

**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO**

# **MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**REDISEÑO MECÁNICO Y CONTROL CON UN PLC DE UN PÉNDULO  
INVERTIDO**

**JULIO 2014**

**Ing. Eliana Acurio Méndez**

**Dr. José Ángel Sirgo Blanco**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer el apoyo incondicional de mi familia, especialmente a mis padres Pablo y Lourdes, quienes a pesar de la distancia siempre han tenido las palabras de ánimo necesarias para sobrellevar los problemas y concluir esta nueva meta en mi vida. Gracias a su apoyo incondicional, su ejemplo y su amor, que ahora más que nunca valoro, me ha sido posible vencer los miedos y adquirir más seguridad en mí misma.

Gracias a mi amado Cristian, por estar a mi lado a pesar de las adversidades y ser mi mejor amigo y confidente en todo momento. Te agradezco por ser el cómplice de toda aventura, el mejor compañero de viaje y el amor de mi vida.

Quiero agradecer de forma especial a todas las personas que conforman el consorcio EU4M, por la oportunidad que me brindaron de realizar este programa de maestría y enriquecerme no solo con los conocimientos adquiridos, sino también con las experiencias multiculturales vividas a lo largo de estos dos años. Un agradecimiento especial al Prof. Neff, Annette, Tina y Mike, por su ayuda constante, por su cariño y amistad. Siempre llevaré un grato recuerdo de ustedes.

Un sincero agradecimiento también al Dr. José Ángel Sirgo, por todo el apoyo que ha brindado en la realización de este proyecto mostrando en cada momento su gran calidad humana y profesional.

## RESUMEN

El presente trabajo de fin de máster consiste en poner en funcionamiento un prototipo de péndulo invertido que pertenece al Área de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Oviedo. En este proceso de habilitación del prototipo, se ha realizado un rediseño mecánico de las piezas de acoplamiento del motor, el diseño electrónico y eléctrico del sistema y se ha implementado una plataforma que permita realizar pruebas con diferentes tipos de controladores.

Dentro del diseño electrónico y eléctrico, se ha elaborado una placa de control principal que permite acondicionar apropiadamente las señales de los sensores de posición y de ángulo, así como la señal hacia el servomotor que permite el movimiento del carro.

Con el objetivo de relacionar la programación de autómatas con los sistemas de control, se ha implementado los algoritmos de control en un PLC de la familia S7-200 del fabricante Siemens, haciendo uso de las herramientas que éste autómata brinda para la implementación de controladores clásicos como el PID.

Utilizando el asistente de configuración PID se ha establecido dos lazos de control para regular la posición del carro y el ángulo de inclinación del péndulo. Los parámetros del algoritmo son ingresados por el usuario a través de una interfaz gráfica para poder hacer la sintonización del controlador y elegir entre un controlador proporcional, proporcional-integral, proporcional-derivativo y proporcional-integral-derivativo.

Además para conocer que tan bien se adapta un controlador difuso a un sistema no lineal inestable como es el sistema de péndulo invertido, se ha implementado este tipo de algoritmo con cada una de sus etapas (fusificación, motor de inferencias, defusificación) en el autómata. El usuario puede seleccionar desde la interfaz entre una entrada o dos para el algoritmo y definir las funciones de pertenencia (conjuntos difusos) de cada señal.

Otro objetivo de este proyecto de fin de máster, ha consistido en hacer el diseño de un nuevo prototipo de péndulo invertido que sea fácil de transportar, tenga bajos costos de montaje, mantenimiento y fabricación; además de compacto y ligero.

### **PALABRAS CLAVE**

Péndulo - S7-200 - PID - Fusificación - Defusificación - Autómata

## ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivos .....	4
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
2.1 Sistema péndulo invertido .....	5
2.1.1 Modelación del sistema del péndulo .....	6
2.1.2 Determinación de los parámetros del péndulo .....	9
2.1.3 Modelación del servomotor.....	12
2.2 Sistema de Control .....	15
2.2.1 Controlador proporcional (P) .....	16
2.2.2 Controlador proporcional-integral (PI) .....	17
2.2.3 Controlador proporcional-derivativo.....	17
2.2.4 Controlador PID .....	18
2.2.5 PID discreto.....	19
2.2.6 Control Difuso.....	20
2.3 PLC Siemens S7-200.....	28
2.3.1 Módulo de entradas analógicas EM-235.....	30
<b>3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA</b> .....	<b>33</b>
3.1 Acondicionamiento de sensores .....	33
3.1.1 Acondicionamiento de la señal de ángulo de inclinación .....	34
3.1.2 Acondicionamiento de la señal de posición del carro .....	35
3.1.3 Sensores de fines de carrera .....	38
3.2 Acondicionamiento señal de actuador.....	39
3.2.1 Acondicionamiento de voltaje.....	39
3.2.2 Acondicionamiento de corriente .....	40
3.3 Alimentación del subsistema electrónico .....	44
3.3.1 Fuente de $\pm 24V$ .....	44
3.3.2 Fuente de $\pm 15V$ y $\pm 5V$ .....	45
3.4 Implementación y montaje del subsistema electrónico .....	47
3.4.1 Placas electrónicas.....	47
3.4.2 Montaje y conexión del subsistema electrónico.....	50
<b>4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN MECÁNICA</b> .....	<b>53</b>
4.1 Modificaciones mecánicas del prototipo péndulo invertido.....	54

4.1.1	Sistema de transmisión en la planta péndulo invertido .....	54
4.1.2	Acoplamientos mecánicos .....	55
4.1.3	Selección de acoplamiento para sistema péndulo invertido .....	58
4.1.4	Conjunto de acople servomotor-mecanismo .....	59
4.2	Diseño mecánico de un nuevo prototipo de péndulo invertido .....	61
4.2.1	Selección de mecanismo .....	61
4.2.2	Descripción del diseño mecánico .....	68
4.2.3	Cálculos justificativos de la transmisión por poleas y correa dentada .....	80
4.2.4	Análisis de elementos finitos .....	86
<b>5.</b>	<b>DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL .....</b>	<b>93</b>
5.1	Descripción del programa de control .....	93
5.1.1	Identificación de eventos, acciones y estados .....	94
5.1.2	Identificación de transiciones .....	95
5.1.3	Descripción de acciones internas en cada estado .....	98
5.2	Descripción de la interfaz de usuario .....	110
5.2.1	Transferencia de variables desde el autómata a la interfaz .....	111
5.2.2	Diseño de pantallas y configuración de objetos .....	113
<b>6.</b>	<b>PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>	<b>121</b>
6.1	Controlador PID .....	121
6.1.1	Control de posición .....	121
6.1.2	Control de ángulo de inclinación del péndulo .....	124
6.1.3	Control de posición y ángulo de inclinación del péndulo .....	127
6.2	Controlador Difuso .....	130
6.2.1	Controlador difuso con una sola entrada .....	131
6.2.2	Controlador difuso con dos entradas .....	132
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>133</b>
7.1	Conclusiones .....	133
7.2	Trabajos futuros .....	136
<b>8.</b>	<b>PRESUPUESTO .....</b>	<b>137</b>

# 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la aplicación de los autómatas programables está muy difundida a nivel industrial para realizar el control y automatización de varios procesos. Desde su aparición en el mercado, ha tenido como objetivo simplificar el control de circuitos complejos de automatización que antiguamente se realizaban de manera cableada usando relés y contactores. Este dispositivo electrónico se integra al proceso a través de un software en el cual se especifica las operaciones a realizar, lo que hace de su programación y manejo requisitos indispensables en el campo de la Ingeniería.

Conjuntamente con la automatización de procesos, se han venido desarrollando a lo largo de los últimos años técnicas de control para sistemas mecánicos lo que ha permitido la creación de máquinas inteligentes y un gran avance en la robótica con el propósito de producir materiales peligrosos, fabricar a gran escala, y desarrollar vehículos autónomos, etc.

El interés por estudiar las diferentes técnicas de control y sus respuestas en tiempo real, ha hecho del sistema de péndulo invertido un problema clásico de control porque es un sistema altamente no lineal, con múltiples entradas y una sola salida y pertenece a una clase especial de sistemas mecánicos llamados sistemas mecánicos subactuados, en los cuales hay menos actuadores que grados de libertad.

La vinculación de los estudiantes de pregrado y postgrado con técnicas de control tanto convencionales como modernas aplicadas a sistemas de control no lineales usando como controlador un autómata programable, han motivado el desarrollo de este proyecto de fin de máster, en el que se pretende rediseñar y controlar por medio de un autómata programable (PLC) un prototipo de péndulo invertido. A continuación se describe los antecedentes del proyecto, así como los objetivos propuestos.

## 1.1 Antecedentes

La planta de péndulo invertido, es un sistema no lineal ampliamente usado para la comprobación de diferentes algoritmos de control, desde los tradicionales como los controladores PID hasta más sofisticados como el control difuso, controladores predictivos, robustos, redes neuronales, etc., es decir es un punto de referencia para comprobar el funcionamiento y la eficacia de un nuevo método de control, además permite mostrar las principales diferencias de control en lazo abierto y de su estabilización en lazo cerrado.

Las aplicaciones del péndulo invertido son muy variadas por ejemplo se utiliza para el control de estabilización de grúas, el desarrollo de vehículos con sistema pendular Segway<sup>1</sup>, la modelación para el control sísmico de estructuras de edificación [1], en el área aeroespacial para el control activo de un cohete con el fin de mantenerlo en posición vertical en el momento del despegue, la modelación de robots bípedos caminantes, estabilización de balance de barcos y aviones, y el posicionamiento de satélites entre otras aplicaciones [2].



**Figura 1.1** Aplicaciones del sistema péndulo invertido.

---

<sup>1</sup> Transportador personal ligero de dos ruedas basado en un sistema pendular

La implementación de este proyecto parte de una maqueta que fue utilizada para el proyecto de fin de carrera titulado “Desarrollo de la planta experimental péndulo invertido” del año 1998. Esta planta está formada por un carro móvil que se mueve a lo largo de una guía de 80 cm y sobre el cual se encuentra el péndulo oscilante. El sistema usa un servomotor para proporcionar el movimiento y como sistema de transmisión de energía un sistema de correa dentada y poleas. La posición del carro se obtenía originalmente de un encoder incluido en el servomotor y el ángulo de inclinación del péndulo a través de una señal de voltaje que proviene de un potenciómetro. La Figura 1.1 muestra la planta de péndulo invertido de la que se disponía.



**Figura 1.2** Planta péndulo invertido

El control del péndulo se lo realizaba por computador usando el puerto paralelo y las placas electrónicas permitían la adaptación de las señales de sensores y actuadores utilizando conversores digital-análogo y viceversa para su acondicionamiento. Partiendo de estas condiciones, uno de los objetivos es simplificar los circuitos electrónicos y hacer uso de los recursos que dispone el autómatas de la marca Siemens serie S7-200 para el acondicionamiento de señales de entradas y salidas.

## ***1.2 Objetivos***

El objetivo principal de este proyecto es el rediseño mecánico de la planta y el control mediante un autómata programable para la realización de experimentos de control para la estabilización del péndulo invertido.

Dentro de los objetivos específicos se encuentran los siguientes:

- Diseñar los circuitos electrónicos que permitan adaptar las señales de los sensores y actuadores del sistema al autómata.
- Rediseñar las piezas mecánicas que permitan poner en funcionamiento la planta.
- Diseñar el esquema eléctrico y seleccionar las protecciones apropiadas para el sistema.
- Realizar el análisis, diseño e implementación del software en el PLC que permita probar diferentes estrategias de control.
- Diseñar un nuevo sistema de péndulo invertido con criterios de manejabilidad y coste que permita su implementación en el futuro.

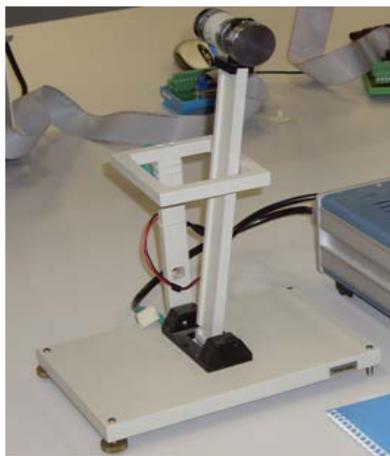
## 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se abarcará los conceptos más importantes involucrados en este proyecto como lo son el sistema de péndulo invertido y su modelación matemática y una breve descripción de técnicas de control a implementar, así como también, la descripción de las características más importantes del autómata programable que se utiliza.

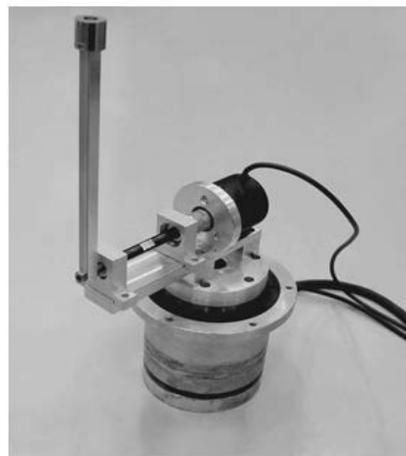
### 2.1 Sistema péndulo invertido

El péndulo invertido es un tipo especial de sistema subactuado y constituye un punto de referencia completo e interesante para la investigación de sistemas de control porque abarca temas como el modelado e identificación de parámetros de sistemas, control de posición y velocidad, control no lineal, compensación por rozamiento y control híbrido (estabilización de péndulo y swing up<sup>2</sup>) [2].

Existen algunas variaciones de esta planta como lo son el péndulo invertido sobre un carro, péndulo con disco inercial, péndulo de Furuta y péndulo con masa radialmente móvil. Algunos de estos tipos se muestran en la Figura 2.1.



a) Péndulo con masa inercial



b) Péndulo de Furuta

**Figura 2.1** Variaciones de péndulo invertido

---

<sup>2</sup> Consiste en el levantamiento inicial del péndulo invertido

El presente proyecto se enfoca en el péndulo invertido sobre un carro. En esta variación se dispone de una barra cilíndrica que oscila sobre un pivote fijo colocado encima de un carro que se mueve a lo largo de una trayectoria rectilínea como se observa en la Figura 2.2.

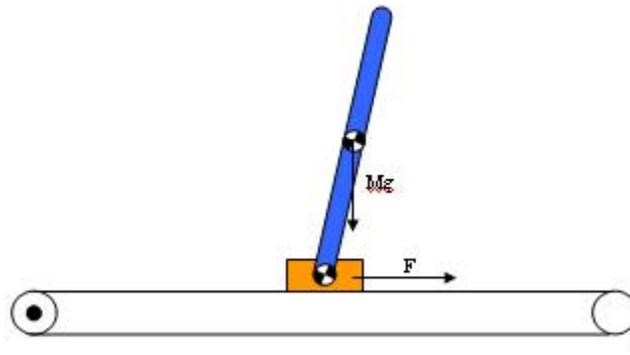


Figura 2.2 Péndulo invertido sobre un carro

### 2.1.1 Modelación del sistema del péndulo

Para hacer uso de algún algoritmo de control hay que analizar el funcionamiento del sistema para lo cual se usa la modelación matemática. En este sistema, el primer paso es obtener las ecuaciones dinámicas que describan el movimiento del péndulo cuando sobre el carro se aplica una fuerza  $F$ . El péndulo está regido por las ecuaciones de movimiento rotacional mientras que el carro se basa en las de movimiento lineal.

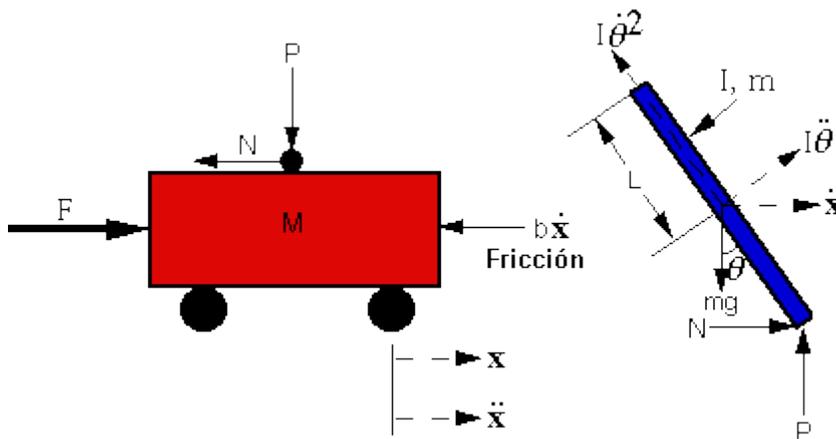


Figura 2.3 Diagrama de cuerpo libre del sistema [3]

Donde:

M	masa del carro
m	masa del péndulo
b	fricción del carro
l	longitud al centro de masa del péndulo
I	inercia del péndulo
F	fuerza aplicada al carro
x	coordenadas de posición del carro

Iniciando con la sumatoria de fuerzas  $\sum F = ma$  presentes en el carro en la dirección del movimiento (eje x) se tiene:

$$M\ddot{x} + b\dot{x} + N = F \quad (2.1)$$

Por otro lado en la Figura 2.3 también se puede apreciar las componentes dinámicas del péndulo donde  $l\dot{\theta}^2$  es la aceleración centrípeta generada por el péndulo, el valor de  $\ddot{x}$  se produce por la aceleración del carro y  $l\ddot{\theta}$  es la aceleración angular del péndulo que siempre se muestra perpendicular al mismo.

Sumando las fuerzas en la dirección horizontal del péndulo se obtiene:

$$N = m\ddot{x} + m \frac{d^2}{dt^2}(l\sin\theta)$$

$$N = m(\ddot{x} + l\ddot{\theta}\cos\theta - l\dot{\theta}^2\sin\theta) \quad (2.2)$$

Sustituyendo la ecuación (2.2) en (2.1) se tiene:

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta}\cos\theta + ml\dot{\theta}^2\sin\theta = F \quad (2.3)$$

Se procede a realizar el sumatorio de fuerzas perpendiculares  $\sum F = ma$  al radio de giro del péndulo:

$$P\sin\theta + N\cos\theta - mg\sin\theta = ml\ddot{\theta} + m\ddot{x}\cos\theta \quad (2.4)$$

Usando el sumatorio de momentos  $M = I\alpha$  donde M es el sumatorio de los momentos externos alrededor del centro de masa de un cuerpo, I es el momento de inercia y  $\alpha$  la aceleración angular se obtiene:

$$-Pl\sin\theta - Nl\cos\theta = I\ddot{\theta} \quad (2.5)$$

Resolviendo las dos últimas ecuaciones para simplificar los términos de P y N se consigue:

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl\sin\theta = -ml\ddot{x}\cos\theta \quad (2.6)$$

Tanto la ecuación (2.3) como la ecuación (2.6) describen el movimiento del péndulo, se debe resaltar que no se ha considerado la fricción del eje en el pivote.

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl\sin\theta = -ml\ddot{x}\cos\theta$$

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta}\cos\theta + ml\dot{\theta}^2\sin\theta = F$$

Linealizando las ecuaciones alrededor de  $\theta = \pi$ , es decir para  $\theta = \pi + \phi$ , donde  $\phi$  representa un pequeño ángulo en la dirección vertical entonces  $\cos\theta = -1$  y  $\sin\theta = -\phi$  [3].

$$(I + ml^2)\ddot{\phi} - mgl\phi = ml\ddot{x} \quad (2.7)$$

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\phi} = u \quad (2.8)$$

A partir de estas ecuaciones se puede obtener la función de transferencia que relaciona la respuesta del sistema a una señal de entrada, para lo cual se aplica la transformada de Laplace, considerando condiciones iniciales nulas.

$$(I + ml^2)\phi(s)s^2 - mgl\phi(s) = mlX(s)s^2 \quad (2.9)$$

$$(M + m)X(s)s^2 + bX(s)s - ml\phi(s)s^2 = U(s) \quad (2.10)$$

Despejando X(s) de la ecuación (2.9) y reemplazando ese valor en (2.10) se obtiene la siguiente función de transferencia que relaciona la señal de salida que es el ángulo con la señal de entrada que es la fuerza aplicada al carro.

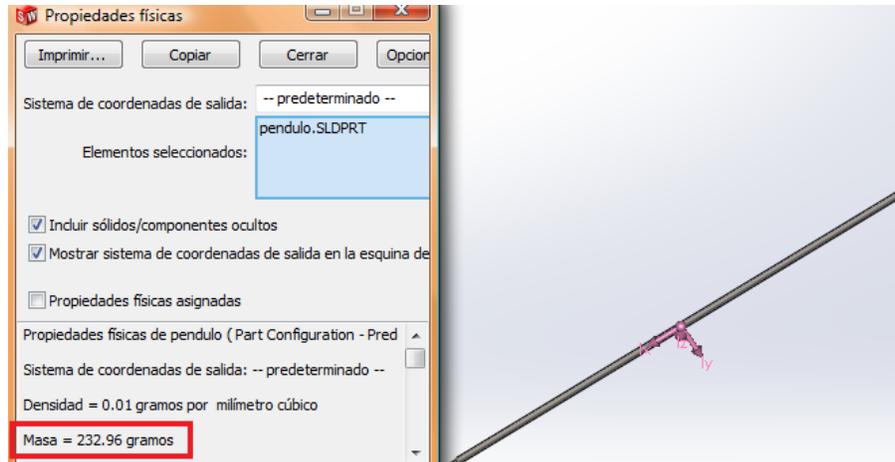
$$\frac{\phi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{ml}{q}s}{s^3 + \frac{b(I + ml^2)}{q}s^2 - \frac{(M + m)mgl}{q}s - \frac{bmgl}{q}} \quad (2.11)$$

Donde q es:

$$q = [(M + m)(I + ml^2) - (ml)^2] \quad (2.12)$$

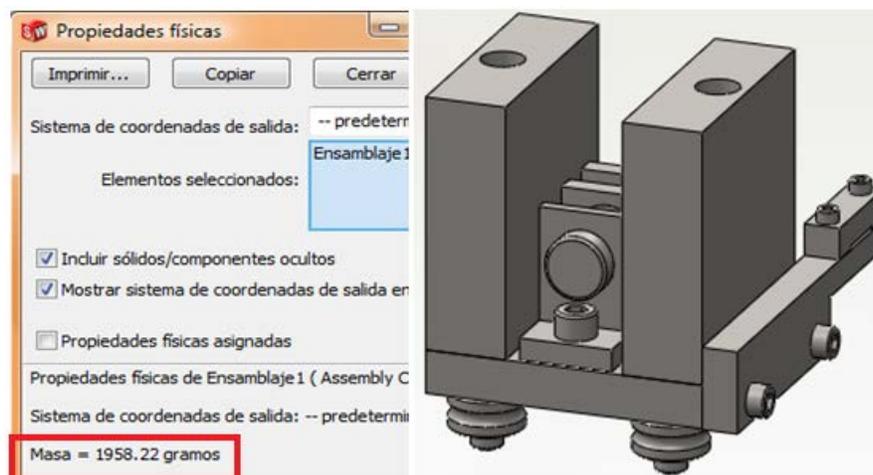
### 2.1.2 Determinación de los parámetros del péndulo

A partir del modelo mecánico dibujado en el software CAD SolidWorks, y aplicando apropiadamente el tipo de materiales a cada una de las piezas del sistema es posible obtener los parámetros que se requieren en la función de transferencia. Por ejemplo, el valor de la masa del péndulo que es de acero es igual a 232,96 g como se muestra en la Figura 2.4.



**Figura 2.4** Masa del péndulo en SolidWorks

Lo mismo se puede hacer para obtener la masa del carro que es igual a 1958,22 g.



**Figura 2.5** Masa del carro en SolidWorks

Para obtener la fricción estática del carro se utilizó el deslizamiento del mismo sobre una pendiente como se indica en la Figura 2.6 cuyo objetivo es establecer el valor del ángulo para el cual el carro empieza a deslizarse.

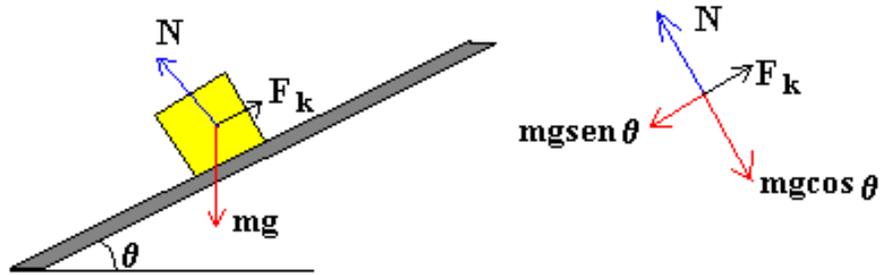


Figura 2.6 Posición del carro para medir fricción [4]

Donde la fuerza de fricción máxima se produce a la altura a la cual el carro empieza a deslizar:

$$Fr_{max} = mgsen\theta \quad (2.13)$$

Y la fuerza normal es igual a:

$$N = mgcos\theta \quad (2.14)$$

Además la fuerza de rozamiento también es igual a:

$$Fr = \mu N \quad (2.15)$$

Utilizando estas tres ecuaciones es posible determinar el coeficiente estático  $\mu = \tan\theta$  que en nuestro sería igual a 0,19.

Para conocer el momento de inercia del péndulo se utiliza la fórmula dada para un cilindro:

$$I = \frac{1}{2}mR^2 \quad (2.16)$$

Donde  $m$  es la masa del péndulo y  $R$  es el radio del péndulo y es igual a 4 mm<sup>2</sup>, por lo tanto su cálculo es igual a 1864 g mm<sup>2</sup>.

Finalmente el centro de masa del péndulo que tiene una densidad uniforme está situado en el centro del mismo, por lo tanto para medir la longitud al centro de masa, se mide su longitud total y se divide para dos lo que da un valor de 0,3 m.

La Tabla 2.1 resume los parámetros del péndulo en unidades del sistema internacional:

**Tabla 2.1** Parámetros del sistema péndulo invertido

Parámetro	Valor	Unidades
Masa del péndulo	0,233	Kg
Masa del carro	1,9582	Kg
Fricción del carro	0,19	N/m/seg
Longitud al centro de masa	0,3	m
Inercia del péndulo	0,000001864	Kgm <sup>2</sup>

Utilizando Matlab y reemplazando los parámetros obtenidos se tiene la siguiente función de transferencia:

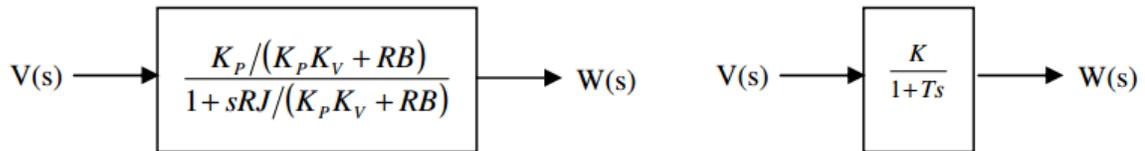
$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{0,0001179s}{6,92e - 005 s^3 + 6,72e - 006 s^2 - 0,002532 s - 0,0002195} \quad (2.17)$$

### 2.1.3 Modelación del servomotor

Para mover el carro del sistema se hace uso del servomotor RS130ER1000 fabricado por la empresa PARVEX que transmite la potencia al mecanismo través de una correa dentada, el motor tiene las siguientes características:

- Torque a baja velocidad: 0,13 Nm
- Corriente a baja velocidad: 2,7 A
- Voltaje nominal : 23,7 V
- Velocidad nominal: 3000 rpm
- Corriente máxima a baja velocidad: 9A

Considerando que un servomotor es un sistema de primer orden se puede obtener la función de transferencia que relacione el voltaje aplicado y la velocidad producida usando las siguientes expresiones:

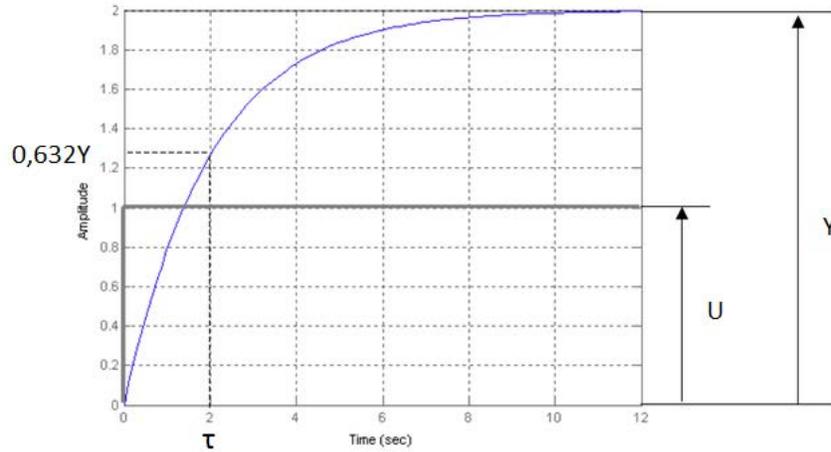


**Figura 2.7** Función de transferencia de un servomotor [5]

Donde:

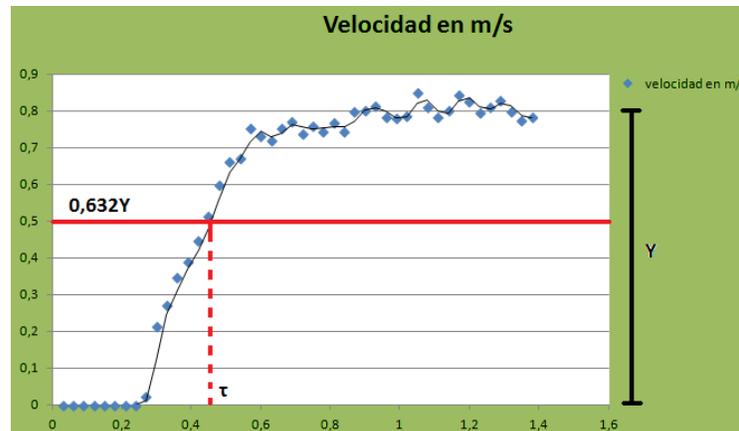
- Kp    Constante de par del motor
- Kv    Constante de velocidad del motor
- R    Resistencia de los devanados del motor
- J    Momento de inercia
- B    Coeficiente de rozamiento viscoso
- V    Voltaje aplicado al motor
- W    Velocidad del motor

Al no tener todos los datos antes mencionados del motor, se obtiene la función de transferencia a partir de la respuesta del sistema ante una señal paso [6]. Para un sistema de primer orden la respuesta a la señal paso es la que se muestra en la Figura 2.8.



