



UNIVERSIDAD DE BURGOS
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
Grado en Ingeniería Informática



TFG del Grado en Ingeniería Informática

Sistema de Navegación Semiautónomo en Interiores



Presentado por Mario Bartolomé Manovel
en Universidad de Burgos — 25 de marzo de 2018

Tutores: Dr. Alejandro Merino Gómez
Dr. César Ignacio García Osorio
Dr. José Francisco Díez Pastor



UNIVERSIDAD DE BURGOS
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
Grado en Ingeniería Informática



D. Dr. Alejandro Merino Gómez, profesor del departamento de Ingeniería Electromecánica, área de Ingeniería de Sistemas y Automática. D. Dr. César Ignacio García Osorio y D. Dr. José Francisco Díez Pastor, profesores del departamento de Ingeniería Civil, área de Lenguajes y Sistemas Informáticos.

Exponen:

Que el alumno D. Mario Bartolomé Manovel, con DNI 71298657Z, ha realizado el Trabajo final de Grado en Ingeniería Informática titulado «Sistema de Navegación Semiautónomo en Interiores».

Y que dicho trabajo ha sido realizado por el alumno bajo la dirección del que suscribe, en virtud de lo cual se autoriza su presentación y defensa.

En Burgos, 25 de marzo de 2018

Vº. Bº. del Tutor:

Vº. Bº. del Tutor:

Vº. Bº. del Tutor:

D. Dr. Alejandro
Merino Gómez

D. Dr. César Ignacio
García Osorio

D. Dr. José Francisco
Díez Pastor

Resumen

El objetivo del proyecto es diseñar un sistema de navegación semi-autónomo en espacios cerrados, destinado a la asistencia en vigilancia de seguridad mediante drones. Dada una estancia, el drone deberá ser capaz de realizar un recorrido por el interior, grabando vídeo que será emitido a un servidor, y transmitiendo su posición dentro del mapa a un responsable de seguridad.

Descriptores

drone, UAV, semi-autónomo, semi-automático, vigilancia, navegación, interior, vídeo, filtro de partículas, campos potenciales, búsqueda de ruta, MSP, raspberry pi

Abstract

The point of this project is to design a semi-autonomous navigation system in enclosed spaces, destined to aid security vigilance using drones. Given an enclosed space, the drone should be able to make its path through it, recording video which will be streamed to a server, and updating its position inside of it to the security guard in charge.

Keywords

drone, UAV, semi-autonomous, semi-automatic, vigilance, navigation, indoor, video, particle filter, potential fields, path searching, MSP, raspberry pi

Índice general

Índice general	III
Índice de figuras	IV
Índice de tablas	V
Introducción	1
Objetivos del proyecto	3
Conceptos teóricos	5
3.1. Algoritmia	5
3.2. Dispositivos Físicos	14
3.3. Protocolos	19
3.4. Referencias	24
3.5. Imágenes	24
3.6. Listas de items	25
3.7. Tablas	25
Técnicas y herramientas	27
Aspectos relevantes del desarrollo del proyecto	29
Trabajos relacionados	31
Conclusiones y Líneas de trabajo futuras	33

Índice de figuras

3.1. Gradiente de Potencial de Atracción.	7
3.2. Gradiente de Potencial de Repulsión.	8
3.3. Mínimo local en zonas convexas.	9
3.4. Movimiento oscilatorio en corredores estrechos.	10
3.5. Distribución Histográfica de Probabilidades	12
3.6. Angulos relativos a la central del drone	13
3.7. Raspberry Pi 3.	15
3.8. Benchmark de lector microSD OC.	16
3.9. Controladora de Vuelo Flip32.	17
3.10. Modulación en Ancho de Pulso. Arriba 100 % del ciclo usado. Centro 25 % del ciclo usado. Abajo 50 % del ciclo usado	19
3.11. Composición de un mensaje MSP	20
3.12. Autómata para una expresión vacía	24

Índice de tablas

3.1. Componentes de una Raspberry Pi 3 Model B	14
3.2. Mensajes MSP. Estructura de datos y representación	22
3.3. Nomenclatura del módulo Struct de la implementación 3.5 de Python	22
3.4. Herramientas y tecnologías utilizadas en cada parte del proyecto .	26

Introducción

En este documento se encuentra toda la información relacionada con el Trabajo de Fin de Grado titulado *Sistema de Navegación Semiautónomo en Interiores*.

En él se puede encontrar la siguiente información:

- **Conceptos teóricos:** Ofrecen una base teórica de la que partir, para llevar a cabo el desarrollo completo del proyecto.
- **Técnicas y herramientas:** Se trata de las implementaciones de, ó uso dado a, los distintos conceptos teóricos anteriormente descritos.
- **Aspectos relevantes del desarrollo del proyecto:** Proporciona información detallada que se ha tenido en cuenta durante las diferentes fases de desarrollo del proyecto.
- **Trabajos relacionados:** Se trata de una lista, junto con una breve descripción, de los diferentes proyectos, papers o trabajos relacionados con el proyecto llevado a cabo.
- **Conclusiones y líneas de trabajo futuras:** Detalla una serie de posibles mejoras, modificaciones e incluso derivaciones, que pueden surgir del proyecto realizado.

Objetivos del proyecto

Este apartado explica de forma precisa y concisa cuales son los objetivos que se persiguen con la realización del proyecto. Se puede distinguir entre los objetivos marcados por los requisitos del software a construir y los objetivos de carácter técnico que plantea a la hora de llevar a la práctica el proyecto.

Conceptos teóricos

Esta sección auna los diferentes conocimientos teóricos necesarios para la realización del proyecto. A continuación, y en este orden, se explicarán los algoritmos utilizados, protocolos de comunicación y sistemas físicos empleados.

3.1. Algoritmia

Filtros de Partículas

Los Filtros de Partículas son modelos utilizados para tratar de estimar el estado de un sistema que cambia con el tiempo.

Fue definido como *bootstrap filter* en 1993 por N. Gordon, D. Salmond y A. Smith. Se trata de un método que pretende implementar filtros bayesianos recursivos, haciendo uso del método de Montecarlo, es decir, realiza repetidas medidas del estado para estimar la posición del sistema.

Campos Potenciales

A la hora de lograr una navegación segura en un entorno determinado, es necesario implementar un sistema de evasión de obstáculos.

