



**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA  
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

**MEMORIA**

**ROBOT INSPECCIÓN DE TUBERÍAS**

**[Identificador\_TFG:424.15.7]**

Autor: Oscar Latorre Moreno

Director: Javier Esteban Escaño

Fecha: Junio 2016



# INDICE DE CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>ABSTRACT</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>4.</b>	<b>ESTADO DEL ARTE</b>	<b>5</b>
4.1.	ANTECEDENTES	5
4.1.1.	TUBERIAS DE PVC	5
4.1.2.	TUBERIAS DE AGUA POTABLE	7
4.1.3.	REDES DE ALCANTARILLADO	8
4.1.4.	TUBERÍAS CON RESIDUOS RADIACTIVOS	9
4.1.5.	TUBERIAS METALICAS FERROSAS	11
4.1.6.	TUBERIAS SUBMARINAS Y VERTICALES	13
4.1.7.	ESTRUCTURAS CILINDRICAS DE INSPECCIÓN DE TUBERIAS	14
4.1.8.	INSPECCIÓN DE CONDUCTOS	15
4.1.9.	TUBERIAS DE GAS	16
4.2.	MARCO TEÓRICO	18
4.2.1.	DESPLAZAMIENTO DEL ROBOT	18
4.2.2.	COMUNICACIÓN	27
4.2.3.	CONJUNTO SENSORES	36
<b>5.</b>	<b>DESARROLLO</b>	<b>50</b>
5.1.	DISEÑO MECÁNICO	50
5.1.1.	DISEÑO DEL CUERPO CENTRAL	50
5.1.2.	EXTREMIDADES DEL ROBOT	52
5.1.3.	CÁLCULOS DE LOS MOTORES	59
5.1.4.	FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	65
5.2.	DISEÑO ELECTRÓNICO	75
5.2.1.	LISTADO DE COMPONENTES	75
5.2.2.	CÁLCULO DE LA BATERÍA	89
5.2.3.	ESQUEMA ELECTRICO	93

5.3.	PROGRAMACIÓN	103
5.3.1.	DISEÑO INTERFAZ DE USUARIO	106
5.3.2.	DISEÑO DE FUNCIONES	110
6.	CONCLUSIONES	113
6.1.	TRABAJOS FUTUROS	114
7.	BIBLIOGRAFÍA	115

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura1,	Robot iPEK ROVVER, obtenida de Panatec.	6
Figura2,	Robot iPEK ROVVER, obtenida de Panatec	6
Figura3	Robot iPEK ROVION, obtenida de Panatec	7
Figura4	proyecto TRACTO, obtenida de: Sintef.	7
Figura5	Versatrax 100, obtenida de Inuktun.	8
Figura6	Versatrax 150, obtenida de Inuktun.	8
Figura7	Versatrax 300, obtenida de Inuktun.	9
Figura8	Versatrax 450, obtenida de Inuktun.	10
Figura9	robot final obtenida de coroflot.	10
Figura10	en funcionamiento, obtenida de coroflot.	11
Figura11	Versatrax 100 MicroMag™ obtenida de Inuktun.	11
Figura12	Versatrax 100 MicroMag™ obtenida de Inuktun.	12
Figura13	NanoMag, obtenida de Inuktun	12
Figura14	NanoMag, obtenida de Inuktun	12
Figura15	Versatrax MicroClimber, obtenida de Inuktun.	13
Figura16	Versatrax MicroClimber, obtenida de Inuktun.	13
Figura17	Versatrax MicroClimber, obtenida de Inuktun.	14

Figura18 Versatrax MicroClimber, obtenida de Inuktun. ....	14
Figura19 Eventronic IBOT3, obtenido de Eventronic .....	15
Figura20 distintos terrenos de funcionamiento del VGTV, obtenida de Inuktun. 16	
Figura21 Micro-Magnetic Cased Pipe Inspection Crawler, obtenida de ULC .....	17
Figura22 imágenes tomadas por Micro-Magnetic Cased Pipe Inspection Crawler, obtenida de ULC. ....	17
Figura23 Mecanismo tijera, obtenida de Unioviedo .....	19
Figura24 Robot PAROYS II y robot FAMPER, imágenes tomadas de diseño y desarrollo de un ro-bot de inspección de tuberías, María Alejandra Urdaneta Lima. ....	19
Figura25 Robot PAROYS II y robot FAMPER, imágenes tomadas de diseño y desarrollo de un ro-bot de inspección de tuberías, María Alejandra Urdaneta Lima. ....	20
Figura26 Motor paso a paso de reluctancia variable, obtenida de Few Words About Stepper Motor   EEP.....	21
Figura27 Motor paso a paso de imanes permanentes, obtenida de Few Words About Stepper Motor   EEP .....	22
Figura28 Motor paso a paso híbrido, obtenida de Few Words About Stepper Motor   EEP .....	22
Figura29 Corrientes de las fases en modo completo y dos señales de referencia necesarias en modo microstepping, obtenida de pfinalfra. ....	23
Figura30 Diagrama fasorial, obtenida de pfinalfra. ....	24
Figura31 motor DC, obtenida de Tema 4. Motores eléctricos de Corriente Continua (c.c.) .....	25
Figura32 motor Brushless, obtenida de motores brushless. ....	26
Figura33 red wifi, obtenida de Consumer. ....	28
Figura34 red "Piconet", obtenida de CCM. ....	29
Figura35 Cable coaxial, obtenida de CCM .....	30
Figura36 espectro radiofrecuencia, obtenida de e-ducativa. ....	32
Figura37 Teorema de Nyquist y fenómeno Aliasing .....	33

Figura38 Reutilización del espectro de radio de las redes de radio celular, obtenida de Introducción a las telecomunicaciones modernas.....	36
Figure 39 Camera module Raspberry PI, obtenida de Raspberry .....	37
Figura40 Odometría, obtenida de ("Modelo odométrico diferencial de robots móviles," 2015.).....	38
Figura41 Encoder incremental, obtenida de Apuntes Robótica 2015. ....	39
Figura42 Encoder absoluto, obtenida de Apuntes Robótica 2015 .....	40
Figura43 batería de Li-Po, obtenida de Erle Robotics. ....	42
Figura44 , batería Ni-Cd 6V, 500mah, obtenida de ("Bateria Ni-cd Aa 6v De 500mah Produto No-vo - R\$ 40,00," 2009.).....	43
Figura45 batería Ni-Mh 4,8V, 2500mA, obtenida de ("Bateria Ni-Mh 4.8V 2500mA AAx4 c/conector BAT177 NIMO Electronic," 2015.) .....	44
Figura46 batería de ácido-plomo, obtenida de baterías de alimentación de robots, Eduardo J.Carletti .....	45
Figura47 Giroscopio, obtenida de 5Hertz Electrónica. ....	46
Figura48 Velocidad angular, obtenida de 5Hertz Electrónica. ....	46
Figura49 orientación del giroscopio ITG 3200, obtenida de 5Hertz Electrónica. .	46
Figura50 Cuerpo central del robot, diseño propio .....	50
Figura51 Extremidad del robot, diseño propio.....	53
Figura52 Detalle extremidad, diseño propio .....	54
Figura53 Cálculos muelle, diseño propio .....	55
Figura54 Resultados Muelle, diseño propio .....	56
Figura55 Diseño Crawler, diseño propio.....	56
Figura56 Calculos Crawler, diseño propio.....	57
Figura57 Robot recogido, diseño propio .....	58
Figura58 Robot extendido, diseño propio .....	58
Figura59 Diagrama cuerpo libre.....	59
Figura60 Función de transferencia, elaboración propia.....	65

Figura61 Función de transferencia, elaboración propia .....	66
Figura62 Viscosidad .....	67
Figura63 Fabricante cojinetes, obtenida de IGUS .....	68
Figura64 Punto más desfavorable, elaboración propia.....	70
Figura65 Fabricante cojinetes, obtenida de IGUS.....	71
Figura66 Motor brushless, obtenida de Faulhaber .....	76
Figura67 Dimensiones del motor y reductora del crawler obtenida de Faulhaber .....	77
Figura68 Conexión motor obtenida de Faulhaber .....	77
Figura69 Motor brushless, obtenida de Faulhaber .....	77
Figura70 Dimensiones del motor y reductora del husillo.....	78
Figura71 Dimensiones encoder, obtenidas de Global Encoder .....	78
Figura72 Diagrama de bloques, obtenida de STMicroelectronic .....	79
Figura73 Patillaje del chip, obtenida de STMicroelectronics.....	80
Figura74 Esquema conexionado motor, controlador y encoder.....	80
Figura75 Final de carrera, obtenida de Omron .....	81
Figura76 Encapsulado con conexiones protegidas, obtenida de Omron .....	81
Figura77 Conexionado final de carrera, montaje normalmente abierto, elaboración propia .....	82
Figura78 Conexión final de carrera pulsado con raspberry, elaboración propia ..	83
Figura79 Diagrama de bloques cc1201, obtenida de Texas Instrument .....	84
Figura80 Dimensiones de la antena, obtenida de YAGEO Phicomp .....	85
Figura81 Esquema de conexionado del chip cc1201 con la antena .....	85
Figura82 Raspberry PI 2, obtenida de www.pcworld.com .....	86
Figura83 Prensaestopa, obtenida de Legrand .....	87
Figura84 Carcasa Raspberry, diseño propio .....	88
Figura85 Cámara raspberry, obtenida de www.raspberry.org .....	88

Figura86 Batería Li-Ion, obtenida debateriadeliorecargable .....	91
Figura87 Diagrama de bloques y conexiones LM2587T-5.0, obtenida de Texas Instrument .....	92
Figure 88 Esquema eléctrico etapa potencia, kicad, diseño propia .....	96
Figura89 Raspberry, kicad, diseño propio.....	97
Figura90 Motor, controlador y encoder, kicad , diseño propio .....	97
Figura91 Filtrado, kicad, diseño propio .....	98
Figura92 Cargador de batería y transformador, kicad, diseño propio .....	99
Figura93 esquema eléctrico etapa comunicación, kicad, diseño propio.....	99
Figura94 placa PCB etapa de comunicación, kicad, diseño propio .....	100
Figura95 PCB de la etapa de potencia, kicad, diseño propio .....	101
Figura96 UML carga, diseño propio. ....	103
Figura97 UML ajuste al diámetro, diseño propio.....	104
Figura98 UML avance, diseño propio .....	105
Figura99 Interfaz de usuario, diseño propio. ....	107
Figura100 Nueva vel. avance. diseño propio.....	108
Figura101 Nueva vel. husillo. diseño propio .....	109

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 tabla de girómetros más usados, obtenida de 5Hertz Electrónica .....	47
Tabla 2 Diámetros, elaboración propia.....	59
Tabla 3 Velocidades, elaboración propia.....	60
Tabla 4 Datos crawler, elaboración propia.....	60
Tabla 5 Datos husillo, elaboración propia .....	63

## INDICES

Tabla 6 Datos rosca, elaboración propia.....	63
Tabla 7 listado de componentes.....	75
Tabla 8 tabla de potencias .....	89



# 1. RESUMEN

El presente proyecto consiste en el diseño de un robot autónomo para la inspección de tuberías, capaz de tomar imágenes del interior de las mismas y localizar algún deterioro, rotura, fisura o bloqueo con posibilidad de mandarlas en tiempo real a la unidad de control para ser estudiadas. De todas las posibles tuberías, centraremos el problema en el caso de las tuberías en edificios de viviendas pudiendo ser aplicable a un abanico más amplio de conductos.

En este proyecto vamos a poder ver la evolución de nuestro sistema y como hemos ido adaptando las posibles soluciones a nuestro robot en función de nuestras necesidades. El planteamiento del sistema está dividido en dos grandes bloques, un análisis del estado del arte relacionado con el problema a tratar y un desarrollo del producto final.

El análisis del estado de arte consiste en la realización de una búsqueda de las distintas formas en las que se lleva actualmente a cabo la inspección de tuberías para tener un conocimiento más amplio de cómo se realiza dicha tarea. Dentro de este punto también se incluye el marco teórico, donde hacemos un estudio de las tecnologías que dichos sistemas usan, y que pueden ser implementadas en nuestra solución final.

El desarrollo del sistema se dividirá en desarrollo del sistema mecánico, electrónico y control.

Dentro del primer punto, se calcularán los parámetros necesarios para determinar las características básicas de los motores: el par necesario para el movimiento de cada articulación del robot, lo que facilitará su posterior elección, además de diseñar la estructura de nuestro robot utilizando para ello un software 3D o en papel.

En el desarrollo electrónico, hay que especificar los elementos que vamos a necesitar como sensores, etapas de potencia para los actuadores, interface con el sistema de control, así como su documentación, esquemas electrónicos, cálculos justificativos y diseño.

En el último apartado, el control, ya que, aunque no es un objetivo de este TFG construir un prototipo del robot, se resolverá el problema de la lógica de control y su documentación UML.

## 2. ABSTRACT

The present project consists of the design of an autonomous robot for the inspection of pipelines, able to take images of the interior of the inside and locate some spoilage, break, fissure or blockade with the possibility of sending the images to the control unit real time to be studied. Of all the possible pipelines, we will focus on the case of pipelines in housings which can be applicable to a wider range of ducts.

In this project we are going to be able to see the evolution of our system and how we have been adapting to the possible solutions to our robot depending on our needs. The system approach is divided into two big blocks, an analysis of the state of the art related to the problem to be dealt with and a final product development.

The analysis of the state of the art consists of the accomplishment of a search of the different ways in which nowadays the inspection of pipelines is carried out to have a wider knowledge of how the above mentioned task is done. In this section also the theoretical context is also included, where we make a study of the technologies that the systems use to, and can be implemented in our final solution.

The development of the system will be divided into mechanical and electronic system and control.

In this section, the necessary parameters to determine the basic features of the motors will be calculated: the torque necessary for the movement of every joint of the robot, which will enable its later choice, in addition to designing the structure of our robot using 3D software or paper for it.

In the electronic development, it is necessary to specify the elements that we are going to need such as sensors, power amps for the actuators, control system interface as well as its documentation, electronic layouts supporting calculations and design.

In the last paragraph, the control, as though it is not an aim of this TFG to manufacture a prototype of the robot, the control logic problem and its documentation will be solved and a user interface will be designed.

### 3. INTRODUCCIÓN

El objetivo, a nivel didáctico y personal, que se persigue con este proyecto, es la puesta en escena de todos los conocimientos y ramas (o la mayoría) que se engloban dentro de la Ingeniería Mecatrónica.

Estos estudios hacen referencia a la mecánica, electrónica, computación y control, todas de ellas a un nivel u otro están reflejadas en la robótica.

La principal motivación es poder realizar el diseño completo de un sistema mecatrónico utilizando para ello todas las habilidades adquiridas durante los años de aprendizaje, así como demostrar la capacidad que hace falta para hacer frente a los problemas que surjan durante el desarrollo del sistema como a su vez la capacidad para superarlos y solucionarlos usando lo aprendido.

En el ámbito industrial, la mayoría de sistemas que realizan el trabajo de inspección de tuberías son sistemas no autónomos, es decir, sistemas que reciben la alimentación del exterior conectados a través de cables, mientras que uno de nuestros objetivos es que sea autónomo. Esta mejora en el diseño del robot añadida a la construcción de un prototipo futuro, podría colocar nuestro sistema al frente del mercado de la inspección de tuberías.

Por otra parte, el objetivo práctico y teórico, así como el alcance y lo que se pretende llevar a cabo es lo siguiente:

- Un diseño mecánico del robot.
- Un diseño electrónico del robot.
- Diagramas de funcionamiento o actividad del robot.

Algunas características que hemos marcado para este sistema son:

- Debe tratarse de un sistema autónomo.
- Debe de estar controlado a través de una estación remota.

El alcance del proyecto, no es la construcción física del robot, si no presentar un diseño mecánico en 3D de la estructura del robot, todos sus componentes mecánicos, su diseño electrónico adecuado para su funcionamiento con todos los elementos referenciados y normalizados.

Por último, no desarrollaremos el programa de funcionamiento del robot, pero si unos diagramas de flujo o de actividad que representaran como sería un correcto inspeccionado de una tubería llevado a cabo por el sistema en todos los casos posibles de funcionamiento.

El proyecto está compuesto por dos grandes bloques que a su vez engloban varios sub-apartados.

- Resumen, Abstract, Introducción.
- Estado del arte.
  - Marco teórico.
- Desarrollo.
  - Desarrollo mecánico.
  - Desarrollo electrónico.
  - Control.
- Conclusiones y Bibliografía.

## 4. ESTADO DEL ARTE

En este apartado hacemos un análisis de la mecánica de los sistemas existentes en el mercado que realizan la misma función que queremos que nuestro sistema sea capaz de llevar a cabo. En este caso, la inspección de tuberías. Para que este apartado quede más completo, vamos a plantear una posible clasificación de distintos tipos de tubería basándonos en el uso final, el diámetro y, por último, aquellos sistemas que sean capaces de desplazarse por un conducto vertical y pondremos al menos un ejemplo de cada uno de ellos.

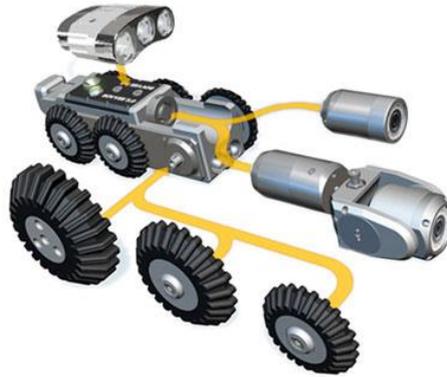
### 4.1. ANTECEDENTES

#### 4.1.1. TUBERIAS DE PVC

##### 4.1.1.1. ROBOT DE INSPECCIÓN DE TUBERÍAS IPEK ROVVER

Es un sistema diseñado para la inspección visual de redes de saneamiento, su diseño hace posible que se pueda adaptar a diferentes tamaños de tuberías. Está equipado con un sistema de cámaras oscilantes con zoom y una cámara de visión trasera. Iluminación con diodos LED para ambientes con poca visibilidad, sumergible hasta 10 m columna de agua. No es un sistema autónomo, consta de un cordón a través del cual, es gobernado y a la vez está transmitiendo y recibiendo la información necesaria. ("Robot de inspeccion tuberias ROVVER," 2015.)

Existen una serie de diámetros normalizados, que, para las redes generales de saneamiento sin presión, los diámetros están dentro de un rango que va desde 110mm a 630mm.



*Figura1, Robot iPEK ROVVER, obtenida de Panatec.*



*Figura2, Robot iPEK ROVVER, obtenida de Panatec*

#### 4.1.1.2. ROBOT DE INSPECCIÓN VISUAL - IPEK

La característica principal de este vehículo es la posibilidad que tiene de acoplarse a una plataforma de tracción más grande, es decir, para inspecciones en grandes tuberías, existe la posibilidad de montar el robot de inspección encima de una plataforma la cual le garantiza un mayor éxito en su tarea. Este sistema puede también desplazarse en tuberías verticales.

Lleva integrado un sistema de tres cámaras de gran resolución y alguna de ellas con la capacidad de girar 360° para tener controlado todo el espacio.

El vehículo es gobernado a través de una consola o mando, externo al robot, que el operario es el encargado de guiar al robot a través de los conductos, para ello utiliza un sistema compuesto por un conjunto de cabestrantes por los que el robot, recibe la energía y envía y recibe los datos adquiridos. ("Robot de inspeccion tuberias ROVVER," 2015.)



*Figura3 Robot iPEK ROVION, obtenida de Panatec*

## 4.1.2. TUBERIAS DE AGUA POTABLE

### 4.1.2.1. PROYECTO TRACTO

Este proyecto innovador tiene por objetivo reducir en 50% la pérdida de agua potable en el mundo debido a fugas en las tuberías.

Consiste en introducir el robot en las tuberías y guiado mediante un sistema de ultrasonidos es capaz de detectar dónde está la fuga de agua y puede calcular el espesor de la tubería en cuestión. Su forma recuerda a la de un torpedo, impulsado por una hélice es capaz de pasar por recodos o a través de ángulos de 90°. (“Robot para inspeccionar tuberías de agua desde dentro — Noticias de la Ciencia y la Tecnología (Amazings® / NCYT®),”2015.)



*Figura4 proyecto TRACTO, obtenida de: Sintef.*

### 4.1.3. REDES DE ALCANTARILLADO

#### 4.1.3.1. VERSATRAX

Inuktun, presenta una gran gama de vehículos oruga, dependiendo del entorno en el que uno quiera desarrollar su acción, ya sean reactores nucleares, red de alcantarillado o búsqueda de personas después de un desastre natural. (“Robots de Inspección Cámaras y sistemas de inspección robotizada - Versatrax 300,” 2015.)

- En esta gama podemos encontrar el Versatrax 100, capaz de inspeccionar conductos o tuberías de pequeño tamaño (4 pulgadas / 10 cm de diámetro). Tiene la capacidad de penetrar 180 metros, superar los obstáculos y compensar sus articulaciones. No es un sistema autónomo.



*Figura5 Versatrax 100, obtenida de Inuktun.*

- Versatrax 150, sistema modular de largo alcance (450metros), su sistema de chasis, está diseñado para que pueda trabajar en diferentes diámetros de tubería, desde 150mm a 300mm. Su cámara, Spectrum 90 estándar, ofrece una alta calidad de video e imagen con movimiento horizontal y vertical y capacidad de zoom. Como se puede apreciar en la imagen, está dotado de cordón umbilical a través del cual se conecta con el exterior.



*Figura6 Versatrax 150, obtenida de Inuktun.*

- Versatrax 300, capaz de inspeccionar 2km de tubería en un solo plazo, incluye 3 cámaras a bordo y una gran cantidad de sensores, diseñado para tuberías pequeñas de 300mm de diámetro interior, no se trata de un sistema autónomo.



*Figura7 Versatrax 300, obtenida de Inuktun.*

## **4.1.4. TUBERÍAS CON RESIDUOS RADIATIVOS**

### **4.1.4.1. VERSATRAX 450**

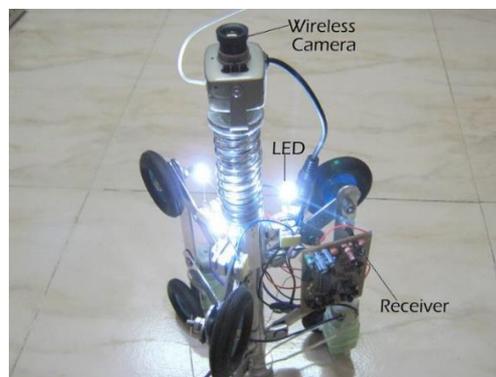
Específicamente diseñados para entornos peligrosos. La cámara principal tiene la capacidad de poder bajarse para espacios más pequeños o de elevarse para una visión de 360°, dispone de una segunda cámara integrada para la visualización más cercana de los elementos que están manipulando. Está dotado de un brazo manipulador de cuatro posiciones, que se despliega desde el rastreador para la manipulación de objetos, escombros u otros elementos. Unas luces de tipo LED, son las encargadas de la iluminación en casos de visibilidad reducida. No es un sistema autónomo. (“Robots de Inspección Camaras y sistemas de inspeccion robotizada - Versatrax 300,” 2015.)



*Figura8 Versatrax 450, obtenida de Inuktun.*

#### 4.1.4.2. PIPE INSPECTION ROBOT

Se trata de un dispositivo de inspección visual, este sencillo mecanismo puede usarse indistintamente en plantas nucleares, plantas de energía convencionales, refinerías o plantas químicas. Su estructura mecánica en forma de tijera, le da la posibilidad mediante un actuador de expandirse o reducirse dependiendo del diámetro de la tubería. Lleva incorporado un conjunto de Leds para la iluminación cuando la visibilidad sea reducida. Una fuente de alimentación en él mismo robot, es la encargada de proporcionarle la suficiente energía. ("Pipe inspection robot," 2014.)



*Figura9 robot final obtenida de coroflot.*



*Figura10 en funcionamiento, obtenida de coroflot.*

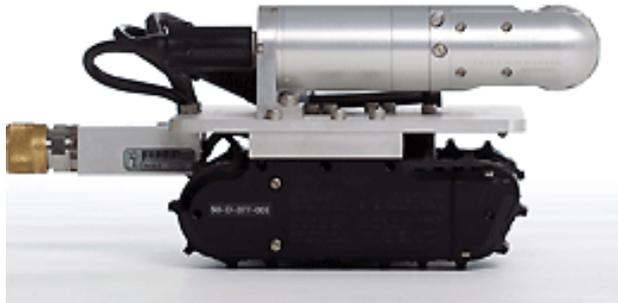
## **4.1.5. TUBERIAS METALICAS FERROSAS**

### **4.1.5.1. VERSATRAX 100 MICROMAG**

Este vehículo de inspección cuenta con un chasis de aluminio plano, un potente imán de tierras raras, un par de Microtracks de aluminio irregulares y una cámara industrial. Dotado de 6 luces LED para la iluminación y dos lámparas halógenas de intensidad variable. Este sistema es magnético y resistente al agua. Ha sido diseñado para captar imágenes y videos de alta calidad en superficies metálicas ferrosas. Operado por control remoto, puede ser orientable, tanto en terrenos llanos horizontales o verticales o incluso pilotado bajo el agua. (“Robots de Inspección Cámaras y sistemas de inspección robotizada - Versatrax 300,” 2015.)



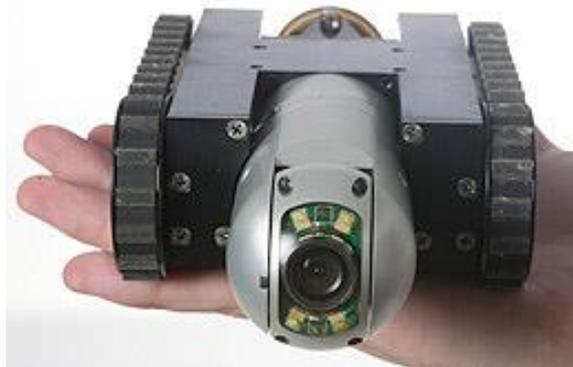
*Figura11 Versatrax 100 MicroMag™ obtenida de Inuktun.*



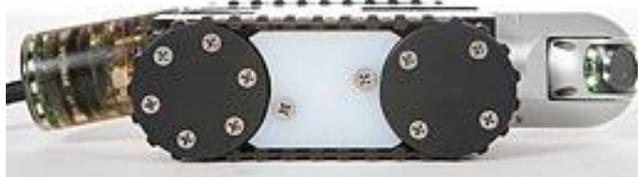
*Figura12 Versatrax 100 MicroMag™ obtenida de Inuktun.*

#### 4.1.5.2. NANOMAG

Es un vehículo diseñado para desplazarse por conductos metálicos, puede hacerlo de forma horizontal, vertical o boca abajo. Posee un fuerte imán de tierras raras, está diseñado únicamente para terrenos secos. La unidad estándar incluye una cámara estándar de espectro de giro e inclinación en la parte delantera del vehículo y mirando hacia atrás para navegar en espacios reducidos. Es ideal donde se requiere una actividad vertical. ("Robots de Inspección Camaras y sistemas de inspeccion robotizada - Versatrax 300," n.d.)



*Figura13 NanoMag, obtenida de Inuktun*



*Figura14 NanoMag, obtenida de Inuktun*

## 4.1.6. TUBERIAS SUBMARINAS Y VERTICALES

### 4.1.6.1. VERSATRAX VERTICAL CRAWLER

Este vehículo está construido con aluminio de grado marino y acero inoxidable, extremadamente duradero. Formado por un chasis trípode expandible, adaptable a diferentes diámetros de tuberías, el control individual de cada segmento hace que sea posible su buen funcionamiento por segmentos curvos y verticales a una profundidad de 183 metros. Una luz LED auxiliar permite una iluminación en lugares con poca visibilidad y complementa a las cámaras incorporadas para una mejor calidad, mientras que los sensores captan la información en tiempo real. (“Robots de Inspección Camaras y sistemas de inspeccion robotizada - Versatrax 300,” 2015.)



*Figura15 Versatrax MicroClimber, obtenida de Inuktun.*



*Figura16 Versatrax MicroClimber, obtenida de Inuktun.*

## 4.1.7. ESTRUCTURAS CILINDRICAS DE INSPECCIÓN DE TUBERIAS

### 4.1.7.1. VERSATRAX MICROCLIMBER

Es una herramienta dirigida por control remoto, creada para desplazarse a través de cualquier estructura cilíndrica o vertical. El sistema estándar está dotado de ocho cámaras Crystal Cam para la inspección visual. Está disponible para una gran variedad de tamaños de tuberías y puede operar en el aire o bajo el agua. (“Robots de Inspección Camaras y sistemas de inspeccion robotizada - Versatrax 300,” 2015.)

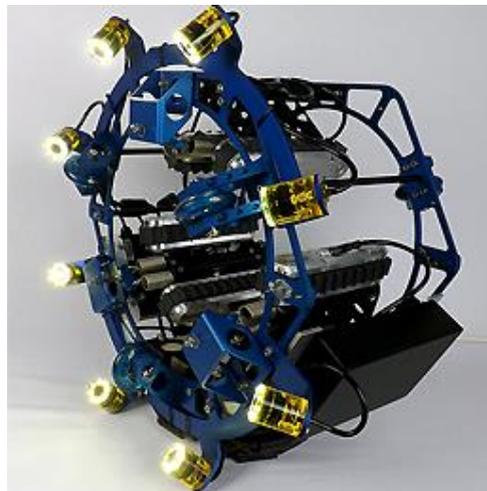


Figura17 Versatrax MicroClimber, obtenida de Inuktun.



Figura18 Versatrax MicroClimber, obtenida de Inuktun.

## 4.1.8. INSPECCIÓN DE CONDUCTOS

### 4.1.8.1. ROBOT DE INSPECCION EVENTRONIC IBOT3

Sus chasis de 2,5mm de espesor y su construcción simétrica, le permite avanzar tanto por conductos cilíndricos y cuadrados y seguir en funcionando, aunque vuelque.

Cuatro motores gobiernan sus cuatro robustas ruedas motrices. Está dotado de una cámara de color delantera con luces regulables y una monocromo detrás con su propia iluminación LED infrarroja. El robot posee una unidad informática que controla la intensidad de las luces, la velocidad de los motores, sirviendo como enlace con el ordenador remoto. ("Robot de inspección Eventronic Ibot3," 2004.)



*Figura19 Eventronic IBOT3, obtenido de Eventronic*

### 4.1.8.2. VGTV

Se trata de un vehículo anfibia que es capaz de operar por la playa, el agua o incluso bajo las profundidades del mar y también sobre terrenos pantanosos y tierra seca o bajo tierra. Sus ruedas son de gran diámetro, está construido de forma robusta, pero es fácil de manejar a través de una consola, no es autónomo. Equipado con audio bidireccional, lentes de aumento, cámara de inclinación y alta calidad de video.



