



**Escuela Superior  
de Ingeniería y Tecnología**  
Universidad de La Laguna

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

---

## **Desarrollo de un brazo robótico antropomórfico:**

Diseño base, elección de los motores, electrónica de potencia y cálculo y simulación de la cinemática del robot

Trabajo Fin de Grado

Autor:

**Domingo Miguel Izquierdo Afonso**

Tutor:

**Santiago Torres Álvarez**



# ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Alcance .....   | 11 |
| 1.2. Objetivos.....  | 12 |
| 1.2.1. Objetivos generales.....                                    | 12 |
| 1.2.2. Objetivos específicos.....                                  | 12 |
| 1.3. Estructura general del trabajo.....                           | 12 |
| Capítulo I: Alcance, Objetivos y Estructura General.....           | 12 |
| Capítulo II: Introducción General.....                             | 13 |
| Capítulo III: Dimensionamiento y diseño .....                      | 13 |
| Capítulo IV: Elección de los motores y ubicación .....             | 13 |
| Capítulo V: Diseño de la electrónica de potencia.....              | 13 |
| Capítulo VI: Obtención del modelo cinemático .....                 | 13 |
| Capítulo II. Introducción General .....                            | 14 |
| 2.1. Introducción general.....                                     | 14 |
| 2.2. Clasificación de los robots industriales en generaciones..... | 14 |
| 2.3. Clasificación del robot industrial según la IFR .....         | 15 |
| Capítulo III. Dimensionamiento y diseño.....                       | 17 |
| 3.1. Elección de las piezas .....                                  | 17 |
| 3.2. Dimensionamiento.....   | 17 |
| 3.3. Diseño de las articulaciones.....                             | 17 |
| Capítulo IV. Elección de los motores y ubicación.....              | 20 |
| 4.1. Principio teórico.....  | 20 |
| 4.2. Procedimiento de cálculo.....                                 | 21 |
| 4.3. Punto de acción del motor.....                                | 21 |
| 4.4. Cálculo del peso .....  | 22 |
| 4.5. Distancia del punto de acción .....                           | 23 |
| 4.6. Cálculo de los centroides .....                               | 24 |
| 4.7. Obtención del par .....                                       | 27 |
| 4.8. Recalculo del par y elección de los motores.....              | 27 |
| 4.8.1. Motores 4 y 5 .....   | 28 |
| 4.8.2. Motores 2 y 3 .....   | 28 |
| 4.8.3. Motor 1 .....   | 29 |
| 4.9. Motores definitivos.....                                      | 29 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Capítulo V. Diseño de la electrónica de potencia</b> ..... | 31  |
| <b>5.1. Elección de los puentes en H</b> .....                | 31  |
| <b>5.2. Elección de la fuente de alimentación</b> .....       | 32  |
| <b>5.3. Protección contra sobrecargas</b> .....               | 32  |
| <b>5.3.1. Motores hombro y codo</b> .....                     | 32  |
| <b>5.3.2. Motor de la base</b> .....                          | 32  |
| <b>5.4. Diagrama de bloques electrónica de potencia</b> ..... | 33  |
| <b>Capítulo VI. Obtención del modelo cinemático</b> .....     | 34  |
| <b>6.1. Introducción al modelo cinemático</b> .....           | 34  |
| <b>6.2. Primer modelo cinemático</b> .....                    | 34  |
| <b>6.2.1. Modelo cinemático directo</b> .....                 | 35  |
| <b>6.2.2. Modelo cinemático inverso</b> .....                 | 37  |
| <b>6.3. Segundo modelo cinemático</b> .....                   | 40  |
| <b>6.3.1. Modelo cinemático directo</b> .....                 | 40  |
| <b>6.3.2. Modelo cinemático inverso</b> .....                 | 44  |
| <b>6.4. Simulación en Octave</b> .....                        | 47  |
| <b>Conclusiones</b> .....                                     | 49  |
| <b>Conclusions</b> .....                                      | 50  |
| <b>Bibliografía</b> .....                                     | 51  |
| <b>ANEXOS</b> .....   | 52  |
| <b>ANEXO I: Cálculos de inercia para cada motor</b> .....     | 53  |
| <b>ANEXO II: Dathaseet electrónica de potencia</b> .....      | 64  |
| <b>ANEXO II: Simulación de los distintos modelos</b> .....    | 92  |
| <b>ANEXO IV: Impresión 3D</b> .....                           | 100 |

# ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Fig. 1: Ejemplo robot secuencial. Robot paletizador KUKA. KR 40 PA .....   | 15 |
| Fig. 2: Ejemplo robot de trayectoria manipulable. Robot SCORBOT-ER 9 PRO.....  | 15 |
| Fig. 3: Ejemplo robot adaptativo. Robot manipulado mediante técnica de control visual.....   | 15 |
| Fig. 4: Ejemplo robot telemanipulado. Manipulador telescópico compacto .....   | 16 |
| Fig. 5: Primer diseño de brazo antropomórfico.....   | 18 |
| Fig. 6: Segundo diseño de brazo antropomórfico.....  | 18 |
| Fig. 7: Tercer diseño de brazo antropomórfico .....  | 19 |
| Fig. 8: Imagen de las especificaciones de un motor cualquiera .....  | 20 |
| Fig. 9: Ubicación de los distintos puntos de acción .....  | 22 |
| Fig. 10: Imagen de la situación más crítica para la determinación del par .....  | 24 |
| Fig. 11: Imagen de la pieza a levantar por los motores del codo (pieza 3) .....  | 25 |
| Fig. 12: Imagen de las piezas a levantar por los motores del hombro (piezas 2 y 3).....  | 25 |
| Fig. 13: Imagen de las piezas a levantar por el motor de la base (piezas 1, 2 y 3) .....   | 26 |
| Fig. 14: Imagen del diagrama de bloques L298N .....  | 31 |
| Fig. 15: Imagen relé de láminas Cynergy3, intensidad de conmutación 3 A.....   | 32 |
| Fig. 16: Imagen relé de estado sólido Crydom, intensidad de conmutación 1.5 A .....  | 33 |
| Fig. 17: Diagrama de Bloques que resume el conexionado entre los distintos elementos .....   | 33 |
| Fig. 18: Primer planteamiento para el modelo cinemático.....   | 34 |
| Fig. 19: Perspectiva del brazo en el Plano XY .....  | 35 |
| Fig. 20: Perspectiva del brazo en el Plano ZY .....  | 36 |
| Fig. 21: Perspectiva de I2 y I3 en el plano que los contiene.....  | 36 |
| Fig. 22: Perspectiva del brazo en los planos ZY y XY .....   | 37 |
| Fig. 23: Perspectiva del brazo en el Plano XY .....  | 38 |
| Fig. 24: Perspectiva de I2 y I3 en el plano que los contiene .....   | 38 |
| Fig. 25: Segundo planteamiento para el modelo cinemático.....  | 40 |
| Fig. 26: Planteamiento del esquema del robot para el cálculo de la cinemática directa mediante parámetros Denavit-Hartenberg ..... | 43 |
| Fig. 27: Perspectiva del brazo en los distintos planos.....  | 44 |
| Fig. 28: Perspectiva del brazo en el plano XY .....  | 45 |
| Fig. 29: Perspectiva del brazo en el plano ZY .....  | 45 |
| Fig. 30: Perspectiva del brazo en el plano que contiene I1, I2, x .....  | 46 |
| Fig. 31: Simulación del brazo alcanzando una posición deseada .....  | 48 |

# ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla. 1: Tabla de las longitudes del brazo .....   | 23 |
| Tabla 2: Tabla del cálculo de áreas y volúmenes.....  | 23 |
| Tabla 3: Tabla con los pesos de cada pieza .....  | 23 |
| Tabla 4: Tabla de los centroides de las piezas 2 y 3.....   | 25 |
| Tabla 5: Tabla de los centroides de cada pieza .....  | 26 |
| Tabla 6: Tabla con los pares que debe soportar cada motor .....   | 27 |
| Tabla 7: Tabla con los pares definitivos que debe soportar cada motor .....                                   | 28 |
| Tabla 8: Tabla de los parámetros Denavit-Hartenberg.....  | 42 |
| Tabla 9: Tabla con los resultados de resolver la cinemática directa por el método de Denavit-Hartenberg ..... | 43 |

# Resumen

El trabajo Fin de Grado que aquí se presenta es uno de los cuatro trabajos que componen el proyecto completo de diseño e implementación de un brazo robótico que replique los movimientos de un brazo humano. Este proyecto ha sido ideado y realizado de forma conjunta por Domingo Miguel Izquierdo Afonso, Javier Peña Mosegué y Alexis Perera Acosta, estudiantes del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, y por Samuel Marrero Pérez, estudiante del Grado en Ingeniería Mecánica Industrial.

En lo que respecta a este Trabajo de Fin de Grado, el objetivo principal es el diseño prototipo del brazo, la elección de los motores para cada articulación, el diseño de la electrónica de potencia y la definición y simulación de la cinemática directa e inversa del robot propuesto.

Para ello se han aplicado conocimientos de mecánica, electrónica y robótica basados en los conocimientos adquiridos a lo largo de titulación. Además, se ha profundizado en todos ellos, adquiriendo mayores competencias que las recibidas con anterioridad.

# **Abstract**

The Final Degree Project presented here is one of the four works that make up the complete project for the design and implementation of a robotic arm that replicates the movements of a human arm. This project has been jointly devised and carried out by Domingo Miguel Izquierdo Afonso, Javier Peña Mosegué and Alexis Perera Acosta, students of the degree in Industrial Electronic and Automatic Engineering, and by Samuel Marrero Pérez, student of the degree in Industrial Mechanical Engineering.

The main objective of this Final Degree Project is the prototype design of the arm, the choice of motors for each joint, the design of power electronics and the definition and simulation of the direct and inverse kinematics of the proposed robot.

Different types of knowledge have been used in this project, like mechanic, electronic and robotic knowledge that we has acquired along this degree. In addition, this knowledge has been deepened, acquiring a greater degree of skills.





**MEMORIA**

# **Capítulo I. Alcance, Objetivos y Estructura General**

## **1.1. Alcance**

Aunque este proyecto está pensado con fines educativos, un brazo antropomórfico tiene múltiples utilidades.

### **Educación:**

La robótica se encuentra muy presente en el ámbito lectivo. Su presencia ayuda al desarrollo por parte de los alumnos de los conocimientos necesarios para que el día de mañana puedan ser un factor determinante en muchos otros campos afectados por la robótica.

La presencia de la robótica en el entorno educativo permite profundizar en distintos conocimientos relacionados con la robótica y comprender las limitaciones del ser humano con respecto a un robot.

### **Medicina:**

Cabe destacar los avances realizados en el mundo de las prótesis humanas. Cada vez la tecnología que emplean estos sustitutos de miembros humanos es más y más sofisticada. Cada vez se asemejan más a la pierna, el brazo, la mano....

Además, dentro del campo de la medicina es conocido por muchos el denominado "robot Da Vinci", diseñado para realizar operaciones precisas y con el menor daño quirúrgico posible.

### **Militar:**

Dentro del campo militar, el uso de un brazo robótico también cuenta con múltiples aportaciones.

El desarrollo de exoesqueletos es una realidad, ello permite al combatiente disminuir no solo la carga, sino también su carga cognitiva gracias al uso de sensores.

Además, tareas como la desactivación de equipos explosivos o adentrarse en zonas de alto riesgo, podría verse eclipsado gracias al desarrollo de robots capaces de llevar a cabo estas funciones sin la necesidad de poner en peligro la vida de personas.

### **Industria:**

Este campo es el más avanzado hasta la fecha, los brazos industriales son conocidos por todo el mundo, permitiendo llevar tareas a cabo con mayor precisión y sin ningún tipo de cansancio.

Gracias a esto, se le puede añadir mayor velocidad a estas tareas, lo cual conlleva a su vez a una reducción de costos mejorando los niveles de producción sin perder la calidad del producto.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivos generales**

El objetivo del presente proyecto consiste en el diseño e implementación completa de un brazo robótico antropomórfico, es decir, cuyos movimientos simulen los de un ser humano.

Para su diseño se hará uso de la impresión 3D. Este método de fabricación ha sido elegido con el objetivo de obtener un diseño completamente propio, adecuado en dimensiones a las diversas elecciones de diseño, componentes y funcionalidad. Así mismo, permite aligerar los costes de fabricación y obtención de un prototipo inicial, adecuado para un entorno académico.

Una vez finalizado, el diseño de este brazo antropomórfico puede llegar a ser una gran ventaja en el campo educativo, permitiendo al alumno profundizar en el campo de la robótica y entender aún más las limitaciones de un ser humano frente a un robot.

Se tratará pues de un robot de trayectoria controlable, cuyo principal objetivo será llegar a determinadas posiciones mediante el uso de la programación. Dichas posiciones deben ser alcanzadas por el robot de una forma similar a la del cuerpo humano.

Se debe tener en cuenta que estas posiciones se encuentran limitadas pues al ser únicamente un brazo, no puede cambiar de ubicación por sí mismo, viéndose confinado a un radio de actuación.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Dentro de la totalidad del proyecto que supone el diseño de un brazo robótico antropomórfico, los objetivos del presente documento y sus distintos apartados son:

- Hacer un diseño previo de su estructura
  - o Determinar las dimensiones de la estructura
  - o Diseño de las articulaciones
- Elección de los motores y su ubicación
- Diseño de la electrónica de potencia
- Cálculo del modelo cinemático directo
- Cálculo del modelo cinemático inverso
- Simulación del modelo cinemático

## **1.3. Estructura general del trabajo**

La presente memoria se desarrollará en los siguientes capítulos.

### **Capítulo I: Alcance, Objetivos y Estructura General**

El primer capítulo presenta el alcance de este proyecto, dando múltiples ejemplos de las aplicaciones que tiene la robótica a día de hoy. También refleja los objetivos del presente proyecto y contiene una breve descripción de la estructura que se seguirá en el mismo.

## **Capítulo II: Introducción General**

El segundo capítulo está destinado a introducir al lector de una forma breve al conocimiento de la robótica y presentar las bases del presente proyecto. Esto dará pie a los siguientes capítulos, en los que se desarrollarán cada una de las etapas correspondientes.

## **Capítulo III: Dimensionamiento y diseño**

El tercer capítulo detalla el punto de partida, cómo se eligieron las dimensiones y llevando a cabo el diseño de las distintas articulaciones, así como el lugar donde irán colocados los distintos motores que generarán los ángulos necesarios para alcanzar las posiciones deseadas.

## **Capítulo IV: Elección de los motores y ubicación**

El cuarto capítulo consiste en la elección de los motores en función de distintos parámetros, tales como el peso, la inercia, el par, etc., haciendo un estudio de cada uno de ellos. Además, se propondrá la ubicación que tendrá cada uno de los motores previamente seleccionados.

## **Capítulo V: Diseño de la electrónica de potencia**

En el quinto capítulo se estudia de la electrónica de potencia que se ha de emplear en el diseño de este robot. Desde el uso de módulos L298N (puentes en H) hasta el uso de una fuente de alimentación que suministre el voltaje necesario a cada uno de los elementos que lo requieran.

## **Capítulo VI: Obtención del modelo cinemático**

El sexto y último capítulo de este proyecto versará sobre el cálculo del modelo cinemático del robot propuesto. Se plantean dos estructuras morfológicas diferentes del robot y hace uso de distintos métodos, como son el uso de la trigonometría y de los parámetros Denavit-Hartenberg para la obtención de la cinemática directa e inversa de las dos estructuras.

## Capítulo II. Introducción General

### **2.1. Introducción general**

La robótica va unida a la construcción de “artefactos” que tratan de materializar el deseo humano de crear seres a su semejanza y que al mismo tiempo lo descarguen de trabajos peligrosos, tediosos o que supongan una pérdida de tiempo que podría verse reducida gracias a estos artefactos.

Los robots surgen en la segunda mitad del pasado siglo. Impulsados por su gran aceptación en la industria automovilística, son hoy en día un elemento habitual en fábricas y talleres.

Tratándose aún de una tecnología reciente, la robótica es motivo de investigación en la mayor parte de las universidades y centros de investigación mundial.

El correcto conocimiento de su funcionamiento y modo de utilización se hace imprescindible, tanto para aquellos técnicos de la industria de la manufactura como para los investigadores que centran su actividad en este tema.

La formación del profesional de la ingeniería ha sido sensible a esta realidad industrial y ha incluido desde finales de los ochenta a la robótica como parte de sus enseñanzas.

### **2.2. Clasificación de los robots industriales en generaciones**

Existen diversas formas de clasificar un robot, sin embargo se escoge en este proyecto, como principal clasificación característica del brazo antropomórfico, la clasificación por generaciones [3]:

- **Primera Generación:**
  - Repite la tarea programada secuencialmente
  - No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno
- **Segunda Generación**
  - Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia
  - Puede localizar, clasificar y detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos en consecuencia
- **Tercera Generación**
  - Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural
  - Posee capacidad para la planificación automática de tareas

En esta definición se debe entender que la reprogramabilidad y multifunción se consigue sin modificaciones físicas del robot.

## 2.3. Clasificación del robot industrial según la IFR

La Federación Internacional de Robótica (IFR) distingue entre cuatro tipos de robots:

- Robot secuencial



Fig. 1: Ejemplo robot secuencial. Robot paletizador KUKA. KR 40 PA  
Fuente: página de kuka

- Robot de trayectoria controlable



Fig. 2: Ejemplo robot de trayectoria manipulable. Robot SCORBOT-ER 9 PRO  
Fuente: página de ORPI

- Robot adaptativo

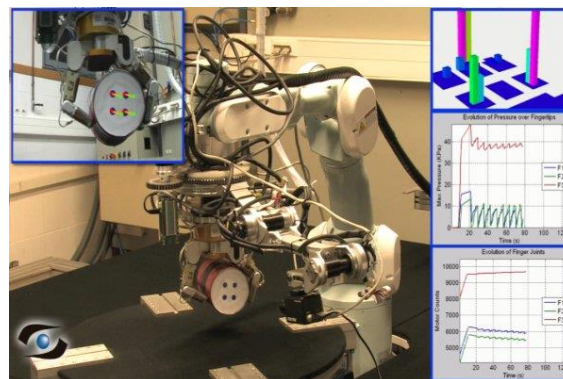


Fig. 3: Ejemplo robot adaptativo. Robot manipulado mediante técnica de control visual  
Fuente: Grupo AUROVA

- Robot telemanipulado



Fig. 4: Ejemplo robot telemanipulado. Manipulador telescópico compacto  
Fuente: Direct Industry



## Capítulo III. Dimensionamiento y diseño

### **3.1. Elección de las piezas**

Como punto de partida, se ha elegido basar el diseño del brazo en tres piezas principales. En las distintas figuras existentes a lo largo del proyecto se hará referencia a estas piezas como:

- Pieza 1 → Tronco
- Pieza 2 → Brazo
- Pieza 3 → Antebrazo

### **3.2. Dimensionamiento**

A continuación se determinan las medidas que tendrán cada una de las piezas. Se ha tratado en todo momento de mantener unas proporciones similares a las de un auténtico brazo humano.

Aunque las longitudes que se presentan a continuación han sido las definitivas, en los cálculos posteriores relacionados con la elección de motores, esos valores se pueden reducir o aumentar estas dimensiones acorde a nuestras necesidades. Por tanto:

- El tronco será la mayor pieza de todas, dándole una longitud de 30 centímetros.
- El brazo, un poco mayor que el antebrazo, tendrá una longitud de 20 centímetros.
- El antebrazo será la menor de las tres piezas principales, tendrá una longitud de 15 centímetros.

Juntos, el brazo y el antebrazo tendrán una longitud mayor que la del tronco, lo cual permite que se asemeje más a la realidad. Por ejemplo, si se tiene que alcanzar una posición que se encuentra pegada a la base del tronco, es decir, en lo que sería la cadera, no solo debe tener la longitud necesaria para llegar a esa posición, sino que además se flexiona ligeramente el codo para que esto llegue a ser posible.

Recordar siempre, que al tratarse de un brazo antropomórfico se deberá seguir manteniendo una proporción que facilite la realización de los distintos movimientos de una forma acorde a la realidad.

### **3.3. Diseño de las articulaciones**

Tras determinar las dimensiones del brazo toca diseñar sus articulaciones, es decir, de qué forma va a realizar los distintos movimientos para los que la vamos a programar.

Para ello, se ha trabajado en el diseño previo de este robot, tanto de las distintas piezas, articulaciones y la viabilidad de determinados mecanismos para reducir el par de los motores.

A partir de aquí, se empezará a trabajar con visualizaciones de los distintos diseños que se han ido llevando a cabo. Se plantea un primer boceto en el que se visualicen las tres piezas que conforman el brazo, así como las principales articulaciones que generarán los movimientos antropomórficos.

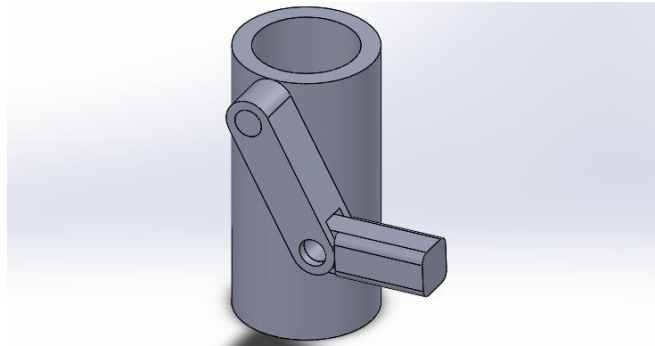


Fig. 5: Primer diseño de brazo antropomórfico

Como se puede apreciar, este diseño empezaría a asemejarse a un brazo humano y contempla los siguientes movimientos:

1. Giro del tronco: no se aprecia pero en la base dispondría de un motor que permite el movimiento de la cintura.
2. Giro del hombro: permite los desplazamientos en el *plano ZY* (*dependiendo del giro que se produzca en el tronco*).
3. Giro del codo: permite la flexión de este mismo.

Así, disponemos de tres tipos de giros, todos ellos emulan el movimiento de un brazo auténtico, con lo cual respeta la premisa que se ha tenido desde el principio del trabajo. Por otro lado, como se dijo en la descripción del hombro, sólo se permiten los movimientos del hombro en un mismo plano.

Si se busca replicar el movimiento de una persona, vemos que esto se resuelve principalmente mediante la elevación de dicho hombro. Por tanto, se han seguido haciendo avances en el diseño para buscar una solución a este nuevo problema. De ahí, surge este nuevo boceto:

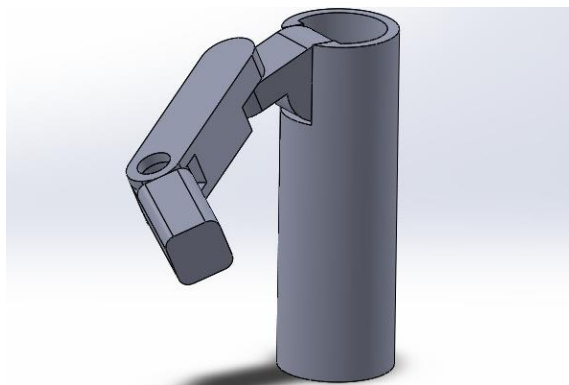


Fig. 6: Segundo diseño de brazo antropomórfico

Ahora sí, se pueden alcanzar posiciones mediante dos sistemas de movimiento en el hombro que aportan grados de libertad redundantes. Por ello, este podría ser un primer diseño válido de cómo va a ser el brazo.

Aun así, en un intento de aproximarse más a la realidad, se observa cómo para cumplir este objetivo ha sido necesario añadir una pieza más en el hombro, haciendo que pierda un poco su forma antropomórfica. Por ello, se ha intentado optimizar el hombro, haciendo que a su vez quede más compacto.

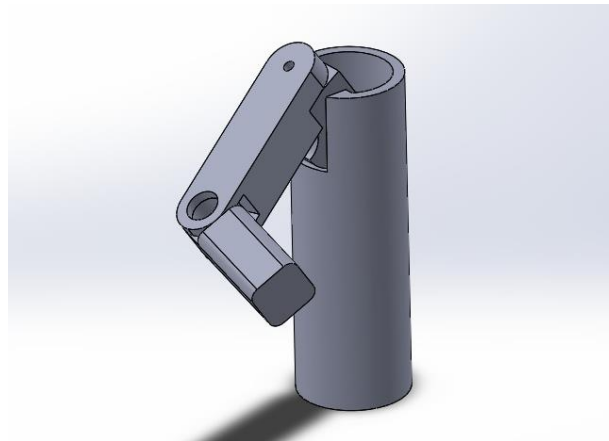


Fig. 7: Tercer diseño de brazo antropomórfico

Como se aprecia en la imagen anterior, este será el boceto del que se hará uso a lo largo de este proyecto. Obviamente, a la hora de su desarrollo sufrirá algunas modificaciones de cara al resultado final, sin embargo, para este proyecto y las tareas que en él se llevarán a cabo, se empleará este último.

## Capítulo IV. Elección de los motores y ubicación

### 4.1. Principio teórico

A la hora de elegir unos motores apropiados, que pongan en movimiento todas las articulaciones, se deben tener en cuenta principalmente aquellas condiciones que puedan impedir dicho movimiento.

El principal problema que se puede encontrar sería el peso de las distintas piezas. Estas son un factor determinante en la elección de los motores, ya que estos deben ser capaces de hacer frente a este peso y llegar de forma óptima a las posiciones deseadas.

Es evidente entonces, que se debe hacer uso de un parámetro que relacione el peso con una especificación propia de los motores. Para ello, se observa la ficha técnica de un motor elegido al azar, en búsqueda de un parámetro que se encuentre directamente relacionado con el peso que debe ser capaz de soportar.

| Atributo                      | Valor            |
|-------------------------------|------------------|
| Velocidad de Salida           | 24 rpm           |
| Tensión de Alimentación       | 12 V dc          |
| Par de Salida Máximo          | 12000 gcm        |
| Tipo de Motor DC              | Con escobillas   |
| Diámetro del Eje              | 6mm              |
| Potencia Nominal              | 19,8 W           |
| Tipo de Cabezal de Engranajes | Cilíndrico       |
| Longitud                      | 94.3mm           |
| Anchura                       | 35.8mm           |
| Corriente Nominal             | 2,81 A           |
| Construcción de la Bobina     | Núcleo de Hierro |
| Serie                         | 942D             |

Fig. 8: Imagen de las especificaciones de un motor cualquiera

Analizando las características que se aprecian en la ficha técnica de dicho motor, se encuentra un parámetro denominado “Par de Salida Máximo”. Como se observa, se encuentra determinado en función de una masa y una distancia, con lo cual, podría servir para la elección del motor.

Se puede entender como par (también puede aparecer como torque o momento) a una magnitud vectorial, obtenida como producto vectorial del vector de posición del punto de aplicación de la fuerza por un vector de fuerza. Ambos vectores deben ser perpendiculares entre sí.

En resumen, es el resultado de multiplicar una fuerza por su distancia perpendicular. He aquí el procedimiento para elegir los distintos motores.

## 4.2. Procedimiento de cálculo

Para el cálculo de los momentos se va a proceder determinando lo siguiente:

- Se elige el punto de acción del motor: es decir, dónde se requiere que desarrolle cada uno de los motores su par correspondiente.
- Cuál es el peso que va a tener que ser capaz de levantar.
- Qué distancia es la que se multiplicará por el peso: para obtener los distintos pares.
- Elegir un motor en función de los resultados.
- Añadir el peso propio de los motores: en los pasos anteriores se ha obtenido el peso de cada una de las piezas, pero no se ha incluido el correspondiente a los motores, pues hasta el momento era desconocido. Una vez elegido un motor, se debe ir añadiendo su peso a los cálculos.
- En caso de que el motor previamente elegido no aporte el par necesario, sustituir por un motor equivalente pero con mayor par.

## 4.3. Punto de acción del motor

El punto de acción es el lugar sobre el que actuará el motor, que será en la propia articulación en la que tiene que ejercer el movimiento.

No se debe confundir punto de acción con la ubicación del motor. Más adelante, veremos que el punto de acción no siempre coincide con la ubicación. Esto es debido a que es posible que no alcance con el par del motor y sea necesario diseñar algún tipo de mecanismo que aumente el par (engranajes, poleas...). Por tanto, el motor no se encontraría exactamente en la articulación, sino en un punto en el que, por medio de dichos engranajes y poleas, llevaría a cabo el mismo papel que si estuviera en la articulación pero con un par mayor.

Por ello, volviendo a la elección de los distintos puntos de acción, la siguiente imagen muestra cada uno de ellos, los cuales, como se adelantó anteriormente, coinciden con la ubicación de las distintas articulaciones.

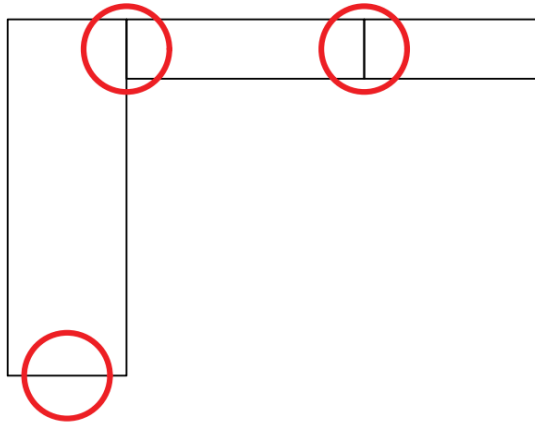


Fig. 9: Ubicación de los distintos puntos de acción

#### 4.4. Cálculo del peso

Una vez determinado el punto de acción, queda por determinar el peso que va a tener que levantar cada motor y la distancia del punto de acción al punto en el que se aplique la fuerza equivalente dicho peso.

Para el cálculo del peso se empleará la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Dónde:

- $\rho \rightarrow$  densidad ( $g/cm^3$ )
- $m \rightarrow$  densidad ( $g$ )
- $V \rightarrow$  densidad ( $cm^3$ )

Por tanto, se necesita obtener cada uno de estos parámetros para determinar la masa de cada una de las piezas.

Se comienza por la densidad, esta es una cualidad propia de todos los materiales, cada uno tiene un valor propio de densidad. El material por el que estarán formado las distintas piezas será plástico. Concretamente, unas bobinas de plástico que acabarán formando las distintas partes del brazo por medio de una impresora 3D.

Suponiendo que este plástico tiene una distribución uniforme de la masa en todos sus puntos, asignaremos un valor continuo de densidad a cada una de las piezas. Por tanto, la densidad correspondiente al plástico será de  $1,241 g/cm^3$ .

Por último, será necesario calcular el volumen de las distintas piezas. Para ello, se considerará en un principio que todas ellas tendrán forma cilíndrica y aunque existe la posibilidad de que cambien las piezas en número y forma, a la hora de realizar estos cálculos, se empleará en el diseño estas tres piezas de forma cilíndrica.

Queda como resultado, una tabla con los distintos valores asignados a cada una de las piezas:

| Nº             | Longitud (cm) | Diámetro (cm) |
|----------------|---------------|---------------|
| <b>Pieza 1</b> | 30            | 10            |
| <b>Pieza 2</b> | 20            | 5             |
| <b>Pieza 3</b> | 15            | 5             |

Tabla. 1: Tabla de las longitudes del brazo

Una vez establecidas las dimensiones de cada una de las piezas, se procederá al cálculo del volumen. El volumen de un cilindro se obtiene mediante  $V = A \cdot h$ , donde A se corresponde con el área de la base y h con la altura. Por tanto es necesario determinar el área de cada una de las piezas (las cuales corresponden con el área de una circunferencia).

- $V = A \cdot h (cm^3)$
- $A = \pi \cdot r^2 (cm^2)$

Por tanto, llevando a cabo dichos cálculos se obtiene:

| Nº             | Área (cm <sup>2</sup> ) | Volumen (cm <sup>3</sup> ) |
|----------------|-------------------------|----------------------------|
| <b>Pieza 1</b> | 78,53981634             | 2356,19449                 |
| <b>Pieza 2</b> | 19,63495408             | 392,6990817                |
| <b>Pieza 3</b> | 19,63495408             | 294,5243113                |

Tabla 2: Tabla del cálculo de áreas y volúmenes

*\*Tener en cuenta que cada una de las piezas serán cilindros huecos, por lo que realmente habría que determinar un diámetro externo e interno. Sin embargo, se considerará la peor condición, en la que el cilindro es macizo, para asegurar que posteriormente, los motores seleccionados, resulten válidos.*

Por tanto, ya obtenidos la densidad y el volumen correspondiente, vamos a la fórmula del cálculo del peso, donde se obtiene:

| Nº             | Peso (kg)   |
|----------------|-------------|
| <b>Pieza 1</b> | 2,924037362 |
| <b>Pieza 2</b> | 0,48733956  |
| <b>Pieza 3</b> | 0,36550467  |

Tabla 3: Tabla con los pesos de cada pieza

#### 4.5. Distancia del punto de acción

Para obtener la distancia de la fuerza al punto de acción se debe tener en cuenta que esta debe ser perpendicular al peso. Si se visualiza en un eje de coordenadas "XY", el peso tiene su influencia en la elección de los motores debido a la gravedad. Por tanto, la fuerza resultante tendrá una componente "Y", es decir, apuntando a la superficie de apoyo.

Se debe encontrar entonces una distancia en la componente X, con el objetivo de cumplir con la mencionada perpendicularidad.

A continuación, se coloca el brazo en una determinada posición en la que sea fácilmente apreciable dicha coordenada en X. Es decir, no se puede imaginar el brazo colgando del hombro en paralelo al tronco (pieza 1), pues ahí la distancia en X con respecto al origen sería cero. Se debe buscar por tanto, una posición del brazo, en la cual, la distancia al origen sea lo más crítica posible. Esto se correspondería con la siguiente imagen:

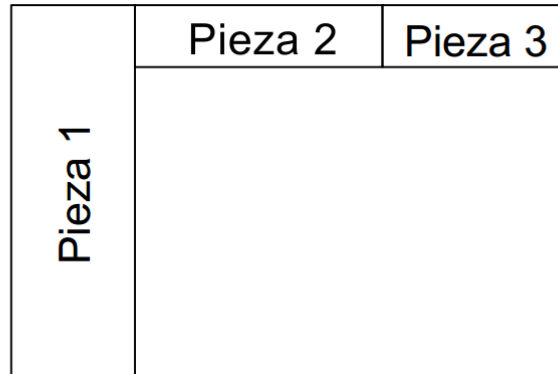


Fig. 10: Imagen de la situación más crítica para la determinación del par

Ahora que se ha ubicado la situación más crítica, se ha de determinar la distancia que multiplica el peso. Esta distancia vendrá determinada mediante la obtención de los centroides. Esto es debido a que la masa de las distintas piezas consiste en una carga distribuida, la cual, si se aprecia como un único vector de fuerza, tiene su punto de aplicación en el centroide de la figura.