Introducido por Oussama Khatib en 1986, el algoritmo de Campos Potenciales aporta una manera de evitar colisionar con los diferentes obstáculos existentes. Se basa en la idea de que el agente se mueve en un campo de fuerzas. La posición que debe alcanzar, su meta o destino, se presenta como una fuerza de atracción, y los obstáculos como fuerzas repulsivas. Los diferentes vectores fuerza, determinan la dirección y magnitud de la fuerza atrayente o repulsora. Sea q la posición actual del agente, considerada como una partícula moviéndose en un espacio n -dimensional R^n . Por simplicidad, se considera la posición como una tupla, esto es, bidimensional, tal que $q = (x, y)$. El campo potencial en el que se encuentra el agente se una función escalar $U(q) : R^2 \rightarrow R$, generado

por la superposición de los campos atrayentes U_{att} y repulsores U_{rep} :

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q) \quad (1)$$

Por supuesto, la suma de todos los campos repulsores U_{rep} generan un vector repulsor, que sumado al de atracción puede determinar la necesidad de acercarse o alejarse de una determinada zona:

$$U(q) = U_{att}(q) + \sum_i U_{rep_i}(q) \quad (2)$$

Donde U_{rep_i} representa el campo potencial generado por un obstáculo i .

Suponiendo que $U(q)$ es diferenciable, en cada punto q , el campo potencial $\nabla(q)$ es un vector que apunta en la dirección que, **localmente**, incrementa $U(q)$.

De esta forma, si el potencial de atracción en la meta se considera 0 y a medida que el agente se distancia de ella, se incrementa, se puede establecer, teniendo en cuenta el potencial de repulsión producido por los diferentes obstáculos, un vector $F(q)$ cuya dirección apunta hacia donde se reduce el potencial U , y su magnitud establece la velocidad con que este se reduce:

$$F(q) = F_{att}(q) + F_{rep}(q) = -\nabla U_{att}(q) - \nabla U_{rep}(q) \quad (3)$$

El potencial de atracción $U_{att}(q)$ se establece como una función cuadrática proporcional a la distancia a la meta. De esta forma crece exponencialmente a medida que el agente se aleja de su destino, y se reduce considerablemente en su cercanía. Así puede ser utilizado como fuente de información para establecer la velocidad de aproximación al objetivo, de forma que el agente no sobreactúe:

$$U_{att}(q) = \epsilon * \delta_{meta}(q)^2 \quad (4)$$

Donde δ es la distancia euclidiana desde la posición del agente q a la meta $meta$, y ϵ es un factor de escalado positivo, que puede utilizarse para ajustar la influencia de la distancia en la velocidad del agente. Y su gradiente negativo:

$$-\nabla U_{att}(q) = -\epsilon * (q - q_{meta}) \quad (5)$$

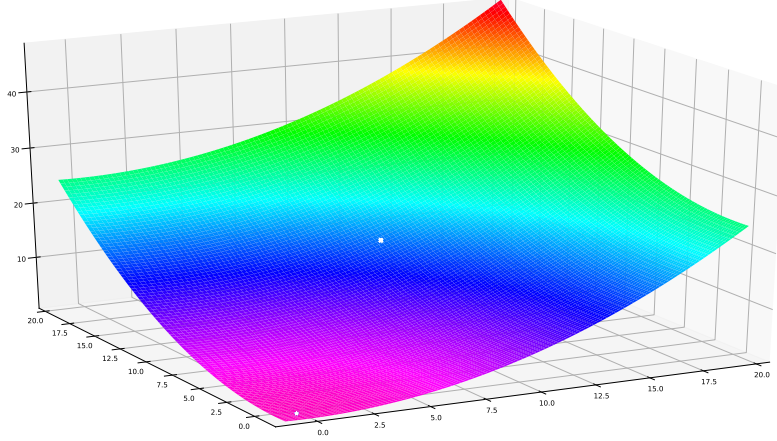


Figura 3.1: Gradiente de Potencial de Atracción.

En la figura 3.1 se ha establecido el agente en el punto (10, 12) y la meta en (0, 0). Puede verse el efecto del gradiente aplicado.

El potencial de repulsión $U_{rep}(q)$ lo establecen los obstáculos detectados por los sensores del agente. Si se establece una función proporcional a la distancia del agente a los obstáculos, el potencial repulsor crece en la cercanía a estos, y decrece con la distancia. De esta forma un obstáculo lejano al agente no debería presentar ninguna fuerza sobre él:

$$U_{rep}(q) = U = \begin{cases} 0 & \text{si } \delta > \rho \\ \eta * (\frac{1}{\delta_{obs}(q)} - \frac{1}{\rho})^2 & \text{si } \delta \leq \rho; \delta \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Donde η es un factor de escalado positivo, que permite establecer como de fuerte se ve afectado el agente por el campo repulsor, δ es la distancia euclidiana desde la posición del agente q al obstáculo obs , y ρ es un factor de escalado positivo, que permite establecer la distancia de influencia de forma proporcional. Y su gradiente

$$-\nabla U_{rep}(q) = \begin{cases} 0 & \text{si } \delta > \rho \\ \eta * (\frac{1}{\delta_{obs}(q)} - \frac{1}{\rho}) * \frac{1}{\delta_{obs}(q)^2} \frac{q - q_{obs}}{\delta_{obs}(q)} & \text{si } \delta \leq \rho; \delta \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

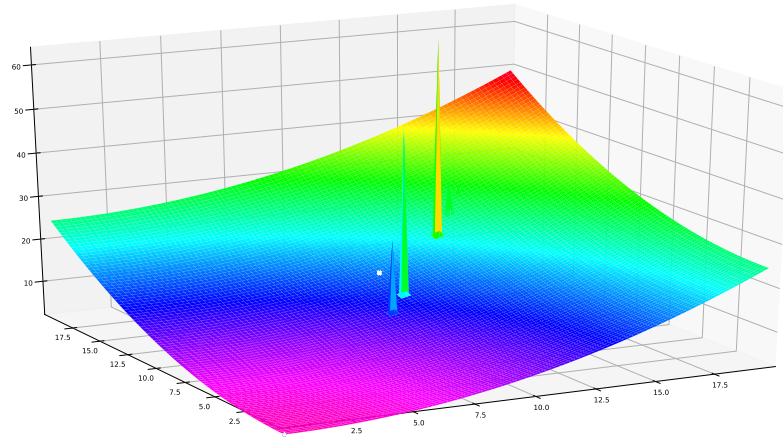


Figura 3.2: Gradiente de Potencial de Repulsión.