*Figura20 distintos terrenos de funcionamiento del VGTV, obtenida de Inuktun.*

(“Robots de Inspección Camaras y sistemas de inspeccion robotizada - Versatrax 300,” 2015.)

## 4.1.9. TUBERIAS DE GAS

### 4.1.9.1. MICRO-MAGNETIC CASED PIPE INSPECTION CRAWLER (MMC)

Sistema micro-magnético para la inspección de tuberías magnéticas, el sistema se adhiere a las paredes internas de las tuberías, diseñado para empresas que trabajan con gas. Este robot es controlado por un operario externamente a la tubería, y no consta de cordón umbilical.

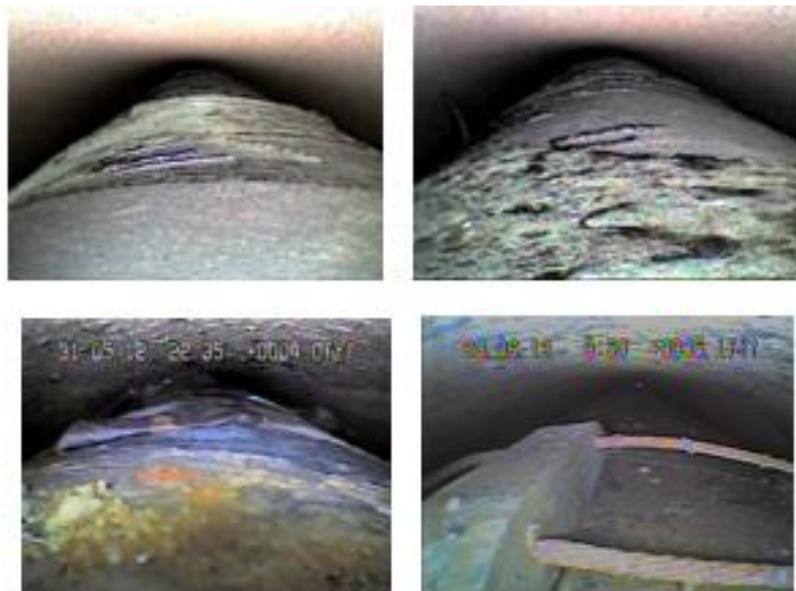
Con este sistema podemos localizar en el interior de los tubos desperfectos o elementos dañados, a la vez de verificar si ha habido filtraciones de agua, y la temperatura de la misma.

Tiene la capacidad de grabar en DVD para su posterior revisión, los sensores son capaces de medir la temperatura del agua y la humedad del espacio tubular. Debido a su reducido tamaño, es capaz de introducirse en espacios tan reducidos como 1 ¼” (“ULC-CasingCrawler-Datasheet.pdf,” 2015.)



*Figura21 Micro-Magnetic Cased Pipe Inspection Crawler, obtenida de ULC*

Estas son algunas fotografías que han sido tomadas por el robot de sus inspecciones.



*Figura22 imágenes tomadas por Micro-Magnetic Cased Pipe Inspection Crawler, obtenida de ULC.*

## 4.2. MARCO TEÓRICO

Después de realizar una búsqueda de robots similares que ya han sido desarrollados antes y que existen actualmente, ahora es el momento de indagar en aquellas tecnologías que emplean y que se puedan implantar en mi sistema. Este apartado se puede dividir en los siguientes puntos, desplazamiento del robot, sensores internos del robot y comunicación con el exterior.

### 4.2.1. *DESPLAZAMIENTO DEL ROBOT*

Este apartado engloba todo lo relacionado con que el robot pueda desplazarse, de un punto a otro de una tubería, es decir, la estructura que queremos que tenga y los actuadores, en este caso los motores.

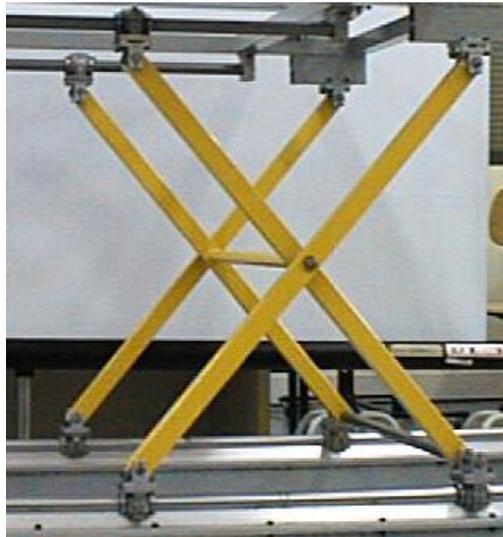
#### 4.2.1.1. SISTEMA DE MOVIMIENTO.

Para esta aplicación, necesitamos un mecanismo que sea capaz de ajustarse a distintos diámetros de tubería, que sea sencillo de fabricar y que, a su vez, sea capaz de moverse dentro de la tubería, sin tener que parar de realizar sus tareas o tener que ajustarlo manualmente.

Teniendo en cuentas estas especificaciones decidimos que el sistema que mejor se podía adoptar para el problema de la adaptación al diámetro del tubo, es el que siguen las carretillas elevadoras y otros mecanismos que reciben el nombre de mecanismos tijera.

Este mecanismo, como su nombre indica sigue el movimiento de una tijera, en el cual sobre un punto fijo situado en el centro del mecanismo se abre y se cierra, por lo que es perfecto para adaptarse en el interior de la tubería a distintos cambios de sección.

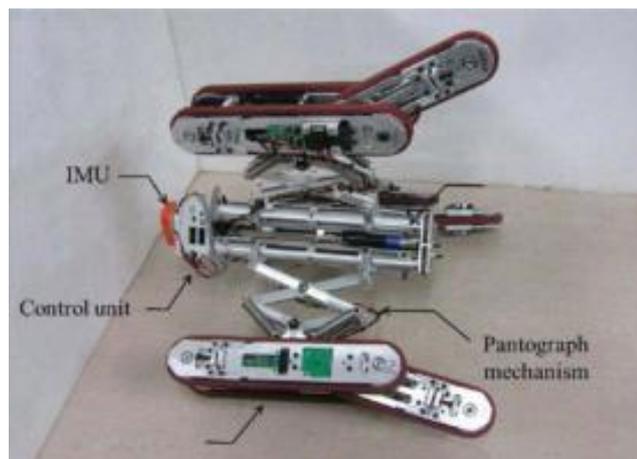
Dispondríamos de tres de estos sistemas espaciados 120° en el robot, con un total de seis ruedas en todo su conjunto, dos por cada sistema. Estas tijeras se abrirán o cerrarán exactamente de la misma manera y al mismo tiempo gracias a un motor.



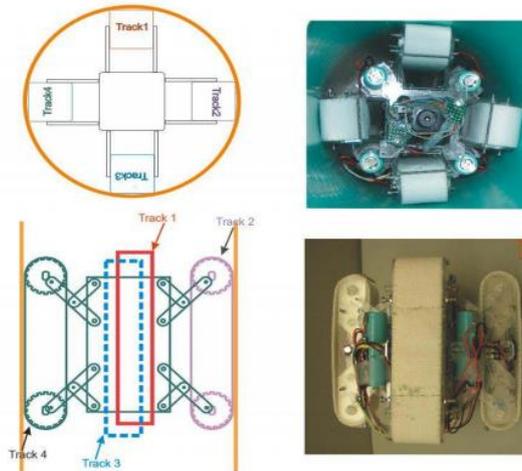
*Figura23 Mecanismo tijera, obtenida de Unioviado*

La amplitud máxima que podemos conseguir con este sistema dependerá de la longitud de los brazos de la tijera.

En este diseño no es necesario que las seis ruedas sean motrices, es decir, no es necesario disponer de seis motores, uno por cada rueda, ya que elevaría considerablemente el volumen y el consumo del sistema, en lugar de ello, tendremos unas ruedas motrices, las traseras, y el resto serán ruedas locas, teniendo también la posibilidad de actuar sobre las ruedas motrices que queramos sin tener la obligación de utilizar siempre todos los motores.



*Figura24 Robot PAROYS II y robot FAMPER, imágenes tomadas de diseño y desarrollo de un ro-bot de inspección de tuberías, María Alejandra Urdaneta Lima.*



*Figura25 Robot PAROYS II y robot FAMPER, imágenes tomadas de diseño y desarrollo de un ro-bot de inspección de tuberías, María Alejandra Urdaneta Lima.*

#### 4.2.1.2. MOTORES PASO A PASO, DC, BRUSHLESS.

##### 4.2.1.2.1. Paso a paso

Este tipo de motores se utiliza cuando se quiere conseguir una gran exactitud en los movimientos del sistema, sus aplicaciones van desde robots hasta control de discos duros o incluso impresoras, e impresoras 3D donde se necesitan movimientos muy precisos.

Su principal característica es que es posible moverlo una vez por cada pulso que el motor recibe, pudiendo variar este paso entre  $90^\circ$  o  $1, 8^\circ$ , dependiendo del número de polos del motor.

Por este principio de funcionamiento se dice que este tipo de motores son motores electromecánicos, ya que transforman un impulso eléctrico en un movimiento rotacional constante y finito.

Para reducir el paso del motor, lo que se debe hacer es ampliar el número de bobinas del estator, pero esto supondría un mayor consumo, mayor volumen y más pérdidas del rendimiento del motor, por lo que esta solución no es buena. La solución alternativa es utilizar los denominados controladores de "micropaso" que modificando la tensión aplicada a cada bobinado consiguen dividir cada paso hasta en 100 micropasos.

Este motor está compuesto de una parte fija, el estator donde van alojadas las bobinas que excitadas de manera correcta generan los polos norte y sur de forma que

se crea un campo magnético giratorio y una parte móvil, el rotor, construido con un imán permanente.

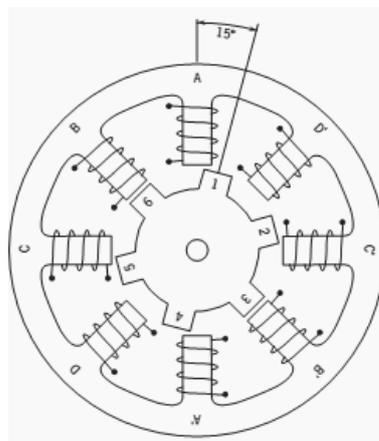
Las desventajas de los motores paso a paso es que puede ocurrir un fenómeno de resonancia que provoca que el motor no se mueva frente a un paso o que incluso retroceda en vez de avanzar, si el motor no es controlado de manera correcta, también que es muy difícil de operar con él a altas velocidades. Uno de los problemas fundamentales para la robótica es el bajo par que tienen.

Hay dos tipos básicos de motores paso a paso, los bipolares y los unipolares, se diferencian en que los primeros tienen dos bobinas y cuatro conexiones por cada bobina y los segundos tienen cuatro bobinas y seis conexiones por cada una.

Desde el punto de vista constructivo, existen tres tipos de motores paso a paso.

a) Motor paso a paso de reluctancia variable.

Posee un rotor de hierro dulce y en estado de excitación bajo la acción de su campo magnético ofrece menos resistencia a ser atravesado por el flujo de la corriente, su inconveniente es que en estado de reposo (no excitado), el rotor gira libremente y no es posible saber el punto exacto de reposo.



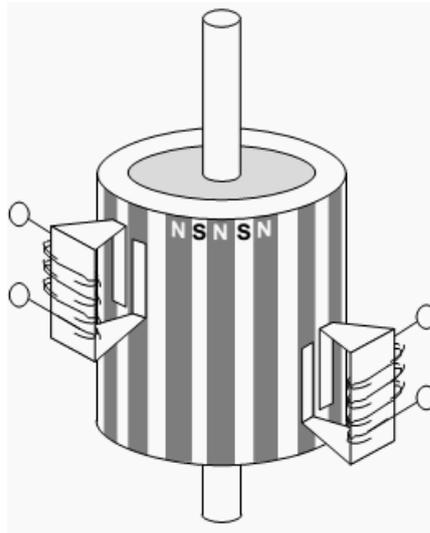
*Figura26 Motor paso a paso de reluctancia variable, obtenida de Few Words About Stepper Motor | EEP*

b) Motor paso a paso de imanes permanentes.

El rotor es un imán permanente, su principal ventaja es que su posición no varía en régimen de carga (excitado) o en reposo (sin excitar).

El rotor gira, para enfrentar sus polos al campo magnético creado por el estator.

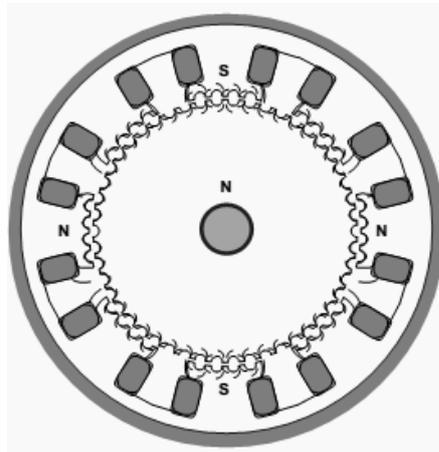
Empleado sobre todo para aplicaciones no industriales.



*Figura27 Motor paso a paso de imanes permanentes, obtenida de Few Words About Stepper Motor | EEP*

c) Motor paso a paso híbrido. ("Motores paso a paso - Monografias.com," 2005.)

Este motor es una combinación de los dos anteriores.



*Figura28 Motor paso a paso híbrido, obtenida de Few Words About Stepper Motor | EEP*

("Few Words About Stepper Motor | EEP," 2013.)

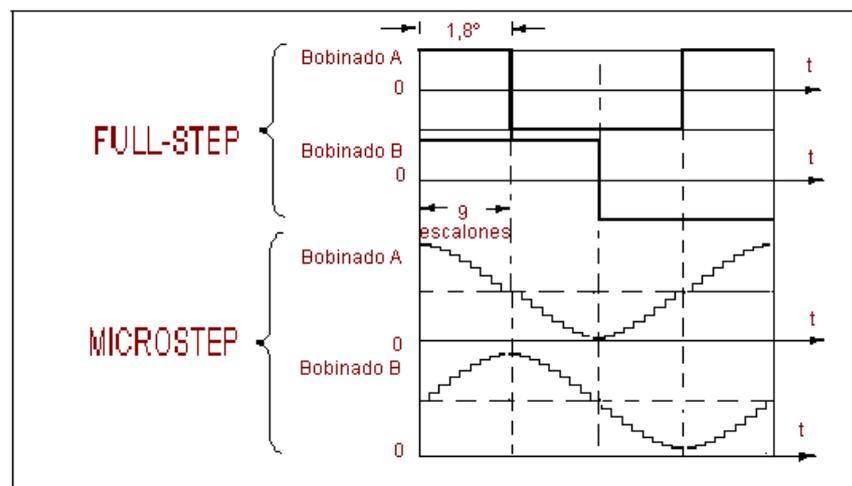
En aplicaciones como impresoras o CNC donde lo más importante es la precisión, donde el movimiento del rotor es la mitad del paso completo, existe una alternativa

para el movimiento del rotor, la ya citada del micro-paso, que tiene mayor precisión consiguiendo un movimiento continuo del rotor.

En el modo micro-paso se aumenta la resolución, el número de pasos por vuelta.

Lo vemos con un ejemplo.

- $1.8^\circ/\text{Paso}$ , especificación del fabricante.
- 9, cantidad de micro paso por paso completo.
- $1.8/9=0.2^\circ/\text{paso}$ , resolución del microstepping.



*Figura29 Corrientes de las fases en modo completo y dos señales de referencia necesarias en modo microstepping, obtenida de pfinalfra.*

Las señales de microstepping deben ser generadas por el driver desde el interior con un DAC que proporciona las señales escalonadas  $90^\circ$  con respecto a la señal de referencia para poder regular la corriente en las fases y así generar los pasos discretos. La razón por la que están desfasadas es para poder girar el motor un giro completo.

En un diagrama fasorial se pueden representar las corrientes en ambos bobinados, recordamos que hemos adoptado  $1.8^\circ$  por paso, en 9 escalones de la señal de referencia que crea una nueva resolución de  $0.2^\circ$ , así pues para rotar  $1.8^\circ$  mecánicos, se necesitan 5 micro pasos.

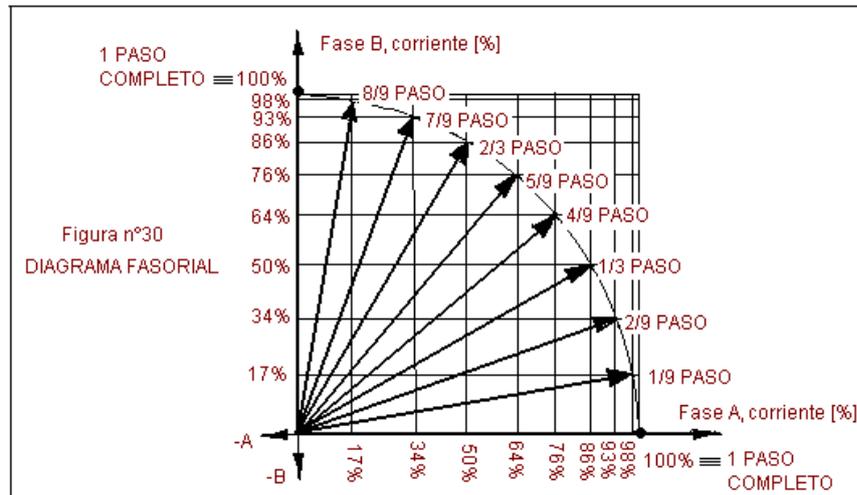


Figura30 Diagrama fasorial, obtenida de pfinalfra.

Para rotar una vuelta completa, es decir  $360^\circ$ , son necesarios 1800 micro pasos.

Una ventaja de este método es que permanece invariable al problema de Full-Step, que consiste en que la cupla (par de fuerzas) en microstepping es constante para cualquier ángulo, debido a que la corriente neta es constante. ("MICRODRIVE," 2015.)

$$T = T_H * \text{sen}(f_s - f_R)$$

#### 4.2.1.2.2. Corriente continua, excitados por armadura

Estos motores son los más usados en la actualidad en todos los ámbitos debido a la gran gama de velocidades que ofrecen, son fáciles de controlar y presentan gran flexibilidad en las curvas par-velocidad y también un buen rendimiento.

Estos motores tienen dos modos de funcionamiento, uno en vacío o sin carga denominado así cuando el eje del motor no lleva acoplada ninguna carga y cuando el motor trabaja con carga, es decir, cuando arrastra un objeto.

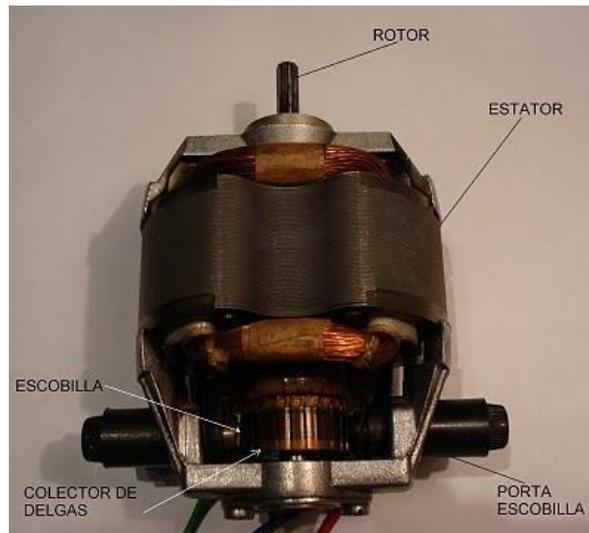
Constitución:

Estator, en su interior se alojan los polos inductores, siempre en un número par y a su alrededor se encuentran las bobinas que forman el devanado inductor, generalmente de hilo de cobre que al ser alimentado por una corriente genera el campo magnético creando así un norte y un sur.

Rotor, formado con unas chapas de acero con bajo contenido en silicio y aisladas unas de otras, está montado sobre el eje de la máquina, en el exterior tienen unas ranuras de una cierta inclinación donde van alojadas el devanado inducido.

Colector de delgas, va montado sobre el eje de la máquina y debe tener tantas delgas como bobinas tenga el devanado inducido ya que cada delga está unida eléctricamente a una bobina.

Entrehierro, este es un espacio entre el rotor y el estator, imprescindible que exista para impedir el rozamiento entre ambos, debe ser lo más pequeño posible.



*Figura31 motor DC, obtenida de Tema 4. Motores eléctricos de Corriente Continua (c.c.)*

Escobillas, estos elementos son los encargados de garantizar el contacto entre el circuito de corriente continua del exterior con las delgas del colector, para que el contacto sea el adecuado utilizan elementos elásticos, las escobillas sufren un gran desgaste teniendo que ser reemplazadas cada un cierto tiempo. ("Tema 4. Motores eléctricos de Corriente Continua (c.c.)," 2015.)

Si queremos elevar la velocidad de la máquina debemos aumentar la tensión dentro del inducido. Si disminuimos el flujo de excitación, disminuye también el par del motor.

Cuando hablamos de estos motores adaptados a los robots, existen los motores controlados por inducido en los que la función de transferencia o relación entre la tensión de control y la velocidad de giro corresponde con un sistema de primer orden, o controlados por excitación que responde a un sistema de segundo orden. El controlado por inducido es el más utilizado para la activación de los robots que produce un efecto estabilizador. (Javier Esteban Escaño, 2013)

#### 4.2.1.2.3. BRUSHLESS

La principal novedad de este tipo de motores es que no emplean escobillas, de modo que no existen los problemas de rozamiento como había en los motores DC y el mantenimiento es casi nulo y el rendimiento es mejor. Al igual que los motores DC, estos también están compuestos por un rotor y un estator, pero en este caso, la corriente pasa directamente a los bobinados del estator. Esta corriente genera un campo electromagnético que interacciona con el campo magnético creado en los imanes permanentes del estator y hace que el eje del motor gire.

Al girar el eje, el rotor está continuamente cambiando su posición, el variador electrónico se asegura de que el eje del motor este girando sea cual sea su posición, ya que el eje se mueve cuando está girando. Estos variadores son más complicados que en otros motores.



*Figura32 motor Brushless, obtenida de motores brushless.*

Un parámetro importante en estos motores es KV, que indica el número de revoluciones del rotor por cada voltio que se le aplica. Por ejemplo, si tenemos un motor brushless de 3000KV y le aplicamos 10V, las revoluciones serían de 30000rpm. No todo son ventajas ya que, a mayor tensión suministrada, mayor es la velocidad del motor, pero obtenemos menos par.

El par alcanza su máximo valor cuando el campo magnético creado por los bobinados es perpendicular con el campo magnético creado por los imanes permanentes, pero como hemos dicho antes, el rotor cambia de posición constantemente por lo que a cada instante debemos conocer la posición del rotor para excitar las bobinas y conseguir este par máximo. Para conocer la posición existen dos procedimientos, uno con sensores integrados en el motor y un algoritmo de seguimiento y otro método que no cuenta con sensores y se realiza a través de la observación de la corriente dentro del motor.

Ambos procedimientos necesitan de un variador, en el caso de los sensores, es más complejo porque se debe conocer el momento preciso para aplicar el valor de tensión adecuado a las bobinas, en el segundo caso, el variador es más sencillo ya que debe monitorizar las corrientes que circulan por el motor, el inconveniente es que para

velocidades bajas, en las cuales la intensidad del campo es menor, es más compleja la detección de estos impulsos. ("motores-brushless.pdf," 2015.)

A la hora de la elección de los motores, hay que tener en cuenta sobre todo la finalidad de los mismos, ya que no todos ellos se pueden implementar en una determinada aplicación. Los motores paso a paso ofrecen una gran precisión en los movimientos e incluso la posibilidad de dividir cada vuelta de su eje en miles de pasos, el problema que presentan es su bajo par. Los motores DC presentan el problema de las escobillas ya que si se mojan, provocan un cortocircuito así como el desgaste y mantenimiento al que están sujetas, a favor tienen que podríamos disponer de un par elevado ya que no vamos a trabajar a altas velocidades. Pero sin duda los que mejor se pueden adoptar a nuestra solución son los motores brushless, ya que estos motores estarán expuestos a lugares de difícil acceso, podrían mojarse eventualmente y la falta de necesidad de un mantenimiento profundo de ellos es algo a tener en cuenta, el control no es tan fácil como el de un motor CC, pero hoy en día se pueden encontrar controladores integrados que no requieren una electrónica muy compleja, nos proporcionarían el par que deseamos ya que como he dicho antes, no usaremos altas velocidades y podremos controlar todos los ejes a la vez o incluso de manera desfasada.

## 4.2.2. COMUNICACIÓN

Es necesario tener siempre comunicado el sistema robot con el exterior de la tubería para saber en cada momento su situación y su estado, así como para analizar la información que el conjunto de los sensores nos proporcione. Para ello, se plantean diferentes alternativas, mediante cable o por radiofrecuencia, y dentro de esta última, vía Wifi, vía bluetooth, o a través de enlaces de radiofrecuencia propios, el principal inconveniente, que será por el cual tomemos una solución u otra es que el robot trabaje bajo tierra y en el interior de conductos.

### 4.2.2.1. WIFI.

La comunicación vía Wifi está a la orden del día en todos los ámbitos de la vida cotidiana, por lo que no sería una idea descabellada implementarla en nuestro sistema.

La red wifi es una comunicación inalámbrica a través de ondas.

Opera a una frecuencia de 2.4GHz, y el alcance de una red wifi suele ser de unos 100m en campo abierto, llegando a varios kilómetros mediante el uso de amplificadores.

En la actualidad existen tres formas de comunicación wifi, 802.11b que emite a 11Mb/seg, la 802.11g algo más rápida, a 54Mb/seg y la 802.11n que llega a los 300mb/seg.

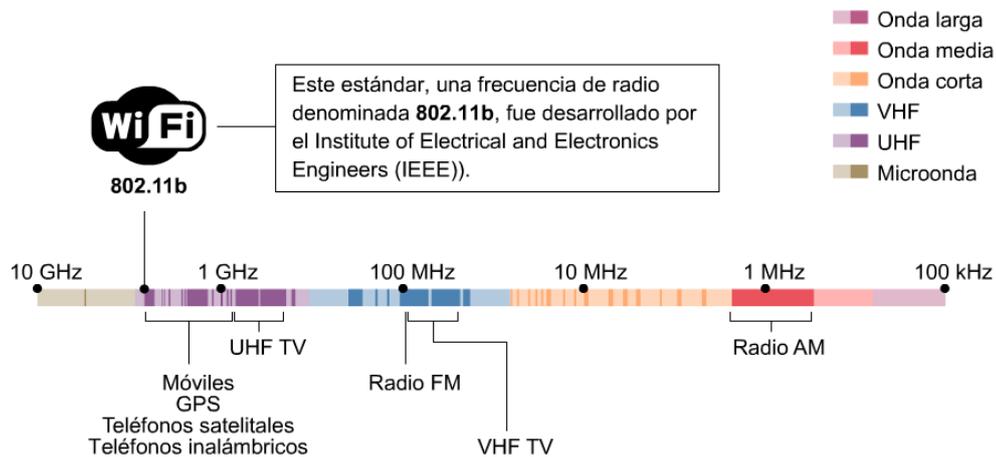


Figura33 red wifi, obtenida de Consumer.

Para disponer de red wifi es necesario un sistema que emita (emisor) y reciba (receptor) la señal wifi orientado hacia todos los objetos que componen la red, que a su vez deberán de poseer un dispositivo wifi para conectarse a ella.

Debido a que las ondas atraviesan las paredes, es posible que agentes externos a la red puedan conectarse a ella, por lo que es necesaria una clave de encriptación para evitarlo. ("WIFI - Comunicación Inalámbrica," 2005.)

#### 4.2.2.2. BLUETOOTH

Se trata de otra comunicación inalámbrica de datos y voz, basada en un enlace de radio de bajo coste y de corto alcance.

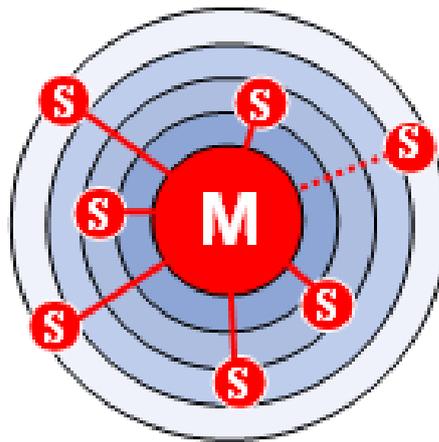
Su radio máximo de operación es de 2m (categoría 3), de 10 metros (categoría 2) y de hasta 100 para la categoría 1 operando en la misma banda global que la red wifi de 2.4GHz.

El canal de comunicación bluetooth permanece abierto entre los dos dispositivos que se estén enlazando sin necesitar de la intervención continuada del usuario, es por lo tanto a diferencia del wifi una red punto a punto.

El transistor permite enviar datos y voz a una velocidad máxima de 32Mb/seg.

Su funcionamiento se basa en el estándar maestro/esclavo

El término "piconet" hace referencia a una a la red formada por un dispositivo y todos los dispositivos que se encuentran dentro de su rango. Un dispositivo maestro puede conectarse simultáneamente a siete dispositivos esclavos. En realidad, el maestro únicamente puede estar conectado con un dispositivo, lo que hace es cambiar de dispositivo de forma muy rápida. ("Cómo funciona Bluetooth," 2015.)



*Figura34 red "Piconet", obtenida de CCM.*

#### 4.2.2.3. CORDON UMBILICAL

Los sistemas que utilizan un sistema de cordón umbilical para la transmisión de la información a menudo no son sistemas autónomos, porque a la vez que se envía la información a la base de operación, mediante un segundo cordón, el sistema está siendo alimentado, por lo que, estos sistemas no dispondrían de una fuente de alimentación incorporada, sino que son alimentados desde el exterior como muchos de los sistemas que se utilizan para la inspección de tuberías que hemos estudiado en el primer apartado.

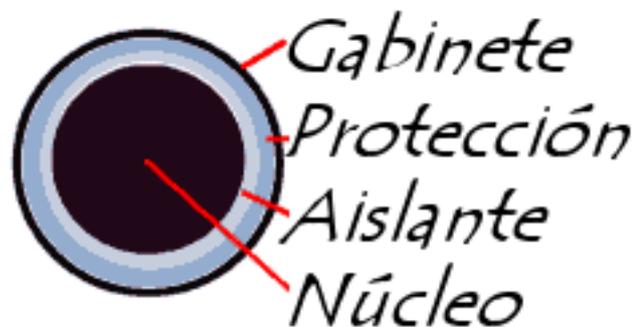
Los cables se encuentran en una bobina en el exterior y conforme el robot u otro sistema avanza por el interior de la tubería la bobina se va desenrollando, de esta manera, la única forma que el sistema quede inoperativo, pierda la alimentación o se pierda la transmisión de datos es que los cables se dañen o se rompan.

Para la conexión de dos dispositivos dentro de una misma red se pueden utilizar distintos tipos de cables, el cable coaxial, doble par trenzado o fibra óptica.

- a) Cable coaxial.