Por tanto, la distancia que será el producto del peso, será aquella que va desde el punto de acción de cada motor (anteriormente determinado) hasta el centroide del conjunto de las distintas masas que tenga que enfrentar cada motor.

#### 4.6. Cálculo de los centroides

El centro de masa de un cuerpo se localiza en aquel punto en el cual para cualquier plano que pasa por él los momentos de las masas a un lado del plano son iguales a los momentos de las masas del otro lado.

Para su cálculo, se plantea el brazo como una imagen en 2D y a continuación se calculará el centroide de cada uno de los pesos que deberá levantar cada motor. Se hará mediante el uso de las siguientes fórmulas:

$$\bar{x} = \frac{\sum \bar{x}_i \cdot A_i}{\sum A_i} \qquad \bar{y} = \frac{\sum \bar{y}_i \cdot A_i}{\sum A_i}$$

Dónde:

- $x_i$  → distancia desde el eje principal al centroide de la figura (cm)
- $A_i$  → área de la figura (cm<sup>2</sup>)
- $\bar{x}$  ó  $\bar{y}$  → distancia a la que se encuentra el centroide de la figura respecto al eje principal (cm)



Por tanto, se irá analizando las piezas que tendrá que levantar cada uno de los motores y determinando sus centroides. Para ello, cada punto de acción pasara a ser un eje principal de coordenadas.

### Motores del codo

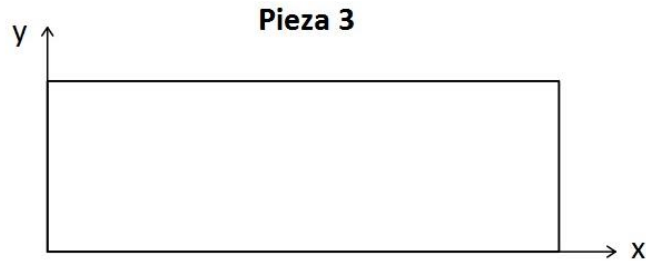


Fig. 11: Imagen de la pieza a levantar por los motores del codo (pieza 3)

Para la pieza 3, recordar que esta tiene unas dimensiones de 15 centímetros de largo por 5 de ancho (el diámetro). El peso, es un vector paralelo al Eje Y, y se busca una distancia perpendicular. Por tanto, será necesaria la distancia al centroide en X.

Al ser una única pieza, no es necesario realizar ningún tipo de cálculo, se aprecia, sin necesidad de ellos, que la distancia en X del eje de coordenadas al centroide, es la mitad de su longitud, es decir:

$$\bar{x}_3 = 7.5 \text{ cm}$$

### Motores del hombro

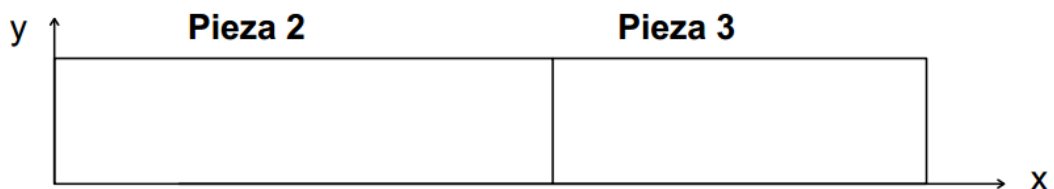


Fig. 12: Imagen de las piezas a levantar por los motores del hombro (piezas 2 y 3)

Los motores que se encuentran en el hombro, tienen la función de levantar las piezas 2 y 3. Por ello, es necesario tener en cuenta a ambas para el cálculo de la distancia al centroide en X.

Recordar que las piezas 2 y 3 tienen 30 y 20 centímetros de largo respectivamente por 5 centímetros de ancho cada una. Resulta por tanto:

| Pieza | $x_i$ | $A_i$ | $x_i \cdot A_i$ |
|-------|-------|-------|-----------------|
| 2     | 10    | 100   | 1000            |
| 3     | 27,5  | 75    | 2062,5          |

Tabla 4: Tabla de los centroides de las piezas 2 y 3

Aplicando las fórmulas de los centroides:

$$\bar{x}_2 = \frac{\sum \bar{x}_i \cdot A_i}{\sum A_i} = \frac{1000 + 2062,5}{100 + 75} = 17,5 \text{ cm}$$

### Motor de la base

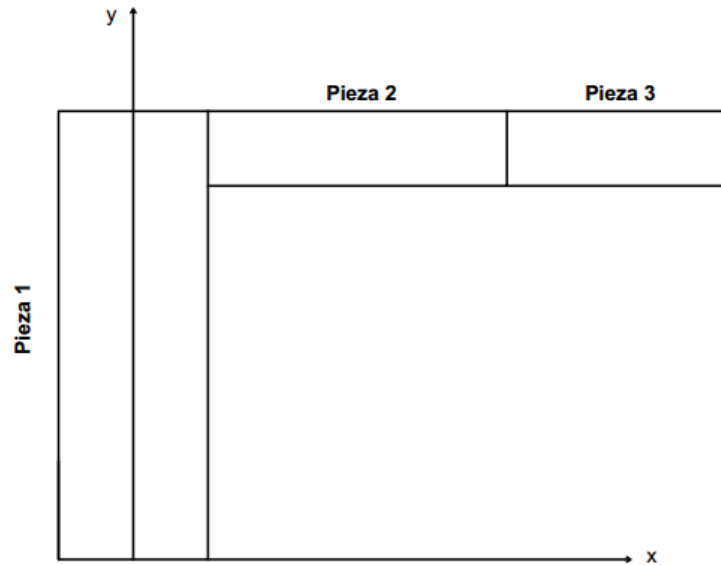


Fig. 13: Imagen de las piezas a levantar por el motor de la base (piezas 1, 2 y 3)

Por último, queda el motor de la base. Este va a tener que ser capaz de desplazar todas las piezas que constituyen el brazo, por lo que todas ellas tendrán que ser tomadas en cuenta.

Aparece ahora la pieza 1, de esta última solo se tendrá en cuenta la parte que se va a estar sumando al efecto de gravedad de las piezas 2 y 3, o lo que es lo mismo, sólo se tendrá en cuenta la mitad de la pieza 1. De hecho, la otra mitad, estaría ejerciendo de contrapeso.

Es por ello, que los ejes se han colocado en mitad de la pieza 1. Es ahí donde se encuentra el punto de acción del motor y a partir de donde empezarán a contar las distancias a lo largo del eje X.

Se obtiene por tanto:

| Pieza | $x_i$ | $A_i$ | $x_i \cdot A_i$ |
|-------|-------|-------|-----------------|
| 1     | 2,5   | 150   | 375             |
| 2     | 15    | 100   | 1500            |
| 3     | 32,5  | 75    | 2437,5          |

Tabla 5: Tabla de los centroides de cada pieza

Aplicando las fórmulas de los centroides:

$$\bar{x}_2 = \frac{\sum \bar{x}_i \cdot A_i}{\sum A_i} = \frac{375 + 1500 + 2437,5}{150 + 100 + 75} = 13,7 \text{ cm}$$

#### 4.7. Obtención del par

Hasta el momento, se ha recabado toda la información necesaria para obtener los pares de cada motor. Una vez llegados a este punto, se procede con el cálculo de cada uno de ellos.

El par únicamente consiste en multiplicar el peso de las piezas que deba levantar el motor por la distancia desde su punto de acción hasta los respectivos centroides. Todo ello ha sido calculado en los capítulos anteriores y por tanto:

| Nº            | Peso (kg)   | Distancia (cm) | CS   | Par (kg-cm) |
|---------------|-------------|----------------|------|-------------|
| Motor 1       | 2,314862912 | 13,27          | 1,25 | 38,3978     |
| Motor 2 y 3   | 0,852844231 | 17,5           | 1,25 | 18,656      |
| Motores 4 y 5 | 0,36550467  | 7,5            | 1,25 | 3,4267      |

Tabla 6: Tabla con los pares que debe soportar cada motor

#### Aclaraciones:

- *El motor 1 se corresponde con el de la base, 2 y 3 para los del hombro y 4 y 5 son los respectivos al codo.*
- *Los pesos no son los mismos que los del apartado 3.4, son el resultado de sumar los pesos correspondientes de dicho apartado a aquellos motores que se vean afectados.*
- *Se ha añadido al cálculo del par un coeficiente por condiciones de seguridad de 1,25. De esta forma el cálculo quedará sobredimensionado y los motores elegidos tendrán capacidad de sobra para llevar a cabo su tarea.*

#### 4.8. Recalculo del par y elección de los motores

Una vez llegados a este punto, se procede con la elección de los motores, los cuales deben estar por encima de estos valores de par para ser capaces de mover correctamente las piezas. Sin embargo, no se ha hablado hasta el momento del peso propio de los motores.

Por lo general, los motores suelen ser bastante pesados y, por lo tanto, tendrán un efecto importante en la estructura. Es por ello, que a medida que se eligen los motores, se debe ir añadiendo su peso a aquellos cálculos de par que se vean influenciados por este hecho.

En primer lugar, se ha de acudir a cualquier página de electrónica en la que dispongan de motores que atiendan a las especificaciones requeridas. En este proyecto se precisarán motores de continua para codo y hombro y un motor paso a paso para la base. Los motores cuyas especificaciones figuran en este proyecto, proceden de la compañía *RS Components* (siendo válida cualquier otra página que distribuya unos motores acordes a las especificaciones).

En *RS Components* se encuentran unos motores pertenecientes a la serie 942D, los cuales vienen con una reductora incorporada (lo cual permite ampliar su par). El

primer candidato es un motor reductor DC con escobillas RS PRO, 6 kgcm de par, alimentado a 12 V DC y con una potencia nominal de 19,35 W.

Este podría ser un motor válido para el caso de los motores 4 y 5, los cuales únicamente necesitan un par superior a 3,4267 kgcm. Se busca por tanto su peso y se añade a los cálculos realizados.

Se trata de un motor con un peso de 0,306 kg. Este valor, reconfigura los pares calculados con anterioridad. Al menos uno de los motores del codo tendrá que levantar al otro (pues habrá uno que se encontrará más adelantado que el otro), con lo cual, al añadir el peso de uno de estos motores al cálculo del par para los motores 4 y 5, se obtiene un par resultante de 6,295 kgcm.

Se trata de un par superior al que puede llegar a ofrecer este motor, con lo cual se debe dar un salto a un motor con mayor capacidad de par de salida.

Una vez elegido este nuevo motor, se procederá de la misma manera: se busca su peso, se le añade en los cálculos a aquellos pares que puedan verse afectados y se comprueba que cumpla con las demandas de par obtenidas.

Al tratarse de un proceso simple y repetitivo, se muestran a continuación los resultados obtenidos:

| Nº            | Peso (kg) | Distancia (cm) | CS   | Par (kg-cm) |
|---------------|-----------|----------------|------|-------------|
| Motor 1       | 3,6269    | 13,27          | 1,25 | 60,1606     |
| Motor 2 y 3   | 1,8148    | 17,5           | 1,25 | 39,6997     |
| Motores 4 y 5 | 0,9775    | 7,5            | 1,25 | 9,1641      |

Tabla 7: Tabla con los pares definitivos que debe soportar cada motor

#### 4.8.1. Motores 4 y 5

Para los dos **motores del codo**, se propone el modelo 942D1391, con un peso de 306 gramos y capaz de desarrollar un par de hasta 10 kgcm.

Como se ve en los resultados, se trata de un modelo válido al estar por encima del par calculado.

#### 4.8.2. Motores 2 y 3

Para los dos **motores del hombro**, se propone el modelo más potente de la serie 942D, capaz de desarrollar un par de hasta 12 kgcm.

Como se puede observar, los motores 2 y 3 no son capaces de desarrollar un par tan elevado como el calculado (39,6997 kgcm).

Sin embargo, esto no supondrá un problema, pues se desarrollarán los mecanismos adecuados (engranajes, poleas...) que mediante una pérdida de la velocidad, generen un aumento del par.

Tras hacer un estudio al respecto se ha garantizado que este modelo, tras las modificaciones que se llevarán a cabo, será válido para las articulaciones del hombro.

#### **4.8.3. Motor 1**

En el caso del motor de la base (motor 1) sucede algo bastante parecido. El par es demasiado alto y no se han encontrado motores adecuados que no se excedan de precio, por lo que será necesario buscarle otra solución. Por ello se han investigado distintas alternativas.

Finalmente, se llegó a la siguiente conclusión: el motor de la base no tiene la función de levantar ninguna de las piezas. Únicamente debe hacer girar la base sobre sí misma. Es por ello, que no se debe calcular el par de la misma forma que se ha hecho con las piezas anteriores sino por un método distinto.

Este método se basa en el cálculo de las inercias. Por medio de él, se obtiene que el par que debe desarrollar el motor de la base, basta con que sea superior a 0,519 Nm.

Se propone entonces, un motor paso a paso 103H5210-5240, con un ángulo de inclinación de  $1,8^\circ$ , bobinado bipolar, alimentado a 24 V DC y con un par de 0,51 Nm.

Se encuentra 0,009 Nm por debajo de lo requerido, pero se puede considerar que al haber realizado un sobredimensionamiento, es un modelo perfectamente válido.

#### **4.9. Motores definitivos**

Tras hacer un estudio del presupuesto, del precio de los distintos motores y de la disponibilidad de los modelos entre los fabricantes consultados, se ha determinado lo siguiente:

Dado que la diferencia de precio entre los motores del codo y los del hombro es bastante pequeña (seis euros de diferencia por motor) y las prestaciones del modelo del hombro es mucho mejor, se ha optado por comprar los cuatro motores del mismo modelo. Esto se debe también a que acaba siendo más rentable comprar los motores en un mismo paquete (por cuestiones de precio) y que de esta forma se tiene mayor margen de error.

Para el motor de la base, se mantiene lo decidido hasta el momento. El modelo 103H5210-5240 es totalmente válido para nuestras necesidades y por tanto es el elegido.

En resumen:

- **Motores del codo y hombro:** motor reductor DC con escobillas RS PRO, 12 kgcm, 24 rpm, 12 V dc, 8 W.

- **Motor de la base:** motor paso a paso, 1,8°, bobinado bipolar, tipo híbrido, 4 cables, par 0,51Nm, 24 V dc.

**NOTA:**

- *La propuesta final es en base a la parte de mecánica que se encuentra bajo la responsabilidad de este proyecto. Existe la posibilidad de que debido a los futuros mecanismos desarrollados o a la estructura del robot, finalmente se lleve a cabo una propuesta distinta. Esta será desarrollada en otro de los cuatro Trabajos de Fin de Grado que componen este estudio.*
- *Los cálculos que no han sido llevados a cabo en el presente proyecto (caso del método de las inercias para el motor de la base), no figuran a lo largo del mismo quedarán recogidos al final de este, en el ANEXO I.*

## Capítulo V. Diseño de la electrónica de potencia

La electrónica de potencia no abarca únicamente la elección de los motores. Influye otros factores como los puentes en H (encargados del sentido de giro de los motores), la fuente de alimentación que vamos a usar y los elementos de protección de los que se hará uso para proteger los motores. Es por ello, que este capítulo estará enfocado al desarrollo de dicha electrónica de potencia.

### 5.1. Elección de los puentes en H

Para controlar el sentido de giro de los motores y moverlos adecuadamente se propone el uso de módulos L298N, el cual cuenta con los siguientes elementos y características [6]:

- Circuito integrado L298N formado por un doble puente en H.
- Regulador de tensión LM7805 para establecer el voltaje lógico a 5V de corriente continua si está activo.
- Diodos para la protección del circuito contra corrientes inducidas.
- Disipador de calor para el circuito integrado L298N.
- Jumpers para habilitar los pines de control de las salidas para los motores y para activar el regulador. Si el regulador está activo (jumper del regulador está colocado) entonces la alimentación puede ser de 12 V en corriente continua, en caso contrario la alimentación puede ser de 35 V de corriente continua (con dos amperios como máximo).
- Clemas de conexión (entrada de alimentación, salida para los motores).

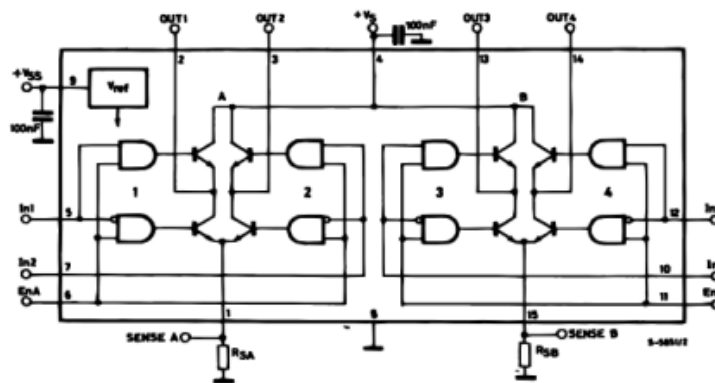


Fig. 14: Imagen del diagrama de bloques L298N  
Fuente: datasheet modelo L298N extraído de RS Components

Se utilizan tres pines de control por motor, dos que controlan la dirección de giro y uno para transmitir la PWM generada por Arduino. Para su utilización, el robot hará uso de un módulo por cada dos motores.

## 5.2. Elección de la fuente de alimentación

Para la fuente de alimentación, se empleará una de las fuentes disponibles en el laboratorio. Tener en cuenta que los puentes en H necesitan hacer uso de una alimentación, así como los motores.

Para el caso de los motores, acorde a las características del datasheet, los motores del codo y del hombro se alimentan a 12 Vdc y el motor de la base a 24 Vdc. Se debe tener esto presente a la hora de elegir/regular la fuente empleada.

## 5.3. Protección contra sobreintensidades

En caso de que los motores se encuentren en la situación de que algo les impida avanzar y estos sigan intentándolo pues se les ha ordenado llegar a una posición que estos no puedan alcanzar por algún impedimento, deben encontrarse protegidos contra posibles sobreintensidades.

Es por ello que se ha introducido en la electrónica la presencia de relés que salten en caso de que se supere un determinado valor de corriente.

### 5.3.1. Motores hombro y codo

Para el caso del hombro y codo se ha empleado el mismo tipo de motor, es por ello que también será válido el mismo tipo de relé. En la ficha técnica de los distintos motores se observa que la intensidad nominal de los mismos es de 2,85 A. Por tanto, con un relé de intensidad de conmutación 3 A, bastaría para proteger a dichos motores.

En concreto, se ha elegido un relé de láminas de la marca Cynergy3 con intensidad de conmutación 3 A. Tal como el que se presenta a continuación:



Fig. 15: Imagen relé de láminas Cynergy3, intensidad de conmutación 3 A  
Fuente: imagen del producto extraída de RS Components

### 5.3.2. Motor de la base

La base cuenta con un motor distinto a todos los demás, dicho motor, cuenta por tanto con distintas prestaciones y su intensidad nominal es de 1 A. Para proteger este motor se ha empleado un relé de intensidad de conmutación 1.5 A. Se trata de un relé de estado sólido de la marca Meder.





Fig. 16: Imagen relé de estado sólido Crydom, intensidad de conmutación 1.5 A  
Fuente: imagen del producto extraída de RS Components

Por tanto, mediante el uso de estos relés, los motores quedarán protegidos ante posibles sobreintensidades. Además, en caso de que salte el relé, se podría enviar una señal a la placa de Arduino que alerte de que se ha producido una sobreintensidad y el software actúe de una forma determinada ante esta alarma.

#### 5.4. Diagrama de bloques electrónica de potencia

Ahora que ya se ha diseñado la electrónica de potencia se puede llevar a cabo su montaje correspondiente. Es por ello, que ha modo de esquema se facilita el siguiente diagrama de bloques, con el objetivo de facilitar la comprensión y visualización del montaje:

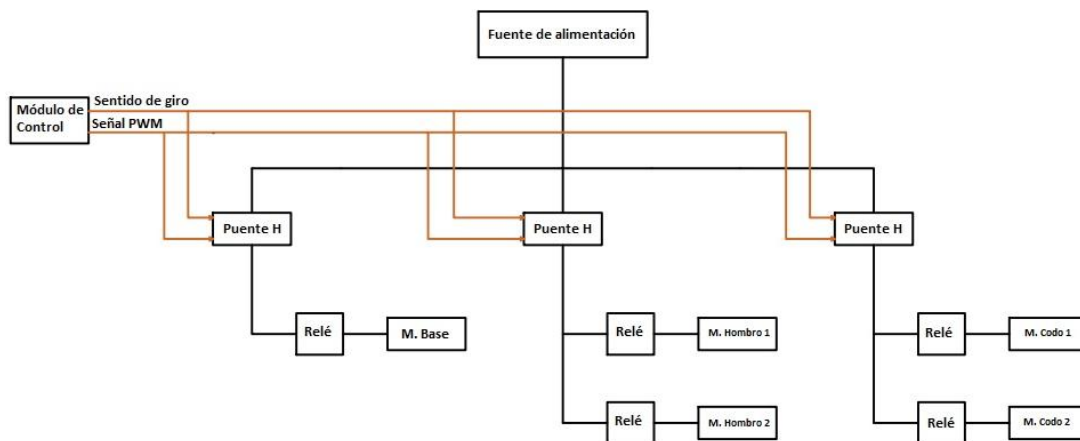


Fig. 17: Diagrama de Bloques que resume el conexionado entre los distintos elementos

**NOTA:**

- *Todos los datasheet correspondientes al material empleado en este proyecto, están al completo en el Anexo II de este proyecto.*

# Capítulo VI. Obtención del modelo cinemático

## 6.1. Introducción al modelo cinemático

Una vez llevada a cabo la parte física del robot, se procederá a la parte de software. En ella se va a determinar el modelo cinemático directo e inverso. El objetivo es, a partir de este modelo, ser capaz de determinar una trayectoria, mediante técnicas de control, que el brazo deba realizar con total fidelidad y precisión.

La cinemática de un robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia [3]. Así, la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que toman sus coordenadas articulares. El modelo cinemático es la base para alcanzar un punto en el espacio.

Existen dos problemas fundamentales a resolver en la cinemática del robot:

- Problema cinemático directo: consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot.
- Problema cinemático inverso: resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas.

## 6.2. Primer modelo cinemático

Como punto de partida se propone un modelo en el que el hombro se pueda mover en un único plano, o lo que es lo mismo, utilizando únicamente uno de los motores. En concreto, se trata del motor que hace que el brazo pendule, tal como tendría lugar el movimiento del hombro en la siguiente imagen:

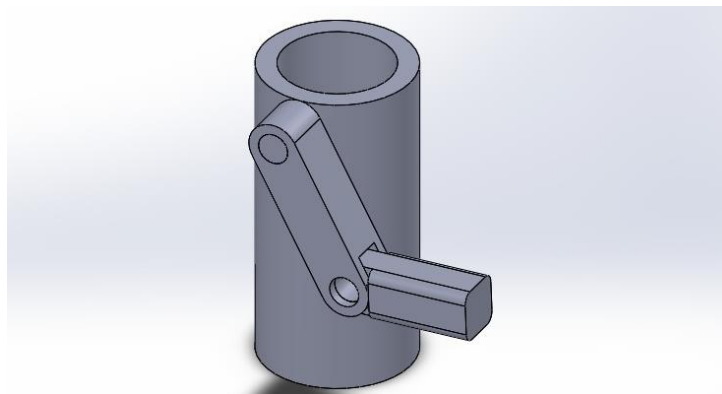


Fig. 18: Primer planteamiento para el modelo cinemático

El principal motivo de empezar con este planteamiento es la simplificación. Se precisaba un modelo en el que los distintos integrantes del proyecto pudieran basarse para avanzar en sus respectivas tareas. Añadir una segunda articulación, complicaba bastante la visualización en 3D, al mismo tiempo se desconocía cómo podían llegar a complicarse los cálculos una vez añadiéramos el movimiento de alabeo (segundo motor del hombro). Aun así, se trata de un modelo totalmente válido para alcanzar cualquier

punto deseado en el espacio que cumple con su requisito antropomórfico, con la excepción de la elevación del hombro a modo de alabeo anteriormente mencionado.

### 6.2.1. Modelo cinemático directo

Para la obtención del modelo cinemático directo de este primer modelo, se hará uso de la trigonometría. El procedimiento a seguir será el siguiente:

- Se coloca el brazo en una posición en la cual se vea una participación de todos los motores, es decir, que tengan un ángulo distinto de cero.
- Dicha posición debe ser óptima para visualizar correctamente las formas geométricas (triángulos) que vamos a buscar.
- Trazar los distintos triángulos que se puedan obtener de la configuración del robot que estamos tratando.
- Resolver estos distintos triángulos de manera que obtengamos el valor que debe tener cada de las coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  para alcanzar la posición deseada.
- Despejar correctamente las ecuaciones para que queden únicamente en función de variables conocidas (longitudes del brazo o ángulos que deben adoptar las respectivas articulaciones).

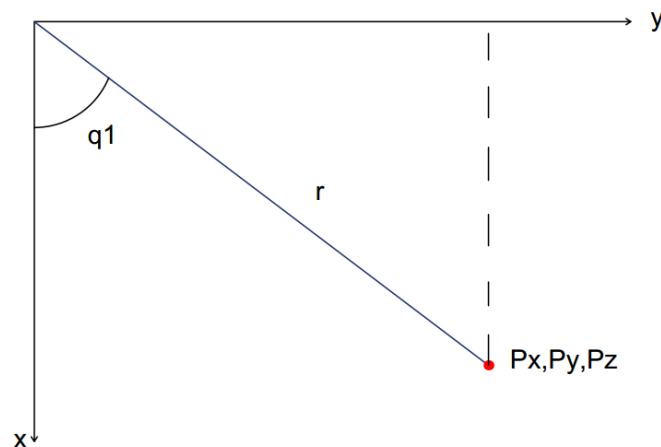


Fig. 19: Perspectiva del brazo en el Plano XY

Haciendo uso de la perspectiva que ofrece el plano XY, se obtiene:

$$p_x = r \cdot \cos(q_1)$$

$$p_y = r \cdot \sen(q_1)$$

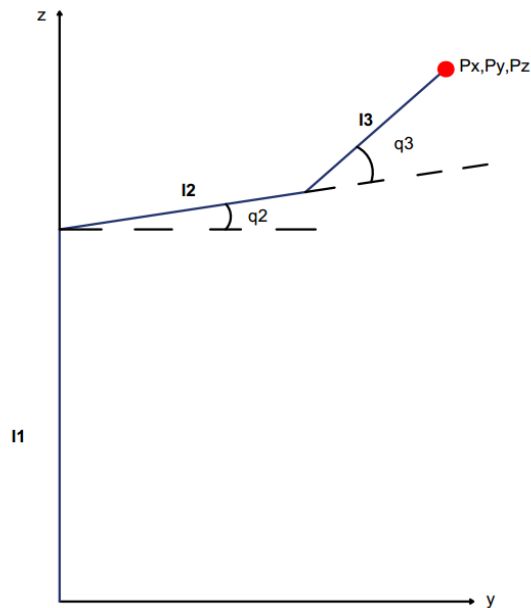


Fig. 20: Perspectiva del brazo en el Plano ZY

Para la obtención del parámetro  $P_z$ , la imagen de arriba es la más visual. De ella se puede concluir que:

$$p_z = l_1 + l_2 \cdot \text{sen}(q_2) + l_3 \cdot \text{sen}(q_2 + q_3)$$

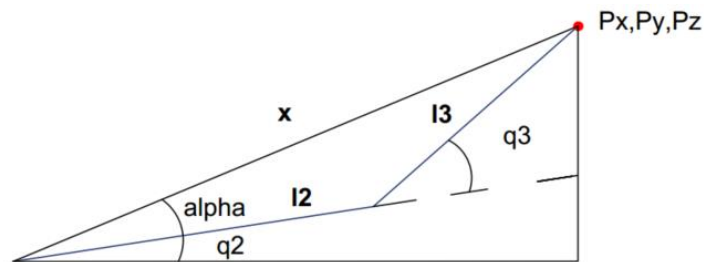


Fig. 21: Perspectiva de  $l_2$  y  $l_3$  en el plano que los contiene

*\*Aclaración:*

- El parámetro "x" es la incógnita que representa la distancia desde el hombro (origen de  $l_2$ ) hasta el punto final (muñeca).
- "Alpha" es el ángulo contiguo a  $q_2$ . En las ecuaciones aparecerá bajo el símbolo  $\alpha$ .

Y por último, para despejar el parámetro "r" en aquellas funciones que han quedado dependientes de él:

$$r = l_2 \cdot \text{cos}(q_2) + l_3 \cdot \text{cos}(q_2 + q_3)$$

### 6.2.2. Modelo cinemático inverso

Para la obtención del modelo cinemático inverso de este primer modelo, se continuará haciendo uso de la trigonometría. Para ello, aprovechando la posición en la que se supuso el brazo para el modelo cinemático inverso y los distintos triángulos que se pueden obtener de dicha posición, se procederá a calcular los distintos valores angulares, siendo estos últimos los que esta vez deban quedar en función de los parámetros conocidos.

La configuración que adoptará el robot para el cálculo del modelo cinemático inverso es la siguiente:

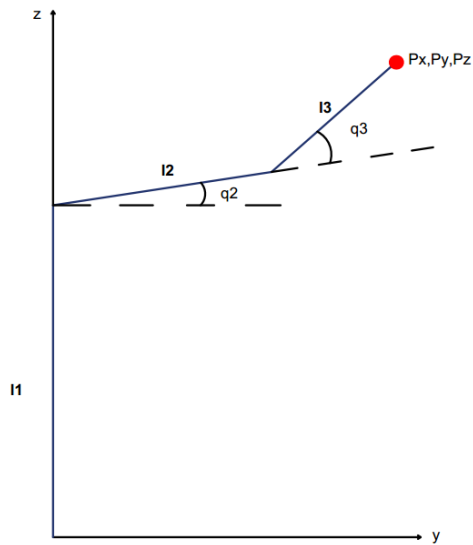
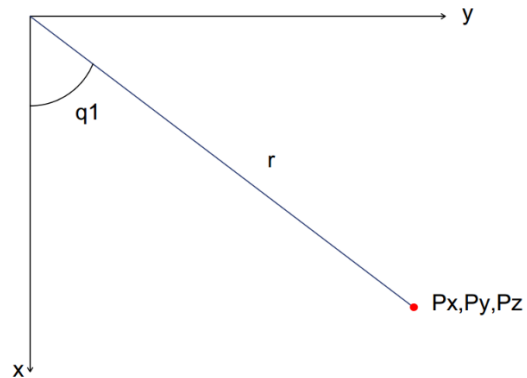


Fig. 22: Perspectiva del brazo en los planos ZY y XY



En el plano ZY se obtiene una visión de cómo actúan los ángulos  $q_2$  y  $q_3$  y el plano XY aclara que el brazo no está contenido en el plano ZY, sino que cuenta con un ángulo  $q_1$  que lo sitúa entre los ejes X e Y.

*\*Aclaración:*

- En el plano XY se puede observar un parámetro "r", se trata de la vista que tenemos de l2 más l3 desde dicho plano.
- El punto rojo en el que se ubica "Px, Py, Pz" es el punto final que se desea alcanzar con la muñeca.

Una vez visualizada la situación del brazo, se trazan los triángulos correspondientes y se lleva a cabo la trigonometría correspondiente para resolver el problema cinemático inverso.

### Resolución de q1:

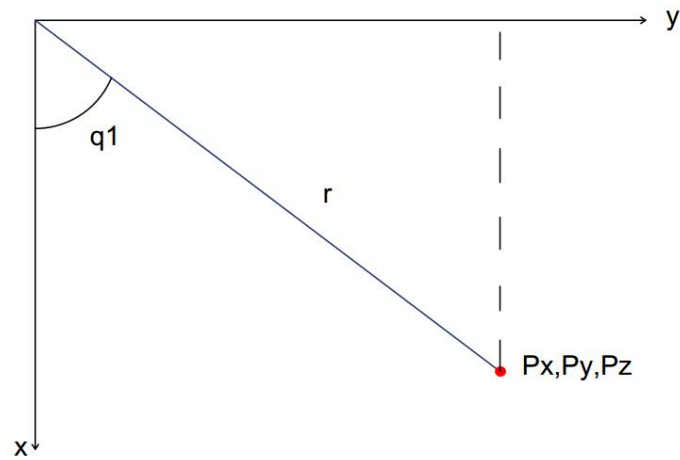


Fig. 23: Perspectiva del brazo en el Plano XY

Para resolver q1 se emplea el plano XY, que es desde donde se puede ver la acción de dicho ángulo. Para ello basta con plantear el arco tangente de dicho ángulo, que está formado por las coordenadas Px y Py.

$$q_1 = \arctg\left(\frac{p_y}{p_x}\right)$$

Adicionalmente, se despeja el valor de "r" que será necesario para los ángulos posteriores:

$$r^2 = p_x^2 + p_y^2$$

### Resolución de q2 y q3:

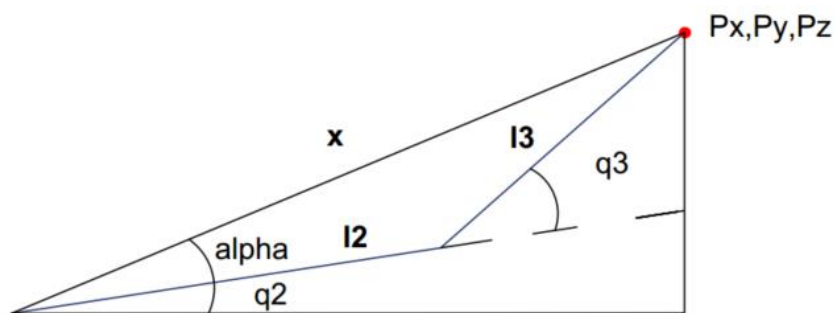


Fig. 24: Perspectiva de l2 y l3 en el plano que los contiene

La imagen de arriba es el resultado de observar l2 y l3 en el plano que lo contiene.