En la figura 3.2 se ha creado una serie de obstáculos artificialmente para ilustrar el comportamiento del algoritmo.

Desventajas

El algoritmo de campos potenciales se puede llevar a cabo con una implementación simple y eficiente haciendo uso de Numpy, dado que se puede crear una representación matricial del plano en que se desplaza el agente, que contenga los diferentes potenciales en cada posición. Esto hace sencillo realizar cálculo vectorizado sobre las matrices.

Sin embargo, tiene ciertas desventajas que lo han hecho, cuanto menos, inútil para las necesidades de este proyecto:

- Es un algoritmo basado en descenso de gradiente, y como tal puede quedar *atascado* en mínimos locales. Estos mínimos pueden encontrarse en zonas que contengan obstáculos en forma cóncava o de caja abierta, tal como se ilustra en la figura 3.3.

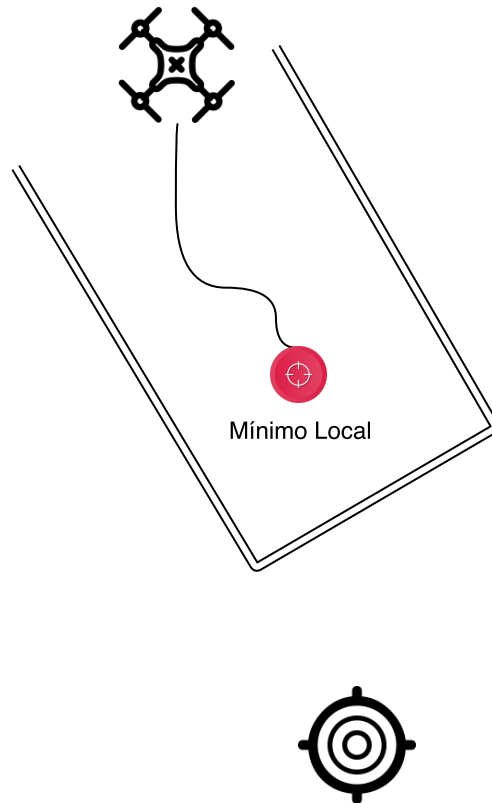


Figura 3.3: Mínimo local en zonas convexas.

- De encontrarse en un espacio con forma de corredor o pasillo, cualquier acercamiento hacia las paredes ocasionará una corrección en el sentido opuesto al campo repulsor, lo cual puede ocasionar un movimiento oscila-

torio si dicha corrección supone aproximar el agente a la pared opuesta, tal y como se ilustra en la figura 3.4.

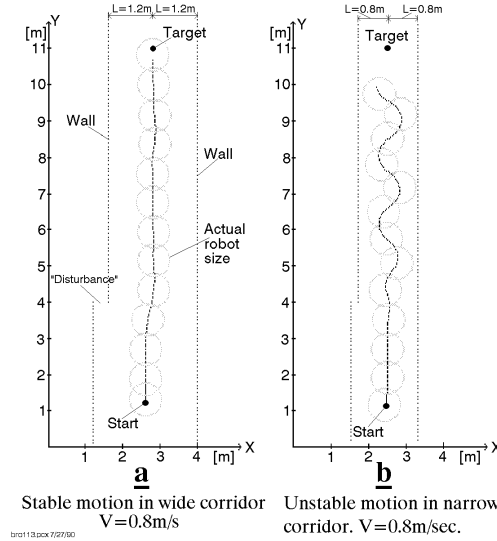


Figura 3.4: Movimiento oscilatorio en corredores estrechos.

- Alta complejidad computacional pese a poder modelarse como calculo vectorizado, requiere de muchas más operaciones que otros métodos más avanzados.
- No funciona correctamente con agentes que se desplazan a alta velocidad.
- Al realizar la adición de todos los campos potenciales, tanto repulsores como atrayente, se produce una gran pérdida de información sobre la distribución local de los obstáculos.

Por estos motivos, se ha desechado el algoritmo de Campos Potenciales como sistema de evasión de obstáculos, y se ha pasado a un modelo más avanzado basado en un plano cartesiano, conocido como *Vector Field Histogram* y detallado en el apartado **Vector Field Histogram**.

Vector Field Histogram

El Vector Field Histogram, o Histograma de Campos Vectoriales, *VFH* de aquí en adelante, fue introducido por Borenstein y Korem en el año 1991. Permite la detección de obstáculos y su evasión mediante el control de la dirección y velocidad del agente en tiempo real.

Para ello realiza una representación del entorno del agente en forma de histograma. Dicho entorno, llamado *Región Activa C** se representa como una *ventana* que se desplaza con el agente en el centro. Se trata un algoritmo de búsqueda local, sin embargo se ha mostrado que suele producir rutas cercanas al óptimo, aunque en el caso de este proyecto no es relevante, dado que la intención es que se exploren todas las zonas del entorno.

Es un algoritmo más robusto, dado que presenta cierta insensibilidad a lecturas erróneas, y eficiente que el algoritmo de Campos Potenciales explicado en 3.1.

Se compone de tres partes:

1. Red Cartesiana de Histogramas: Se construye un plano cartesiano representando el entorno cercano del agente. Por *cercano*, se entiende una distancia que los sensores de distancia puedan abarcar, dado que no tendría sentido tratar de computar zonas inalcanzables en un momento determinado. Dicho plano será representado como un histograma, y de ahí su nombre habitual *Cartesian Histogram Grid*.
2. Histograma Polar: Una representación unidimensional, obtenida a partir de una reducción de la Red Cartesiana definida en el punto anterior. Se compone de n sectores angulares, de anchura α , de forma que $n * \alpha = 360$; $n \in \mathbb{Z}$. Dichos sectores k contienen un valor h_k que representa la densidad de obstáculos, *Polar Obstacle Density* o *POD* de aquí en adelante, contenida en él.
3. Capa de salida: Representa el resultado del algoritmo. A partir del POD, se obtienen los posibles *valles*¹ candidatos existentes entre obstáculos, y se elige el que más se aproxime a la dirección de la meta establecida. Finalmente, entrega los valores de cambio de dirección necesario en cada momento.