Está compuesto por un hilo de cobre central denominado núcleo rodeado por un material aislante y luego por una protección.

- El núcleo realiza la función de transmitir los datos.
- El aislante, que rodea al núcleo y es de un material dieléctrico que evita que cualquier contacto pueda derivar en interacciones eléctricas.
- La protección que recubre los cables y protege los datos transmitidos del ruido y no se puedan distorsionar.
- La funda, que protege al cable del exterior.



*Figura35 Cable coaxial, obtenida de CCM*

Se utilizan dos tipos de cables coaxiales, 10Base2-cable coaxial delgado, muy flexible y se puede conectar a la mayoría de las redes, capaz de transportar los datos durante 185 metros sin perder la señal o 10Base5-cable coaxial grueso, un cable más grueso con un núcleo mayor capaz de transportar mayor cantidad de datos y a mayores distancias hasta de 500 metros.

#### b) Par trenzado

De forma sencilla, consta de dos cables trenzados dentro de un cordón y cubiertas por un aislante, generalmente hay dos tipos.

- Par trenzado protegido (STP).

Este cable utilizar una funda de cobre de mejor calidad que la de un par trenzado no protegido, resumiendo, posee una mejor protección contra las interferencias y permite una velocidad de transmisión mayor y a mayores distancias.

- Par trenzado no protegido (UTP).

Longitud máxima de segmentación 100 metros, compuesto por dos hilos de cobre recubiertos de un aislante. ("Transmisión de datos," 2015.)

c) Fibra óptica.

Está constituido por uno o más fibras de vidrio, cada una de ellas consta de:

- Un núcleo de fibra con un elevado índice de refracción.
- Una cubierta que rodea al núcleo con un índice de refracción menor.
- Una envoltura que protege a las fibras de posibles interferencias entre fibras adyacentes y proporciona mayor seguridad al núcleo.

La luz producida por los diodos o por un láser viaja en el interior de la fibra y debido a la reflexión que se produce en su cubierta, la transforma en señal eléctrica. Es un gran medio para la comunicación y el envío de datos por sus buenas características de gran ancho de banda, baja atenuación de la señal, integridad, inmunidad a las interferencias electromagnéticas, alta seguridad y duración. Su mayor desventaja es su coste de producción, ya que es necesario un vidrio de muy alta calidad y la fragilidad en su manejo. Uno de los parámetros más importantes de la fibra de vidrio es la frecuencia fundamental o normalizada, según este parámetro se puede dividir en dos tipos, monomodo o multimodo.

- Monomodo, cuando la frecuencia fundamental es inferior a 2.405, solo se propagan rayos paralelos a la fibra óptica, consiguiendo un rendimiento máximo de 50GHz. Pueden operar a velocidades de 622Mbps y un alcance de 100km.
- Multimodo, cuando la frecuencia fundamental es superior a 2.405, son las más usadas en redes locales por su bajo coste. La distancia de transmisión de esta fibra es muy baja, 2.4km y usa diferentes velocidades como 10Mbps, 16Mbps, 100Mbps y 155Mbps.

Las características generales de la fibra óptica son el ancho de banda, la distancia, la integridad de datos, la duración y la seguridad. ("FIBRA OPTICA," 2015.)

#### 4.2.2.4. RADIOFRECUENCIA.

La comunicación por medio de radio frecuencias tiene lugar cuando una señal se propaga en el rango de 3kHz a 300GHz, parte menos energética del espectro electromagnético, se propaga de emisor a receptor.

La radiofrecuencia se puede dividir en distintas bandas según el espectro.

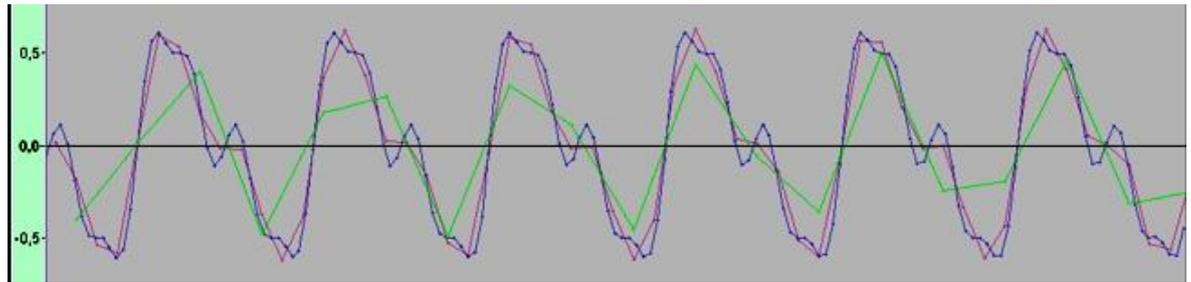
## Espectro de radiofrecuencia

Nombre	Banda	Frecuencia	Longitud de onda	Uso
		< 3 Hz	> 100.000 km	
Extra baja frecuencia (Extremely low frequency)	ELF	3-30 Hz	100.000–10.000 km	No se utiliza en radiofrecuencia
Super baja frecuencia (Super low frequency)	SLF	30-300 Hz	10.000–1.000 km	Comunicaciones submarinas
Ultra baja frecuencia (Ultra low frequency)	ULF	300–3.000 Hz	1.000–100 km	Comunicaciones militares secretas
Muy baja frecuencia (Very low frequency)	VLF	3–30 kHz	100–10 km	Comunicaciones militares y gubernamentales
Baja frecuencia (Low frequency)	LF	30–300 kHz	10–1 km	Comunicaciones aéreas y marítimas
Frecuencia media (Medium frequency)	MF	300–3.000 kHz	1 km – 100 m	Radiodifusión
Alta frecuencia (High frequency)	HF	3–30 MHz	100–10 m	Seguridad, defensa, o. corta, radioaficionados
Muy alta frecuencia (Very high frequency)	VHF	30–300 MHz	10–1 m	Televisión, radio FM, aviación, satélites, servicio marítimo
Ultra alta frecuencia (Ultra high frequency)	UHF	300–3.000 MHz	1 m – 100 mm	Televisión, radiotransmisiones uso personal, telefonía móvil, militar
Super alta frecuencia (Super high frequency)	SHF	3-30 GHz	100–10 mm	Televisión vía satélite, radioenlaces, radar
Extra alta frecuencia (Extremely high frequency)	EHF	30-300 GHz	10–1 mm	Radioastronomía, radar alta resolución
		> 300 GHz	< 1 mm	

Figura36 espectro radiofrecuencia, obtenida de e-ducativa.

Los usos de las distintas bandas del espectro, viene determinado por el hecho de que, a mayor frecuencia, mayor es la cantidad de información que podemos transmitir, de modo que, por ejemplo, para la televisión, se usan las altas frecuencia sin embargo, cuanto mayores son las frecuencias, mayor es la facilidad de ser absorbidas por los objetos. (“3. Aplicaciones de las ondas electromagnéticas. Telecomunicaciones,” 2015.)

Cuando hablamos de términos de radiofrecuencia no podemos olvidar el Teorema de Nyquist o del muestreo, según el cual, para poder replicar con exactitud una forma de onda, es necesario que la frecuencia de muestreo sea dos veces la frecuencia a muestrear. Si tenemos un sonido de 10000Hz, la frecuencia de Nyquist será de 20000Hz, se dice entonces que el proceso será reversible y que la onda no ha perdido nada de información. Cuando la frecuencia de muestro es inferior a la frecuencia de Nyquist, y por lo tanto insuficiente para hacer el muestreo correctamente, aparece el fenómeno denominado Aliasing, aparecen las llamas frecuencias fantasmas que no tienen nada que ver con la señal original. Este fenómeno, afecta más a las altas frecuencias. (“Teorema de Nyquist o Teorema del Muestreo y el Aliasing,” 2016.)



*Figura37 Teorema de Nyquist y fenómeno Aliasing*

La onda azul es la original, la onda roja es la señal reconstruida que como vemos es muy parecida a la original ya que la frecuencia cumple con el teorema de Nyquist, pero al disminuir la frecuencia aparece el fenómeno aliasing representado por la onda verde.

Existen algunos parámetros importantes que deberíamos conocer como son:

- Frecuencia, que es el número de veces que una señal se repite por unidad de tiempo, medido en Hz.
- Longitud de onda, es la distancia que una señal recorre en el intervalo de tiempo comprendido entre dos máximos consecutivos y es inversamente proporcional a la frecuencia de la señal, denominada  $\lambda$ .

La técnica de la radio comunicación consiste en la superposición de la información que deseamos transmitir sobre una onda electromagnética denominada portadora mediante una operación de modulación.

Como consecuencia de la modulación, se origina una señal modulada cuyo espectro contiene frecuencias que se encuentran cercanas a la frecuencia de la portadora. Esta onda modulada se envía al medio de propagación por medio de una antena.

El elemento receptor debe "desmodular" la onda para tratar la información.

Hay dos tipos de transmisores, homodino y heterodino.

- Homodino, son aquellos que realizan la modulación sobre la señal portadora y posteriormente realizan un filtrado, es de uso común en portadoras de baja frecuencia y específicamente con modulaciones de amplitud AM. El inconveniente es que, si la frecuencia de la portadora es variable, la operación de filtrado más compleja.

- Heterodino, la modulación se realiza sobre una frecuencia diferente a la que se va a transmitir por la antena. Aunque la frecuencia de la portadora varíe, la modulación se hace siempre sobre la misma frecuencia, por lo que se facilita el filtrado. Este método es mejor que el homodino y se actualmente se están centrando en la modulación en frecuencia FM, dejando la AM.

Existen dos modos de transmitir datos a través de radiofrecuencia, cada uno de ellos presentan ventajas e inconvenientes, estos son el modo analógico y el modo digital.

- Analógico, consiste en el envío de la información en forma de ondas electromagnéticas de forma continuada a través de un medio físico. Los datos se transmiten a través de una onda portadora, cuyo objetivo es únicamente transportar la información modificando en una de sus características (amplitud, frecuencia o fase), según este parámetro que varía hay tres tipos:
  - o Transmisión por modulación de la amplitud de la onda portadora (AM).
  - o Transmisión por modulación de la frecuencia de la onda portadora (FM).
  - o Transmisión por modulación de la fase de la onda portadora (PM).
- Digital, consiste en el envío de información a través de medios de comunicaciones físicos en forma de señales digitales. Para ello, las señales analógicas deben digitalizarse antes para poder ser enviadas. Sin embargo, como esta señal no puede mandarse en paquetes de 1 y 0, debe ser codificada en la forma de una señal con dos estados, por ejemplo:
  - Dos niveles de voltaje con respecto a tierra.
  - Diferencia de voltaje entre dos cables.
  - La presencia/ausencia de corriente en un cable.
  - La presencia/ausencia de luz.

("Transmisión de datos por radio frecuencia," 2015.)

Cada uno de los sistemas de comunicación estudiados son muy útiles y usados todos ellos el ámbito industrial y cotidiano.

El inconveniente que presentan tanto la red wifi como bluetooth, es que operan a altas frecuencias 2.4GHz y ya hemos explicado que las altas frecuencias son fácilmente absorbidas por los objetos, como la finalidad de nuestro robot es que trabaje en lugares

de difícil acceso para el hombre o bajo tierra en función de donde se encuentre la tubería, esa frecuencia sería absorbida por el terreno y las paredes de la tubería, de modo que perderíamos la comunicación y el control sobre nuestro sistema.

Esto nos deja una única opción, que es comunicarnos a través de radiofrecuencias de baja frecuencia, del orden de 300-9400MHz (VHF y UHF), lo suficientemente bajas para que no sean absorbidas por el entorno y seamos capaces de tener un buen control del sistema, así como una buena comunicación a la hora de la transmisión de datos.

Esta banda de frecuencias se emplea para la televisión, radiodifusión FM, banda aérea, satélites, comunicaciones entre buques y control del tráfico marítimo.

De esta banda, los denominados canales bajos, del 2 al 13, están guardados para la televisión a partir de los 50MHz. Entre los 88 y 108MHz para la radio FM. Entre los 108 y 136.975MHz se encuentra la banda usada en aviación. 137MHz, señales meteorológicas. Entre 144 y 146MHz radioaficionados. Entre 156 y 162MHz, las bandas reservadas para el servicio radio marítimo, por encima de ellas encontramos las usadas en el servicio de bomberos, taxis, etc. Entre 174 y 216MHz, en Estados Unidos y Canadá se usa para canales de televisión 7-13 (VHF-hi), conocido como "Banda III" a nivel internacional, también para micrófonos inalámbricos profesionales. Dentro del intervalo 216-222MHz, móvil terrestre, fijo y móvil marítimo. En según qué países, los canales nacionales e internacionales ocupan las frecuencias comprendidas entre 470MHz o algo más bajas y uno 862MHz. En Estados Unidos y otros países americanos, existe el servicio FRS, que permite a particulares utilizar transistores de baja potencia para uso no profesional. Los radioaficionados cuenta con dos bandas UHF entre los 430 y los 440MHz con carácter secundario, quiere decir que deben compartir las frecuencias con otros servicios y no son prioritarios.

De las distintas opciones, la única para la que no necesitaremos de una licencia especial es la de 433MHz que como ya hemos dicho antes está reservada para aplicaciones industriales. (Pérez, 1998)

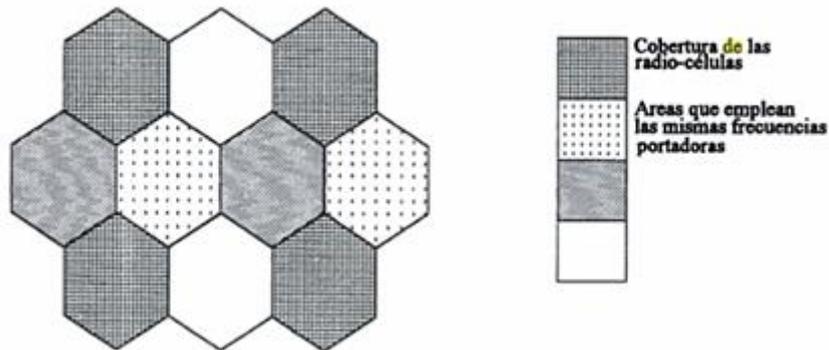


Figura38 Reutilización del espectro de radio de las redes de radio celular, obtenida de *Introducción a las telecomunicaciones modernas*.

### 4.2.3. CONJUNTO SENSORES

#### 4.2.3.1. CÁMARA

La cámara es el sensor más importante que nuestro sistema va a llevar incorporado, será el encargado de tomar las imágenes del interior de la tubería para posteriormente analizarlas e identificar, en la base, si hay algún tipo de imperfección, daño, fuga u obstrucción dentro de ella.

En el mercado podemos encontrar infinidad de cámaras, pero la que buscamos nosotros es una que solo transmita las imágenes, con esto quiero decir que la mayoría de las cámaras toman fotos o videos de un lugar y lo almacenan en una memoria incorporada en el propio dispositivo, esta funcionalidad no es necesaria ya que debemos ver en tiempo real todo lo que nuestro robot está captando en el interior de la tubería.

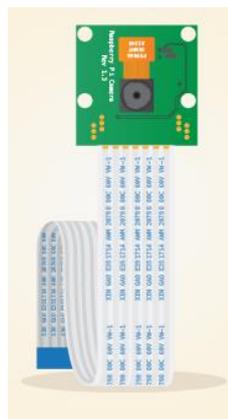
A este grupo de cámaras pertenecen, entre otras, las webcams o las cámaras de vigilancia. Las webcams únicamente graban un video y en tiempo real lo están transmitiendo a la otra persona al otro lado de la cámara y las cámaras de vigilancia adquieren un video del exterior y lo transmiten a un sistema donde posteriormente se guarda.

Para este proyecto, no necesitamos que las imágenes que tomemos sean de alta resolución ni tampoco que sean a color, de esta manera se reduce la complejidad de la cámara y sobre todo el ancho de banda consumido a la hora de la transmisión de dicha información.

La cámara elegida para nuestro robot es la camera module de raspberry PI, una cámara específica de raspberry PI de pequeño tamaño y fácil de instalar en nuestro robot.

Se conecta a la raspberry a través del interface CSI diseñado específicamente para la cámara. El bus CSI permite grande velocidades de transmisión de datos.

- Resolución de 5 megapíxel.
- Resolución de la imagen 2592 x 1944
- Velocidad máxima de transferencia de imágenes:
  - 1080p: 30fps
  - 720p: 60fps
- Conexión a Raspberry mediante un cable plano de 15 pines.
- Dimensiones 20 x 25 10mm



*Figure 39 Camera module Raspberry PI, obtenida de Raspberry*

#### 4.2.3.2. Odometría.

La odometría tiene por objetivo determinar cuál es la posición de un vehículo y su orientación en cada instante de tiempo en un lugar. La odometría estima la posición relativa de un sistema, en este caso, un robot, respecto a un punto de partida. Este método es sensible a errores debidos a la integración de las medidas de velocidad en el tiempo realizadas para obtener estimaciones de posición, por lo que en general se deberá de disponer de marcas que permitan sincronizar el sistema de nuevo con una posición en el espacio. (Cuánticos, 2011.)

## Ejemplo

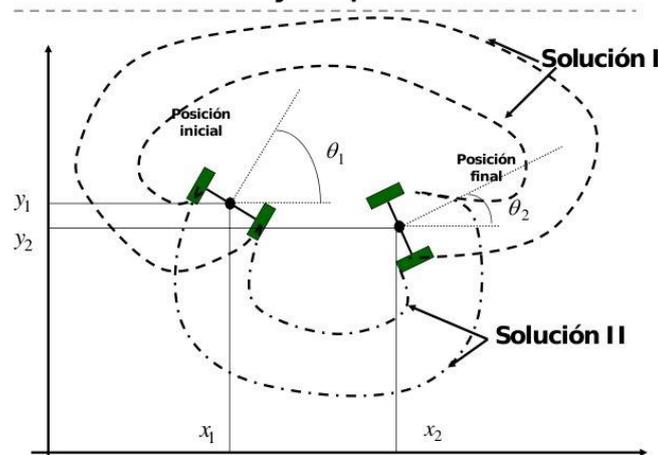


Figura40 Odometría, obtenida de ("Modelo odométrico diferencial de robots móviles," 2015.)

Existe una relación matemática para determinar la posición del robot partiendo del ángulo de giro de la rueda.

Considerando  $P$ , la precisión de los encoders,  $B$ , la distancia entre las ruedas y  $T_i$ ,  $T_r$ , los acumuladores de los encoders izquierdo y derecho respectivamente.

$$D_i = T_i * P$$

$$D_r = T_r * P$$

El desplazamiento realizado por el punto medio del eje imaginario que une las dos ruedas se calcula como:

$$D_c = \frac{D_i + D_r}{2}$$

El valor del ángulo de giro que se produce cuando las dos ruedas giran a velocidades diferentes se calcula como:

$$D\theta = \frac{D_r - D_i}{D}$$

A partir de la posición en el instante actual  $t$  ( $X_t$ ,  $Y_t$ ,  $\theta_t$ ) se calcula la posición en el instante  $t+1$ :

$$\theta_{t+1} = \theta_t + D\theta$$

$$x_{t+1} = x_t + D_c * \cos(\theta_{t+1})$$

$$y_{t+1} = y_t + D_c * \text{sen}(\theta_{t+1})$$

Para ello es necesario el uso de encoders ópticos, que son colocados en cada uno de los ejes de las ruedas acopladas a los motores. Los sensores que miden las revoluciones de un eje, son sensores del tipo propioceptivo, ya que nos dan información sobre el estado interno del robot. El giro de los motores originan un movimiento en las llantas de las ruedas originando un desplazamiento lineal del robot, a no ser que estas ruedas no patinen o se queden atascadas, con estos datos y conociendo la posición de partida del robot, se calcula la posición relativa del sistema.

Existen dos tipos de encoders ópticos, incremental y absoluto.

Los encoders ópticos incrementales constan en su forma más simple de un disco transparente con una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí, de un sistema de iluminación en el que la luz es colimada de forma correcta y de un elemento fotorreceptor. Este disco transparente ira alojado en eje cuya posición queramos medir, a medida que el eje gira, la luz atravesara cada una de las marcas y se generaran unos pulsos en el receptor, de esta forma es posible conocer la posición del eje.

Existe el problema de no saber si el robot está realizando un giro en un sentido o en otro, lo que conllevaría un conteo de vueltas defectuoso. Para resolverlo, basta con colocar otra franja de marcas desplazada de la anterior  $90^\circ$ , de modo que el tren de impulsos generado por estas marcas, este desplazado  $90^\circ$  respecto al otro.

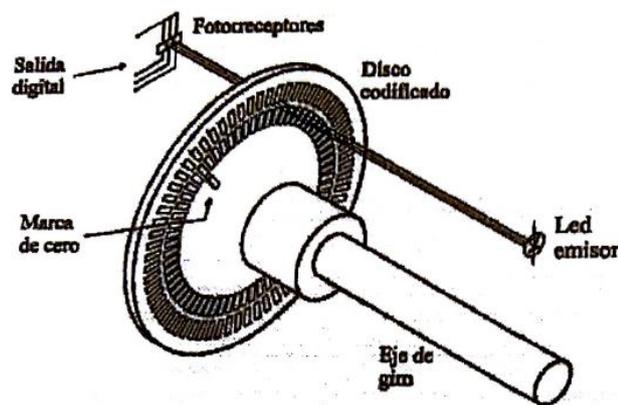
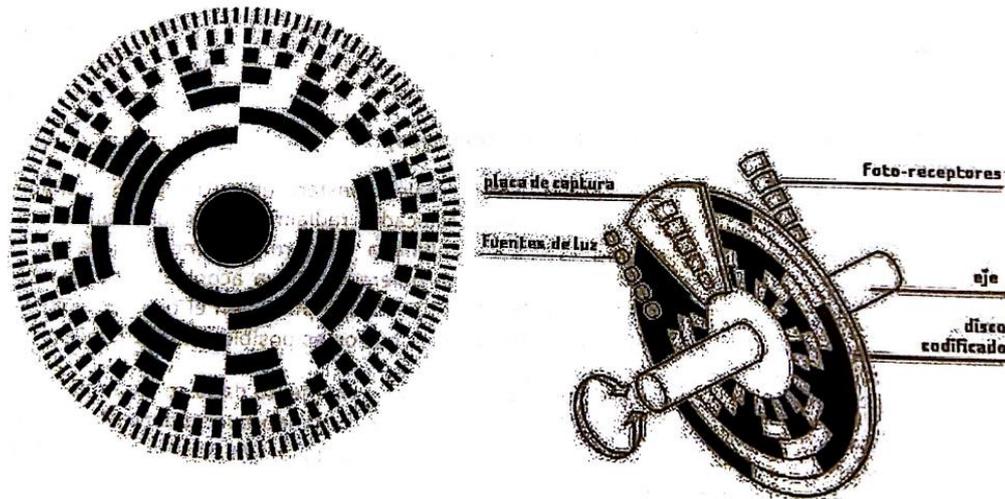


Figura41 Encoder incremental, obtenida de Apuntes Robótica 2015.

El funcionamiento básico de los encoders absolutos es similar a los incrementales. Se tiene una fuente de luz con lentes de adaptación, un disco graduado y unos fotorreceptores. En este caso el disco se divide en un número determinado de sectores (potencia de 2), codificándose cada uno de ellos bajo un código binario cíclico, (Código Gray).



*Figura42 Encoder absoluto, obtenida de Apuntes Robótica 2015*

No es necesario ningún tipo de contador o electrónica adicional para detectar el sentido de giro ya que cada posición está codificada de forma absoluta.

Un encoder incremental mide velocidad rotacional con la cual se puede obtener el desplazamiento de la posición del robot.

Un encoder absoluto mide exactamente la posición angular de la cual se puede obtener la velocidad.

Errores de la odometría:

No Sistemáticos: causados por interacción del robot con características impredecibles del medio.

Sistemáticos: son específicos del robot y no dependen del medio. ("clase.pdf," 2015.)

#### 4.2.3.3. Batería.

Uno de los aspectos más importantes dentro de cualquier sistema robótico, es la aportación de energía y son las baterías las que se encargan de ello.

Se definen como elementos que transforman la energía química de las reacciones en energía eléctrica y viceversa, pudiéndose usar para mover los motores, generar movimientos etc.

Las baterías están formadas por elementos individuales o celdas conectadas en serie, cada una de ellas tiene un voltaje interno que oscila entre 1,2V a 3,6V.

Las baterías tienen diferentes capacidades como 500mAh, 1700mAh, 3300mAh, así una batería de 1000mAh es capaz de entregar una corriente de 1000mA (1A) durante una hora.

Actualmente existe una gran gama de distintas baterías disponibles en el mercado.

#### 4.2.3.3.1. Batería de Litio-Polímero (Li-Po)

Son un tipo de baterías recargables usadas en sistemas eléctricos de radiocontrol. Estas baterías son la razón principal por la que el vuelo eléctrico puede ser viable respecto a los sistemas que usan combustible.

A diferencia de las baterías de Ni-Cd o Ni-Mh que poseen celdas de 1,2V, las celdas de estas baterías son de 3,7V y 4,2V totalmente cargada.

- 3,7V de batería = 1 celda \* 3,7V
- 7,4V de batería = 2 celdas \* 3,7V
- 11,1V de batería = 3 celdas \* 3,7V.

La capacidad, indica cuanta energía puede contener la batería, expresada en mAh. Es la manera de indicar cuanta carga en miliamperios podemos colocar en la batería durante una hora, así, por ejemplo, una batería que tiene 100mAh, se descargará totalmente en una hora con una carga de 1000 miliamperios. Si la misma batería tiene una carga de 500 mAh, durará dos horas.

Lo principal es que si quieres más tiempo de funcionamiento debes ampliar la capacidad. A diferencia del voltaje, la capacidad puede cambiar todo para tener más o menos tiempo de funcionamiento. A mayor capacidad, mayor es su tamaño y su peso.

La tasa de descarga es un parámetro fundamental en todas las baterías, es la rapidez con la que la batería puede ser descargada de forma segura. Cuando más rápido los iones fluyen del ánodo al cátodo indicará la velocidad de descarga. En las baterías Li-Po se denomina C.

Una batería con una tasa de descarga 10C, se descarga a un ritmo 10 veces más alto que la capacidad de la batería.

Suponemos que tenemos una batería de 1000mAh 10C, significa que puede dar una carga máxima sostenida de hasta 10.000 miliamperios.

Determinamos primero los mA por minuto, es decir  $1000\text{mAh}/60\text{minutos}=16,6\text{mA}$  por minuto. Multiplicamos este valor por su tasa de descarga, 10C,  $166\text{mA}$  por minuto y dividido por la capacidad de la batería (1000mAh) son alrededor de 6 min.

La resistencia interna de estas baterías aumenta conforme la batería se hace mayor. La mayoría poseen una tasa de descarga interna de 2 a 6 miliohms (0,002 a 0,006ohm), para el cálculo de la resistencia total en una batería con varias celdas, basta multiplicar el número de celdas por su resistencia interna.

Una batería de LiPo de 3,7V está totalmente cargada cuando alcanza los 4,2V, si se carga por encima de este valor, se pueden destruir las celdas y posiblemente se prenda fuego la batería. ("Baterías LiPo | Erle Robotics: Erle-copter," 2014.)



*Figura43 batería de Li-Po, obtenida de Erle Robotics.*

#### 4.2.3.3.2. Batería de Níquel-Cadmio (Ni-Cd)

Hoy en día, este tipo de baterías son las más usadas y están presentes en un 70% de los equipos electrónicos a nivel mundial, son utilizadas cuando se requiere una gran durabilidad, alta capacidad de proporcionar energía y bajo costo. Contienen materiales tóxicos y dañinos para el medioambiente. Estas baterías pueden sufrir el llamado efecto memoria e inversión de polaridad.



*Figura44 , batería Ni-Cd 6V, 500mah, obtenida de ("Bateria Ni-cd Aa 6v De 500mah Producto No-vo - R\$ 40,00," 2009.)*

- Efecto memoria, estas baterías están compuestas por unos pequeños cristales de cadmio, que, a mayor cantidad de ellos, mayor contacto directo con el electrodo proporcionando mayor eficiencia. Cuando ocurre este fenómeno, estos cristales aumentan de tamaño, por lo que es menor la cantidad de cristales en contacto lo que reduce la eficiencia. Ocurre por una mala carga de la batería. Se corrige descargando la batería hasta sus niveles mínimos.
- El efecto de inversión de polaridad ocurre si la batería es descargada por debajo de su nivel mínimo, este fenómeno es casi irreversible. ("Pagina nueva 2," 2015.)

#### 4.2.3.3.3. Batería de Níquel-Metal hidruro (Ni-Mh)

Formadas por un ánodo de oxidróxido de níquel y un cátodo de aleación de hidruro metálico. Elimina la peligrosidad el cadmio y se beneficia de una mayor capacidad de carga. Usadas actualmente para baterías de móviles. Permite almacenar casi un 30% más de energía que las baterías de Ni-Cd. No contienen metales tóxicos y no sufren el efecto memoria. ("Baterías de Ni-MH - EcuRed," 2015.)



*Figura45 batería Ni-Mh 4,8V, 2500mA, obtenida de ("Bateria Ni-Mh 4.8V 2500mA AAx4 c/conector BAT177 NIMO Electronic," 2015.)*

#### Comparación de baterías Ni-Cd y Ni-Mh

La batería Ni-Mh, posee mayor densidad de carga, no contiene cadmio (Cd) y aparentemente no tiene pérdidas por un mal uso, como inconvenientes, presenta una resistencia interna elevada, lo que la limita para aplicaciones de alta potencia, no admiten una carga tan rápida con en las baterías de Ni-Cd. Es bueno no cargarlas a régimen alto, ya que un sobrecalentamiento puede producir gases internos y sobrepresiones, reduciendo la vida útil de las celdas. El estado de carga total es también más difícil de detectar por lo que se recomienda el uso de cargadores que especifiquen su aptitud para cargar baterías de Ni-Mh, evitando así sobrecalentamientos indeseados. ("Baterías de NiCd y NiMH," 2009.)

#### 4.2.3.3.4. Batería Litio ion (Li-ion)

Estas baterías se presentan en celdas de poco espesor 0,5cm, interesantes para sistema de portátiles con poco espacio. Tienen un alto voltaje por celda de 3,6V, como tres celdas de Ni-Cd de 1,2V cada celda. ("Energía - Baterías para alimentación de robots - Robots Argentina," 2014.)

Diseñadas para el almacenamiento de energía, utiliza como electrolito, una sal de litio. Su mayor uso se da en la industria electrónica de gran consumo debido a su elevada capacidad energética y resistencia a la descarga, la ausencia del efecto memoria o la capacidad de trabajar a un número elevado de ciclos.

Ventajas:

- Elevada densidad de carga, acumula mayor carga por unidad de peso y volumen.
- Poco peso, a igualdad de carga almacenada, son menos pesada y ocupa menos que las baterías de Ni-Cd y Ni-Mh.
- Carecen de efecto memoria.
- Descarga lineal, lo que hace posible saber de manera muy fácil la carga almacenada en la batería.
- Baja tasa de autodescarga, se descarga más lento un 6%, que las baterías de Ni-Mh donde la autodescarga es de un 20% mensualmente.