**Figura 2.8** Respuesta paso de un sistema de primer orden

Para obtener la gráfica de la velocidad del motor en el tiempo, cuando se aplica una entrada paso de voltaje, se realizó un pequeño programa en el PLC S7200 para obtener los datos de posición cada 30 ms y almacenarnos en una tabla. A partir de estos datos es posible sacar la velocidad y graficarla obteniendo como resultado lo siguiente:



**Figura 2.9** Respuesta paso del servomotor

Para calcular la ganancia del sistema se utiliza la siguiente expresión:

$$K = Y/U \quad (2.18)$$

Donde  $Y$  es la velocidad alcanzada y  $U$  es el voltaje aplicado al servomotor que para la prueba realizada fue de 18,57V.

$$K = \frac{0,8 \text{ m/s}}{18,57V} = 0,4308$$

Y el valor de  $\tau$  obtenido de la gráfica es de 0,45 seg., con estos datos la función de transferencia del motor es la siguiente:

$$\frac{V(s)}{W(s)} = \frac{0,4308}{0,45s + 1} \quad (2.19)$$

Si se deriva la velocidad se tiene la aceleración y usando la segunda ley de Newton  $F=ma$  donde  $m$  es la masa del conjunto carro-péndulo se obtiene la fuerza que es la señal de entrada de la función de transferencia del péndulo. El modelo completo que relaciona el voltaje aplicado al motor con el ángulo de giro del péndulo se indica en la Figura 2.10.

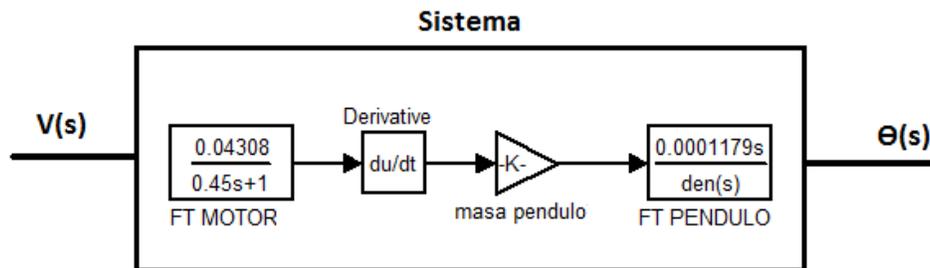


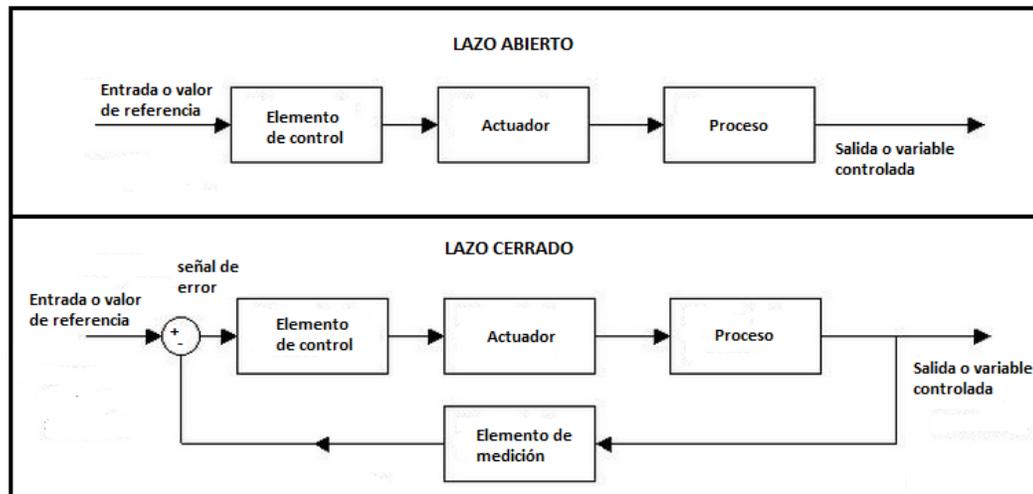
Figura 2.10 Modelo del sistema péndulo invertido

## 2.2 Sistema de Control

Un sistema de control es un conjunto de elementos cuyo objetivo es mantener a las variables de salida dentro de un rango o una consigna preestablecida por medio de la manipulación de variables de control. Los sistemas de control deben asegurar la estabilidad del sistema, ser robustos ante perturbaciones o errores en los modelos, evitar comportamientos bruscos, ser de fácil implementación y operación en tiempo real.

Los sistemas de control se pueden clasificar en sistemas en lazo abierto, en donde la acción de control es independiente de la variable de salida y sistemas en lazo cerrado, en donde la acción de control si depende de la salida.

La Figura 2.11 ilustra estos dos tipos de sistemas de control y sus elementos principales.



**Figura 2.11** Tipos de sistemas de control

El bloque proceso representa el sistema a controlar, los elementos de medición son los sensores que permiten medir la variable a regular, el elemento de control o controlador se encarga de mantener la variable de salida en el valor de referencia predeterminado y el actuador es un elemento final de control (motor, bomba, resistencia, etc.) que modifica la señal de salida en base al valor que le envía el controlador.

### 2.2.1 Controlador proporcional (P)

En este tipo de controlador, la señal de accionamiento es proporcional al error, es decir la señal del error es amplificada antes de ser enviada al sistema para corregir la variable de salida. El factor de amplificación se conoce como ganancia del controlador y la función de transferencia viene dada por:

$$C(s) = K_p \quad (2.20)$$

### 2.2.2 Controlador proporcional-integral (PI)

La acción integral es proporcional al error acumulado y en conjunto con la acción proporcional elimina el error en estado estacionario. Dentro de los inconvenientes que presenta este controlador se tiene que aumenta el tiempo de establecimiento, la respuesta del sistema es más lenta y el periodo de oscilación es mayor que la acción proporcional [7].

$$C(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.21)$$

$T_i$  es el tiempo requerido para que la acción integral contribuya a la salida del controlador en la misma cantidad que la acción proporcional [8]. Si  $T_i$  es un tiempo muy grande el efecto de la acción integral es pequeño y viceversa. La función de transferencia para este controlador es:

$$C_{PI}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.22)$$

### 2.2.3 Controlador proporcional-derivativo

Un problema del controlador PI es que solo considera los errores ocurrido en el pasado, es decir no intenta predecir lo que sucederá con la señal en un futuro próximo.

La acción derivativa compensa este suceso ya que mide la pendiente instantánea de  $e(t)$ , prediciendo que tan grande será el sobreimpulso y efectuando las correcciones necesarias antes de que se produzca el sobreimpulso.

$$C(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.23)$$

$T_d$  es el tiempo derivativo o de adelanto y es una medida de la rapidez con la que se compensa un cambio en la variable controlada. Este controlador se utiliza para mejorar el amortiguamiento del sistema y su función de transferencia es:

$$C_{PD}(s) = K_p + K_p T_d s \quad (2.24)$$

#### 2.2.4 Controlador PID

Un controlador PID aprovecha las ventajas que tienen cada una de las acciones básicas proporcional, integral y derivativa; de esta manera si el error varía de manera lenta en el tiempo prevalecen la acción proporcional e integral y si la variación del error es rápido predomina la acción derivativa. La salida de este controlador es:

$$C(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.25)$$

La función de transferencia es la siguiente:

$$C_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.26)$$

La Tabla 2.2 muestra cómo afecta la variación de las diferentes constantes de las acciones básicas al sistema y su respuesta:

**Tabla 2.2** Reglas heurísticas para ajuste [8]

<b>PARÁMETRO</b>	<b>Kp aumenta</b>	<b>Ti disminuye</b>	<b>Td aumenta</b>
<b>Estabilidad</b>	disminuye	disminuye	aumenta
<b>Velocidad</b>	aumenta	aumenta	aumenta
<b>Error estacionario</b>	no elimina	elimina	no elimina
<b>Área de error</b>	disminuye	disminuye hasta cierto punto	disminuye
<b>Perturbación control</b>	aumenta bruscamente	aumenta gradualmente	aumenta bruscamente
<b>Frecuencia lazo</b>	no afecta hasta cierto punto	disminuye	aumenta

### 2.2.5 PID discreto

En la actualidad varios sistemas de control usan microcontroladores o PLC's en los que el algoritmo de control se lo implementa de manera digital. Los sistemas analógicos son continuos mientras que los sistemas digitales son discontinuos, es decir, sus valores son capturados cada cierto tiempo, a este tiempo se lo conoce como período de muestreo  $T$  y define el número de veces por segundo que se realiza la conversión análoga-digital.

El controlador PID depende directamente de este periodo de muestreo al igual que la respuesta del sistema.  $T$  debe ser menor que una décima parte de la constante de tiempo del sistema que se espera en lazo cerrado [9].

Para la implementación digital de un PID se debe obtener las aproximaciones para la derivada y la integral de la ecuación (2.25). Considerando  $u(k)$  como la salida del controlador se tiene:

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (2.27)$$

La representación digital de la acción integral es un sumario al que se le puede hacer una aproximación rectangular o trapezoidal.

$$u_i(k) = u_i(k-1) + T \cdot e(k-1) \quad (2.28)$$

$$u_i(k) = u_i(k-1) + \frac{T}{2}(e(k) + e(k-1)) \quad (2.29)$$

La ecuación (2.28) es el resultado obtenido por la aproximación rectangular y la ecuación (2.29) por la aproximación trapezoidal [9]. Por lo tanto el PID discreto será igual a:

$$u(k) = K_i \cdot u_i + K_p \cdot e(k) - k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (2.30)$$

## 2.2.6 Control Difuso

La lógica difusa es una extensión de la lógica booleana y fue introducido en los años 60 para implementar controladores en plantas de difícil modelación debido a su complejidad y no linealidad. Ha sido muy usado en aplicaciones industriales básicamente porque se adapta muy bien a casos particulares usando pocas variaciones de parámetros, combina apropiadamente expresiones lingüísticas con valores numéricos y no hace uso de algoritmos complejos.

### 2.2.6.1 Lógica Difusa

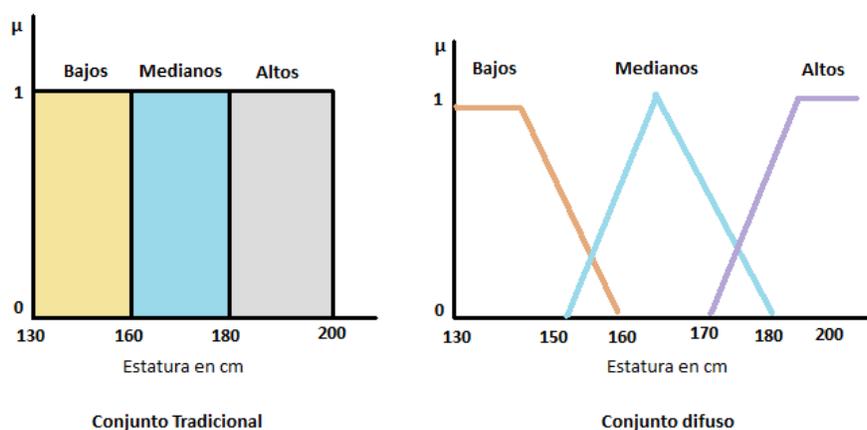
La lógica difusa no utiliza valores estrictos (por ejemplo de 0 o 1) para clasificar a un elemento dentro de un conjunto. Por ejemplo si se considera que una persona es alta si mide 1.80 m o más, y que es baja de ocurrir lo contrario, si una persona mide 1,799m estaría dentro del grupo de personas bajas porque no cumple el requisito estricto preestablecido según la lógica tradicional, pero en la realidad esa persona tiene un mayor grado de pertenencia al grupo de personas altas que de bajas.

La lógica difusa trata de usar valores intermedios entre 0 o 1 para clasificar a un elemento dentro de un conjunto, es decir en lugar de los términos *pertenece* o *no pertenece* se usa la expresión *grado de pertenencia* a un conjunto.

### 2.2.6.2 Conjuntos difusos

Un conjunto difuso puede contener elementos de forma parcial y normalmente están asociados a una variable lingüística. En este tipo de variables, los valores son palabras o sentencias y no números. Por ejemplo si se habla de la estatura de un grupo de personas se puede tener “bajos”, “medianos”, y “altos” como variables lingüísticas que a la vez se traducen en conjuntos difusos.

En la Figura 2.12 se puede apreciar la diferencia entre los conjuntos clásicos en donde la función de pertenencia solo puede tener dos valores 0 o 1, y los conjuntos difusos cuya función de pertenencia puede tener valores intermedios.

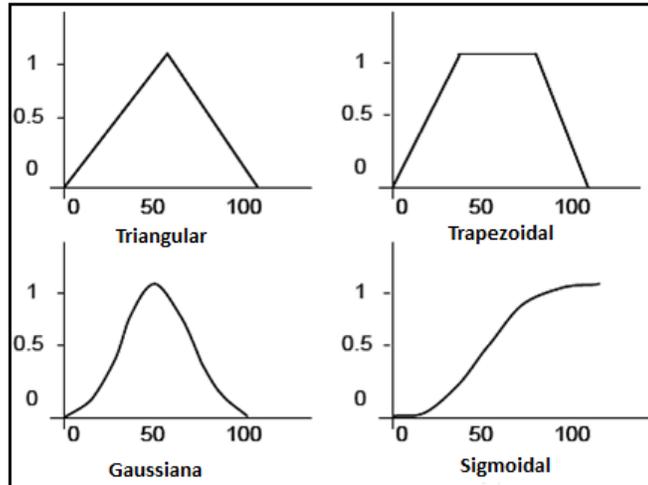


**Figura 2.12** Diferencia entre conjunto clásico y difuso

### 2.2.6.3 Funciones de membrecía

Las funciones de pertenencia o membrecía indica el grado de pertenecía de un elemento a un conjunto difuso y pueden presentar varias geometrías pero se debe cumplir que la función tome valores entre 0 y 1 con continuidad. Las funciones más utilizadas son la triangular, trapezoidal,

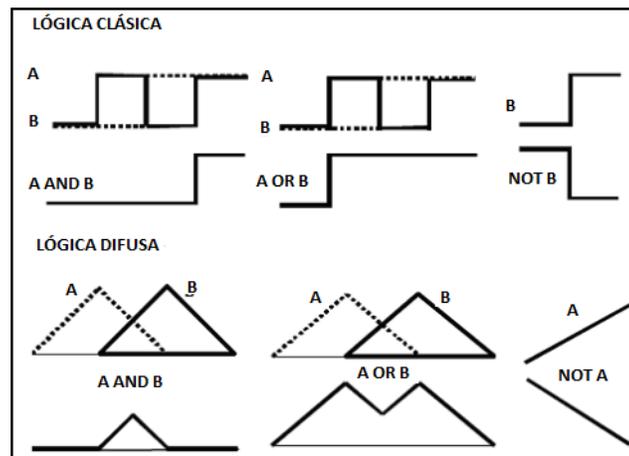
gaussiana, campana, sigmoideal, etc. La Figura 2.13 ilustra las funciones de membresía más utilizadas.



**Figura 2.13** Funciones de membresía

#### 2.2.6.4 Operaciones entre conjuntos difusos

Las operaciones básicas de unión, intersección y complemento de los conjuntos tradicionales también se aplican a los conjuntos difusos y cumplen además las mismas propiedades asociativa, conmutativa y distributiva. Estas operaciones se observan en la Figura 2.14.



**Figura 2.14** Operaciones entre conjuntos difusos

### 2.2.6.5 Sistema de lógica difusa

Un sistema de lógica difusa está compuesto por un bloque de fusificación, una máquina de inferencias basada en reglas y un bloque de defusificación como se muestra en la Figura 2.15.

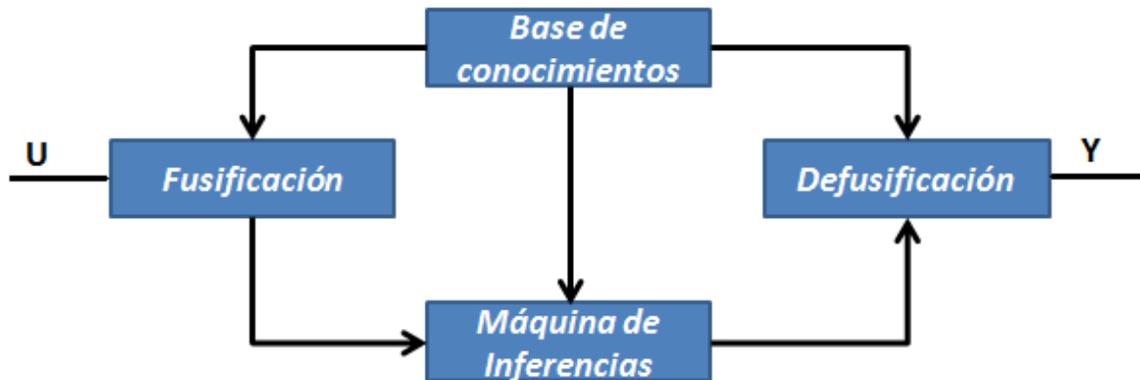


Figura 2.15 Sistema de lógica difusa

### 2.2.6.6 Fusificación

En esta etapa se convierte cada una de las variables de entrada en variables difusas. Para esto se calcula el grado de pertenencia de la variable a cada uno de los conjuntos difusos. Con el objetivo de ilustrar de mejor manera cada una de las etapas del sistema de lógica difusa se utiliza el siguiente ejemplo [10].

Se desea controlar el tiempo de regadío en un sembrío en base a la temperatura del ambiente y la humedad del suelo. Por lo tanto se tiene la siguiente información del sistema:

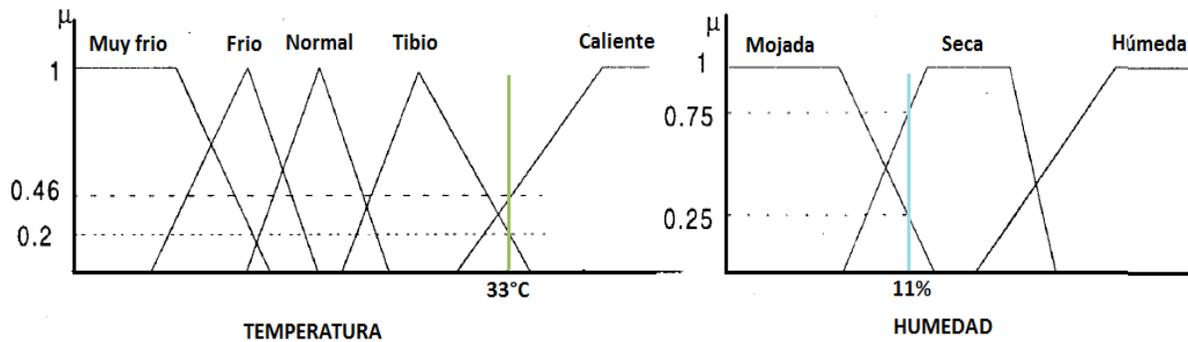
- Variables de entrada: temperatura y humedad
- Variable de salida: tiempo de regadío

El primer paso es establecer los conjuntos difusos para cada entrada:

- Conjuntos difusos temperatura: muy frio, frio, normal, tibio, caliente.

- Conjuntos difusos humedad: seca, húmeda, mojada.

Como funciones de membrecía se utiliza funciones triangulares y trapezoidales. Para un caso particular en donde la temperatura es de 33° y la humedad del 11% se tiene:



**Figura 2.16** Funciones de membrecía de variables de entrada

Por lo tanto en esta primera etapa como resultado de la fusificación se tiene que si la temperatura es de 33° C, las variables difusas de temperatura son:

- 0,46 en el conjunto *Caliente*.
- 0,2 en el conjunto *Tibio*.

Y para una humedad del 11%:

- 0,75 en el conjunto *Seca*.
- 0,25 en el conjunto *Mojada*.

### 2.2.6.7 Base de conocimiento

Contiene las reglas lingüísticas del control y la información de los respectivos conjuntos difusos para cada variable de entrada y su efecto en los conjuntos difusos de salida. Las reglas son del tipo:

**Si  $X1$  es  $A1$  y  $X2$  es  $A2$  y... y  $Xm$  es  $Am$**

**Entonces  $Y1$  es  $B1$  y  $Y2$  es  $B2$  y... y  $Yn$  es  $Bn$**

En donde  $A1, A2, \dots, Am$  son los términos lingüísticos que caracterizan los conjuntos difusos para las variables de entrada y  $B1, B2, \dots, Bn$  son los términos lingüísticos que caracterizan los conjuntos difusos para las variables de salida.

Si se elige el conector **Y (AND)** entre las proposiciones quiere decir que se elige el valor **mínimo** entre las dos variables para reflejarlo en el conjunto difuso de salida.

$$u_{A1 \text{ and } A2}(x, y) = \min\{\mu_{A1}(x), \mu_{A2}(y)\} \quad (2.31)$$

Si por otro lado se elige el conector **O (OR)** entre las proposiciones se escoge el valor **máximo** entre las dos variables para reflejarlo en el conjunto difuso de salida.

$$u_{A1 \text{ or } A2}(x, y) = \max\{\mu_{A1}(x), \mu_{A2}(y)\} \quad (2.32)$$

Estas reglas se pueden obtener de la experiencia de los operarios con el proceso, o el conocimiento de los expertos de la dinámica del sistema o de un modelo de la planta.

Para el ejemplo que se está realizando se puede usar las reglas que se muestran en la Tabla 2.3 [10]:

**Tabla 2.3** Reglas lingüísticas

PARÁMETRO	TEMPERATURA					
HUMEDAD		MUY FRIO	FRIO	NORMAL	TIBIO	CALIENTE
MOJADA		corto	corto	corto	corto	corto
HÚMEDA		corto	medio	medio	medio	medio
SECA		prolongado	prolongado	prolongado	prolongado	prolongado

Existe un total de 15 posibles reglas para este sistema, pero para el caso actual de 33° C de temperatura y 11% de humedad se activarán cuatro de estas reglas que se expresan a continuación:

1. **Si** la temperatura es *caliente* (0.46) **y** la humedad es *seca* (0.25) **entonces** el tiempo es *prolongado*.
2. **Si** la temperatura es *tibia* (0.2) **y** la humedad es *húmeda* (0.75) **entonces** el tiempo es *medio*.
3. **Si** la temperatura es *tibia* (0.2) **y** la humedad es *seca* (0.25) **entonces** el tiempo es *prolongado*.
4. **Si** la temperatura es *caliente* (0.46) **y** la humedad es *húmeda* (0.75) **entonces** el tiempo es *medio*.

#### 2.2.6.8 Motor de inferencia

El motor de inferencia usa la lógica difusa para hacer un mapeo de los conjuntos difusos de entrada en los conjuntos difusos de salida, en otras palabras es la interpretación matemática de las reglas lingüísticas para obtener un valor numérico en los conjuntos de salida [11].

En el ejemplo los valores en los conjuntos difusos de salida para cada regla son:

1. Prolongado:  $\min(0.46; 0.25) = 0.25$
2. Medio:  $\min(0.2; 0.75) = 0.2$
3. Prolongado:  $\min(0.2; 0.25) = 0.2$
4. Medio:  $\min(0.46; 0.75) = 0.46$

En el caso de tener diferentes valores para un mismo conjunto de salida se debe obtener el máximo. Este tipo de regla de evaluación se denomina MIN-MAX, porque se elige el mínimo entre las proposiciones y el máximo entre dos valores del mismo conjunto difuso de salida.

Los conjuntos de salida tienen los siguientes valores como se muestra en la Figura 2.17:

- Prolongado:  $\text{máx}(0.25; 0.2) = 0.25$
- Medio:  $\text{máx}(0.2; 0.46) = 0.46$

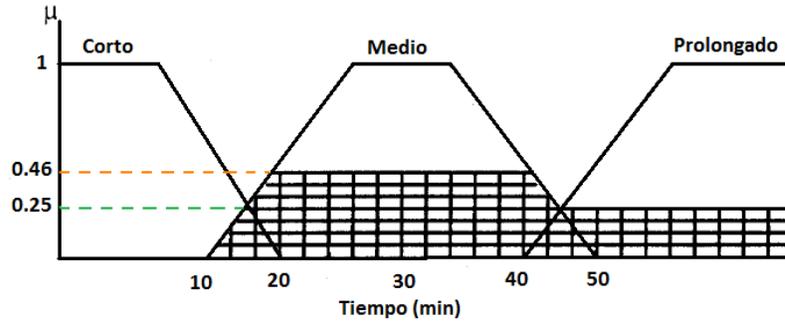


Figura 2.17 Conjuntos difusos de salida [11]

### 2.2.6.9 Defusificación

Es el proceso en el cual el subconjunto difuso que se obtiene del motor de inferencias se convierte en un valor numérico que puede ser enviado a los actuadores del sistema. Existen varios métodos de defusificación y se describen a continuación [12].

- Método del centro de área (COA) o centroide: En este método se utiliza el sumatorio del centro de gravedad de cada conjunto difuso multiplicado por el grado de pertenencia al mismo y dividido para el sumatorio de los grados de pertenencia en todos los conjuntos difusos de salida.

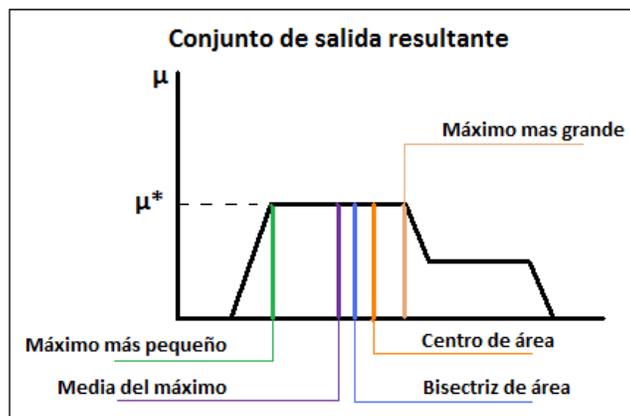
$$y_d = \frac{\sum_{l=1}^R \delta_l \mu_{Bl}(\delta_l)}{\sum_{l=1}^R \mu_{Bl}(\delta_l)} \quad (2.33)$$

En la ecuación anterior  $\delta$  es centro de gravedad de caja conjunto difuso y  $\mu$  es el grado de pertenencia a ese conjunto.

- Método de la media del máximo (MOM, middle of maximum): La salida es el promedio de los valores cuyas funciones de pertenencia alcanzan el valor máximo.

- El método del máximo más pequeño (SOM, smallest of maximum): La salida es el mínimo valor entre los valores más altos de la función de membrecía.
- Método del máximo más grande (LOM, largest of maximum): La salida es el máximo entre los valores más altos de la función de membrecía.
- Bisector de área: El resultado es el valor que separa al subconjunto difuso de salida en dos áreas iguales.

En la Figura 2.18 se muestra la diferencia entre los valores de salida usando los diferentes métodos de defusificación.



**Figura 2.18** Defusificación por diferentes métodos

Para el ejemplo que se está llevando a cabo se utiliza el método de centro de área para calcular el tiempo de riego bajo las condiciones establecidas y el resultado es 38 min [11].

### 2.3 PLC Siemens S7-200

Un autómata programable es un computador industrial que puede ser programado por el usuario para realizar una secuencia de instrucciones en tiempo real en una máquina o proceso industrial. Este dispositivo electrónico reemplaza la lógica de relés y el uso de temporizadores y contadores

electromecánicos, además provee de detección de fallas, manejo de alarmas y comunicación en red. Por otro lado, maneja una programación en varios lenguajes (lenguaje ladder LD, Diagrama de bloques de funciones FBD, lista de instrucciones IL, texto estructurado ST) lo que lo hace amigable a cualquier programador.

El autómatas programable utilizado en este proyecto es del fabricante Siemens y de la familia S7-200 llamada también micro-PLCs con un CPU 224. Con este autómatas es posible realizar operaciones booleanas, aritméticas normales y en como flotante, operaciones con contadores y temporizadores y se puede realizar comunicación con otros dispositivos [13].

La Tabla 2.4 muestra las características principales de algunos modelos de CPU de esta familia.