Cartesian Histogram Grid

Se modela el espacio cercano al drone en forma de malla. En cada celda (i, j) de esa malla se encuentra un valor $c_{i,j} \in \mathbb{Z}$ que establece la certeza de la existencia de un obstáculo. La cantidad de celdas existentes en la malla

¹ Así denominados por su representación en forma de histograma

se establece en función de los límites del sensor, y teniendo en cuenta que es necesario establecer una precisión c , i.e: Si se dispone de un sensor con un rango de medidas de hasta 400cm se puede crear una malla de 80x80, suponiendo que cada celda tenga un tamaño de $c = 5$, $5 \times 5 \text{cm}$. De esta forma se consigue una precisión de $\pm 5 \text{cm}$

Dicho valor se obtiene de la lectura proporcionada por el sensor de distancia, en este caso un sonar, y se establece en el centro del ángulo de barrido del sonar, ver ???. La eficiencia superior de este algoritmo se basa precisamente en incrementar el valor $c_{i,j}$ de únicamente una celda con cada medida. Dicha celda (i, j) se encuentra a una distancia de $R = \frac{\delta_{obs} q}{c}$ celdas y en la bisectriz del ángulo barrido por el sonar. Si bien esta solución puede parecer una simplificación del problema, se llega a generar una distribución probabilística tomando múltiples medidas de forma continua mientras el agente se desplaza por el entorno. Por tanto, la misma celda, cercana a un obstáculo, y sus vecinas serán incrementadas repetidas veces, tal y como se muestra en la figura 3.5

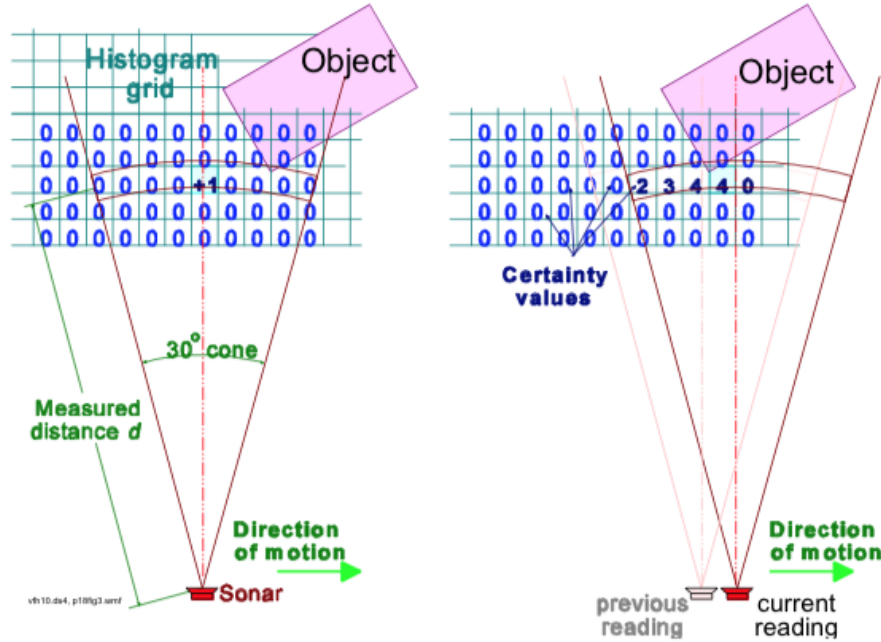


Figura 3.5: Distribución Histográfica de Probabilidades

Polar Histogram

A partir de las medidas obtenidas en el Histogram Grid, se realiza la primera reducción de información para construir un Histograma Polar. Para ello, los contenidos de la región activa C^* son tratados como un *vector de obstáculos* cuya dirección está definida por la dirección β de la celda en cuestión

al centro del agente VCP^2 , y que viene definida por la función:

$$\beta_{i,j} = \tan^{-1} \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \quad (8)$$

La ecuación 8 devuelve un valor $\beta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]rad$. Al hacer uso de Numpy, es sencillo calcular los ángulos en los que se encuentra cada celda de la región activa C^* con respecto al agente que se encuentra en su centro, de forma vectorizada. Tal y como puede verse en la figura 3.6


-135			-90			-45
	-135		-90		-45	
		-135	-90	-45		
±180	±180	±180		0	0	0
		135	90	45		
	135		90		45	
135			90			45

Figura 3.6: Ángulos relativos a la central del drone

Nótese que para llevar a cabo la obtención de estos ángulos **no** se ha hecho uso de la función *arctan* disponible en Numpy, dado que esta devuelve valores, en radianes, pertenecientes al 1º y 4º cuadrante únicamente. En su lugar, se ha utilizado la función *arctan2*, que tiene en cuenta el signo de las componentes del vector dirección $[y_i - y_0, x_i - x_0]$ resultante. De forma que devuelve el

²El VCP o *Vehicle Center Point* se define como el centro geométrico del vehículo. En nuestro caso, al tratarse de un drone, se considera el centro del mismo como VCP

ángulo de giro, sea en sentido horario (valores positivos) o antihorario (valores negativos), más corto posible.³

3.2. Dispositivos Físicos

Raspberry Pi

Componente	Raspberry Pi 3B
CPU	BCM2837
Núcleos	4
Velocidad	1.2GHz
RAM	1GB
Coms	Ethernet, WiFi, Bluetooth
USB	4 (2.0)
GPIO	40
Consumo máximo	6.7W

Tabla 3.1: Componentes de una Raspberry Pi 3 Model B

Una Raspberry Pi es un pequeño ordenador desarrollado en UK por la Raspberry Pi Foundation, con la intención de promover el aprendizaje de informática básica en colegios y países en desarrollo. El modelo base se compone de una única placa de medidas 85mm x 56mm (LxA), y unos 42g de peso.

Concretamente el modelo empleado es una Raspberry Pi 3B, y consta de los componentes detallados en la tabla 3.1

Su reducido tamaño y bajo consumo lo hacen ideal para este tipo de proyecto. En este caso se utiliza bajo una distribución GNU/Linux llamada Raspbian⁴, basada en Debian. Para tratar de mejorar su rendimiento y reducir al mínimo el consumo, se ha escogido la versión Lite del sistema, es decir, un sistema mínimo sin entorno de escritorio y con la mayor parte de servicios desactivados por defecto.

Una vez descargado el sistema, este ha sido instalado en una micro SD mediante el siguiente procedimiento por consola⁵:

- `diskutil list` Permite localizar el dispositivo en el que se encuentra la tarjeta. En nuestro caso `/dev/disk4`

³Obviamente es lo deseable, no sería eficiente realizar un giro de 225° en el sentido de las agujas del reloj, cuando uno de 135° en el sentido contrario a las agujas del reloj bastaría.