#### Desventajas:

- Duración media. Depende de la cantidad de carga que almacene independientemente de su uso. Tienen una vida útil de 3 años.
- Soportan un número limitado de cargas, entre 300 y 1000, menos que las Ni-Cd e igual que las Ni-Mh.
- Su proceso de fabricación es más costoso que las otras baterías.
- Peor capacidad de trabajo en frío, ofrecen un rendimiento peor que las baterías de Ni-Cd y Ni-Mh, reduciendo su duración hasta en un 25%.("Baterías de Li-Ion," 2014.)

#### 4.2.3.3.5. Baterías de ácido-plomo

Estas baterías, usadas en los autos, están compuesta por seis celdas con un voltaje de 2,1V cada una de ellas. Cuando están cargadas están sumergidas en un electrolito de alrededor de 37% de ácido sulfúrico disuelto en agua.("Energía - Baterías para alimentación de robots - Robots Argentina," 2007.)



*Figura46 batería de ácido-plomo, obtenida de baterías de alimentación de robots, Eduardo J.Carletti*

#### 4.2.3.4. Giroscopio

Los giroscopios o girómetros, son dispositivos que miden o mantienen el momento de rotación. Son pequeños sensores para medir la velocidad angular, medida en grados por segundo o revoluciones por segundo.

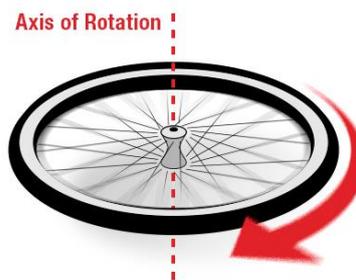


*Figura47 Giroscopio, obtenida de 5Hertz Electrónica.*

Se puede emplear para determinar la orientación y se encuentra en la mayoría de sistema autónomos. Se puede usar para equilibrar un robot.

#### 4.2.3.4.1. Funcionamiento

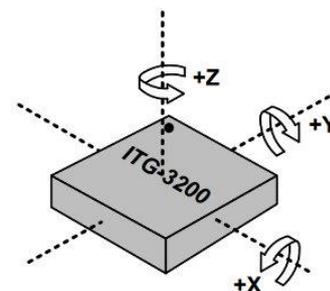
Cuando un objeto gira alrededor de un eje, aparece la velocidad angular.



*Figura48 Velocidad angular, obtenida de 5Hertz Electrónica.*

Alineando el eje de rotación de la rueda con el giroscopio de la siguiente manera, estaremos midiendo la velocidad angular del eje z, mientras que los otros dos ejes no son capaces de medir esa velocidad.

Existen giroscopios de uno, dos y tres ejes, el de tres ejes puede medir la rotación en torno a los tres ejes X, Y y Z.



*Figura49 orientación del giroscopio ITG 3200, obtenida de 5Hertz Electrónica.*

#### 4.2.3.4.2. Conexión

Las conexiones hardware principales son el interfaz de conexión y la alimentación.

La interfaz de conexión puede ser analógica o digital, los que usan una interfaz digital por lo general usan el SPI o protocolos de comunicación I2C. Permiten una fácil

conexión con un microcontrolador. Una de las limitaciones es la velocidad de muestro máxima. El I2C tiene una frecuencia de muestreo máximo de 400Hz. El SPI puede tenerla mucho más alta.

Los giroscopios con una interfaz analógica, representan la velocidad de rotación con un voltaje variable.

Por lo general la tensión de alimentación suele ser 5V o menos.

#### 4.2.3.4.3. Selección

A la hora de seleccionar un giroscopio debemos tener en cuenta una serie de especificaciones como el alcance, la sensibilidad o el off set.

- Alcance, el rango de medición, o rango de escala.
- Sensibilidad, se mide en mV por grado por segundo ( $\text{mV}/^\circ/\text{s}$ ), se determina la cantidad de los cambios de voltaje por velocidad angular dada.
- Off set, como todos los sensores, los valores medidos tendrán una cierta cantidad de error, este se puede detectar midiendo el valor de la salida cuando el sistema este estático, el valor esperado seria  $0^\circ/\text{s}$ , pero siempre se ve un ligero error. El aumento de la temperatura, es la principal causa de ello, para solucionarlo se colocan sensores de temperatura para corregir los cambios que puedan originarse, con el fin de corregir estos errores, el sensor debe ser calibrado, realizándose cuando el giroscopio está quieto, reduciéndose a cero todas sus variables.

Girómetros más usados:

*Tabla 1 tabla de girómetros más usados, obtenida de 5Hertz Electrónica*

Dispositivo	Ejes	Rango	Interfaz	Requerimientos de energía	Características
<b>IDG1215</b>	2 (X,Y)	$\pm 67^\circ/\text{s}$	Analógica	3V100 $\mu$ A	-Incluye amplificador y filtro paso bajo.
<b>LPR503AL</b>	2 (X,Y)	$\pm 30^\circ/\text{s} \pm 120^\circ/\text{s}$	Analógica	2.7V a 3.6 V 6.8 mA	- Filtro paso bajo. - SEFL-TEST. - Power down.

## ESTADO DEL ARTE

<b>LPR5150AL</b>	2 (X,Y)	$\pm 1500^\circ/\text{s}$ $\pm 6000^\circ/\text{s}$	Analógica	2.7V a 3.6 V 6.8 mA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Filtro paso bajo.</li> <li>- SEFL-TEST.</li> <li>- Power down.</li> </ul>
<b>ITG3200</b>	3 (X,Y,Z)	$\pm 2000^\circ/\text{s}$	Digital I2C- 16 bits	2.1V a 3.6V 6.5 mA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Filtro paso bajo programable.</li> <li>- Sensor de temperatura.</li> </ul>
<b>MPU-6050</b>	3 acelerómetro (X,Y,Z) 3 girómetro (X,Y,Z)	$\pm 250$ , $\pm 500$ , $\pm 1000$ , and $\pm 2000^\circ/\text{sec}$ $\pm 2\text{g}$ , $\pm 4\text{g}$ , $\pm 8\text{g}$ and $\pm 16\text{g}$	Digital I2C	2.375V- 3.46VG-3.6 mA- 500 $\mu$ A	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Filtro paso bajo programable.</li> <li>- Detección de orientación.</li> <li>- Interrupciones programables.</li> <li>- Detección de caída libre.</li> <li>- SEL-TEST.</li> <li>- Detección de golpe.</li> </ul>
<b>LPY503AL</b> 	2 (X,Z)	$\pm 30^\circ/\text{s}$ $\pm 120^\circ/\text{s}$	Analógica	2.7 V a 3.6 V6.8mA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Filtro paso bajo.</li> <li>- SEFL-TEST.</li> <li>- Power down.</li> </ul>
<b>MPU-3050</b>	3 (X,Y,Z)	$\pm 250$ , $\pm 500$ , $\pm 1000$ , and $\pm 2000^\circ/\text{sec}$	Digital I2C	2.1V a 3.6V 6.1 mA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interrupciones programable soporta características tales como el reconocimiento de gestos, paneo, detección de cero movimiento, detección de golpe y sacudida.</li> <li>- Filtro paso bajo programable.</li> <li>- Funcionalidad podómetro.</li> </ul>
<b>MPU-6000</b>	3 acelerómetro (X,Y,Z) 3 girómetro (X,Y,Z)	$\pm 250$ , $\pm 500$ , $\pm 1000$ , and $\pm 2000^\circ/\text{sec}$ $\pm 2\text{g}$ , $\pm 4\text{g}$ , $\pm 8\text{g}$ and $\pm 16\text{g}$	Digital I2C	2.375V- 3.46VG-3.6 mA- 500 $\mu$ A	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Filtro paso bajo programable.</li> <li>- Detección de orientación.</li> <li>- Interrupciones programables.</li> <li>- Detección de caída libre.</li> <li>- SEL-TEST.</li> </ul>

					- Detección de golpe.
<b>MAX-21000</b>	3 (X,Y,Z)	$\pm 31.25/\pm 62.50/\pm 125/\pm 250/\pm 500/\pm 1k/\pm 2k$ °/s	Digital I2C, SPI	1.71V a 3.6V 5.4 mA	-Filtro paso bajo programable.(Interrupciones programable)
<b>BMG160</b>	3 (X,Y,Z)	$\pm 125^\circ/s$ a $\pm 2000^\circ/s$	Digital I2C, SPI	2.4V a 3.6V 5mA	- Filtro paso bajo. - Sensor de temperatura.

## 5. DESARROLLO

Terminado el proceso de búsqueda, estudio y selección de los distintos sistemas y componentes, en este apartado se procede a la explicación del diseño mecánico, diseño electrónico y el control sobre el robot.

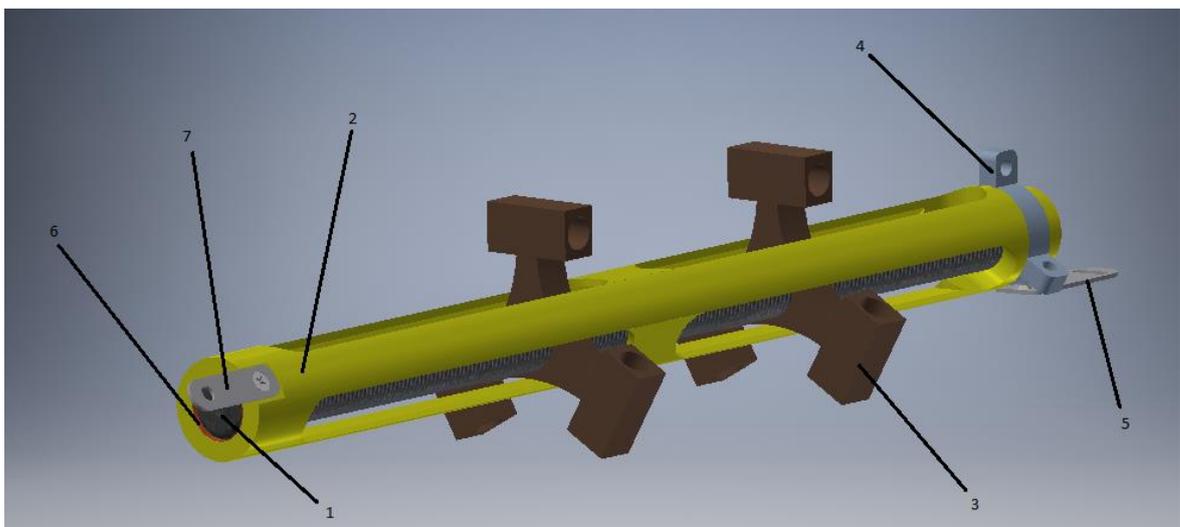
### 5.1. DISEÑO MECÁNICO

Antes de empezar a elaborar y entender el porqué de este diseño mecánico, debemos saber que, dentro de las restricciones del sistema, hay una condición por encima del resto que repercutirá en el diseño final como es el diámetro de la tubería en la que queremos trabajar, el diseño se ha centrado en disminuir todo lo posible el diámetro de la tubería en la que el robot puede actuar pudiéndose adaptar también a tuberías de mayor diámetro siempre dentro de las limitaciones del robot.

Vamos a dividir este apartado en tres secciones como son el diseño del cuerpo central del robot, el diseño de las extremidades del robot y los cálculos pertinentes.

#### 5.1.1. DISEÑO DEL CUERPO CENTRAL

Esta es la disposición del cuerpo central de robot.



*Figura50 Cuerpo central del robot, diseño propio*

Está diseñado así para que el cuerpo vaya siempre en el centro de la tubería, y sean las extremidades las que estén en contacto con las paredes del conducto.

Formado principalmente por:

1. Un husillo TR15\*3
2. Una carcasa protectora.
3. Dos acoplamientos en Y a 120°.
4. Una oreja triple a 120°.
5. Sujeción para el motor.
6. Dos cojinetes GSM-1516- 15.
7. Sujeción par el encoder

El cuerpo, es el eje del robot, sobre él van alojados y acoplados el resto de sistemas mecánicos y electrónicos.

Funciona de la siguiente manera, cuando el motor del husillo, (colocado en la zona posterior) gire a derechas, los dos acoplamientos en Y se mueven hacia atrás al mismo tiempo y siempre guardando la misma distancia entre ellos elevando las extremidades y cuando el motor realiza el movimiento a izquierdas, los acopladores se mueven hacia delante y por consiguiente, las extremidades bajan, de esta manera se consigue que el robot se adapte a distintos diámetro de tuberías.

La disposición del acoplador en "Y" y la orejeta a 120°, es porque habrá un grupo de 3 extremidades separadas 120° que garantizan la estabilidad del robot.

Dispone de dos rodamientos en los extremos del husillo para permitir un buen deslizamiento de este y no dañe o deteriore la carcasa protectora.

La elección de los componentes es muy importante ya que se debe mirar hacia dos puntos clave como es la oxidación y corrosión y a su vez intentando que el peso del robot sea lo mínimo posible, bajo estos dos conceptos, el husillo es de acero inoxidable mientras que los acoplamientos en 120° son de bronce, ¿Por qué no poner los dos de acero inoxidable?, esto es porque al engranar acero con acero existe el riesgo de tirantes o puede llegar a gripar, de modo que para asegurarnos he elegido esta pareja de materiales. El husillo tiene un diámetro de 15mm y una longitud de 30mm.

La carcasa protectora es de polietileno de alta densidad, resistente al agua y a los golpes originados por algún desprendimiento dentro de la tubería. Es un tubo hueco de diámetro exterior 25mm e interior 15,5. La forma tan especial de esta carcasa es debido a que había que diseñar algo que protegiera al husillo y que a la vez pudiera permitir el movimiento de los acopladores en Y, se decidió hacer dos ranuras separadas por un puente, en cada hueco, se mueve cada una de las Y, sin que exista la manera que puedan llegar a chocar y también de esta manera, se gana sección para evitar un posible pandeo o flexión que pudiera llegar a aparecer.

La oreja triple a 120° es de acero inoxidable encaja en la carcasa protectora de diámetro interior 20,2mm y exterior 24,5mm, los agujeros de las "orejas" tiene un diámetro de 4mm. La sujeción para el motor de plástico de alta densidad.

En la parte posterior del robot va alojado el motor con reductora de husillo que a través de un acoplamiento irá conectada con el husillo central y provocará el giro del mismo, mientras que, en la parte delantera del husillo, a través de otro acoplamiento se colocará un encoder.

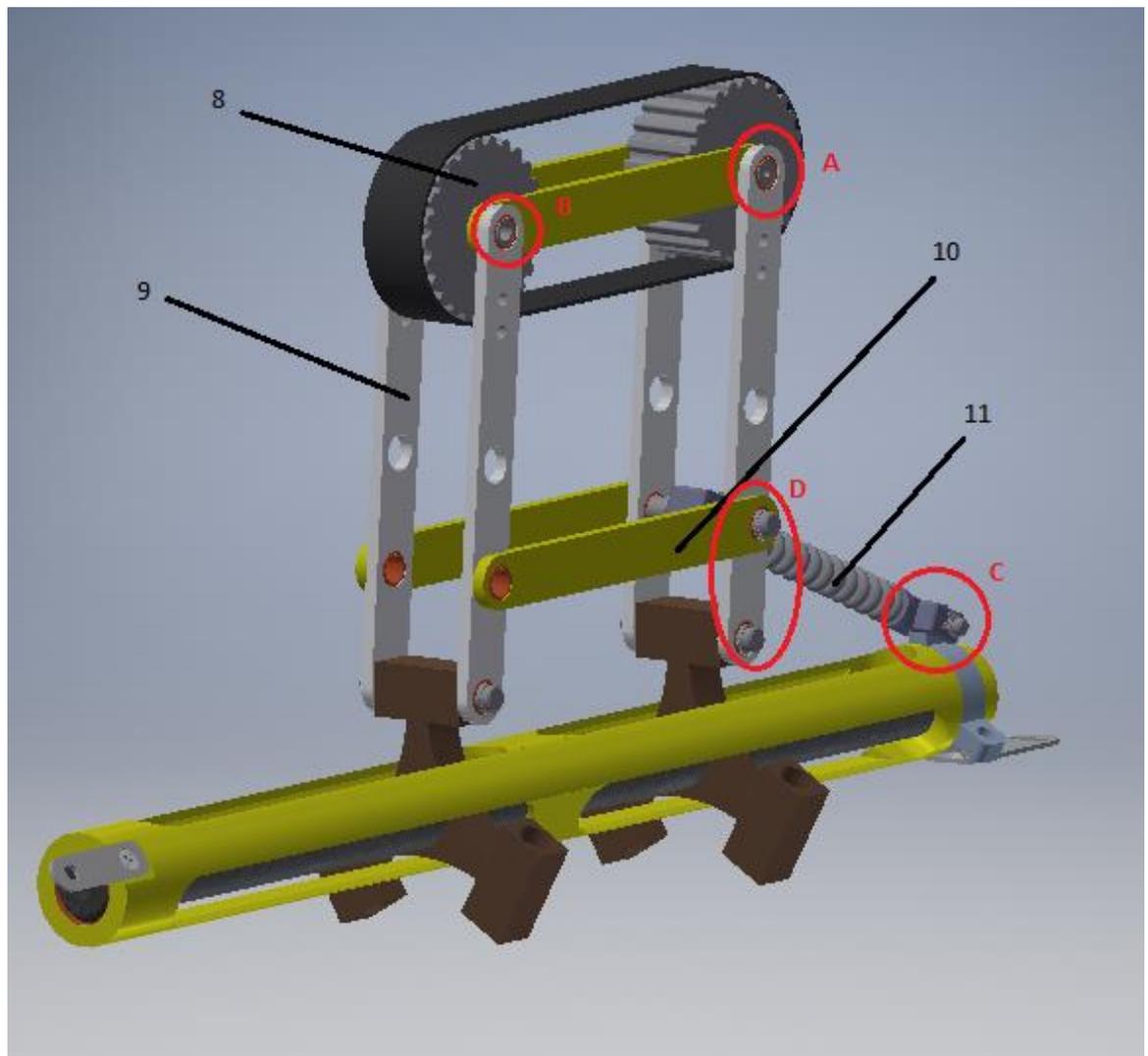
En la parte delantera del sistema, sobre la carcasa, hemos dejado el espacio necesario para el microcontrolador y algunos componentes electrónicos.

### ***5.1.2. EXTREMIDADES DEL ROBOT***

Veamos en qué consisten ahora las extremidades del robot, son los tres iguales, de modo que vamos a explicar una de ellas.

Para conocer cuando el robot ha llegado a extenderse por completo y cuando se ha recogido al mínimo, se ha dispuesto dos finales de carrera mecánicos. Uno de ellos se accionará cuando el robot haya completado su máxima apertura y el otro se accionará cuando el robot alcance su menor tamaño, haciendo posible de esta manera la detección de los motores o una regulación de ellos para evitar un sobrecalentamiento o sobrecargas.

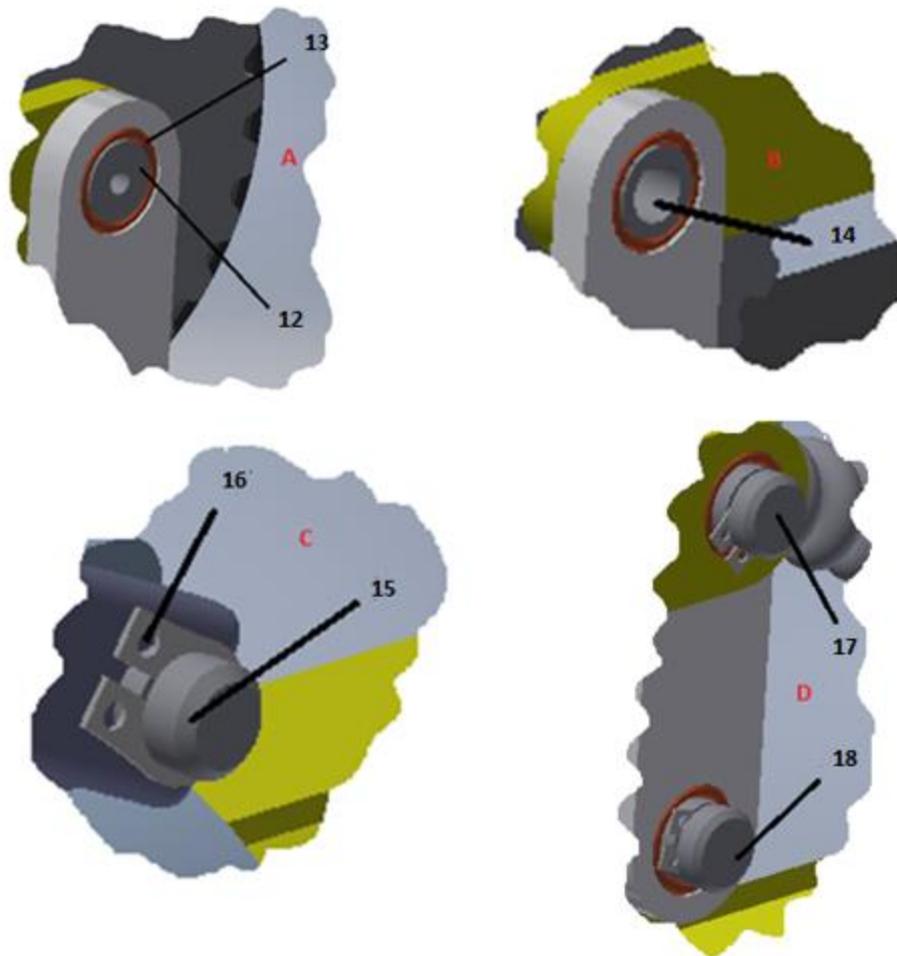
- 2 Finales de carrera D2HW, Omron



*Figura51 Extremidad del robot, diseño propio*

Este bloque está principalmente conformado por:

- 8. 3 Crawler.
- 9. 12 Segmento.
- 10. 6 Segmento 2.
- 11. 3 Amortiguación.



*Figura52 Detalle extremidad, diseño propio*

12. 3 Eje motor crawler.

13. 36 Cojinetes CNS 9349 - 6 x 8 x 6

14. 3 Eje encoder.

15. 3 Eje coto suspensión.

16. 36 Grupilla ANSI B 27.7M - 3AMI-6

17. 3 Eje largo suspensión.

18. 6 eje Y.

Ya hemos visto lo que sucede cuando el motor gira a izquierdas o derechas con el husillo, bien, ahora cuando los dos acoplamientos en Y o 120º avanzan o retroceden.

Los segmentos verticales acompañan el movimiento, esto no sería posible sin los segmentos horizontales que obligan a que la distancia entre los ejes del crawler sea constante, siempre la misma independientemente de la amplitud de las extremidades.

Existe la posibilidad, debido a la versatilidad del diseño, el poder ensamblar la amortiguación a otros de los agujeros hechos en el segmento vertical (gris) y así cambiar los valores de amplitud del robot.

La amortiguación trasera cumple una doble función, además de ser de ayuda para sujetar la estructura y ayudar a la apertura y cerradura de las extremidades, podría absorber algún pequeño desperfecto en el interior de las paredes de la tubería como bultos en las paredes o bollos.

En lugar de incorporar un amortiguador, también existe la variante de no colocarlo. A través de inventor, software utilizado para la elaboración del muelle y del resto del diseño, obtenemos todas las características del muelle.

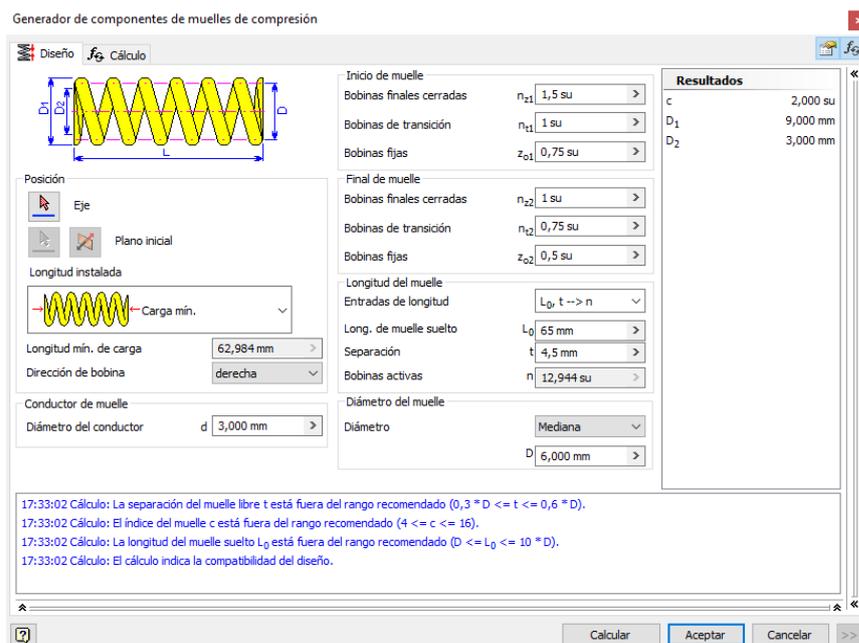


Figura53 Cálculos muelle, diseño propio

Y aquí los resultados,

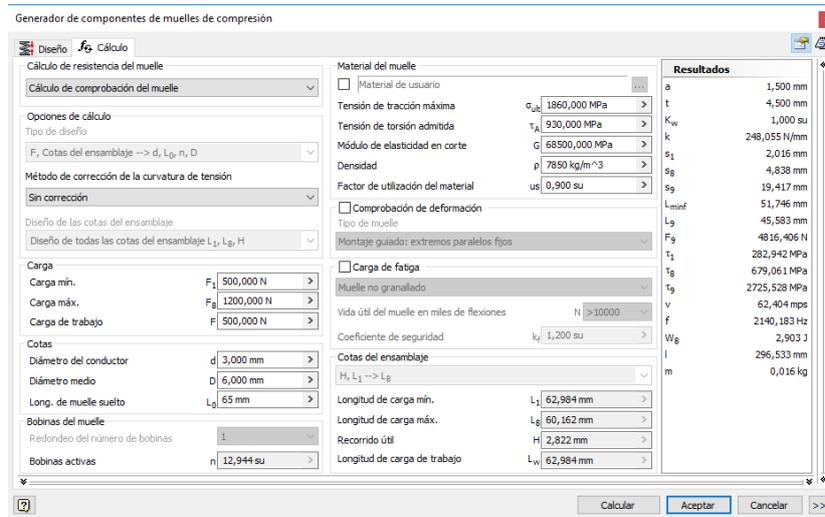


Figura54 Resultados Muelle, diseño propio

La idea original no comprendía esta opción de acoplar un muelle para la absorción de impactos cuando el robot avanza, pero debido a su diseño creo que puede ser una buena variante que se podría tener en cuenta y que se debería estudiar más detenidamente.

Todos los ejes están asegurados con grupillas para impedir que el eje se salga por alguno de los dos lados al igual que las partes que más sufren a torsión y están girando llevan rodamientos.

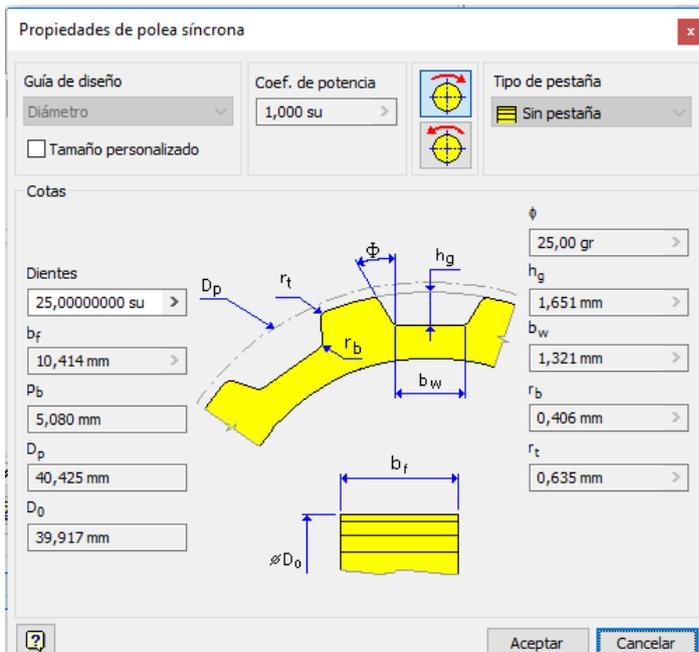


Figura55 Diseño Crawler, diseño propio

El crawler está formado por dos engranajes rectos cuyas medidas son las siguientes.

Más adelante explicaremos de donde salen los valores de velocidad, potencia y par, pero si introducimos estos valores dentro del software en 3D inventor usado para la creación del diseño mecánico, vemos como el cálculo es correcto.

La distancia entre centros es de 88,9mm.

Anteriormente hemos dicho que el sistema se distribuye en 120°, es decir, en las imágenes solo se está viendo un tercio de lo que realmente es el robot, en la siguiente imagen mostramos el diseño mecánico del robot completo junto con los motores y las reductoras sin las respectivas conexiones, ya que ese apartado se estudiará en el estudio electrónico.

Posteriormente a este diseño se le ha añadido todos los elementos de unión pertinentes como pernos o pasadores, además de la raspberry PI, la module camera así como sus protecciones estancas contra la humedad y el polvo, los prensaestopas PG 7 para que tanto la salida y entrada de las conexiones estén protegidas.

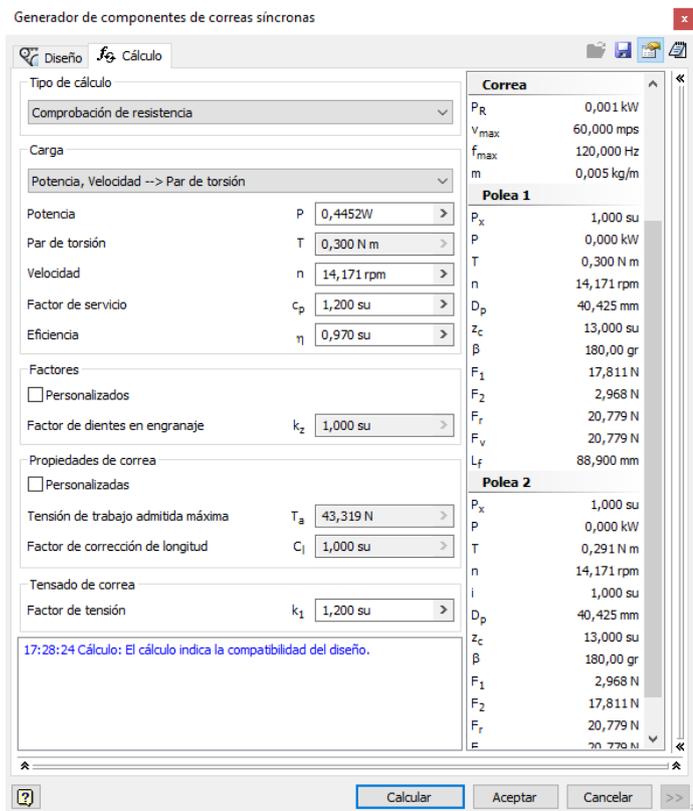


Figura56 Calculos Crawler, diseño propio



*Figura57 Robot recogido, diseño propio*



*Figura58 Robot extendido, diseño propio*

Aquí vemos la disposición de los motores, reductoras y encoders en el robot, sus placas de sujeción atornilladas a los segmentos de unión y los finales de carrera.