Como se puede apreciar, de la imagen se obtienen un total de cuatro triángulos, los cuales, en combinación unos con otros, permiten obtener cada uno de los parámetros deseados.

Para la obtención de  $q_3$ , se emplea el triángulo formado por  $l_2$ ,  $l_3$  y  $x$ , el cual se resuelve por medio del teorema del coseno.

$$x^2 = l_2^2 + l_3^2 - 2 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \cos(180^\circ - q_3)$$

Si se representa la circunferencia goniométrica de  $q_3$  y  $180 - q_3$  se puede observar que se cumple la igualdad:

$$\cos(180^\circ - q_3) = -\cos(q_3)$$

Sustituyendo:

$$x^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \cos(q_3)$$

Ahora queda una ecuación dependiente de parámetros conocidos a excepción de "x". Para ello, se emplea el triángulo rectángulo que contiene a los otros tres. Del cual, aplicando Pitágoras, se obtiene:

$$x^2 = r^2 + p_z^2$$

Y "r" se encuentra previamente despejada en el apartado anterior mediante la fórmula:

$$r^2 = p_x^2 + p_y^2$$

Por lo tanto, si se sustituye:

$$r^2 + p_z^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \cos(q_3)$$

$$p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \cos(q_3)$$

Ordenando la ecuación adecuadamente, se obtiene como resultado el parámetro  $q_3$  dependiente únicamente de valores conocidos:

$$\cos(q_3) = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3}$$

Resultado:

$$q_3 = \cos^{-1} \left( \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3} \right)$$

Para obtener  $q_2$ , se añade un nuevo parámetro  $\beta$  que es la suma del ángulo  $q_2$  y  $\alpha$ :

$$\beta = q_2 + \alpha$$

Con lo cual, se procede a calcular ambos ángulos:

- Ángulo  $\beta$

$$\beta = \arctg \left( \frac{p_z}{r} \right)$$

Despejando “r” de la misma forma que en los casos anteriores:

$$\beta = \operatorname{arctg}\left(\frac{p_z}{\pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right)$$

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{L_3 \cdot \operatorname{sen}(q_3)}{L_2 + L_3 \cdot \operatorname{cos}(q_3)}\right)$$

Calculados  $\alpha$  y  $\beta$ , simplemente despejamos en la ecuación de  $q_2$ :

$$q_2 = \beta - \alpha$$

$$q_2 = \operatorname{arctg}\left(\frac{p_z}{\pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{L_3 \cdot \operatorname{sen}(q_3)}{L_2 + L_3 \cdot \operatorname{cos}(q_3)}\right)$$

### 6.3. Segundo modelo cinemático

Tras plantear un modelo mucho más sencillo, se ha procedido a aumentar su complejidad, la cual se basa en añadir la funcionalidad del segundo motor del hombro, es decir, la técnica que anteriormente se ha denominado “alabeo”.

Este modelo aumenta su complejidad por múltiples factores como son la perspectiva (más difícil debido a la presencia de más motores y por tanto, más movimientos) y el aumento del número de incógnitas y ecuaciones (lo cual complica los cálculos).

Sin embargo, lograr este nuevo modelo, permite hacer uso de este tipo de estructura:

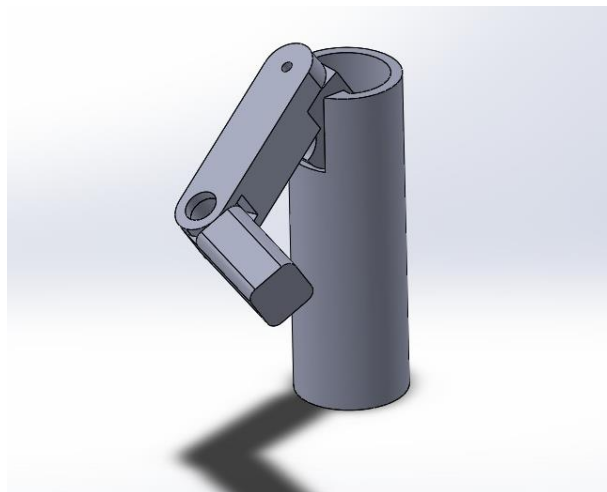


Fig. 25: Segundo planteamiento para el modelo cinemático

Nuevamente, será necesario disponer de los modelos cinemático inverso y cinemático directo.

#### 6.3.1. Modelo cinemático directo

En este caso, para resolver el problema cinemático directo, se recurrirá a un método llamado Algoritmo de Denavit-Hartenberg. El motivo de hacer uso de este



método es que permite conocer cada uno de los puntos de las articulaciones, a diferencia del método por trigonometría planteado anteriormente, el cual daba como resultado la posición de la muñeca únicamente.

Este método permite saber las coordenadas de cada una de las articulaciones además de que las ecuaciones trigonométricas se van complicando a medida que aparecen nuevas articulaciones.

### 6.3.1.1. Procedimiento general del cálculo de la cinemática directa

Se parte de una estructura con “n” articulaciones (cuatro en este caso), por lo tanto se tendrán “n” links (también cuatro).

Los pasos que habría que seguir para el cálculo de la cinemática directa serían [17]:

1. Fijar un SR que no se mueva:  $(O_0, x_0, y_0, z_0)$ .
2. Numerar las articulaciones y los links. En el caso de que haya bifurcaciones será necesario el uso de un segundo índice (no es el caso).
3. Colocar un SR en cada uno de los puntos O de la estructura. Existen n+1 puntos numerados de la forma  $(O_0, \dots, O_n)$ . El punto  $O_n$  corresponde con el extremo de la estructura. El  $SR_i = (O_i, x_i, y_i, z_i)$  corresponde a la articulación i+1 y está fijo al link i.
4. Los SR deberán ser de tipo dextrógiro.
5. Colocación de los ejes en los distintos SR.
  - a. Para articulaciones de revolución:  
El eje z debe coincidir con el eje de giro. El eje X y el eje Y se pueden elegir arbitrariamente siempre que cumplan la condición dada en el punto 4.
  - b. Para articulaciones prismáticas (no procede):  
Hay libertad para elegir el sistema de ejes aunque se recomienda mantener la misma orientación que el SR anterior.

NOTA: Para aquellas articulaciones que no sean la inicial, es recomendable mantener la misma orientación que tiene el sistema colocado en la articulación anterior, siempre que los sistemas sean compatibles Denavit-Hartenberg (D-H).

6. Los sistemas deben ser compatible Denavit-Hartenberg con el sistema anterior, para que la matriz de cambio del  $SR_i$  al  $SR_{i-1}$  tenga la siguiente expresión:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \cdot \sin \theta_i & \sin \alpha_i \cdot \sin \theta_i & a_i \cdot \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cdot \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cdot \cos \theta_i & a_i \cdot \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 6.3.1.2. Sistema compatible D-H

Se dice que un  $SR_i$  es compatible D-H con un  $SR_{i-1}$  si se pueden calcular los parámetros D-H.

Los cuatro parámetros D-H se calculan según la siguiente tabla:

|            | A                    | B                    | C         |
|------------|----------------------|----------------------|-----------|
| $d_i$      | $O_{i-1}$            | $Z_{i-1} \wedge x_i$ | $Z_{i-1}$ |
| $\theta_i$ | $x_{i-1}$            | $x_i$                | $Z_{i-1}$ |
| $a_i$      | $Z_{i-1} \wedge x_i$ | $O_i$                | $x_i$     |
| $\alpha_i$ | $Z_{i-1}$            | $Z_i$                | $x_i$     |

Tabla 8: Tabla de los parámetros Denavit-Hartenberg

Donde  $a \wedge b$  indica el punto resultante del corte de  $a$  con  $b$ , y deberá tenerse en cuenta que:

- Cada distancia se mide como la distancia desde A hasta B. Si el sentido desde A hasta B coincide con el sentido de C entonces se toma como positiva. En caso contrario la distancia es negativa.
- Cada ángulo se mide como el ángulo que forman la dirección de A con la dirección de B. Si el eje de giro dextrógiro de este ángulo coincide con el sentido de C entonces se toma positivo. En caso contrario el ángulo será negativo.

Para que puedan calcularse los parámetros D-H será necesario que:

1.  $Z_{i-1}$  y  $x_i$  se corten en un solo punto.
2.  $Z_{i-1}$  sea perpendicular a  $x_{i-1}$  y a  $x_i$ .
3.  $x_i$  sea perpendicular a  $Z_i$ .

### 6.3.1.3. Resolución del modelo cinemático directo mediante parámetros D-H.

Cumpliendo con cada uno de los pasos mencionados anteriormente queda un planteamiento tal que:

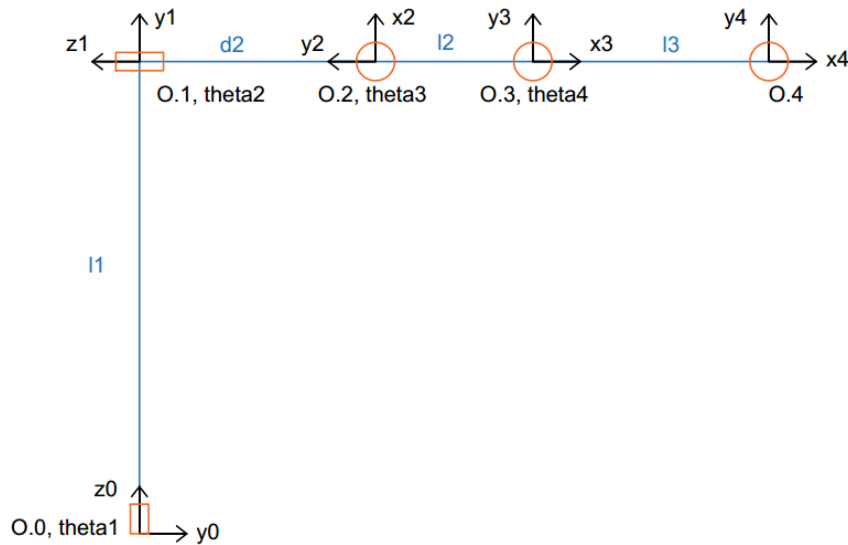


Fig. 26: Planteamiento del esquema del robot para el cálculo de la cinemática directa mediante parámetros Denavit-Hartenberg

A continuación, mediante esta imagen y haciendo uso la tabla de cómo calcular los cuatro parámetros Denavit-Hartenberg, resulta:

|          | 1        | 2        | 3        | 4        |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>d</b> | l1       | -d2      | 0        | 0        |
| <b>Θ</b> | variable | variable | variable | Variable |
| <b>a</b> | 0        | 0        | l2       | l3       |
| <b>α</b> | $\pi/2$  | $\pi/2$  | 0        | 0        |

Tabla 9: Tabla con los resultados de resolver la cinemática directa por el método de Denavit-Hartenberg

### 6.3.1.4. Aplicación de los parámetros D-H

Una vez obtenidos los parámetros D-H, se puede obtener el punto final con respecto a la base del robot. Para obtener la ubicación de cada una de las articulaciones y obtener así un simulador gráfico de la estructura, es necesario dar la posición  $O_i$  en cada  $SR_i$ . La posición de cada articulación,  $i$ , respecto a su propio sistema de referencia viene dada por el vector:

$$(O_i)_i = [0, 0, 0, 1]^T$$

Así, ya se podrá aplicar la transformación de coordenadas para calcular  $O_1$ ,  $O_2$ ,  $O_3$  y  $O_4$  respecto al sistema de referencia de la base:

$$(O_1)_0 = T_{0,1} \cdot (O_1)_1$$

$$(O_2)_0 = T_{0,1} \cdot T_{1,2} \cdot (O_2)_2$$

$$(O_3)_0 = T_{0,1} \cdot T_{1,2} \cdot T_{2,3} \cdot (O_3)_3$$

$$(O_4)_0 = T_{0,1} \cdot T_{1,2} \cdot T_{2,3} \cdot T_{3,4} \cdot (O_4)_4$$

De esta forma, se obtiene la posición de cada una de las articulaciones con respecto al origen, siendo  $(O_4)_0$  la posición del efector final del brazo.

### 6.3.2. Modelo cinemático inverso

Para este modelo se continuará haciendo uso del mismo proceso que para el modelo anterior, basado en el uso de la trigonometría:

- Se coloca el brazo en una posición en la cual se vea una participación de todos los motores, es decir, que tengan un ángulo distinto de cero.
- Dicha posición debe ser óptima para visualizar correctamente las formas geométricas (triángulos) que vamos a buscar.
- Trazar los distintos triángulos que se puedan obtener de la configuración del robot que estamos tratando.
- Resolver estos distintos triángulos de manera que obtengamos el valor que debe tener cada uno de los ángulos para alcanzar la posición deseada.
- Despejar correctamente las ecuaciones para que queden únicamente en función de variables conocidas (longitudes del brazo y coordenadas del punto final o bien de alguno de los otros ángulos).

La configuración que adoptará el robot para el cálculo del modelo cinemático inverso es la siguiente:

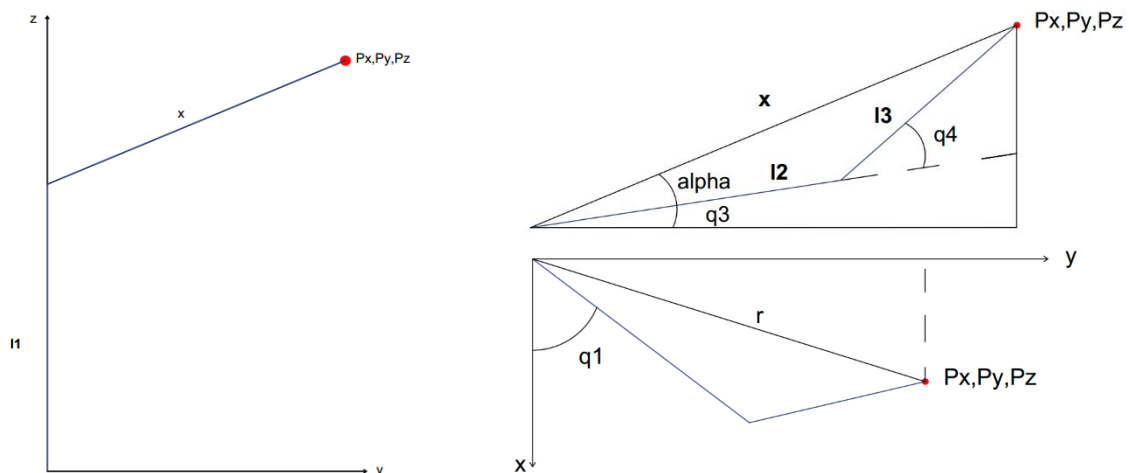


Fig. 27: Perspectiva del brazo en los distintos planos

Para poner un poco en contexto, el plano ZY sería una vista de lado del robot, en el que “x” sería la perspectiva de  $l_1$  y  $l_2$ .

En el plano XY se aprecia en qué punto entre el Eje X y Eje Y se sitúa el brazo debido a un ángulo de rotación  $q_1$ . El parámetro “r” es la vista desde arriba de la distancia desde el origen hasta el punto final.

La tercera imagen se corresponde con la vista en la que los links azules sí que se corresponden con los valores de  $l_1$  y  $l_2$ . Esta imagen no se corresponde con ninguno de los planos anteriores y el parámetro “x” coincide con el del plano ZY anteriormente mencionado.

Siguiendo con la misma metodología se plantean distintos triángulos y con ellos se procede a calcular los parámetros  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  y  $q_4$ .

### Resolución de $q_1$ :

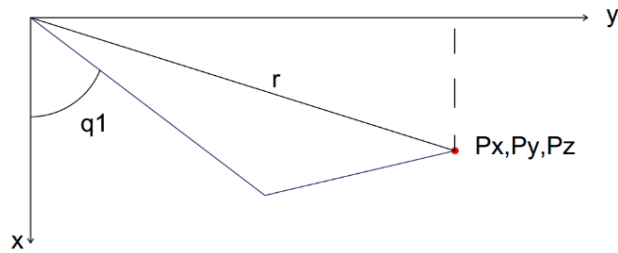


Fig. 28: Perspectiva del brazo en el plano XY

Para resolver  $q_1$  se emplea el plano XY, que es desde donde se puede ver la acción de dicho ángulo. Para ello basta con plantear el arco tangente de dicho ángulo, que está formada por las coordenadas  $P_x$  y  $P_y$ .

$$q_1 = \arctg\left(\frac{p_y}{p_x}\right)$$

Adicionalmente, se despeja el valor de “ $r$ ”, el cual será necesario para los ángulos posteriores:

$$r^2 = p_x^2 + p_y^2$$

### Resolución de $q_2$ :

El ángulo  $q_2$  es el encargado de producir el “alabeo”. Es el hecho de añadir este nuevo ángulo lo que invalida el modelo anterior. Para calcularlo:

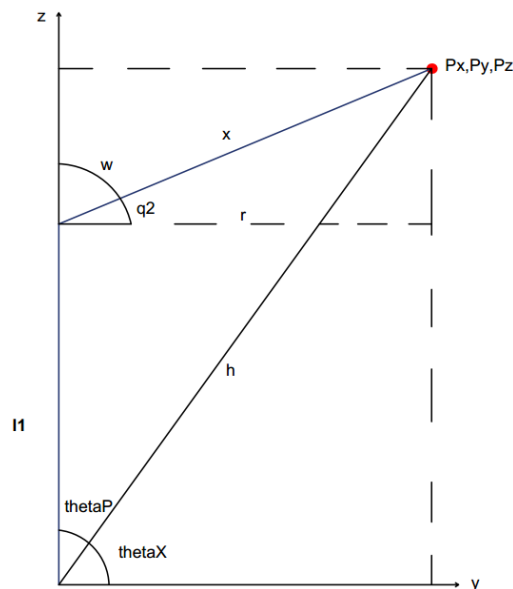


Fig. 29: Perspectiva del brazo en el plano ZY

Se calcula el parámetro h por medio de Pitágoras:

$$h = \sqrt{p_z^2 + r^2}$$

Se obtiene  $\sigma_x$  y  $\sigma_p$ :

$$\sigma_x = \cos^{-1}\left(\frac{r}{h}\right)$$

$$\sigma_p = \frac{\pi}{2} - \sigma_x$$

A continuación se resuelve el ángulo de  $\omega$ :

$$\omega = \sin^{-1}\left(\frac{h \cdot \text{sen}(\sigma_p)}{c}\right)$$

Por tanto, si se le resta  $90^\circ$  al ángulo  $\omega$  se obtiene  $q_2$ :

$$q_2 = \omega - \frac{\pi}{2}$$

### Resolución de $q_3$ :

El ángulo  $q_3$  es el encargado de pendular, para ello se hace uso del plano en el que se puede ver los parámetros  $l_1$ ,  $l_2$  y  $x$  al mismo tiempo.

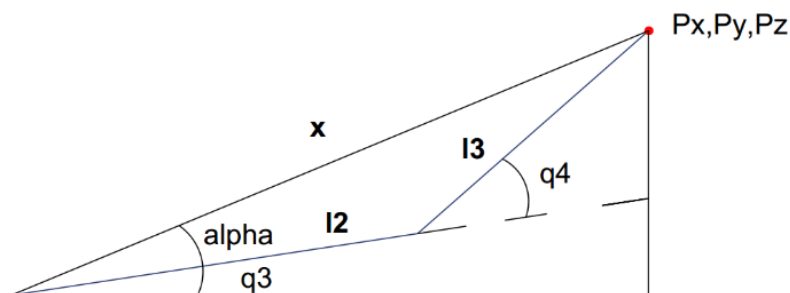


Fig. 30: Perspectiva del brazo en el plano que contiene  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $x$

Por medio del Teorema del coseno:

$$x^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \cos(q_4)$$

$$x = \sqrt{l_2^2 + l_3^2 + 2 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \cos(q_4)}$$

Se calcula el ángulo  $\varphi$ :

$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{l_3 \cdot \sin(q_4)}{x}\right)$$

Ahora,  $q_3$  tiene un rango de amplitud de hasta  $180^\circ$ , si se le resta a esos  $180^\circ$  el ángulo  $\varphi$  queda:

$$q_3 = \pi - \varphi$$

$$q_3 = \pi - \sin^{-1} \left( \frac{l_3 \cdot \sin(q_4)}{\sqrt{l_2^2 + l_3^2 + 2 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \cos(q_4)}} \right)$$

Por lo tanto, se obtiene el ángulo  $q_3$  en función de parámetros conocidos a excepción de  $q_4$ , cuyo valor se calcula a continuación:

#### Resolución de $q_4$ :

Este ángulo se calcula de la misma forma que en el método anterior, de hecho, tendrá el mismo valor. Para ello, se recurre a la ecuación obtenida para el cálculo de  $q_3$ :

$$x^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \cos(q_4)$$

Dónde “ $x$ ” es:

$$x^2 = r^2 + p_z^2$$

Y sustituyendo “ $r$ ”:

$$r^2 = p_x^2 + p_y^2$$

Por lo que queda:

$$p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot \cos(q_4)$$

Despejando,  $q_4$  es:

$$q_4 = \cos^{-1} \left( \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3} \right)$$

#### 6.4. Simulación en Octave

Tras calcular ambos métodos, en cada uno de ellos, tanto para el modelo cinemático directo como el inverso, se debe recurrir a algún método de simulación para verificar que los parámetros han sido calculados correctamente y se alcanzan las posiciones de forma deseada.

No se pueden aplicar los cálculos directamente al robot sin hacer previamente una simulación pues en caso de estar incorrectos se podría dañar la estructura.

Es por ello, que se ha empleado el programa Octave como software de simulación. En él se harán todas las pruebas necesarias para verificar la validez de los parámetros y que se alcanzan las coordenadas deseadas mediante una configuración aceptable.

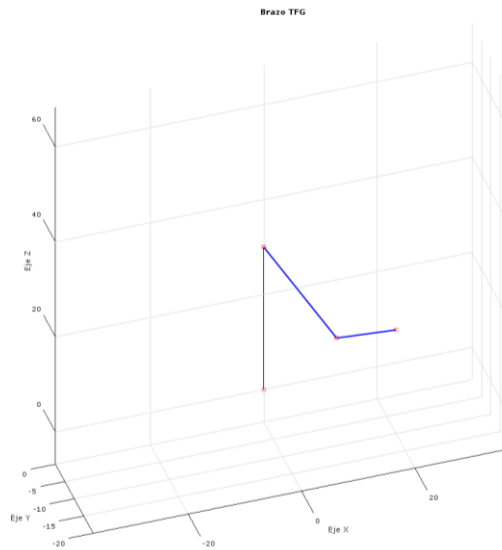


Fig. 31: Simulación del brazo alcanzando una posición deseada

**NOTA:**

*La programación empleada en este software se recoge dentro del Anexo III de este documento, tanto para el primero como para el segundo de los modelos calculados, demostrando la validez de ambos.*



## **Conclusiones**

El presente Trabajo de Fin de Grado ha tenido como objetivo, junto a los otros tres TFG coordinados con este, el diseño e implementación completa de un brazo robótico antropomórfico, es decir, cuyos movimientos simulen los de un ser humano.

Esto ha permitido profundizar en los distintos conocimientos adquiridos a lo largo de la titulación, ya que en este proyecto han intervenido distintas ramas de la ingeniería. Este proyecto ha requerido la aplicación de conocimientos del ámbito de la mecánica, electrónica y de la robótica.

Gracias a los conocimientos adquiridos en el campo de la mecánica, se ha logrado llevar a cabo el dimensionamiento de la estructura del robot, así como la elección de los motores en base al cálculo del par que se ha llevado a cabo previamente.

La electrónica ha estado presente tanto en la elección de los motores, como en el diseño de la electrónica de potencia que requiere este brazo antropomórfico. La implementación de puentes en H, fuente de alimentación y relés ha resultado un problema sencillo de resolver gracias a los conocimientos adquiridos en esta área.

Por último, los conocimientos adquiridos en el área de la robótica han permitido llevar a cabo el diseño del modelo cinemático directo e inverso, los cuales son la base de la programación de cualquier robot. Además, un software de simulación, como es el Octave, ha resultado bastante sencillo de emplear gracias a que ya había sido utilizado en repetidas ocasiones a lo largo de la titulación.

Con ello, concluye un proyecto que agrupa distintas ramas de la ingeniería, siendo una forma de mostrar los distintos conocimientos y habilidades que han sido desarrolladas a lo largo del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática.

## **Conclusions**

The objective of this Final Degree Project, with the collaboration of other Final Degree Projects coordinated with this one, has been the design and complete implementation of an anthropomorphic robotic arm.

This has allowed to deepen the knowledge acquired throughout the degree. This project has required the application of mechanicals, electronics and robotics knowledge.

Thanks to the mechanicals knowledge it has been possible to carry out the dimensioning of the robot structure, as well as the choice of motors based on the calculation of torque that has been previously carried out.

Electronics has been present in the choice of motors and in the design of the power electronics that this anthropomorphic arm requires. The implementation of the L298N modules, the power supply and relays has been a simple problem to solve thanks to the knowledge acquired in this area.

Finally, the knowledge acquired in the area of robotics has allowed the design of the direct and inverse kinematic model, which are the bases of any robot's programming. In addition, simulation software, such as Octave, has been quite easy to use thanks to the fact that it has already been used frequently throughout the degree.

Here concludes a project that unites different branches of engineering, being a way to show the different knowledge and skills that have been developed throughout the degree in Industrial Electronic and Automatic Engineering.

# Bibliografía

- [1] A. Ollero. Robótica: manipuladores y robots móviles. Marcombo, 1991.
- [2] F. Torres et al. Robots y Sistemas Sensoriales. Prentice Hall, 2002.
- [3] A. Barrientos et al. Fundamentos de Robótica (2a ed). McGraw-Hill, 2007.
- [4] Philpot, TA. Mechanics of materials-SI edition. 3ª ed. Wiley, 2013
- [5] Gere, JM. Resistencia de materiales. 5ª ed. Madrid: Paraninfo, 2015
- [6] Estévez Pérez. Ana. Implementación de la electrónica para el control dinámico de un manipulador Scorbót-ER Vplus: interfaz electrónica, lectura de codificadores digitales de posición y cálculos cinemáticos [Trabajo de Fin de grado] Universidad de La Laguna.
- [7] R. Components, <<RS,>> [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/reles-de-laminas/1245096/> [Último acceso: 10 Junio 2020].
- [8] R. Components, <<RS,>> [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/reles-de-estado-solido/7385588/> [Último acceso: 10 Junio 2020].
- [9] R. Components, <<RS,>> [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/motorreductores-dc/4540899/> [Último acceso: 5 mayo 2020].
- [10] R. Components, <<RS,>> [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/motores-paso-a-paso/8293500/?sra=pmpn> [Último acceso: 11 mayo 2020].
- [11] Kuka <<kuka<< [En línea] Available: <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/robot-industrial/kr-40-pa> [Último acceso: 28 mayo 2020].
- [12] Orpi <<orpi>> [En línea] Available: <https://www.orpi-sl.com/productos/robotica/robot-scorbot-er-9-pro> [Último acceso: 28 mayo 2020].
- [13] Grupo Aurova <<Aurova>> [En línea] Available: <http://www.aurova.ua.es/> [Último acceso: 11 mayo 2020].
- [14] Direct Industry <<D. Industry>> [En línea] Available: <https://www.directindustry.es/prod/xcmg/product-50713-1891169.html> [Último acceso: 28 mayo 2020].
- [15] Elsevier <<Elsevier>> [En línea] Available: <https://www.elsevier.com/es-es/connect/ehealth/robotica-y-medicina> [Último acceso: 7 mayo 2020].
- [16] Wikipedia <<wikipedia>> [En línea] Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Rob%C3%B3tica> [Último acceso: 7 mayo 2020].
- [17] Apuntes de Robotica. Leopoldo Acosta, Marta Sigut, Juan Albino Méndez, Santiago Torres, Nicolás Marichal.

# ANEXOS

# ANEXO I

Cálculos de inercia para cada  
motor

# Comprobación avanzada

Posteriormente al prediseño se modeló toda la estructura del brazo en un software de diseño donde se alojaron los motores de la manera más fiel posible al prediseño, incluyendo la transmisión de engranajes calculada. Como medida de precaución, ya que fue imposible que los elementos lo mantuvieran en la misma posición, se optó por aligerar las piezas cuanto fuera posible manteniendo una geometría que, aunque será calculada posteriormente, pueda garantizar la rigidez de la estructura.

Los ejes también se calcularán posteriormente tanto a flexión como fatiga de tal manera que puedan funcionar de manera óptima. Como criterio se establecieron los diámetros iniciales que se corresponden con los huecos de los engranajes calculados. Además de esto faltaría dimensionar los cojinetes y cuñas, pero debido a la naturaleza de estos elementos, no son determinantes en el estudio que vamos a hacer.

El software elegido fue SolidWorks, ya que por muy complicada que sea la pieza, el programa nos puede dar una inercia de todo el conjunto de los elementos y el centro de masas para poder realizar las comprobaciones.

Cabe destacar que, para permitir los movimientos del hombro, se tuvo que diseñar una pieza nueva para el brazo que alojara el motor H2 y poder permitir el movimiento del brazo. Empezaremos verificando el motor H1.

# Motor H1

El conjunto de piezas que tiene que mover el motor H1 el siguiente:

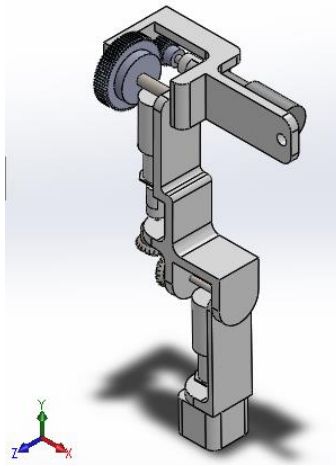


Figura 1. Piezas H1 (fuente propia)

En la imagen se pueden ver el brazo, el antebrazo y la nueva pieza que está alojando el motor H2. También se puede ver el sistema de ejes de coordenadas que se están utilizando, siendo el eje Z paralelo al eje de giro del brazo.

Lo siguiente que se hará va a ser colocar el origen de coordenadas en el centro del eje del motor H1 y evaluar las inercias y el centro de masas para la posición de la figura.

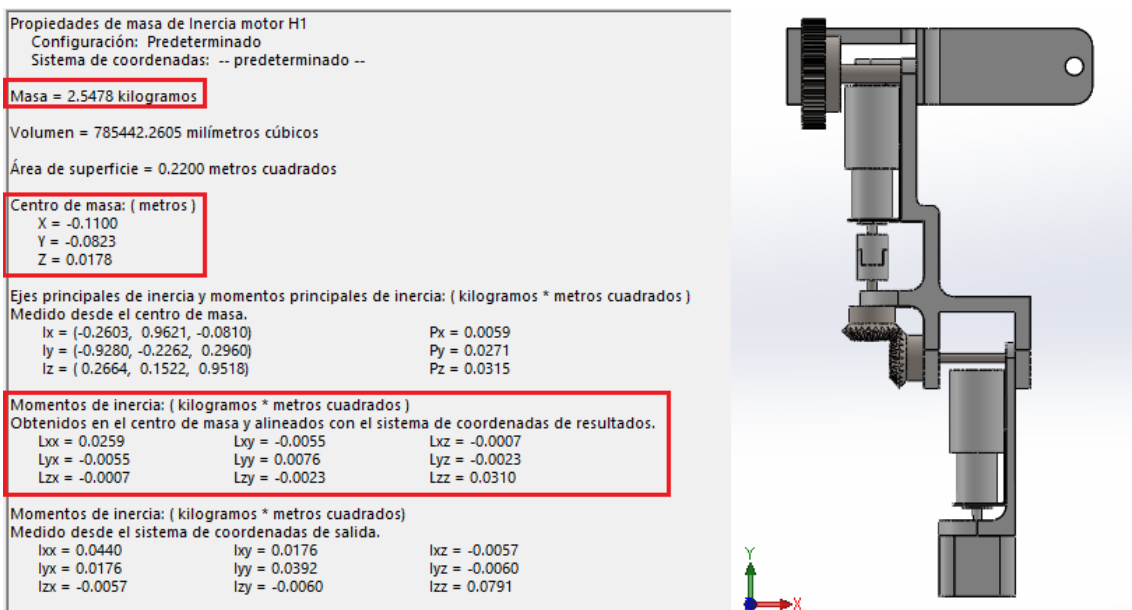


Figura 2. Inercia piezas H1 (fuente propia)

De todos los valores que nos da, nos vamos a quedar con los resaltados. Respecto a los momentos de inercia sólo nos interesan las inercias respecto al eje de giro, que coincide en con el sistema de coordenadas de resultados.

El centro de masas parece estar situado a la izquierda y por debajo del eje de giro, esto implica que la posición más desfavorable en no es el actual. En cambio, si el brazo se levantara hasta que la componente y del centro de masas fuera cero, se estaría ante la distancia más alejada que puede estar el centro de masas.

Si esto pasa se estaría ante el máximo momento resistente que generaría brazo y al ser la posición más desfavorable es la situación que se debe buscar.

Como la distancia del centro de masas al eje de giro no va a cambiar si se sigue girando en torno al eje de giro, es fácil calcularla considerando que las distancias X e Y son las componentes del vector que da la distancia máxima. Por lo tanto, se puede calcular aplicando el teorema de Pitágoras:

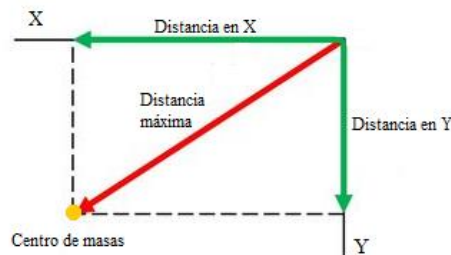


Figura 3. Esquema descomposición de distancias (fuente propia)

$$D_{Max} = \sqrt{(110,7 \text{ mm})^2 + (81,5 \text{ mm})^2} = 137,4 \text{ mm} \approx 137 \text{ mm}$$

Esta hipótesis se demuestra cuando se gira el brazo hasta un punto en el que la componente X de la distancia al centro de masas se acerca a este valor, ya que es muy difícil anular la componente Y moviendo la estructura manualmente.