⁴Descargable desde: <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian>

⁵Realizado en OSX, aunque en Linux es muy similar

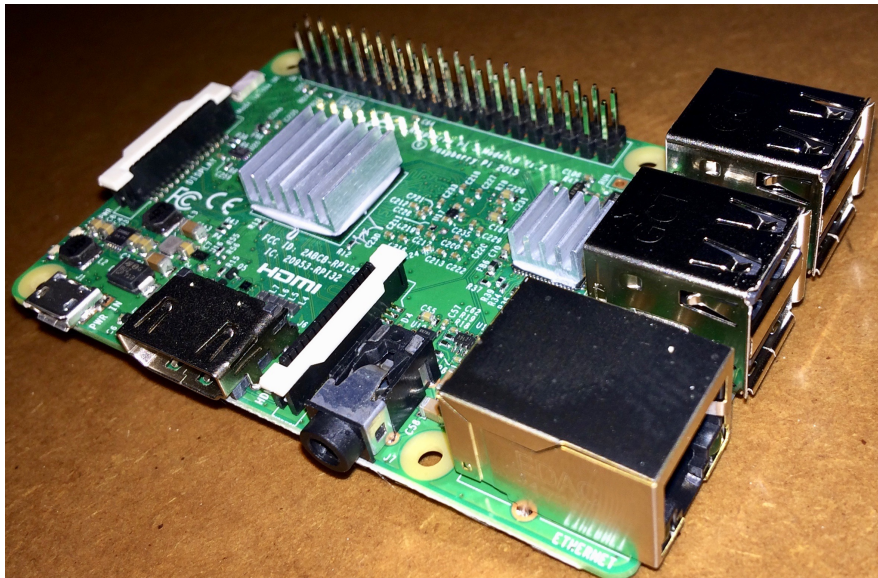


Figura 3.7: Raspberry Pi 3.

- `diskutil umountDisk /dev/disk4` Permite desmontar el volumen.
- `sudo dd if=raspbian-stretch.img of=/dev/rdisk4 bs=1m` El comando `dd` copia la entrada estándar a la salida estándar. Mediante `if/of` se establece el fichero de entrada/salida. Mediante `bs` se establece el tamaño de bloque a copiar. Se está utilizando `/dev/rdisk4` en lugar de `/dev/disk4` debido a la capacidad de OSX de trabajar con dispositivos en bruto, *raw*, de forma que es posible acceder al dispositivo de forma directa⁶, sin almacenar en un buffer la lectura del archivo, proporcionando velocidades de escritura/lectura hasta 20 veces más rápidas.

Una vez realizados estos pasos, se puede insertar la microSD en la Raspberry Pi. Para encenderla basta con utilizar el puerto micro-usb de que dispone. La Raspberry Pi 3 requiere de una fuente de alimentación capaz de proporcionar 2,5A⁷ para funcionar al máximo nivel de estrés para el procesador y alimentar dispositivos USB.

Sin embargo, este no es estrictamente nuestro caso, véase el apartado **Modificaciones**. Se requiere un dispositivo cuyo consumo sea lo más reducido posible, pero que sea rápido en la ejecución, y que muestre poca latencia en operaciones de `IO`, que es donde se encuentra el cuello de botella.

⁶Véase `man hdiutil`, sección *DEVICE SPECIAL FILES*

⁷Véase <https://www.raspberrypi.org/help/faqs/#power>

```

CONFIG:
CLOCK : 100.000 MHz
CORE  : 400 MHz, turbo=0
DATA  : 512 MB, /root/test.dat

HDPARM:
=====
Timing 0_DIRECT disk reads: 108 MB in 3.02 seconds = 35.78 MB/sec
Timing 0_DIRECT disk reads: 108 MB in 3.02 seconds = 35.72 MB/sec
Timing 0_DIRECT disk reads: 108 MB in 3.02 seconds = 35.75 MB/sec

WRITE:
=====
536870912 bytes (537 MB, 512 MiB) copied, 21.7232 s, 24.7 MB/s
536870912 bytes (537 MB, 512 MiB) copied, 20.7831 s, 25.8 MB/s
536870912 bytes (537 MB, 512 MiB) copied, 21.6338 s, 24.8 MB/s

READ:
=====
536870912 bytes (537 MB, 512 MiB) copied, 14.3944 s, 37.3 MB/s
536870912 bytes (537 MB, 512 MiB) copied, 14.3785 s, 37.3 MB/s
536870912 bytes (537 MB, 512 MiB) copied, 14.3567 s, 37.4 MB/s

```

Figura 3.8: Benchmark de lector microSD OC.

Una vez encendida, se accede a ella con el usuario por defecto `pi` y la contraseña por defecto `raspberrypi`. Obviamente ambas **han sido cambiadas** por motivos de seguridad.

Modificaciones

- Se ha desactivado el puerto HDMI para reducir el consumo en ~30mA:
Para ello se ha incluido en `/etc/rc.local` la línea `/usr/bin/tvservice -o`.
- Se ha overcloveado el lector de microSD a 100MHz, en lugar de los 50MHz por defecto:
Para ello se ha incluido en `/boot/config.txt` la línea `dtoverlay=sd_overclock=100`.
Y que arroja los resultados mostrados en la imagen 3.8
- Se han incluido una serie de disipadores para evitar sobrecalentamiento de la placa. Así como un pequeño ventilador de bajo consumo.

Controladora de Vuelo

Una controladora de vuelo (*FC* de aquí en adelante) es un pequeño circuito integrado, que contiene un procesador, una serie de sensores, y una serie de entradas y salidas. La FC se encarga de mantener el sistema de estabilización del drone, tomando medidas de los sensores de que dispone, tales como un acelerómetro, giroscopio, magnetómetro, barómetro... etc.

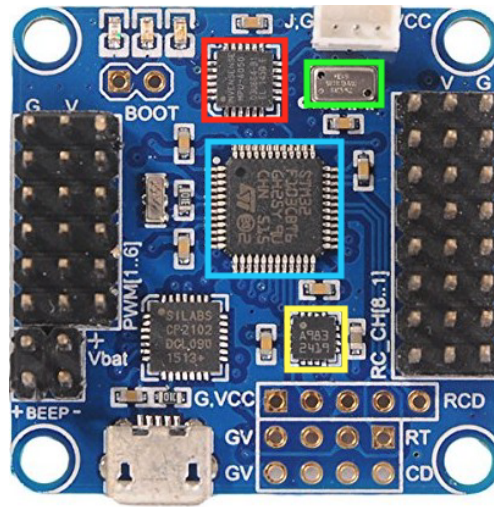


Figura 3.9: Controladora de Vuelo Flip32.