Con este diseño, terminado, podemos conocer los diámetros de las tuberías en los que nuestro robot puede llevar a cabo su actividad.

*Tabla 2 Diámetros, elaboración propia*

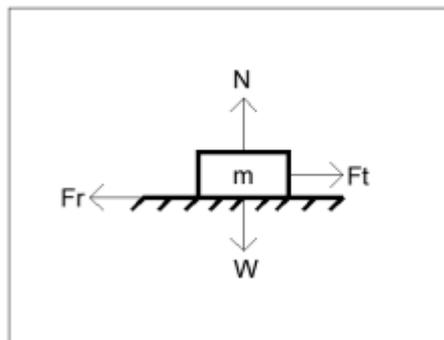
<b>DIÁMETRO MÁXIMO</b>	<b>294mm</b>
<b>DIÁMETRO MÍNIMO</b>	<b>172mm</b>

### 5.1.3. CÁLCULOS DE LOS MOTORES

En este apartado vamos a realizar el cálculo del par y la potencia que requieren nuestros motores para llevar a cabo el desplazamiento del robot, es decir, los motores encargados del movimiento de las ruedas del crawler.

#### **Cálculo del par y la potencia para el sistema de avance del robot.**

##### **Diagrama del Cuerpo Libre**



*Figura59 Diagrama cuerpo libre*

Dispondremos de tres motores, uno por crawler situados en las ruedas posteriores mientras que las ruedas delanteras no serán motrices, es decir, no llevan motor.

Una vez conozcamos los valores, podremos decidir que motores es el más adecuado para nuestro robot.

Para empezar los cálculos, hemos de definir una velocidad de avance, en este caso

Tabla 3 Velocidades, elaboración propia

<b>Velocidad lineal</b>	<b>3 cm/seg</b>
<b>Aceleración</b>	<b>44cm/seg<sup>2</sup></b>

Es necesario también los datos de las ruedas del crawler.

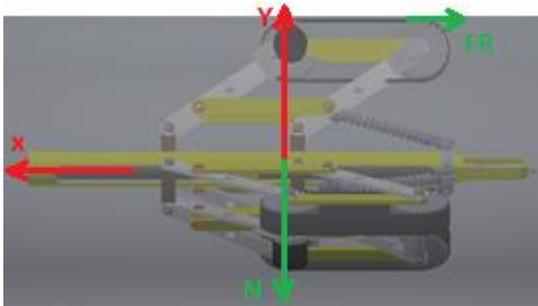
Tabla 4 Datos crawler, elaboración propia

<b>DATOS CRAWLER</b>	
<b>Diámetro primitivo</b>	40,425mm
<b>Radio primitivo (Rp)</b>	20,2125mm

1. El primer paso es calcular la velocidad angular del sistema.

$$Vel. angular = \frac{Vel. linal}{Rp} \rightarrow Wr = \frac{Vl}{Rp} = \frac{\frac{0,03m}{s}}{0.0202125m} = \frac{800}{539} \approx 1,484 \frac{rad}{s} = 14,17 rpm.$$

- Ahora vamos a estudiar el movimiento del robot en un plano horizontal.



Para que el robot empiece el movimiento se debe vencer la fuerza de rozamiento.

$$\sum F_Y = 0 \rightarrow N = W$$

$$\sum F_X = m * a$$

$$F_t - F_r = m * a \rightarrow F_t = m * a + F_r$$

$$F_t = m * a + \mu * N$$

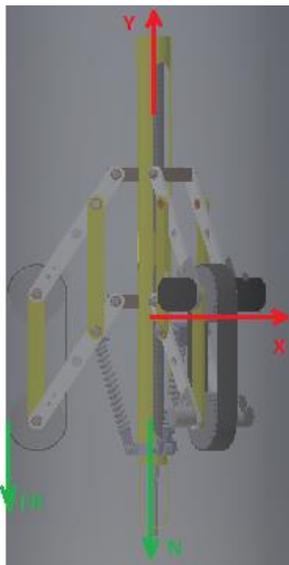
$$F_t = 2,5Kg * \frac{0,044m}{s^2} + 1 * \frac{9,8m}{s^2} * 2,5Kg = 24,61N$$

Este valor se dividirá entre 4 debido a que pondremos 3 motores para la locomoción del robot.

$$F_t = \frac{24,61}{3} = 8,20N$$

$F_t$  es la fuerza necesaria que debe ser proporcionada a cada motor.

- $\mu$ , Coeficiente de rozamiento, El coeficiente de rozamiento entre el caucho y la superficie de acero de los depósitos varía entre 1 y 4 por lo que se usará el valor de 1.
- $N$ , Fuerza normal, resulta del producto del peso por la gravedad, el peso es estimado, el software nos da un peso total de la estructura, no exacto.
  - Cálculo del robot en un plano vertical.



Este es el caso más desfavorable ya que para que el robot inicie el movimiento, además de vencer la fuerza de rozamiento debe vencer la fuerza de su propio peso.

$$\sum F_x = m * a$$

$$F_t - F_r - W = m * a \rightarrow F_t = m * a + F_r + W$$

$$F_t = m * a + \mu * N + F_r$$

$$F_t = 2,5Kg * \frac{0,044m}{s^2} + 1 * \frac{9,8m}{s^2} * 2,5Kg + 2,5Kg * \frac{9,8m}{s^2}$$

$$F_t = 49,11N$$

Este valor se dividirá entre 3 debido a que pondremos 3 motores para la locomoción del robot.

$$F_M = \frac{49,11}{3} = 16,37N$$

## 2. Par necesario.

Realizamos los cálculos más desfavorables porque con ellos nos aseguramos que el robot funcione en el resto de casos.

$$T = F * Rp = 49,11 N * 0,020125m \approx 1Nm$$

Este valor sería el correcto si tuviéramos solo un motor, pero como disponemos de tres, este valor hay que dividirlo entre los tres.

$$\frac{Tt}{3} = \frac{1Nm}{3} = 0,33Nm \text{ por cada motor}$$

- **T**, Par del motor.
- **F**, es la fuerza que hay que vencer.
- **Rp**, radio primitivo.

## 3. Potencia necesaria por cada motor

$$P = F * V = 16,37N * 0,03 \approx 0,5W$$

Si escogemos un motor con esta potencia, significaría que, para poder empezar el movimiento, el motor debe estar trabajando a su 100% potencia, con el riesgo que supone eso, de modo que lo ideal sería encontrar un motor que supere estas especificaciones para evitar quemar el motor u otros problemas por una sobreexplotación de los motores.

El rendimiento de los motores eléctricos es del 80%, por lo tanto:

$$P = 0,5 * 1,2\% = 0,6W$$

Para un motor de 12V, la intensidad consumida es de 500mA

$$P = V * A \rightarrow A = \frac{P}{V} = \frac{0,6W}{12V} = 0,05A = 50mA$$

### **Cálculo del par y la potencia para el husillo.**

A continuación, se calcula el par y la potencia necesarias para el motor encargado de hacer girar el husillo y provocar así el desplazamiento de los acopladores a 120°.

Datos del husillo:

Tabla 5 Datos husillo, elaboración propia

DATOS HUSILLO	
<b>Diámetro</b>	15 mm
<b>Paso</b>	3 mm
<b>Longitud</b>	300 mm
<b>Material</b>	Acero F114
<b>Modelo</b>	TR15 x 3

Datos de la rosca (Acopladores a 120°)

Tabla 6 Datos rosca, elaboración propia

DATOS ROSCA	
<b>Paso</b>	3 mm
<b>Material</b>	Bronce
<b>Modelo</b>	88/12
<b>Coef. Fricción (<math>\mu</math>)</b>	Seco = 0,1 Lubricado = 0,5

Las fórmulas para calcular el momento torsor y la potencia son las siguientes:

$$Mt = Q * \frac{d_m}{2} * \text{tag}(\beta + \varphi)$$

$$P = Mt * w$$

- w, velocidad angular (rad/s).
- Q, fuerza de empuje o que tienen que vencer los acopladores a 120°.

- $D_m$ , diámetro del tornillo del eje.
- $\beta$ , ángulo del tornillo, de la rosca del eje.
- $\varphi$ , ángulo de rozamiento.
- $M_t$ , momento torsor.

La fuerza de empuje  $Q=15N$

1. Ángulo del tornillo, rosca.

$$\operatorname{tag} \beta = \frac{P}{\pi * d_m} = \frac{3}{13,5 * \pi} = 0,07073 \rightarrow \beta = 4,0461^\circ$$

$$d_m = d_{ex} - \frac{P}{2} = 15mm - \frac{3}{2} = 13,5mm$$

2. Ángulo de rozamiento.

$$\varphi = \mu * \pi * 0,7 = 0,5 * \pi * 0,7 = 1,099^\circ$$

3. Momento torsor y potencia.

$$M_t = Q * \frac{d_m}{2} * \operatorname{tag}(\beta + \varphi)$$

$$M_t = 15 * \frac{13,5}{2} * \operatorname{tag}(4,0461 + 1,099) = 9,12Nm$$

Para el cálculo de la potencia es necesario saber la velocidad lineal del avance del husillo.

La distancia recorrida aproximadamente por los dos acopladores en  $120^\circ$  es de 35mm entre el punto de máxima apertura de las extremidades del robot y el menor tamaño posible que el robot puede adoptar.

Definimos también, que sea 1 minuto, el tiempo que tarde en realizar este movimiento, por lo que:

$$\text{Velocidad lineal} = \frac{\text{espacio}}{\text{tiempo}} = \frac{0,035m}{60\text{seg}} = 5,83 * 10^{-4} \frac{m}{s}$$

$$\text{Velocidad angular} = \frac{\text{Vel. linal}}{\text{radio}} = \frac{5,83 * 10^{-4} \frac{m}{s}}{7,5 * 10^{-3}m} = \frac{0,0777\text{rad}}{s} = 0,742\text{rpm}$$

$$P = Mt * w = 9,12Nm * \frac{0,0777rad}{s} = 0,708W$$

El rendimiento de los motores eléctricos es del 80%, por lo tanto:

$$P = 0,708 * 1,2\% = 0,85W$$

Para un motor de 12V, la intensidad consumida es de 500mA

$$P = V * A \rightarrow A = \frac{P}{V} = \frac{0,85W}{12V} = 0,071A = 70,83mA$$

### 5.1.4. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

La función de transferencia es un modelo matemático que a través de un cociente relaciona la respuesta de un sistema con una señal de entrada.

Se define como la relación entre la transformada de Laplace de la variable de salida y la transformada de Laplace de la variable de entrada, suponiendo que todas las condiciones iniciales se hacen iguales a cero. La función de transferencia de un sistema (o elemento) representa la relación que describe la dinámica del sistema considerado.

La función de transferencia puede definirse solamente para un sistema lineal y estacionario (de parámetros constante). (Sistema de control moderno, 10ª edición, editorial: Prentice Hall)

Entonces es:

$$\frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

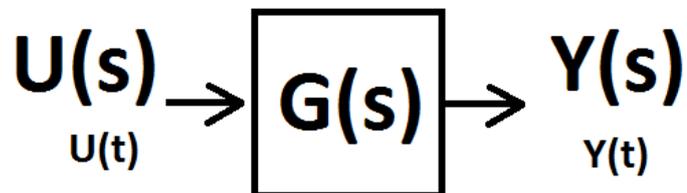


Figura60 Función de transferencia, elaboración propia

Si el sistema es lineal, o se ha linealizado entonces:

$$a_0 u(t) + \frac{a_1 * du(t)}{dt} + \frac{a_2 * d^2 u(t)}{dt^2} + \dots = b_0 y(t) + \frac{b_1 * dy(t)}{dt} + \frac{b_2 * d^2 y(t)}{dt^2} + \dots$$

Aplicamos la transformada de Laplace considerando el sistema en equilibrio para  $t < 0$

$$a_0 U(s) + a_1 s U(s) + a_2 s^2 U(s) \dots = b_0 Y(s) + b_1 s Y(s) + b_2 s^2 Y(s) \dots$$

$$(a_0 + a_1 s + a_2 s^2 \dots) * U(s) = (b_0 + b_1 s + b_2 s^2 \dots) * Y(s)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 \dots}{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 \dots}$$

### Función de transferencia de nuestro sistema

Esta es la función de transferencia de nuestro sistema, tanto para conjunto formado por el crawler con su respectivo motor y reductora como para el formado por el husillo, de modo que trataremos cada uno por separado.

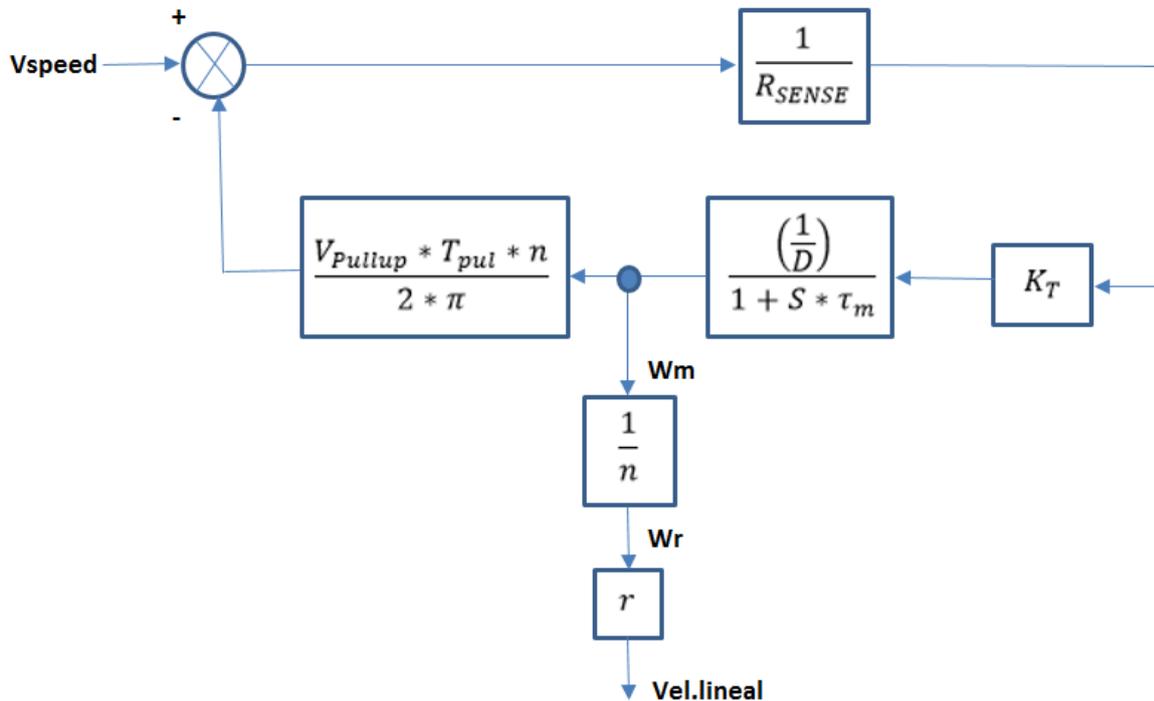


Figura61 Función de transferencia, elaboración propia

**F.T Crawler.**

Variables:

- $K_{\tau}$ , constante motor = 7,13 mNm/A.
- $D$ , rozamiento viscoso del cojinete.
- $J$ , momento inercia de las ruedas + motor.
- $\tau_m = J/D$ .
- $\omega_m$ , Velocidad angular.
- $T_{pul} = 0,6 * R_{pulse} * C_{pulse}$ .
- $R_{sense} = 240\Omega$
- Número de pares de polos = 2.
- $V_{pullup} = 5V$ .

Cálculos:

- $J$

$$J = \frac{1}{2} * m * R^2 * 2 = \frac{0,5 * 0,155 * [20,2125 * 10^{-3}]^2}{324} * 2 = 1,95 * 10^{-7} Nm$$

- $D$ , la viscosidad solo se manifiesta en fluidos en movimiento , se ha definido como la relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad.

("Viscosidad," 2016)

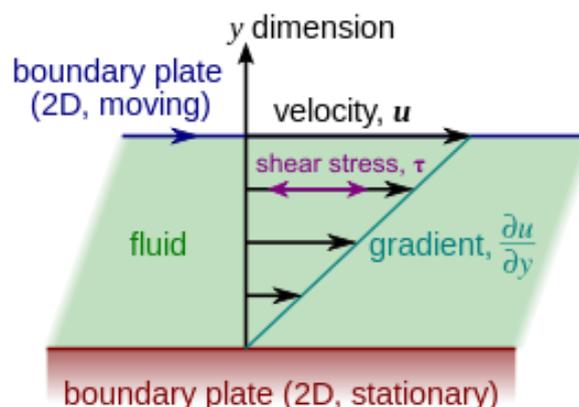


Figura62 Viscosidad

Ilustración 47, viscosidad, obtenida de Wikipedia.

$\mu$ , Coeficiente de fricción, grasa = [0,09]

$$F_R = \mu * A * \frac{u_0}{h} \rightarrow \tau_{xy} = \mu * \left(\frac{du}{dy}\right)$$

U, Velocidad del fluido.

Y, holgura del cojinete.

La velocidad del fluido está en función de la velocidad de giro del cojinete multiplicado por el radio del eje, y la velocidad de giro del cojinete a su vez, está relacionada con la velocidad de giro del motor.

$$Y = \text{diámetro interior del cojinete} - \text{diámetro del eje} = 6,068 - 6 = 0,068\text{mm}$$

Datos del fabricante.

<b>GSM-0607-17.5</b>	6,0	+0,010	+0,040	7,0	17,5
<b>GSM-0608-015</b>	6,0	+0,020	+0,068	8,0	1,5
<b>GSM-0608-025</b>	6,0	+0,020	+0,068	8,0	2,5
<b>GSM-0608-04</b>	6,0	+0,020	+0,068	8,0	4,0
<b>GSM-0608-05</b>	6,0	+0,020	+0,068	8,0	5,0
<b>GSM-0608-055</b>	6,0	+0,020	+0,068	8,0	5,5
<b>GSM-0608-06</b>	6,0	+0,020	+0,068	8,0	6,0
<b>GSM-0608-08</b>	6,0	+0,020	+0,068	8,0	8,0
<b>GSM-0608-09</b>	6,0	+0,020	+0,068	8,0	9,5

\* nach dem Einpressen; Messverfahren ► Seite 59

Figura63 Fabricante cojinetes, obtenida de IGUS

$$U = \text{Vel. eje cojinete} * \text{Reje} = Wr * \text{Radio rueda crawler} * \text{Radio coj.} =$$

$$= Wr * 0,0202125\text{m} * 3 * 10^{-3}\text{m} = 6,06375 * 10^{-5} * Wr \left(\frac{\text{rad} * \text{m}^2}{\text{s}}\right)$$

$$\tau_{xy} = \mu * \left(\frac{du}{dy}\right) = 0,09 * \frac{6,06375 * 10^{-5} * Wr}{0,068 * 10^{-3}\text{m}} = 0,08025 * Wr$$

$$\tau_m = \left(\frac{J}{D}\right) = \frac{1,95 * 10^{-7}\text{Nm}}{0,08025} = 2,43 * 10^{-6}$$

$$T_{\text{pulse}} = 0,6 * 47000\Omega * 10 * 10^{-9}\text{F} = 2,82 * 10^{-4}\text{seg} \rightarrow 0,282\text{mseg}$$

Nos quedamos únicamente con el valor numérico, no introducimos en la ecuación la variable  $W_r$ , porque la función de transferencia nos da el valor en función de  $W_r$ .

Resultados:

$$\frac{1}{R_{sense}} = \frac{1}{240\Omega} = 4,16 * 10^{-3}$$

$$K_T = \frac{7,13mNm}{A}$$

$$\left( \frac{\frac{1}{D}}{1 + S\tau m} \right) = \frac{\frac{1}{0,8025}}{1 + 2,43 * 10^{-6} * S}$$

$$\frac{V_{pullup} * T_{pul} * n}{2\pi} = \frac{5V * 0,282seg * 2}{2\pi} = 0,4488Vseg$$

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{324}$$

$$r = 0,0202125m$$

Ahora debemos repetir el mismo procedimiento para el husillo.

### F.T Husillo.

Variables:

- $K_T$ , constante motor = 17,6 mNm/A.
- $D$ , rozamiento viscoso del cojinete.
- $J$ , momento inercia de las ruedas + motor.
- $\tau m = J/D$ .
- $W_m$ , Velocidad angular.
- $T_{pul} = 0,6 * R_{pulse} * C_{pulse}$ .
- $R_{sense} = 170\Omega$
- Número de pares de polos = 2.

- $V_{pullup} = 5V$ .

Cálculos:

- $J$

$$J = \frac{\pi * \rho}{32} * D^4 * L = \frac{\pi * \frac{7850kg}{m^3}}{32} * 0,015^4m * 0,3m = 1,17 * 10^{-5}Nm$$

$\rho$ , densidad acero.

$D$ , diámetro del husillo.

$L$ , Longitud del husillo.

Es necesario tener en cuenta también el esfuerzo que debe vencer el husillo en el caso más desfavorable para elevar toda la estructura del crawler.

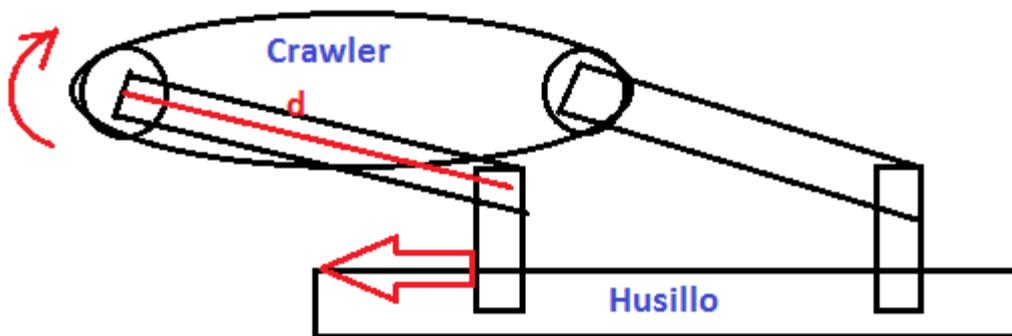


Figura64 Punto más desfavorable, elaboración propia

El peso total de una estructura es de 0,606Kg, teniendo en cuenta que son tres iguales, el peso total es de 1,8194kg.

$$F = m * a = 1,8194kg * \frac{9.8m}{seg^2} = 17,83N$$

$$T = F * d = 17,83N * 0,1m = 1,783Nm$$

$$Jt = J + T = 1,17 * 10^{-3} + 1,783 = 1,7830117$$

- $D$ , Viscosidad.

$\mu$ , Coeficiente de fricción, grasa = [0,09]

$$F_R = \mu * A * \frac{u_0}{h} \rightarrow \tau_{xy} = \mu * \left( \frac{du}{dy} \right)$$

U, Velocidad del fluido.

Y, holgura del cojinete.

La velocidad del fluido está en función de la velocidad de giro del cojinete multiplicado por el radio del eje, y la velocidad de giro del cojinete a su vez, está relacionada con la velocidad de giro del motor.

$$Y = \text{diámetro interior del cojinete} - \text{diámetro del eje} = 15,059 - 15 \\ = 0,059\text{mm}$$

Datos del fabricante.

Bestellnummer	d1	d1-Toleranz*	d2	b1 h13
GSM-1416-10	14,0	+0,032 +0,102	16,0	10,0
GSM-1416-12	14,0	+0,032 +0,102	16,0	12,0
GSM-1416-15	14,0	+0,032 +0,102	16,0	15,0
GSM-1416-20	14,0	+0,032 +0,102	16,0	20,0
GSM-1416-25	14,0	+0,032 +0,102	16,0	25,0
<b>GSM-1516-15</b>	<b>15,0</b>	<b>+0,016 +0,059</b>	<b>16,0</b>	<b>15,0</b>
GSM-1517-04	15,0	+0,032 +0,102	17,0	4,0
GSM-1517-10	15,0	+0,032 +0,102	17,0	10,0
GSM-1517-12	15,0	+0,032 +0,102	17,0	12,0
GSM-1517-15	15,0	+0,032 +0,102	17,0	15,0

Figura65 Fabricante cojinetes, obtenida e IGUS

$$U = \text{Vel. eje cojinete} * \text{Reje} = Wr * \text{Radio husillo} * \text{Radio coj.} =$$

$$= Wr * 7,5 * 10^{-3}\text{m} * 3 * 10^{-3}\text{m} = 2,25 * 10^{-5} * Wr \left( \frac{\text{rad} * \text{m}^2}{\text{s}} \right)$$

$$\tau_{xy} = \mu * \left( \frac{du}{dy} \right) = 0,09 * \frac{2,25 * 10^{-5} * Wr}{0,059 * 10^{-3}\text{m}} = 0,034 * Wr$$

$$\tau_m = \left( \frac{J}{D} \right) = \frac{1,7830117}{0,034} = 52.44$$

$$T_{pulse} = 0,6 * 47000\Omega * 10 * 10^{-9}\text{F} = 0,282\text{mseg}$$

Nos quedamos únicamente con el valor numérico, no introducimos en la ecuación la variable Wr, porque la función de transferencia nos da el valor en función de Wr.

Resultados:

$$\frac{1}{R_{sense}} = \frac{1}{170\Omega} = 5,88 * 10^{-3}$$

$$K_T = \frac{17,6mNm}{A}$$

$$\left( \frac{\frac{1}{D}}{1 + S\tau_m} \right) = \frac{\frac{1}{0,034}}{1 + 52,44 * S}$$

$$\frac{V_{Pullup} * T_{pul} * n}{2\pi} = \frac{5V * 0,282seg * 2}{2\pi} = 0,4488Vseg$$

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{1257}$$

$$r = 7,5 * 10^{-3}m$$

A continuación, se presenta la función de transferencia, es decir, la ecuación que relaciona la señal de salida con la señal de entrada, en este caso, la relación entre

$$\frac{V_{lineal}}{V_{speed}}$$

Realizando la equivalencia de bloques de nuestra función de transferencia llegamos a la siguiente ecuación.

$$\frac{V_{lineal}}{V_{speed}} = \frac{K_T}{2 * \pi * D * R_{sense} * (1 + S\tau_m) + K_T * V_{pull} * T_{pull} * n_{parespolos}} * \frac{1}{n} * r$$

Sustituyendo cada variable por su valor en unidades del Sistema Internacional obtenemos la relación entre la variable de salida y la variable de entrada para el motor del crawler y el motor del husillo.

- Crawler

$$\frac{V_{lineal}}{V_{speed}} =$$

$$= \frac{7,13 * 10^{-3} \left(\frac{Nm}{A}\right)}{2 * \pi * 0,08025 * 240\Omega * (1 + 2,43 * 10^{-6} * S) + 7,13 * 10^{-3} \left(\frac{Nm}{A}\right) * 5V * 0,282s * 2} * \frac{1}{1,484 \frac{rad}{s}} * 0,0202125m$$

$$= \frac{7,13 * 10^{-3}}{\frac{963}{25} * \pi * (1 + 2,43 * 10^{-6} * S) + 0,0201066} * \left(\frac{0,202125}{1,484}\right)$$

$$\frac{(9,711261792 * 10^{-5})}{\frac{963}{25} * \pi * (1 + 2,43 * 10^{-6} * S) + 0,0201066}$$

$$\frac{(9,711261792 * 10^{-5})}{\frac{963}{25} * \pi + 2,940643821 * 10^{-4} * S + 0,0201066} = \frac{(9,711261792 * 10^{-5})}{121,0342556 + 2,940643821 * 10^{-4} * S}$$

se divide el denominador por  $2,940643821 * 10^{-4}$

$$= \frac{(9,711261792 * 10^{-5})}{411591,0086 + S} \rightarrow \frac{K}{S + a}$$

- Husillo

$$\frac{V_{lineal}}{V_{speed}} =$$

$$= \frac{17,6 * 10^{-3} \left(\frac{Nm}{A}\right)}{2 * \pi * 0,034 * 170\Omega * (1 + 52,44 * S) + 17,6 * 10^{-3} \left(\frac{Nm}{A}\right) * 5V * 0,282s * 2} * \frac{1}{0,0777 \frac{rad}{s}} * 7,5 * 10^{-3}m$$

$$= \frac{17,6 * 10^{-3}}{\frac{289}{25} * \pi * (1 + 52,44 * S) + \frac{1551}{31250}} * \left(\frac{7,5 * 10^{-3}}{0,0777}\right)$$

$$\frac{\frac{11}{6475}}{\frac{289}{25} * \pi * (1 + 52,44 * S) + \frac{1551}{31250}}$$

$$\frac{\frac{11}{6475}}{\frac{289}{25} * \pi + 1904,453573 * S + \frac{1551}{31250}} = \frac{\frac{11}{6475}}{36,36644308 + 1904,453573 * S}$$

*se divide el denominador por 1904,453573*

$$\frac{1,698841699 * 10^{-3}}{0,01909547368 + S} \rightarrow \frac{K}{s + a}$$

## 5.2. DISEÑO ELECTRÓNICO

Los actuadores y componentes encargados de transformar la energía en el movimiento de nuestro robot son los que conforman el diseño electrónico.

Para llevar a cabo el diseño electrónico, es necesario tener seleccionados todos los componentes que forman parte de nuestro robot, de modo que este apartado va a estar dividido en varios grupos, empezando por una lista de todos los componentes necesarios y una descripción de cada uno de ellos para posteriormente realizar el cálculo y elección de la batería en base a nuestras necesidades y para finalizar, un esquema eléctrico y el diseño de la PCB donde irán alojados parte de los componentes electrónicos.

### 5.2.1. LISTADO DE COMPONENTES

*Tabla 7 listado de componentes*

ETAPA	COMPONENTE	CANTIDAD
<b>ETAPA DE POTENCIA</b>	MOTOR AVANCE	3
	MOTOR HUSILLO	1
	ENCODER	2
	CONTROLADOR MOTOR	4
	FINAL DE CARRERA	2
<b>ETAPA DE TRANSMISIÓN</b>	RADIO FRECUENCIA	2
	CÁMARA	1
<b>ETAPA DE CONTROL</b>	RASPBERRY PI 2	1

## ETAPA DE POTENCIA

La denominada etapa de potencia está compuesta por los dispositivos y componentes encargados de la función del movimiento del robot.