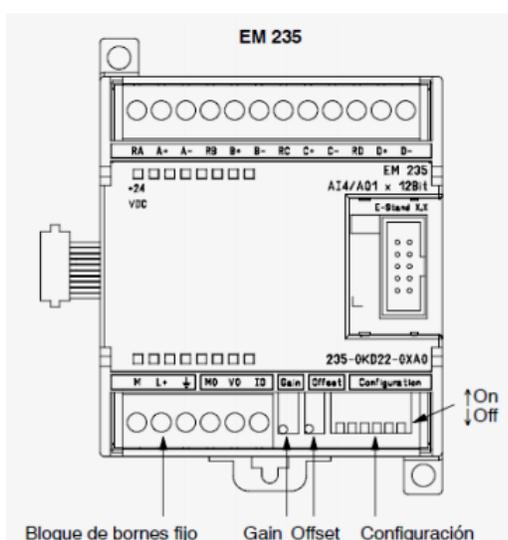
**Tabla 2.4** Comparación CPUs S7200 [13]

Función	CPU 221	CPU 222	CPU 224	CPU 224XP, CPU 224XPSi	CPU 226
Dimensiones físicas (mm)	90 x 80 x 62	90 x 80 x 62	120,5 x 80 x 62	140 x 80 x 62	190 x 80 x 62
Memoria del programa: con edición en runtime sin edición en runtime	4096 bytes 4096 bytes	4096 bytes 4096 bytes	8192 bytes 12288 bytes	12288 bytes 16384 bytes	16384 bytes 24576 bytes
Memoria de datos	2048 bytes	2048 bytes	8192 bytes	10240 bytes	10240 bytes
Memoria de backup	50 horas (típ.)	50 horas (típ.)	100 horas (típ.)	100 horas (típ.)	100 horas (típ.)
E/S integradas Digitales Analógicas	6 E/4 S	8 E/6 S	14 E/10 S	14 E/10 S 2 E/1 S	24 E/16 S
Modulos de ampliación	0 modulos	2 modulos <sup>1</sup>	7 modulos <sup>1</sup>	7 modulos <sup>1</sup>	7 modulos <sup>1</sup>
Contadores rápidos Fase simple	4 a 30 kHz	4 a 30 kHz	6 a 30 kHz	4 a 30 kHz	6 a 30 kHz
Dos fases	2 a 20 kHz	2 a 20 kHz	4 a 20 kHz	2 a 200 kHz 3 a 20 kHz 1 a 100 kHz	4 a 20 kHz
Salidas de impulsos (DC)	2 a 20 kHz	2 a 20 kHz	2 a 20 kHz	2 a 100 kHz	2 a 20 kHz
Potenciómetros analógicos	1	1	2	2	2
Reloj de tiempo real	Cartucho	Cartucho	Incorporado	Incorporado	Incorporado
Puertos de comunicación	1 RS-485	1 RS-485	1 RS-485	2 RS-485	2 RS-485
Aritmética en coma flotante	SI				
Tamaño de la imagen de E/S digitales	256 (128 E / 128 S)				
Velocidad de ejecución booleana	0.22 microsegundos/operación				

### 2.3.1 Módulo de entradas analógicas EM-235

El autómata programable S7-200 no tiene integrada la capacidad de leer y escribir datos analógicos, por lo tanto es necesario utilizar un módulo externo que se adapte a este PLC, entre los que se puede seleccionar el EM-231, EM-232 y EM-235.

En este proyecto se disponía del módulo EM-235 que tiene 4 entradas analógicas y una salida que pueden ser de voltaje o corriente. La Figura 2.19 indica la constitución física de éste módulo.

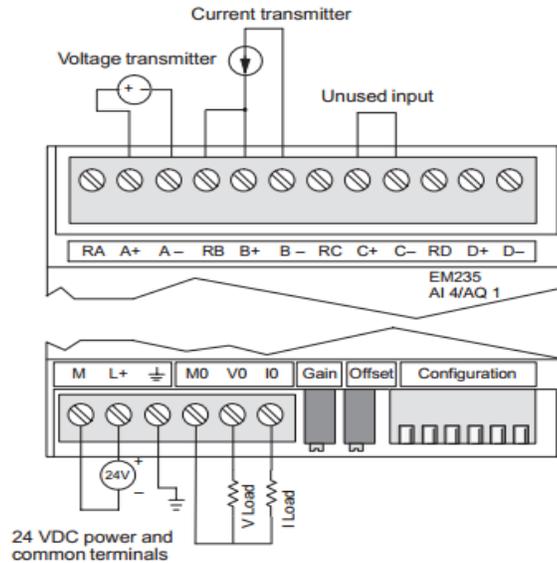


**Figura 2.19** Estructura física del módulo EM-235 [14]

Para entradas de voltaje permite valores unipolares entre 0 y 10V y para valores bipolares entre -10 y 10V, en el caso de entradas de corriente se tiene un rango entre 0 y 20 mA. Estos mismos valores son los obtenidos en caso de utilizar la salida analógica.

El tiempo de la conversión analógica-digital es menor a 250  $\mu$ s y tiene una resolución de 12 bits, es decir la conversión dará como resultado un dato de tipo palabra que varía entre -32000 y 32000 para valores bipolares y entre 0 y 32000 para valores unipolares.

La Figura 2.20 indica la conexión apropiada para señales analógicas de voltaje y corriente en éste módulo.



**Figura 2.20** Conexión de entradas y salidas de voltaje y corriente [15]

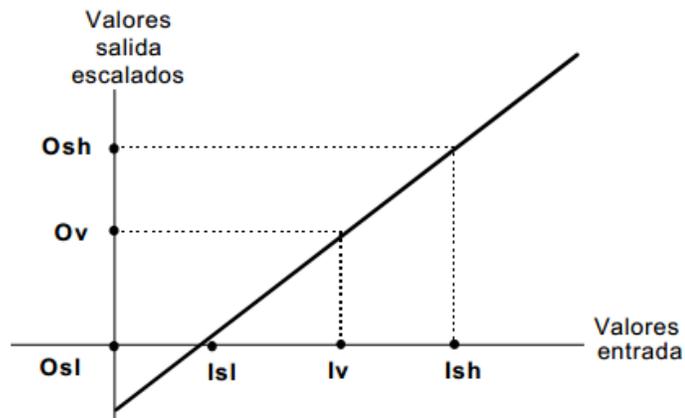
Para seleccionar los diferentes rangos de voltaje y corriente con los que se va a trabajar el módulo EM-235 dispone de interruptores de configuración. En Tabla 2.5 la se visualiza las posibles combinaciones de los interruptores.

**Tabla 2.5** Configuración de rangos de voltaje y corriente

Unipolar						Full-Scale Input	Resolution
SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6		
ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	0 to 50 mV	12.5 $\mu$ V
OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	0 to 100 mV	25 $\mu$ V
ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	0 to 500 mV	125 $\mu$ V
OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	0 to 1 V	250 $\mu$ V
ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	0 to 5 V	1.25 mV
ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	0 to 20 mA	5 $\mu$ A
OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	0 to 10 V	2.5 mV
Bipolar						Full-Scale Input	Resolution
SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6		
ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	$\pm$ 25 mV	12.5 $\mu$ V
OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF	$\pm$ 50 mV	25 $\mu$ V
OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	$\pm$ 100 mV	50 $\mu$ V
ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	$\pm$ 250 mV	125 $\mu$ V
OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	$\pm$ 500 mV	250 $\mu$ V
OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF	$\pm$ 1 V	500 $\mu$ V
ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	$\pm$ 2.5 V	1.25 mV
OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	$\pm$ 5 V	2.5 mV
OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	$\pm$ 10 V	5 mV

Con el objetivo de una interpretación correcta de los datos que se obtienen en las entradas análogas se debe realizar una conversión para lo cual Siemens dispone de una librería denominada *Scale*.

El esquema de escalado se observa en la Figura 2.21.



**Figura 2.21** Escalado de valores [16]

Y la fórmula que se usa para realizar el escalamiento es la siguiente:

$$Ov = [(Osh - Osl) * (Iv - Isl) / (Ish - Isl)] + Osl \quad (2.34)$$

Donde:

- Ov Valor de salida escalado
- Iv Valor analógico de entrada
- Osh Límite superior de la escala para el valor de salida escalado
- Osl Límite inferior de la escala para el valor de salida escalado
- Ish Límite superior de la escala para el valor analógico de entrada
- Isl Límite inferior de la escala para el valor analógico de entrada

### 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA

El sistema péndulo invertido está constituido por un subsistema mecánico, un subsistema electrónico y subsistema de control que trabajan en conjunto para lograr la estabilización del péndulo. En este capítulo, se diseña el subsistema electrónico que es el encargado del acondicionamiento de las señales de entrada al sistema de control y de las salidas del mismo para activar el mecanismo. Además se encarga de la alimentación de voltaje para todos los sensores y actuadores. La Figura 3.1 ilustra un esquema completo del sistema.

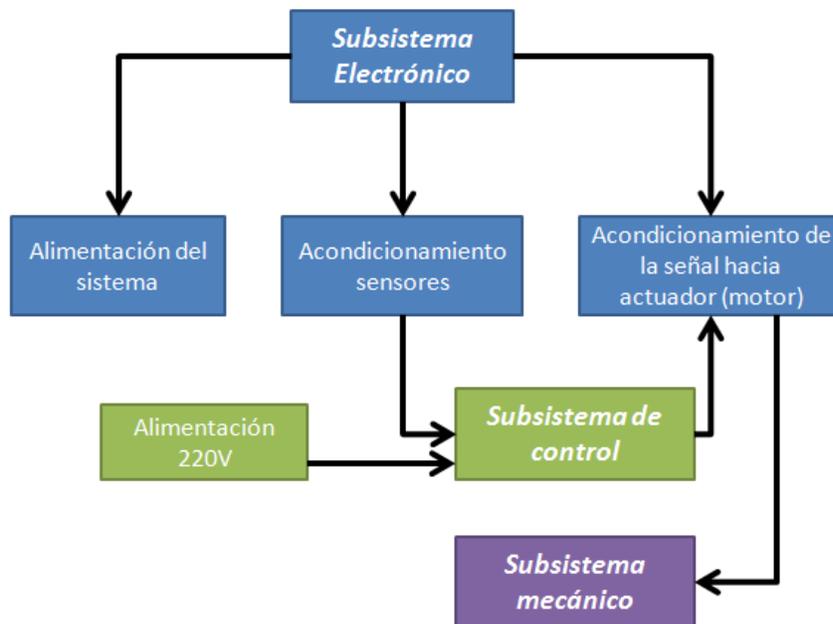


Figura 3.1 Esquema del sistema

A continuación se detalla cada componente del subsistema electrónico y su implementación.

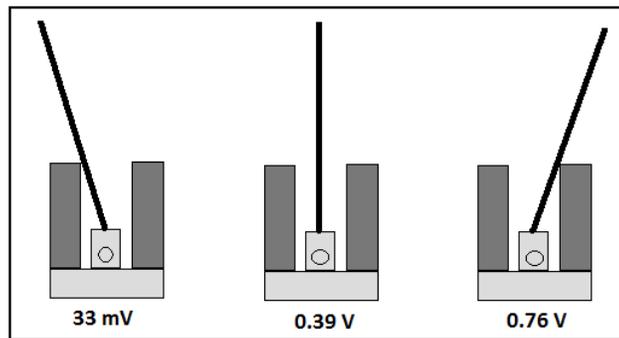
#### 3.1 Acondicionamiento de sensores

Para el control del péndulo invertido es necesario tener los datos del ángulo de inclinación del péndulo y la posición del carro. Para esto se utiliza dos sensores, un potenciómetro y un encoder incremental cuyas señales deben ser adaptadas antes de enviarlas al controlador.

### 3.1.1 Acondicionamiento de la señal de ángulo de inclinación

Existen algunas posibilidades para medir el ángulo de inclinación por ejemplo se puede utilizar un acelerómetro, un giroscopio, un arreglo de sensores de efecto hall, potenciómetro, etc. Debido a los resultados muy buenos obtenidos en otros proyectos que han trabajado con péndulos invertidos y por su simplificado acondicionamiento, se eligió un potenciómetro rotativo lineal de 1 KΩ como sensor de ángulo.

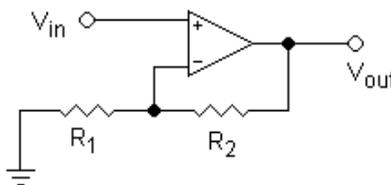
Si se alimenta el potenciómetro con un voltaje de 5V, en las posiciones central y extremas del péndulo se tiene los valores que se indican en la Figura 3.2.



**Figura 3.2** Salida de voltaje del potenciómetro

Aunque esta señal de voltaje podría ir directamente al PLC, es recomendable realizar una amplificación para aumentar la resolución en la medición y tener mayor inmunidad al ruido. Utilizando la configuración de un amplificador no inversor (Figura 3.3) se tiene:

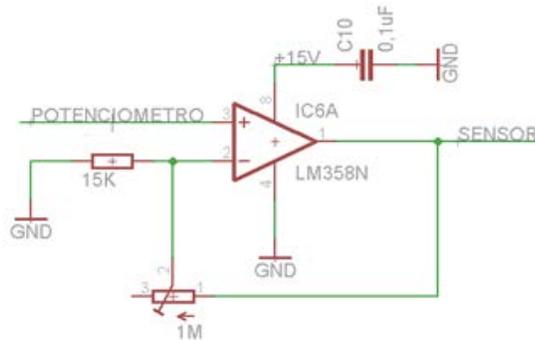
$$V_{out} = \frac{(R1 + R2)}{R1} V_{in} \quad (3.1)$$



**Figura 3.3** Amplificador no inversor

Se requiere que el voltaje de salida sea de 10V cuando el voltaje de entrada es 0,76 V, es decir una ganancia de 13,16.

Si  $R1=15\text{ K}\Omega$ , entonces  $R2=182,37\text{ K}\Omega$  por lo tanto se coloca un potenciómetro de  $1\text{ M}\Omega$  en la realimentación negativa obteniendo el circuito que se ilustra en la Figura 3.4 y que se encuentra implementado en la placa electrónica principal del sistema.



**Figura 3.4** Acondicionamiento señal de ángulo

### 3.1.2 Acondicionamiento de la señal de posición del carro

Para medir la posición del carro se utiliza un encoder óptico incremental del fabricante Hewlett Packard modelo HEDS-5540A de tres canales. Las características de éste encoder se resumen en la Tabla 3.1 dada por el fabricante en la hoja de datos (Anexo III) y la forma de conexión se observa en la Figura 3.5.

Tabla 3.1 Características HEDS-5540

Parameter	HEDS-55XX/56XX	HEDM-550X/560X
Storage Temperature, $T_s$	-40°C to 100°C	-40°C to +70°C
Operating Temperature, $T_A$	-40°C to 100°C	-40°C to +70°C
Supply Voltage, $V_{CC}$	-0.5 V to 7 V	-0.5 V to 7 V
Output Voltage, $V_o$	-0.5 V to $V_{CC}$	-0.5 V to $V_{CC}$
Output Current per Channel, $I_{OUT}$	-1.0 mA to 5 mA	-1.0 mA to 5 mA
Vibration	20 g, 5 to 1000 Hz	20 g, 5 to 1000 Hz
Shaft Axial Play	$\pm 0.25\text{ mm}$ ( $\pm 0.010\text{ in.}$ )	$\pm 0.175\text{ mm}$ ( $\pm 0.007\text{ in.}$ )
Shaft Eccentricity Plus Radial Play	0.1 mm (0.004 in.) TIR	0.04 mm (0.0015 in.) TIR
Velocity	30,000 RPM	30,000 RPM
Acceleration	250,000 rad/sec <sup>2</sup>	250,000 rad/sec <sup>2</sup>

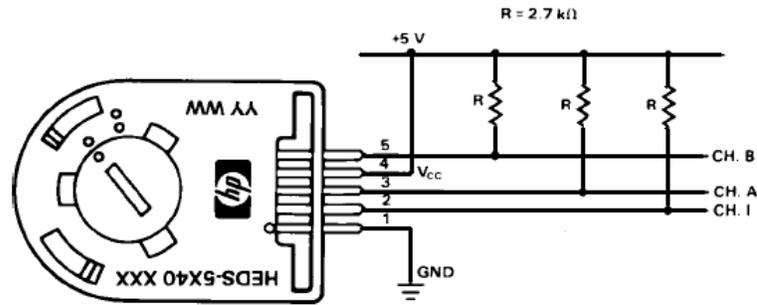


Figura 3.5 Diagrama de conexión

Este encoder tiene una resolución de 500 ciclos por revolución y permite a través de sus canales A y B conocer la distancia recorrida por el carro y el sentido en el que se mueve. Si el canal A adelanta al canal B, el carro se mueve de izquierda a derecha (se acerca al motor), caso contrario el carro se mueve en la dirección opuesta.

El canal I (índice) se utiliza para localizar una posición específica pero en este proyecto no se la utiliza. La Figura 3.6 muestra las formas de onda de los canales A y B.

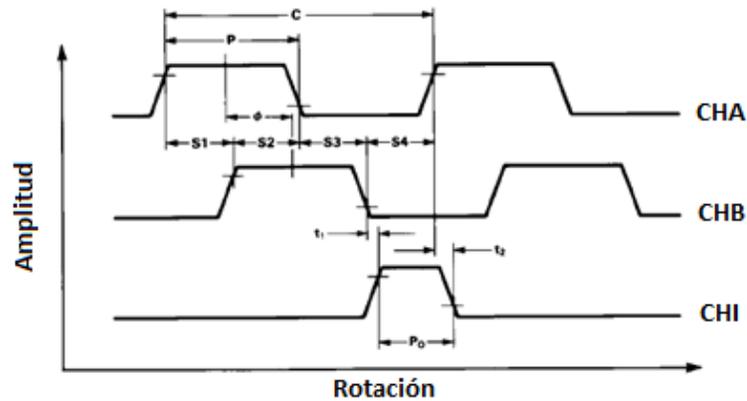
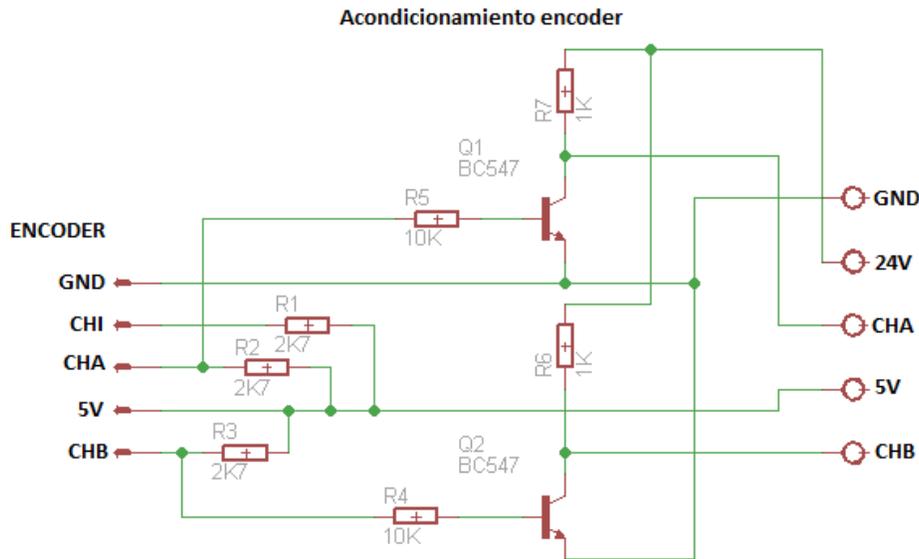


Figura 3.6 Formas de onda de los canales del encoder

El encoder es alimentado con 5V de acuerdo a las recomendaciones del fabricante, y los canales A y B alcanzan máximo ese voltaje, pero ese valor no es suficiente para ser reconocidos por el PLC que necesita en las entradas voltajes mayores a 15V.

Para acondicionar estas señales se usa transistores alimentados desde la fuente interna del PLC de 24V en modo corte-saturación para incrementar el voltaje de los canales A y B. Este acondicionamiento se implementa en una placa electrónica individual cuyo circuito final se muestra en la Figura 3.7.



**Figura 3.7** Placa electrónica de acondicionamiento del encoder

La máxima velocidad del motor al aplicar un voltaje de 18,57 V es de 0,8 m/s como se muestra en la Figura 2.9, traduciendo esa velocidad lineal a angular a través de la ecuación donde  $V_c$  es la velocidad lineal en m/s y  $r$  es el radio de la polea dentada del mecanismo se tiene que la velocidad del motor es:

$$n = \frac{V_c * 60}{2\pi * r} \quad (3.2)$$

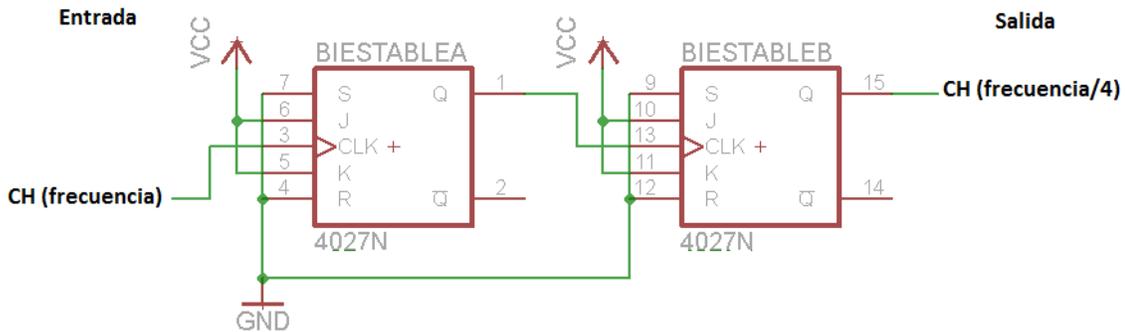
$$n = \frac{0,8 * 60}{2\pi * 0,0075} = 1018,59 \text{ rpm}$$

Como se ha mencionado anteriormente la resolución del encoder HEDS-5540A es de 500 ciclos por revolución, por lo tanto la frecuencia máxima de las señales del encoder es:

$$1018,59 \frac{rev}{min} * 500 \frac{ciclos}{rev} * 1 \frac{min}{60 seg} = 8,49 KHz$$

El PLC posee contadores rápidos de dos canales que admiten frecuencias desde 4 a 20 KHz como se observa en las características del CPU 224 de la Tabla 2.4. Haciendo uso de estos contadores, es posible conectar directamente las salidas acondicionadas al autómata ya que la frecuencia esta dentro del rango aceptado.

En el caso de usar un autómata que no disponga de contadores rápidos, se puede utilizar un divisor de frecuencia basado en biestables J-K como el que se muestra en la Figura 3.8.



**Figura 3.8** Divisor de frecuencia

Con el objetivo de que el sistema sea adaptable no solo al autómata S7-200 éste circuito ha sido implementado en la placa electrónica principal.

### 3.1.3 Sensores de fines de carrera

Para detectar los extremos del módulo y tener una referencia inicial de conteo del número de pulsos, se utilizan dos interruptores de fin de carrera. Estas señales son de tipo digital y se conectan directamente al autómata sin ningún acondicionamiento. Se ha utilizado el contacto normalmente abierto (NO) de este dispositivo conectado a la fuente de 24V del PLC.



Figura 3.9 Interruptor de fin de carrera

### 3.2 Acondicionamiento señal de actuador

Para el accionamiento del motor se dispone de la salida analógica del módulo EM-235 en un rango entre -10 y 10V y una corriente máxima de 20 mA. Esta señal requiere tanto acondicionamiento de voltaje como de corriente para accionar el servomotor que requiere  $\pm 24V$  y una corriente de 3A en régimen permanente y 6A en régimen transitorio [18].

#### 3.2.1 Acondicionamiento de voltaje

Para obtener los valores de voltaje que requiere el motor se utiliza un amplificador operacional que se pueda alimentar con  $\pm 24V$ , es decir un amplificador de alto voltaje. El PA85 cumple con esta característica ya que permite alimentación entre  $\pm 15V$  y  $\pm 150V$  como se indica en la hoja de datos del Anexo III. La distribución de los pines de este operacional se ilustra en la Figura 3.10.

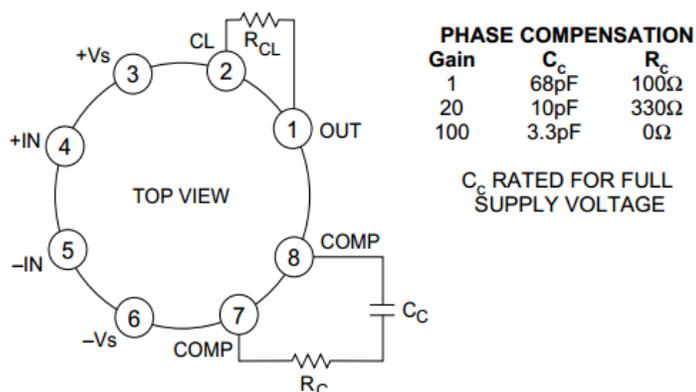
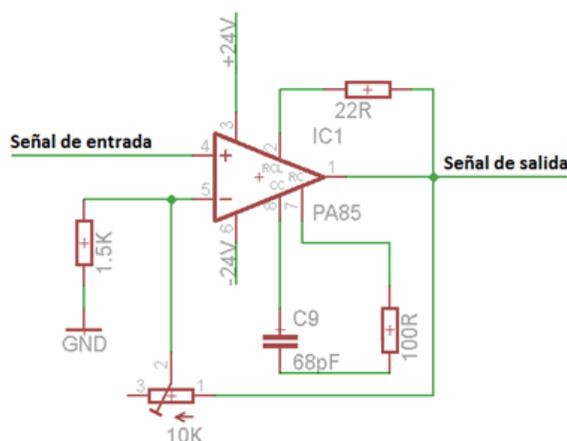


Figura 3.10 Pines y conexionado del PA85

El circuito implementado es un amplificador no inversor con un voltaje de entrada de  $\pm 10$  V y un voltaje de salida requerido de  $\pm 24$  V, si se usa una  $R_1 = 1,5$  K $\Omega$  y recurriendo a la ecuación (3.1) se tiene que  $R_2 = 2,1$  K $\Omega$ . El circuito implementado en la placa electrónica principal con una ganancia de compensación de fase igual a 1 se observa en la Figura 3.11.



**Figura 3.11** Amplificación de voltaje

Realizando las pruebas experimentales, se tiene que el voltaje máximo de salida es de  $\pm 18,57$  V, para voltajes superiores el operacional se satura.

La resistencia entre los pines 1 y 2 determina la corriente límite del amplificador PA85 como se muestra en la ecuación dada por el fabricante.

$$R_{CL} = \frac{0,7}{I_{LIM} - 0,016} \quad (3.3)$$

Utilizando una resistencia  $R_{CL} = 22$   $\Omega$ , la corriente máxima es  $I_{LIM} = 0,0478$  A.

### 3.2.2 Acondicionamiento de corriente

La corriente máxima obtenida del amplificador operacional no es suficiente para alimentar el servomotor que requiere 6A en su estado transitorio. Lo adecuado es realizar una etapa de amplificación cuya ganancia se calcula según la ecuación (3.4).

$$\beta = \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (3.4)$$

Donde la corriente de entrada es 0,0478 A y la corriente de salida es 6 A, por lo tanto la ganancia es de 126. Esta amplificación se realiza en dos etapas push-pull.

### 3.2.2.1 Etapa uno

Los transistores 2N3055 (NPN) y 2N2955 (PNP) se utilizan para la etapa push-pull que es la que se conecta al motor. Las características de estos transistores se muestran en las hojas de datos del Anexo III y se resumen a continuación:

- Corriente máxima: 15 A
- Voltaje de alimentación: 60 V
- Ganancia de corriente: Depende de la corriente de colector, para  $I_C = 4A$  la ganancia es de 20 y para  $I_C = 10A$  es de 5.
- Resistencia unión-cápsula ( $R_{JC}$ ): 1,52 °C/W
- Potencia máxima disipada a una temperatura de encapsulado de 25 °C: 115 W
- Rango de temperatura máximo: -60 a +200 °C

Considerando que la resistencia unión-ambiente  $R_{thj}$  para el encapsulado TO-3 es de 35 °C/W [17] y que la potencia asumiendo que la carga del motor es una resistencia de 4Ω es [18]:

$$P = (V_{CE} - R_M I_M) I_C \quad (3.5)$$

$$P = (24V - 4\Omega * 3A) * 3A = 36 W$$

Se tiene entonces que la temperatura que alcanza se puede calcular con la siguiente expresión:

$$T = R_{thj} * P + T_a \quad (3.6)$$

$$T = 35 \frac{^{\circ}C}{W} * 36W + 25^{\circ} = 1260^{\circ} + 25^{\circ} = 1285^{\circ}C$$

Es por esto que se debe utilizar un disipador con una resistencia unión-ambiente menor de  $2,64^{\circ}C/W$  para garantizar que la temperatura no sobrepase los  $150^{\circ}C$ :

$$T_{max} \geq (R_{JC} + R_{thj})P \quad (3.7)$$

$$150^{\circ}C \geq \left(1,52 \frac{^{\circ}C}{W} + R_{thj}\right) \cdot 36 W \rightarrow R_{thj} \leq 2,64^{\circ}C/W$$

La ganancia en esta etapa de amplificación considerando en el peor de los casos una corriente de colector de 10A es de 5. Usando la ecuación (3.4).

$$I_{in} = \frac{3A}{5} = 0,6 A$$

Para implementar esta etapa se utilizó el mismo montaje que se encontraba en la maqueta, es decir dos transistores de cada tipo colocados en paralelo sobre un disipador voluminoso [18].