En el caso de la FC usada para este proyecto, llamada Flip32 y mostrada en la imagen 3.9, se dispone de un IC MPU-6050, en rojo, con acelerómetro y giroscopio, así como de un barómetro M55611, en verde, y un magnetómetro HMC5883L, en amarillo. El núcleo de esta pequeña placa es un procesador STM32F103, en cyan, a 72MHz y basado en arquitectura ARM el cual dispone de dos puertos serie, que permiten establecer comunicación entre la FC y otros dispositivos, como emisoras u otros sensores.

El puerto micro-USB de que dispone es utilizado para establecer comunicación entre el configurador de opciones del drone, o en el caso de nuestro proyecto, para hacer uso del [MultiWii Serial Protocol](#).

Entradas

En el lado derecho de la imagen 3.9 pueden verse una serie de pines que actúan como 8 canales de entrada desde el receptor de radio. Dichos canales de entrada, por defecto, reciben una señal modulada en ancho de pulso o **PWM**

Salidas

En el lado izquierdo de la imagen 3.9, pueden verse otros pines que actúan como salida de señal hacia los controladores de velocidad de los motores del drone (ESC o *Electronic Speed Controller*). Estos pines de salida, emiten una señal que será interpretada por los ESC del drone, para determinar la frecuencia dada al voltaje que alimenta los motores. En el caso de nuestro proyecto, los ESC disponibles reciben una señal PWM, al igual que la FC desde un receptor de radio.

Sensores

La controladora de vuelo Flip32 en su versión más completa, dispone de los siguientes sensores:

- IMU⁸ MPU-6050: Se trata de un circuito integrado compuesto de un acelerómetro de tres (3) ejes y un giroscopio de tres (3) ejes. El acelerómetro mide las fuerzas en los tres diferentes ejes (en g), el giroscopio se encarga de medir la velocidad angular en cada uno de los tres ejes (en $\text{deg}^\circ/\text{s}$)
- Magnetómetro HMC5883L: Se trata de un pequeño magnetómetro digital capaz de medir el campo magnético terrestre (en Gauss). Se debe tener en cuenta que según la posición en el planeta, el campo magnético varía entre $G0,25$ - $G0,65$, así como la declinación magnética de la zona en la que se realiza la medición.⁹
- Barómetro M55611: Se trata de un altímetro de alta precisión, con resoluciones de hasta 10cm, que funciona midiendo la presión atmosférica (en milibar). Hay que tener en cuenta que los cambios de presión, como los generados por las hélices del drone, hacen variar la medida del sensor. Por ello, en el caso de usarlo, se cubre con un pequeño filtro de un material absorbente, lo suficientemente denso como para evitar el contacto directo entre una corriente de aire y el sensor.

⁸Unidad de Medición Inercial.

⁹Disponible en: <http://magnetic-declination.com/>

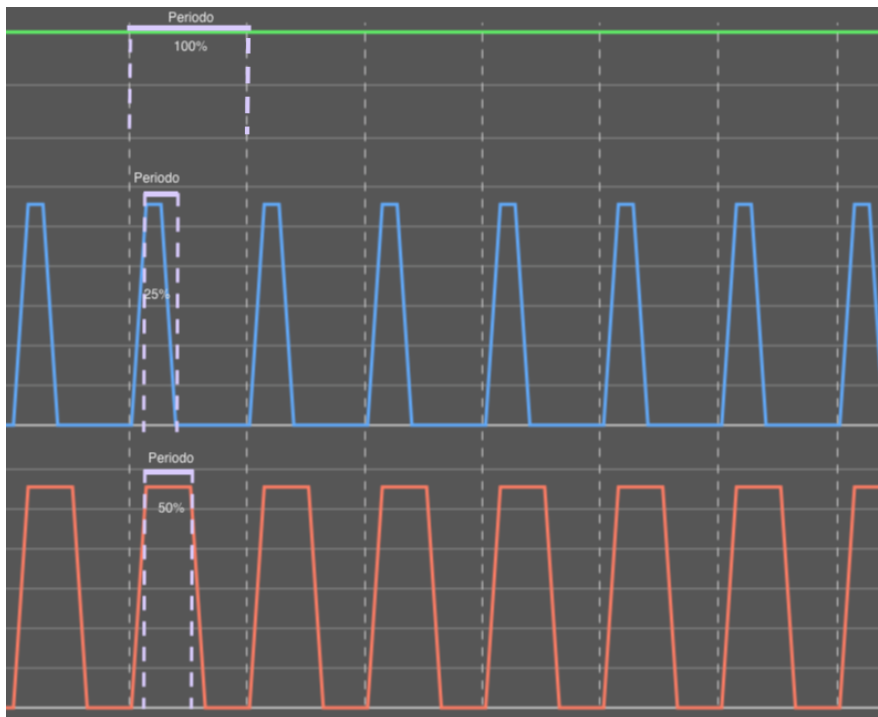


Figura 3.10: Modulación en Ancho de Pulso. Arriba 100 % del ciclo usado. Centro 25 % del ciclo usado. Abajo 50 % del ciclo usado

3.3. Protocolos

Pulse Width Modulation

La modulación por ancho de pulso, se basa en medir el transcurso de tiempo entre el flanco de subida de una señal, y el flanco de bajada, tal y como puede verse en la imagen 3.10. En este contexto, un receptor de radio recibe una señal de la emisora, y genera una señal PWM acorde que será transmitida a la FC. Estas son capaces de entender señales de entre 1000 y 2000 μ s. Cualquier valor por debajo, o por encima, haría entrar la controladora en FailSafe¹⁰. En el caso de este proyecto, se ha determinado que no se hará uso de este protocolo para la comunicación entre la Raspberry Pi y la controladora de vuelo, véase ?? y 3.3, y por lo tanto el uso de estos pines queda descartado.

Sin embargo, la comunicación entre la FC y los ESC se realiza mediante este tipo de señal, por ello se ha considerado relevante explicar, brevemente, su funcionamiento.