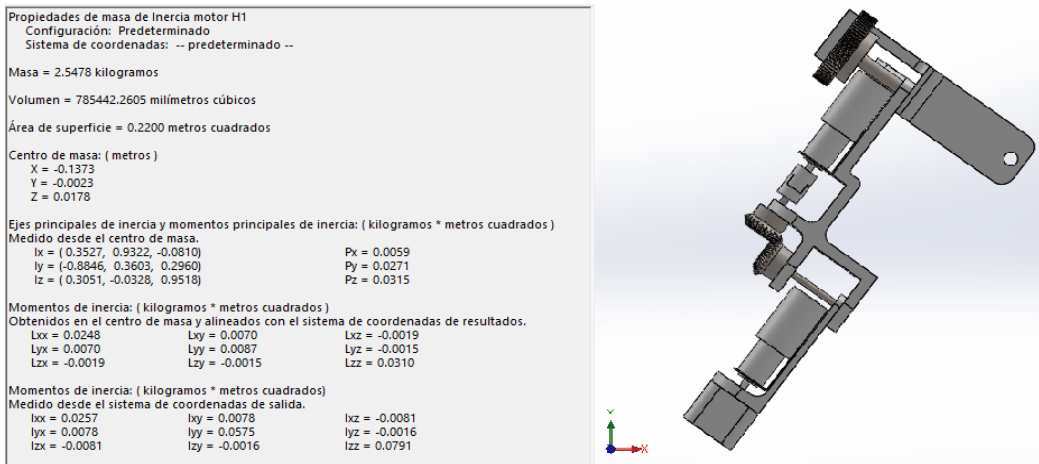


Figura 4. Inercias piezas H1 girada (fuente propia)

Una vez se tiene la inercia en el eje de giro, la masa y la distancia, se puede calcular el momento necesario en el motor y compararlo con el que se tiene para verificar que sigue funcionando.

$$\Sigma M = M_{Resist} + M_{Motor} = 3,1 \cdot 10^{-2} \text{ Kg}m^2 \cdot 5 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = 0,155 \text{ Nm}$$

$$M_{Resist} = 2,55 \text{ Kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,137 \text{ m} = 3,43 \text{ Nm}$$

$$M_{Motor} = 3,41 + 0,155 = 3,585 \text{ Nm}$$

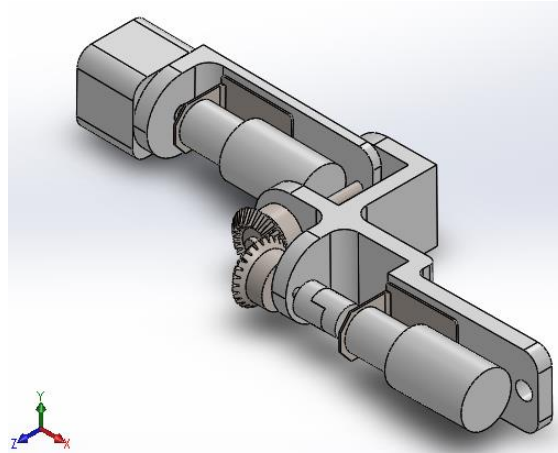
Ahora se compara con el momento que nos da nuestro motor:

$$M_{Actual} = 1,18 \text{ Nm} \cdot 3,18 = 3,75 \text{ Nm}$$

Cumple ya que 3,75 Nm es mayor que en 3,585 Nm.

## Motor H2

El conjunto de piezas que tiene que mover el H2 es el siguiente:



*Figura 5. Piezas H2 (fuente propia)*

Para el caso de este motor se hará exactamente lo mismo que para el motor anterior. Primero se valorará la inercia y la ubicación del centro de masas para dar con la posición más desfavorable y así poder calcular el momento resistente máximo y compararlo con el que nos da nuestro motor.

Para este caso el sistema de coordenadas de salida de las inercias también está colocado en el centro del eje de giro del motor H2. Sabiendo esto, se procederá a la evaluación.

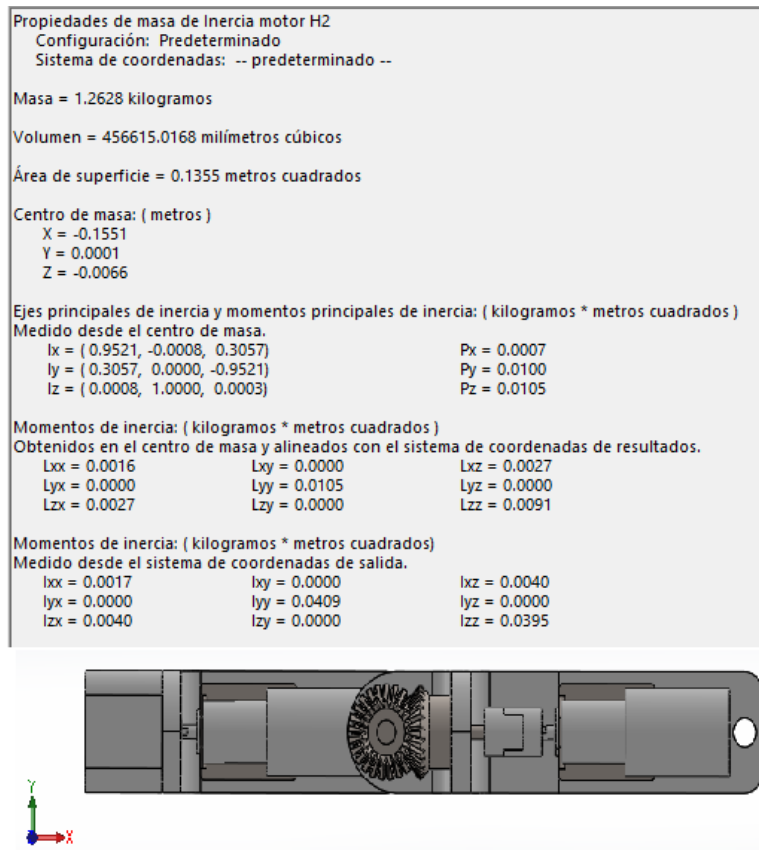


Figura 6. Inercias piezas H2 (fuente propia)

Observando la imagen, se confirma que la posición más desfavorable es aquella en la que el brazo está estirado completamente recto, tal como se supuso. Sabiendo esto, se procederá a evaluar los momentos:

$$\Sigma M = M_{Resist} + M_{Motor} = 9,1 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}m^2 \cdot 5 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = 0,046 \text{ Nm}$$

$$M_{Resist} = 1,26 \text{ Kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,155 \text{ m} = 1,92 \text{ Nm}$$

$$M_{Motor} = 1,92 + 0,046 = 1,97 \text{ Nm}$$

Como 3,75 Nm es mayor que 1,97 Nm, también se cumplen los requerimientos en este motor. Así que se tenga que funcione adecuadamente en las condiciones de operación.

# Motor C1

La pieza que tiene que mover el motor C1 se corresponde con el subconjunto del brazo:

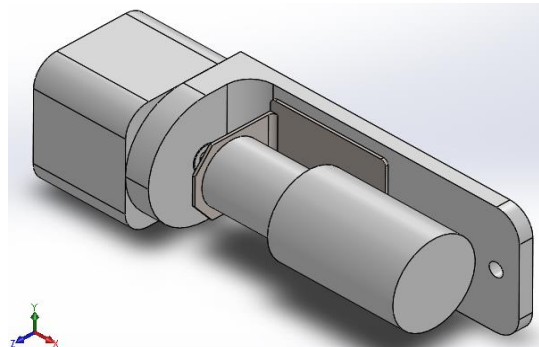


Figura 7. Piezas C1 (fuente propia)

Para ese caso se volverán a colocar los ejes igual y el origen en el eje de giro del motor C2. El procedimiento será el mismo: evaluar las inercias en la posición más desfavorable y calcular el par resistente a partir del centro de masas y la distancia de este hacia el eje de giro.

|  |                   |                    |
|--|-------------------|--------------------|
| Propiedades de masa de inercia motor C2  |                   |                    |
| Configuración: Predeterminado  |                   |                    |
| Sistema de coordenadas: -- predeterminado --   |                   |                    |
| Masa = 0.4236 kilogramos   |                   |                    |
| Volumen = 152197.4381 milímetros cúbicos   |                   |                    |
| Área de superficie = 0.0553 metros cuadrados   |                   |                    |
| Centro de masa: ( metros )   |                   |                    |
| X = -0.0551  |                   |                    |
| Y = -0.0009  |                   |                    |
| Z = 0.0217   |                   |                    |
| Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: ( kilogramos * metros cuadrados ) |                   |                    |
| Medido desde el centro de masa.  |                   |                    |
| $I_x = ( 1.0000, -0.0055, 0.0048 )$  | $P_x = 0.0001$    |                    |
| $I_y = ( 0.0048, 0.0000, -1.0000 )$  | $P_y = 0.0005$    |                    |
| $I_z = ( 0.0055, 1.0000, 0.0000 )$   | $P_z = 0.0006$    |                    |
| Momentos de inercia: ( kilogramos * metros cuadrados )   |                   |                    |
| Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.          |                   |                    |
| $L_{xx} = 0.0001$  | $L_{yy} = 0.0000$ | $L_{zz} = 0.0000$  |
| $L_{yx} = 0.0000$  | $L_{zy} = 0.0006$ | $L_{yz} = 0.0000$  |
| $L_{zx} = 0.0000$  | $L_{xy} = 0.0000$ | $L_{xz} = 0.0005$  |
| Momentos de inercia: ( kilogramos * metros cuadrados )   |                   |                    |
| Medido desde el sistema de coordenadas de salida.  |                   |                    |
| $I_{xx} = 0.0003$  | $I_{yy} = 0.0000$ | $I_{zz} = -0.0005$ |
| $I_{yx} = 0.0000$  | $I_{zy} = 0.0020$ | $I_{yz} = 0.0000$  |
| $I_{zx} = -0.0005$   | $I_{xy} = 0.0000$ | $I_{xz} = 0.0018$  |

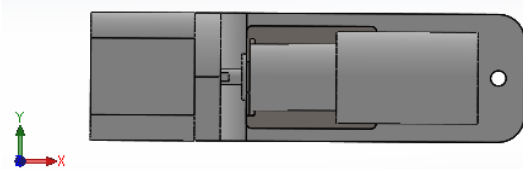


Figura 8. Inercia piezas C1 (fuente propia)

Para este caso se vuelve a confirmar que la posición más desfavorable es con el brazo extendido horizontalmente. A continuación, se procederá a evaluar los momentos.

$$\Sigma M = M_{Resist} + M_{Motor} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Kgm}^2 \cdot 5 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$$

$$M_{Resist} = 0,42 \text{ Kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,055 \text{ m} = 0,227 \text{ Nm}$$

$$M_{Motor} = 2,5 \cdot 10^{-3} + 0,227 = 0,23 \text{ Nm}$$

Recordemos que para este tramo la relación de transmisión entre los engranajes cónicos era de 1, así que el par transmitido por nuestro motor es directamente el que sale del mismo. En este caso, su valor es de 1,18 Nm, que sigue siendo suficiente para garantizar las condiciones de operación.

# Motor C2

La única pieza que tiene que mover el motor C2 es la de la figura:

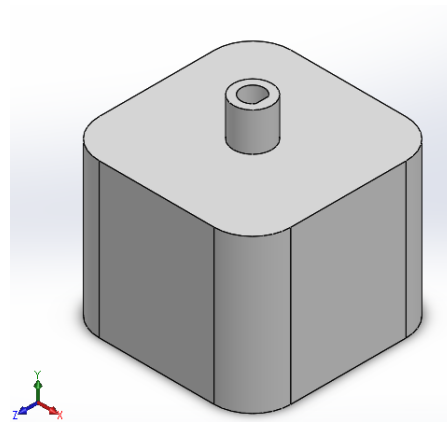


Figura 9. Pieza C2 (fuente propia)

Se recuerda que este motor no tenía un par resistente ya que únicamente se quiere garantizar que rotara, en este caso sobre su eje Y. Por lo tanto, únicamente se necesita la inercia de este eje. Como en los casos anteriores, el origen de coordenadas está situado en el centro del eje del motor.

|  |                  |                  |
|--|------------------|------------------|
| <b>Propiedades de masa de Inercia motor C2</b><br>Configuración: Predeterminado<br>Sistema de coordenadas: -- predeterminado --                          |                  |                  |
| Masa = 0.02326231 kilogramos   |                  |                  |
| Volumen = 18759.92599443 milímetros cúbicos  |                  |                  |
| Área de superficie = 0.01911236 metros cuadrados   |                  |                  |
| <b>Centro de masa: ( metros )</b><br>X = 0.00000162<br>Y = -0.02514028<br>Z = 0.00000000   |                  |                  |
| <b>Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: ( kilogramos * metros cuadrados )</b><br>Medido desde el centro de masa.               |                  |                  |
| lx = ( 0.99999901, 0.00023952, 0.00138852)   |                  | Px = 0.00001124  |
| ly = ( 0.00138852, 0.00000000, -0.99999904)  |                  | Py = 0.00001124  |
| lz = (-0.00023952, 0.99999997, 0.00000000)   |                  | Pz = 0.00001441  |
| <b>Momentos de inercia: ( kilogramos * metros cuadrados )</b><br>Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados. |                  |                  |
| Lxx = 0.00001124   | Lxy = 0.00000000 | Lxz = 0.00000000 |
| Lyx = 0.00000000   | Lyy = 0.00001441 | Lyz = 0.00000000 |
| Lzx = 0.00000000   | Lzy = 0.00000000 | Lzz = 0.00001124 |
| <b>Momentos de inercia: ( kilogramos * metros cuadrados )</b><br>Medido desde el sistema de coordenadas de salida.                                       |                  |                  |
| Ixx = 0.00002595   | Ixy = 0.00000000 | Ixz = 0.00000000 |
| Iyx = 0.00000000   | Iyy = 0.00001441 | Iyz = 0.00000000 |
| Izx = 0.00000000   | Izy = 0.00000000 | Izz = 0.00002595 |

Figura 10. Inercia pieza C2 (fuente propia)

$$\Sigma M = M_{Motor} = 1,44 \cdot 10^{-5} \text{ Kg}m^2 \cdot 5 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}$$

Por lo tanto, se puede concluir que el motor cumple.

| MOTOR DE LA BASE                  |            |                                    |                    |
|-----------------------------------|------------|------------------------------------|--------------------|
| Datos del cuerpo (cilindro)       |            | Inercias                           |                    |
| Diámetro exterior (cm)            | 10         | I cuerpo (Kgm <sup>2</sup> )       | 0,000473312        |
| Diámetro interior (cm)            | 8          | I cuerpo - eje (Kgm <sup>2</sup> ) | 0,000473312        |
| Altura (cm)                       | 30         | I brazo (Kgm <sup>2</sup> )        | 0,010120212        |
| Volumen (cm <sup>3</sup> )        | 848,230016 | I brazo - eje (Kgm <sup>2</sup> )  | 0,059304441        |
| Masa (Kg)                         | 1,05180522 | I M2 (Kgm <sup>2</sup> )           | 0,000305302        |
| Datos brazo + antebrazo           |            | I M2 - eje (Kgm <sup>2</sup> )     | 0,000332098        |
| Ancho (cm)                        | 5          | I M3 (Kgm <sup>2</sup> )           | 5,60718E-05        |
| Alto (cm)                         | 5          | I M3 - eje (Kgm <sup>2</sup> )     | 0,000227015        |
| Largo (cm)                        | 35         | I M4 (Kgm <sup>2</sup> )           | 4,90227E-05        |
| Volumen (cm <sup>3</sup> )        | 783,500269 | I M4 - eje (Kgm <sup>2</sup> )     | 0,016533368        |
| Masa (Kg)                         | 0,97154033 | I M5 (Kgm <sup>2</sup> )           | 0,000235213        |
| Distancia del CM al eje (cm)      | 22,5       | I M5 - eje (Kgm <sup>2</sup> )     | 0,026946168        |
| Densidad PLA (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,24       | I total (Kgm <sup>2</sup> )        | 0,103816403        |
| Datos motores                     |            | α máxima                           |                    |
| Peso M4/5 (Kg)                    | 0,306      | w final (rad/s)                    | 1                  |
| Peso M2/3 (Kg)                    | 0,35       | w inicial (rad/s)                  | 0                  |
| Diámetro común (mm)               | 35,8       | tiempo (s)                         | 0,2                |
| Longitud M4/5 (mm)                | 90,9       | 5                                  |                    |
| Longitud M2/3 (mm)                | 97,5       | Par necesario (Nm)                 | <b>0,519082017</b> |
|                                   |            | Par necesario (Kgcm)               | <b>5,291355929</b> |

# ANEXO II

Dathaseet electrónica de  
potencia



# Datasheet

4540877 / 8347672 / 4540883 / 7521973 / 7521977 / 4540899 / 7521986



## 942D SERIES 32mm (37mm motor) PLANETRY (EPICYCLIC) METAL GEARBOX

|          |              |             |
|----------|--------------|-------------|
| 942D51   | (4.5v - 15v) | RATIO 5:1   |
| 942D271  | (4.5v - 15v) | RATIO 27:1  |
| 942D511  | (4.5v - 15v) | RATIO 51:1  |
| 942D1001 | (4.5v - 15v) | RATIO 100:1 |
| 942D1391 | (4.5v - 15v) | RATIO 139:1 |
| 942D2641 | (4.5v - 15v) | RATIO 264:1 |
| 942D5161 | (4.5v - 15v) | RATIO 516:1 |
| 942D7211 | (4.5v - 15v) | RATIO 721:1 |

Designed for heavy-duty industrial and model applications this robust unit boasts a powerful high quality motor with sintered bronze bearings. The metal gearbox incorporates sleeved bearings, enabling the high torque transfer from the motor to be transmitted through the gearbox.

### MOTOR DATA.

| MODEL | VOLTAGE         |                | NO LOAD |         | MAX EFFICIENCY |         |         |        |        |      | STALL TORQUE |     |
|-------|-----------------|----------------|---------|---------|----------------|---------|---------|--------|--------|------|--------------|-----|
|       | OPERATING RANGE | NOMINAL        | SPEED   | CURRENT | SPEED          | CURRENT | TORQUE  |        | OUTPUT | EFF  | g - cm       |     |
|       |                 |                | R.P.M.  | A       | R.P.M.         | A       | oz - in | g - cm | W      | %    |              |     |
| 540/1 | 4.5 - 15.0      | 12.0v CONSTANT | 14,724  | 0.52    | 12380          | 2.75    | 2.14    | 152    | 19.35  | 58.6 | 13.9         | 956 |

## REDUCTION TABLE. R.P.M. (no load)

| SUPPLY VOLTAGE | 4.5v | 6.0v | 9.0v | 12.0v | 15.0v |
|----------------|------|------|------|-------|-------|
| 942D51         | 1104 | 1472 | 2209 | 2945  | 3681  |
| 942D271        | 205  | 273  | 409  | 545   | 682   |
| 942D511        | 108  | 144  | 217  | 289   | 361   |
| 942D1001       | 55   | 74   | 110  | 147   | 184   |
| 942D1391       | 40   | 53   | 79   | 106   | 132   |
| 942D2641       | 21   | 28   | 42   | 56    | 70    |
| 942D5161       | 11   | 14   | 21   | 29    | 36    |
| 942D7211       | 7.6  | 10   | 15   | 20    | 26    |

| WEIGHT   |      |
|----------|------|
| 942D51   | 254g |
| 942D271  | 279g |
| 942D511  | 306g |
| 942D1001 | 303g |
| 942D1391 | 306g |
| 942D2641 | 329g |
| 942D5161 | 333g |
| 942D7211 | 350g |

## GEARED MOTOR TORQUE RATINGS AT MAX. EFFICIENCY.

Note: Motor speeds may vary by (+) or (-) 12.5%

| At 12V<br>(g.cm) |       |
|------------------|-------|
| 5:1              | 618   |
| 27:1             | 2918  |
| 51:1             | 4725  |
| 100:1            | 9264  |
| 139:1            | 10000 |
| 264:1            | 12000 |
| 516:1            | 12000 |
| 721:1            | 12000 |

| 942D SERIES                            |              |
|--|--------------|
| No load Backlash:                      | Max 2.5 deg. |
| Max Radial Load:<br>(10mm from flange) | 3000gf.      |
| Shaft Axial Load:                      | 2500gf.      |

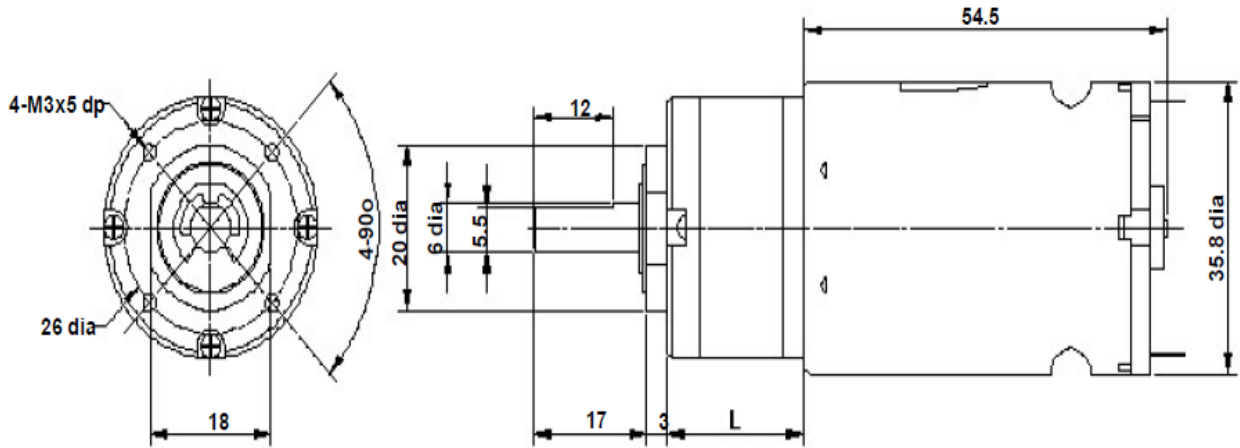
24 volt versions are available for this range of motor-gearboxes. Performance data is similar to 12 volt versions. This version also has an extended 10mm rear shaft to accommodate motor encoders. When ordering please use 12v version part number suffixed with 24V. I.E. 942D1001 will be 942D100124V

**IMPORTANT NOTICE**  
At very low ratios the torque produced by this geared motor combination may exceed the maximum permissible torque of the gearbox. In this situation the unit must not be allowed to stall as this may damage the gears.

NOTE: To establish Torque Rating in Nm, divide g.cm by 10,197.0

## MOTOR DATA. (RE-540/1 24v).

| MODEL          | VOLTAGE         |              | NO LOAD |         | AT MAXIMUM EFFICIENCY |         |         |        |        |     | STALL TORQUE |        |
|----------------|-----------------|--------------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|--------|--------|-----|--------------|--------|
|                | OPERATING RANGE | NOMINAL      | SPEED   | CURRENT | SPEED                 | CURRENT | TORQUE  |        | OUTPUT | EFF | TORQUE       |        |
|                |                 |              | R.P.M.  | A       | R.P.M.                | A       | oz - in | g - cm | W      | %   | oz - in      | g - cm |
| RE - 540/1 24v | 12 - 24v        | 24v CONSTANT | 14452   | 0.30    | 12111                 | 1.57    |         | 177    | 22     | 65  |              | 1094   |



| GEARBOX REF.     | L    |
|------------------|------|
| 942D51 (5:1)     | 20.8 |
| 942D271 (27:1)   | 26.5 |
| 942D511 (51:1)   | 32.5 |
| 942D1001 (100:1) | 33.6 |
| 942D1391 (139:1) | 33.4 |
| 942D2641 (264:1) | 40.0 |
| 942D5161 (516:1) | 40.0 |
| 942D7211 (721:1) | 40.0 |

## ADVANTAGES OF PLANETARY GEARBOXES.

**EFFICIENCY:** Efficiencies of planetary gearboxes can be above 90% while some other types of transmission can be 50% or less. This allows the use of smaller motors.

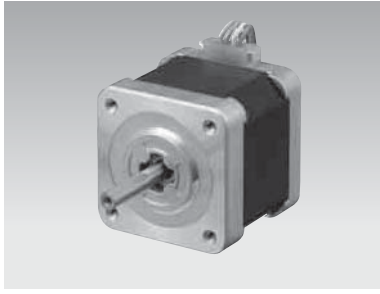
**SIZE:** Planetary gearboxes can be half the size of conventional boxes.

**WEIGHT:** Weight savings can be as high as 60%, allowing smaller, lighter support structures.

**MAINTENANCE:** Other than routine oil changes, no maintenance is required, eliminating the need to hold spares.

**REVERSIBLE:** Planetary gears can be equally efficient in either direction. This is an advantage for use in running machinery in both clockwise and anti-clockwise directions.

**COAXIAL:** The coaxial configuration of input and output shafts allows planetary gears to be installed in line with a motor and a machine.



# 42 mm sq. (1.65 inch sq.)

1.8° /step RoHS

Bipolar winding, Lead wire type  
Unipolar winding, Connector type ▶ p. 61

### Customizing

- Hollow Shaft modification
- Decelerator Encoder
- Brake

Varies depending on the model number and quantity. Contact us for details.

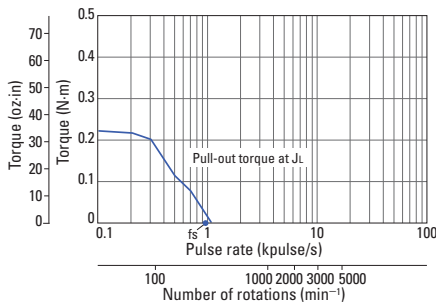
### Bipolar winding, Lead wire type

| Model number         |                      | Holding torque at 2-phase energization | Rated current | Wiring resistance | Winding inductance | Rotor inertia  | Mass (Weight) | Motor length (L) |
|----------------------|----------------------|--|---------------|-------------------|--------------------|--|---------------|------------------|
| Single shaft         | Dual shaft           | [N·m (oz·in) min.]                     | A/phase       | Ω /phase          | mH/phase           | [× 10 <sup>-4</sup> kg·m <sup>2</sup> (oz·in <sup>2</sup> )] | [kg (lbs)]    | mm (in)          |
| <b>103H5205-5040</b> | <b>103H5205-5010</b> | 0.23 (32.57)                           | 0.25          | 54                | 78                 | 0.036 (0.20)   | 0.23 (0.51)   | 33 (1.25)        |
| <b>103H5205-5140</b> | <b>103H5205-5110</b> | 0.25 (35.40)                           | 0.5           | 13.4              | 23.4               | 0.036 (0.20)   | 0.23 (0.51)   | 33 (1.25)        |
| <b>103H5205-5240</b> | <b>103H5205-5210</b> | 0.265 (37.53)                          | 1             | 3.4               | 6.5                | 0.036 (0.20)   | 0.23 (0.51)   | 33 (1.25)        |
| <b>103H5208-5040</b> | <b>103H5208-5010</b> | 0.35 (49.56)                           | 0.25          | 66                | 116                | 0.056 (0.31)   | 0.29 (0.64)   | 39 (1.54)        |
| <b>103H5208-5140</b> | <b>103H5208-5110</b> | 0.38 (53.81)                           | 0.5           | 16.5              | 34                 | 0.056 (0.31)   | 0.29 (0.64)   | 39 (1.54)        |
| <b>103H5208-5240</b> | <b>103H5208-5210</b> | 0.39 (55.23)                           | 1             | 4.1               | 9.5                | 0.056 (0.31)   | 0.29 (0.64)   | 39 (1.54)        |
| <b>103H5209-5040</b> | <b>103H5209-5010</b> | 0.38 (53.81)                           | 0.25          | 71.4              | 133                | 0.062 (0.34)   | 0.31 (0.68)   | 41 (1.61)        |
| <b>103H5209-5140</b> | <b>103H5209-5110</b> | 0.41 (58.06)                           | 0.5           | 18.2              | 39                 | 0.062 (0.34)   | 0.31 (0.68)   | 41 (1.61)        |
| <b>103H5209-5240</b> | <b>103H5209-5210</b> | 0.425 (60.18)                          | 1             | 4.4               | 11                 | 0.062 (0.34)   | 0.31 (0.68)   | 41 (1.61)        |
| <b>103H5210-5040</b> | <b>103H5210-5010</b> | 0.465 (65.85)                          | 0.25          | 80                | 123.3              | 0.074 (0.40)   | 0.37 (0.82)   | 48 (1.89)        |
| <b>103H5210-5140</b> | <b>103H5210-5110</b> | 0.49 (69.39)                           | 0.5           | 20                | 35                 | 0.074 (0.40)   | 0.37 (0.82)   | 48 (1.89)        |
| <b>103H5210-5240</b> | <b>103H5210-5210</b> | 0.51 (72.22)                           | 1             | 4.8               | 9.5                | 0.074 (0.40)   | 0.37 (0.82)   | <b>48 (1.89)</b> |

## Characteristics diagram

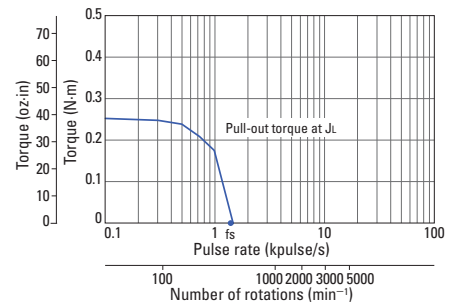
### 103H5205-5040 103H5205-5010

Constant current circuit  
Source voltage: 24 VDC  
Operating current:  
0.25 A/phase, 2-phase  
energization (full-step)  
 $J_L=[0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$  (5.14  
oz·in<sup>2</sup>) use the rubber  
coupling]  
fs: Maximum self-start  
frequency when not  
loaded



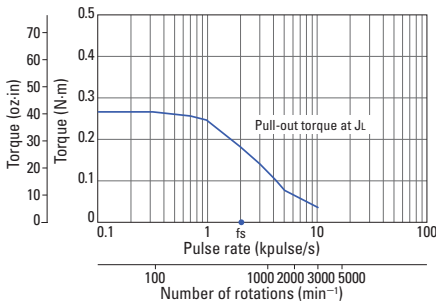
### 103H5205-5140 103H5205-5110

Constant current circuit  
Source voltage: 24 VDC  
Operating current:  
0.5 A/phase, 2-phase  
energization (full-step)  
 $J_L=[0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$  (5.14  
oz·in<sup>2</sup>) use the rubber  
coupling]  
fs: Maximum self-start  
frequency when not  
loaded



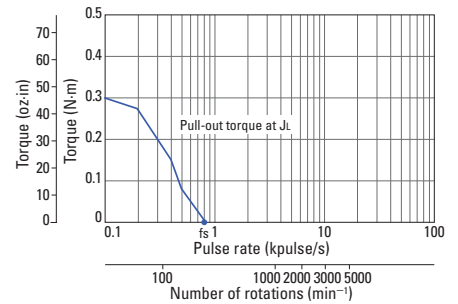
### 103H5205-5240 103H5205-5210

Constant current circuit  
Source voltage: 24 VDC  
Operating current:  
1 A/phase, 2-phase  
energization (full-step)  
 $J_L=[0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$  (5.14  
oz·in<sup>2</sup>) use the rubber  
coupling]  
fs: Maximum self-start  
frequency when not  
loaded



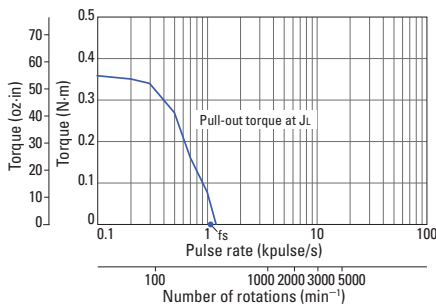
### 103H5208-5040 103H5208-5010

Constant current circuit  
Source voltage: 24 VDC  
Operating current:  
0.25 A/phase, 2-phase  
energization (full-step)  
 $J_L=[0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$  (5.14  
oz·in<sup>2</sup>) use the rubber  
coupling]  
fs: Maximum self-start  
frequency when not  
loaded



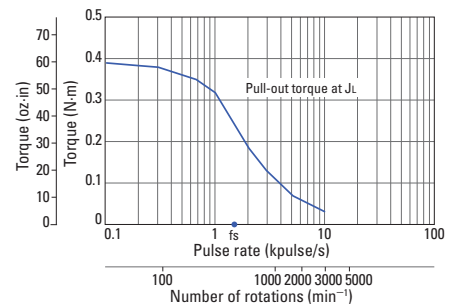
### 103H5208-5140 103H5208-5110

Constant current circuit  
Source voltage: 24 VDC  
Operating current:  
0.5 A/phase, 2-phase  
energization (full-step)  
 $J_L=[0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$  (5.14  
oz·in<sup>2</sup>) use the rubber  
coupling]  
fs: Maximum self-start  
frequency when not  
loaded



### 103H5208-5240 103H5208-5210

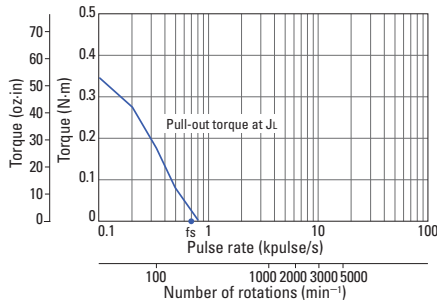
Constant current circuit  
Source voltage: 24 VDC  
Operating current:  
1 A/phase, 2-phase  
energization (full-step)  
 $J_L=[0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$  (5.14  
oz·in<sup>2</sup>) use the rubber  
coupling]  
fs: Maximum self-start  
frequency when not  
loaded



## Characteristics diagram

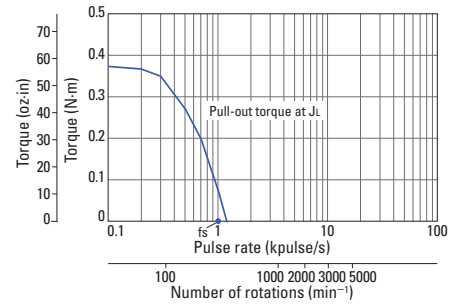
### 103H5209-5040 103H5209-5010

Constant current circuit  
Source voltage: 24 VDC  
Operating current:  
0.25 A/phase, 2-phase  
energization (full-step)  
 $J_L = [0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$  (5.14  
oz·in<sup>2</sup>) use the rubber  
coupling]  
fs: Maximum self-start  
frequency when not  
loaded



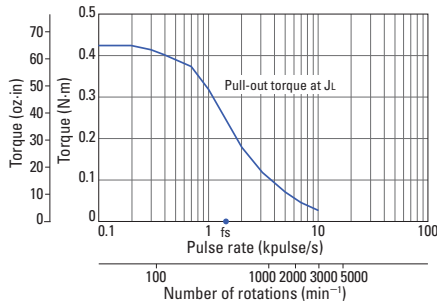
### 103H5209-5140 103H5209-5110

Constant current circuit  
Source voltage: 24 VDC  
Operating current:  
0.5 A/phase, 2-phase  
energization (full-step)  
 $J_L = [0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$  (5.14  
oz·in<sup>2</sup>) use the rubber  
coupling]  
fs: Maximum self-start  
frequency when not  
loaded



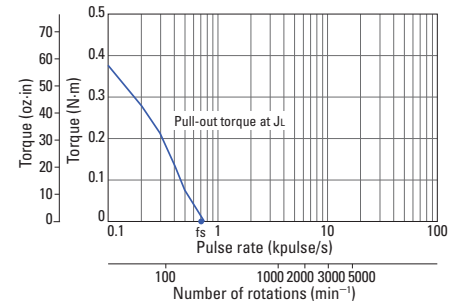
### 103H5209-5240 103H5209-5210

Constant current circuit  
Source voltage: 24 VDC  
Operating current:  
1 A/phase, 2-phase  
energization (full-step)  
 $J_L = [0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$  (5.14  
oz·in<sup>2</sup>) use the rubber  
coupling]  
fs: Maximum self-start  
frequency when not  
loaded



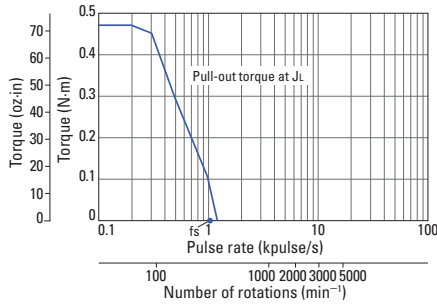
### 103H5210-5040 103H5210-5010

Constant current circuit  
Source voltage: 24 VDC  
Operating current:  
0.25 A/phase, 2-phase  
energization (full-step)  
 $J_L = [0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$  (5.14  
oz·in<sup>2</sup>) use the rubber  
coupling]  
fs: Maximum self-start  
frequency when not  
loaded



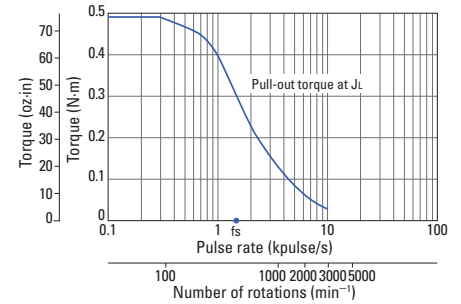
### 103H5210-5140 103H5210-5110

Constant current circuit  
Source voltage: 24 VDC  
Operating current:  
0.5 A/phase, 2-phase  
energization (full-step)  
 $J_L = [0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$  (5.14  
oz·in<sup>2</sup>) use the rubber  
coupling]  
fs: Maximum self-start  
frequency when not  
loaded

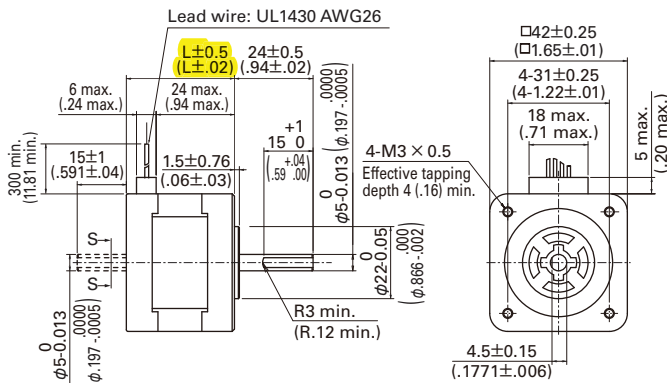


### 103H5210-5240 103H5210-5210

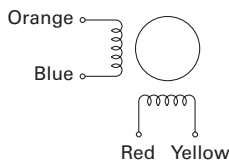
Constant current circuit  
Source voltage: 24 VDC  
Operating current:  
1 A/phase, 2-phase  
energization (full-step)  
 $J_L = [0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$  (5.14  
oz·in<sup>2</sup>) use the rubber  
coupling]  
fs: Maximum self-start  
frequency when not  
loaded



## Dimensions [Unit: mm (inch)]



## Internal wiring



## Compatible drivers

- For motor model number 103H52 □□ -50 □ 0 (0.25 A/phase), 103H52 □□ -51 □□ (0.5 A/phase)  
Driver is not included.