### 3.2.2.2 Etapa dos

La ganancia en esta etapa es de 25,2 para poder obtener la ganancia total de 126. Los transistores elegidos para la configuración push-pull son el BD135 (NPN) y BD136 (PNP). Las características resumidas de la hoja de datos (Anexo III) son:

- Corriente máxima: 1,5 A
- Voltaje de alimentación: 45 V

- Ganancia de corriente: Depende de la corriente de colector, para  $I_C = 150 \text{ mA}$  la ganancia es de mínimo 40 V y máximo 250 V.
- Resistencia unión-cápsula ( $R_{JC}$ ):  $10 \text{ }^\circ\text{C/W}$
- Potencia máxima disipada a una temperatura de encapsulado menor o igual a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ : 12,5 W
- Potencia máxima disipada a una temperatura ambiente menor o igual a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ : 1,25 W
- Rango de temperatura máximo: -65 a  $+150 \text{ }^\circ\text{C}$

Utilizando una corriente  $I_C = 0,6 \text{ A}$ , y la ecuación (3.5), la potencia asumiendo que la carga del motor es una resistencia de  $4\Omega$  [18] es igual a:

$$P = (24V - 4\Omega * 3A) * 0,6A = 7,2 \text{ W}$$

Si se considera que la resistencia unión-ambiente  $R_{thj}$  para el encapsulado SOT-32 es de  $80 \text{ }^\circ\text{C/W}$ , se tiene que la temperatura que alcanza la unión es de:

$$T = 80 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} * 7,2\text{W} + 25^\circ = 576^\circ + 25^\circ = 601 \text{ }^\circ\text{C}$$

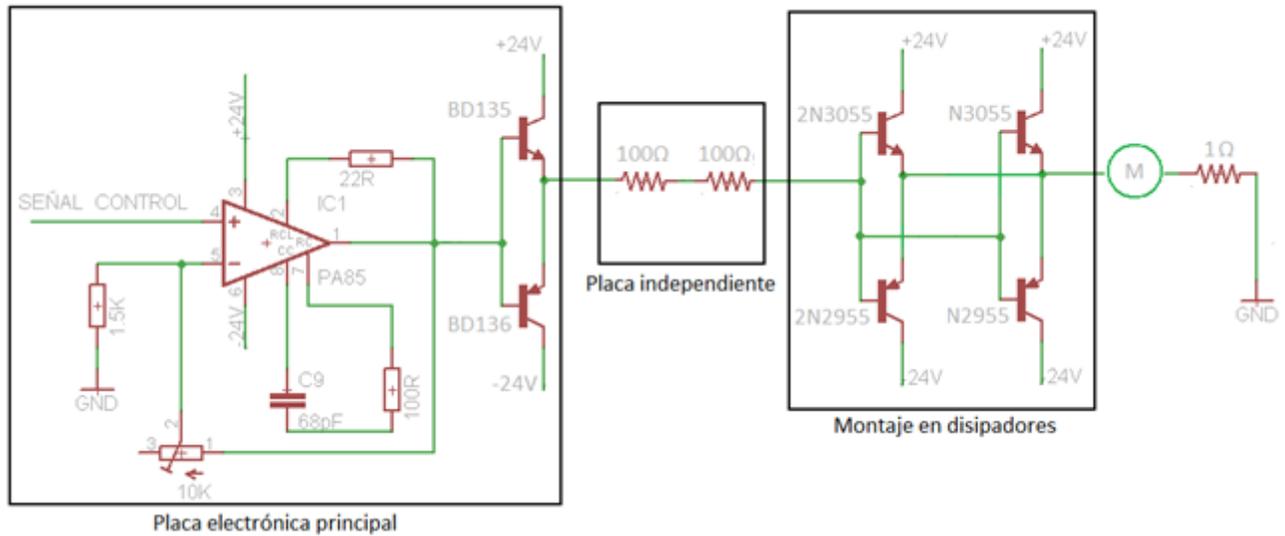
Para mantener la temperatura debajo del máximo permitido, se debe colocar un disipador con una resistencia unión-ambiente menor de  $7,36 \text{ }^\circ\text{C/W}$ .

$$125 \text{ }^\circ\text{C} \geq \left(10 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} + R_{thj}\right) \cdot 7,2 \text{ W} \rightarrow R_{thj} \leq 7,36 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Para acoplar las dos etapas se coloca dos resistencias limitadoras de corriente en serie de  $100 \Omega$  cada una y de 2W y en la conexión hacia el motor una resistencia de  $1\Omega$  y de 10 W de potencia.

El circuito completo de acondicionamiento de la señal se encuentra distribuido en tres partes, la etapa uno se encuentra colocada directamente sobre un disipador, la etapa dos está en la tarjeta electrónica principal y las resistencias de acople entre etapas están en una placa independiente

porque al colocarlas en la placa principal hubo problemas. La Figura 3.12 muestra el acondicionamiento completo de la señal hacia el motor.



**Figura 3.12** Acondicionamiento señal hacia motor

### 3.3 Alimentación del subsistema electrónico

#### 3.3.1 Fuente de $\pm 24V$

Como se ha mencionado en el capítulo 1, éste proyecto parte de una maqueta existente la cual dispone de una fuente de alimentación no regulada de  $\pm 24V$ , diseñada para manejar un motor de corriente continua de 24V y una corriente máxima de 6A y suministrar de voltaje a los diferentes circuitos electrónicos utilizados en el proyecto “Desarrollo de la planta experimental péndulo invertido” [18].

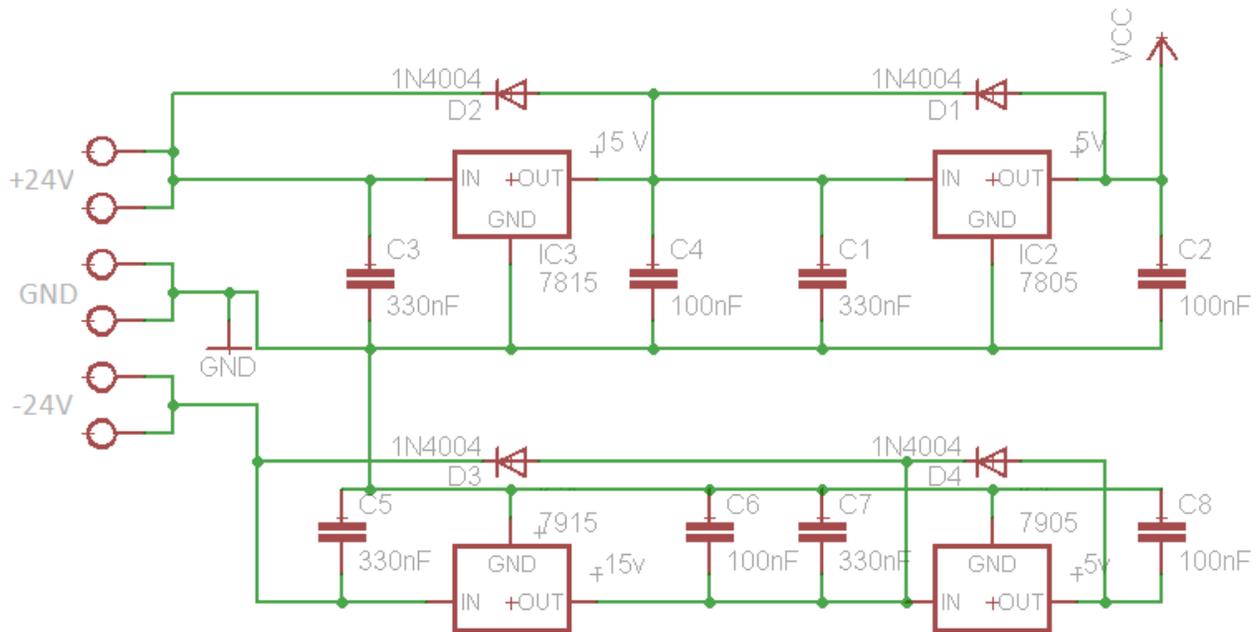
Esta fuente de alimentación está constituida por un transformador de dos devanados de 18 voltios eficaces cada uno, un puente rectificador que soporta 35 amperios nominales, y dos parejas de capacitores de 4700  $\mu F$  para obtener el voltaje de +24V y -24V. Esta fuente maneja una potencia media 150W y máxima de 300W.

Debido a que se simplifica el acondicionamiento de las señales de los sensores al utilizar un autómata programable, se reduce el número de elementos electrónicos utilizados en el presente proyecto por lo que es posible utilizar esta fuente de alimentación sin riesgo de que sea insuficiente para el sistema.

### 3.3.2 Fuente de $\pm 15V$ y $\pm 5V$

Para la alimentación de los circuitos integrados que se utilizan en el proyecto se ha implementado las fuentes de  $\pm 15V$  y  $\pm 5V$ . Como entrada de estas fuentes se usa la salida de voltaje de la fuente de  $\pm 24V$  y se utiliza los reguladores LM7905, LM7915, LM7805 y LM7815 (Ver anexo III) para obtener los voltajes deseados.

Utilizando las recomendaciones del fabricante para protección e implementación de circuitos con estos reguladores se obtiene el circuito que se muestra en la Figura 3.13.



**Figura 3.13** Fuentes de voltaje

Este circuito esta implementado en la tarjeta electrónica principal y aunque todos estos voltajes no son utilizados, hacen que la tarjeta sea adaptable a conexiones a otros circuitos externos que se pueden requerir en el futuro.

Para saber si se requiere de disipadores de calor se realiza un análisis de los circuitos integrados que se deben alimentar con estos niveles de voltaje

- Alimentación 15V:

LM358: corriente de 2 mA

La potencia para el regulador LM7815 se obtiene con la suma de las corrientes que requiere cada circuito integrado y añadiendo 5 mA que pasan por el regulador a masa se tiene que la corriente total es de 7 mA. La potencia disipada por el regulador se puede calcular con la ecuación (3.8):

$$P = (V_{in} - V_{out}) * I \quad (3.8)$$

$$P = (24V - 15V) * 7mA = 0,063 W$$

La temperatura de la juntura considerando una temperatura ambiente de 25 °C y una resistencia térmica entre juntura-ambiente  $R_{thJA}$  igual a 50 °C/W para un encapsulado TO-220 se obtiene:

$$T_j = T_a + (P * R_{thJA}) \quad (3.9)$$

$$T_j = 25^{\circ}C + \left(0,063W * 50 \frac{^{\circ}C}{W}\right) = 28,15^{\circ}C$$

Observando las características del fabricante se tiene que la temperatura máxima de operación para este regulador es de 125 °C, por lo tanto no se requiere de un disipador.

- Alimentación 5V

2 CD4027:  $10^{-5} \mu A$  cada uno

Encoder: 85 mA

La corriente total que debe manejar el regulador LM7805 es de:

$$I = 2 * 10^{-5} \mu A + 85 mA + 5 mA = 0,09 A$$

La potencia disipada usando la ecuación (3.8) es:

$$P = (24V - 5V) * 0,09A = 1,71 W$$

La temperatura de la junta considerando una temperatura ambiente de 25 °C y una resistencia térmica entre junta-ambiente  $R_{thJA}$  igual a 50 °C/W para un encapsulado TO-220 se obtiene:

$$T_j = 25^{\circ}C + \left(1,71W * 50 \frac{^{\circ}C}{W}\right) = 110^{\circ}C$$

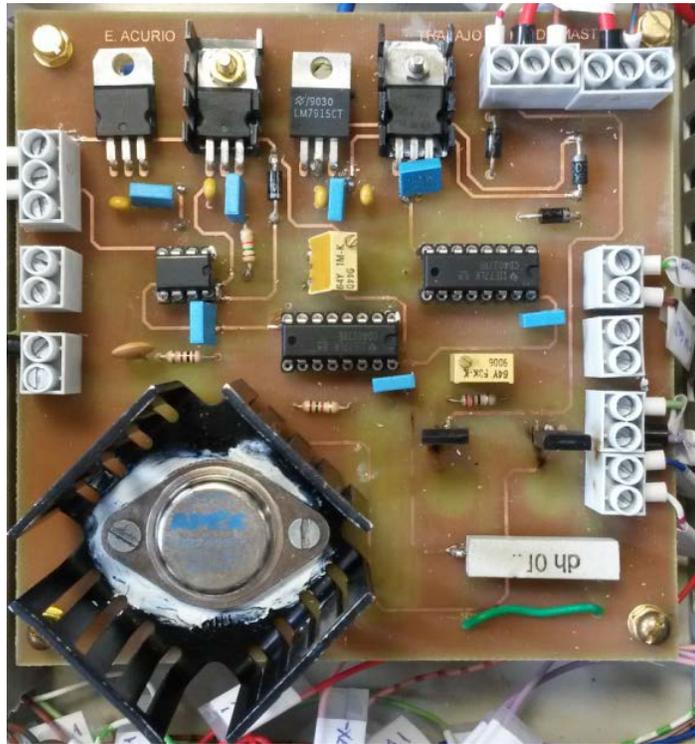
Aunque la temperatura no supera el límite dado por el fabricante se recomienda colocar un pequeño disipador.

### ***3.4 Implementación y montaje del subsistema electrónico***

#### **3.4.1 Placas electrónicas**

Para implementar los circuitos electrónicos en placas, se utiliza el software *CadSoft Eagle*. Este programa permite implementar el diagrama esquemático de los circuitos y obtener el diseño de la placa de circuito impreso (PCB), haciendo uso de sus amplias librerías de elementos electrónicos. En todo el subsistema electrónico se tiene las siguientes placas:

- Placa electrónica principal: En esta placa se encuentra las fuentes reguladas de  $\pm 15V$  y  $\pm 5V$ , el circuito de acondicionamiento de la señal del potenciómetro, un divisor de frecuencia para los canales A y B del encoder (en caso de no usar contadores rápidos en el PLC) y el acondicionamiento de la señal de control del motor. En la Figura 3.14 se muestra la placa ya implementada.



**Figura 3.14** Placa electrónica principal

- Placa de acondicionamiento de señales de encoder: En esta placa se adapta los niveles de voltaje del encoder a 24V para que puedan ser leídos por el PLC. La implementación de esta placa se observa en la Figura 3.15.



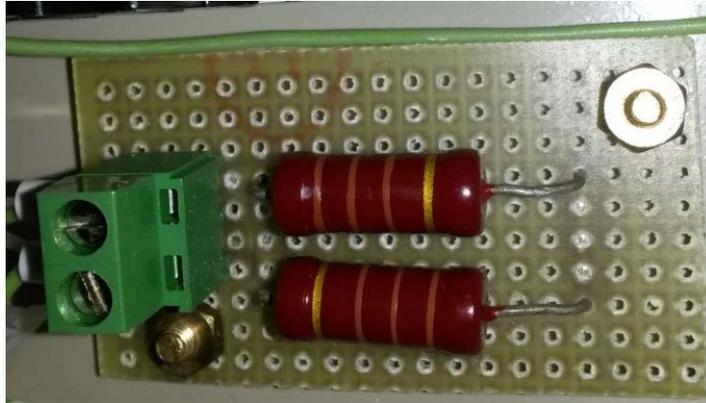
**Figura 3.15** Placa de acondicionamiento de señales de encoder

- Placa de fuente de voltaje no regulada  $\pm 24V$ : Esta placa fue tomada del proyecto “Desarrollo de la planta experimental péndulo invertido” [18].



**Figura 3.16** Placa de fuente de voltaje  $\pm 24V$

- Placa de resistencias: En esta placa se encuentran las dos resistencias en serie que acoplan la etapa uno y dos del acondicionamiento de la señal de control del motor. Debido a su sencillez, se ha utilizado una placa perforada en lugar de una placa impresa.



**Figura 3.17** Placa de resistencias

### 3.4.2 Montaje y conexión del subsistema electrónico

Para el montaje del subsistema electrónico se utiliza un pequeño tablero eléctrico de 35 cm de ancho por 35 cm de alto y 18 cm de profundidad. En el tablero se incorpora un interruptor ON/OFF, un paro de emergencia y un interruptor termomagnético de 10 A como elementos de maniobra y protección de sobre corrientes.

La Figura 3.18 muestra el tablero con sus elementos y conexiones.



**Figura 3.18** Tablero eléctrico

El PLC tiene su propio montaje y protección con un interruptor termomagnético de 6A, y se conecta al tablero de manera externa para poder utilizarlo en otras aplicaciones además de este proyecto. El diagrama de ubicación de los elementos del proyecto (Figura 3.19) y el esquema unifilar (Figura 3.20) se muestran a continuación.

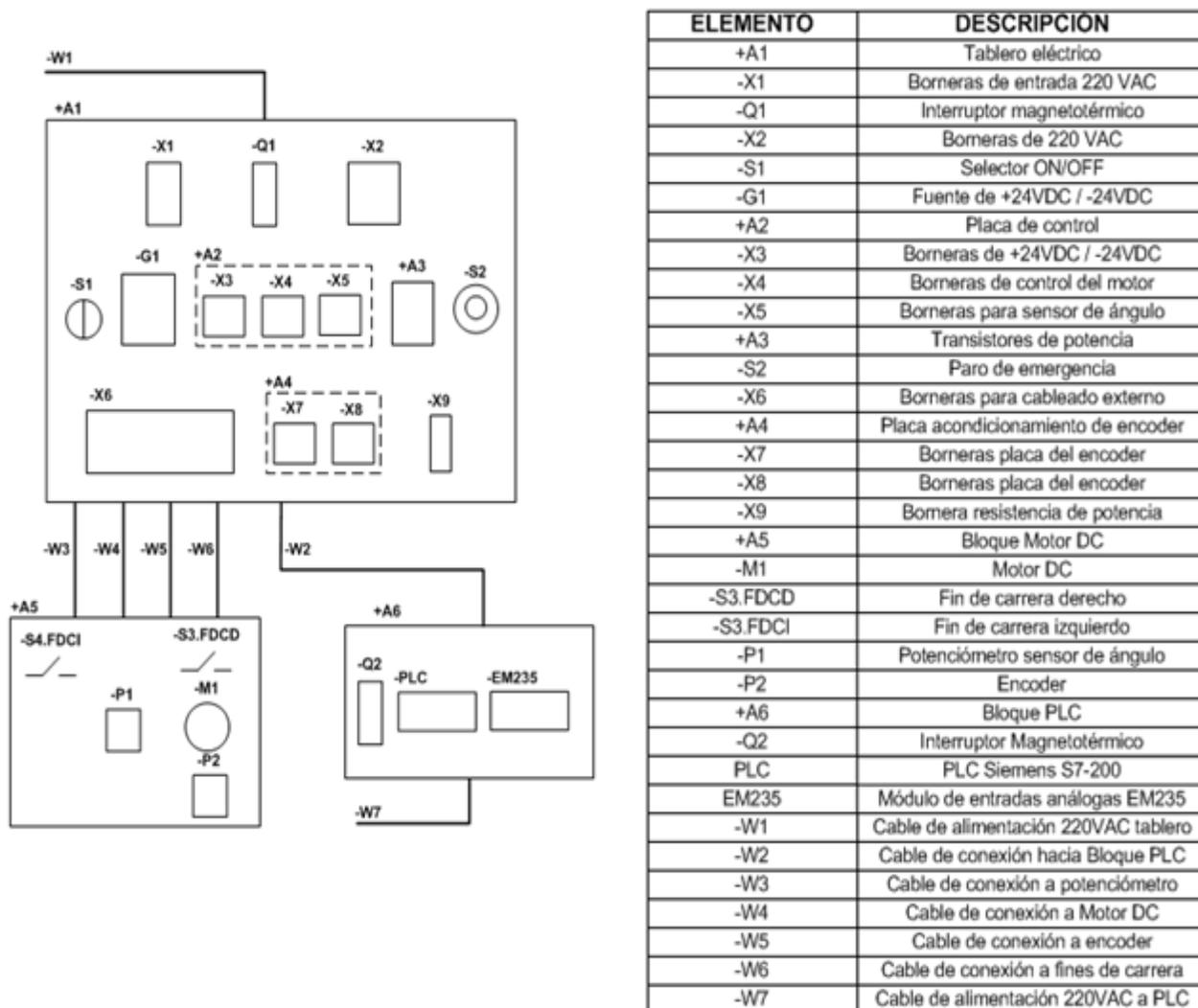
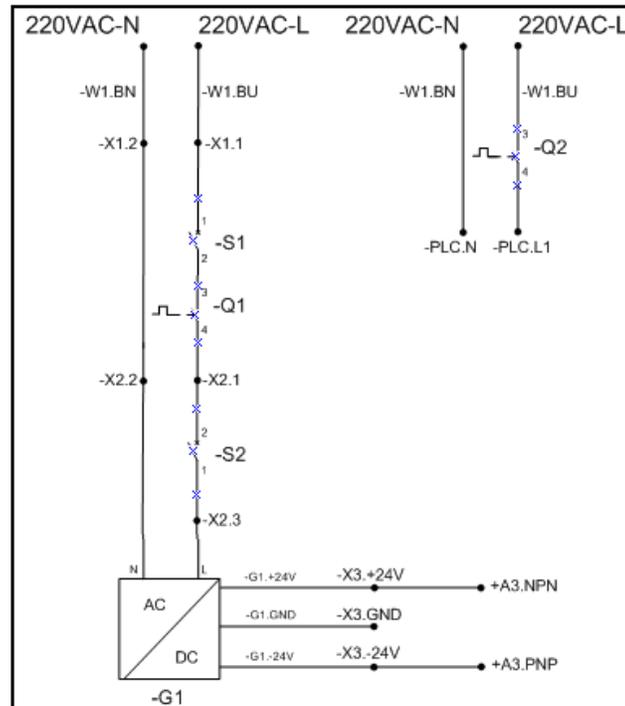


Figura 3.19 Diagrama de ubicación



**Figura 3.20** Diagrama unifilar de alimentación del tablero eléctrico

Los diagramas de las placas electrónicas, así como el detalle del diagrama de ubicación, el esquema unifilar y los planos de conexión y cableado se adjuntan en el anexo I.

## 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN MECÁNICA

El subsistema mecánico de este sistema está formado por una guía lineal con un patín del fabricante INA FAG, un servomotor y un mecanismo de transmisión de energía por correa dentada. El péndulo está atornillado a un eje colocado entre dos rodamientos en la parte central del carro y su movimiento está limitado por dos piezas laterales. El carro se une a la polea dentada por medio de dos piezas sujetas con tornillo. La Figura 4.1 ilustra el carro y la sujeción a la correa dentada.



**Figura 4.1** Carro con péndulo invertido

En una transmisión por correa dentada es muy importante el tensionado de la correa, para esto el mecanismo dispone de un tornillo de ajuste de tensión como se observa en la Figura 4.2.



**Figura 4.2** Ajuste de tensión de correa

La conexión entre el servomotor y el mecanismo era directa en el prototipo original, pero no es una buena opción en el caso en que existan pequeñas desalineaciones, es por esto que en este capítulo se describe las modificaciones mecánicas realizadas al sistema y se presenta el diseño de un nuevo prototipo de péndulo invertido.

#### 4.1 Modificaciones mecánicas del prototipo péndulo invertido

Se realizaron algunas modificaciones al prototipo original para lograr una mejor forma de acoplar el servomotor y el encoder al mecanismo. Antes de analizar las posibles formas de acoplamiento, hace falta describir brevemente la transmisión por correa usada en este prototipo. Una visión más detallada ésta transmisión se realizará más adelante en este capítulo cuando se hable del diseño de un nuevo prototipo.

##### 4.1.1 Sistema de transmisión en la planta péndulo invertido

En la transmisión por correa dentada existen dos poleas una conductora o motriz y una conducida. La polea conductora es aquella que tiene movimiento propio producido por un motor, es decir esta polea posee el movimiento que se desea transmitir.

En el prototipo las dos poleas poseen el mismo diámetro porque no se desea ni un sistema reductor de velocidad ni un sistema multiplicador. Además, ambas poleas giran en el mismo sentido por lo que se tiene un sistema de transmisión por correa abierta. Un esquema de este tipo de transmisión se muestra en la Figura 4.3.

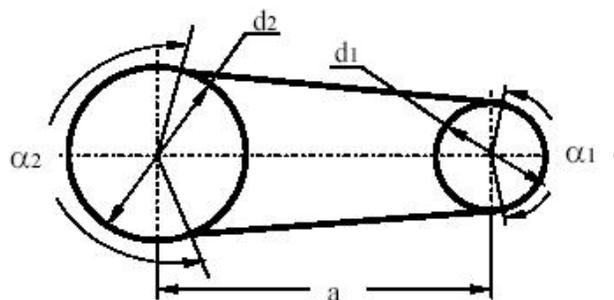


Figura 4.3 Transmisión por correa abierta [19]

En la figura anterior,  $d1$  y  $d2$  representan los diámetros de la polea,  $\alpha1$  y  $\alpha2$  son las velocidades de giro y  $a$  es la distancia entre los centros de las poleas y que es muy útil para calcular la longitud primitiva de la correa (longitud que tendría la correa de ser cortada y extendida). Para este caso en el que los diámetros son iguales y el ángulo de contacto es  $180^\circ$ , la longitud primitiva está dada por la siguiente expresión [20]:

$$L_p = 2 \cdot a + \pi \cdot d \quad (4.1)$$

Donde:

- a      Distancia entre las poleas
- d      Diámetro de las poleas

Reemplazando los valores medidos del mecanismo en la ecuación (4.1) se tiene:

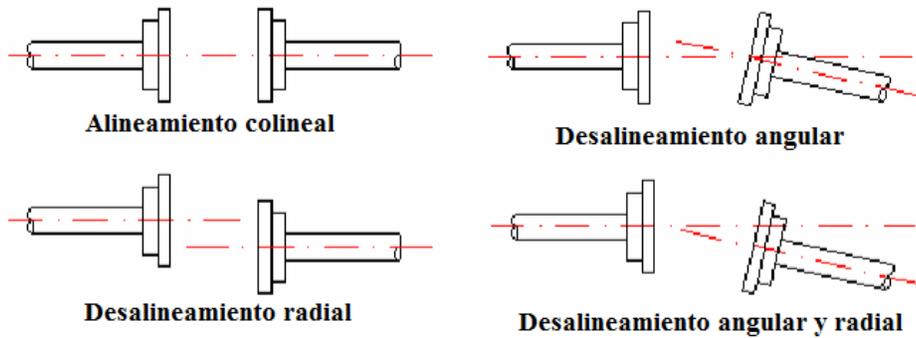
$$L_p = (2 * 97,3cm + \pi * 1,5cm) = 199,31 \text{ cm}$$

#### 4.1.2 Acoplamientos mecánicos

Un acoplamiento permite transmitir movimiento entre ejes y árboles de un mecanismo y si se tiene una buena resolución en la transmisión, se garantiza la vida útil de encoders y de los mecanismos acoplados.

Algunos acoplamientos permiten desalineaciones entre los elementos a unir. Una desalineación es una de las causas más frecuentes de vibraciones y se produce por la dificultad que existe en el momento de alinear los ejes o árboles.

Alineación es el proceso mediante el cual la línea de centros del eje de un elemento de maquinaria, por ejemplo, un motor, se hace coincidir con la prolongación de línea de centros del eje de otra maquinaria acoplada a ella, por ejemplo una bomba [21]. Los tipos de desalineaciones se indican en la Figura 4.4.



**Figura 4.4** Tipos de desalineamientos [21]

Las vibraciones muy elevadas pueden degradar los rodamientos y producir desgaste y rotura de pernos, sobrecalentamiento del eje conductor y por lo tanto mayor consumo eléctrico.

Dependiendo de las alineaciones de los árboles o ejes que unen, de la velocidad del movimiento y de la potencia a transmitir se pueden clasificar en:

- **Acoplamientos Rígidos:** Este tipo de acoplamientos no permite desalineaciones, y está diseñado para unir ejes de manera apretada y no permitir movimiento relativo entre ellos [22]. Si durante la operación existe algún tipo de desalineación puede haber fallos en el eje debido a fatiga. Algunas variaciones de acoplamientos rígidos incluyen acoplamientos de manguito, de plato, de brida y juntas Oldham.



**Figura 4.5** Acoplamientos Rígidos

- **Acoplamientos Flexibles:** Permiten cierta desalineación axial, radial o angular. Dependiendo de la forma en que absorben desalineaciones se dividen en acoplamientos de elementos deslizantes, de elementos flexionantes y una combinación de ambos elementos. Si son de elementos deslizantes absorben la desalineación deslizando dos o más de sus componentes. Por ejemplo, acoplamientos del tipo engranaje, de cadena o de rejilla de acero. Los acoplamientos de elementos flexionantes por otro lado, absorben las desalineaciones por la flexión o doblamiento de una o más de sus partes. Estos acoples pueden ser de elemento metálico o elastómero.



**Figura 4.6** Acoplamientos flexibles

- **Acoplamientos Articulados:** Los acoplamientos articulados o angulares se utilizan cuando se requiere la transmisión de potencia entre árboles o ejes que se cortan con un ángulo determinado o árboles en diferentes posiciones. En este grupo se encuentran por ejemplo las juntas Cardan.



**Figura 4.7** Junta Cardan

### 4.1.3 Selección de acoplamiento para sistema péndulo invertido

Para dimensionar un acoplamiento se debe utilizar el par nominal, que está en función de la potencia a transmitir y de la velocidad de rotación. Observando las gráficas del fabricante del motor (ver anexo III) se tiene que para una velocidad de 3000 rpm el torque es 0,28 Nm. La Figura 4.8 muestra la curva de torque-velocidad del motor RS130ER1000.