### MOTORES

Para el avance del robot, dispondremos de tres motores colocados en cada uno de los ejes del crawler, como hemos mencionado en el marco teórico, debido a las propiedades y características que nos ofrecen, el modelo seleccionado es un motor brushless DC Gearmotors. Tras haber consultado y comparado varios fabricantes, he decidido decantarme por Faulhaber, debido a que ofrecen dispositivos que incluyen motor y reductora.

El actuador escogido es un motor combinado con una reductora perteneciente a la serie 1515 modelo 012B, cuyas propiedades pueden verse en la página 1.1 del documento Anexos.



*Figura66 Motor brushless, obtenida de Faulhaber*

Este motor, alimentado a 12V, nos proporciona un par de 30mNm, insuficiente según los cálculos realizados anteriormente, pero con la reductora, con una relación de reducción de 324:1, cumple con el par requerido para el movimiento del robot, para ello se debe multiplicar el par que ofrece el motor por el factor de reducción.

- Par real suministrado por el motor = 30mNm.
- Par necesario = 0,33Nm por motor
- Par motor + reductora =  $30\text{mNm} \times 324:1 = 9,720\text{Nm}$

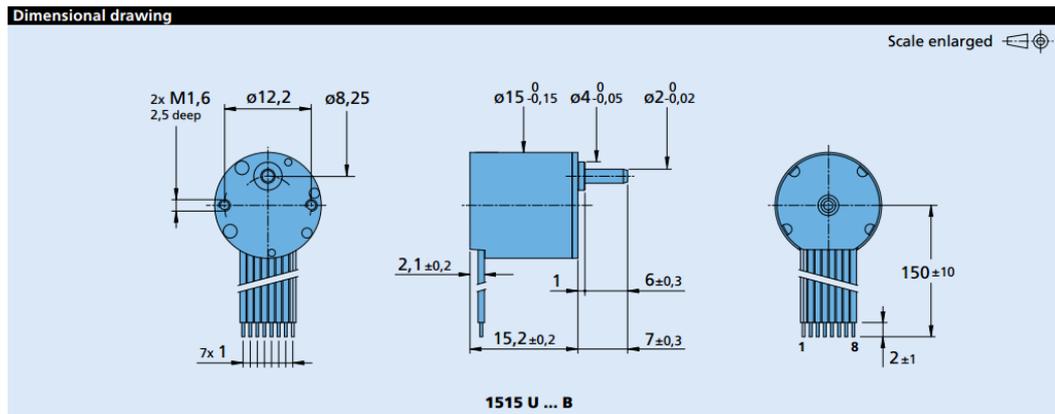


Figura67 Dimensiones del motor y reductora del crawler obtenida de Faulhaber

El motor posee ocho conexiones de las cuales la 1, 2 y 3 son las tres fases del motor conectadas al controlador al igual que los sensores hall correspondientes con las conexiones 6, 7 y 8, mientras que las centrales 4 y 5 están reservadas para la alimentación del motor + reductora.

#### Connection

No.	Function
1	Phase C
2	Phase B
3	Phase A
4	GND
5	U <sub>DD</sub> (+5V)
6	Hall sensor C
7	Hall sensor B
8	Hall sensor A

#### Standard cable

Insulation: PVC  
8 conductors, AWG 28  
pitch 1 mm, wires tinned

Figura68 Conexión motor obtenida de Faulhaber

Para el movimiento del ajuste del robot al diámetro requerido, es decir, para el husillo, se ha seleccionado un motor + reductora del mismo fabricante, en esta ocasión, perteneciente a la serie 2622 modelo 012B, que nos proporciona más par. Sus propiedades también pueden verse en la página 1.3 del documento Anexos.



Figura69 Motor brushless, obtenida de Faulhaber

Alimentado también a 12V, proporciona un par de 100mNm, junto con la reductora, obtendremos el par necesario para iniciar el movimiento.



## CONTROLADOR DE MOTOR

A pesar de que uno de los motores es diferente, el controlador encargado de gobernar cada uno de ellos es el mismo, el chip L2635Q, de modo que dispondremos de cuatro controladores.

Este chip soporta tensiones de hasta 52V y corrientes de pico de 5,2A, de modo que podemos usarlo con una tensión de 12V al igual que los motores.

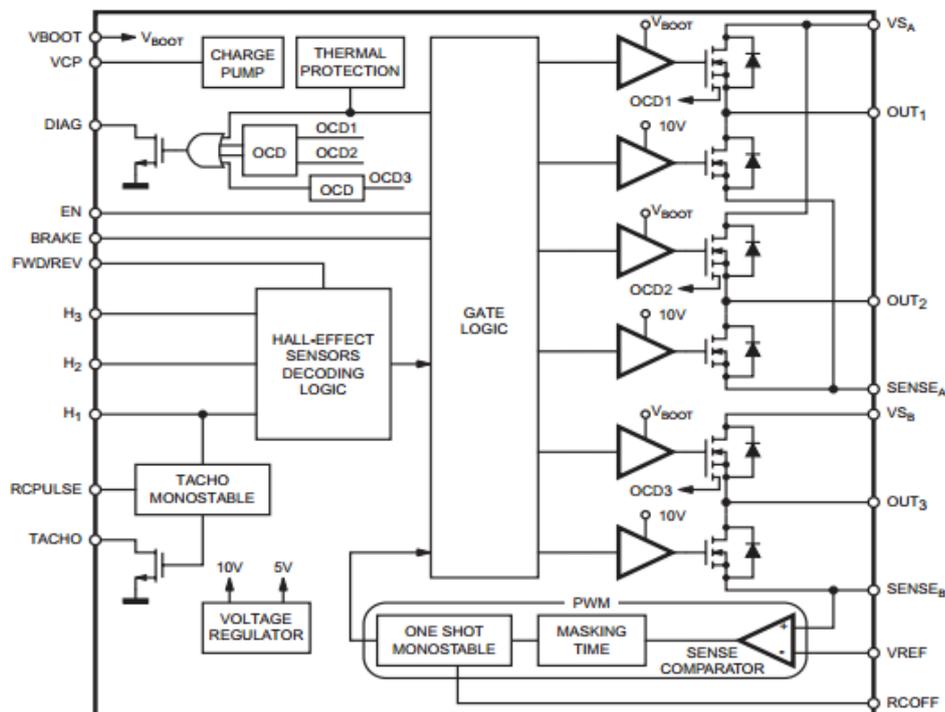


Figura72 Diagrama de bloques, obtenida de STMicroelectronic

Como podemos ver en la imagen anterior, se trata de un chip de 48 pines con un encapsulado QFN-48. A continuación vamos a describir las conexiones más importantes.

- PIN 38-39, PIN 2-3, PIN 22-23, son los tres pines donde se conectan cada una de las tres fases de los motores brushless.
- PIN 41,42 y 43, están conectados con los sensores hall de los motores.
- PIN 26-27 y 34-35, son los pines de alimentación.
- PIN 17, FWD/REV, conectado a un puerto libre de la raspberry, podremos hacer inversiones de giro del motor.
- PIN 20, BRAKE, conectado también a un puerto de la raspberry, es el freno del motor.
- PIN 12, TACHO, conectado directamente al pin PWM de la raspberry, gracias a él, se permite desarrollar un bucle de control de la velocidad.

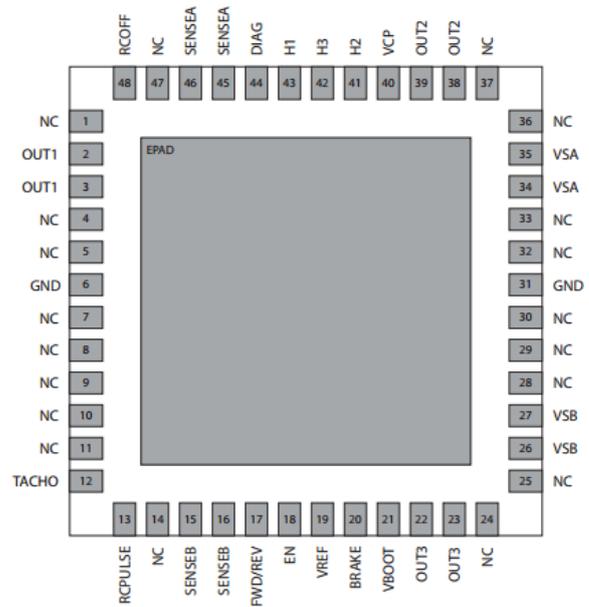


Figura73 Patillaje del chip, obtenida de STMicroelectronics

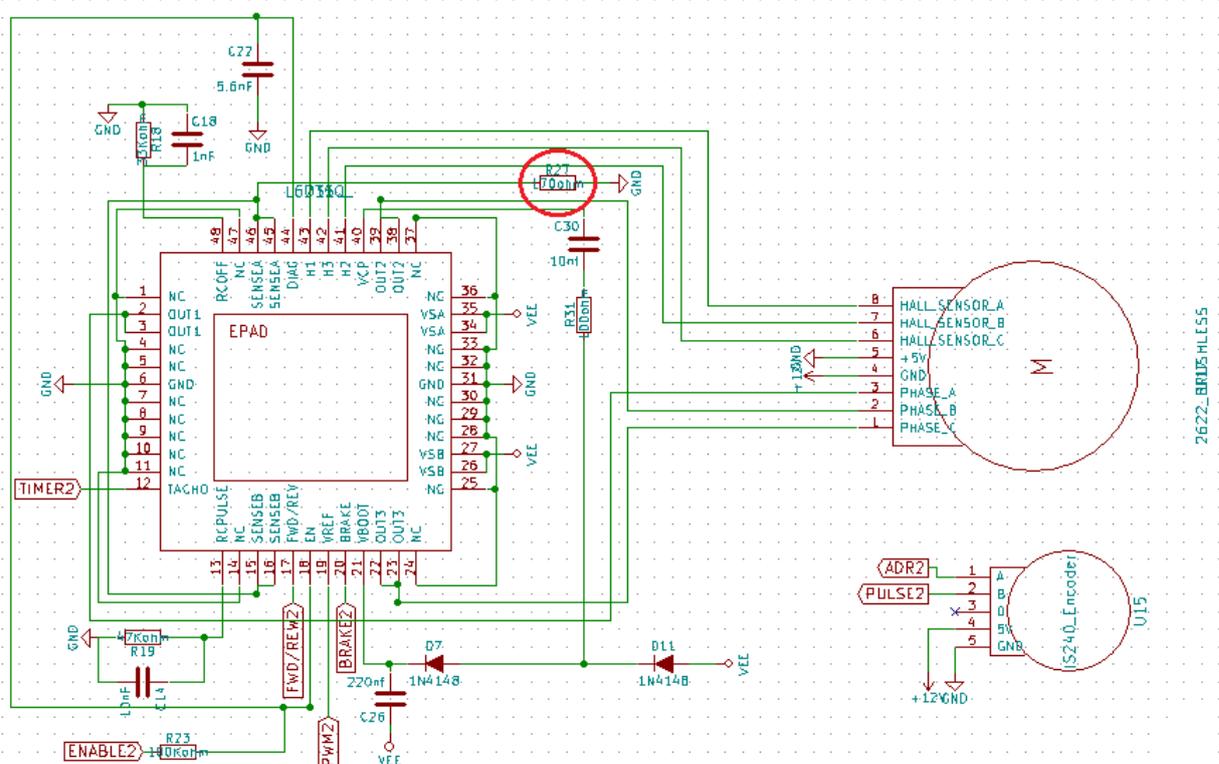


Figura74 Esquema conexionado motor, controlador y encoder

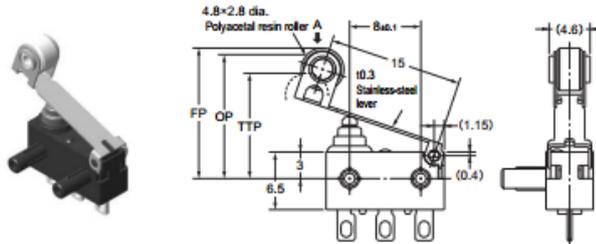
Para una información más explícita del resto de las conexiones, se puede consultar el esquema general diseñado y la página 1.5 de los Anexos.

### FINAL DE CARRERA

Gracias a estos dispositivos vamos a conocer el momento exacto en el que el robot alcance su tamaño máximo y mínimo posible.

El final de carrera seleccionado pertenece al fabricante Omron, de modelo D2HW, de pequeño tamaño alimentado a 5V. Este modelo posee un actuador de rodillo. Más información se puede encontrar consultando el datasheet de componente en la página 1.43 del documento Anexos.

#### ●Hinge Roller Lever D2HW-□24□□



Operating characteristics	Type	Models with Posts	M3-screw Mounting Models
Operating Force	OF	Max.	0.65N (66 gf)
Releasing Force	RF	Min.	0.03N (3 gf)
Overtravel	OT		1.9 mm (reference value)
Movement Differential	MD	Max.	0.6 mm
Free Position	FP	Max.	15.3 mm
Operating Position	OP		14±0.6 mm
Total Travel Position	TTP	Max.	12.3 mm

Figura75 Final de carrera, obtenida de Omron

El encapsulado que aparece en la imagen, no es el que usaremos en nuestro sistema, ya que las conexiones quedan expuestas a agentes externos como el polvo o la humedad, de modo que debemos elegir aquel en el cual, los conectores están protegidos.

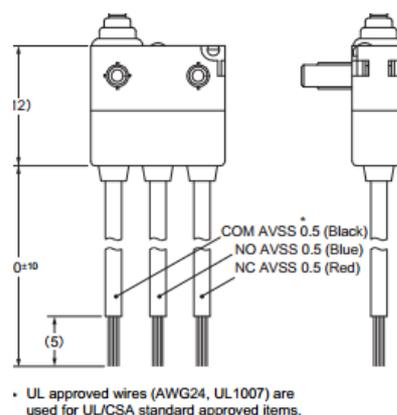
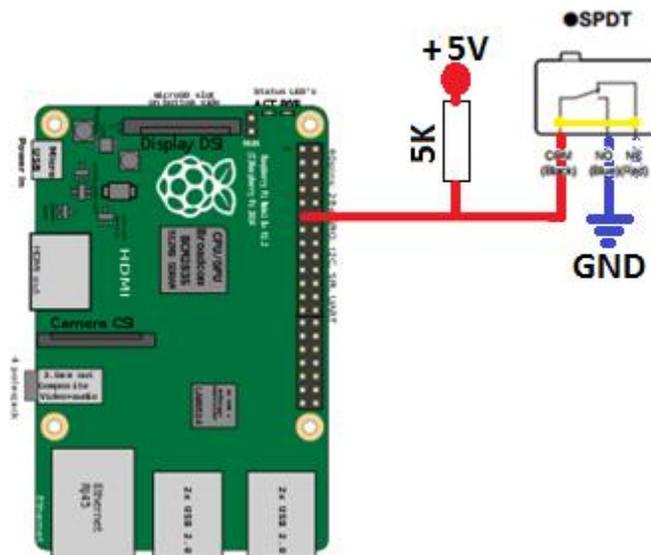


Figura76 Encapsulado con conexiones protegidas, obtenida de Omron

El conexionado del final de carrera se puede hacer de dos maneras, normalmente abierto o normalmente cerrado, he decidido hacerlo de la primera manera. Se conecta a la raspberry de la siguiente manera, posee tres pines de conexión.

- COM, común.
- NO, normalmente abierto.
- NC, normalmente conectado.



*Figura77 Conexionado final de carrera, montaje normalmente abierto, elaboración propia*

Cuando el final de carrera permanece en su estado de reposo, la raspberry este recibiendo 5V, de modo que el pin COM, estará conectado con el pin NC.

Cuando el final de carrera se acciona, quiere decir que el crawler ha llegado a su punto máximo o mínimo, la raspberry estará recibiendo 0V, el pin NO se conecta con el pin COM.

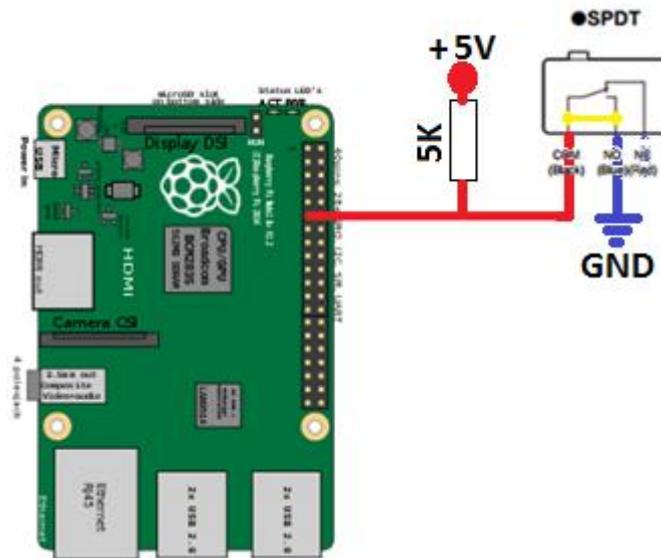


Figura78 Conexión final de carrera pulsado con raspberry, elaboración propia

## ETAPA DE TRANSMISIÓN

Esta etapa esta formada por los dispositivos con los cuales vamos a tener comunicados el robot con el exterior, es decir, los dos chips de radiofrecuencia utilizados tanto para el manejo y control del robot como para la transmisión de imágenes y una cámara para la toma de imágenes del interior de las tuberías.

## RADIO FRECUENCIA

Para la comunación con el centro de control externo a la tubería, se ha seleccionado el chip CC1201 del fabricante Texas Instruments, capaz de trabajar con frecuencias entre 169MHz y 920 MHz.

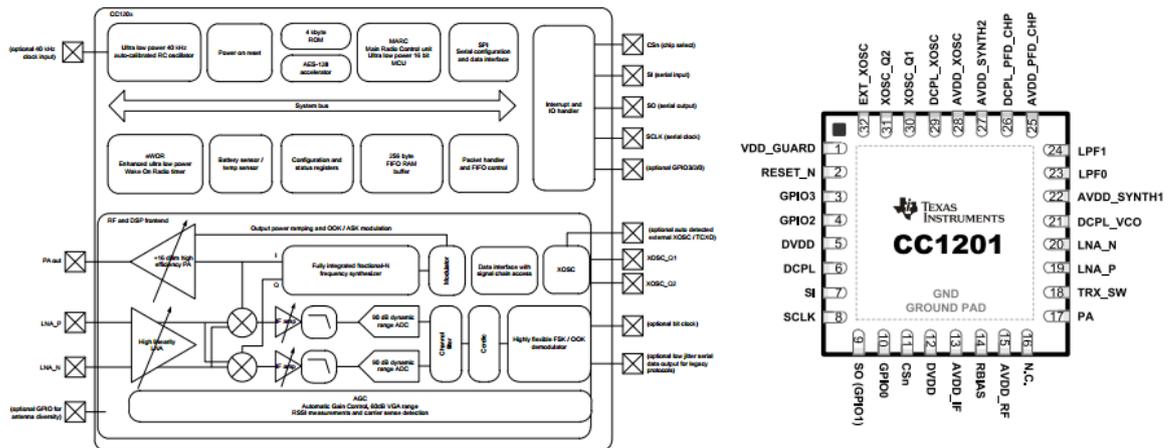


Figura79 Diagrama de bloques cc1201, obtenida de Texas Instrument

Las conexiones mas significativas son las siguientes:

- PIN 2, RESET, se trata de una entrada digital conectada directamente a un pin de carácter general de la raspberry.
- PIN 7, 8, 9 y 11, MOSI, SCLK, MISO y SELECT, este chip trabaja bajo el estandar de comunicación SPI (Serial Peripheral Interface)
  - MOSI, (Master Output Slave Input), salida de datos del master y entrada de datos al esclavo.
  - SCLK, (Clock), es el pulso que marca la sincronización. Con cada pulso de reloj, se lee o envía un bit.
  - MISO, (Master Input Slave Output), salida de datos del esclavo y entrada al master.
  - SELECT, para seleccionar un esclavo, o para que el master le diga al esclavo que se active.
- PIN 17, se conecta la antena.

Para más información sobre el resto de conexiones del chip, consultar el documento Anexos la página 1.106.

La antena seleccionada para la transmisión se trata de una antena cerámica del fabricante YAGEO Phicomp, de la serie 1204, que trabaja a 433MHz, utilizada, entre otras utilidades, para el control remoto en sistemas industriales.

Más datos y características sobre la antena se hallan en el datasheet en la página 1.143 del documento Anexos.

Table 2 Machinal Dimension

DIMENSION	
L (mm)	12.00 ±0.50
W (mm)	4.00 ±0.50
T (mm)	1.50 ±0.30
A (mm)	0.85 ±0.35

OUTLINES

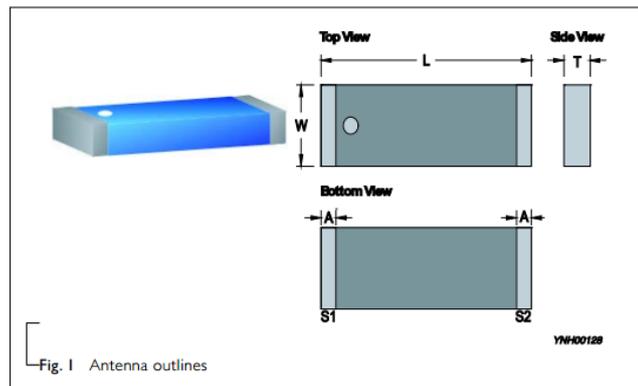


Table 3 Termination configuration

TERMINAL NAME	FUNCTION
S1	Feeding Point
S2	Soldering Point

Figura80 Dimensiones de la antena, obtenida de YAGEO Phicomp

La antena se conecta al chip cc1201 y es soldada a través de sus dos pads de soldadura a la PCB.

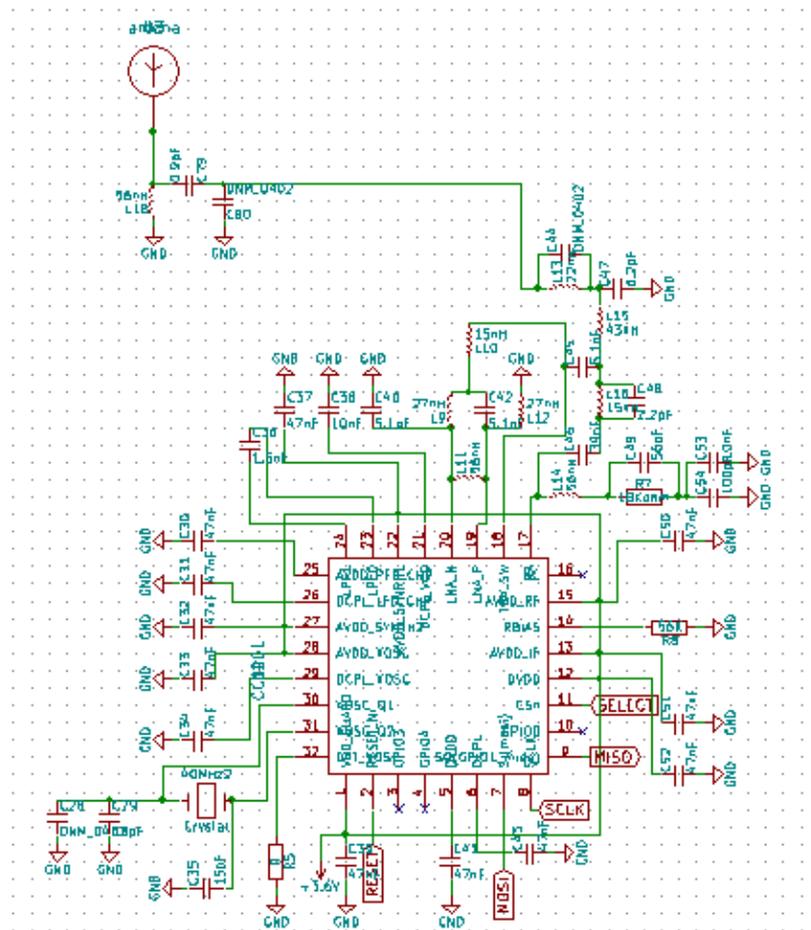
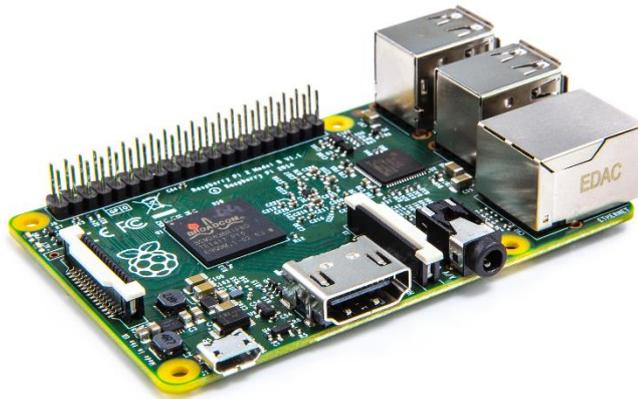


Figura81 Esquema de conexionado del chip cc1201 con la antena

## ETAPA DE CONTROL

El microcontrolador escogido para hacer la función de “cerebro” del robot se trata de la raspberry PI 2, encargada de recibir y analizar la información recibida de los sensores y componentes nombrados anteriormente para que el robot realice correctamente sus funciones. La información detalla se encuentra en la página 1.150 del documento Anexos.

- Posee un procesador de cuatro núcleos ARM Cortex-A7, 900MHz CPU.
- 1 GB de RAM.
- 4 puertos USB.
- 40 pines GPIO.
- HDMI
- Puerto Ethernet.
- Interfaz de cámara (CSI).
- Interfaz de pantalla (DSI).
- Ranura para tarjetas micro SD.
- Consumo entre 500mA y 700mA.

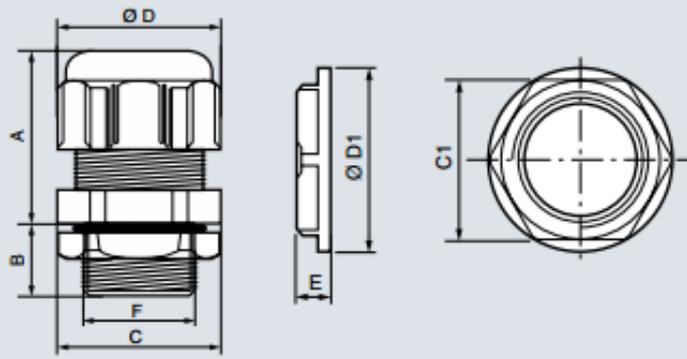


*Figura82 Raspberry PI 2, obtenida de [www.pcworld.com](http://www.pcworld.com)*

Para proteger la raspberry y el resto de los componentes de la humedad, el polvo y otros agentes del interior de la tubería, se ha diseñado una carcasa estanca transparente. Esta carcasa, lleva una pequeña ranura, la cual se sellará con silicona para evitar filtraciones de agua o polvo, para permitir el paso del conector plano del módulo de la cámara que se conecta a la raspberry. A esta carcasa se le ha añadido unos conectores

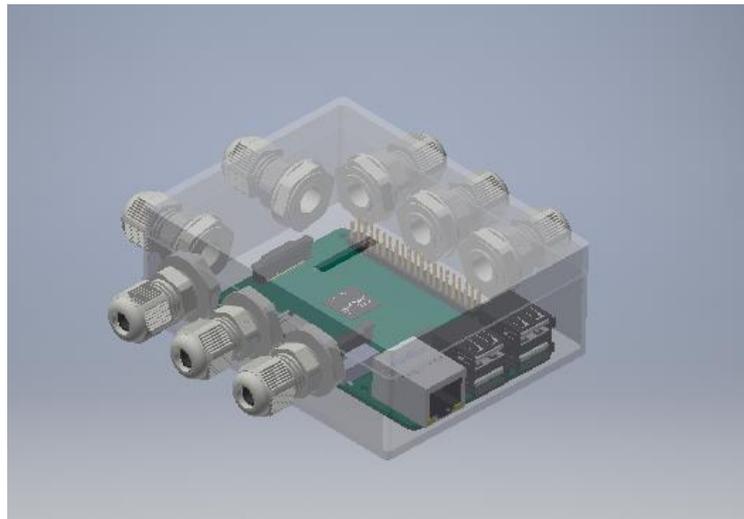
llamados prensaestopas o pasa muros para proteger a los cables que conectan con la raspberry. Estos conectores presentan un grado de protección IP 68, que impide el paso del agua y polvo. El modelo seleccionado es el GP 7 del fabricante Legrand. Más información en la página 1.151 del documento Anexos.

■ Dimensiones (mm)  
Prensaestopa plástica IP 68



Ref.	Rosca	A	B	Ø D	C Sobre caras	F	Ø de perforación	C1	E	ØD1
980 03	ISO 20	29	12	26,5	24	19,8	20,4	26	6	28
980 05	ISO 25	35	15	36	33	24,8	25,4	32	6	35
980 20	PG 7	22	10	16,8	15	12,5	12,7	19	5	21
980 21	PG 9	26	10	21	19	15,2	15,2	22	5	24
980 22	PG11	27	12	24,5	22	18,6	18,6	24	5	26
980 23	PG 13	29	12	26,5	24	20,4	20,4	26	6	28
980 24	PG 16	30	13	29,5	27	22,5	22,5	32	6	35
980 25	PG 21	35	15	36	33	28,3	28,3	36	7	38
980 26	PG 29	40	15	46,5	42	37	37	46	7	51
980 27	PG 36	49	17	58,5	53	47	47	60	8	66
980 28	PG 42	54	17	66,5	60	54	54	70	8	78
980 29	PG 48	54	18	75	68	60	60	75	8	82

Figura83 Prensaestopa, obtenida de Legrand



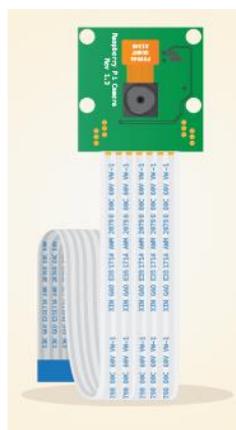
*Figura84 Carcasa Raspberry, diseño propio*

## **CÁMARA**

Raspberry ha desarrollado una cámara facil de conectar y de instalar al microcontrolador, perfecta para nuestra aplicación.

Esta cámara es capaz de grabar videos en alta definición, así como captar fotografías fijas de imágenes. Tiene un foco fijo de cinco megapíxeles que soporta los modos 1080p30, 720p60 y vídeo VGA90. Se conecta a través de un cable plano de 15cm hasta el puerto de CSI de la raspberry.

Para la radio transmisión de las imágenes, también vamos a operar a 433MHz, pero para evitar interferencias entre nuestras propias comunicaciones de control y transmisión, usaremos los extremos de este ancho de banda. Consultar la página 1.149 del documento Anexos.



*Figura85 Cámara raspberry, obtenida de [www.raspberrypi.org](http://www.raspberrypi.org)*

## 5.2.2. CÁLCULO DE LA BATERÍA

Una vez seleccionado todos los componentes que necesitamos para el funcionamiento del robot, necesitamos saber cuál es la energía necesaria para abastecer a todos ellos y que puedan cumplir sus funciones, para ello, el primer paso es realizar un listado de los consumos de cada uno de los componentes.