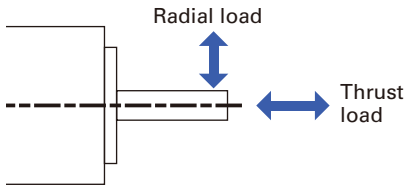
If you require assistance finding a driver, contact us for details.

- For model number 103H52 □□ -52 □□ (1 A/phase)  
Model number: BS1D200P10 (DC input)

Operating current select switch setting: A

The characteristics diagram shown above is from our experimental circuit.

# Allowable Radial/Thrust Load



| Flange size             | Model number | Distance from end of shaft : mm (in) |           |           |           | Thrust load N (lbs) |
|-------------------------|--------------|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
|                         |              | 0                                    | 5         | 10        | 15        |                     |
| Radial load : N (lbs)   |              |                                      |           |           |           |                     |
| 14 mm sq. (0.55 in sq.) | SH2141       | 10 (2.25)                            | 11 (2.47) | 13 (2.92) | -         | 0.7 (0.16)          |
| 28 mm sq. (1.10 in sq.) | SH228 □      | 42 (9)                               | 48 (10)   | 56 (12)   | 66 (14)   | 3 (0.67)            |
| 35 mm sq. (1.38 in sq.) | SH353 □      | 40 (8)                               | 50 (11)   | 67 (15)   | 98 (22)   | 10 (2.25)           |
| 42 mm sq. (1.65 in sq.) | 103H52 □□    | 22 (4)                               | 26 (5)    | 33 (7)    | 46 (10)   | 10 (2.25)           |
|                         | SH142 □      |                                      |           |           |           |                     |
| 50 mm sq. (1.97 in sq.) | 103H670 □    | 71 (15)                              | 87 (19)   | 115 (25)  | 167 (37)  | 15 (3.37)           |
| 56 mm sq. (2.20 in sq.) | 103H712 □    | 85 (19)                              | 105 (23)  | 138 (31)  | 200 (44)  | 15 (3.37)           |
|                         | 103H7128     |                                      |           |           |           |                     |
| 60 mm sq. (2.36 in sq.) | 103H782 □    | 70 (15)                              | 87 (19)   | 114 (25)  | 165 (37)  | 20 (4.50)           |
|                         | SH160 □      |                                      |           |           |           |                     |
| 86 mm sq. (3.39 in sq.) | SM286 □      | 167 (37)                             | 193 (43)  | 229 (51)  | 280 (62)  | 60 (13.488)         |
|                         | SH286 □      |                                      |           |           |           |                     |
| 86 mm sq. (3.39 in sq.) | 103H822 □    | 191 (43)                             | 234 (53)  | 301 (68)  | 421 (95)  | 60 (13.488)         |
| φ 106 mm (φ 4.17 in)    | 103H8922 □   | 321 (72)                             | 356 (79)  | 401 (90)  | 457 (101) | 100 (22.48)         |

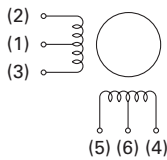
## Internal Wiring and Rotation Direction

### Unipolar winding

Connector type Model number: 103H52 □□

#### Internal wire connection

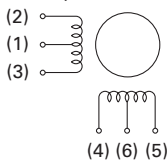
( ) connector pin number



Connector type Model number: 103H782 □□

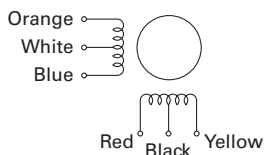
#### Internal wire connection

( ) connector pin number



Lead wire type

#### Internal wire connection



#### Direction of motor rotation

When excited by a direct current in the order shown below, the direction of rotation is clockwise as viewed from the output shaft side.

| Exciting order | Connector pin number |     |     |     |     |
|----------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|
|                | (1.6)                | (5) | (3) | (4) | (2) |
| 1              | +                    | -   | -   | -   | -   |
| 2              | +                    | -   | -   | -   | -   |
| 3              | +                    | -   | -   | -   | -   |
| 4              | +                    | -   | -   | -   | -   |

#### Direction of motor rotation

When excited by a direct current in the order shown below, the direction of rotation is clockwise as viewed from the output shaft side.

| Exciting order | Connector pin number |     |     |     |     |
|----------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|
|                | (1.6)                | (4) | (3) | (5) | (2) |
| 1              | +                    | -   | -   | -   | -   |
| 2              | +                    | -   | -   | -   | -   |
| 3              | +                    | -   | -   | -   | -   |
| 4              | +                    | -   | -   | -   | -   |

#### Direction of motor rotation

When excited by a direct current in the order shown below, the direction of rotation is clockwise as viewed from the output shaft side.

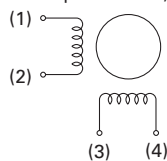
| Exciting order | Lead wire color |     |      |        |        |
|----------------|-----------------|-----|------|--------|--------|
|                | White & black   | Red | Blue | Yellow | Orange |
| 1              | +               | -   | -    | -      | -      |
| 2              | +               | -   | -    | -      | -      |
| 3              | +               | -   | -    | -      | -      |
| 4              | +               | -   | -    | -      | -      |

### Bipolar winding

Connector type

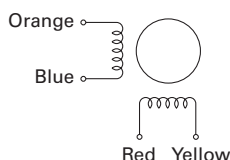
#### Internal wire connection

( ) connector pin number, terminal block number



Lead wire type

#### Internal wire connection



#### Direction of motor rotation

When excited by a direct current in the order shown below, the direction of rotation is clockwise as viewed from the output shaft side.

| Exciting order | Connector pin number, terminal block number |     |     |     |
|----------------|---|-----|-----|-----|
|                | (3)   | (2) | (4) | (1) |
| 1              | -   | -   | +   | +   |
| 2              | +   | -   | -   | +   |
| 3              | +   | +   | -   | -   |
| 4              | -   | +   | +   | -   |

#### Direction of motor rotation

When excited by a direct current in the order shown below, the direction of rotation is clockwise as viewed from the output shaft side.

| Exciting order | Lead wire color |      |        |        |
|----------------|-----------------|------|--------|--------|
|                | Red             | Blue | Yellow | Orange |
| 1              | -               | -    | +      | +      |
| 2              | +               | -    | -      | +      |
| 3              | +               | +    | -      | -      |
| 4              | -               | +    | +      | -      |

AC Input Set Models/  
Drivers

DC Input Set Models/  
Drivers

Stepping Motors

IP65 Splash and Dust  
Proof Stepping Motors

Stepping Motors for  
Vacuum Environments

Synchronous Motors

Stepping Motors with  
Integrated Drivers

# General Specifications

|   |   |   |   |  |   |   |  |  |  |
|---|---|---|---|--|---|---|--|--|--|
| Motor model number                                | SH2141  | SH228 <input type="checkbox"/>                    | SH353 <input type="checkbox"/>                  | SS242 <input type="checkbox"/>                 | SH142 <input type="checkbox"/>                  | 103H52 <input type="checkbox"/>                 | SS250 <input type="checkbox"/>   | 103H67 <input type="checkbox"/>                  | 103H712 <input type="checkbox"/>                 |
| Type  | -   |   |   |  |   |   |  |  |  |
| Operating ambient temperature                     | - 10°C to + 50°C  |   |   |  |   |   |  |  |  |
| Conversation temperature                          | - 20°C to + 65°C  |   |   |  |   |   |  |  |  |
| Operating ambient humidity                        | 20 to 90% RH (no condensation)  |   |   |  |   |   |  |  |  |
| Conversation humidity                             | 5 to 95% RH (no condensation)   |   |   |  |   |   |  |  |  |
| Operation altitude                                | 1000 m (3281 feet) max. above sea level   |   |   |  |   |   |  |  |  |
| Vibration resistance                              | Vibration frequency 10 to 500 Hz, total amplitude 1.52 mm (10 to 70 Hz), vibration acceleration 150 m/s <sup>2</sup> (70 to 500 Hz), sweep time 15 min/cycle, 12 sweeps in each X, Y and Z direction. |   |   |  |   |   |  |  |  |
| Impact resistance                                 | 500 m/s <sup>2</sup> of acceleration for 11 ms with half-sine wave applying three times for X, Y, and Z axes each, 18 times in total.   |   |   |  |   |   |  |  |  |
| Insulation class                                  | Class B (+130°C)  |   |   |  |   |   |  |  |  |
| Withstandable voltage                             | At normal temperature and humidity, no failure with 500 VAC @50/60 Hz applied for one minute between motor winding and frame.   |   |   |  |   |   | At normal temperature and humidity, no failure with 1000 VAC @50/60 Hz applied for one minute between motor winding and frame. |  |  |
| Insulation resistance                             | At normal temperature and humidity, not less than 100 MΩ between winding and frame by 500 VDC megger.   |   |   |  |   |   |  |  |  |
| Protection grade                                  | IP40  |   |   |  |   |   |  |  |  |
| Winding temperature rise                          | 80 K max. (Based on Sanyo Denki standard)   |   |   |  |   |   |  |  |  |
| Static angle error                                | ± 0.09°   |   |   |  | ± 0.054°  |   | ± 0.09°  |  |  |
| Thrust play *1                                    | 0.075 mm (0.003 in) max. (load: 0.35 N (0.08 lbs))  | 0.075 mm (0.003 in) max. (load: 1.5 N (0.34 lbs)) | 0.075 mm (0.003 in) max. (load: 5 N (1.12 lbs)) | 0.075 mm (0.003 in) max. (load: 4 N (0.9 lbs)) | 0.075 mm (0.003 in) max. (load: 5 N (1.12 lbs)) | 0.075 mm (0.003 in) max. (load: 5 N (1.12 lbs)) | 0.075 mm (0.003 in) max. (load: 4 N (0.9 lbs))   | 0.075 mm (0.003 in) max. (load: 10 N (2.25 lbs)) | 0.075 mm (0.003 in) max. (load: 10 N (2.25 lbs)) |
| Radial play *2                                    | 0.025 mm (0.001 in) max. (load: 5 N (1.12 lbs))   |   |   |  |   |   |  |  |  |
| Shaft runout                                      | 0.025 mm (0.001 in)   |   |   |  |   |   |  |  |  |
| Concentricity of mounting pilot relative to shaft | φ 0.05 mm (φ 0.002 in)  | φ 0.05 mm (φ 0.002 in)                            | φ 0.075 mm (φ 0.003 in)                         | φ 0.075 mm (φ 0.003 in)                        | φ 0.05 mm (φ 0.002 in)                          | φ 0.05 mm (φ 0.002 in)                          | φ 0.075 mm (φ 0.003 in)  | φ 0.075 mm (φ 0.003 in)                          | φ 0.075 mm (φ 0.003 in)                          |
| Squareness of mounting surface relative to shaft  | 0.1 mm (0.004 in)   | 0.1 mm (0.004 in)                                 | 0.1 mm (0.004 in)                               | 0.1 mm (0.004 in)                              | 0.1 mm (0.004 in)                               | 0.1 mm (0.004 in)                               | 0.1 mm (0.004 in)  | 0.075 mm (0.003 in)                              | 0.075 mm (0.003 in)                              |
| Direction of motor mounting                       | Can be freely mounted vertically or horizontally  |   |   |  |   |   |  |  |  |

|   |   |  |  |   |  |  |  |  |  |
|---|---|--|--|---|--|--|--|--|--|
| Motor model number                                | SH160 <input type="checkbox"/>  | 103H78 <input type="checkbox"/>            | SH286 <input type="checkbox"/>             | 103H8922 <input type="checkbox"/>           | SM286 <input type="checkbox"/>   | 103H712 <input type="checkbox"/> -6 <input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> CE Model | 103H822 <input type="checkbox"/> -6 <input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> CE Model | 103H8922 <input type="checkbox"/> -63 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> CE Model |  |
| Type  | -   |  |  |   | S1 (continuous operation)  |  |  |  |  |
| Operating ambient temperature                     | - 10°C to + 50°C  |  |  |   | - 10°C to + 40°C   |  |  |  |  |
| Conversation temperature                          | - 20°C to + 65°C  |  |  |   | - 20°C to + 60°C   |  |  |  |  |
| Operating ambient humidity                        | 20 to 90% RH (no condensation)  |  |  |   | 95% max.: 40°C max., 57% max.: 50°C max., 35% max.: 60°C max. (no condensation)  |  |  |  |  |
| Conversation humidity                             | 5 to 95% RH (no condensation)   |  |  |   |  |  |  |  |  |
| Operation altitude                                | 1000 m (3280 feet) max. above sea level   |  |  |   |  |  |  |  |  |
| Vibration resistance                              | Vibration frequency 10 to 500 Hz, total amplitude 1.52 mm (10 to 70 Hz), vibration acceleration 150 m/s <sup>2</sup> (70 to 500 Hz), sweep time 15 min/cycle, 12 sweeps in each X, Y and Z direction. |  |  |   |  |  |  |  |  |
| Impact resistance                                 | 500 m/s <sup>2</sup> of acceleration for 11 ms with half-sine wave applying three times for X, Y and Z axes each, 18 times in total.  |  |  |   |  |  |  |  |  |
| Insulation class                                  | Class B (+130°C)  |  |  |   | Class F (+155°C)   |  | Class B (+130°C)   |  |  |
| Withstandable voltage                             | At normal temperature and humidity, no failure with 1000 VAC @50/60 Hz applied for one minute between motor winding and frame.  |  |  |   | At normal temperature and humidity, no failure with 1500 VAC @50/60 Hz applied for one minute between motor winding and frame. |  |  |  |  |
| Insulation resistance                             | At normal temperature and humidity, not less than 100 MΩ between winding and frame by 500 VDC megger.   |  |  |   |  |  |  |  |  |
| Protection grade                                  | IP40  |  |  |   | IP43   |  |  |  |  |
| Winding temperature rise                          | 80 K max. (Based on Sanyo Denki standard)   |  |  |   |  |  |  |  |  |
| Static angle error                                | ± 0.054°  |  | ± 0.09°                                    |   |  |  |  |  |  |
| Thrust play *1                                    | 0.075 mm (0.003 in) max. (load: 10 N (2.25 lbs))  |  |  |   |  |  |  |  |  |
| Radial play *2                                    | 0.025 mm (0.001 in) (load: 5 N (1.12 lbs))  | 0.025 mm (0.001 in) (load: 5 N (1.12 lbs)) | 0.025 mm (0.001 in) (load: 5 N (1.12 lbs)) | 0.025 mm (0.001 in) (load: 10 N (2.25 lbs)) | 0.025 mm (0.001 in) (load: 5 N (1.12 lbs))   | 0.025 mm (0.001 in) (load: 5 N (1.12 lbs))   | 0.025 mm (0.001 in) (load: 5 N (1.12 lbs))   | 0.025 mm (0.001 in) (load: 10 N (2.25 lbs))  |  |
| Shaft runout                                      | 0.025 mm (0.001 in)   |  |  |   |  |  |  |  |  |
| Concentricity of mounting pilot relative to shaft | φ 0.075 mm (φ 0.003 in)   |  |  |   |  |  |  |  |  |
| Squareness of mounting surface relative to shaft  | 0.1 mm (0.004 in)   | 0.075 mm (0.003 in)                        | 0.15 mm (0.006 in)                         | 0.1 mm (0.004 in)                           | 0.15 mm (0.006 in)   | 0.075 mm (0.003 in)  | 0.1 mm (0.004 in)  | 0.1 mm (0.004 in)  |  |
| Direction of motor mounting                       | Can be freely mounted vertically or horizontally  |  |  |   |  |  |  |  |  |

\*1 Thrust play: Shaft displacement under axial load.

\*2 Radial play: Shaft displacement under radial load applied 1/3rd of the length from the end of the shaft.

## Safety standards

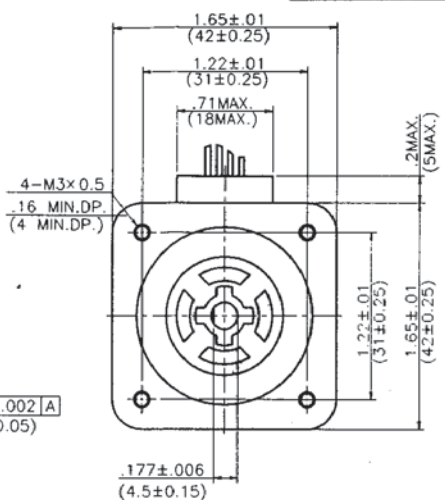
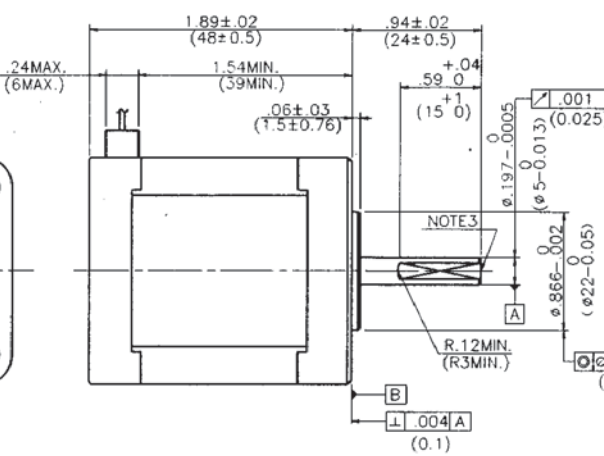
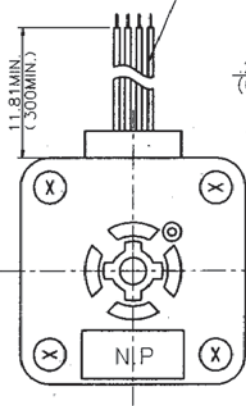
### Model Number: SM286 CE/UL marked models

|          |                        |                     |                      |
|----------|------------------------|---------------------|----------------------|
| CE (TÜV) | Standard category      |                     | Applicable standard  |
|          | Low-voltage directives |                     | EN60034-1, EN60034-5 |
| UL       | Acquired standards     | Applicable standard | File No.             |
|          | UL                     | UL1004-1, UL1004-6  | E179832              |
|          | UL for Canada          | CSA C22.2 No.100    |                      |

### Model Number: 103H712 -6 0 103H822 -6 0 103H8922 -63 1 CE marked model

|          |                        |  |                      |
|----------|------------------------|--|----------------------|
| CE (TÜV) | Standard category      |  | Applicable standard  |
|          | Low-voltage directives |  | EN60034-1, EN60034-5 |

LEAD WIRE: UL1430 CSA.AWG26(7/0.16)

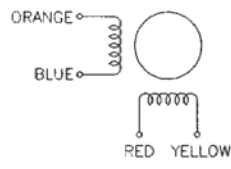


**RATED CHARACTERISTICS**

|                            |   |
|----------------------------|---|
| PHASES                     | 2   |
| STEP ANGLE                 | 1.8 °   |
| VOLTS                      | 4.8 V(DC)   |
| AMPS                       | 1 A/PHASE   |
| D.C RESISTANCE             | 4.8 Ω±10% at 25 °C  |
| COIL INDUCTANCE            | 9.5 mH±20% at 1 kHz, 1 V(rms)   |
| HOLDING TORQUE             | 72.21 oz·in (0.51 N·m) MIN. at I=1 A/PHASE 2Ex.   |
| NOTE1. PULL OUT TORQUE     | 55.2 oz·in (0.39 N·m) MIN. at 200 pulse/s INERTIAL LOAD 5.14 oz·in <sup>2</sup> (0.94×10 <sup>-4</sup> kg·m <sup>2</sup> ) (INCLUDE COUPLING INERTIA) |
| NOTE1. MAX. STARTING RATE  | 1200 pulse/s MIN. at NO LOAD  |
| NOTE1. MAX. SLEWING RATE   | 1200 pulse/s MIN. at NO LOAD  |
| NOTE2. POSITIONAL ACCURACY | ±0.09 ° (0.18° SPREAD MAX.) 2Ex.  |
| COIL TEMPERATURE RISE      | 80 K MAX.   |
| ROTOR INERTIA              | .4 oz·in <sup>2</sup> (0.074×10 <sup>-4</sup> kg·m <sup>2</sup> ) NOMINAL   |
| INSULATION CLASS           | B   |

NOTE1. SANYO PMM-BD-4502 DRIVE CIRCUIT. (2 PHASE EXCITATION) E=24 V(DC), I=1 A/PHASE. (AVERAGE VALUE)  
 NOTE2. MOUNT A MOTOR ON 4.00×4.00×.081 (100×100×2t) SPCC HEAT SINK AND ENERGIZE A COIL AT 2 PHASE EXCITATION, I=1 A/PHASE CONSTANTLY. MEASURED BY THE CHANGE OF RESISTANCE METHOD.  
 NOTE3. CENTER HOLE ON THE SHAFT END IS NOT ALWAYS MADE.

**CONNECTION**



**DIRECTION OF ROTATION**

WHEN A MOTOR IS SEQUENCED AS SHOWN IN BELOW TABLE, THE SHAFT ROTATION MUST BE CLOCKWISE WHEN VIEWED FROM SURFACE [B] SIDE.

|        | RED | BLUE | YELLOW | ORANGE |
|--------|-----|------|--------|--------|
| STEP 1 | ⊕   | ⊖    | ⊕      | ⊕      |
| STEP 2 | ⊖   | ⊕    | ⊖      | ⊖      |
| STEP 3 | ⊕   | ⊖    | ⊕      | ⊖      |
| STEP 4 | ⊖   | ⊕    | ⊖      | ⊕      |

|                       |  |          |           |                |          |
|-----------------------|--|----------|-----------|----------------|----------|
| E0055049              |  | 03-05-27 | 1/8" UNF  | APPROVED BY    | DATE     |
| NEW DESIGN            |  | 02-12-25 | 1/16" UNF | 03-06-02       | 03-06-02 |
| SANYO DENKI CO., LTD. |  |          |           | STEPPING MOTOR |          |
| 山洋電機株式会社              |  |          |           | 103H5210-5240  |          |

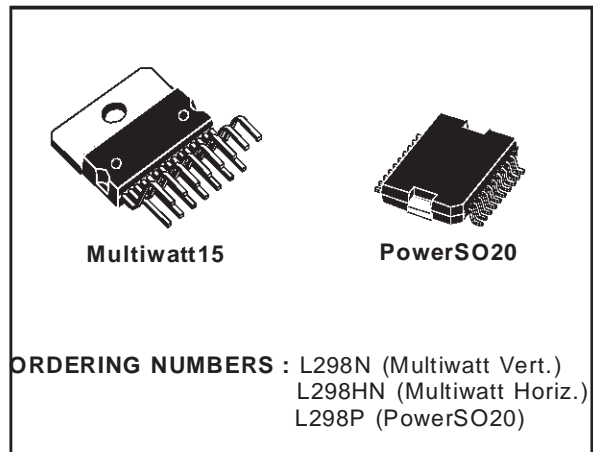


## DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

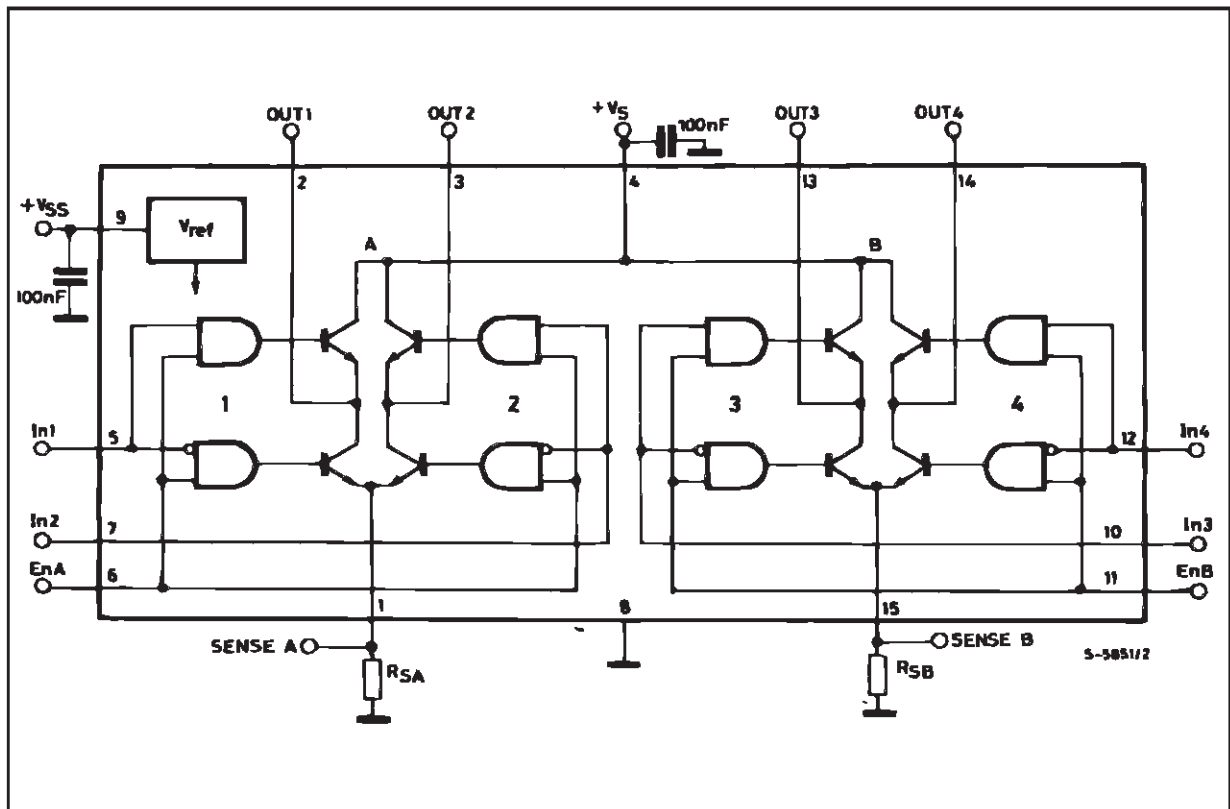
### DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

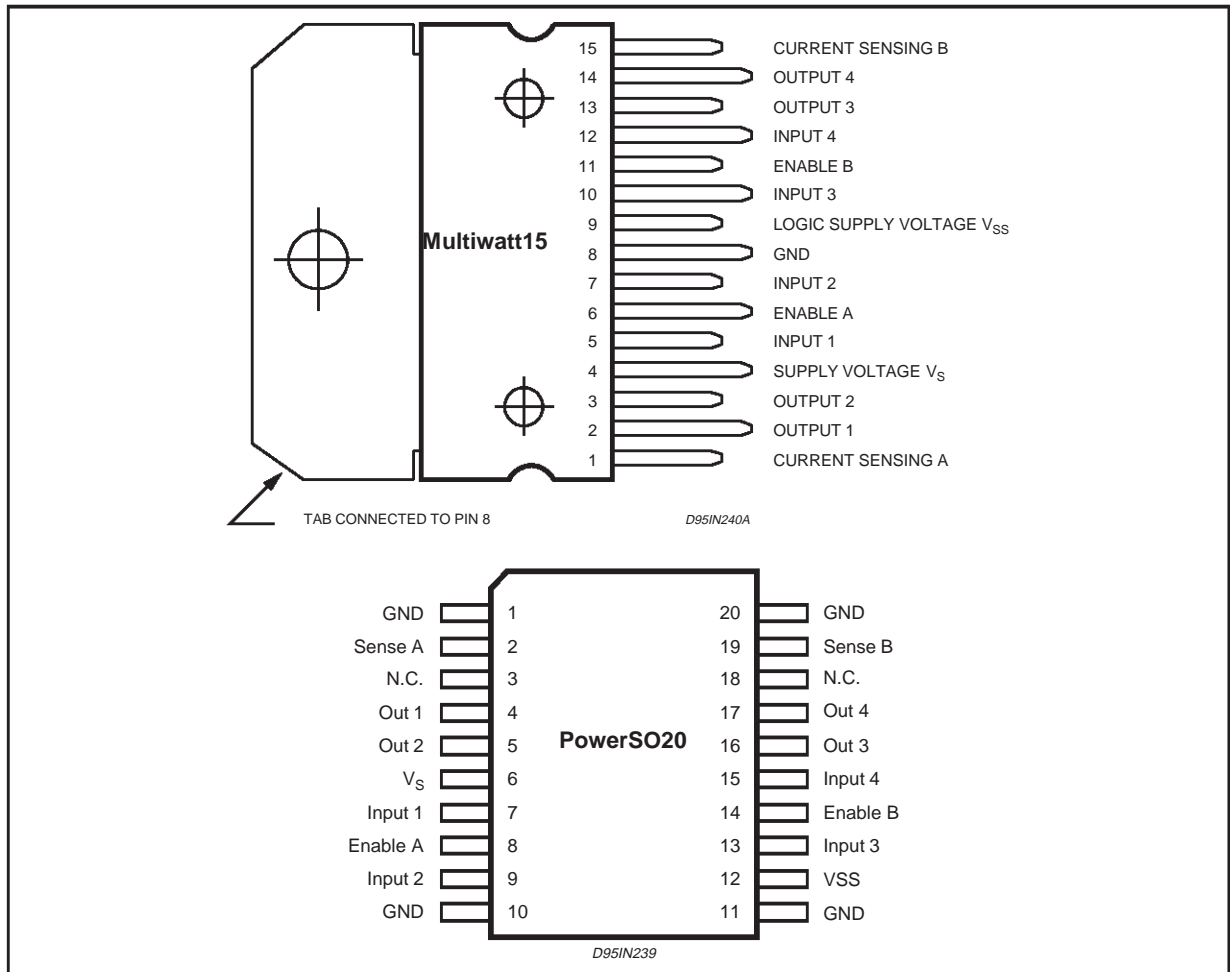
### BLOCK DIAGRAM



**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

| Symbol         | Parameter   | Value      | Unit       |
|----------------|---|------------|------------|
| $V_S$          | Power Supply  | 50         | V          |
| $V_{SS}$       | Logic Supply Voltage                                | 7          | V          |
| $V_I, V_{en}$  | Input and Enable Voltage                            | -0.3 to 7  | V          |
| $I_O$          | Peak Output Current (each Channel)                  |            |            |
|                | - Non Repetitive ( $t = 100\mu s$ )                 | 3          | A          |
|                | - Repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10ms$ )    | 2.5        | A          |
|                | -DC Operation                                       | 2          | A          |
| $V_{sens}$     | Sensing Voltage                                     | -1 to 2.3  | V          |
| $P_{tot}$      | Total Power Dissipation ( $T_{case} = 75^\circ C$ ) | 25         | W          |
| $T_{op}$       | Junction Operating Temperature                      | -25 to 130 | $^\circ C$ |
| $T_{stg}, T_j$ | Storage and Junction Temperature                    | -40 to 150 | $^\circ C$ |