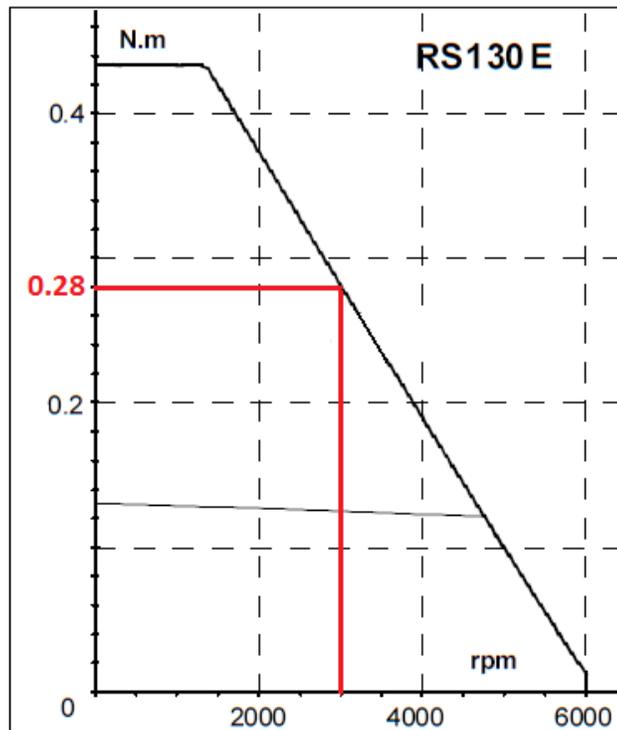


Figura 4.8 Curva torque vs. Velocidad

Además se debe considerar un factor de carga o coeficiente de seguridad según el tipo de máquina, la frecuencia de arranques y el número de horas de trabajo al día. Considerando un factor de seguridad de 2 debido al número muy grande arranques e inversiones de giro, se tiene que el torque de selección del acoplamiento es:

$$\text{Par nominal de acoplamiento} = \text{Par a transmitir} \times F_s \quad (4.2)$$

$$T_a = 0,28 \text{ Nm} * 2 = 0,56 \text{ Nm}$$

Por lo tanto se elige un acoplamiento flexible de elementos mecánicos de la marca Ruland PSMR19-4-4-SS (ver anexo III) con las características que se indican en la Tabla 4.1 :

**Tabla 4.1** Características del acoplamiento Ruland PSMR19-4-4-SS

<i>Diámetro 1 (mm)</i>	4
<i>Diámetro 2 (mm)</i>	4
<i>Torque estático (Nm)</i>	2.6
<i>Torque dinámico reversible (Nm)</i>	0.65
<i>Desalineación angular (grados)</i>	3°
<i>Desalineación paralela (mm)</i>	0.20
<i>Desalineación axial (mm)</i>	0.13
<i>Material</i>	Acero



**Figura 4.9** Acoplamiento PSMR19-4-4-SS

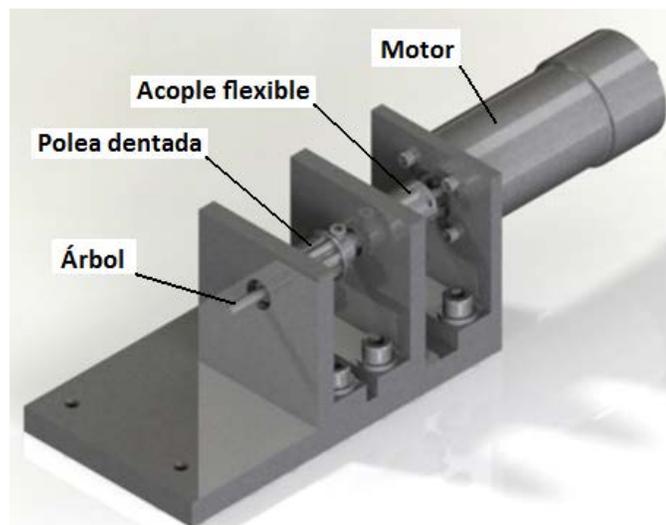
#### 4.1.4 Conjunto de acople servomotor-mecanismo

Las modificaciones realizadas al prototipo actual se resumen en este conjunto mecánico que está formado por 5 piezas diseñadas en aluminio, 3 piezas comerciales y tornillos de sujeción que permiten acoplar el servomotor a la polea conductora. La Tabla 4.2 resume los elementos de este conjunto e indica la numeración de los planos de construcción de cada pieza que se encuentran en el anexo II.

**Tabla 4.2** Piezas del conjunto servomotor-mecanismo

<b>NOMBRE DE PIEZA</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>PLANO</b>	<b>CANTIDAD</b>
base_motor	Al	TFM-MEC-1001	1
soporte_motor_2	Al	TFM-MEC-1002	1
arbol_rodamientos	Al	TFM-MEC-1003	1
soporte_motor_1	Al	TFM-MEC-1004	1
Soporte_motor_3	Al	TFM-MEC-1005	1
motor	Comercial		1
polea_dentada_motor	Comercial	-	1
acoplamiento_flexible	Comercial		1
rodamiento_pequeño (Inafag-624)	Comercial	-	2
B18.22M - Plain washer, 6 mm, narrow	Comercial	-	6
B18.3.1M - 6 x 1 x 16 Hex SHCS -- 16NHX	Comercial	-	6
B18.3.1M - 3 x 0.5 x 10 Hex SHCS -- 10NHX	Comercial		4
B18.3.1M - 3 x 0.5 x 6 Hex SHCS -- 6NHX	Comercial	-	1

Como se puede observar en la Figura 4.10, el conjunto servomotor-mecanismo tiene un árbol colocado entre dos rodamientos de bolas del fabricante Inafag de referencia 624 ubicados en dos piezas de soporte. Este árbol transmite el movimiento a la polea conductora por medio de un tornillo prisionero de métrica M3. El árbol tiene dos prolongaciones de 4 mm de diámetro, la primera prolongación permite la unión al acoplamiento flexible y la segunda prolongación sirve para acoplar el encoder.



**Figura 4.10** Conjunto servomotor-mecanismo

## ***4.2 Diseño mecánico de un nuevo prototipo de péndulo invertido***

El objetivo de este prototipo mecánico es convertir el movimiento rotacional de un motor en un movimiento rectilíneo de un carro que permita el equilibrio del péndulo invertido recorriendo una trayectoria más corta que el actual prototipo, además se pretende que sea más ligero y de fácil trasportación. En este apartado se realiza la selección y descripción del mecanismo de transmisión de potencia. También se hace una breve sección de cálculos justificativos y de criterios de selección de piezas comerciales.

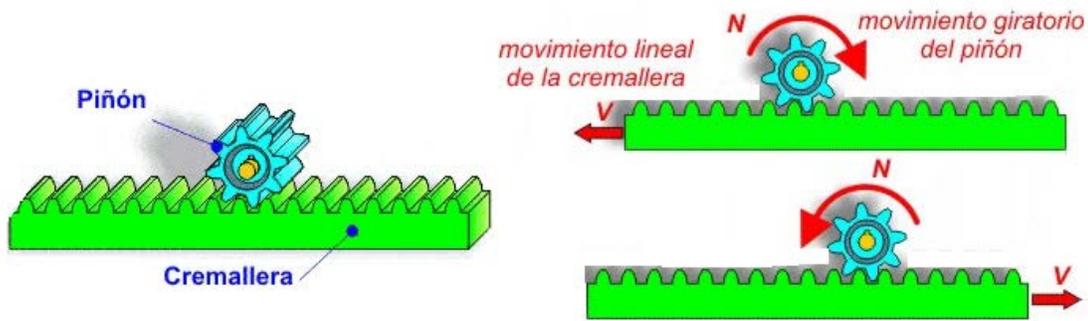
### **4.2.1 Selección de mecanismo**

Para lograr la conversión de movimiento existen algunas alternativas que deben ser analizadas antes de seleccionar una opción. Con el objetivo de elegir el mecanismo que mejor se adapte a las características que requiere el prototipo se ha realizado un análisis comparativo de cada mecanismo enfatizando sus ventajas y desventajas y se ha elegido el que mejores características ofrece a la aplicación.

#### *4.2.1.1 Mecanismo engranaje-cremallera*

Con este mecanismo se logra convertir el movimiento giratorio en lineal y viceversa, además se logra obtener una muy buena precisión en los desplazamientos rectilíneos es por eso muy utilizado en aplicaciones como microscopios, en la dirección de un auto, taladradora de columna, movimiento de puertas automáticas, etc.

Este mecanismo está formado por una rueda dentada que engrana con una barra también dentada. Su modo de operación puede ser de dos tipos, en el primero el engranaje gira sobre su eje y desplaza la cremallera y en la segunda opción la cremallera permanece fija y el engranaje (piñón) al girar, se desplaza. En la Figura 4.11 se puede observar este mecanismo y sus componentes.



**Figura 4.11** Mecanismo engranaje-cremallera

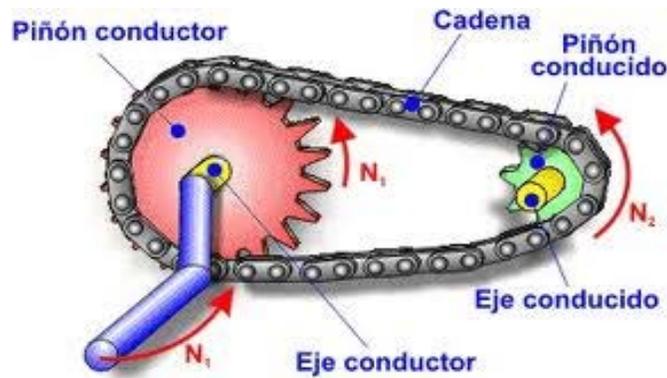
Este mecanismo funciona como un engranaje simple, es decir tanto el engranaje como la cremallera tienen el mismo paso circular por lo tanto el mismo módulo. Si no se cumple este requisito el engrane no es posible.

#### 4.2.1.2 Mecanismo piñón-cadena

Permite transmitir un movimiento giratorio entre dos ejes paralelos, en los cuales es posible variar la velocidad pero no se puede hacer que un eje gire en un sentido y el otro en sentido contrario. Este mecanismo es muy utilizado en bicicletas, motos, motores de autos, puertas elevables, etc.

Este sistema consta de una cadena sin fin (cerrada) cuyos eslabones engranan con ruedas dentadas que están unidas a los ejes paralelos [23]. Existen muchos tipos de cadenas que se eligen en función de la fuerza a transmitir, la durabilidad, la lubricación y el ambiente en donde van a ser colocadas. Una ventaja muy importante de este mecanismo frente a las poleas, es que mantiene una relación de transmisión constante, es decir, no existe deslizamiento transmitiendo grandes potencias y mantiene un buen rendimiento energético. Por otro lado, este sistema es algo más caro, ruidoso y ofrece menos flexibilidad que otros mecanismos.

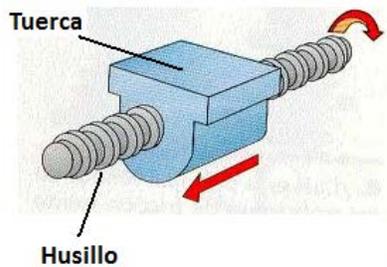
El tensado de la correa es importante pero permite cierto tipo de holgura. Para que el sistema engrane correctamente, es necesario que el tamaño del diente sea igual en la rueda dentada conductora y en la conducida. Este mecanismo con sus componentes se ilustra en la Figura 4.12.



**Figura 4.12** Mecanismo piñón-cadena

#### 4.2.1.3 Mecanismo tuerca-husillo

Permite convertir el movimiento circular del tornillo en movimiento rectilíneo de la tuerca y constituye un sistema irreversible. El avance lineal depende de la velocidad de giro del elemento motriz y el paso de la rosca del tornillo, mientras mayor sea el paso, mayor es la velocidad de avance. Este mecanismo se utiliza mucho en gatos mecánicos, sistemas de elevación y aplicaciones que requieran alta precisión. En la Figura 4.13 se muestra este mecanismo y sus componentes.

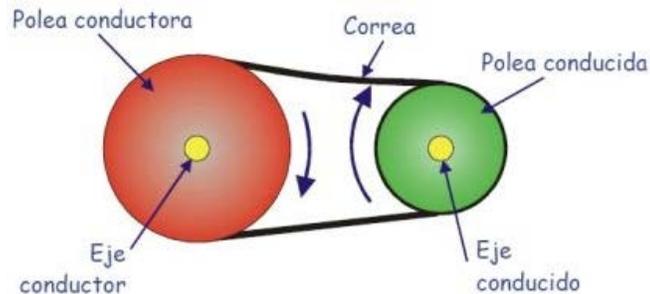


**Figura 4.13** Mecanismo tuerca-husillo

#### 4.2.1.4 Mecanismo de poleas con correa

Un mecanismo de transmisión por correa es un conjunto de dos poleas (polea conductora y polea conducida) acopladas por medio de una correa para transmitir fuerzas y velocidades angulares entre árboles normalmente paralelos por efecto del rozamiento producido entre la correa y ambas poleas (Figura 4.14). El valor de rozamiento depende de la tensión de la correa y de su resistencia a

tracción, es decir del tipo de material con el que está construida (cuero, fibra, hilos metálicos recubiertos de goma) y de sus dimensiones [24].



**Figura 4.14** Mecanismo poleas-correa

Este mecanismo permite reducir la velocidad o aumentarla dependiendo del diámetro de las poleas, de esta manera si el diámetro de la polea conductora es menor que el de la polea conducida se habla de un sistema reductor de velocidad caso contrario es un multiplicador de velocidad.

Entre las ventajas de este sistema se tiene:

- Transmite potencia a gran distancia entre los ejes conductor y conducido.
- Puede operar a altas velocidades de rotación.
- Tiene un funcionamiento suave, silencioso y sin choques: absorben cargas de choque y vibraciones, esto alarga la vida de los componentes de la máquina.
- Diseño, fabricación, montaje y mantenimiento sencillo.
- Protege de sobrecargas al limitar la carga transmitida (rozamiento). Se usan como fusible mecánico.
- Es un sistema económico, en costo directo y de mantenimiento.
- Permite trabajar aceptablemente en ambientes con polvo y humedad, no requieren lubricación ni mantenimiento.
- Se puede hacer transmisión a varias poleas o entre ejes no paralelos.

Este sistema también presenta algunos inconvenientes como una vida útil relativamente baja, la relación de transmisión no es exacta ni constante porque varía de acuerdo al deslizamiento elástico y al esfuerzo transmitido en correas no dentadas, normalmente este sistema ocupa mucho espacio y se presenta deslizamientos al trabajar a altas velocidades.

Dependiendo de las aplicaciones en las que se utilice este mecanismo, se debe escoger entre algunos tipos de correas [25].

- Trapezoidales: Son las más utilizadas porque se adaptan mejor al canal de la polea evitando deslizamientos.
- Redondas: Son utilizadas cuando se requiere adaptar curvas cerradas y se necesitan fuerzas pequeñas.
- Planas: Son cada vez menos usadas y se emplean para transmitir el esfuerzo de giro y el movimiento de los motores a las máquinas.
- Dentadas (síncronas): Estas correas además de ser dentadas son del tipo trapezoidal y se usan cuando es indispensable evitar deslizamientos. El acoplamiento de la correa se hace sobre poleas con dientes tallados de tal manera que reproducen el perfil de la correa. Son usadas en transmisiones compactas y que requieren alta potencia. Además permiten relación de transmisión constante entre los ejes que se acoplan y los requerimientos de un tensado inicial de la correa no son tan exigentes como en las correas trapezoidales sin dientes.

Una vez que se ha realizado una breve descripción de las posibilidades de mecanismos de transmisión de potencia, es posible realizar un análisis comparativo. A cada mecanismo se le ha colocado una numeración para simplificar el análisis y elegir la opción que se ajuste mejor a las necesidades.

En la Tabla 4.3 se resume los posibles mecanismos para convertir el movimiento giratorio en movimiento lineal en el prototipo nuevo de péndulo invertido.

**Tabla 4.3** Posibles mecanismos

Sistemas	Engranaje-Cremallera (A1)	Piñón –cadena (A2)	Tuerca-husillo (A3)	Poleas con correa dentada (A4)
Gráficos				

#### 4.2.1.5 Evaluación inicial

El criterio de la evaluación inicial es el de la Tabla 4.4

**Tabla 4.4** Criterio de evaluación inicial

<i>Evaluación</i>	<i>Significado</i>
0	Inviabile
1	Posible
2	Buena

La comparación entre los distintos mecanismos y su evaluación se muestran en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5** Evaluación inicial de mecanismos

<i>Alternativa</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>	<i>Evaluación</i>
A1	-Buena precisión en los movimientos de avance. -Velocidad alta de trabajo. -Dos posibilidades de montaje (piñón fijo o piñón móvil).	-Sistema algo costoso -Sistema con poca capacidad amortiguadora. -No permite desalineamientos.	2
<i>Alternativa</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>	<i>Evaluación</i>
A2	-Relación de transmisión constante (sin deslizamientos). -Trasmite altas potencias.	-Sistema caro, ruidoso y poco flexible. -Acoplamiento a carro no muy sencillo	1

<i>Alternativa</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>	<i>Evaluación</i>
A3	-Desplazamientos lineales muy precisos. -Sencillo mecánicamente.	-Baja velocidad de operación. -Algo costoso	0
<i>Alternativa</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>	<i>Evaluación</i>
A4	-Se puede usar elementos comerciales para la implementación. -Relación de transmisión constante (sin deslizamientos). -Trabaja a altas velocidades y transmite potencia a grandes distancias. -Funcionamiento silencioso e implementación sencilla.	-Vida útil relativamente baja. -Sistema voluminosos	2

#### 4.2.1.6 Evaluación final de mecanismos

Una vez que se ha descartado la peor posibilidad (evaluación 0) se realiza el análisis de otras características según los criterios de la Tabla 4.6 y los valores de evaluación se muestran en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.6** Criterios de evaluación final

<i>Criterio</i>	<i>Descripción</i>
C1	Sencillez
C2	Velocidad
C3	Precisión
C4	Costo

**Tabla 4.7** Valores de evaluación

<i>Evaluación</i>	<i>Significado</i>
0	Insuficiente
1	Suficiente
2	Bueno
3	Muy bueno

La evaluación final de las alternativas y sus resultados se muestran en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.8** Evaluación final de mecanismos

<i>Alternativa</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>Resultado</i>
<i>A1</i>	3	3	3	1	10
<i>A2</i>	1	3	1	0	5
<i>A4</i>	3	3	2	3	11

Como se puede observar el sistema que mejor se acopla a las necesidades del prototipo es el mecanismo de poleas y correa dentada.

#### **4.2.2 Descripción del diseño mecánico**

Para iniciar con el diseño del mecanismo se debe establecer los requisitos que debe cumplir el prototipo para ser utilizado como plataforma de pruebas de control para estudiantes, de esta manera se han establecido los siguientes parámetros a cumplir:

- Longitud máxima de la trayectoria de movimiento para el carro del péndulo: 50 cm.
- Limitaciones laterales en la rotación del péndulo.
- Velocidad del carro: 1,5 m/s (para asegurar un prototipo más rápido que el actual cuya velocidad es de 0,8 m/s)
- Bajo costo, transportable, ligero, de fácil mantenimiento y reparación.
- Condiciones de trabajo: temperatura ambiente, ambiente no hostil.
- Motor fijo en uno de los extremos.

En base a las condiciones establecidas se ha diseñado un prototipo mecánico que utiliza una guía doble lineal para deslizar el carro que sostiene el péndulo en base a un sistema de transmisión por correa dentada para evitar deslizamientos.

La Figura 4.15 muestra una imagen completa del prototipo diseñado y a continuación se describe su montaje.



**Figura 4.15** Nuevo prototipo de péndulo invertido

Para detallar adecuadamente el diseño del prototipo se ha dividido el mismo en tres partes, el conjunto motor-mecanismo, el conjunto carro-guía lineal y finalmente el conjunto de polea conducida.

#### *4.2.2.1 Conjunto motor-mecanismo*

Este conjunto constituye el extremo derecho del prototipo y está formado por las piezas que permiten la transmisión del movimiento giratorio del motor a la polea conductora. Dentro de este grupo de componentes, las piezas diseñadas y piezas comerciales con modificaciones poseen un número de plano específico que se adjuntan conjuntamente con vistas explosionadas en el anexo II La Tabla 4.9 muestra las piezas que conforman este conjunto.

**Tabla 4.9** Piezas del conjunto Motor-mecanismo

N.º DE PIEZA	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL (Nº PLANO)	CANTIDAD
1001	polea1	Comercial (TFM-MEC-N-1001)	1
1002	eje1	Acero (TFM-MEC-N-1002)	1
1003	soporte_FDC	Polímero (TFM-MEC-N-1003)	1
1004	soporte_rodamiento	Al (TFM-MEC-N-1004)	1
1005	soporte_rodamiento2	Al (TFM-MEC-N-1005)	1
1006	tapa_posterior	Al (TFM-MEC-N-1006)	1
1007	tapa_superior	Al (TFM-MEC-N-1007)	1
1008	soporte_acoplamiento	Al (TFM-MEC-N-1008)	1
1009	base_lateral	Al (TFM-MEC-N-1009)	1
1010	ensamble_motor	Comercial	1
1011	fin_carrera	Comercial	1
1012	inafag_626_8h7nhevu4uflqs2xvbfv8t5d6	Comercial	2
1013	acoplamiento PSMR25-8-6-SS	Comercial	1
1014	B18.3.1M - 3 x 0.5 x 8 Hex SHCS -- 8NHX	Comercial	12
1015	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 10 Hex SHCS -- 10NHX	Comercial	4
1016	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 16 Hex SHCS -- 16NHX	Comercial	4
1017	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M4 x 0.7 --D-N	Comercial	4
1018	B18.3.1M - 2.5 x 0.45 x 8 Hex SHCS -- 8NHX	Comercial	1
1019	B18.3.1M - 2 x 0.4 x 10 Hex SHCS -- 10NHX	Comercial	2

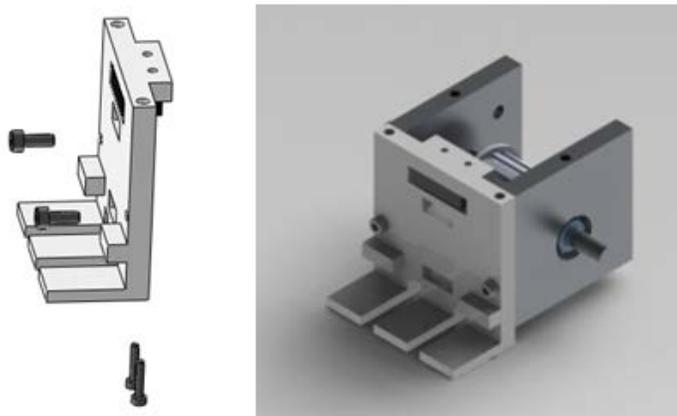
El primer paso es colocar los rodamientos de bolas del fabricante Inafag referencia 626 (*pieza 1012*) en sus respectivos soportes (*piezas 1004 y 1005*). De igual manera la polea conductora del fabricante Michaud Chailly a9-21t5-15f (*pieza 1001*) se acopla al árbol de rodamientos (*pieza 1002*) utilizando un tornillo prisionero de métrica M2.5 (*pieza 1018*). El subconjunto formado por la polea y el acoplamiento se coloca en los rodamientos ubicados en los soportes.

En la Figura 4.16 se muestra se muestra el montaje de la polea en los soportes.



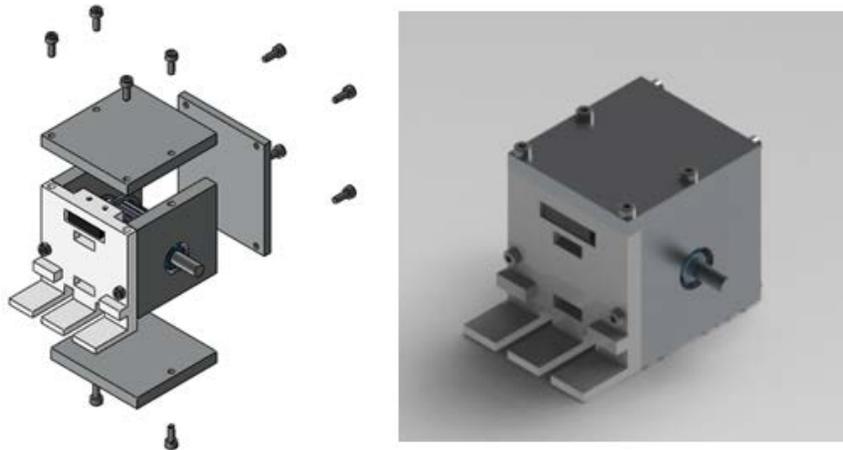
**Figura 4.16** Montaje de la polea conductora en soportes

A continuación se debe colocar el fin de carrera (*pieza 1011*) en su respectivo soporte (*pieza 1003*) mediante dos tornillos de métrica M2 (*pieza 1012*). El soporte con el fin de carrera incorporado se une al subconjunto de la Figura 4.16 usando dos tornillos de métrica M3. La unión del soporte de fin de carrera al subconjunto se indica en la Figura 4.17.



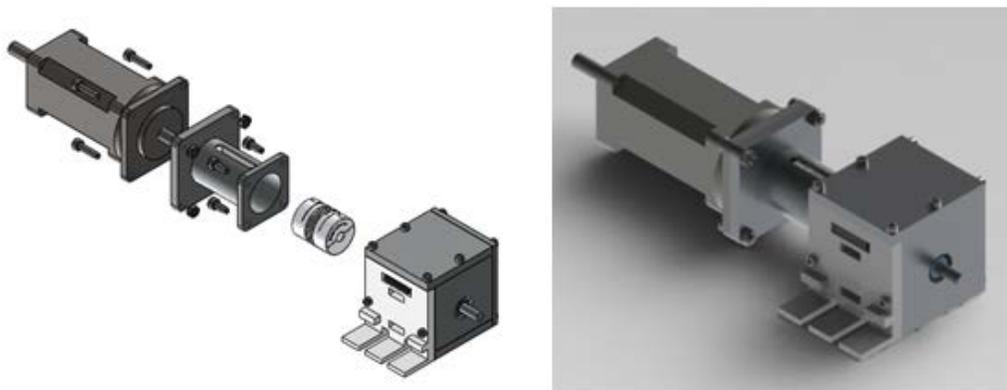
**Figura 4.17** Unión soporte FDC al subconjunto

Como siguiente paso se debe colocar el soporte posterior (*pieza 1006*), el superior (*1007*) e inferior (*pieza 1009*) utilizando 10 tornillos de métrica M3 (*pieza 1014*). El resultado de este paso se muestra en la Figura 4.18.



**Figura 4.18** Montaje piezas superior, lateral e inferior

Finalmente se coloca el acoplamiento flexible del fabricante Ruland con referencia PSMR25-8-6-SS (*pieza 1013*) para unir el subconjunto de la Figura 4.18 y el motor (*pieza 1010*). Para evitar que los usuarios del prototipo estén en contacto directo con elementos móviles, se ha diseñado una pieza que cubre el acoplamiento (*pieza 1008*). La pieza de protección se une al conjunto por medio de 4 tornillos de métrica M4 (*pieza 1015*) y para fijar el motor se usa 4 tornillos (*pieza 1016*) y 4 tuercas de métrica M4 (*pieza 1017*). El acoplamiento del motor al mecanismo y el ensamble completo de este conjunto se observa en la Figura 4.19.



**Figura 4.19** Acoplamiento del motor al mecanismo

## 4.2.2.2 Conjunto carro-guía lineal

En este conjunto se encuentran las piezas tanto diseñadas como comerciales que conforman el carro y el sistema de guiado lineal. Las vistas explosionadas y los planos de detalle se muestran en el anexo II y un resumen de las piezas utilizadas se observa en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Piezas del conjunto carro-guía lineal

N.º DE PIEZA	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL (Nº PLANO)	CANTIDAD
2001	soporte_arbol	Acero (TFM-MEC-N-2001)	2
2002	árbol_rodamientos	Acero (TFM-MEC-N-2002)	1
2003	pendulo_1	Acero (TFM-MEC-N-2003)	1
2004	base	Acero (TFM-MEC-N-2004)	1
2005	pieza_potenciometro	Al (TFM-MEC-N-2005)	1
2006	pieza_apriete_inferior	Al (TFM-MEC-N-2006)	2
2007	pieza_apriete_superior	Al (TFM-MEC-N-2007)	2
2008	pieza_límite_angulo	Acero (TFM-MEC-N-2008)	2
2009	riel_doble_1	Comercial (TFM-MEC-N-2009)	1
2010	perfil_tornilo51	Comercial (TFM-MEC-N-2010)	2
2011	cojinete	Comercial	2
2012	inafag_61800_3km1sgasz6fugaxu60oyr chvt_01	Comercial	2
2013	potenciometro	Comercial	1
2014	Perfil_5_40x20_1	Comercial	1
2015	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 10 Hex SHCS -- 10NHX	Comercial	14
2016	B18.3.1M - 3 x 0.5 x 10 Hex SHCS -- 10NHX	Comercial	2
2017	B18.3.1M - 5 x 0.8 x 20 Hex SHCS -- 20NHX	Comercial	4
2018	B18.3.6M - M2.5 x 0.45 x 5 Hex Socket Oval Pt. SS --N	Comercial	1
2019	B18.3.1M - 3 x 0.5 x 6 Hex SHCS -- 6NHX	Comercial	10
2020	B18.6.7M - M3 x 0.5 x 8 Type I Cross Recessed FHMS --8N	Comercial	2

En este conjunto primero se ensambla la guía lineal, para esto se coloca el perfil tuerca natural 5 del fabricante Item (*pieza 2014*) en el perfil doble de aluminio Item 5x40x20 (*pieza 2012*). Después se coloca los dos cojinetes Igus WJ200UM-01-10 (*pieza 2009*) en la guía doble sin perforar Igus WS-10-40-1000 (*pieza 2013*), la cual se fija mediante 10 tornillos de métrica M3 (*pieza 2019*) al perfil de aluminio. La Figura 4.20 muestra el montaje de la guía lineal.