¹⁰Al recibir una señal inválida por parte del receptor, la controladora de vuelo puede ser configurada para desactivar el drone, mantener la última medida buena conocida, intentar aterrizar... etc. Este modo es conocido como FailSafe

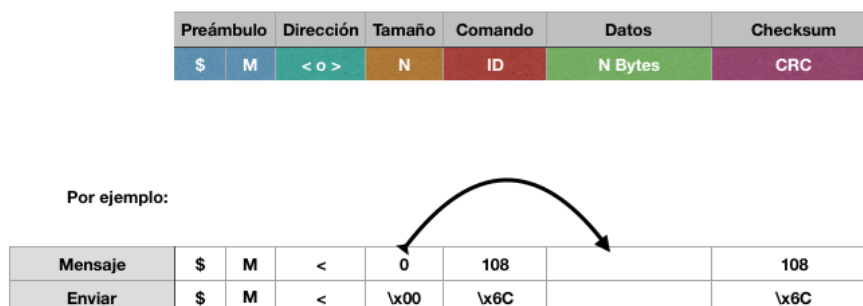


Figura 3.11: Composición de un mensaje MSP

MultiWii Serial Protocol

MultiWii es un software de control de multirrotores y está basado en componentes de la Nintendo Wii. Concretamente, los mandos de control de la consola de Nintendo poseen tres acelerómetros para determinar la posición angular y medir aceleraciones laterales. El problema es que los acelerómetros no son precisos para variaciones pequeñas, de forma que Nintendo creó un complemento que se podía conectar al propio mando, el Wii Motion Plus, que dispone de tres giroscopios, de forma que unidos a los tres acelerómetros iniciales, proporcionan una medición mucho más precisa de la posición del mando.

A los primeros creadores del sistema de control MultiWii se les ocurrió la posibilidad de hacer uso de estos sensores para crear un sistema de control de drones. Uniendo estos sensores a un controlador, en principio se trató de un Arduino Mini, y programándolo para tal efecto, se logra crear una FC algo rudimentaria, pero que da muy buenos resultados.

Para crear un entorno amigable para el usuario común, se desarrolló una aplicación de escritorio capaz de configurar los parámetros de esta controladora de vuelo poco convencional. De alguna forma debía lograrse una comunicación entre la FC y la aplicación, y así se implementó MultiWii Serial Protocol. Conocido como *MSP*, se trata de un protocolo que se ha mantenido en diferentes implementaciones de sistemas de control de vuelo. No solo aquellos basados en sensores de la Nintendo Wii controlados por Arduino, sino en otros más modernos y potentes que han ido surgiendo los últimos años. Como el utilizado en nuestro proyecto.

Es un protocolo eficiente y sencillo, que permite una comunicación rápida y completa. Su composición puede verse en la imagen [3.11](#)

- **Preámbulo:** Se trata de dos caracteres ASCII que determinan el comienzo de un nuevo mensaje. Se compone de un símbolo '\$' y una letra 'M'.

- Dirección: Se trata de un caracter ASCII que determina la dirección del mensaje, **hacia** la controladora '<' o **desde** la controladora '>'.
- Tamaño: Se trata de un byte que determina el tamaño, en bytes, de los datos enviados o recibidos.
- Comando: Se trata de un byte que determina el comando a ejecutar. Véase ?? para una relación de los comandos implementados.
- Datos: Se trata de una serie de bytes, de longitud definida por el byte <tamaño>, que establecen el resto de parámetros a pasar con la función definida por el byte <comando>.
- Checksum: Se trata de un byte de control. Se define su valor mediante la función XOR entre <tamaño>, <comando> y cada byte contenido en <datos>

En el caso de nuestro proyecto, se hará uso de este protocolo dado que existe la posibilidad de establecer la recepción de los canales de radio a través de un puerto serie, así como de solicitar información sobre el estado del dron a la FC. Es decir, en lugar de utilizar un receptor de radio, se utilizará un puerto serie para obtener la telemetría¹¹, y establecer las entradas de los canales de radio. En la tabla 3.2 se dispone de los mensajes implementados para la realización de este proyecto.

La columna *Mensaje* sigue esta nomenclatura por razones históricas, para mantener cierta cohesión con la tabla disponible en la descripción del protocolo MultiWii,[?]. La columna *Código* establece el número de comando enviado. Los comandos que empiezan por 1, se corresponden con solicitudes de información, y aquellos que comienzan por 2 son órdenes. Este valor será utilizado por la FC para establecer el parseo de la información enviada, de ser alguna. La columna *Estructura* establece el tipo y la cantidad de cada dato que se envía o recibe. La columna *Parse* establece el tipo de parser que se aplicará a la respuesta recibida de la FC. Nótese que solo se define el parser para los comandos que comienzan por 1, es decir, para las solicitudes de información. La información del parser proporciona la manera de decodificar la cadena de bytes devuelta por la FC al realizar una solicitud. Para ello se ha seguido la nomenclatura utilizada en el módulo *struct* de Python 3.5, descrita en la tabla 3.3

Los enteros sin signo representados en la tabla 3.3, tienen su equivalencia a enteros con signo mediante el mismo caracter en minúscula.

¹¹Se define telemetría como un sistema de medición de magnitudes a distancia; en este contexto el término se ha desvirtuado y se entiende como la información que es transmitida de vuelta a la emisora de vuelo, siendo esta generalmente información de los sensores de la FC, GPS o voltaje disponible en la batería.

Mensaje	Código	Estructura	Parse	Descripción
MSP_MOTOR	104	8x UINT16	<8H	Devuelve la señal PWM que los ESC envían a los motores.
MSP_RC	105	18x UINT16	<18H	Devuelve la señal PWM disponible en cada canal.
MSP_ATTITUDE	108	3x INT16	<3h	Devuelve las inclinaciones de los ejes X e Y, así como la orientación.
MSP_ANALOG	110	1x UINT8, 3x UINT16	<B3H	Devuelve el estado de los sensores incluidos en la FC: voltaje de la batería, RSSI, corriente instantánea y consumo
MSP_SET_RAW_RC	200	Nx UINT16	N/A	Establece el valor de los canales de radio-control.
MSP_SET_RAW_MOTOR	214	Nx UINT16	N/A	Establece la señal PWM a enviar a los motores.