**PIN CONNECTIONS (top view)**



**THERMAL DATA**

| Symbol           | Parameter                           |      | PowerSO20 | Multiwatt15 | Unit         |
|------------------|-------------------------------------|------|-----------|-------------|--------------|
| $R_{th\ j-case}$ | Thermal Resistance Junction-case    | Max. | -         | 3           | $^\circ C/W$ |
| $R_{th\ j-amb}$  | Thermal Resistance Junction-ambient | Max. | 13 (*)    | 35          | $^\circ C/W$ |

(\*) Mounted on aluminum substrate

## PIN FUNCTIONS (refer to the block diagram)

| MW.15  | PowerSO    | Name               | Function  |
|--------|------------|--------------------|---|
| 1;15   | 2;19       | Sense A; Sense B   | Between this pin and ground is connected the sense resistor to control the current of the load.                               |
| 2;3    | 4;5        | Out 1; Out 2       | Outputs of the Bridge A; the current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 1.      |
| 4      | 6          | V <sub>S</sub>     | Supply Voltage for the Power Output Stages.<br>A non-inductive 100nF capacitor must be connected between this pin and ground. |
| 5;7    | 7;9        | Input 1; Input 2   | TTL Compatible Inputs of the Bridge A.  |
| 6;11   | 8;14       | Enable A; Enable B | TTL Compatible Enable Input: the L state disables the bridge A (enable A) and/or the bridge B (enable B).                     |
| 8      | 1,10,11,20 | GND                | Ground.   |
| 9      | 12         | V <sub>SS</sub>    | Supply Voltage for the Logic Blocks. A100nF capacitor must be connected between this pin and ground.                          |
| 10; 12 | 13;15      | Input 3; Input 4   | TTL Compatible Inputs of the Bridge B.  |
| 13; 14 | 16;17      | Out 3; Out 4       | Outputs of the Bridge B. The current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 15.     |
| –      | 3;18       | N.C.               | Not Connected   |

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V<sub>S</sub> = 42V; V<sub>SS</sub> = 5V, T<sub>j</sub> = 25°C; unless otherwise specified)

| Symbol                | Parameter                                      | Test Conditions   | Min.                 | Typ.       | Max.            | Unit     |
|-----------------------|--|---|----------------------|------------|-----------------|----------|
| V <sub>S</sub>        | Supply Voltage (pin 4)                         | Operative Condition   | V <sub>IH</sub> +2.5 |            | 46              | V        |
| V <sub>SS</sub>       | Logic Supply Voltage (pin 9)                   |   | 4.5                  | 5          | 7               | V        |
| I <sub>S</sub>        | Quiescent Supply Current (pin 4)               | V <sub>en</sub> = H; I <sub>L</sub> = 0<br>V <sub>i</sub> = L<br>V <sub>i</sub> = H |                      | 13<br>50   | 22<br>70        | mA<br>mA |
|                       |  | V <sub>en</sub> = L<br>V <sub>i</sub> = X   |                      |            | 4               | mA       |
| I <sub>SS</sub>       | Quiescent Current from V <sub>SS</sub> (pin 9) | V <sub>en</sub> = H; I <sub>L</sub> = 0<br>V <sub>i</sub> = L<br>V <sub>i</sub> = H |                      | 24<br>7    | 36<br>12        | mA<br>mA |
|                       |  | V <sub>en</sub> = L<br>V <sub>i</sub> = X   |                      |            | 6               | mA       |
| V <sub>iL</sub>       | Input Low Voltage (pins 5, 7, 10, 12)          |   | –0.3                 |            | 1.5             | V        |
| V <sub>iH</sub>       | Input High Voltage (pins 5, 7, 10, 12)         |   | 2.3                  |            | V <sub>SS</sub> | V        |
| I <sub>iL</sub>       | Low Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)  | V <sub>i</sub> = L  |                      |            | –10             | μA       |
| I <sub>iH</sub>       | High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12) | V <sub>i</sub> = H ≤ V <sub>SS</sub> –0.6V  |                      | 30         | 100             | μA       |
| V <sub>en</sub> = L   | Enable Low Voltage (pins 6, 11)                |   | –0.3                 |            | 1.5             | V        |
| V <sub>en</sub> = H   | Enable High Voltage (pins 6, 11)               |   | 2.3                  |            | V <sub>SS</sub> | V        |
| I <sub>en</sub> = L   | Low Voltage Enable Current (pins 6, 11)        | V <sub>en</sub> = L   |                      |            | –10             | μA       |
| I <sub>en</sub> = H   | High Voltage Enable Current (pins 6, 11)       | V <sub>en</sub> = H ≤ V <sub>SS</sub> –0.6V   |                      | 30         | 100             | μA       |
| V <sub>CEsat(H)</sub> | Source Saturation Voltage                      | I <sub>L</sub> = 1A<br>I <sub>L</sub> = 2A  | 0.95                 | 1.35<br>2  | 1.7<br>2.7      | V<br>V   |
| V <sub>CEsat(L)</sub> | Sink Saturation Voltage                        | I <sub>L</sub> = 1A (5)<br>I <sub>L</sub> = 2A (5)                                  | 0.85                 | 1.2<br>1.7 | 1.6<br>2.3      | V<br>V   |
| V <sub>CEsat</sub>    | Total Drop                                     | I <sub>L</sub> = 1A (5)<br>I <sub>L</sub> = 2A (5)                                  | 1.80                 |            | 3.2<br>4.9      | V<br>V   |
| V <sub>sens</sub>     | Sensing Voltage (pins 1, 15)                   |   | –1 (1)               |            | 2               | V        |

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

| Symbol                            | Parameter                     | Test Conditions                                    | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|-----------------------------------|-------------------------------|--|------|------|------|------|
| T <sub>1</sub> (V <sub>i</sub> )  | Source Current Turn-off Delay | 0.5 V <sub>i</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (2); (4)  |      | 1.5  |      | μs   |
| T <sub>2</sub> (V <sub>i</sub> )  | Source Current Fall Time      | 0.9 I <sub>L</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (2); (4)  |      | 0.2  |      | μs   |
| T <sub>3</sub> (V <sub>i</sub> )  | Source Current Turn-on Delay  | 0.5 V <sub>i</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (2); (4)  |      | 2    |      | μs   |
| T <sub>4</sub> (V <sub>i</sub> )  | Source Current Rise Time      | 0.1 I <sub>L</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (2); (4)  |      | 0.7  |      | μs   |
| T <sub>5</sub> (V <sub>i</sub> )  | Sink Current Turn-off Delay   | 0.5 V <sub>i</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4)  |      | 0.7  |      | μs   |
| T <sub>6</sub> (V <sub>i</sub> )  | Sink Current Fall Time        | 0.9 I <sub>L</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (3); (4)  |      | 0.25 |      | μs   |
| T <sub>7</sub> (V <sub>i</sub> )  | Sink Current Turn-on Delay    | 0.5 V <sub>i</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4)  |      | 1.6  |      | μs   |
| T <sub>8</sub> (V <sub>i</sub> )  | Sink Current Rise Time        | 0.1 I <sub>L</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4)  |      | 0.2  |      | μs   |
| f <sub>c</sub> (V <sub>i</sub> )  | Commutation Frequency         | I <sub>L</sub> = 2A                                |      | 25   | 40   | KHz  |
| T <sub>1</sub> (V <sub>en</sub> ) | Source Current Turn-off Delay | 0.5 V <sub>en</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (2); (4) |      | 3    |      | μs   |
| T <sub>2</sub> (V <sub>en</sub> ) | Source Current Fall Time      | 0.9 I <sub>L</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (2); (4)  |      | 1    |      | μs   |
| T <sub>3</sub> (V <sub>en</sub> ) | Source Current Turn-on Delay  | 0.5 V <sub>en</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (2); (4) |      | 0.3  |      | μs   |
| T <sub>4</sub> (V <sub>en</sub> ) | Source Current Rise Time      | 0.1 I <sub>L</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (2); (4)  |      | 0.4  |      | μs   |
| T <sub>5</sub> (V <sub>en</sub> ) | Sink Current Turn-off Delay   | 0.5 V <sub>en</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4) |      | 2.2  |      | μs   |
| T <sub>6</sub> (V <sub>en</sub> ) | Sink Current Fall Time        | 0.9 I <sub>L</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (3); (4)  |      | 0.35 |      | μs   |
| T <sub>7</sub> (V <sub>en</sub> ) | Sink Current Turn-on Delay    | 0.5 V <sub>en</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4) |      | 0.25 |      | μs   |
| T <sub>8</sub> (V <sub>en</sub> ) | Sink Current Rise Time        | 0.1 I <sub>L</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4)  |      | 0.1  |      | μs   |

- 1) Sensing voltage can be -1 V for t ≤ 50 μsec; in steady state V<sub>sens</sub> min ≥ -0.5 V.
- 2) See fig. 2.
- 3) See fig. 4.
- 4) The load must be a pure resistor.

Figure 1 : Typical Saturation Voltage vs. Output Current.

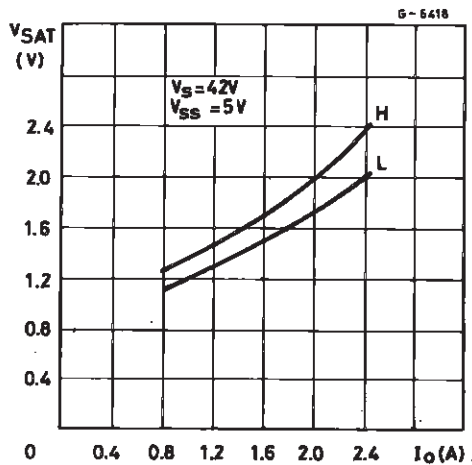
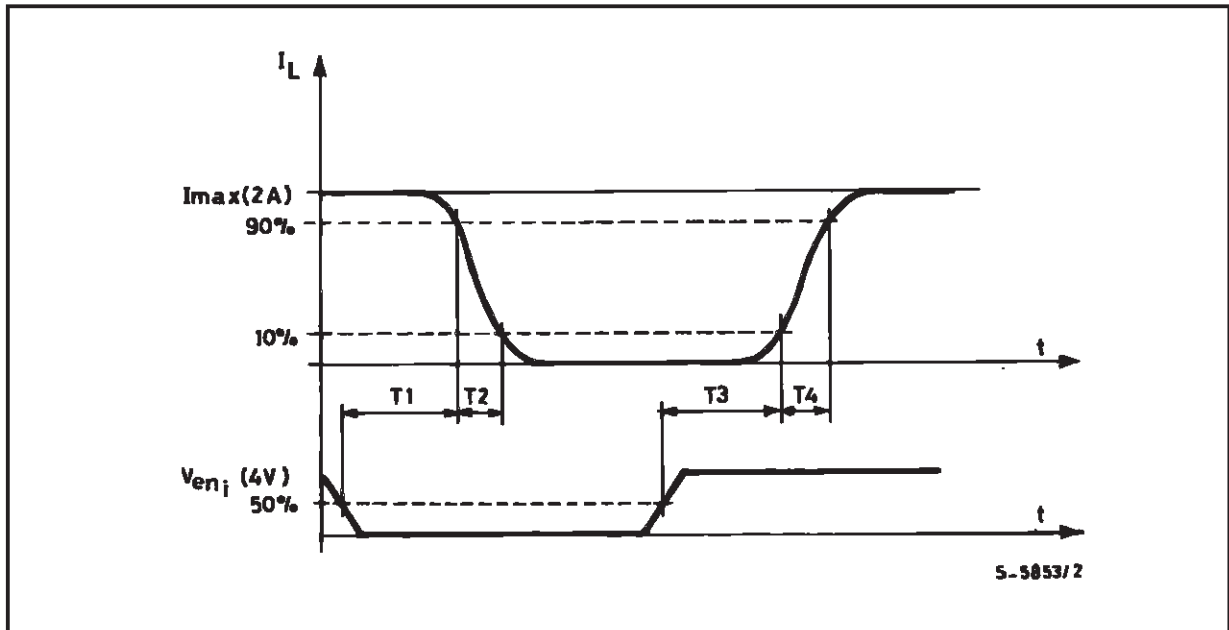


Figure 2 : Switching Times Test Circuits.

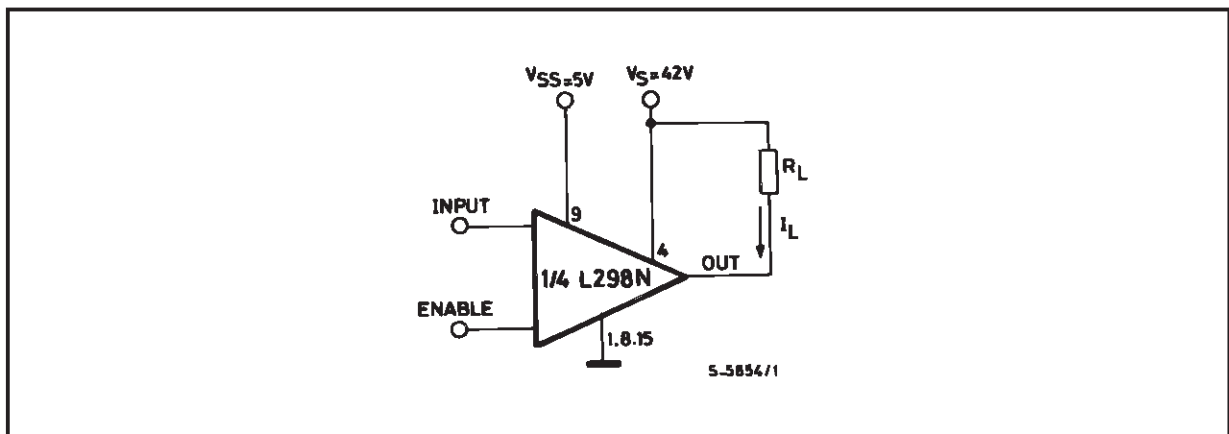


Note: For INPUT Switching, set EN = H  
 For ENABLE Switching, set IN = H

**Figure 3 :** Source Current Delay Times vs. Input or Enable Switching.



**Figure 4 :** Switching Times Test Circuits.



**Note :** For INPUT Switching, set EN = H  
 For ENABLE Switching, set IN = L

Figure 5 : Sink Current Delay Times vs. Input 0 V Enable Switching.

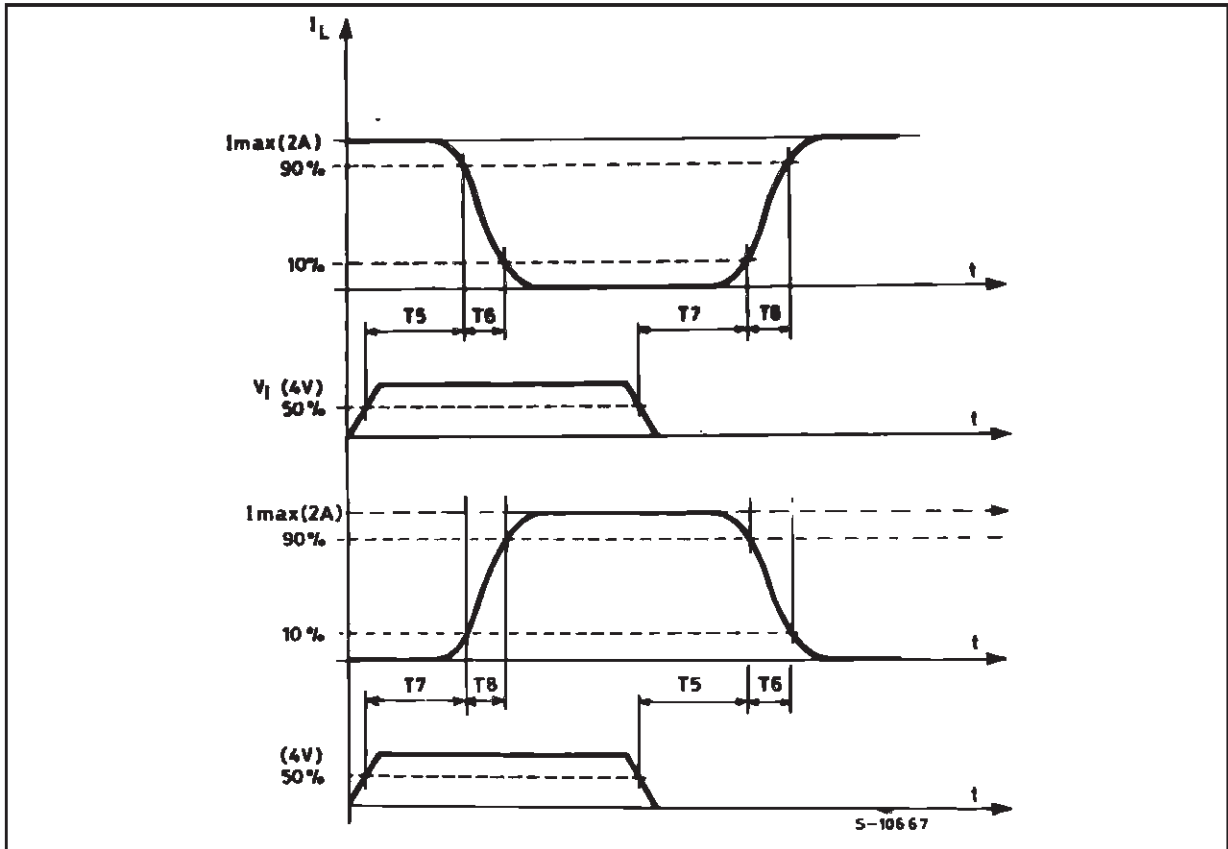
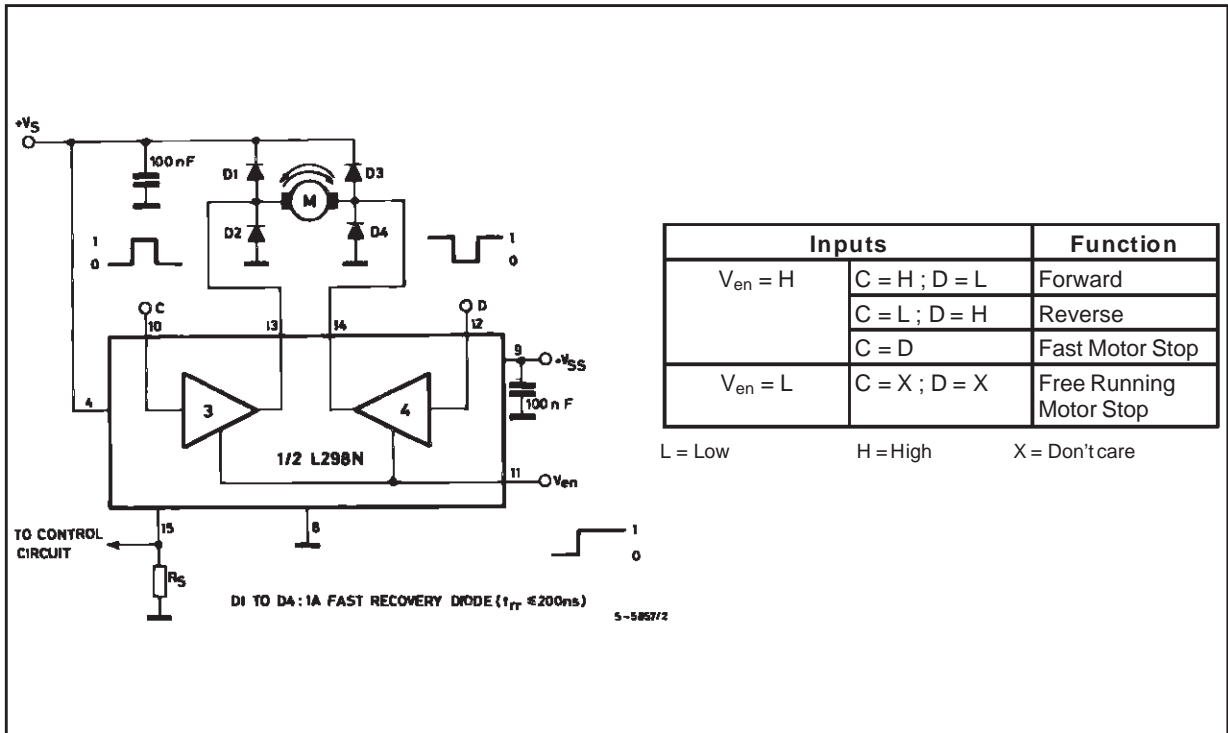
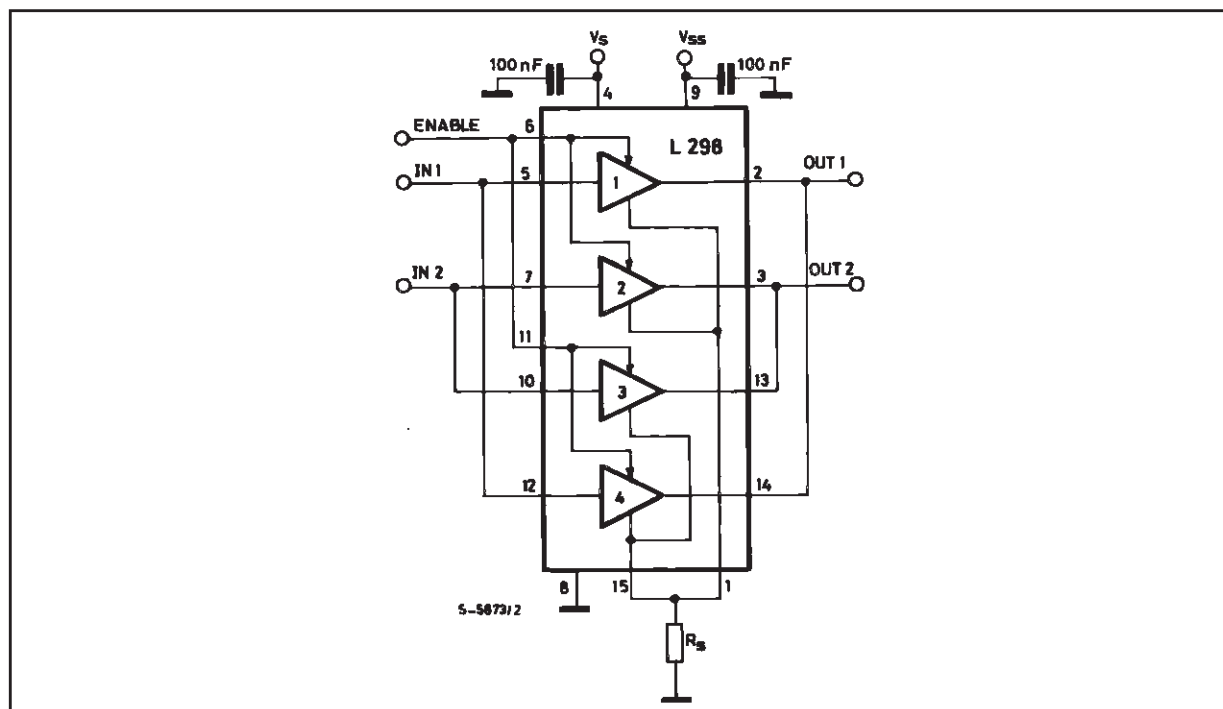


Figure 6 : Bidirectional DC Motor Control.



**Figure 7** : For higher currents, outputs can be paralleled. Take care to parallel channel 1 with channel 4 and channel 2 with channel 3.



## APPLICATION INFORMATION (Refer to the block diagram)

### 1.1. POWER OUTPUT STAGE

The L298 integrates two power output stages (A; B). The power output stage is a bridge configuration and its outputs can drive an inductive load in common or differential mode, depending on the state of the inputs. The current that flows through the load comes out from the bridge at the sense output: an external resistor ( $R_{SA}$ ;  $R_{SB}$ ) allows to detect the intensity of this current.

### 1.2. INPUT STAGE

Each bridge is driven by means of four gates the input of which are  $In1$ ;  $In2$ ;  $EnA$  and  $In3$ ;  $In4$ ;  $EnB$ . The  $In$  inputs set the bridge state when The  $En$  input is high; a low state of the  $En$  input inhibits the bridge. All the inputs are TTL compatible.

### 2. SUGGESTIONS

A non inductive capacitor, usually of 100 nF, must be foreseen between both  $V_s$  and  $V_{ss}$ , to ground, as near as possible to GND pin. When the large capacitor of the power supply is too far from the IC, a second smaller one must be foreseen near the L298.

The sense resistor, not of a wire wound type, must be grounded near the negative pole of  $V_s$  that must be near the GND pin of the I.C.

Each input must be connected to the source of the driving signals by means of a very short path.

Turn-On and Turn-Off : Before to Turn-ON the Supply Voltage and before to Turn it OFF, the Enable input must be driven to the Low state.

### 3. APPLICATIONS

Fig 6 shows a bidirectional DC motor control Schematic Diagram for which only one bridge is needed. The external bridge of diodes  $D1$  to  $D4$  is made by four fast recovery elements ( $trr \leq 200$  nsec) that must be chosen of a  $V_F$  as low as possible at the worst case of the load current.

The sense output voltage can be used to control the current amplitude by chopping the inputs, or to provide overcurrent protection by switching low the enable input.

The brake function (Fast motor stop) requires that the Absolute Maximum Rating of 2 Amps must never be overcome.

When the repetitive peak current needed from the load is higher than 2 Amps, a paralleled configuration can be chosen (See Fig.7).

An external bridge of diodes are required when inductive loads are driven and when the inputs of the IC are chopped; Schottky diodes would be preferred.

This solution can drive until 3 Amps In DC operation and until 3.5 Amps of a repetitive peak current.

On Fig 8 it is shown the driving of a two phase bipolar stepper motor ; the needed signals to drive the inputs of the L298 are generated, in this example, from the IC L297.

Fig 9 shows an example of P.C.B. designed for the application of Fig 8.

**Figure 8** : Two Phase Bipolar Stepper Motor Circuit.

This circuit drives bipolar stepper motors with winding currents up to 2 A. The diodes are fast 2 A types.

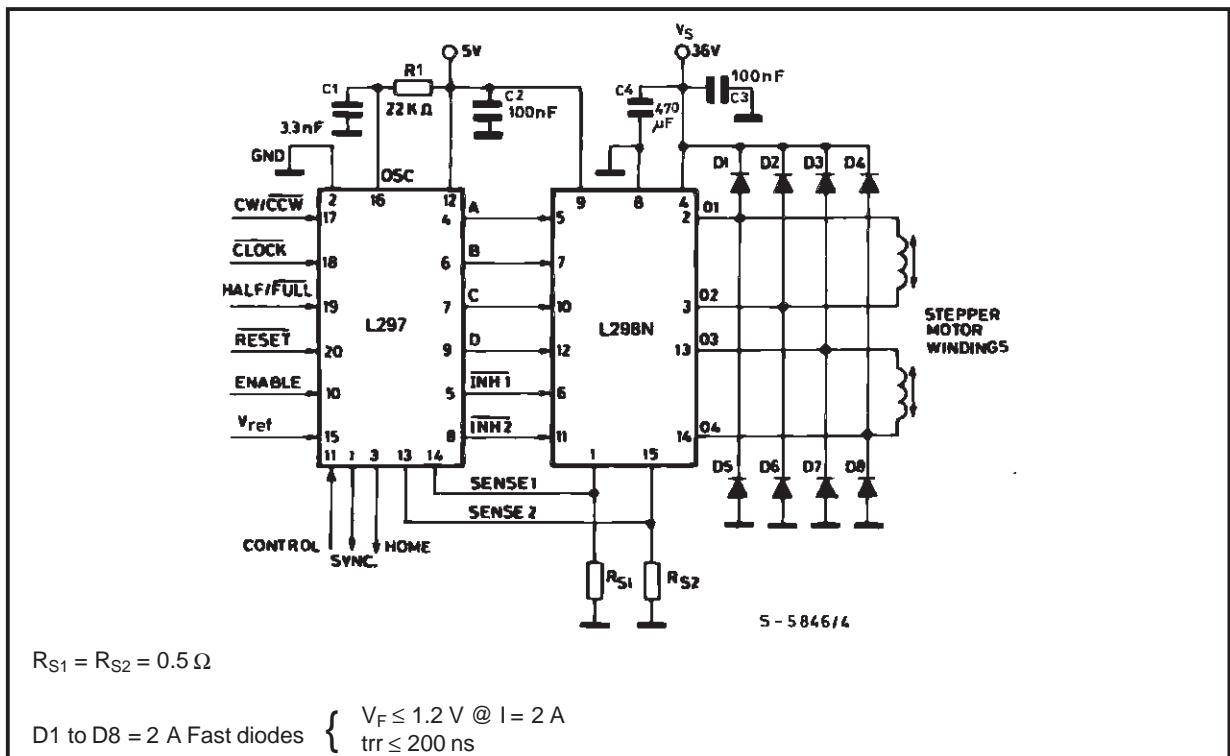


Fig 10 shows a second two phase bipolar stepper motor control circuit where the current is controlled by the I.C. L6506.



Figure 9 : Suggested Printed Circuit Board Layout for the Circuit of fig. 8 (1:1 scale).

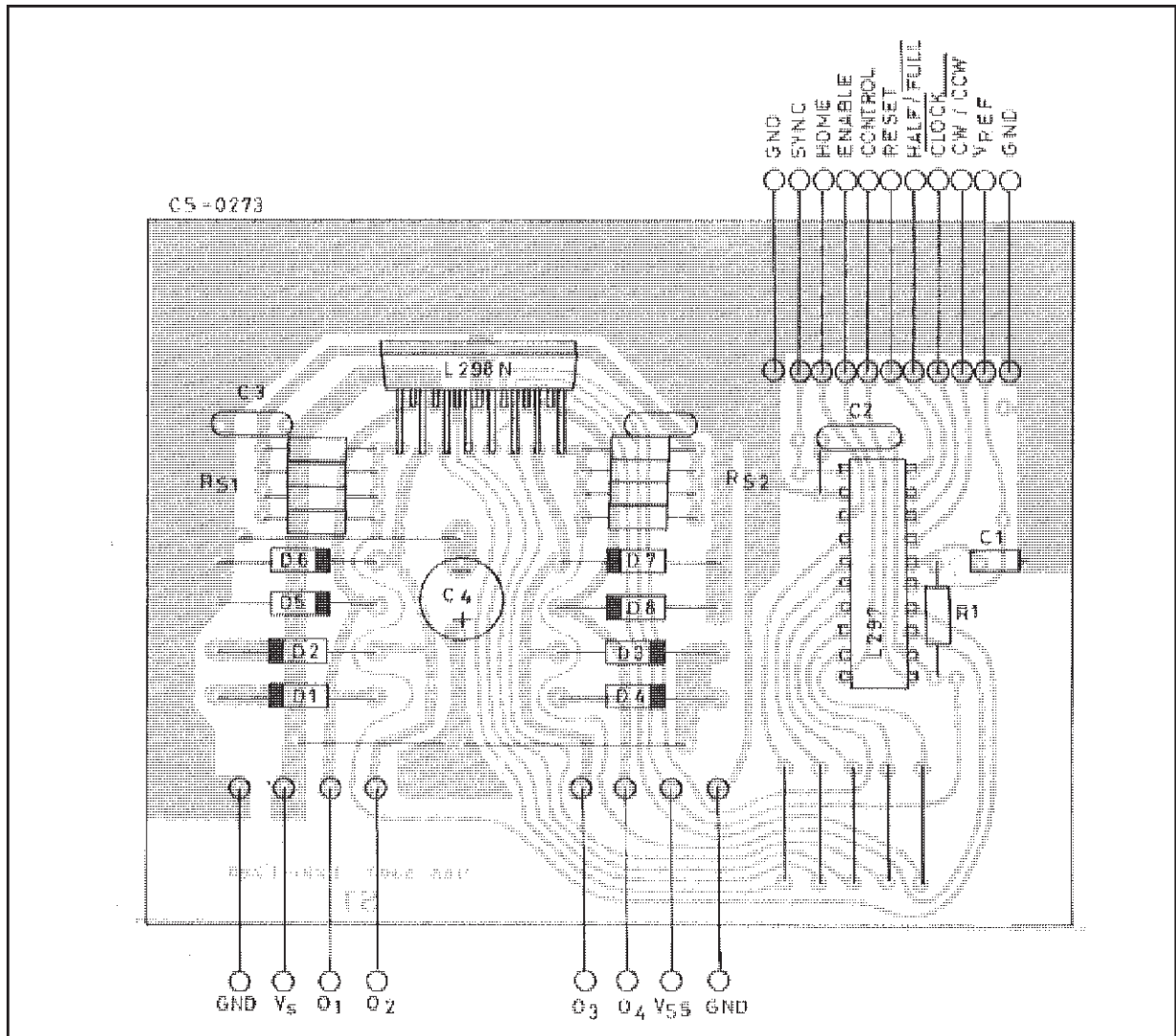
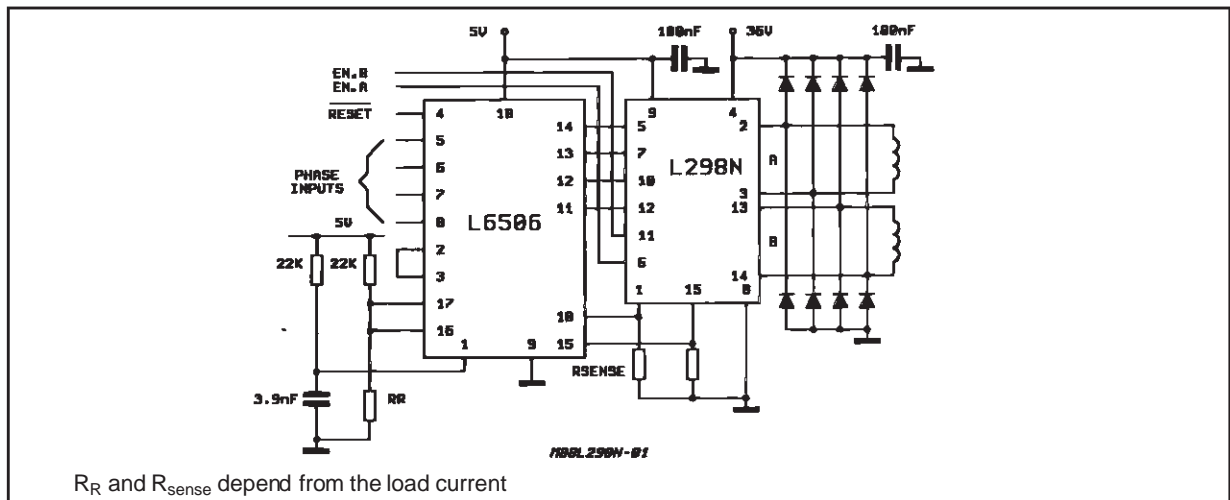
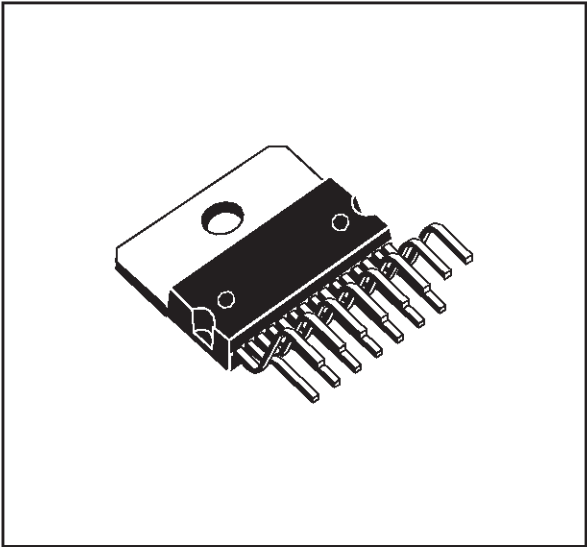


Figure 10 : Two Phase Bipolar Stepper Motor Control Circuit by Using the Current Controller L6506.