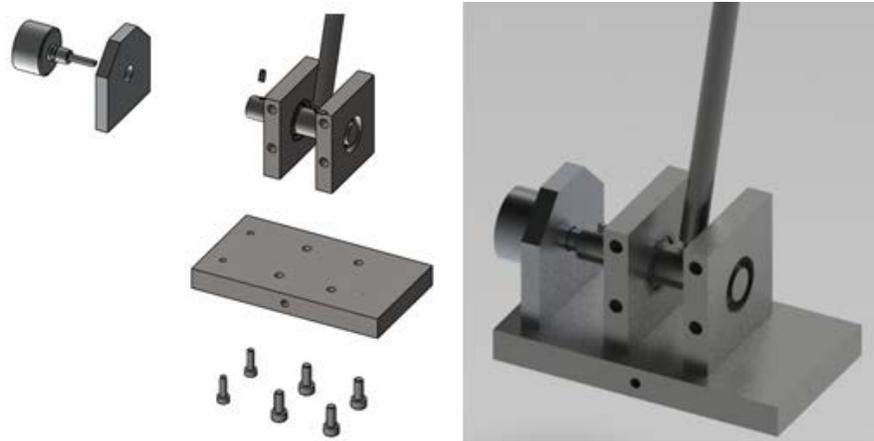
**Figura 4.20** Montaje de guía lineal

A continuación se debe hacer el montaje del carro, para esto primero se coloca los rodamientos de bolas Inafag referencia 61800 (*pieza 2010*) en sus respectivos soportes (*pieza 2001*) y luego se coloca el árbol (*pieza 2002*) entre los rodamientos. El péndulo (*pieza 2003*) se atornilla directamente en el árbol de rodamientos como se ilustra en la Figura 4.21.



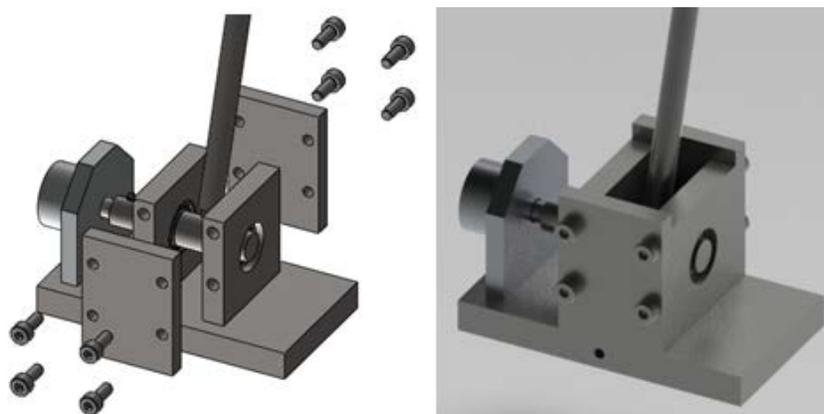
**Figura 4.21** Montaje del árbol central del carro

El siguiente paso es acoplar el potenciómetro (*pieza 2011*) al árbol de rodamientos, para esto se utiliza un tornillo prisionero de métrica M2.5 (*pieza 2018*). Luego se une todo el subconjunto a la base del carro (*pieza 2004*) utilizando 4 tornillos de métrica M4 (*pieza 2015*) para la unión de las piezas de soporte y 2 tornillos de métrica M3 (*pieza 2016*) para juntar la pieza que soporta el potenciómetro. Este procedimiento de montaje se ilustra en la Figura 4.22.



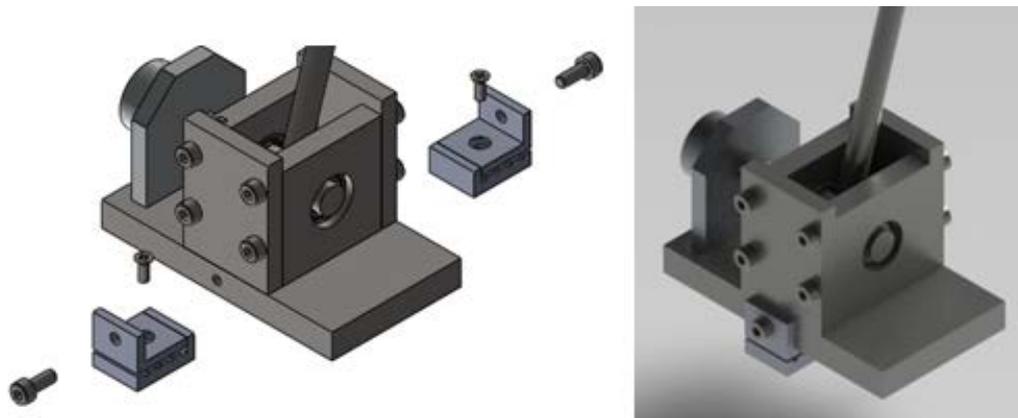
**Figura 4.22** Montaje en la base del carro

El carro hasta al final de este proceso permitiría el movimiento del péndulo entre  $-180^\circ$  y  $180^\circ$ , por lo tanto se ha diseñado dos piezas que limitan el movimiento (*pieza 2008*) y se acoplan al carro por medio de 8 tornillos de métrica M4 (*pieza 2015*) como se indica en la Figura 4.23.



**Figura 4.23** Acoplamiento de piezas de limitación de ángulo

Para ajustar el tensado de correa, se ha diseñado dos piezas de apriete (*pieza 2006 y 2007*) que a través de un tornillo (*pieza 2020*) sujeta la correa dentada a cada extremo del carro, y el ajuste de tensión se realiza por medio de dos tornillos de métrica M4 (*pieza 2015*). El sistema de tensado para correa abierta se muestra en la Figura 4.24.



**Figura 4.24** Sistema de tensado para correa abierta

Una vez acoplado por completo el carro, se lo coloca sobre los cojinetes de la guía lineal y se lo fija usando 4 tornillos de métrica M5 (*pieza 2017*). El conjunto completo carro-guía lineal se muestra en la Figura 4.25.



**Figura 4.25** Conjunto carro-guía lineal

## 4.2.2.3 Conjunto de polea conducida

Este conjunto mecánico está constituido por las piezas que permiten el soporte de la polea conducida. La vista explosionada de este conjunto y los planos de detalle de las piezas diseñadas se muestran en el anexo II y la Tabla 4.11 resume los elementos indicando la cantidad y sus respectivos números de planos.

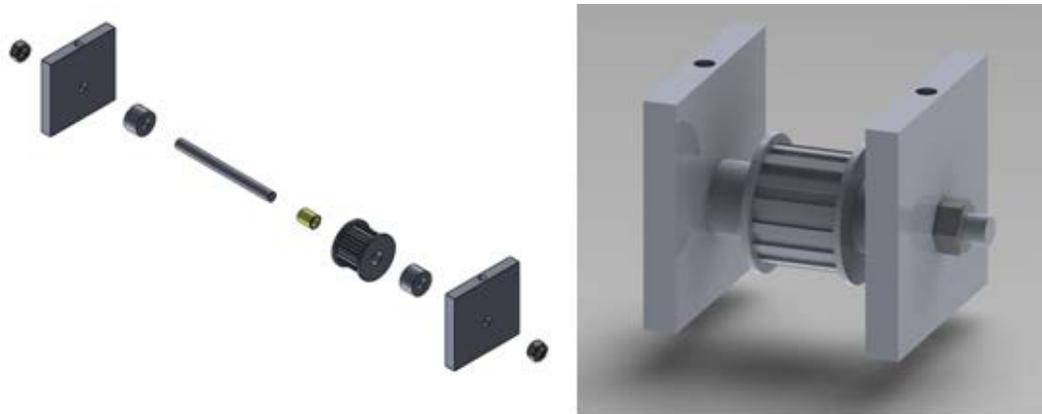
Tabla 4.11 Piezas del conjunto de polea conducida

N.º DE PIEZA	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL (Nº PLANO)	CANTIDAD
3001	soporte1	Al (TFM-MEC-N-3001)	2
3002	soporte_FDC	polímero (TFM-MEC-N-3002)	1
3003	eje2	Al (TFM-MEC-N-3003)	1
3004	polea_mecanizada	Comercial (TFM-MEC-N-3004)	1
3005	ajuste1	Al (TFM-MEC-N-3005)	2
3006	tapa_posterior	Al (TFM-MEC-N-3006)	1
3007	tapa_superior	Al (TFM-MEC-N-3007)	1
3008	base_lateral	Al (TFM-MEC-N-3008)	1
3009	fin_carrera	Comercial	1
3010	igus_jsm-0608-10_edqvof99603q0sqda7ckd7zz	Comercial	1
3011	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M6 x 1 --D-N	Comercial	2
3012	B18.3.1M - 3 x 0.5 x 8 Hex SHCS - - 8NHX	Comercial	12
3013	B18.3.1M - 2 x 0.4 x 10 Hex SHCS -- 10NHX	Comercial	2

Para ensamblar este conjunto, se coloca el cojinete de plástico del fabricante Iigus referencia JSM-0608-10 (*pieza 3010*) en el interior de la polea dentada Michaud Chailly a9-21t5-15f que debe tener una tolerancia H7 en el alojamiento<sup>3</sup> (*pieza 3004*) y conjuntamente con las dos piezas de ajuste

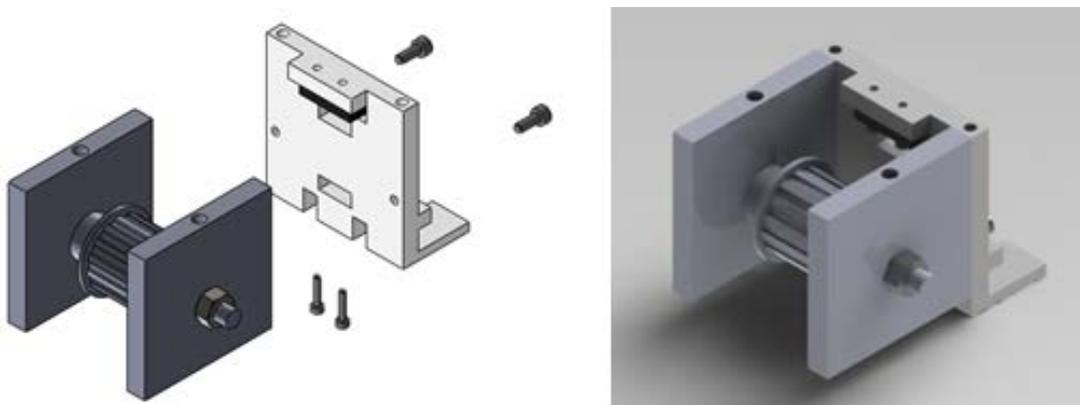
<sup>3</sup> Recomendación obtenida del fabricante Iigus para cojinetes de la gama Iglidur.

(pieza 3005) se montan sobre el eje central del subconjunto (pieza 3003). El eje es puesto sobre dos soportes (pieza 3001) como se muestra en la Figura 4.26.



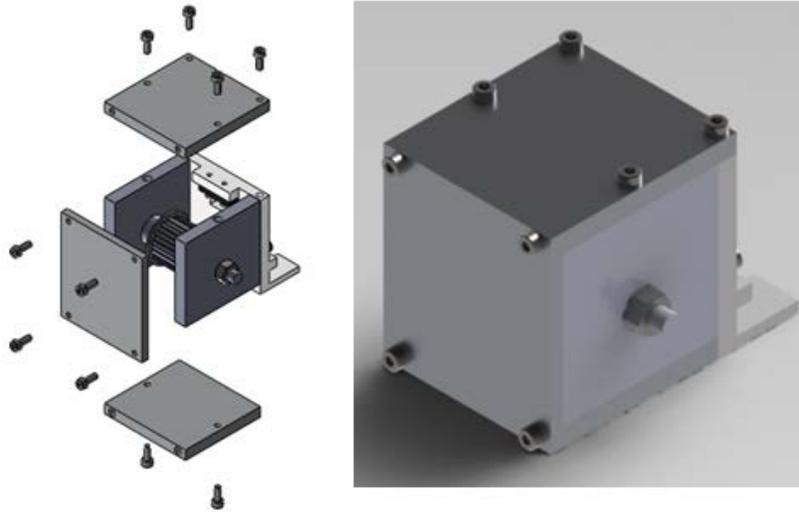
**Figura 4.26** Montaje del eje central

El siguiente paso consiste en colocar el fin de carrera (pieza 3009) en su soporte (pieza 3002) utilizando dos tornillos de métrica M2 (pieza 3013). Después se une el soporte al subconjunto de la Figura 4.26 mediante dos tornillos de métrica M3 (pieza 3012). Al final de este paso se tiene como resultado la Figura 4.27.



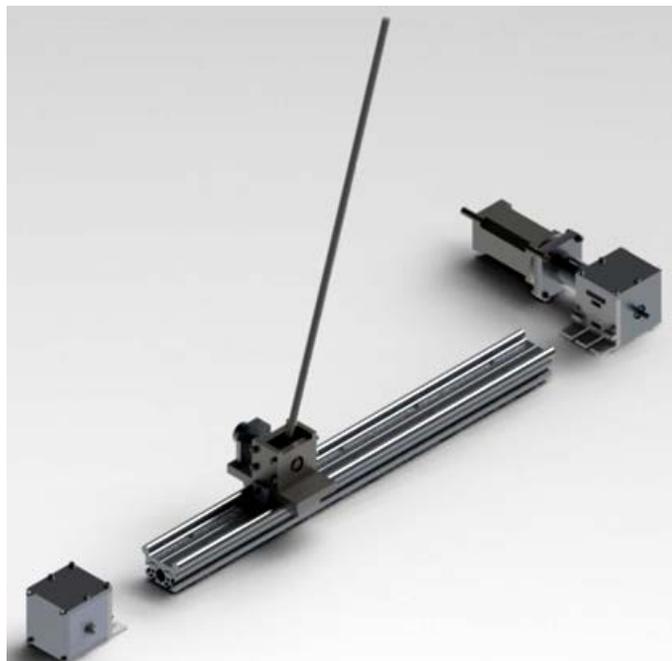
**Figura 4.27** Montaje de fin de carrera

Para concluir con este conjunto, se coloca la pieza superior (pieza 3007), lateral (pieza 3006) e inferior (pieza 3008) en el conjunto de piezas del paso anterior usando 10 tornillos de métrica M3 (pieza 3012) como se ilustra en la Figura 4.28.



**Figura 4.28** Montaje conjunto de polea conducida

Después de tener los tres conjuntos ensamblados y tras colocar la correa dentada, se los acopla por medio de las salientes cuadradas de material que poseen los soportes de fines de carrera de cada extremo como lo muestra la Figura 4.29.



**Figura 4.29** Acoplamiento de los tres conjuntos

### 4.2.3 Cálculos justificativos de la transmisión por poleas y correa dentada

En el prototipo no se requiere ni tener un sistema reductor de velocidad ni un multiplicador, por lo tanto la relación de transmisión del mecanismo es 1 y se calcula con la siguiente expresión:

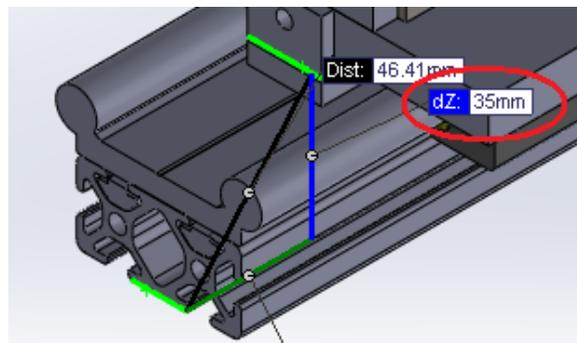
$$d_{p1} \cdot n_1 = d_{p2} \cdot n_2 \quad (4.3)$$

Donde  $d_{p1}$  y  $d_{p2}$  son los diámetros primitivos de las correas y  $n_1$ ,  $n_2$  el número de revoluciones de cada polea.

Para calcular el diámetro de una polea dentada se tiene:

$$d_p = \frac{P}{\pi} * Z \quad (4.4)$$

Donde  $P$  es el paso de la correa dentada y  $Z$  el número de dientes. La elección correcta del diámetro de la polea es muy importante, ya que si el diámetro es muy pequeño hay una flexión excesiva de la correa disminuyendo su vida útil. Debido al sistema de guiado implementado se dispone de una altura de 35 mm para colocar la polea dentada como se puede ver en la Figura 4.30.



**Figura 4.30** Espacio disponible para polea dentada

Revisando algunos catálogos se optó por la polea dentada de 15 dientes y paso 5 que tiene un diámetro primitivo de 23,87 mm del fabricante Michaud Chailly (número de referencia a9-21t5-15f).

La distancia entre poleas estuvo inicialmente limitada por el requisito de limitar el movimiento del carro a 50cm, por lo tanto una vez colocadas las poleas en el prototipo se pudo medir la distancia entre los centros de las poleas dando un resultado de 56,2 cm.

Siendo  $d_{p1}$  el diámetro de la polea mayor,  $d_{p2}$  el de la polea menor y  $E$  la distancia entre poleas, el diámetro primitivo de la correa se calcula en base a la siguiente fórmula:

$$L_p = 2E + \frac{\pi}{2}(d_{p1} + d_{p2}) + \frac{(d_{p1} - d_{p2})^2}{4E} \quad (4.5)$$

$$L_p = 2 * 562 \text{ mm} + \frac{\pi}{2}(23,87 \text{ mm} * 2) = 1198,98 \text{ mm} \approx 1,2 \text{ m}$$

Como se ha elegido un sistema de tensado para correa abierta, no hace falta que la longitud sea un valor estándar.

Para cumplir el requisito mínimo de velocidad establecido en 1,5 m/s se ha elegido para el diseño una velocidad lineal de la correa de 2 m/s. Utilizando la ecuación (4.6), en donde  $r$  es el radio de la polea, se puede calcular el número de revoluciones por minuto:

$$V_c = \frac{2\pi * n * r}{60} \text{ (m/s)} \quad (4.6)$$

$$n = \frac{V_c * 60}{2\pi * r} = \frac{2 * 60}{2\pi * 0,01194} = 1599 \text{ rpm}$$

Esta constituye la velocidad mínima a la que debe moverse el motor para garantizar una velocidad lineal de 2 m/s de la correa dentada.

4.2.3.1 Selección del motor de accionamiento del prototipo

Para calcular la inercia total del mecanismo se debe hacer la suma de la inercia del motor, la inercia de las poleas y la inercia de la carga como se muestra en la ecuación (4.7).

$$J_{TOTAL} = J_{MOTOR} + J_{POLEAS} + J_W \quad (4.7)$$

La inercia de las poleas está dada por:

$$J_{POLEAS} = (\pi * L * \rho * r^4) * 2 \quad (4.8)$$

Donde:

- L Longitud de la polea
- $\rho$  Densidad de la polea, en el caso de ser de aluminio se considera de 2700 Kg/m<sup>3</sup>.
- r Radio de la polea (se ha utilizado el radio externo)

$$J_{POLEAS} = (\pi * 0,021 \text{ m} * 2700 \text{ Kg/m}^3 * (0,014 \text{ m})^4) * 2 = 0,000006843 \text{ Kg} - \text{m}^2$$

El siguiente paso es calcular la inercia de la carga, para lo cual se aproxima el carro a un bloque rectangular (Figura 4.31) y se utiliza la siguiente ecuación:

$$J_W = \frac{Peso}{12} * (h^2 + w^2) \quad (4.9)$$

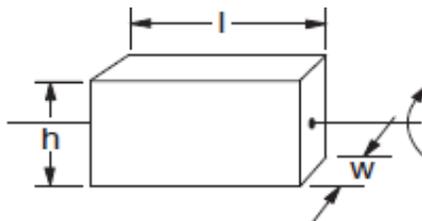


Figura 4.31 Aproximación de la carga a un bloque rectangular

Usando el software SolidWorks se puede medir la masa del carro diseñado que es de 520,39 gramos, pero para la selección del motor se utiliza un factor de seguridad de 1,25 por lo tanto la masa que se utiliza es de 650,5 gramos.

Por lo tanto la inercia de la carga es igual a:

$$J_W = \frac{0,6505 \text{ Kg}}{12} * (0,0715^2 + 0,052^2) = 0,000423 \text{ Kg.m}^2$$

La inercia de la carga y las poleas reflejadas al motor es:

$$\frac{J_{POLEAS+CARGA}}{MOTOR} = (J_{POLEAS} + J_W) \quad (4.10)$$

$$\frac{J_{POLEAS+CARGA}}{MOTOR} = 0,0004298 \text{ Kg.m}^2$$

El torque que el motor debe desarrollar es igual a la suma del torque necesario para acelerar y desacelerar la carga y del torque de fricción.

$$T_{motor} = T_{acel} + T_{resist} \quad (4.11)$$

El torque para acelerar y desacelerar la carga esta dado por:

$$T_{acel} = J_{TOTAL} * \left( \frac{\Delta VELOCIDAD}{\Delta TIEMPO} \right) * 2\pi * 60 \quad (4.12)$$

$$T_{acel} = 0,0004298 \text{ Kg.m}^2 * \left( \frac{1599 \text{ RPM}}{0,7} \right) * \left( \frac{2\pi}{60} \right) = 0,1028 \text{ Nm}$$

Para calcular el torque de fricción se considera la fuerza de rozamiento estática (Coeficiente de rozamiento estático multiplicado por la fuerza normal) multiplicada por la longitud de los cojinetes que son los que están en contacto con la guía lineal.

$$T_{resist} = \mu * F_{normal} * distancia \tag{4.13}$$

La guía lineal del fabricante IGUS seleccionada ofrece bajos coeficientes de fricción, pero por criterios de diseño para seleccionar el motor se asume un coeficiente de fricción de 0,2.

$$T_{resist} = 0,2 * 0,6505Kg * 9,8 \frac{m}{s^2} * 0,029m = 0,0369 Nm$$

Por lo tanto el torque que el motor debe desarrollar es de:

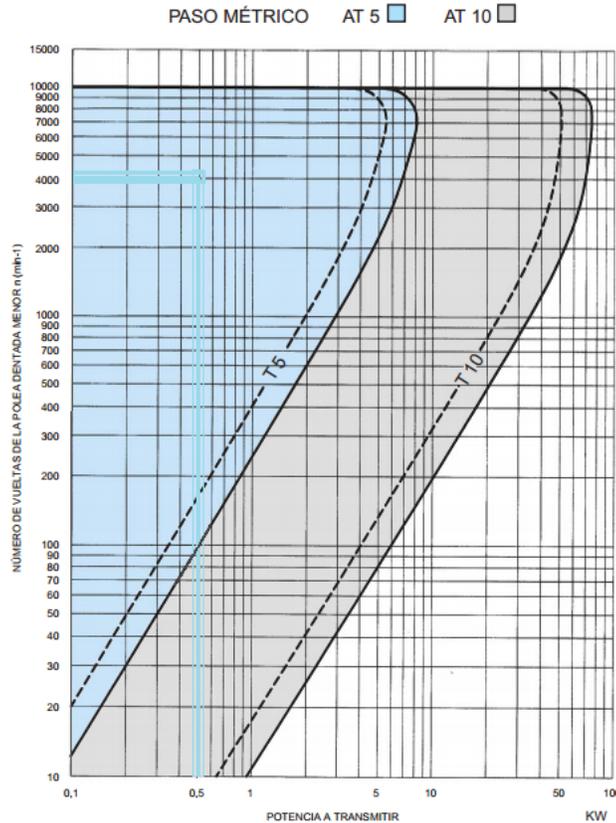
$$T_{motor} = T_{acel} + T_{resist} = 0,1028 + 0,0369 = 0,139 Nm$$

El motor seleccionado es de la marca Parvalux modelo PBL42-87 cuya hoja de características se adjunta en el anexo III y el resumen de sus principales características se muestran en la Tabla 4.12.

**Tabla 4.12** Características motor PBL42-87

Motor type	PBL42-87	
Max rated speed	rpm	4000
Rated torque	Nm	0.17
Rated power at max rated speed	W	71
Peak torque	Nm	0.555
DC bus voltage nominal	V	24
Back EMF	V/krpm	4
Torque constant	Nm/A	0.047
Rated current	A rms	3.6
Current for peak torque	A rms	13
Stator resistance (25 °C)	ohms	0.5
Number of poles		8
Dimension 'A'	mm	87
Inertia	gcm <sup>2</sup>	80
Weight	kg	0.73
Connector size - pin pitch	mm	5.08

En el caso en el que se trabaje a la máxima velocidad la potencia de salida es de 71 W, este dato permite ir a un catálogo de correas dentadas y elegir el paso de la correa. En la Figura 4.32 se muestra un gráfico velocidad vs. potencia a transmitir para seleccionar el paso métrico adecuado.



**Figura 4.32** Gráfica de selección de paso métrico

De la figura anterior se puede observar que para la potencia que se va a transmitir en el mecanismo es adecuado un paso métrico de 5 mm es decir una correa T5, por lo tanto se ha elegido una correa dentada del fabricante Michaud Chailly de longitud primitiva 1215 mm (número de referencia a8-10t5-1215).

Para seleccionar el acoplamiento mecánico se utiliza el torque pico del motor y un factor de seguridad de 2 porque hay muchos arranques e inversiones de giro del motor durante la operación del prototipo. Si se utiliza la ecuación (4.2) se tiene:

$$T_a = 0,555 \text{ Nm} * 2 = 1,11 \text{ Nm}$$

Se ha elegido por lo tanto el acoplamiento flexible del fabricante Ruland PSMR25-8-6-SS (ver anexo III).

#### 4.2.4 Análisis de elementos finitos

Con el objetivo de validar el diseño del nuevo prototipo de péndulo invertido, se utiliza el análisis por elementos finitos. Esta técnica utiliza métodos numéricos dividiendo la geometría de una pieza en la que se quiere resolver problemas físicos en pequeños elementos en los cuales la resolución de ecuaciones es discreta y en forma iterativa.

El análisis por elementos finitos considera las propiedades físicas de los materiales empleados, los elementos del entorno de vecindad, las condiciones de contorno y las fuentes generadoras de campo (la temperatura en transmisión del calor, el campo magnético en electromagnetismo, el campo de velocidades en mecánica de fluidos, etc.). Se ha realizado éste análisis para las piezas que se considera están más sometidas a esfuerzos utilizando el software de simulación de SolidWorks.

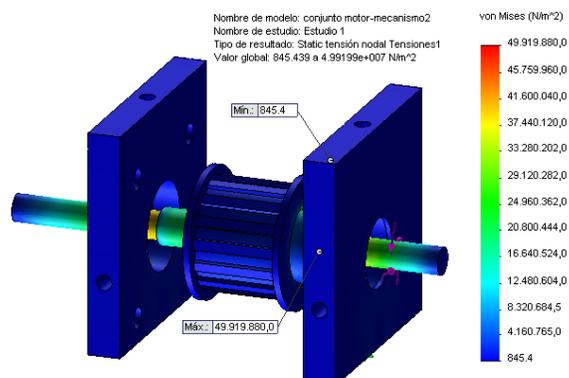
Haciendo uso de ésta herramienta se puede calcular desplazamientos, deformaciones y tensiones de los componentes con cargas internas y externas. Además utiliza elementos tetraédricos 3D, triangulares 2D y de viga como geometrías base permitiendo al usuario determinar el tamaño de dichos elementos al variar el mallado de la pieza, mientras más pequeño el mallado más preciso es el resultado obtenido pero el costo computacional es mayor.

Se ha realizado este análisis para verificar que no se supere el límite elástico y el límite de ruptura garantizando que la pieza no va a fallar (deformaciones, grietas, ruptura) durante el funcionamiento del prototipo.

##### 4.2.4.1 Análisis del conjunto motor-mecanismo

En este subconjunto se analiza sobre todo el árbol que transmite la potencia desde el motor a la polea conductora y las piezas de soporte de dicho árbol. Los soportes laterales no están sometidos a grandes esfuerzos y no actúa ninguna fuerza externa sobre ellos por lo que esas piezas no se han considerado en este análisis. El primer análisis realizado es el de tensión para verificar que no se supere la tensión límite elástica. El mallado en todos los análisis es el que ofrece SolidWorks por

defecto y se ha colocado una torsión de 1 N que es mucho mayor que el valor real de torque que se tiene con el motor seleccionado. La Figura 4.33 muestra este primer análisis.