Tabla 8 tabla de potencias

COMPONENTE	TENSIÓN (V)	CORRIENTE (A)	POTENCIA (V*A=W)
<b>(3) Motor avance</b>	12V	50mA	0,6W
<b>(1) Motor husillo</b>	12V	70,85mA	0,85W
<b>(3) Controlador crawler</b>	12V		0,06W
<b>(1) Controlador husillo</b>	12V		0,085W
<b>(2) Encoder</b>	12V	40mA	0,48W
<b>(2) Chip radio frecuencia</b>	5V	25mA	0,125W
<b>(2) Final de carrera</b>	5V	1mA	0,005W
<b>(1) Raspberry</b>	5V	700mA	3,5W

En algunos casos, según los fabricantes, la información dada en los datasheet es directamente la potencia, sin embargo, en otros, para determinar la potencia, es necesario multiplicar la tensión, en voltios y la intensidad, en amperios, de esta manera se obtiene la potencia en watos.

Para determinar la potencia de los controladores, se ha estimado que es un 10% de la potencia de los motores.

Para saber cuál es el consumo máximo del robot, lo que nos permitirá escoger una batería acorde con el cálculo, es necesario establecer que componentes estarán funcionando simultáneamente y en qué período de tiempo, durante el funcionamiento del robot, para ello, vamos a analizar por separado las actividades o tareas que puede realizar nuestro robot y cuáles son los elementos que actúan en cada una de ellas.

### 1. Tarea de ajustar al diámetro de la tubería.

En esta tarea se encontrarán en funcionamiento el motor del husillo, su controlador y su encoder, así como los dos finales de carrera, la raspberry y la transmisión de las imágenes. Se ha estimado un tiempo de duración de 60 segundos.

Es decir, 60 segundos es el tiempo en el cual la estructura alcanzará su tamaño máximo o mínimo.

$$W_{ajuste} = tiempo(h) * \sum potencias \text{ que intervienen en cada tarea } (w)$$
$$W_{ajuste} = h * \sum (Motor \text{ husillo} + Encoder \text{ husillo} + Controlador \text{ husillo} + 2$$
$$* \text{ Finales de carrera} + raspberry + transmisión \text{ imágenes})$$
$$W_{ajuste} = \frac{60seg}{3600} * (0,85W + 0,48W + 0,085W + 2 * 0,005W + 3,5W + 0,125W)$$
$$W_{ajuste} = 0,084Wh$$

### 2. Avance del robot.

En esta tarea interfieren los tres motores de los crawler, los tres controladores, un encoder, las raspberry y los dos chips de radiofrecuencia, uno para la transmisión de las imágenes, y otro para el manejo del robot.

Estimaremos una tubería de 100m, y la velocidad de avance ya fijada de 3 cm/seg.

$$Vel \text{ avance} = \frac{0,03m}{seg}$$
$$tiempo \text{ de trabajo en } 100m = 3333,33 \text{ seg}$$

$$W_{avance} = tiempo(h) * \sum potencias \text{ que intervienen en cada tarea } (w)$$

$$W_{ajuste} = h * \sum (3 * Motor \ crawler + Encoder \ crawler + 3 * Controlador \ crawler + raspberry + transmisión \ imágenes + manejo)$$

$$W_{ajuste} = \frac{3333,33seg}{3600} * (3 * 0,6W + 0,48W + 3 * 0,06W + 3,5W + 0,125W + 0,125W)$$

$$W_{ajuste} = 5,75Wh$$

Sumando el consumo de cada tarea por separado, obtendremos el consumo máximo de nuestro robot.

$$Consumo = W_{ajuste} + W_{avance} = 0,084Wh + 5,75Wh = 5,834Wh$$

En la batería, el consumo viene dado en miliamperios hora (mAh), de modo que debemos transformar el consumo total a las unidades correctas.

$$Potencias = V * I \rightarrow I = \frac{Potencia}{V} = \frac{5,834Wh}{12V} = 486mAh$$

Conociendo la tensión máxima que vamos a necesitar, 12V y el consumo total en miliamperios hora, ya podemos seleccionar el modelo de batería.

Para este robot, se ha seleccionado una batería de Litio-Ion recargable de 12V del fabricante O.E.M. products.

- Capacidad de 1800mAh (1,8 A).
- Tamaño 80 x 45 x 20mm.
- Peso 125 gramos.



Figura86 Batería Li-Ion, obtenida de bateriadeliorecargable

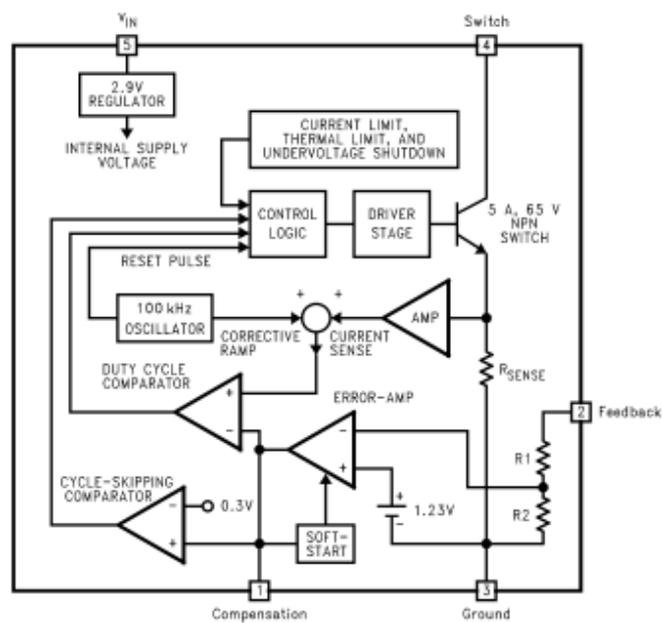
Como disponemos de dos tensiones de trabajo diferentes, necesitamos transformar la tensión de 12V a 5V para los componentes que requieran dicha tensión. Para ello he elegido el regulador flyback LM2587T-5.0 de Texas Instrument.

**Connection Diagrams**


**Figure 2. Bent, Staggered Leads 5-Lead TO-220 (NDH) Top View**



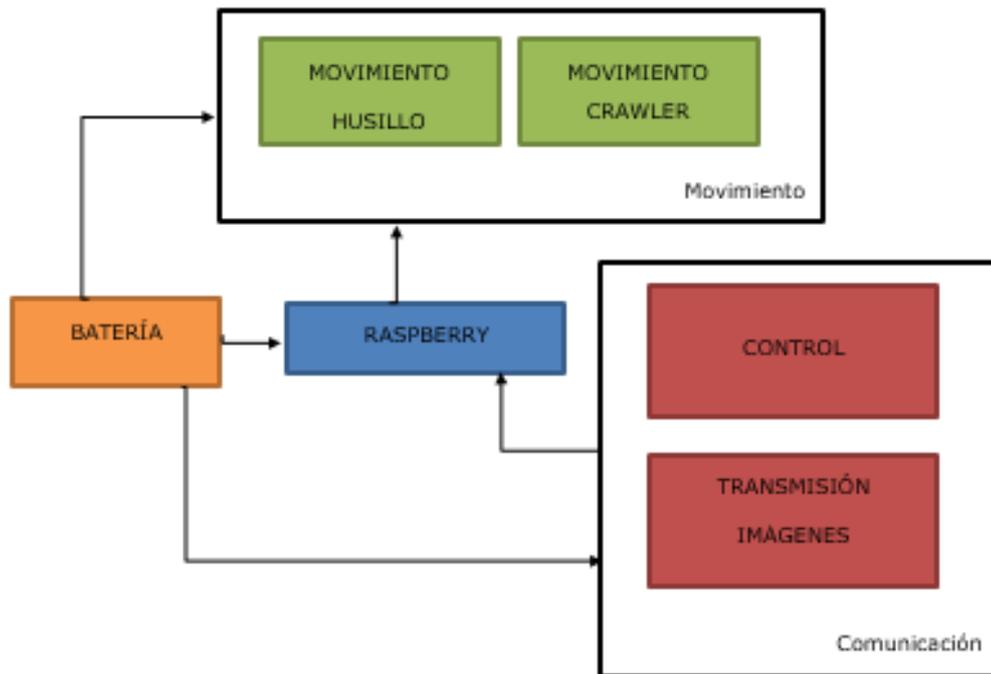
**Figure 3. Bent, Staggered Leads 5-Lead TO-220 (NDH) Side View**



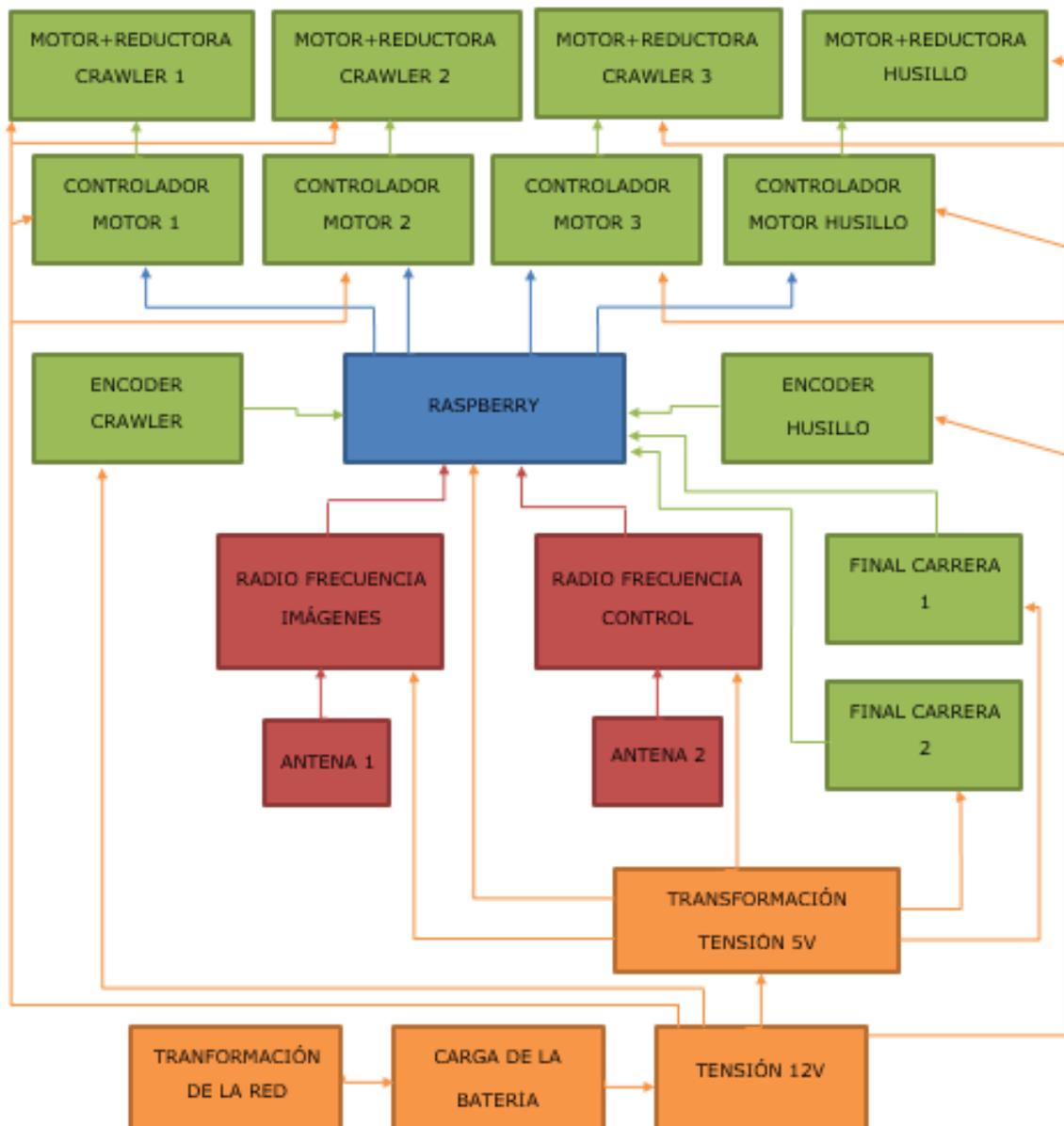
*Figura87 Diagrama de bloques y conexiones LM2587T-5.0, obtenida de Texas Instrument*

### 5.2.3. ESQUEMA ELECTRICO

Antes de realizar el diseño de la PCB, se realizarán unos diagramas de alto nivel para que se observe de manera rápida y visual como interaccionan unos componentes con otros y que nos ayudará a que el diseño electrónico sea más completo.



En los diagramas de alto nivel se representan los componentes en grande "cajas" sin hacer mención al resto de elementos que intervienen en cada actividad, a continuación, vamos a indagar en el interior de cada bloque para ver de manera más completa los componentes que interfieren en cada etapa y la relación con el resto de elementos del sistema.



Una vez terminado el diagrama de alto nivel, podemos pasar a desarrollar el diagrama de bajo nivel, en el cual, se representa el cableado de los componentes que irán incorporados en la PCB. Para su diseño se ha utilizado el software libre KiCad.

Para nuestro robot, vamos a disponer de dos PCB`s o shield`s que colocaremos encima de la raspberry, en el primer shield incorporaremos la etapa de comunicación con los dos chips de radio frecuencia y las dos antenas, en el shield superior, la etapa de potencia con los motores, controladores, encoders, finales de carrera, la batería y la

etapa de transformación, debido a la gran cantidad de componentes en esta última etapa, se ha decidido hacer más grande la PCB.

En primer lugar, debemos de realizar el esquema eléctrico de cada PCB.

El primer esquema hace referencia a la etapa de potencia.

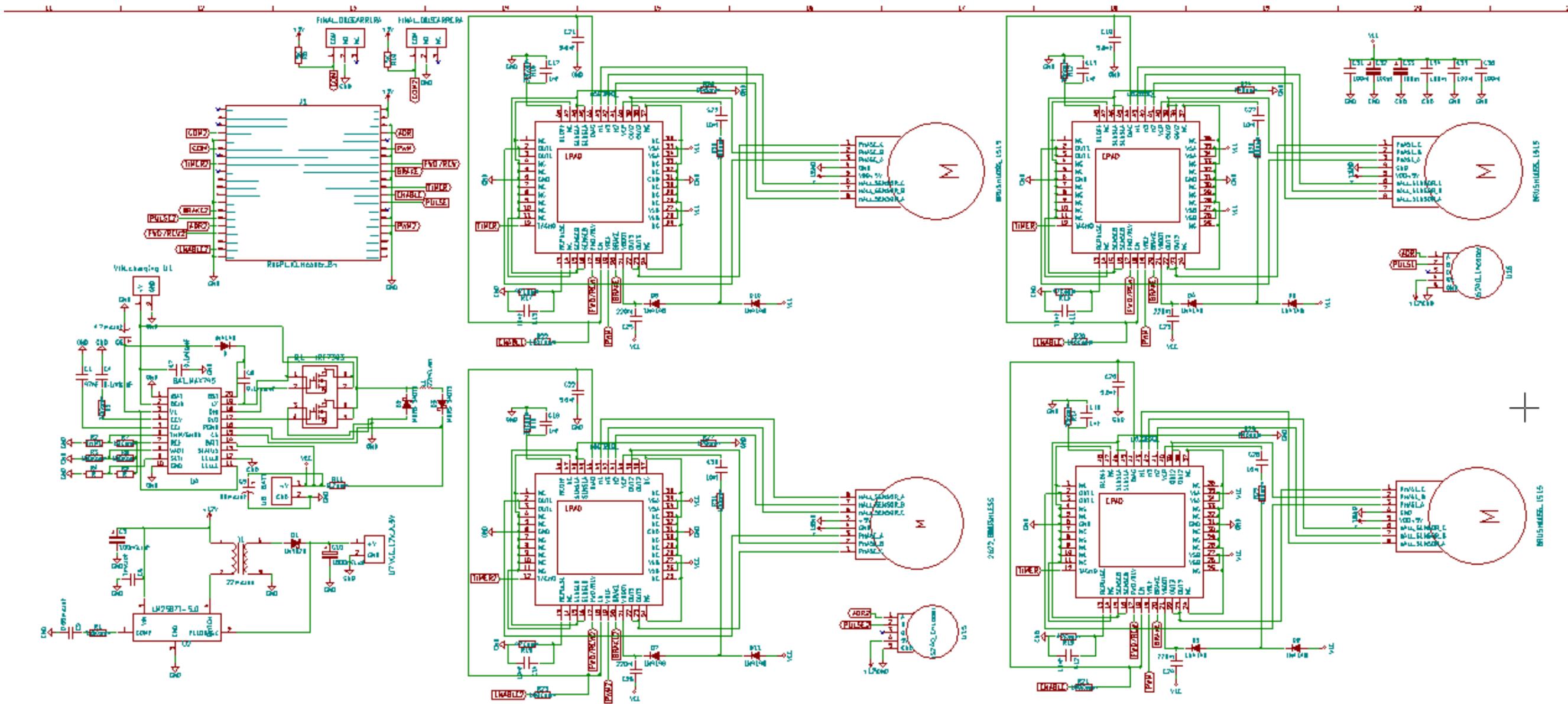


Figure 88 Esquema eléctrico etapa potencia, kicad, diseño propia



Como se había representado en el esquema de alto nivel, aquí podemos ver el cableado del motor con el controlador y el encoder.

Es necesario ajustar la  $R_{sense}$  tanto del controlador de los motores del crawler y del husillo ya que no trabajan con las mismas intensidades.

Partiendo de la ley de Ohm  $\rightarrow V = R * I$

$$R_{sense \ crawler} = \frac{12V}{50 * 10^{-3}A} = 240\Omega$$

$$R_{sense \ husillo} = \frac{12V}{71 * 10^{-3}A} = 170\Omega$$

Colocamos en serie un conjunto de condensadores para mejorar el filtrado de la tensión.

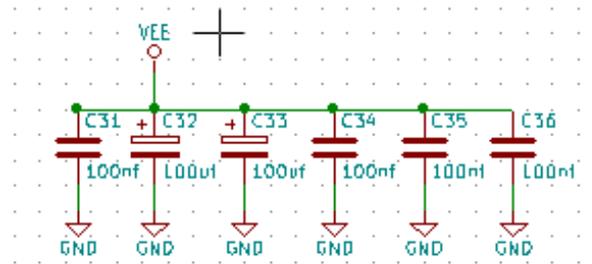


Figura91 Filtrado, kicad, diseño propio

- Cargador de la batería y la transformación de 12V a 5V.

Se puede observar que el chip MAX745 es cargador, y el chip LM2507T-5.0 es el regulador de tensión.

A todos los componentes es necesario añadirles una serie de dispositivos que vienen recomendados en los datasheet de cada componente para su correcto funcionamiento.

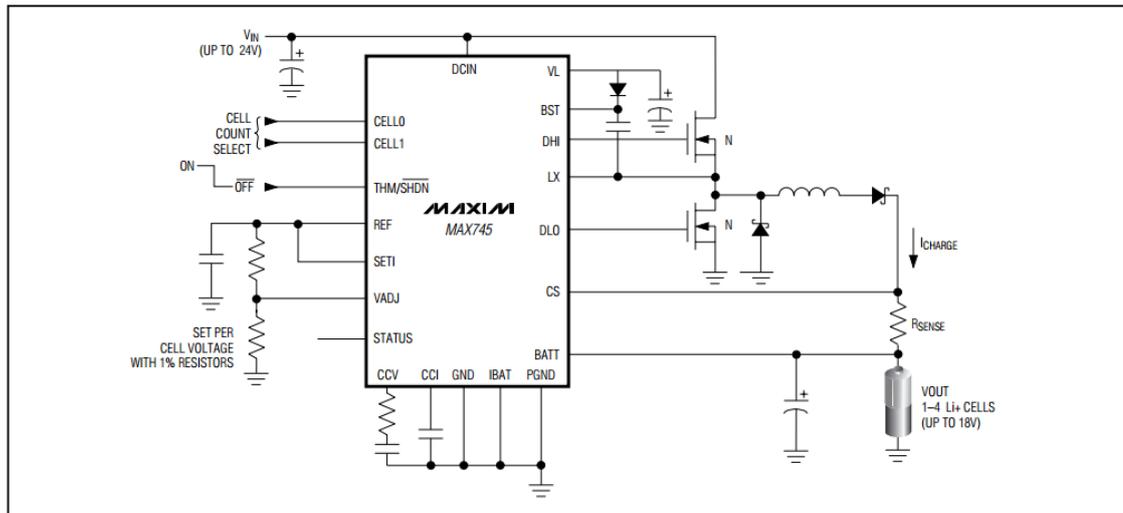


Figura92 Cargador de batería y transformador, kicad, diseño propio

El segundo esquema, el que formara parte de otra PCB, contiene los componentes de la parte de comunicación, los dos chips cc1201 para la transmisión por radiofrecuencia y las dos antenas cerámicas.

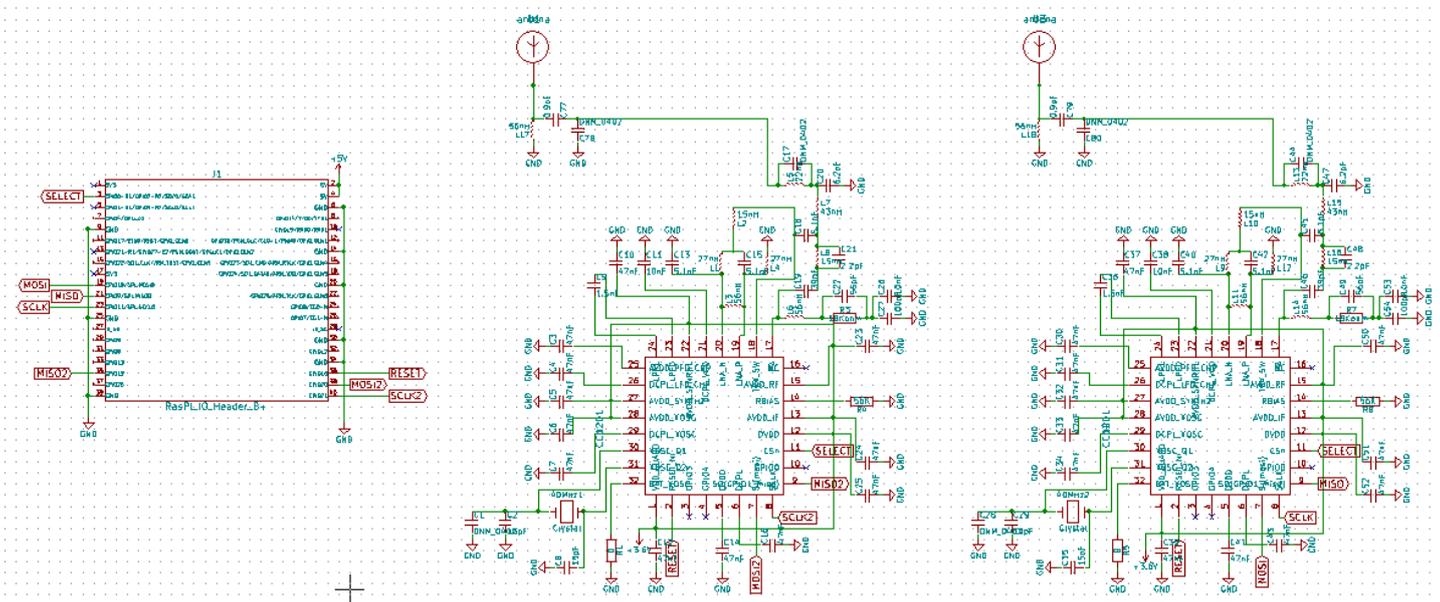


Figura93 esquema eléctrico etapa comunicación, kicad, diseño propio

Una vez que tenemos los esquemas eléctricos cableados y seguros de no haber cometido ningún error, podemos continuar con el diseño de la PCB.

En segundo lugar, debemos asignar a cada componente del esquema, su huella, porque una vez acabada la PCB, cada componente se debe colocar encima de la suya para luego soldarlos a la placa, de modo que es muy importante seleccionar la huella correcta ya que también influirá en el tamaño de la placa, la distribución y colocación de los componentes.

Kicad posee, una biblioteca con todas las huellas de todos los componentes que Kicad posee en sus librerías, con la opción también de descargar librerías o huellas desde internet y poder insertarlas en nuestro proyecto.

Tras haber realizado esta asignación, diseñamos la PCB, el programa automáticamente pondrá en pantalla todas las huellas de los componentes de la lista desordenados y sin cablear.

Una vez conectados todos los componentes, este es el resultado de nuestras dos placas PCB`s.

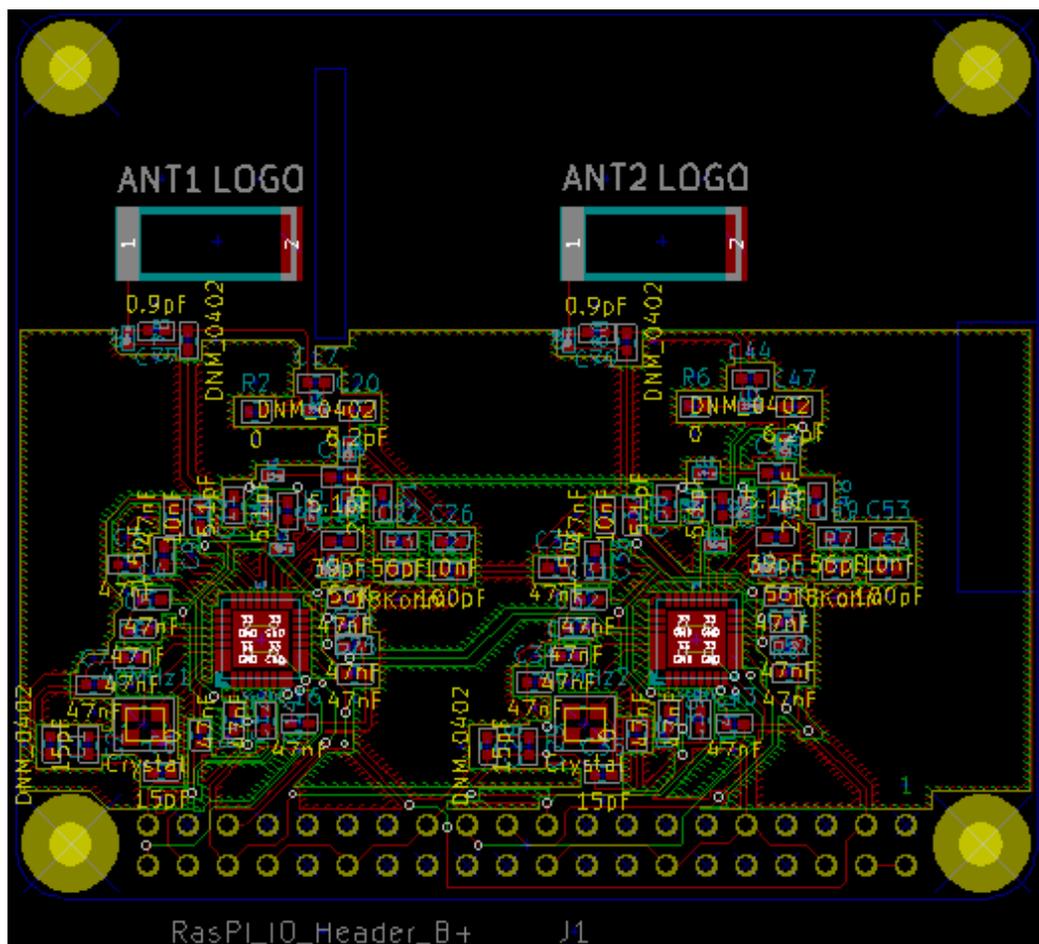


Figura94 placa PCB etapa de comunicación, kicad, diseño propio

Esta placa PCB, ira colocada sobre la raspberry, como podemos observar, todos los componentes están en el interior de la huella de la raspberry delimitada por los cuatro agujeros grandes amarillos.

Se puede apreciar los dos chips cc1201 de radio frecuencia acompañados del montaje del circuito eléctrico con sus componentes requeridos para un buen funcionamiento, al igual que la presencia de las dos huellas de las antenas cerámicas ANT1 y ANT2, donde una vez terminada físicamente la PCB, se soldaría la antena y los componentes.

Para evitar problemas de ruido, un factor muy importante a tener en cuenta en la transmisión por radiofrecuencia, es necesario rellenar todos los grandes huecos que queden sin ocupar, de modo que tanto por la cara delantera, las pistas rojas, y la cara trasera, las pistas verdes, los huecos deben rellenarse con un plano de masa.

Este es el resultado de la segunda placa PCB, la de potencia.

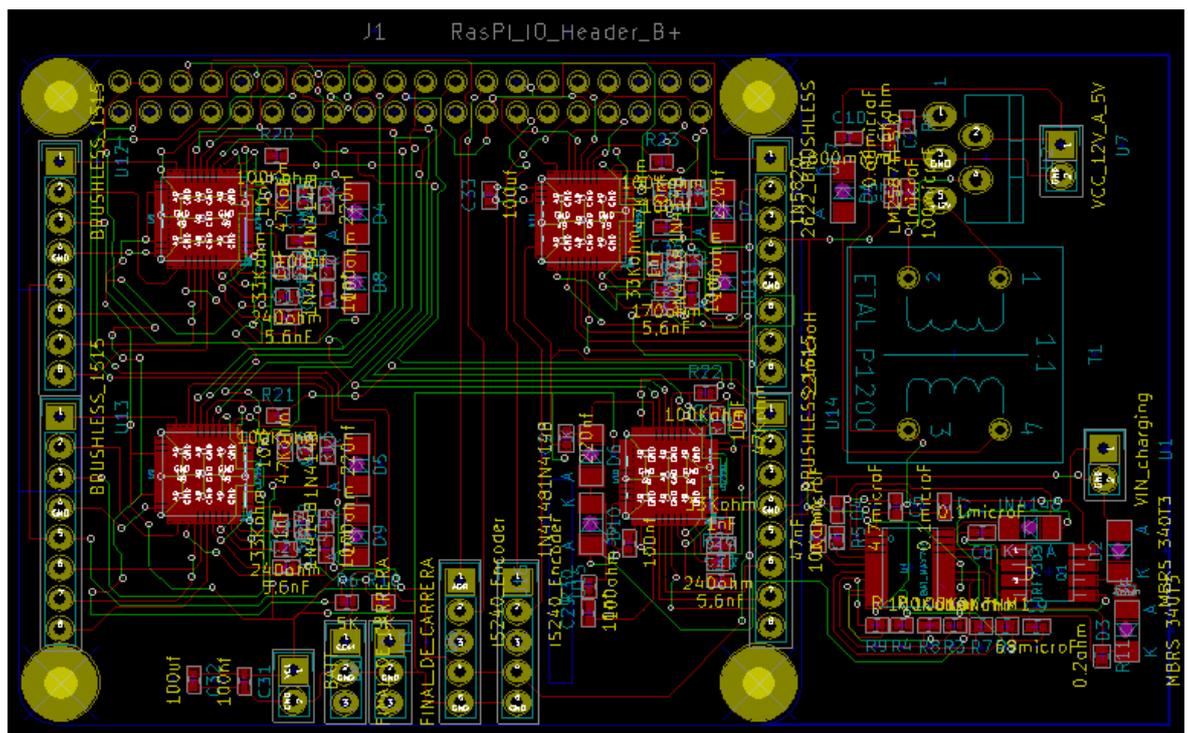


Figura95 PCB de la etapa de potencia, kicad, diseño propio

Como vemos, esta placa es más grande que el tamaño máximo de la raspberry, debido a la gran cantidad de componentes, he decidido ampliar el tamaño de este shield

en lugar de realizar otra placa, ya que un tercer piso, sería desproporcionado y el tamaño sería demasiado grande, además, esta placa al ir colocada encima de la PCB anterior, no hay ningún problema por ampliar su tamaño.