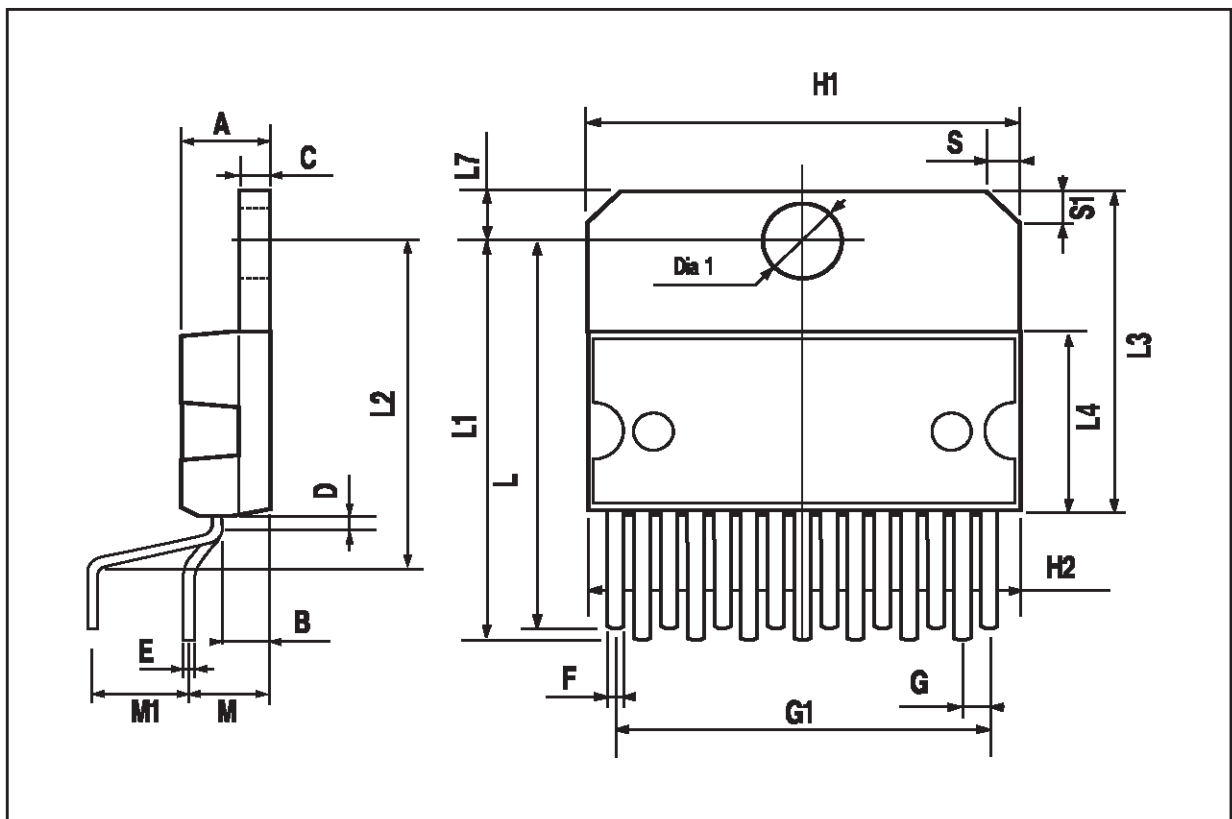


| DIM. | mm    |       |       | inch  |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | MIN.  | TYP.  | MAX.  | MIN.  | TYP.  | MAX.  |
| A    |       |       | 5     |       |       | 0.197 |
| B    |       |       | 2.65  |       |       | 0.104 |
| C    |       |       | 1.6   |       |       | 0.063 |
| D    |       | 1     |       |       | 0.039 |       |
| E    | 0.49  |       | 0.55  | 0.019 |       | 0.022 |
| F    | 0.66  |       | 0.75  | 0.026 |       | 0.030 |
| G    | 1.02  | 1.27  | 1.52  | 0.040 | 0.050 | 0.060 |
| G1   | 17.53 | 17.78 | 18.03 | 0.690 | 0.700 | 0.710 |
| H1   | 19.6  |       |       | 0.772 |       |       |
| H2   |       |       | 20.2  |       |       | 0.795 |
| L    | 21.9  | 22.2  | 22.5  | 0.862 | 0.874 | 0.886 |
| L1   | 21.7  | 22.1  | 22.5  | 0.854 | 0.870 | 0.886 |
| L2   | 17.65 |       | 18.1  | 0.695 |       | 0.713 |
| L3   | 17.25 | 17.5  | 17.75 | 0.679 | 0.689 | 0.699 |
| L4   | 10.3  | 10.7  | 10.9  | 0.406 | 0.421 | 0.429 |
| L7   | 2.65  |       | 2.9   | 0.104 |       | 0.114 |
| M    | 4.25  | 4.55  | 4.85  | 0.167 | 0.179 | 0.191 |
| M1   | 4.63  | 5.08  | 5.53  | 0.182 | 0.200 | 0.218 |
| S    | 1.9   |       | 2.6   | 0.075 |       | 0.102 |
| S1   | 1.9   |       | 2.6   | 0.075 |       | 0.102 |
| Dia1 | 3.65  |       | 3.85  | 0.144 |       | 0.152 |

**OUTLINE AND MECHANICAL DATA**

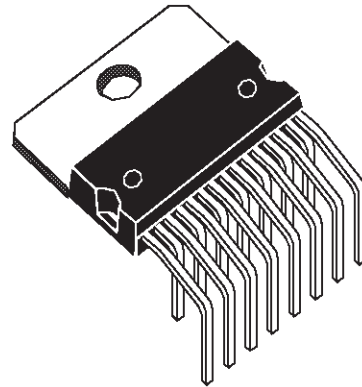


**Multiwatt15 V**

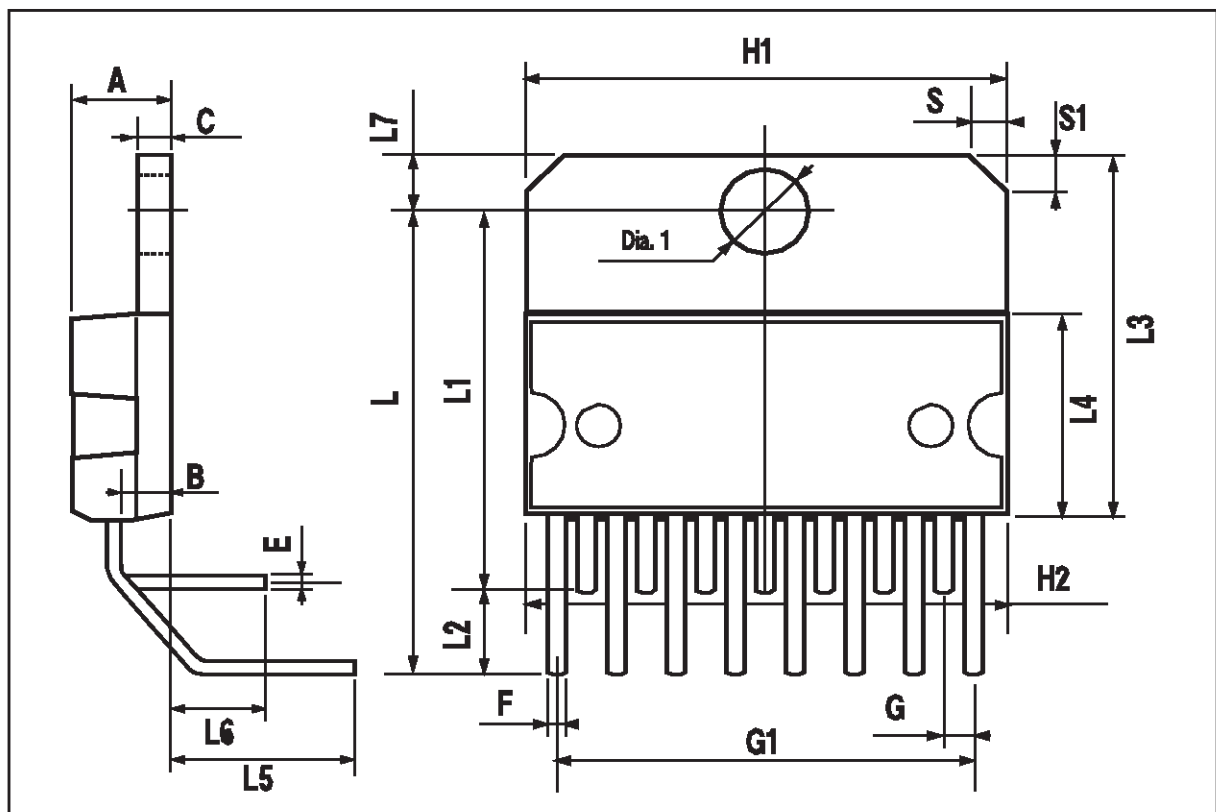


| DIM. | mm    |       |       | inch  |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | MIN.  | TYP.  | MAX.  | MIN.  | TYP.  | MAX.  |
| A    |       |       | 5     |       |       | 0.197 |
| B    |       |       | 2.65  |       |       | 0.104 |
| C    |       |       | 1.6   |       |       | 0.063 |
| E    | 0.49  |       | 0.55  | 0.019 |       | 0.022 |
| F    | 0.66  |       | 0.75  | 0.026 |       | 0.030 |
| G    | 1.14  | 1.27  | 1.4   | 0.045 | 0.050 | 0.055 |
| G1   | 17.57 | 17.78 | 17.91 | 0.692 | 0.700 | 0.705 |
| H1   | 19.6  |       |       | 0.772 |       |       |
| H2   |       |       | 20.2  |       |       | 0.795 |
| L    |       | 20.57 |       |       | 0.810 |       |
| L1   |       | 18.03 |       |       | 0.710 |       |
| L2   |       | 2.54  |       |       | 0.100 |       |
| L3   | 17.25 | 17.5  | 17.75 | 0.679 | 0.689 | 0.699 |
| L4   | 10.3  | 10.7  | 10.9  | 0.406 | 0.421 | 0.429 |
| L5   |       | 5.28  |       |       | 0.208 |       |
| L6   |       | 2.38  |       |       | 0.094 |       |
| L7   | 2.65  |       | 2.9   | 0.104 |       | 0.114 |
| S    | 1.9   |       | 2.6   | 0.075 |       | 0.102 |
| S1   | 1.9   |       | 2.6   | 0.075 |       | 0.102 |
| Dia1 | 3.65  |       | 3.85  | 0.144 |       | 0.152 |

## OUTLINE AND MECHANICAL DATA



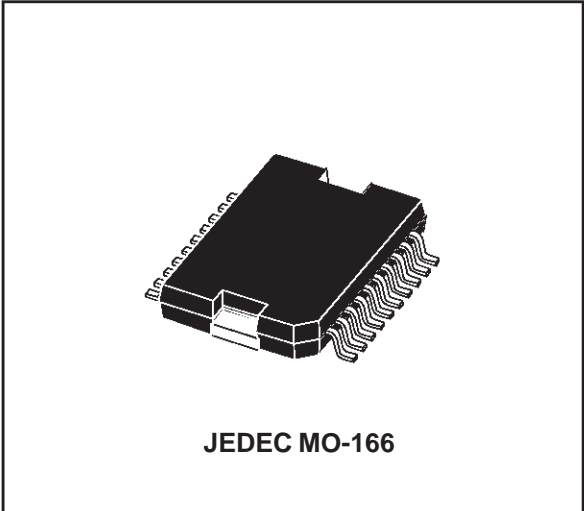
**Multiwatt15 H**



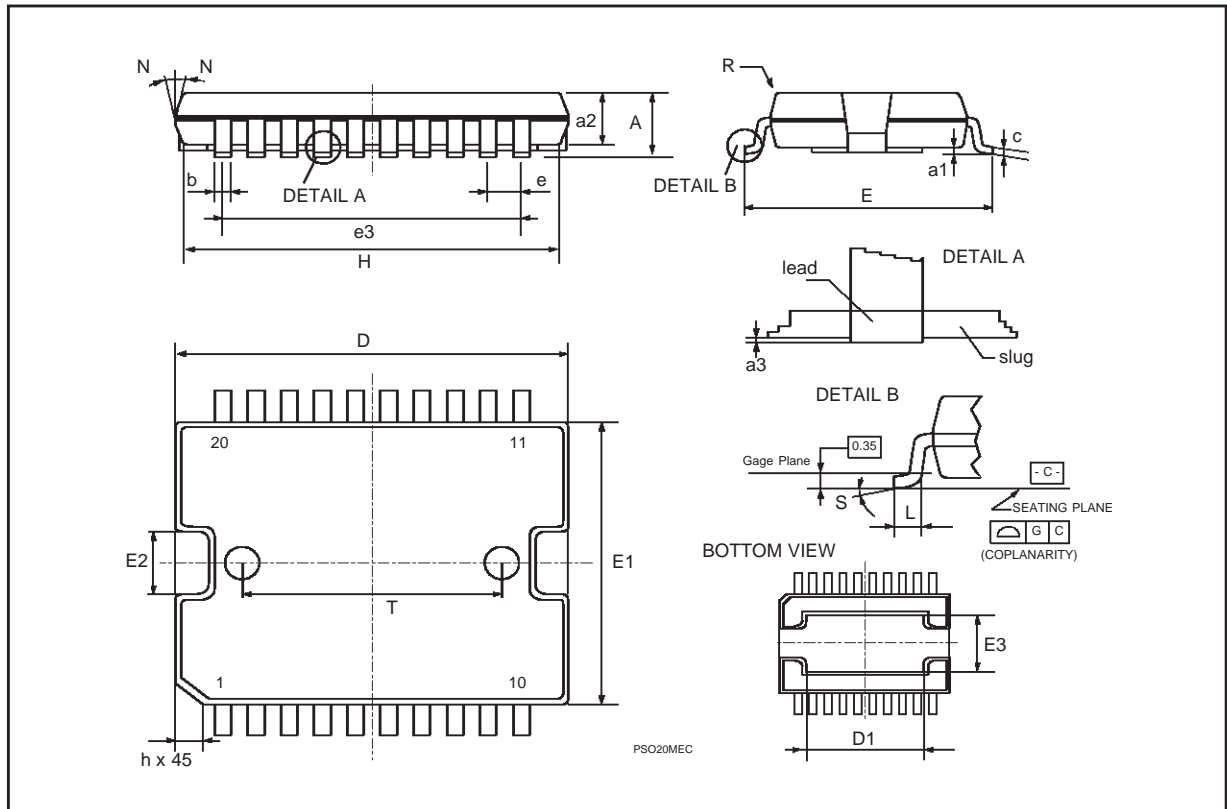
| DIM.   | mm         |       |      | inch  |       |       |
|--------|------------|-------|------|-------|-------|-------|
|        | MIN.       | TYP.  | MAX. | MIN.  | TYP.  | MAX.  |
| A      |            |       | 3.6  |       |       | 0.142 |
| a1     | 0.1        |       | 0.3  | 0.004 |       | 0.012 |
| a2     |            |       | 3.3  |       |       | 0.130 |
| a3     | 0          |       | 0.1  | 0.000 |       | 0.004 |
| b      | 0.4        |       | 0.53 | 0.016 |       | 0.021 |
| c      | 0.23       |       | 0.32 | 0.009 |       | 0.013 |
| D (1)  | 15.8       |       | 16   | 0.622 |       | 0.630 |
| D1     | 9.4        |       | 9.8  | 0.370 |       | 0.386 |
| E      | 13.9       |       | 14.5 | 0.547 |       | 0.570 |
| e      |            | 1.27  |      |       | 0.050 |       |
| e3     |            | 11.43 |      |       | 0.450 |       |
| E1 (1) | 10.9       |       | 11.1 | 0.429 |       | 0.437 |
| E2     |            |       | 2.9  |       |       | 0.114 |
| E3     | 5.8        |       | 6.2  | 0.228 |       | 0.244 |
| G      | 0          |       | 0.1  | 0.000 |       | 0.004 |
| H      | 15.5       |       | 15.9 | 0.610 |       | 0.626 |
| h      |            |       | 1.1  |       |       | 0.043 |
| L      | 0.8        |       | 1.1  | 0.031 |       | 0.043 |
| N      | 10° (max.) |       |      |       |       |       |
| S      | 8° (max.)  |       |      |       |       |       |
| T      |            | 10    |      |       | 0.394 |       |

(1) "D and F" do not include mold flash or protrusions.  
 - Mold flash or protrusions shall not exceed 0.15 mm (0.006").  
 - Critical dimensions: "E", "G" and "a3"

**OUTLINE AND MECHANICAL DATA**



**PowerSO20**



Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specification mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

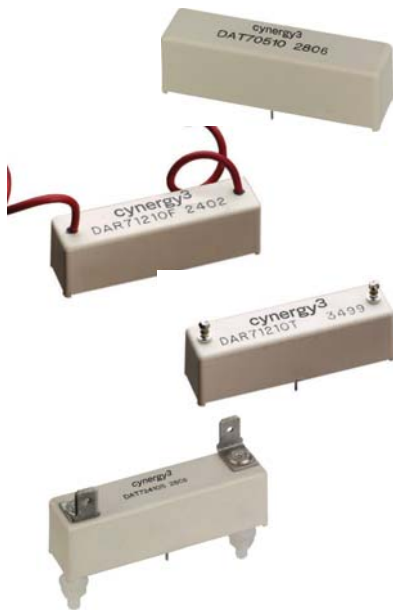
The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics  
© 2000 STMicroelectronics – Printed in Italy – All Rights Reserved  
STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Italy - Japan - Malaysia - Malta - Morocco -  
Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - U.S.A.

<http://www.st.com>

# D Series

## High Voltage relays 10kV & 15kV



Very high isolation voltages, up to 15kV, are achieved through the use of high vacuum reed switches with either Rhodium or Tungsten contacts and make these relays suitable for high reliability applications, such as cardiac defibrillators, test equipment and high voltage power supplies.

The Rhodium contact relays have low contact resistance, while the Tungsten contact relays can switch higher voltages.

PCB or Panel Mount, via Nylon studs, versions are available.

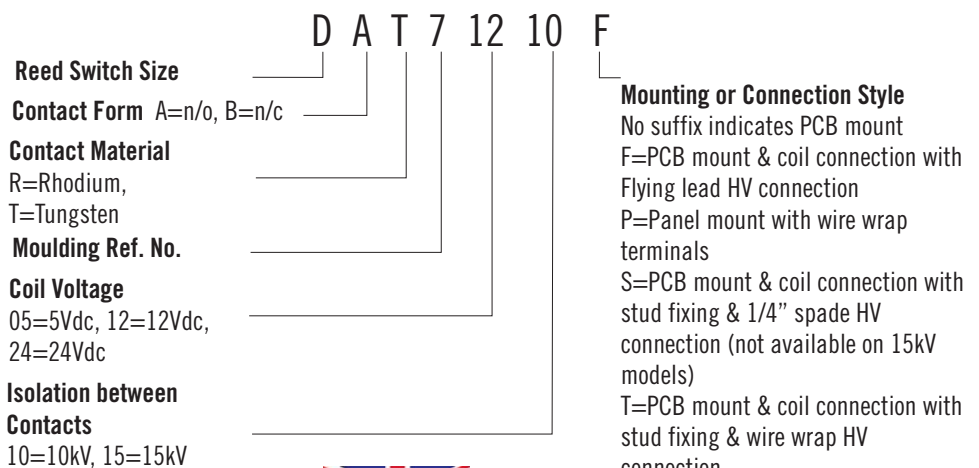
Connection options, for the HV, include PCB, solder turret(wire wrap), flying lead and 0.25" spade terminals.

- 10kV or 15kV Isolation
- Low Contact Resistance
- PCB or Panel Mount
- HV connections via Flying Leads, Solder Turret (wire wrap), or 1/4" Spade Terminals
- Excellent AC characteristics

| Contact Specification   | Unit Condition                 | 10kV SPNO                            |                                    |     | 10kV SPNC                            |                                    |     | 15kV SPNO                            |      |     |
|---|--------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----|--------------------------------------|------------------------------------|-----|--------------------------------------|------|-----|
| Contact Material  |                                | Rhodium                              | Tungsten                           |     | Rhodium                              | Tungsten                           |     | Tungsten                             |      |     |
| Isolation across contacts   | kV DC or AC peak               | 10                                   | 10                                 |     | 10                                   | 10                                 |     | 15                                   |      |     |
| Switching Power Max.  | W                              | 50                                   | 50                                 |     | 50                                   | 50                                 |     | 50                                   |      |     |
| Switching Voltage Max.  | V DC or AC peak                | 1000                                 | 7000                               |     | 1000                                 | 7000                               |     | 10000                                |      |     |
| Switching Current Max.  | A DC or AC peak                | 3                                    | 2                                  |     | 3                                    | 2                                  |     | 2                                    |      |     |
| Carry Current Max   | A DC or AC peak                | 4                                    | 3                                  |     | 4                                    | 3                                  |     | 2                                    |      |     |
| Capacitance across contacts   | pF coil to screen grounded     | <0.2                                 | <0.2                               |     | <0.2                                 | <0.2                               |     | <0.2                                 |      |     |
| Lifetime operations   | dry switching<br>50W switching | 10 <sup>9</sup><br>10 <sup>6</sup>   | 10 <sup>9</sup><br>10 <sup>6</sup> |     | 10 <sup>9</sup><br>10 <sup>6</sup>   | 10 <sup>9</sup><br>10 <sup>6</sup> |     | 10 <sup>9</sup><br>10 <sup>6</sup>   |      |     |
| Contact Resistance  | mΩ max (typical)               | 50 (15)                              | 250(100)                           |     | 50 (15)                              | 250(100)                           |     | 250 (100)                            |      |     |
| Insulation Resistance   | Ωmin (typical)                 | 10 <sup>10</sup> (10 <sup>13</sup> ) |                                    |     | 10 <sup>10</sup> (10 <sup>13</sup> ) |                                    |     | 10 <sup>10</sup> (10 <sup>13</sup> ) |      |     |
| Coil Specification  |                                | 5V                                   | 12V                                | 24V | 5V                                   | 12V                                | 24V | 5V                                   | 12V  | 24V |
| Must Operate Voltage  | V DC                           | 3.7                                  | 9                                  | 20  | 3.7                                  | 9                                  | 20  | 3.7                                  | 9    | 20  |
| Must Release Voltage  | V DC                           | 0.5                                  | 1.25                               | 4   | 0.5                                  | 1.25                               | 4   | 0.5                                  | 1.25 | 4   |
| Operate Time  | ms diode fitted                | 3.0                                  | 3.0                                | 3.0 | 2.0                                  | 2.0                                | 2.0 | 3.0                                  | 3.0  | 3.0 |
| Release Time  | ms diode fitted                | 2.0                                  | 2.0                                | 2.0 | 3.0                                  | 3.0                                | 3.0 | 2.0                                  | 2.0  | 2.0 |
| Resistance  | Ω                              | 28                                   | 150                                | 780 | 38                                   | 240                                | 925 | 16                                   | 95   | 350 |
| <small>Note: The operate / release voltage and coil resistance will change at a rate of 0.4% per degree C. Values are stated at room temperature (20 degrees C)</small> |                                |                                      |                                    |     |                                      |                                    |     |                                      |      |     |
| Relay Specification   |                                |                                      |                                    |     |                                      |                                    |     |                                      |      |     |
| Isolation contact/coil  | kV                             | 17                                   |                                    |     | 17                                   |                                    |     | 17                                   |      |     |
| Insulation resistance contact to all terminals  | Ωmin (typical)                 | 10 <sup>10</sup> (10 <sup>13</sup> ) |                                    |     | 10 <sup>10</sup> (10 <sup>13</sup> ) |                                    |     | 10 <sup>10</sup> (10 <sup>13</sup> ) |      |     |
| Environmental   |                                |                                      |                                    |     |                                      |                                    |     |                                      |      |     |
| Operating Temp range  | °C                             | -20 to +70                           |                                    |     | -20 to +70                           |                                    |     | -20 to +70                           |      |     |

Please refer to this document for circuit design notes:-  
<http://www.cynergy3.com/blog/application-notes-reed-relays-0>

### Part Numbering System



Cynergy3 Components Ltd.  
 7 Cobham Road  
 Ferndown Industrial Estate  
 Wimborne, Dorset BH21 7PE  
 Telephone +44 (0) 1202 897969  
 Email:sales@cynergy3.com

ISO9001 CERTIFIED  
 D 2018



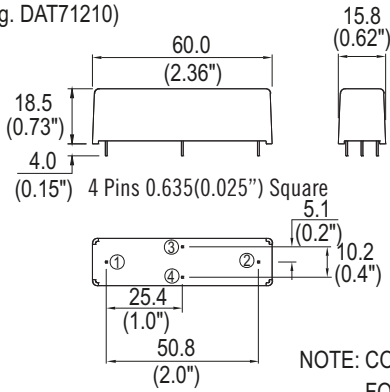
www.cynergy3.com



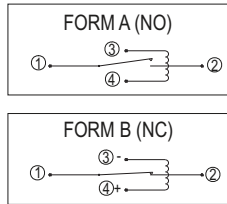
## MECHANICAL

### STANDARD

(e.g. DAT71210)



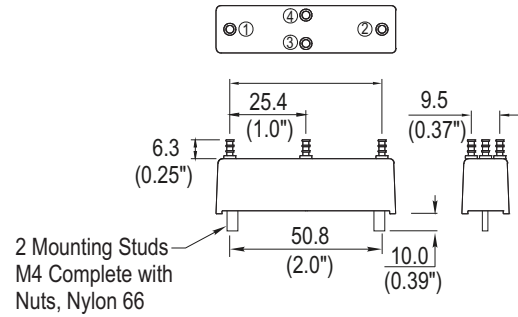
### CIRCUIT DIAGRAMS (ALL VARIANTS)



NOTE: COIL POLARITY IS IMPORTANT FOR FORM B VARIANT ONLY.

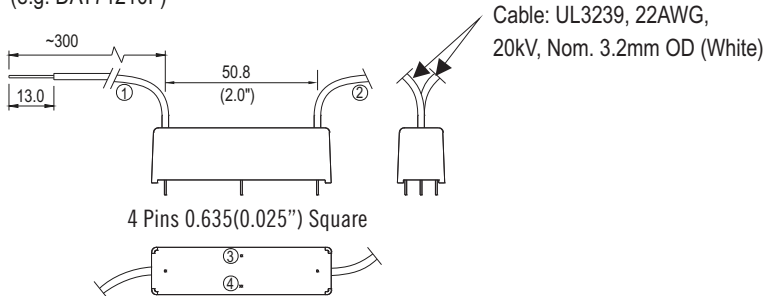
### PANEL MOUNT

(e.g. DAT71210P)



### FLYING LEAD

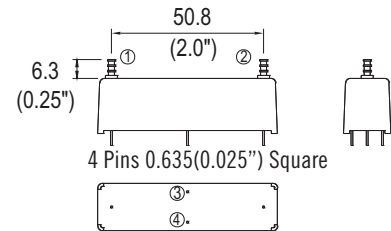
(e.g. DAT71210F)



NOTE: PINS WHICH ARE NOT NUMBERED HAVE NO ELECTRICAL CONNECTION.

### TURRET (Wire Wrap)

(e.g. DAT71210T)

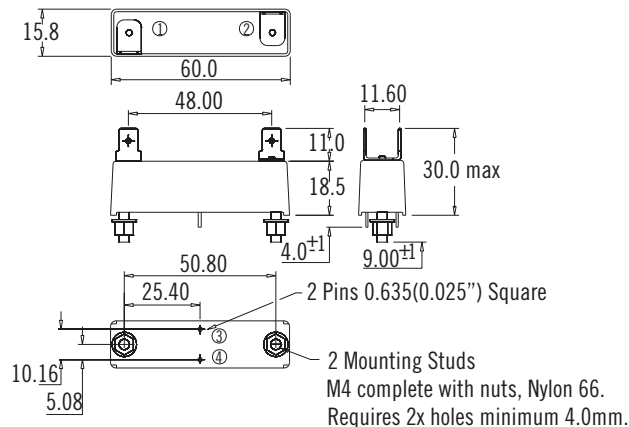


NOTE: PINS WHICH ARE NOT NUMBERED HAVE NO ELECTRICAL CONNECTION.

### SPADE TYPE

(e.g. DAT71210S)

'S' Suffix denotes the 0.250" 'Push On' blade connectors, M4 fixing bolts and Epoxy potting.



Cynergy3 Components Ltd.  
7 Cobham Road  
Ferndown Industrial Estate  
Wimborne, Dorset BH21 7PE  
Telephone +44 (0) 1202 897969  
Email: sales@cynergy3.com

ISO9001 CERTIFIED

Please refer to this document for circuit design notes:-  
<http://www.cynergy3.com/blog/application-notes-reed-relays-0>

www.cynergy3.com

## CX241 Series



- SIP SSR
- Ratings to 1.5A @ 280 VAC
- SCR output
- DC control
- Zero-crossing (resistive loads) or random-fire (inductive loads) output

### PRODUCT SELECTION

| Control Voltage | Zero Crossing | Random Fire |
|-----------------|---------------|-------------|
| 4-10 VDC        | CX241         | CX241R      |

### OUTPUT SPECIFICATIONS (1)

| Description  | CX241  | CX241R |
|--|--------|--------|
| Operating Voltage (47-63Hz) [Vrms]                               | 12-280 | 12-280 |
| Transient Overvoltage [Vpk]                                      | 600    | 600    |
| Maximum Off-State Leakage Current @ Rated Voltage [mArms]        | 0.1    | 0.1    |
| Minimum Off-State dv/dt @ Maximum Rated Voltage [V/μsec] (3)     | 500    | 500    |
| Maximum Load Current [Arms](3)                                   | 1.5    | 1.5    |
| Minimum Load Current [Arms]                                      | 0.025  | 0.025  |
| Maximum Surge Current (16.6ms) [A <sub>pk</sub> ]                | 40     | 40     |
| Maximum On-State Voltage Drop @ Rated Current [V <sub>pk</sub> ] | 1.5    | 1.5    |
| Minimum Power Factor (with Maximum Load)                         | 0.5    | 0.5    |

### INPUT SPECIFICATIONS (1)

| Description                   | CX241               | CX241R              |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| Control Voltage Range         | 4-10 VDC            | 4-10 VDC            |
| Must Turn On Voltage          | 4.0 VDC             | 4.0 VDC             |
| Must Turn Off Voltage         | 1.0 VDC             | 1.0 VDC             |
| Typical Input Current @ 5 VDC | 15 mA <sub>dc</sub> | 15 mA <sub>dc</sub> |
| Nominal Input Impedance       | 300 Ohm             | 300 Ohm             |
| Maximum Turn-On Time [msec]   | 1/2 Cycle           | 0.1 msec            |
| Maximum Turn-Off Time [msec]  | 1/2 Cycle           | 1/2 Cycle           |

### GENERAL SPECIFICATIONS

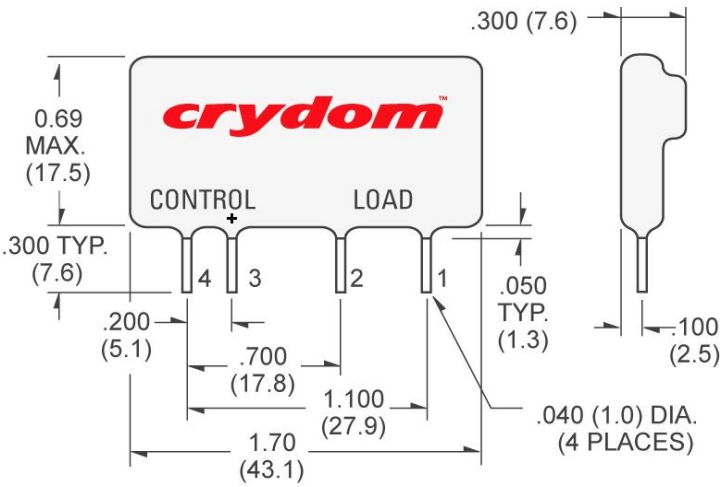
| Description   | Parameters                 |
|---|----------------------------|
| Dielectric Strength, Input/Output/Base (50/60Hz)(2) | 4000 Vrms                  |
| Minimum Insulation Resistance (@ 500 VDC) (2)       | 10 <sup>9</sup> Ohm        |
| Maximum Capacitance, Input/Output                   | 8.0 pF                     |
| Ambient Operating Temperature Range                 | -30 to 80°C                |
| Ambient Storage Temperature Range                   | -30 to 125°C               |
| Weight (typical)                                    | 0.4 oz. (11 g)             |
| Encapsulation                                       | Thermally Conductive Epoxy |

### GENERAL NOTES

- 1) All parameters at 25°C unless otherwise specified.
- 2) Dielectric and insulation resistance are measured between input and output
- 3) Off-State dv/dt test method per EIA/NARM standard RS-443

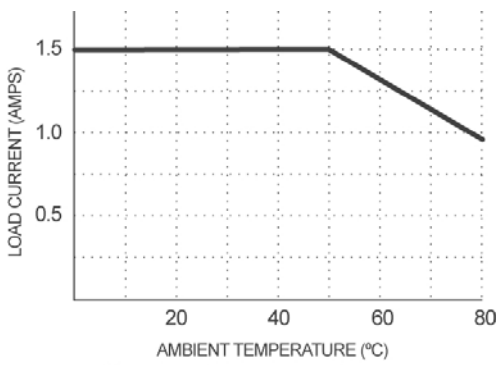


**MECHANICAL SPECIFICATIONS**



DC CONTROL.  
 PIN 1: AC LOAD  
 PIN 2: AC LOAD  
 PIN 3: +DC CONTROL  
 PIN 4: -DC CONTROL

**THERMAL DERATE INFORMATION**





Max. Load Current vs. Temp.