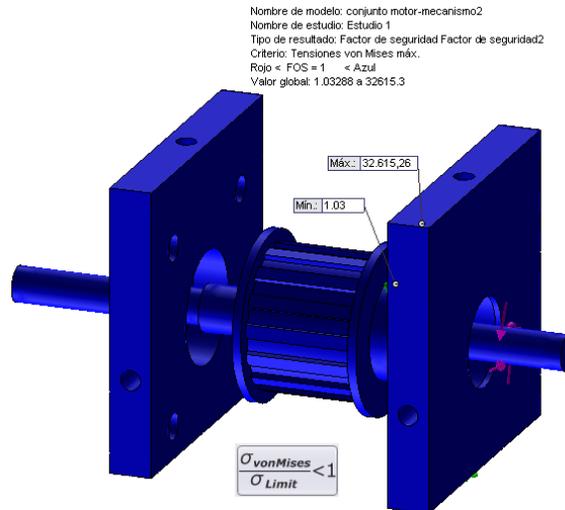


**Figura 4.33** Análisis de tensiones del conjunto motor-mecanismo

De este gráfico se puede concluir que la pieza que está más sometida a esfuerzo es el árbol de transmisión de movimiento. Los valores máximos ocurren en el árbol y como se puede observar no superan el límite elástico del acero y los valores mínimos están en las piezas de soporte de aluminio que tampoco superan su límite (límite elástico del aluminio 27574200 N/m<sup>2</sup> y del acero 620422000 N/m<sup>2</sup>).

Se realizó también el gráfico de factor de seguridad (FDS), el cual comprueba que a lo largo de las piezas no existe ningún punto que sea cercano a la unidad con lo cual la pieza no fallará (deformaciones permanentes o rotura).

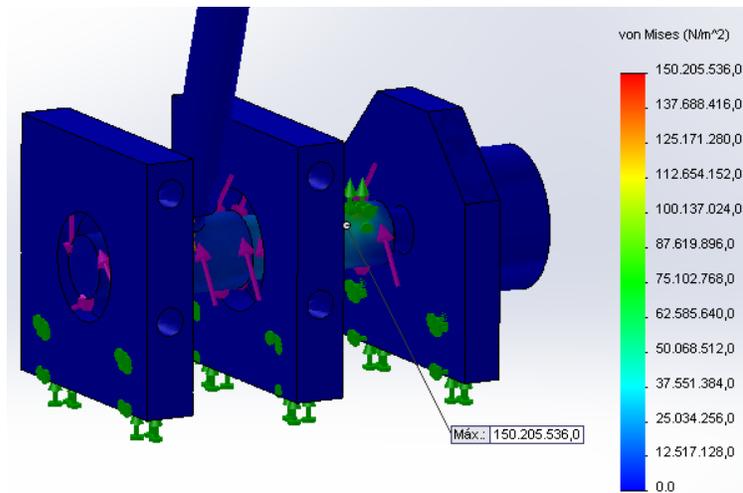
En esta gráfica se ha resaltado las áreas con un factor menor que uno y se utilizó el criterio de Von Mises máximo y el límite elástico. Como se puede apreciar en la Figura 4.34 no existe ningún punto que tenga un valor de factor de seguridad igual o mayor que uno. Como valor mínimo se tiene 1,03 en el agujero para el tornillo prisionero en la polea y el valor máximo 32615,3 que se encuentra en las piezas de soporte.



**Figura 4.34** Análisis del factor de seguridad del conjunto motor-mecanismo

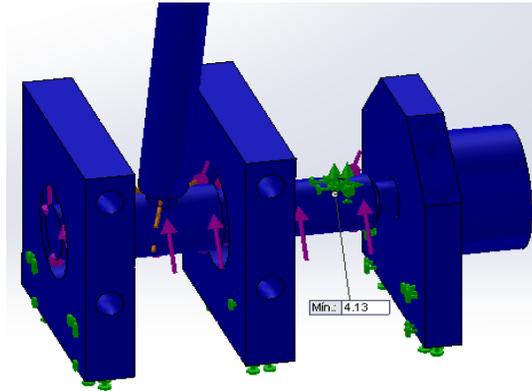
#### 4.2.4.2 Análisis del conjunto carro-guía lineal

En este conjunto una de las piezas a analizar es el eje central del carro que sostiene al péndulo de masa 176 gramos. Realizando un análisis de tensiones en el carro como se muestra en la Figura 4.35 se puede observar que las tensiones máximas ocurren en los taladros, ya que los orificios en una pieza son acumuladores de tensión, pero no se llega a sobrepasar el límite elástico del acero que es el material del árbol.



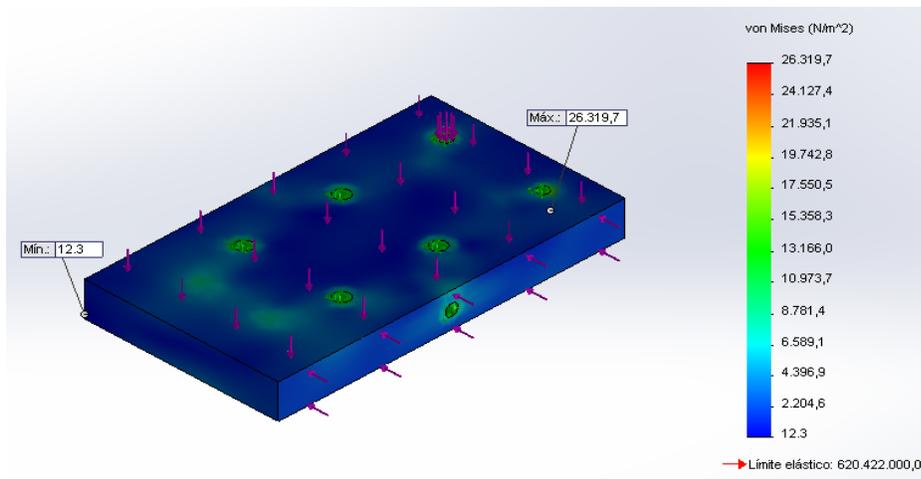
**Figura 4.35** Análisis de tensiones del carro

También se ha hecho el análisis de factor de seguridad el cual resalta que no hay ningún punto de la pieza con un factor de seguridad mayor a uno. El mínimo valor de 4,13 se ubica en el eje central del carro como se puede observar en la Figura 4.36.



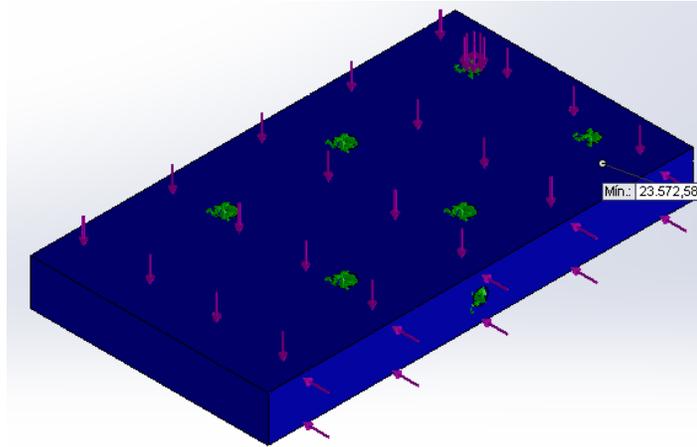
**Figura 4.36** Análisis de factor de seguridad del carro

Otra pieza analizada es la base del carro que se acopla a la guía lineal. La masa que debe soportar esta pieza de acero es de 402 gramos lo que implica un peso de aproximadamente 4 N y una fuerza lateral de 2N para acelerar el carro a 2 m/s en 0,7 seg. Como se puede observar en la Figura 4.37, no se supera el límite elástico y las tensiones máximas ocurren en los agujeros de taladros.



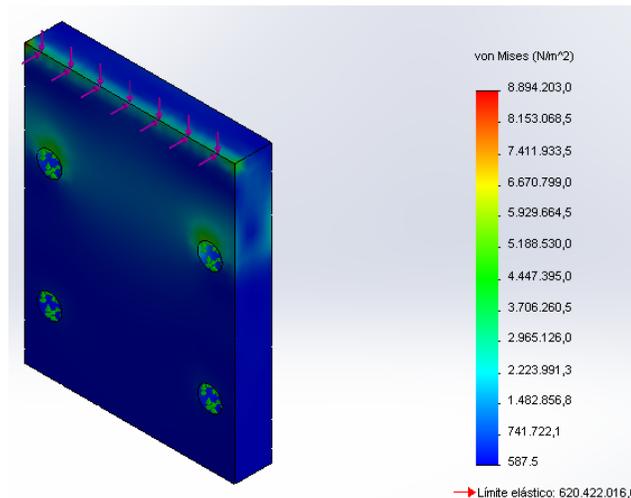
**Figura 4.37** Análisis de tensiones de la pieza base del carro

El análisis del factor de seguridad que se indica en la Figura 4.38 garantiza que esta pieza no va a tener fallo durante la operación del prototipo ya que tiene un valor mínimo de 23572,58.



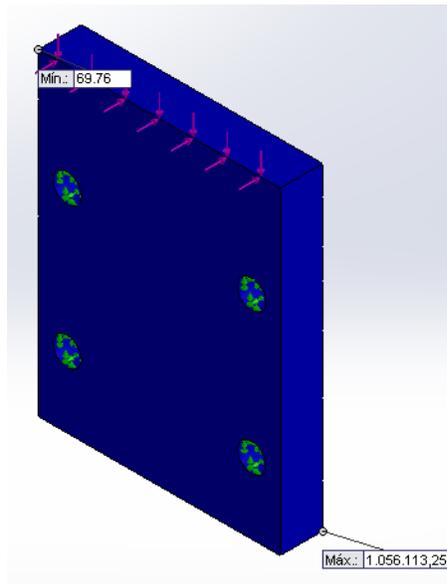
**Figura 4.38** Análisis de factor de seguridad de la pieza base del carro

Las piezas laterales que limitan el movimiento del péndulo también se analizaron para garantizar que no exista fallo cuando el péndulo golpee estos extremos. Utilizando una fuerza (50N) con dos componentes en la arista de contacto se observa en la Figura 4.39 que las máximas tensiones ocurren en los agujeros para tornillos superiores y en la arista, pero no se sobrepasa el límite de tensión elástica del acero.



**Figura 4.39** Análisis de tensiones para piezas laterales del carro

De la misma manera se comprobó el factor de seguridad de la pieza y no se tiene valores por debajo de 69,76 en los puntos de la arista en contacto como se indica en la Figura 4.40, por lo tanto no hay riesgo de deformaciones o de ruptura en el material.

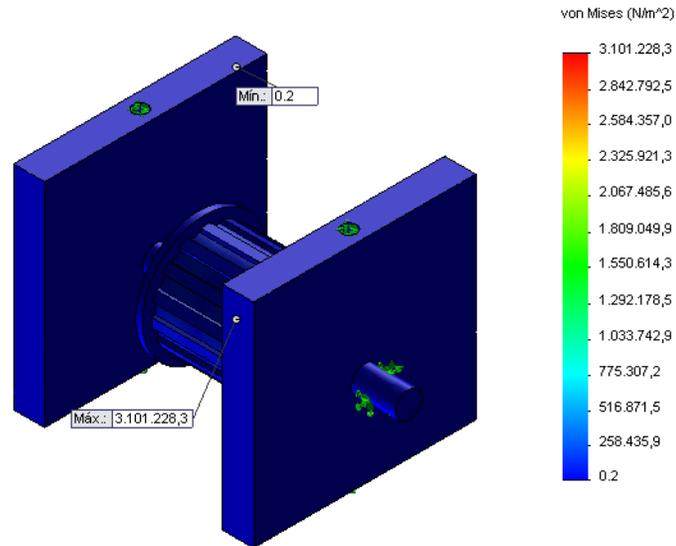


**Figura 4.40** Análisis de factor de seguridad en pieza lateral

#### 4.2.4.3 Análisis del conjunto de polea conducida

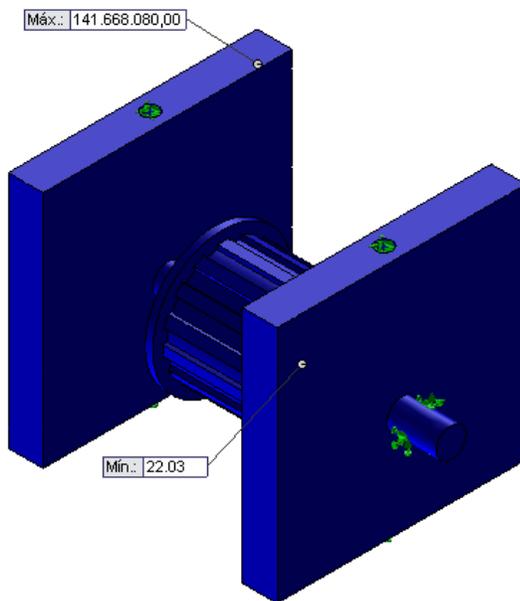
Para el análisis de este conjunto se toma en cuenta el mismo valor de torsión que en el conjunto motor-mecanismo, es decir 1N y las mismas condiciones de mallado para evitar un coste computacional demasiado alto. El primer análisis es el de tensiones donde se comprobó que los mayores valores ocurren en el interior de la polea conducida que se encuentra en contacto con el cojinete.

El valor mínimo para este análisis es de 0,2 N/m<sup>2</sup> y el valor máximo de 3101228,3 N/m<sup>2</sup> como se ilustra en la Figura 4.41.



**Figura 4.41** Análisis de tensión en el conjunto de polea conducida

Con el análisis de factor de seguridad se comprobó que el conjunto no sufrirá fallos, teniendo como valor mínimo 22,03 como se observa en la Figura 4.42.



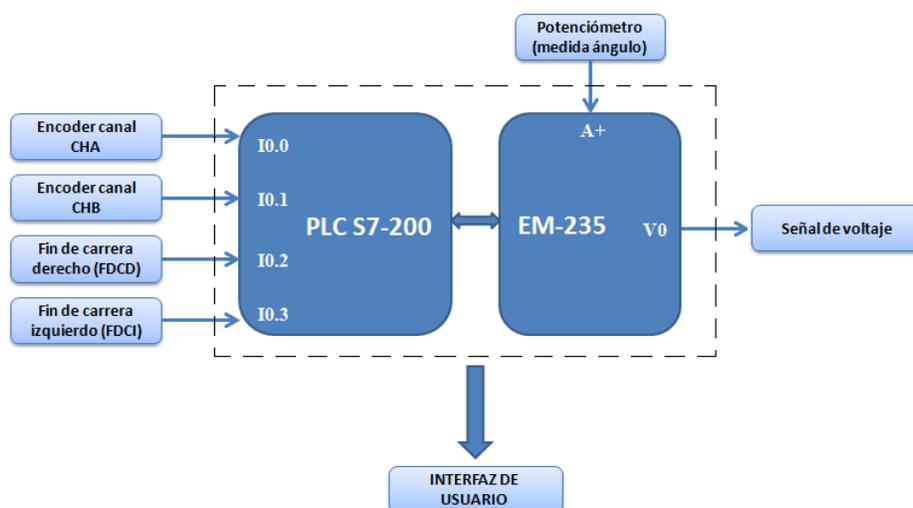
**Figura 4.42** Análisis de factor de seguridad del conjunto de polea conducida

## 5. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

En el presente capítulo se describe el subsistema de control, el cual toma las señales de los sensores, realiza el algoritmo de control y proporciona la señal de salida hacia el servomotor. El programa de control implementado en el PLC S7-200 se lo realizó en el software STEP 7 V4.0 y la interfaz de usuario en el software SIMATIC WINCC V6.0, siendo ambos programas propios del fabricante Siemens.

### 5.1 Descripción del programa de control

Para diseñar el programa implementado en el PLC, se ha considerado no solo como propósito el desarrollo del algoritmo de control, sino también la adecuada comunicación con la interfaz de usuario para el ingreso de datos y para mostrar los resultados, además de un apropiado manejo de las señales de entrada y salida. Un diagrama esquemático del subsistema de control con sus conexiones se muestra en la Figura 5.1



**Figura 5.1** Diagrama esquemático del subsistema de control

Para tener una idea global de las acciones que debe realizar el PLC ante determinados eventos, es necesario identificar estados dentro del proceso de ejecución y analizar cómo se realizan las transiciones entre dichos estados.

### 5.1.1 Identificación de eventos, acciones y estados

Los eventos de nuestro sistema consisten en las señales enviadas por el usuario desde la interfaz y en las señales de los interruptores de fin de carrera que indican que el carro está en uno de los extremos. La Tabla 5.1 resume los eventos del sistema.

**Tabla 5.1** Tabla de eventos del sistema

<b>NOMBRE DEL EVENTO</b>	<b>PRODUCIDO CUANDO:</b>
SEL_PID()	Se elige el modo de control PID
OK_PID()	Se confirma parámetros del controlador PID del péndulo
OK_PIDP()	Se confirma parámetros del controlador PID de la posición del carro
OK_PIDA()	Se confirma parámetros de los controladores PID de péndulo y posición
SEL_FUZZY()	Se elige el modo de control FUZZY
EA()	Se elige el control Fuzzy con un parámetro de entrada (ángulo)
EDA()	Se elige el control Fuzzy con dos parámetros de entrada (ángulo y derivada)
OK_FUZZY()	Se confirma parámetros del controlador FUZZY
INICIO()	Se elige iniciar el proceso
PARO()	Se elige detener el proceso
VOLVER()	Se elige cambiar entre controlador PID y FUZZY
FDCD()	El carro está en el extremo derecho
FDCI()	El carro está en el extremo izquierdo
HC0()	El carro está en una posición determinada
VAR_PRIMERA_VEZ()	Se activo el algoritmo de control
eTimeout63()	Señal de finalización de temporizador T63 (5seg)
eTimeout37()	Señal de finalización de temporizador T37 (5seg)

Las acciones consisten en las salidas del sistema, en este caso la única salida física es el voltaje del motor que permite variar la velocidad del mismo.

**Tabla 5.2** Tabla de acciones del sistema

<b>ACCIÓN</b>	<b>TRABAJO REALIZADO</b>
velocidad_motor()	Se coloca un valor entre -32000 y 32000 en la salida analógica para controlar la velocidad del motor.

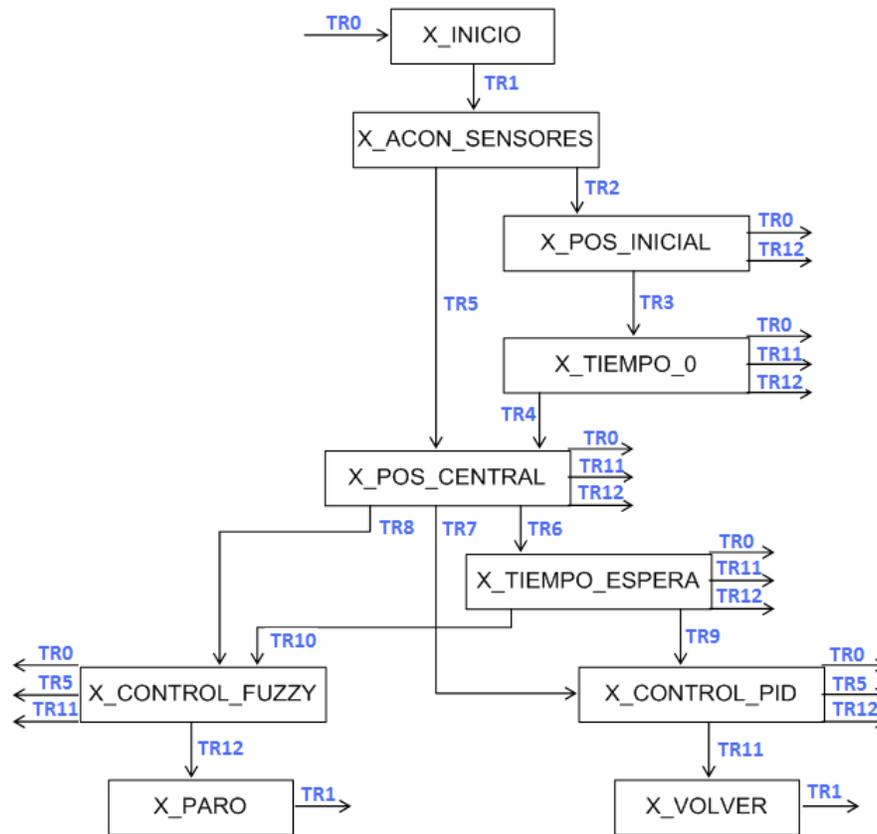
A continuación se identifican los diferentes estados que tiene el programa para el funcionamiento del prototipo. En un estado se realiza alguna actividad o se espera algún evento, bajo este aspecto se han considerado los estados que se indican en la Tabla 5.3.

**Tabla 5.3** Tabla de estados del sistema

NOMBRE DEL ESTADO	DESCRIPCIÓN
X_INICIO	Es el primer estado al que se ingresa cuando se inicia el programa.
X_ACON_SENSORES	Se lee los valores de los sensores del ángulo del péndulo y de la posición del carro.
X_POS_INICIAL	El usuario manipula manualmente el carro hasta encontrar el extremo derecho que es la referencia del sistema.
X_TIEMPO_0	El sistema espera 5 segundos antes de posicionarse centralmente.
X_POS_CENTRAL	Se posiciona el carro en el centro de la guía lineal.
X_TIEMPO_ESPERA	Se espera 6 segundos antes de iniciar el algoritmo de control.
X_CONTROL_PID	En este estado se realiza el control PID del prototipo.
X_CONTROL_FUZZY	En este estado se realiza el control FUZZY del prototipo.
X_PARO	Se reinicia el sistema para volver a seleccionar los parámetros del controlador seleccionado.
X_VOLVER	Se reinicia el sistema para volver a elegir entre control PID y control FUZZY.

### 5.1.2 Identificación de transiciones

Una vez identificado los diferentes eventos, acciones y estados es posible relacionarlos a través de transiciones, que son una combinación lógica de los eventos o un conjunto de condiciones que permiten la activación y desactivación de estados. Las transiciones que ingresan a los estados son de activación y las transiciones que salen de los estados permiten la desactivación del mismo. En la Figura 5.2 se muestra un diagrama de la lógica que ejecuta el programa del PLC para la activación y desactivación secuencial de estados.



**Figura 5.2** Diagrama de estados del programa del PLC

El paso de un estado a otro ocurre cuando se cumple la condición de franqueabilidad esto quiere decir que la transición tiene un valor lógico igual a 1. A continuación se muestra cada una de las transiciones con su respectiva combinación lógica.

TR0 = SM0.1 //Es la marca interna del PLC que indica el primer ciclo de ejecución.

TR1 = SM0.0 //Esta marca interna del PLC se activa en cada ciclo de ejecución del programa.

TR2 = X\_ACON\_SENSORES **AND** (SEL\_PID(on) **OR** SEL\_FUZZY (on)) **AND** INICIO(off)  
**AND** VAR\_PRIMERA\_VEZ(off)

TR3 = X\_POS\_INICIAL AND FDCD(on) AND {[SEL\_PID(on) AND ((OK\_PID(on) OR OK\_PIDP(on) OR OK\_PIDA(on)) ) OR [SEL\_FUZZY(on) AND OK\_FUZZY(on) AND (EA(on) OR EDA(on))]} AND INICIO(on) AND VAR\_PRIMERA\_VEZ(off)

TR4 = X\_TIEMPO\_0 AND {[SEL\_PID(on) AND ((OK\_PID(on) OR OK\_PIDP(on) OR OK\_PIDA(on)))] OR [SEL\_FUZZY(on) AND OK\_FUZZY(on) AND (EA(on) OR EDA(on))]} AND INICIO(on) AND eTimeout63(on) AND VAR\_PRIMERA\_VEZ(off)

TR5 = X\_ACON\_SENSORES AND {[SEL\_PID(on) AND ((OK\_PID(on) OR OK\_PIDP(on) OR OK\_PIDA(on)))] OR [SEL\_FUZZY(on) AND OK\_FUZZY(on) AND (EA(on) OR EDA(on))]} AND INICIO(on) AND (FDCD(on) OR FDCI(on) OR HC0( $\leq$ 250) OR HC0( $\geq$ 6500)) AND VAR\_PRIMERA\_VEZ(on)

TR6 = X\_POS\_CENTRAL AND {[SEL\_PID(on) AND ((OK\_PID(on) OR OK\_PIDP(on) OR OK\_PIDA(on)))] OR [SEL\_FUZZY(on) AND OK\_FUZZY(on) AND (EA(on) OR EDA(on))]} AND INICIO(on) AND HC0( $\leq$ 4000) AND HC0( $\geq$ 3000) AND VAR\_PRIMERA\_VEZ(off)

TR7 = X\_POS\_CENTRAL AND [SEL\_PID(on) AND ((OK\_PID(on) OR OK\_PIDP(on) OR OK\_PIDA(on)))] AND INICIO(on) AND HC0( $\leq$ 4000) AND HC0( $\geq$ 3000) AND VAR\_PRIMERA\_VEZ(on)

TR8 = X\_POS\_CENTRAL AND SEL\_FUZZY(on) AND OK\_FUZZY(on) AND (EA(on) OR EDA(on)) AND INICIO(on) AND HC0( $\leq$ 4000) AND HC0( $\geq$ 3000) AND VAR\_PRIMERA\_VEZ(on)

TR9 = X\_TIEMPO\_ESPERA AND SEL\_PID(on) AND (OK\_PID(on) OR OK\_PIDP(on) OR OK\_PIDA(on)) AND INICIO(on) AND eTimeout37(on) AND VAR\_PRIMERA\_VEZ(off)

TR10 = X\_TIEMPO\_ESPERA AND SEL\_FUZZY(on) AND OK\_FUZZY(on) AND (EA(on) OR EDA(on)) AND INICIO(on) AND eTimeout37(on) AND VAR\_PRIMERA\_VEZ(off)

TR11 = PARO(on)

TR12 = VOLVER(on)

### 5.1.3 Descripción de acciones internas en cada estado

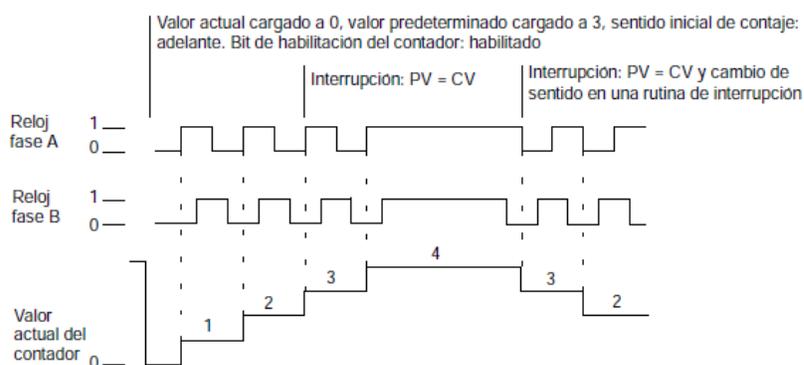
Aunque el sistema solo tenga una acción externa que es el voltaje de alimentación del motor, internamente se ejecutan más acciones que permiten implementar el algoritmo de control, el acondicionamiento de señales y la adaptación de valores para mostrar en la interfaz de usuario. En cada estado se describe su condición de activación, desactivación y las actividades que se realizan.

#### 5.1.3.1 Estado X\_INICIO

**Tabla 5.4** Descripción del estado X\_INICIO

<i>X_INICIO</i>	
<b>Activación</b>	TR0
<b>Desactivación</b>	TR1
<b>Acciones</b>	Activa subrutina de inicialización de contadores rápidos y encera variables.

En este estado se configura los contadores rápidos del PLC en modo de operación 10 para determinar la posición del carro, para esto se usa las señales de los canales A y B del encoder, y la señal del fin de carrera derecho para poner en cero el contador como se indica en la Figura 5.3.



**Figura 5.3** Modo de operación 10 de los contadores rápidos [13]

5.1.3.2 Estado *X\_ACON\_SENSORES***Tabla 5.5** Descripción del estado *X\_ACON\_SENSORES*

<i>X_ACON_SENSORES</i>	
<b>Activación</b>	TR1
<b>Desactivación</b>	TR2 OR TR5
<b>Acciones</b>	Acondiciona la señal del contador rápido y del ángulo de inclinación del péndulo.

La señal del contador rápido HC0 varía desde 0 (extremo derecho de guía lineal) hasta 7000 (extremo izquierdo de guía lineal), por lo tanto en este estado se ha escalado a valores de 0 a 32000 para utilizarlo en los algoritmos de control y de 0 cm a 80 cm para utilizarlo en la interfaz de usuario. El ángulo de inclinación varía de 0 a 32000, por lo tanto se ha hecho el mismo procedimiento de escalamiento para tener su valor en grados (-20° a 20°) y se ha eliminado los dos bits menos significativos de la variable para mejorar la sintonización del algoritmo PID.

5.1.3.3 Estado *X\_POS\_INICIAL***Tabla 5.6** Descripción del estado *X\_POS\_INICIAL*

<i>X_POS_INICIAL</i>	
<b>Activación</b>	TR2
<b>Desactivación</b>	TR0 OR TR3 OR TR12
<b>Acciones</b>	velocidad_motor(+16000) OR velocidad_motor(-16000)  Se guarda los datos de configuración del controlador Fuzzy que el usuario ingresa en la interfaz en variables internas del PLC.

Este estado obedece los comandos de la interfaz que permiten mover el carro hacia la derecha o izquierda para posicionarlo en el extremo de referencia y encerrar el contador rápido HC0 para obtener la posición correcta del carro en todo momento. Para mover a la izquierda se coloca valores negativos en la salida analógica y para mover hacia la derecha valores positivos (salida de tipo bipolar). El inicio del proceso de control no es posible si el carro no se encuentra en su posición de referencia, además los fines de carrera protegen al motor ya que si son activados el valor de voltaje enviado al motor es cero evitando su movimiento.