Podemos ver los cuatro controladores conectados a los conectadores donde llegan los cables de los motores brushlees y el resto de circuitería que necesitan para un correcto funcionamiento.

En la parte inferior se encuentran los dos encoder, los finales de carrera y la tensión de alimentación de los controladores.

A la derecha se ha colocado el cargador de la batería y el transformador de tensión de 12V a 5V para el resto de componentes.

Para conectar los componentes tenemos dos opciones, o dos formas, una por encima de la placa, la parte delantera (pistas de color rojo) o por la parte posterior de la placa (pistas de color verde).

## 5.3. PROGRAMACIÓN

Como este robot no se va a desarrollar de una forma física, no podemos comprobar el funcionamiento de la programación, de modo que se ha optado por llevar a cabo unos diagramas UML de funcionamiento de alto nivel de como tendría que actuar el robot en cada situación.

- Estación de carga.

El robot permanece en un estado de pausa, mientras la batería se encuentra al 100% de su capacidad, cuando no es así y la temperatura no supera la temperatura crítica, se carga durante un tiempo de 50ms. Si la temperatura supera la temperatura crítica, podríamos llegar a quemar la batería.

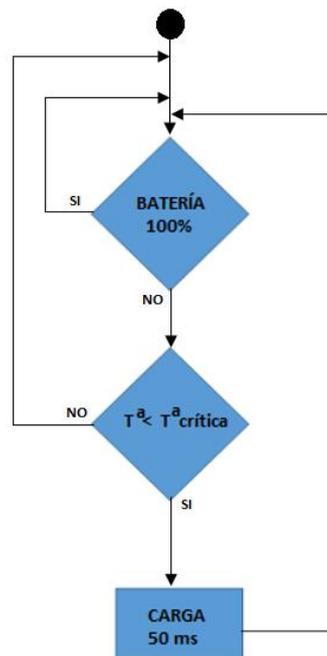


Figura96 UML carga, diseño propio.

- Ajustar el diámetro de la tubería.

Antes de empezar con la inspección tenemos que iniciar los sistemas de comunicación y transmisión y comprobar que están funcionando correctamente.

Lo primero que se debe hacer es ajustar el robot al tamaño de la tubería que queremos examinar, esta tarea, puede realizarse en dos momentos durante la inspección, antes de empezarla o mientras se está llevando a cabo el análisis de la tubería si esta presenta algún cambio de sección. Para llevar a cabo esta acción, el motor del husillo se mueve a su velocidad máxima y en un sentido u otro, dependiendo de si lo que deseamos es ajustar el robot a un diámetro mayor o menor respecto a la posición inicial del robot. El sentido, es una variable interna del sistema que puede tener dos valores, a izquierdas o a derechas.

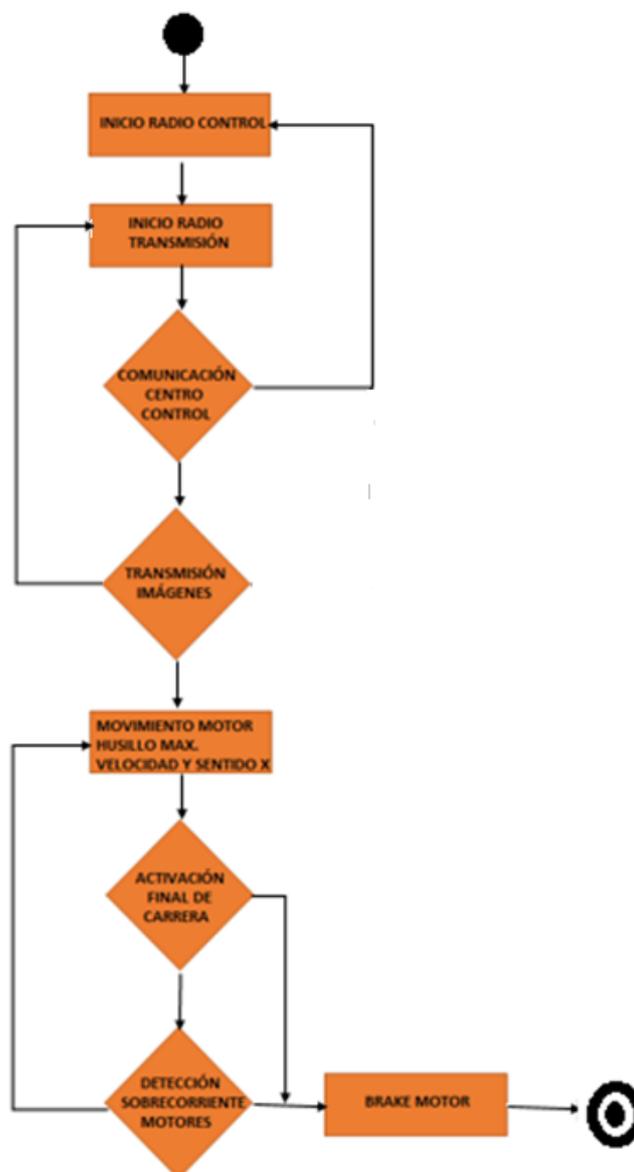


Figura97 UML ajuste al diámetro, diseño propio

Una vez hemos ajustado el robot al diámetro, frenamos el motor del husillo para impedir que el robot pierda el ajuste con la tubería.

- Avance

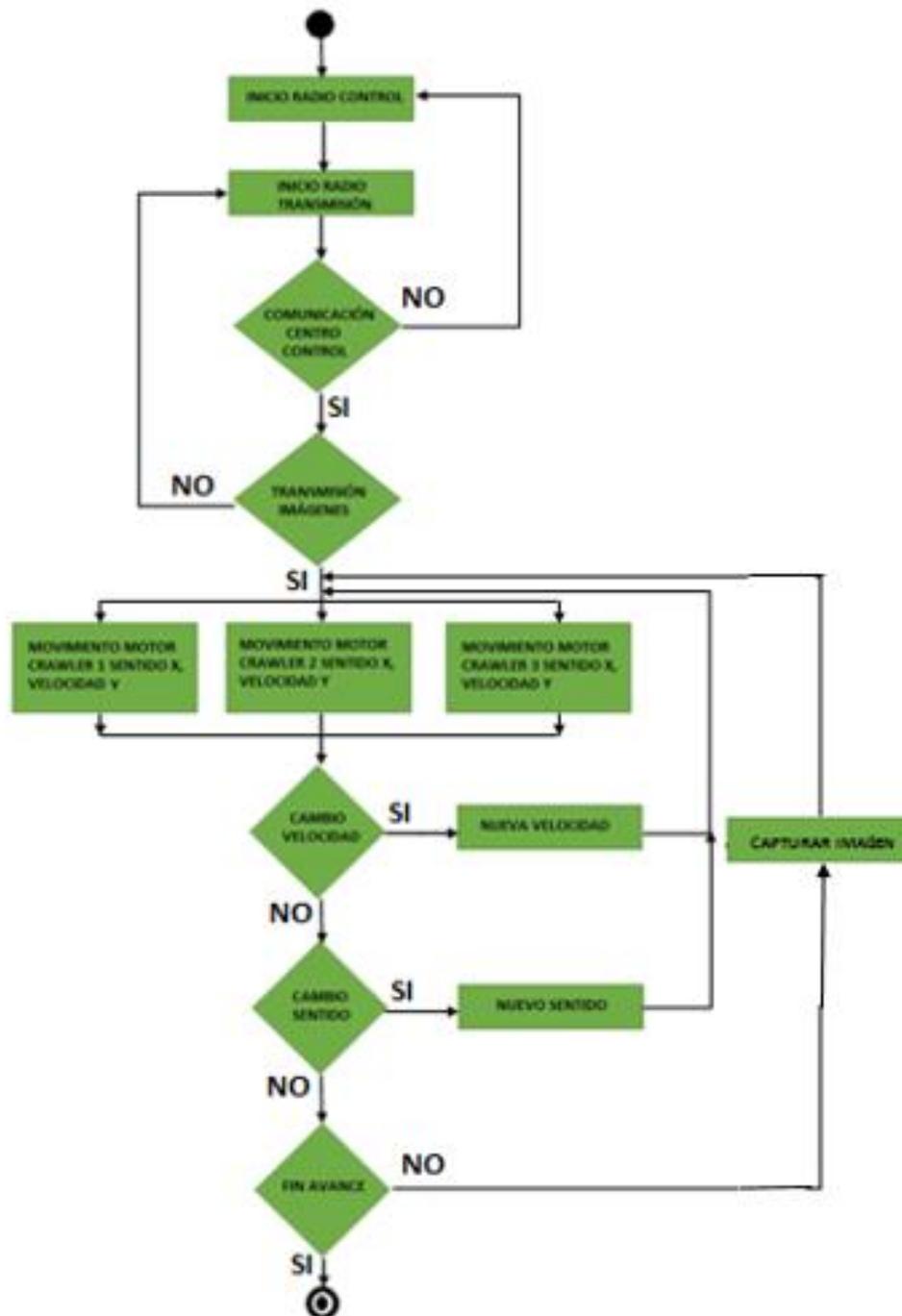


Figura98 UML avance, diseño propio

Previamente de comenzar con el avance, se debe comprobar de nuevo la inicialización de los sistemas de comunicación y transmisión y el correcto funcionamiento.

Para realizar el avance, los motores del crawler 1, crawler 2 y crawler 3, deben girar a una misma velocidad constante Y, y en un mismo sentido X. Velocidad y sentido son dos variables internas de nuestro sistema. Si durante la inspección se requiere un cambio de velocidad o se sentido, a través de estas variables se establecerá sus nuevos valores.

### ***5.3.1. DISEÑO INTERFAZ DE USUARIO***

Para completar los diagramas UML se ha diseñado una interfaz de usuario a través del cual, desde el centro de control, la persona responsable de la inspección de la tubería puede interactuar con el robot y comunicarse con él.

El operario, puede transmitir órdenes al robot y cambiar variables de funcionamiento como la velocidad de los motores o el sentido de giro de los mismos y visualizar el estado de otras variables del robot.

Además de hacer posible una comunicación remota con el robot, la interfaz de usuario posee una pantalla para mostrar las imágenes que el robot está transmitiendo del interior de la tubería, así como una serie de indicadores que nos hacen saber en todo momento cual es el estado actual del robot.

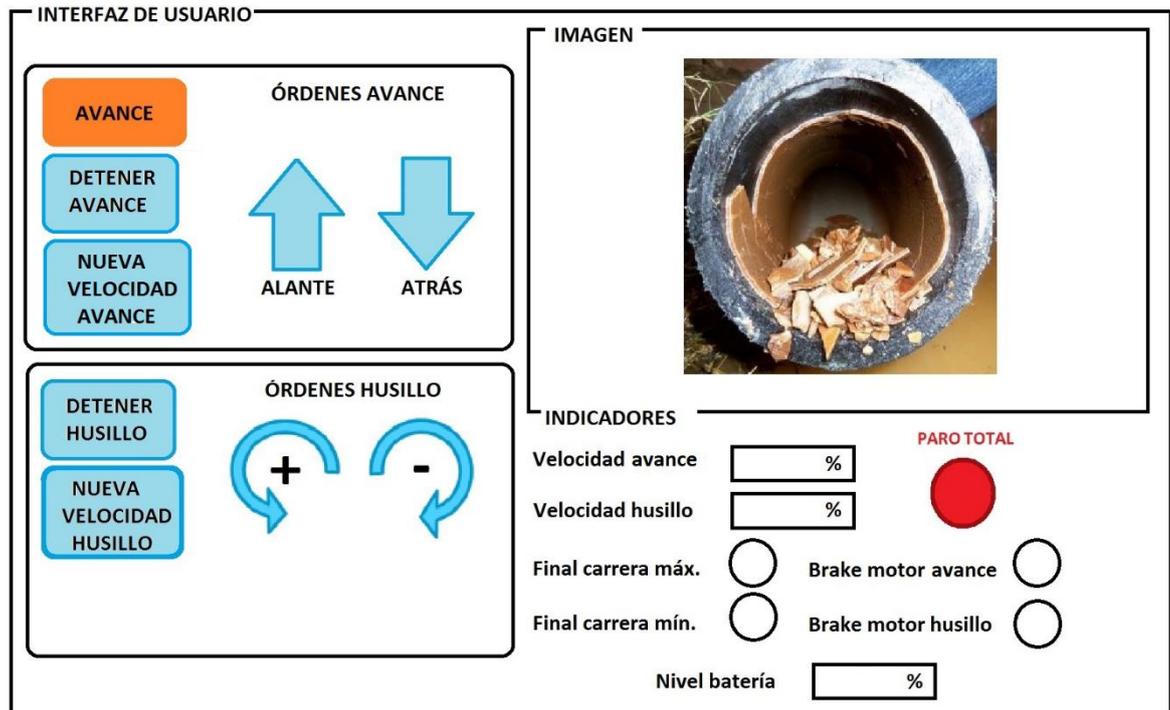


Figura99 Interfaz de usuario, diseño propio.

El interfaz está dividido en cuatro zonas, dos de ellas es para el control de los parámetros relacionados con el movimiento como son los motores de avance y el husillo. Otra parte es la recepción de imágenes a través de la pantalla y, por último, los indicadores de estado del robot.

Cuando el robot se encuentra en la tarea de avance, tal y como representa el diagrama UML anterior, el indicador de avance (Naranja) se encuentra encendido, dando a conocer al usuario, de que la tarea de inspección se ha iniciado correctamente.

Disponemos de dos botones de sentido del robot, ADELANTE y ATRÁS, con los cuales podemos definir en qué dirección queremos realizar la inspección o si durante ella se ha detectado alguna anomalía en la tubería y se quiere retroceder para volver a visualizar la zona afectada. Con esta orden, a través de la programación, se invierte el sentido de giro de los motores.

Podremos también detener el robot en cualquier momento durante la inspección con el botón DETENER AVANCE, puede ser muy útil en el caso de encontrarnos con alguna obstrucción en la tubería y el robot no pueda continuar. Mediante la programación, esta orden activaría el freno (BRAKE) del motor.

Si queremos variar la velocidad de los motores de avance, pulsaremos sobre NUEVA VELOCIDAD AVANCE, automáticamente se nos abrirá una ventana donde podamos insertar el nuevo valor que queramos.



*Figura100 Nueva vel. avance. diseño propio*

He decidido que tanto la velocidad como el nivel de batería se exprese en tanto por cien, es decir, que la velocidad máxima a la que puede avanzar el robot es el 100%, y cuando está parado, es 0%, de tal modo en la programación, se deberá crear una variable de tipo entero, "(int velocidadAdelante);" donde escribamos la velocidad en tanto por cien y el programa la transformará para poder variarla.

En las órdenes del husillo nos encontramos con la posibilidad de invertir el sentido de giro, necesario para poder ajustar el robot al diámetro de la tubería requerido tal y como se muestra en el diagrama UML de ajuste al diámetro de la tubería.

Cuando el motor gira en sentido positivo, es decir, en sentido contrario a las agujas del reloj, las extremidades del robot se cierran consiguiendo un diámetro menor, por el contrario, si el motor gira en sentido negativo, sentido horario, las extremidades del robot se abren, consiguiendo un mayor tamaño.

También podemos frenar el motor del husillo para impedir que una vez alcanzado el diámetro de la tubería las extremidades se cierren, el botón DETENER HUSILLO activa el "BRAKE" del motor como está indicado en el diagrama UML de programación.

Como hemos explicado en el apartado de programación, el movimiento de abrir o cerrar las extremidades se realiza a la máxima velocidad para que nos lleve el menor tiempo posible, pero existe la posibilidad de que sea necesario reducir esta velocidad, al igual que con el crawler, si accionamos el botón NUEVA VELOCIDAD HUSILLO, nos permite variar este parámetro.



*Figura101 Nueva vel. husillo. diseño propio*

En este caso se deberá crear una variable de tipo entera diferente a la anterior, "(int velocidadAbrir)" y seguido insertar la nueva velocidad en tanto por cien.

Se ha reservado un espacio donde visualizar las imágenes que el robot va tomando del interior de la tubería, esta acción se realiza durante la operación de avance como se describe en el diagrama UML.

En la parte inferior de la imagen transmitida, tenemos una serie de indicadores con los que conocemos en tiempo real y tenemos controlado algunos de los parámetros más importantes del robot; como son, los indicadores de velocidad, donde nos muestran en tanto por cien cual es la velocidad a la que tanto los motores de los crawler y el motor del husillo están funcionando.

Se muestran también cuatro indicadores luminosos, dos de ellos destinados para los frenos o "brake" de los motores, cuando el motor del husillo se frena, además de indicar que la velocidad es del 0%, se activará el piloto BRAKE MOTOR HUSILLO de color rojo, del mismo modo, cuando los motores de los crawler se frenen, además de indicar 0% en velocidad, se encenderá de color rojo el piloto BRAKE MOTOR CRAWLER.

Para conocer cuándo el robot ha alcanzado su máximo o mínimo tamaño tenemos los dos finales de carrera, para que el usuario conozca cuando el robot ha llegado a unos de sus dos extremos tenemos los otros dos indicadores, uno para cada final de carrera, que se encenderán de color rojo cuando uno de los finales de carrera se active.

Por último, disponemos de un indicador del nivel de batería, que nos indica en tanto por ciento de la capacidad de la que disponemos y si es necesario o no proceder a su carga.

### 5.3.2. DISEÑO DE FUNCIONES

A continuación, diseñamos un prototipo de las funciones que integrará el sistema con los parámetros y el tipo de datos para realizar cada una de las funciones que nuestro robot puede desempeñar.

#### **AVANCE**

*/\* Esta función nos permite mover el robot hacia adelante y cambiar la velocidad de avance del robot introduciendo un parámetro llamado "velocidadAdelante". Esta función nos retorna un booleano "true" si ha tenido éxito o "false" si se ha producido algún error. En esta situación, el freno de los motores de avance están desactivados y el freno del husillo activado.\*/*

*bool moverAdelante(int velocidadAdelante)*

*/\* Al igual que la función anterior, pero esta vez, nos permite mover el robot hacia atrás y cambiar la velocidad por medio del parámetro "velocidadAtras". Esta función nos retorna un booleano "true" si ha tenido éxito o "false" si se ha producido algún error. En esta situación, el freno de los motores de avance están desactivados y el freno del husillo activado.\*/*

*bool moverAtras (int velocidadAtras)*

*/\* Esta función se encarga de detener el avance del robot usando el parámetro "paroAvance", de activar el freno "brake" de los motores de avance y de poner la velocidad de avance a 0. Se activará el led "Brake motor avance"\*/*

*bool stopAvance (int paroAvance)*

#### **HUSILLO**

*/\* Esta función nos permite, con el parámetro "velocidadAbrir", modificar la velocidad del movimiento del husillo con la que el robot se abre para alcanzar un mayor tamaño para ajustarse al diámetro de la tubería. Esta función nos retorna un booleano "true" si ha tenido éxito o "false" si se ha producido algún error. En esta situación, el freno del husillo está desactivado y el freno de los motores de avance activado.\*/*

*bool abrir (int velocidadAbrir)*

/\* Esta función nos permite, con el parámetro "velocidadCerrar", modificar la velocidad del movimiento del husillo con la que el robot se cierra para alcanzar un menor tamaño para ajustarse al diámetro de la tubería. Esta función nos retorna un booleano "true" si ha tenido éxito o "false" si se ha producido algún error. En esta situación, el freno del husillo está desactivado y el freno de los motores de avance activado.\*/

*bool cerrar (int velocidadCerrar)*

/\* Esta función se encarga de detener el movimiento del husillo cuando el robot ha alcanzado el tamaño deseado para ajustarse a la tubería usando el parámetro "paroHusillo", de activar el freno "brake" del motor y de poner la velocidad a 0. Se activará el led "Brake motor husillo".\*/

*bool stopHusillo (int paroHusillo)*

/\* Esta función es la responsable de detectar cuando el robot ha alcanzado su máximo tamaño, retornará un booleano "true" si ha llegado a la máxima apertura o "false" si no ha llegado aún. Cuando llegue al punto máximo, se activará el "brake" del husillo y se frenará y se encenderá el piloto rojo de "final carrera máx.".\*/

*bool maximoTamaño (int fc1)*

/\* Esta función es la responsable de detectar cuando el robot ha alcanzado su mínimo tamaño, retornará un booleano "true" si ha llegado a alcanzado su mínimo tamaño o "false" si no ha llegado aún. Cuando llegue al punto mínimo, se activará el "brake" del husillo y se frenará y se encenderá el piloto rojo de "final carrera mín.".\*/

*bool minimoTamaño (int fc2)*

## COMUNICACIÓN

/\* Esta función es la encargada de la comunicación con el centro de control, nos retorna una variable de tipo char "character" con el comando que le hemos enviado o un 0, si no le hemos enviado nada.\*/

*char recibeComando()*

*/\* Esta función junto con la anterior, nos permite tener comunicados el robot con el centro de control. Nos retornar un valor booleano "true" o "false" si el robot ha recibido o no un estado.\*/*

*bool enviarEstado (char estado)*

*/\* Esta función es la encargada de transmitir la imagen, la variable creada "imagen" es del tipo imagen. Nos retorna un "true" si hay imagen o un "false" si no hay imagen.\*/*

*bool enviarImagen (imagen img)*

*/\* Para transmitir y guarda de las imágenes, es necesario crear una matriz de tamaño, la resolución de las imágenes. La resolución de la imagen es 640 x 480.\*/*

*unsigned char imagen [640][480];*

*/\* Para capturar las imágenes, es necesario inicializar la cámara.\*/*

*raspistill --mode 6 -o imagen.bmp -e bmp*

*/\*raspistill*

- *--mode 6*, Estable un modo de sensor específico. El mode 6, hace referencia al tamaño 640 x 480.
- *-o imagen.bmp*, Especifica la ruta donde las imágenes son salvadas.
- *-e bmp*, Especifica la extensión de la imagen, el tipo de imagen, en este caso, bmp.

*\*/*

## 6. CONCLUSIONES

Con la finalización de este proyecto he llegado a las siguientes conclusiones.

- Los materiales que se han seleccionado para la estructura del robot y la protección del mismo contra la humedad, el polvo y otros agentes dañinos para el sistema son los más apropiados.
- El diseño realizado en 3D con el software Inventor, tiene una gran importancia en el desarrollo del proyecto ya que podemos detectar numerosos fallos o errores antes de fabricar un prototipo real, y, por consiguiente, supone un gran ahorro de dinero.
- Conociendo el paso y tamaño de nuestro robot de una forma aproximada con ayuda del diseño en 3D, hemos podido seleccionar los actuadores encargados del movimiento del husillo y del avance del robot de una forma satisfactoria.
- Se ha definido la función de transferencia, así como la ecuación que calcula la velocidad lineal del sistema.
- En el apartado del diseño electrónico, se han seleccionado los componentes electrónicos para desempeñar las funciones del robot.
- Hemos seleccionado la batería a raíz del consumo total del robot y de las distintas tareas de funcionamiento.
- Con el modelo de batería seleccionada podemos triplicar la autonomía del robot, lo que conlleva el poder realizar inspecciones en tuberías de mayor longitud y durante más tiempo.
- Para completar el diseño electrónico se han diseñado dos PCB-s, una que contiene el sistema de radio transmisión y otra con la epata de potencia y transformaciones de tensión necesarias.
- Por último y debido a que no se ha fabricado un prototipo físico en el que poder probar una programación a bajo nivel, se ha realizado una programación de alto nivel con los diagramas UML de funcionamiento del robot.

## 6.1. TRABAJOS FUTUROS

Si se siguiera con la investigación y el desarrollo del robot, se podría hacer más hincapié sobre las siguientes líneas.

- Desarrollar un prototipo físico del robot para poder exponerlo a situaciones reales de trabajo y comprobar su funcionamiento.
- Una vez fabricado un prototipo, desarrollar el apartado de programación a bajo nivel para comprobar que el robot se comporta acorde a los diagramas de alto nivel.
- Instalar en el robot un sistema de balizas con el que pudiera indicar en qué punto exacto de la tubería está el desperfecto, rotura u obstrucción y poder comunicarlo al centro de control.
- Instalar una segunda cámara en la parte posterior del robot para grabar lo que este va dejando atrás y que ambas emitiesen las fotos a color.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Aplicaciones de las ondas electromagnéticas. Telecomunicaciones. (n.d.). Retrieved November 19, 2015, from [http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3233/html/3\\_aplicaciones\\_de\\_las\\_ondas\\_electromagnticas\\_telecomunicaciones.html](http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3233/html/3_aplicaciones_de_las_ondas_electromagnticas_telecomunicaciones.html)

Baterías de Li-Ion: Ventajas, desventajas, y mantenimiento. (2014.). Retrieved from <http://www.securamente.com/baterias-de-li-ion-ventajas-desventajas-y-mantenimiento/>

Baterías de NiCd y NiMH. (2009.). Retrieved December 7, 2015, from <http://www.icmm.csic.es/jaalonso/velec/baterias/bateria.htm>

Baterías de Ni-MH - EcuRed. (2015.). Retrieved December 7, 2015, from [http://www.ecured.cu/Bater%C3%ADas\\_de\\_Ni-MH](http://www.ecured.cu/Bater%C3%ADas_de_Ni-MH)

Baterías LiPo | Erle Robotics: Erle-copter. (2014.). Retrieved December 8, 2015, from <https://erlerobotics.gitbooks.io/erle-robotics-erle-copter/content/es/safety/lipo.html>

clase.pdf. (2015). Retrieved from <http://www-2.dc.uba.ar/materias/robotica/practicas/Odometria/clase.pdf>

Cómo funciona Bluetooth. (n.d.). Retrieved November 17, 2015, from <http://es.ccm.net/contents/69-como-funciona-bluetooth>

Cuánticos, C. (n.d.). Robótica: Estimación de posición por odometría. Retrieved from <http://cuentos-cuanticos.com/2011/12/15/robotica-estimacion-de-posicion-por-odometria/>

Energía - Baterías para alimentación de robots - Robots Argentina. (2007.). Retrieved December 14, 2015, from [http://robots-argentina.com.ar/Energia\\_baterias.htm](http://robots-argentina.com.ar/Energia_baterias.htm)

Few Words About Stepper Motor | EEP. (n.d.).

FIBRA OPTICA. (n.d.). Retrieved November 17, 2015, from [http://www.uazuay.edu.ec/estudios/sistemas/teleproceso/apuntes\\_1/optica.htm](http://www.uazuay.edu.ec/estudios/sistemas/teleproceso/apuntes_1/optica.htm)

MICRODRIVE. (n.d.). Retrieved November 23, 2015, from <http://www.pfinalfra.com.ar/proyectos/Microstepping/MICRODRIVE.htm>

motores-brushless.pdf. (n.d.). Retrieved from <https://1mecanizadoelarenal.files.wordpress.com/2013/11/motores-brushless.pdf>

Motores paso a paso - Monografias.com. (n.d.). Retrieved November 23, 2015, from <http://www.monografias.com/trabajos17/motor-paso-a-paso/motor-paso-a-paso.shtml>

Pagina nueva 2. (2015.). Retrieved December 7, 2015, from <http://platea.pntic.mec.es/~lmarti2/robotinfra/baterias3.htm>

Pérez, E. H. (1998). *Introducción a las telecomunicaciones modernas*. Editorial Limusa.

Pipe inspection robot. (n.d.). Retrieved November 5, 2015, from [http://es.slideshare.net/arjunmbetageri/pipe-inspection-robot?next\\_slideshow=1](http://es.slideshare.net/arjunmbetageri/pipe-inspection-robot?next_slideshow=1)

Robot de inspección Eventronic Ibot3. (n.d.). Retrieved November 5, 2015, from <http://www.robotlimpiezaconductos.es/index.php/ibot3>

Robot de inspeccion tuberias ROVVER. (n.d.). Retrieved November 5, 2015, from <http://www.panatec-agua.com/Robot-Inspeccion-Rovver.php>

- Robot para inspeccionar tuberías de agua desde dentro — Noticias de la Ciencia y la Tecnología (Amazings® / NCYT®). (n.d.). Retrieved November 5, 2015, from <http://noticiasdelaciencia.com/not/12362/robot-para-inspeccionar-tuberias-de-agua-desde-dentro/>
- Robóts de Inspección Camaras y sistemas de inspeccion robotizada - Versatrax 300. (n.d.). Retrieved November 5, 2015, from <http://www.robotsdeinspeccion.com/veh%C3%ADculos/versatrax-300/>
- Tema 4. Motores eléctricos de Corriente Continua (c.c.). (n.d.). Retrieved November 12, 2015, from <http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio//4750/4933/html/index.html>
- Teorema de Nyquist o Teorema del Muestreo y el Aliasing. (n.d.). Retrieved March 21, 2016, from [http://www.gradomultimedia.com/29-musica/2\\_2\\_2-teorema-de-nyquist.html](http://www.gradomultimedia.com/29-musica/2_2_2-teorema-de-nyquist.html)
- Transmisión de datos: Cableado. (n.d.). Retrieved November 17, 2015, from <http://es.ccm.net/contents/685-transmision-de-datos-cableado>
- Transmisión de datos por radio frecuencia. (n.d.). Retrieved November 19, 2015, from <http://es.slideshare.net/nallely2015/transmision-de-datos-por-radio-frecuencia>
- ULC-CasingCrawler-Datasheet.pdf. (n.d.). Retrieved from <http://www.ulcrobotics.com/wp-content/uploads/2013/07/ULC-CasingCrawler-Datasheet.pdf>
- Viscosidad. (2016, March 2). In *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Retrieved from <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Viscosidad&oldid=89532614>
- WIFI - Comunicación Inalámbrica. (n.d.). Retrieved November 17, 2015, from <http://www.aulaclie.es/articulos/wifi.html>



## Relación de documentos

( ) Memoria .....	131	páginas
( ) Planos .....	30	páginas
( ) Anexos .....	134	páginas

La Almunia, a 6 de Junio de 2016

Firmado: Oscar Latorre Moreno