**AGENCY APPROVALS**



Rev. 112910

|  <b>DANGER / PELIGRO / DANGER /GEFAHR / PERICOLO / PERIGO</b>   |  |   |  |  |   |
|--|--|---|--|--|---|
| <p><b>HAZARD OF ELECTRIC SHOCK, EXPLOSION, OR ARC FLASH.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disconnect all power before installing or working with this equipment.</li> <li>• Verify all connections and replace all covers before turning on power.</li> </ul> <p><b>Failure to follow these instructions will result in death or serious injury.</b></p> | <p><b>RIESGO DE DESCARGA ELECTRICA O EXPLOSION.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desconectar todos los suministros de energia a este equipo antes de trabajar con este equipo.</li> <li>• Verificar todas las conexiones y colocar todas las tapas antes de energizar el equipo.</li> </ul> <p><b>El incumplimiento de estas instrucciones puede provocar la muerte o lesiones serias.</b></p> | <p><b>RISQUE DE DESCARGE ELECTRIQUE OU EXPLOSION</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eteindre toutes les sources d'énergie de cet appareil avant de travailler dessus de cet appareil</li> <li>• Vérifier tous connections, et remettre tous couverts en olace avant de mettre sous</li> </ul> <p><b>De non-suivi de ces instructions provoquera la mort ou des lésions sérieuses sérieuses.</b></p> | <p><b>GEFAHR EINES ELEKTRISCHE N SCHLAGES ODER EINER EXPLOSION.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stellen Sie jeglichen Strom ab, der dieses Gerät versorgt, bevor Sie an dem Gerät Arbeiten durchführen</li> <li>• Vor der Inbetriebnahme alle Anschlüsse überprüfen und alle Gehäuseteile montieren.</li> </ul> <p><b>Unterlassung dieser Anweisungen können zum Tode oder zu schweren Verletzungen führen.</b></p> | <p><b>RISCHIO DI SCOSSA ELETTRICA O DELL'ESPLOSIONE.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Spenga tutta l'alimentazion e che fornisce questa apparecchiatura prima del lavorare a questa apparecchiatura</li> <li>• Verificare tutti i collegamenti e sostituire tutte le coperture prima della rotazione sull'alimentazione</li> </ul> <p><b>L'omissione di seguire queste istruzioni provocherà la morte o di lesioni serie</b></p> | <p><b>RISCO DE DESCARGA ELÉTRICA OU EXPLOÇÃO</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desconectar o equipamento de toda a energia antes de instalar ou trabalhar com este equipamento</li> <li>• Verificar todas as conexões e recolocar todas as tampas antes de religar o equipamento</li> </ul> <p><b>O não cumprimento destas instruções pode levar à morte ou lesões sérias.</b></p> |

|  <b>WARNING / AVERTISSEMENT / WARNUNG /ADVERTENCIA / AVVERTENZA / AVISO</b>  |  |   |
|---|--|---|
| <p><b>RISK OF MATERIAL DAMAGE AND HOT ENCLOSURE</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• The product's side panels may be hot, allow the product to cool before touching.</li> <li>• Follow proper mounting instructions including torque values.</li> <li>• Do not allow liquids or foreign objects to enter this product.</li> </ul> <p><b>Failure to follow these instructions can result in serious injury, or equipment damage.</b></p>  | <p><b>RISQUE DE DOMMAGE MATERIEL ET DE SURCHAUFFE DU BOITIER</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les panneaux latéraux du produit peuvent être chauds. Laisser le produit refroidir avant de le toucher.</li> <li>• Respecter les consignes de montage, et notamment les couples de serrage.</li> <li>• Ne pas laisser pénétrer de liquide ni de corps étrangers à l'intérieur du produit.</li> </ul> <p><b>Le non-respect de cette directive peut entraîner, des lésions corporelles graves ou des dommages matériels.</b></p> | <p><b>GEFAHR VON MATERIALSCHÄDEN UND GEHÄUSEERHITZUNG</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Seitenwände können heiß sein. Lassen Sie das Produkt abkühlen, bevor Sie es berühren.</li> <li>• Beachten Sie die Montageanweisungen,</li> <li>• Führen Sie keine Flüssigkeiten oder Fremdkörper in das Produkt ein.</li> </ul> <p><b>Die Nichtbeachtung dieser Anweisung kann Körperverletzung oder Materialschäden zur Folge haben.</b></p>                    |
| <p><b>RIESGO DE DAÑOS MATERIALES Y DE SOBRECIENTAMIENTO DE LA UNIDAD</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Los paneles laterales del producto pueden estar calientes. Esperar que el producto se enfríe antes de tocarlo.</li> <li>• Respetar las instrucciones de montaje, y en particular los pares de apretado.</li> <li>• No dejar que penetren líquidos o cuerpos extraños en el producto.</li> </ul> <p><b>Si no se respetan estas precauciones pueden producirse graves lesiones, daños materiales.</b></p> | <p><b>RISCHIO DI DANNI MATERIALI E D'INVOLUCRO CALDO</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• I pannelli laterali dell'apparecchio possono scottare; lasciar quindi raffreddare il prodotto prima di toccarlo.</li> <li>• Seguire le istruzioni di montaggio corrette.</li> <li>• Non far entrare liquidi o oggetti estranei in questo apparecchio.</li> </ul> <p><b>La mancata osservanza di questa precauzione può causare gravi rischi per l'incolumità personale o danni alle apparecchiature.</b></p>                           | <p><b>RISCO DE DANO MATERIAL E DE AQUECIMENTO</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Os painéis laterais do produto podem estar quentes; dê tempo ao produto para arrefecer antes de lhe tocar.</li> <li>• Siga devidamente as instruções de montagem.</li> <li>• Não permita a entrada de líquidos e de objectos estranhos no produto.</li> </ul> <p><b>A não observância destas precauções pode provocar a morte, ferimentos graves ou danos materiais.</b></p> |

**ANNEX - ENVIROMENTAL INFORMATION**

The environmental information disclosed in this annex including the EIP Pollution logo are in compliance with People's Republic of China Electronic Industry Standard SJ/T11364 – 2006, Marking for Control of Pollution Caused by Electronic Information Products.

| Part Name         | Toxic or hazardous Substance and Elements |              |              |                               |                                |                                       |
|-------------------|---|--------------|--------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
|                   | Lead (Pb)                                 | Mercury (Hg) | Cadmium (Cd) | Hexavalent Chromium (Cr (VI)) | Polybrominated biphenyls (PBB) | Polybrominated diphenyl ethers (PBDE) |
| Semiconductor die | X   | 0            | 0            | 0                             | 0                              | 0                                     |
| Solder            | X   | 0            | 0            | 0                             | 0                              | 0                                     |

此附件所标示的包括电子信息产品污染图标的环境信息符合中华人民共和国电子行业标准 **SJ/T11364 - 2006**, 电子信息产品污染控制标识要求



| 部件名称  | 有毒有害物质或元素 |        |        |               |            |              |
|-------|-----------|--------|--------|---------------|------------|--------------|
|       | 铅 (Pb)    | 汞 (Hg) | 镉 (Cd) | 六价铬 (Cr (VI)) | 多溴联苯 (PBB) | 多溴二苯醚 (PBDE) |
| 半导体芯片 | X         | 0      | 0      | 0             | 0          | 0            |
| 焊接点   | X         | 0      | 0      | 0             | 0          | 0            |

# ANEXO III

Simulación de los distintos  
modelos

# 1. Primer modelo cinemático

## 1.1. Modelo cinemático inverso:

```
function [theta1,theta2,theta3]=cinematicainversaFN(x3,y3,z3);  
l1 = 30;  
l2 = 20;  
l3 = 15;  
  
%Ángulo del codo  
  
argtheta3=(((x3^2)+(y3^2)+((z3-l1)^2)-(l2^2)-(l3^2))/(2*l2*l3));  
theta3=acos(argtheta3);  
  
%Ángulo de la base  
  
theta1=atan2(y3,x3);  
  
%Ángulo del péndulo  
  
phi=atan2((z3-l1),(sqrt((x3^2)+(y3^2))));  
alpha=atan2((l3*sin(theta3)),(l2+(l3*cos(theta3))));  
theta2=phi-alpha;  
  
[x3, y3, z3]=cinematicadirecta(theta1,theta2,theta3);  
  
end
```

### 1.2. Modelo cinemático directo:

```
function [x3, y3, z3]=cinematicadirecta(theta1,theta2,theta3);  
l1 = 30;  
l2 = 20;  
l3 = 15;  
r =l2*cos(theta2)+l3*cos(theta2+theta3);  
z3=l1+l2*sin(theta2)+l3*sin(theta2+theta3);  
x3=r*cos(theta1);  
y3=r*sin(theta1);  
[x3,y3,z3] = plotarm(theta1,theta2,theta3,l1,l2,l3);  
end
```

### 1.3. Representación gráfica del robot:

```
function [x6,y6,z6] = plotarm(theta1,theta2,theta3,l1,l2,l3)  
  
% Puntos conocidos  
O00 = [ 0, 0, 0, 1 ]'; % Origen del sistema de coordenadas 0 respecto al  
sistema 0.  
O11 = [ 0, 0, 0, 1 ]'; % Origen del sistema de coordenadas 1 respecto al  
sistema 1.  
O22 = [ 0, 0, 0, 1 ]'; % Origen del sistema de coordenadas 2 respecto al  
sistema 2.  
O33 = [ 0, 0, 0, 1 ]'; % Origen del sistema de coordenadas 3 respecto al  
sistema 3.  
  
% Matrices de transformaciÃ³n.  
T01 = obtenerMatrizTransformacion(l1,theta1,0,pi/2);  
T12 = obtenerMatrizTransformacion(0,theta2,l2,0);  
T23 = obtenerMatrizTransformacion(0,theta3,l3,0);  
  
% PosiciÃ³n de las articulaciones.
```

```

O10 = T01 * O11;
O20 = T01 * T12 * O22;
O30 = T01 * T12 * T23 * O33;

```

```

% Vectores para la representaci3n gr4fica.

```

```

xplot= [O00(1) O10(1) O20(1) O30(1)];
yplot= [O00(2) O10(2) O20(2) O30(2)];
zplot= [O00(3) O10(3) O20(3) O30(3)];

```

```

% Redondeo para evitar errores por limitaci3n de la mantisa de c4lculo.

```

```

xplot = round(xplot*10000)/10000;
yplot = round(yplot*10000)/10000;
zplot = round(zplot*10000)/10000;

```

```

x6 = round(O30(1)*10000)/10000;
y6 = round(O30(2)*10000)/10000;
z6 = round(O30(3)*10000)/10000;

```

```

% Representaci3n gr4fica.

```

```

limXY= l2+l3;
limZ = l1+l2+l3;
clf;
plot3(xplot, yplot, zplot, 'b-', 'linewidth', 2, xplot, yplot, zplot, 'ro');
axis(1.05*[-limXY,limXY,-limXY,limXY,-limZ/10,limZ], "equal");
title('Brazo antropom3rfico');
xlabel('Eje X')
ylabel('Eje Y')
zlabel('Eje Z')
grid on

```

```

end

```

```

function matriz = obtenerMatrizTransformacion(di, thetai, ai, alphai)
matriz= [ cos(thetai) -cos(alphai)*sin(thetai) sin(alphai)*sin(thetai)
ai*cos(thetai);

```

```

sin(thetai) cos(alphai)*cos(thetai) -sin(alphai)*cos(thetai)
ai*sin(thetai);

```

```

0 sin(alphai) cos(alphai) di;
0 0 0 1 ];

```

```

end

```

## 2. Segundo modelo cinemático

Modelo cinemático inverso:

```
function[theta1,theta2,theta3,theta4]=cinematicainversa2(x3,y3,z3);
```

```
l1 = 30;
```

```
l2 = 20;
```

```
l3 = 15;
```

```
%Ángulo del codo
```

```
argtheta4=(((x3^2)+(y3^2)+((z3-l1)^2)-(l2^2)-(l3^2))/(2*l2*l3));
```

```
theta4=acos(argtheta4);
```

```
%Ángulo de la base
```

```
theta1=atan2(y3,x3);
```

```
%Ángulo del péndulo
```

```
c = sqrt((l2*l2)+(l3*l3)-2*l2*l3*cos((pi-theta4)));
```

```
theta3=pi-asin(l3*sin(theta4)/c);
```

```
%Ángulo del ala
```

```
yn = -sqrt((x3*x3)+(y3*y3));
```

```
h = sqrt((z3*z3)+(yn*yn));
```

```
p = yn/h;
```

```
thetax = acos(p);
```

```
thetap=(pi/2)-thetax;
```



```

w = (h*sin(thetap))/c;
theta2 = (asin(w))-pi/2;
if(z3 < 30),
    theta2 = -theta2;
endif

[x4,y4,z4] = brazoTFG(theta1,theta2,theta3,theta4)

end

```

Modelo cinemático directo:

```

% Brazo Antropomórfico TFG - Cinemática directa.
%
% Cinemática directa con muñeca de un robot antropomórfico 3D tipo
PUMA.
% Cálculo de la cinemática directa (ángulos que consiguen una
configuración
% determinada del brazo) y representación gráfica.
%
% [x4,y4,z4] = brazoTFG(theta1,theta2,theta3,theta4,l1,l2,l3)
%
% Argumentos de entrada:
%   theta_i : ángulo en radianes de la articulación i, con i=1,2,3,4,5.
%   l_i : longitud del elemento i, con i=1,2,3.
%
% Argumentos de salida:
%   x4, y4, z4 : coordenadas cartesianas del extremo del brazo
%               respecto al origen del brazo,
%               en las unidades en las que se den l_i.
%
% Autor: Santiago Torres (storres@ull.edu.es), 14/04/2020.
%
function [x4,y4,z4] = brazoTFG(theta1,theta2,theta3,theta4,l1,l2,l3)

```

*%Medidas de nuestro brazo robótico*

$l1=30$

$l2=20$

$l3=15$

*% Puntos conocidos*

$O00 = [ 0, 0, 0, 1 ]'$ ; % Origen del sistema de coordenadas 0 respecto al sistema 0.

$O11 = [ 0, 0, 0, 1 ]'$ ; % Origen del sistema de coordenadas 1 respecto al sistema 1.

$O22 = [ 0, 0, 0, 1 ]'$ ; % Origen del sistema de coordenadas 2 respecto al sistema 2.

$O33 = [ 0, 0, 0, 1 ]'$ ; % Origen del sistema de coordenadas 3 respecto al sistema 3.

$O44 = [ 0, 0, 0, 1 ]'$ ; % Origen del sistema de coordenadas 4 respecto al sistema 4.

*% Matrices de transformaci3n.*

$d2 = 0$

$T01 = \text{obtenerMatrizTransformacion}(l1, \theta1, 0, \pi/2);$

$T12 = \text{obtenerMatrizTransformacion}(0, \theta2, -d2, \pi/2);$

$T23 = \text{obtenerMatrizTransformacion}(0, \theta3, l2, 0);$

$T34 = \text{obtenerMatrizTransformacion}(0, \theta4, l3, 0);$

*% Posici3n de las articulaciones.*

$O10 = T01 * O11;$

$O20 = T01 * T12 * O22;$

$O30 = T01 * T12 * T23 * O33;$

$O40 = T01 * T12 * T23 * T34 * O44;$

*% Vectores para la representaci3n grÁfica.*

$xplot = [O00(1) O10(1) O20(1) O30(1) O40(1)];$

$yplot = [O00(2) O10(2) O20(2) O30(2) O40(2)];$

$zplot = [O00(3) O10(3) O20(3) O30(3) O40(3)];$

*% Redondeo para evitar errores por limitaci3n de la mantisa de cÁlculo.*

$xplot = \text{round}(xplot*10000)/10000;$

$yplot = \text{round}(yplot*10000)/10000;$

```
zplot = round(zplot*10000)/10000;
```

```
x4 = round(O40(1)*10000)/10000;
```

```
y4 = round(O40(2)*10000)/10000;
```

```
z4 = round(O40(3)*10000)/10000;
```

```
% Representación gráfica.
```

```
limXY= l2+l3;
```

```
limZ = l1+l2+l3;
```

```
clf;
```

```
plot3(xplot, yplot, zplot, 'b-', 'linewidth', 2, xplot, yplot, zplot, 'ro');
```

```
axis(1.05*[-limXY,limXY,-limXY,limXY,-limZ/10,limZ], "equal");
```

```
title('Brazo TFG');
```

```
xlabel('Eje X')
```

```
ylabel('Eje Y')
```

```
zlabel('Eje Z')
```

```
grid on
```

```
end
```

```
function matriz = obtenerMatrizTransformacion(di, thetai, ai, alphai)
```

```
matriz= [ cos(thetai) -cos(alphai)*sin(thetai) sin(alphai)*sin(thetai)
```

```
ai*cos(thetai);
```

```
sin(thetai) cos(alphai)*cos(thetai) -sin(alphai)*cos(thetai)
```

```
ai*sin(thetai);
```

```
0 sin(alphai) cos(alphai) di;
```

```
0 0 0 1 ];
```

```
end
```

# ANEXO IV

Impresión 3D

En este apartado se analizará la impresión de las piezas que se han indicado a lo largo de la memoria. Para ello se utilizará el software Ultimaker Cura, que nos dará información relevante, ya que no solo se podrá variar parámetros de impresión, además permite simular todo el proceso.

La consideración general que se tendrá en cuenta será que para garantizar que las piezas sean lo más homogéneas posibles, el espesor del hilo depositado por la boquilla será de 0,15 mm, de tal manera que la orientación de las fibras no influya en las propiedades elásticas del material.

Sabiendo esto, para cada pieza se analizarán principalmente los tiempos que se tardará en la impresión y la cantidad de material necesario para cada una, además de los costes estimados generales de todo el proceso de impresión. Para simplificar el proceso se realizará un volcado de información en la tabla 10 para evaluar los resultados.

| <b>Parte</b>               | <b>Tiempo</b>   | <b>Cantidad de material</b> |
|----------------------------|-----------------|-----------------------------|
| <b>Cuerpo</b>              | 1 d 22 h 58 min | 456 g - 57,71 m             |
| <b>Articulación hombro</b> | 10 h 15 min     | 93 g - 11,8 m               |
| <b>Brazo</b>               | 11 h 12 min     | 102 g - 12,89 m             |
| <b>Antebrazo superior</b>  | 4 h 2 min       | 35 g - 4,43 m               |
| <b>Antebrazo inferior</b>  | 3 h 29 min      | 24 g - 3,02 m               |
| <b>TOTAL</b>               | 3 d 3 h 56 min  | 710 g - 89,85 m             |

*Tabla 1. Costes de impresión (fuente propia)*

Como se puede observar, el tiempo de impresión es bastante elevado, esto se debe al espesor de la fibra que se ha impuesto. Por su parte el gasto de material no parece tan elevado ya que una bobina típica contiene 1 Kg de material y solo eso sería necesario para terminar con el diseño.

Por lo tanto, se puede concluir que, aunque el material sea poco, los tiempos de impresión son muy elevados con el objetivo de lograr una impresión de calidad. Además, cabe destacar que el precio de una bobina es aproximadamente de 30 €, con lo que las piezas serían realmente baratas. A continuación, se mostrará una captura de pantalla de las piezas impresas en el software usado para prepararlas:

## Cuerpo

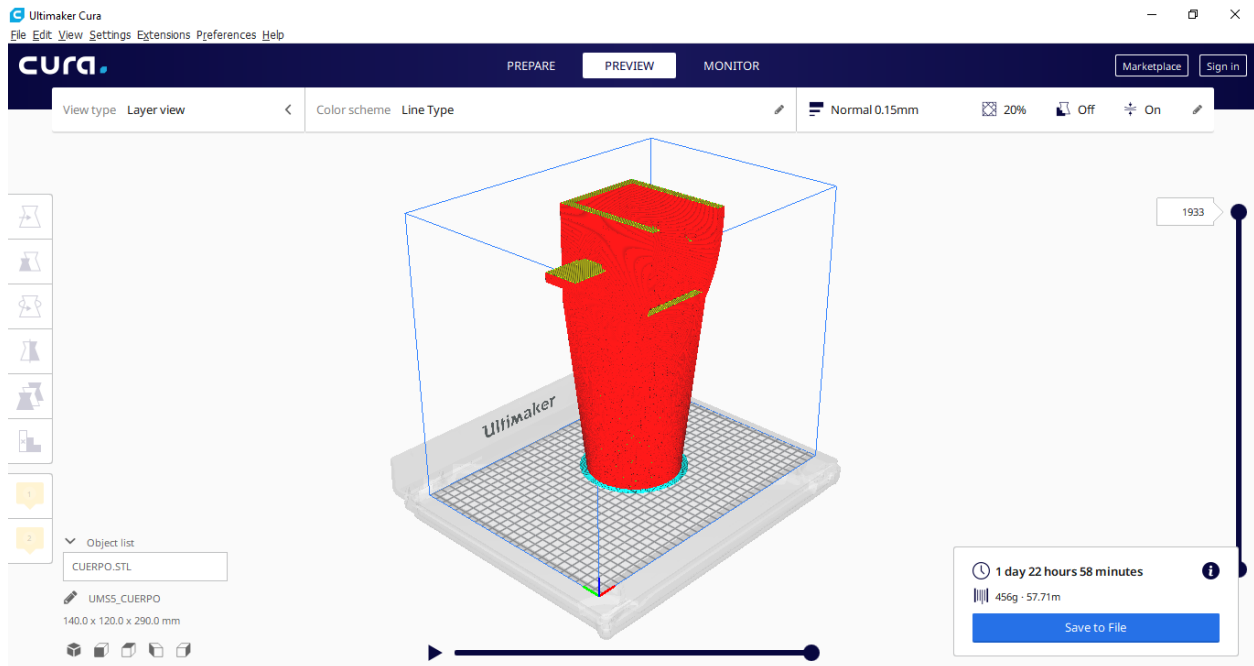


Figura 1. Simulación de la impresión del cuerpo (fuente propia)

## Articulación del hombro

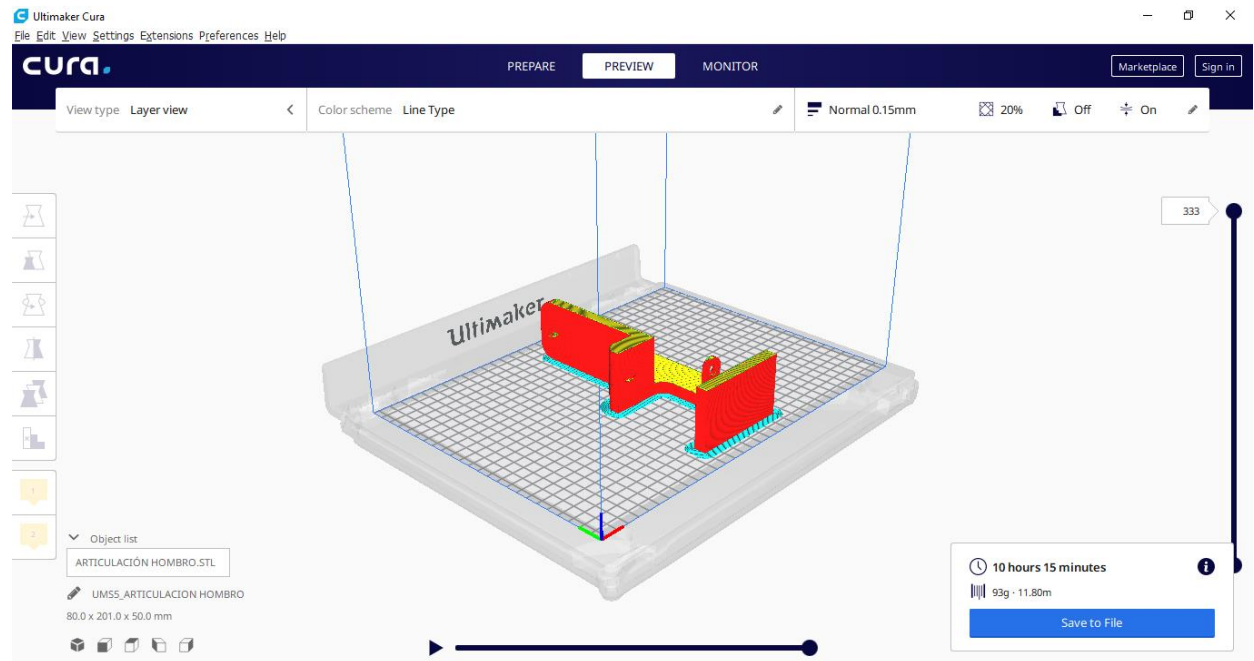


Figura 2. Simulación de la impresión de la articulación del hombro (fuente propia)

## Brazo

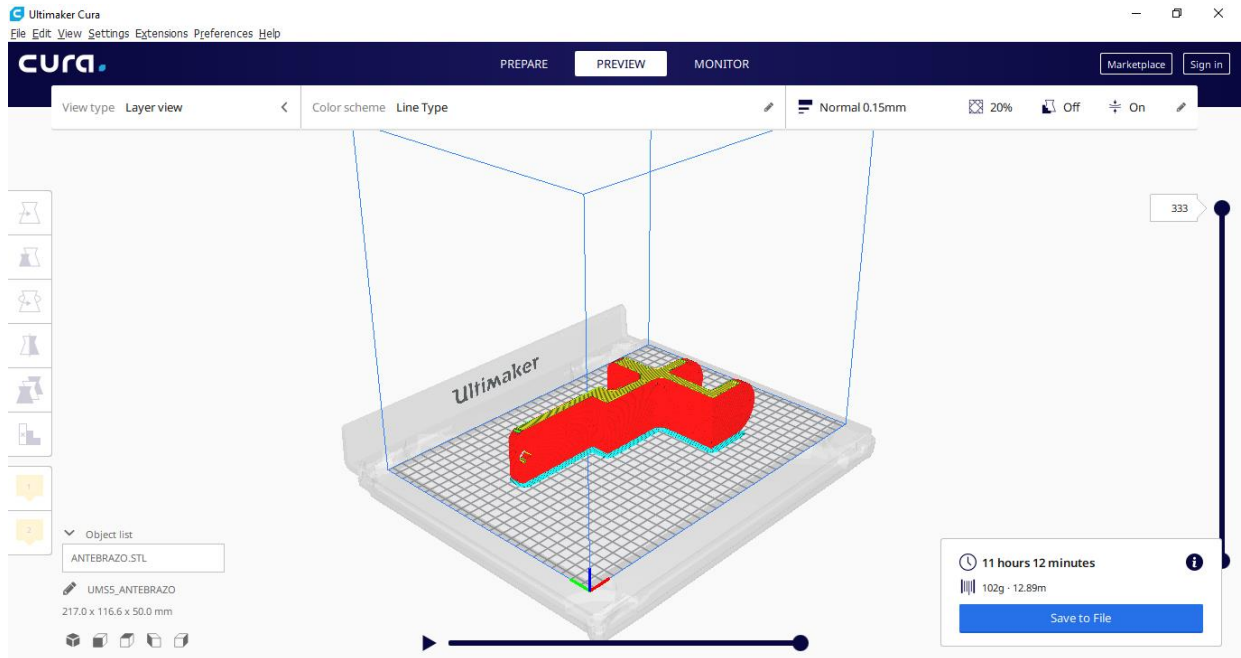


Figura 3. Simulación de la impresión del brazo (fuente propia)

## Antebrazo superior

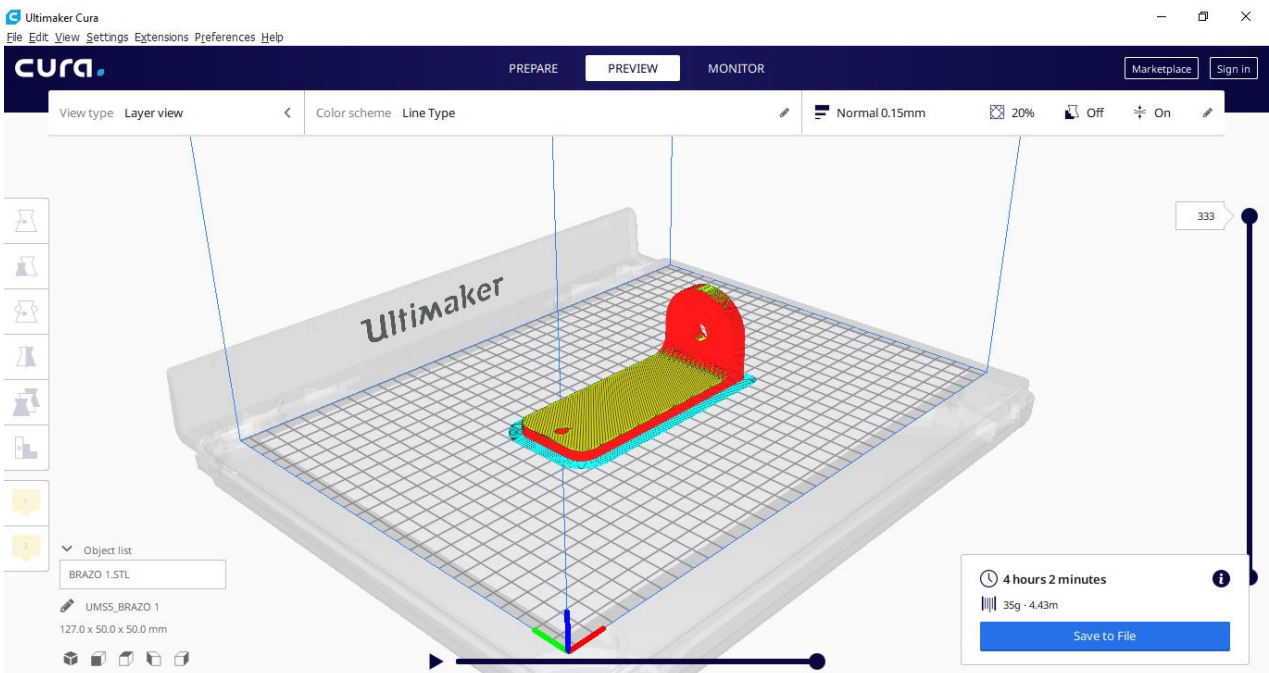


Figura 4. Simulación de la impresión del antebrazo superior (fuente propia)

## Antebrazo inferior

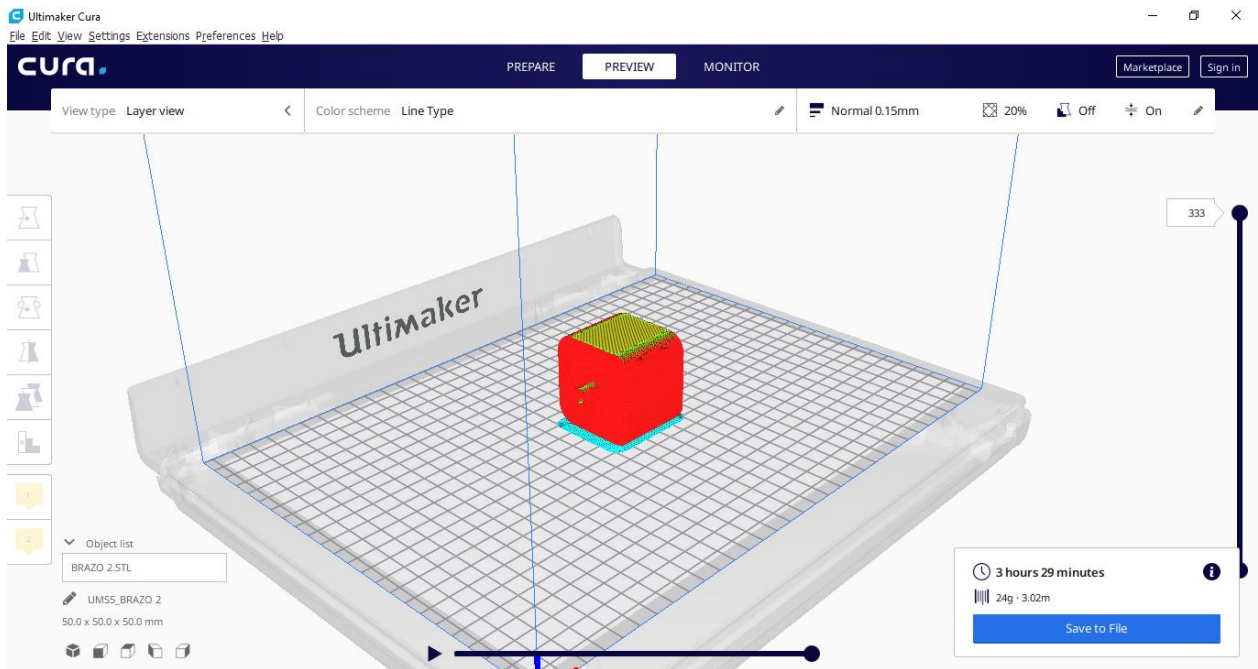


Figura 5. Simulación de la impresión del antebrazo inferior (fuente propia)