Tabla 3.2: Mensajes MSP. Estructura de datos y representación

Elemento	Descripción
'<', '>'	Little o Big Endian respectivamente. Establece la ubicación del byte menos significativo, y por lo tanto determina la dirección de lectura de los grupos de bytes de la cadena recibida.
'B'	Caracter utilizado para representar un entero de un byte sin signo.
'H'	Caracter utilizado para representar un entero de dos bytes sin signo.
'c'	Caracter utilizado para representar un caracter de un byte.

Tabla 3.3: Nomenclatura del módulo Struct de la implementación 3.5 de Python

La implementación realizada sigue un paradigma funcional, de forma que la función utilizada para leer las respuestas de la FC puede ser utilizada con nuevas solicitudes de información, con tan solo pasar un nuevo parser en forma de cadena de texto.

Secure SHell

Secure SHell o *SSH* de aquí en adelante, es un protocolo de red cifrado el cual se basa en el uso de claves públicas compartidas para crear un canal de comunicación seguro en una red no segura. Al aceptar una conexión, el servicio SSH presenta una shell sobre la que el cliente puede realizar las operaciones necesarias y propias de su nivel de privilegio. Además proporciona la posibilidad de redirigir el sistema de ventanas remoto al cliente, aunque en este caso se está haciendo uso de una versión reducida del SO, y por lo tanto no presenta entorno de escritorio. El acceso a la Raspberry Pi que controla el drone, se lleva a cabo mediante el uso de este protocolo, siguiendo los siguientes pasos para su configuración:

- Generar el par de claves pública-privada en el cliente mediante el comando `ssh-keygen`
- Copiar la clave pública del cliente en el archivo `.ssh/authorized_keys` de la carpeta `home` del usuario a utilizar en el sistema remoto.
- Editar el archivo `/etc/ssh/sshd_config` para:
 - permitir unicamente acceso a usuarios que envíen una clave pública contenida en `authorized_keys`.
 - desactivar el acceso al usuario root, estableciendo la propiedad `PermitRootLogin` a `no`.
 - desactivar el acceso por contraseña, estableciendo la propiedad `PasswordAuthentication` a `no`.

De esta forma se logra dotar de acceso seguro a un cliente autorizado. Al tratar de conectar al sistema de control del drone, se muestra un banner en el que se advierte a usuarios malintencionados de la existencia de un log de conexiones recibidas. Para tratar de mitigar los intentos más comunes de intrusión en el sistema, algo tan simple como cambiar el puerto en el que responde el servidor SSH, se ha mostrado tremendamente efectivo contra los ataques automatizados más simples y comunes.

3.4. Referencias

Las referencias se incluyen en el texto usando cite [?]. Para citar webs, artículos o libros [?].

3.5. Imágenes

Se pueden incluir imágenes con los comandos standard de \LaTeX , pero esta plantilla dispone de comandos propios como por ejemplo el siguiente:



Figura 3.12: Autómata para una expresión vacía

3.6. Listas de items

Existen tres posibilidades:

- primer item.
- segundo item.

1. primer item.
2. segundo item.

Primer item más información sobre el primer item.

Segundo item más información sobre el segundo item.

▪

3.7. Tablas

Igualmente se pueden usar los comandos específicos de \LaTeX o bien usar alguno de los comandos de la plantilla.

Herramientas	App	AngularJS	API REST	BD	Memoria
HTML5		X			
CSS3		X			
BOOTSTRAP		X			
JavaScript		X			
AngularJS		X			
Bower		X			
PHP			X		
Karma + Jasmine		X			
Slim framework			X		
Idiorm			X		
Composer			X		
JSON		X	X		
PhpStorm		X	X		
MySQL				X	
PhpMyAdmin				X	
Git + BitBucket		X	X	X	X
MikTeX					X
TeXMaker					X
Astah					X
Balsamiq Mockups		X			
VersionOne		X	X	X	X

Tabla 3.4: Herramientas y tecnologías utilizadas en cada parte del proyecto

Técnicas y herramientas

Esta parte de la memoria tiene como objetivo presentar las técnicas metodológicas y las herramientas de desarrollo que se han utilizado para llevar a cabo el proyecto. Si se han estudiado diferentes alternativas de metodologías, herramientas, bibliotecas se puede hacer un resumen de los aspectos más destacados de cada alternativa, incluyendo comparativas entre las distintas opciones y una justificación de las elecciones realizadas. No se pretende que este apartado se convierta en un capítulo de un libro dedicado a cada una de las alternativas, sino comentar los aspectos más destacados de cada opción, con un repaso somero a los fundamentos esenciales y referencias bibliográficas para que el lector pueda ampliar su conocimiento sobre el tema.

Aspectos relevantes del desarrollo del proyecto

Este apartado pretende recoger los aspectos más interesantes del desarrollo del proyecto, comentados por los autores del mismo. Debe incluir desde la exposición del ciclo de vida utilizado, hasta los detalles de mayor relevancia de las fases de análisis, diseño e implementación. Se busca que no sea una mera operación de copiar y pegar diagramas y extractos del código fuente, sino que realmente se justifiquen los caminos de solución que se han tomado, especialmente aquellos que no sean triviales. Puede ser el lugar más adecuado para documentar los aspectos más interesantes del diseño y de la implementación, con un mayor hincapié en aspectos tales como el tipo de arquitectura elegido, los índices de las tablas de la base de datos, normalización y desnormalización, distribución en ficheros³, reglas de negocio dentro de las bases de datos (EDVHV GH GDWRV DFWLYDV), aspectos de desarrollo relacionados con el WWW... Este apartado, debe convertirse en el resumen de la experiencia práctica del proyecto, y por sí mismo justifica que la memoria se convierta en un documento útil, fuente de referencia para los autores, los tutores y futuros alumnos.

Trabajos relacionados

Este apartado sería parecido a un estado del arte de una tesis o tesina. En un trabajo final grado no parece obligada su presencia, aunque se puede dejar a juicio del tutor el incluir un pequeño resumen comentado de los trabajos y proyectos ya realizados en el campo del proyecto en curso.

Conclusiones y Líneas de trabajo futuras

Todo proyecto debe incluir las conclusiones que se derivan de su desarrollo. Éstas pueden ser de diferente índole, dependiendo de la tipología del proyecto, pero normalmente van a estar presentes un conjunto de conclusiones relacionadas con los resultados del proyecto y un conjunto de conclusiones técnicas. Además, resulta muy útil realizar un informe crítico indicando cómo se puede mejorar el proyecto, o cómo se puede continuar trabajando en la línea del proyecto realizado.