5.1.3.4 Estado X\_TIEMPO\_0

**Tabla 5.7** Descripción del estado X\_TIEMPO\_0

<i>X_TIEMPO_0</i>	
<b>Activación</b>	TR3
<b>Desactivación</b>	TR0 OR TR4 OR TR11 OR TR12
<b>Acciones</b>	Temporizador T63(on)  Se guarda los datos de configuración de los controladores PID que el usuario ingresa en la interfaz en variables internas del PLC.  Cálculo de rectas de las funciones de pertenencia del control Fuzzy.

En este estado, el programa espera 5 segundos desde que el usuario presiona el botón de inicio antes de continuar al siguiente estado. Mientras se está en el modo de espera, las variables requeridas en los algoritmos de control son calculadas o configuradas desde la interfaz.

5.1.3.5 Estado X\_POS\_CENTRAL

**Tabla 5.8** Descripción del estado X\_POS\_CENTRAL

<i>X_POS_CENTRAL</i>	
<b>Activación</b>	TR4 OR TR5
<b>Desactivación</b>	TR0 OR TR6 OR TR7 OR TR8 OR TR11 OR TR12
<b>Acciones</b>	velocidad_motor(-21000)

Después de transcurrir los 5 segundos del estado anterior, se habilita la subrutina para posicionar centralmente el carro, para esto se coloca un valor negativo en la salida analógica hasta que el sensor de posición indique que está en el centro.

5.1.3.6 Estado X\_TIEMPO\_ESPERA

**Tabla 5.9** Descripción del estado X\_TIEMPO\_ESPERA

<i>X_TIEMPO_ESPERA</i>	
<b>Activación</b>	TR6
<b>Desactivación</b>	TR0 OR TR9 OR TR10 OR TR11 OR TR12
<b>Acciones</b>	Temporizador T37(on)

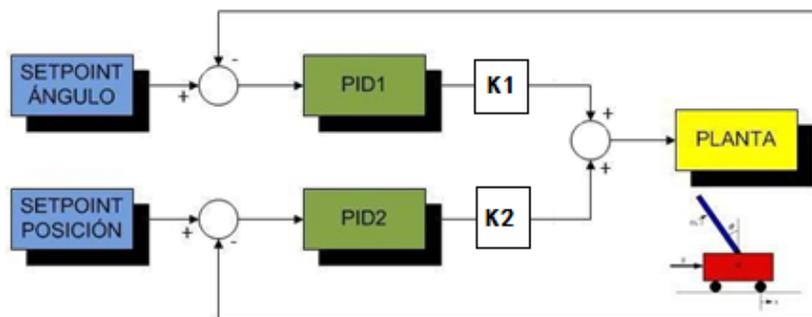
En este estado se habilita un temporizador de 6 segundos para hacer una pequeña prórroga desde que el carro se ubica en la posición central hasta que inicia el algoritmo de control seleccionado por el usuario.

5.1.3.7 Estado X\_CONTROL\_PID

**Tabla 5.10** Descripción del estado X\_CONTROL\_PID

<i>X_CONTROL_PID</i>	
<b>Activación</b>	TR7 OR TR9
<b>Desactivación</b>	TR0 OR TR5 OR TR11 OR TR12
<b>Acciones</b>	velocidad_motor(salida algoritmo PID)

En este estado se encuentran dos lazos PID, uno para el control del péndulo invertido y el otro para el control de posición del carro. El usuario puede elegir entre estos dos lazos de control PID o activar los dos lazos en cuyo caso la salida total del sistema es la suma de las respuestas de los dos controladores saturada [26], esto implica que si la suma es mayor que 32000 o menor que -32000 (valores máximos de la salida analógica) la salida se limita a esos valores. Existe una ganancia después de cada PID para dar más prioridad a un control u otro en el caso de utilizarse los dos. La Figura 5.4 muestra el funcionamiento de los dos controladores PID.



**Figura 5.4** Algoritmo de control con dos lazos PID

Para realizar este algoritmo se utilizó el asistente PID que proporciona el PLC S7-200. La configuración de este asistente se realiza en siete pasos que se describen a continuación.

- Indicar el número de lazo: En el presente proyecto se configura dos lazos. El lazo 0 para el PID de control de ángulo y el lazo 1 para el PID de control de posición.
- Ajustar los parámetros del lazo: En este paso se configura la ganancia, tiempo de muestreo, tiempo de acción integral y tiempo de acción derivativa.
- Ajustar las opciones de entrada y salida del lazo: Se debe indicar como escalar la variable de proceso, de manera unipolar (0 a 32000) o bipolar (-32000 a 32000) y configurar la variable de salida entre analógica o digital y el escalamiento requerido.
- Ajustar las opciones de Alarma del lazo: Es posible configurara alarmas para saber si la variable de proceso es muy baja, muy alta o para habilitar la comprobación de.
- Indicar el área de memoria para cálculos: El algoritmo PID utiliza una tabla de 36 bytes de memoria V [13] para almacenar los parámetros utilizados en el funcionamiento del lazo por lo tanto se debe indicar en qué dirección inicia la tabla.
- Indicar la subrutina de inicialización y la rutina de interrupción: Los nombres de las rutinas se colocan por defecto pero es posible también elegir el nombre que mejor se adapte a nuestro programa.
- Generar código PID: En este paso se muestra una lista de las unidades de organización del programa generadas por el asistente PID y describe como se deben integrar al programa.

En este proyecto la configuración de los dos lazos se realizó como se muestra en la Tabla 5.11.

**Tabla 5.11** Configuración de parámetros PID

PARÁMETRO	LAZO 0 (PID ÁNGULO)	LAZO 1 (PID POSICIÓN)
Límite inferior de la consigna de lazo	0.0	0.0
Límite superior de la consigna de lazo	1.0	1.0
Ganancia	Ingresado por el usuario	Ingresado por el usuario
Tiempo de acción integral	Ingresado por el usuario	Ingresado por el usuario
Tiempo de acción derivativa	Ingresado por el usuario	Ingresado por el usuario
Tiempo de muestreo	0.1 seg	0.2 seg
Escalamiento variable de proceso	Unipolar (0 a 32000)	Unipolar (0 a 32000)
Escalamiento variable de salida	Bipolar (-32000 a 32000)	Bipolar (-32000 a 32000)
Alarmas	Ninguna	Ninguna
Dirección de tabla	VB0 hasta VB119	VB120 hasta VB239
Subrutina de inicialización	PID0_INIT	PID1_INIT
Rutina de interrupción	PID_EXE	PID_EXE

Una descripción más detallada de la tabla de parámetros del lazo PID nos da el fabricante en el manual del PLC y se indica en la Tabla 5.12.

**Tabla 5.12** Tabla del lazo PID [13]

Offset	Campo	Formato	Tipo de datos	Descripción
0	Variable de proceso (PV <sub>n</sub> )	REAL	In	Contiene la variable de proceso que debe estar escalada entre 0,0 y 1,0.
4	Consigna (SP <sub>n</sub> )	REAL	In	Contiene la consigna que debe estar escalada entre 0,0 y 1,0.
8	Salida (M <sub>n</sub> )	REAL	In/Out	Contiene la salida calculada, escalada entre 0,0 y 1,0.
12	Ganancia (K <sub>C</sub> )	REAL	In	Contiene la ganancia, que es una constante proporcional. Puede ser un número positivo o negativo.
16	Tiempo de muestreo (T <sub>S</sub> )	REAL	In	Contiene el tiempo de muestreo en segundos. Tiene que ser un número positivo.
20	Tiempo de acción integral (T <sub>I</sub> )	REAL	In	Contiene el tiempo de acción integral en minutos. Tiene que ser un número positivo.
24	Tiempo de acción derivativa (T <sub>D</sub> )	REAL	In	Contiene el tiempo de acción derivativa en minutos. Tiene que ser un número positivo.
28	Suma integral (MX)	REAL	In/Out	Contiene el valor de la suma integral entre 0,0 y 1,0.
32	Variable de proceso previa (PV <sub>n1</sub> )	REAL	In/Out	Contiene el valor almacenado de la variable de proceso al ejecutar por última vez la instrucción PID.
36 a 79	Reservados para variables de autosintonía. Para más detalles, consulte la tabla 15-1.			

### 5.1.3.8 Estado X\_CONTROL\_FUZZY

**Tabla 5.13** Descripción del estado X\_CONTROL\_FUZZY

<i>X_CONTROL_FUZZY</i>	
<b>Activación</b>	TR8 OR TR10
<b>Desactivación</b>	TR0 OR TR5 OR TR11 OR TR12
<b>Acciones</b>	velocidad_motor(salida algoritmo FUZZY)

En este estado se implementa el algoritmo de control difuso que puede tener como entrada solo el error del ángulo o el error y su derivada. El algoritmo está formado de tres etapas, la fusificación, la máquina de inferencias en base a reglas establecidas y la defusificación. Como datos de entrada del algoritmo el usuario debe definir las funciones de pertenencia de las variables de entrada y salida. En este proyecto se ha determinado cinco funciones de pertenencia de tipo triangular, por lo tanto el usuario debe ingresar los valores del extremo izquierdo, central y derecho de cada función.

Para el caso de la variable de entrada *error del ángulo*, que varía máximo entre -16000 y 16000 se tiene las funciones que se muestran en la Tabla 5.14.

**Tabla 5.14** Funciones de pertenencia de error del ángulo

<b>ERROR DEL ÁNGULO</b>		
<b>FUNCIÓN DE PERTENENCIA</b>	<b>PUNTOS (variable en PLC)</b>	<b>VALOR</b>
MUY IZQUIERDA (MI)	Centro (MI_C)	Determinado en interfaz
	Derecha (MI_DER)	Determinado en interfaz
POCO IZQUIERDA (PI)	Izquierda (PI_IZQ)	Determinado en interfaz
	Centro (PI_C)	Determinado en interfaz
	Derecha (PI_DER)	Determinado en interfaz
CENTRO (C)	Izquierda (C_IZQ)	Determinado en interfaz
	Centro (C_C)	Determinado en interfaz
	Derecha (C_DER)	-C_IZQ
POCO DERECHA (PD)	Izquierda (PD_IZQ)	-PI_DER
	Centro (PD_C)	-PI_C
	Derecha (PD_DER)	-PI_IZQ
MUY DERECHA (MD)	Izquierda (MD_IZQ)	-MI_DER
	Centro (MD_C)	-MI_C

<b>VALORES DE ENTRADA</b>

<b>GRÁFICO DE FUNCIONES DE PERTENENCIA</b>

Para la variable de entrada *derivada del error* se ha considerado cambios bruscos de posición angular de 0 a 32000 en un milisegundo por lo tanto la variación máxima de esta entrada está entre -32000 y 32000 y las funciones de pertenencia se muestran en la Tabla 5.15.

**Tabla 5.15** Funciones de pertenencia de la derivada del error

<b>DERIVADA DEL ERROR</b>		
<b>FUNCIÓN DE PERTENENCIA</b>	<b>PUNTOS (variable en PLC)</b>	<b>VALOR</b>
VELOCIDAD MUY NEGATIVA (VMN)	Centro (VMN_C)	Determinado en interfaz
	Derecha (VMN_DER)	VPN_C
VELOCIDAD POCO NEGATIVA (VPN)	Izquierda (VPN_IZQ)	VMN_C
	Centro (VPN_C)	Determinado en interfaz
VELOCIDAD CERO (VC)	Derecha (VPN_DER)	VC_C
	Izquierda (VC_IZQ)	VPN_C
	Centro (VC_C)	Determinado en interfaz
VELOCIDAD POCO POSITIVA (VPP)	Derecha (VC_DER)	-VPN_C
	Izquierda (VPP_IZQ)	-VC_C
	Centro (VPP_C)	-VPN_C
VELOCIDAD MUY POSITIVA (MD)	Derecha (VPP_DER)	-VMN_C
	Izquierda (VMP_IZQ)	-VPN_C
	Centro (VMP_C)	-VMN_C
<b>VALORES DE ENTRADA</b>		
$\text{velocidad}_{\max} = \frac{\text{posición final} - \text{posición inicial}}{\text{tiempo}} = \frac{32000 - 0}{1\text{ms}} = 32000 \text{ 1/ms}$		
$\text{velocidad}_{\max} = \frac{0 - 32000}{1\text{ms}} = -32000 \text{ 1/ms}$		
<b>GRÁFICO DE FUNCIONES DE PERTENENCIA</b>		
<p>El gráfico muestra cinco funciones de pertenencia triangulares en un eje horizontal que representa la derivada del error. Los puntos de activación en el eje horizontal son VMN_C, VPN_C, VC_C, -VPN_C y -VMN_C. El eje vertical representa el grado de pertenencia, con marcas en 0, 0.5 y 1. Las funciones son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>VMN (azul):</b> Valor 1 para valores menores que VMN_C, decrece linealmente a 0 en VPN_C.</li> <li><b>VPN (rojo):</b> Aumenta linealmente de 0 en VPN_C a 1 en VC_C, luego decrece linealmente a 0 en -VPN_C.</li> <li><b>VC (verde):</b> Aumenta linealmente de 0 en VPN_C a 1 en VC_C.</li> <li><b>VPP (púrpura):</b> Aumenta linealmente de 0 en VC_C a 1 en -VPN_C.</li> <li><b>VMP (cian):</b> Aumenta linealmente de 0 en -VPN_C a 1 en -VMN_C, luego permanece constante en 1 para valores menores que -VMN_C.</li> </ul>		

La variable de salida es la *velocidad del motor* que se obtiene a través de una salida analógica que proporciona el voltaje de alimentación del motor, esta salida es de tipo bipolar, es decir varía entre -32000 y 32000. Debido al método de defusificación empleado, no hace falta utilizar una función de pertenencia triangular, sino una recta cuyo valor esta dado por el usuario y se ilustra en la Tabla 5.16.

**Tabla 5.16** Funciones de pertenencia de la velocidad del motor

<b>VELOCIDAD DEL MOTOR</b>		
<b>FUNCIÓN DE PERTENENCIA</b>	<b>PUNTOS (variable en PLC)</b>	<b>VALOR</b>
RÁPIDO IZQUIERDA (RI)	Centro (RI_C)	Determinado en interfaz
LENTO IZQUIERDA (LI)	Centro (LI_C)	Determinado en interfaz
CERO (Z)	Centro (Z_C)	Determinado en interfaz
LENTO DERECHA (LD)	Centro (LD_C)	-LI_C
RÁPIDO DERECHA (RD)	Centro (RD_C)	-RI_C
<b>VALORES DE SALIDA</b>		
salida <sub>max</sub> = 32000 → voltaje <sub>max</sub> = 18,57 V		
salida <sub>min</sub> = -32000 → voltaje <sub>min</sub> = -18,57 V		
<b>GRÁFICO DE FUNCIONES DE PERTENENCIA</b>		
<p>El gráfico muestra cinco funciones de pertenencia representadas por rectas verticales de igual altura (valor 1) y anchura (valor 1). Las funciones son: RI (azul) centrada en RI_C; LI (rojo) centrada en LI_C; Z (verde) centrada en Z_C; LD (púrpura) centrada en -LI_C; y RD (cian) centrada en -RI_C. El eje horizontal está etiquetado con RI_C, LI_C, Z_C, -LI_C y -RI_C. El eje vertical tiene marcas 0 y 1.</p>		

### *Fusificación*

Cuando el estado X\_CONTROL\_FUZZY es activado, se habilita las subrutinas de fusificación de las variables de entrada (error de ángulo y derivada). En estas subrutinas, se calcula el grado de pertenencia de la variable a cada función o conjunto difuso. El análisis en esta primera etapa del algoritmo se muestra en la Tabla 5.17.

**Tabla 5.17** Algoritmo de fusificación

<b>ERROR ÁNGULO</b>		
<b>CONJUNTO DE FUSIFICACIÓN</b>	<b>COMPARACIÓN</b>	<b>VARIABLE DE PLC CON VALOR FUSIFICADO</b>
MUY IZQUIERDA (MI)	$error < MI\_C$	FUS_MI = 1
	$MI\_C \leq error \leq MI\_DER$	FUS_MI = ecuación de recta
	$error > MI\_DER$	FUS_MI = 0
POCO IZQUIERDA (PI)	$PI\_IZQ \leq error \leq PI\_C$	FUS_PI = ecuación de recta
	$PI\_C < error \leq PI\_DER$	FUS_PI = ecuación de recta
	$error > PI\_DER$ OR $error < PI\_IZQ$	FUS_PI = 0
CENTRO (C)	$C\_IZQ \leq error \leq C\_C$	FUS_C = ecuación de recta
	$C\_C < error \leq C\_DER$	FUS_C = ecuación de recta
	$error > C\_DER$ OR $error < C\_IZQ$	FUS_C = 0
POCO DERECHA (PD)	$PD\_IZQ \leq error \leq PD\_C$	FUS_PD = ecuación de recta
	$PD\_C < error \leq PD\_DER$	FUS_PD = ecuación de recta
	$error > PD\_DER$ OR $error < PD\_IZQ$	FUS_PD = 0
MUY DERECHA (MD)	$error > MD\_C$	FUS_MD = 1
	$MD\_IZQ \leq error \leq MD\_C$	FUS_MD = ecuación de recta
	$error < MD\_IZQ$	FUS_MD = 0
<b>DERIVADA DEL ERROR DEL ÁNGULO</b>		
<b>CONJUNTO DE FUSIFICACIÓN</b>	<b>COMPARACIÓN</b>	<b>VARIABLE DE PLC CON VALOR FUSIFICADO</b>
VELOCIDAD MUY NEGATIVA (VMN)	$deriv < VMN\_C$	FUS_VMN = 1
	$VMN\_C \leq deriv \leq VMN\_DER$	FUS_VMN = ecuación de recta
	$deriv > VMN\_DER$	FUS_VMN = 0
VELOCIDAD POCO NEGATIVA (VPN)	$VPN\_IZQ \leq deriv \leq VPN\_C$	FUS_VPN = ecuación de recta
	$VPN\_C < deriv \leq VPN\_DER$	FUS_VPN = ecuación de recta
	$deriv > VPN\_DER$ OR $deriv < VPN\_IZQ$	FUS_VPN = 0
VELOCIDAD CERO (VC)	$VC\_IZQ \leq deriv \leq VC\_C$	FUS_VC = ecuación de recta
	$VC\_C < deriv \leq VC\_DER$	FUS_VC = ecuación de recta
	$deriv > VC\_DER$ OR $deriv < VC\_IZQ$	FUS_VC = 0
VELOCIDAD POCO POSITIVA (VPP)	$VPP\_IZQ \leq deriv \leq VPP\_C$	FUS_VPP = ecuación de recta
	$VPP\_C < deriv \leq VPP\_DER$	FUS_VPP = ecuación de recta
	$deriv > VPP\_DER$ OR $deriv < VPP\_IZQ$	FUS_VPP = 0
VELOCIDAD MUY POSITIVA (VMP)	$deriv > VMP\_C$	FUS_VMP = 1
	$VMP\_IZQ \leq deriv \leq VMP\_C$	FUS_VMP = ecuación de recta
	$deriv < VMP\_IZQ$	FUS_VMP = 0

*Máquina de inferencias*

En esta fase se evalúa cada una de las reglas difusas a través de dos subrutinas, una en el caso de una sola entrada y otra para cuando se emplea las dos entradas. Las reglas para una entrada se muestran en la Tabla 5.18.

**Tabla 5.18** Reglas difusas para una entrada

<b>SUBROUTINA Reglas</b>	
<b>REGLA DIFUSA</b>	<b>OPERACIÓN EN PLC</b>
Si <i>error del ángulo</i> muy izquierda (MI), entonces <i>velocidad del motor</i> rápido izquierda (RI).	FUS_RI = FUS_MI
Si <i>error del ángulo</i> poco izquierda (PI), entonces <i>velocidad del motor</i> lento izquierda (LI).	FUS_LI = FUS_PI
Si <i>error del ángulo</i> centro (C), entonces <i>velocidad del motor</i> cero (Z).	FUS_Z = FUS_C
Si <i>error del ángulo</i> poco derecha (PD), entonces <i>velocidad del motor</i> lento derecha (LD).	FUS_LD = FUS_PD
Si <i>error del ángulo</i> muy derecha (MD), entonces <i>velocidad del motor</i> rápido derecha (RD).	FUS_RD = FUS_MD

En el caso de que el algoritmo tenga dos entradas, se establece las reglas utilizando como operador difuso el concepto de *mínimo* (operador Y) como se muestra en la Tabla 5.19.

**Tabla 5.19** Reglas difusas para dos entradas

<b>SUBROUTINA Reglas 2</b>	
<b>REGLA DIFUSA</b>	<b>OPERACIÓN EN PLC</b>
Si <i>error del ángulo</i> muy izquierda (MI) <b>Y</b> <i>derivada</i> cero (VC), <b>ENTONCES</b> <i>velocidad del motor</i> rápido izquierda (RI).	FUS_RI_1 = min[FUS_MI,FUS_VC]
Si <i>error del ángulo</i> poco izquierda (PI) <b>Y</b> <i>derivada</i> cero (VC), <b>ENTONCES</b> <i>velocidad del motor</i> lento izquierda (LI).	FUS_LI_1 = min[FUS_PI,FUS_VC]
Si <i>error del ángulo</i> poco izquierda (PI) <b>Y</b> <i>derivada</i> poco positiva (VPP), <b>ENTONCES</b> <i>velocidad del motor</i> cero (Z).	FUS_Z_1 = min[FUS_PI,FUS_VPP]
Si <i>error del ángulo</i> centro (C) <b>Y</b> <i>derivada</i> muy negativa (VMN), <b>ENTONCES</b> <i>velocidad del motor</i> rápido izquierda (RI).	FUS_RI_2 = min[FUS_C,FUS_VMN]
Si <i>error del ángulo</i> centro (C) <b>Y</b> <i>derivada</i> poco negativa (VPN), <b>ENTONCES</b> <i>velocidad del motor</i> lento izquierda (LI).	FUS_LI_2 = min[FUS_C,FUS_VPN]
Si <i>error del ángulo</i> centro (C) <b>Y</b> <i>derivada</i> cero (VC), <b>ENTONCES</b> <i>velocidad del motor</i> cero (Z).	FUS_Z_2 = min[FUS_C,FUS_VC]
Si <i>error del ángulo</i> centro (C) <b>Y</b> <i>derivada</i> poco positiva (VPP), <b>ENTONCES</b> <i>velocidad del motor</i> lento derecha (LD).	FUS_LD_1 = min[FUS_C,FUS_VPP]
Si <i>error del ángulo</i> centro (C) <b>Y</b> <i>derivada</i> muy positiva (VMP), <b>ENTONCES</b> <i>velocidad del motor</i> rápido derecha (RD).	FUS_RD_1 = min[FUS_C,FUS_VMP]
Si <i>error del ángulo</i> poco derecha (PD) <b>Y</b> <i>derivada</i> poco negativa (VPN), <b>ENTONCES</b> <i>velocidad del motor</i> cero (Z).	FUS_Z_3 = min[FUS_PD,FUS_VPN]
Si <i>error del ángulo</i> poco derecha (PD) <b>Y</b> <i>derivada</i> cero (VC), <b>ENTONCES</b> <i>velocidad del motor</i> lento derecha (LD).	FUS_LD_2 = min[FUS_PD,FUS_VC]
Si <i>error del ángulo</i> muy derecha (MD) <b>Y</b> <i>derivada</i> cero (VC), <b>ENTONCES</b> <i>velocidad del motor</i> rápido derecha (RD).	FUS_RD_2 = min[FUS_MD,FUS_VC]

### Defusificación

La última acción que ejecuta el estado X\_CONTROL\_FUZZY es la habilitación de la subrutina Defusificación. En esta subrutina se calcula el valor final del algoritmo utilizando el método del centroide como se indica en la ecuación (2.33) del segundo capítulo. Para la implementación en el PLC se realiza un sumatorio del producto de los centros de cada función de pertenencia de salida multiplicado por la fuerza de esa función (valor fusificado entre 0 y 1) y se divide para el sumatorio de todas las fuerzas de la función. La operación realizada en el PLC se muestra en la ecuación (5.1).

$$\frac{(RI\_C * FUS\_RI) + (LI\_C * FUS\_LI) + (Z\_C * FUS\_Z) + (LD\_C * FUS\_LD) + (RD\_C * FUS\_RD)}{FUS\_RI + FUS\_LI + FUS\_Z + FUS\_LD + FUS\_RD} \quad (5.1)$$

Si el algoritmo utiliza una entrada, las fuerzas de cada función se obtienen automáticamente de la evaluación de las reglas difusas. Por otro lado, si se utiliza las dos entradas, se debe calcular la fuerza total de la función en base a las fuerzas parciales de cada regla. Este cálculo se realizó en una subrutina llamada *Fuerzas* y se muestran en la Tabla 5.20.

**Tabla 5.20** Cálculo de las fuerzas de cada función de salida

<b>SUBROUTINA Fuerzas</b>		
<b>FUNCIONES DE SALIDA</b>	<b>FUERZAS PARCIALES</b>	<b>FUERZA TOTAL</b>
RÁPIDO IZQUIERDA (RI)	FUS_RI_1	$FUS\_RI=(FUS\_RI\_1^2 + FUS\_RI\_2^2)^{1/2}$
	FUS_RI_2	
LENTO IZQUIERDA (LI)	FUS_LI_1	$FUS\_LI=(FUS\_LI\_1^2 + FUS\_LI\_2^2)^{1/2}$
	FUS_LI_2	
CERO (Z)	FUS_Z_1	$FUS\_Z=(FUS\_Z\_1^2 + FUS\_Z\_2^2 + FUS\_Z\_3^2)^{1/2}$
	FUS_Z_2	
	FUS_Z_3	
LENTO DERECHA (LD)	FUS_LD_1	$FUS\_LD=(FUS\_LD\_1^2 + FUS\_LD\_2^2)^{1/2}$
	FUS_LD_2	
RÁPIDO DERECHA (RD)	FUS_RD_1	$FUS\_RD=(FUS\_RD\_1^2 + FUS\_RD\_2^2)^{1/2}$
	FUS_RD_2	

### 5.1.3.9 ESTADO X\_PARO

**Tabla 5.21** Descripción de estado X\_PARO

<i>X_PARO</i>	
<b>Activación</b>	TR11
<b>Desactivación</b>	TR1
<b>Acciones</b>	Se pone en cero todas las variables utilizadas para la habilitación del controlador seleccionado.

Se ingresa en este estado, cuando el usuario desea detener el prototipo y configurar nuevamente los parámetros del mismo, por lo tanto el programa del PLC borra todas las variables asociadas a ese controlador.

### 5.1.3.10 ESTADO X\_VOLVER

**Tabla 5.22** Descripción de estado X\_VOLVER

<i>X_VOLVER</i>	
<b>Activación</b>	TR12
<b>Desactivación</b>	TR1
<b>Acciones</b>	Se pone en cero todas las variables utilizadas en el programa

Este estado es activado, cuando el usuario desea cambiar de controlador, en ese caso el programa del PLC borra todas las variables.

## 5.2 Descripción de la interfaz de usuario

Para la interacción del usuario con el prototipo se ha diseñado una interfaz en el programa WinCC versión 6.0. Dentro de este desarrollo, se identifican dos etapas las cuales son la transferencia de variables desde el PLC y el diseño de pantallas y configuración de objetos.

### 5.2.1 Transferencia de variables desde el autómatas a la interfaz

El programa WinCC permite crear variables internas y también importar variables desde un autómatas, para lo cual debe instalarse un servidor OPC que permita la conexión entre el HMI (Human-machine interface) y el PLC. El servidor utilizado es el S7-200 PC Access del fabricante Siemens. Una vez que se ha abierto este servidor, se importa los símbolos del proyecto realizado en el software STEP 7 como se muestra en la Figura 5.5.

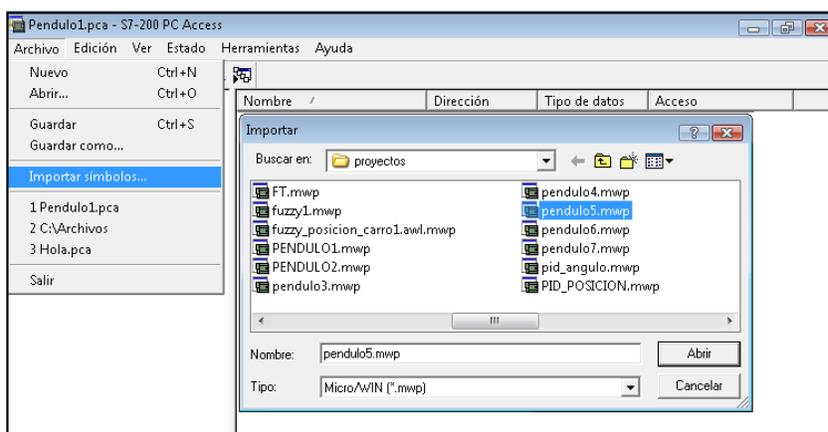


Figura 5.5 Transferencia de variables en S7-200 PC Access

El siguiente paso es configurar el tipo de variable para que pueda usarse desde la interfaz, es decir elegir entre variables de tipo entero, doble entero, booleana y real como se indica en la Figura 5.6.

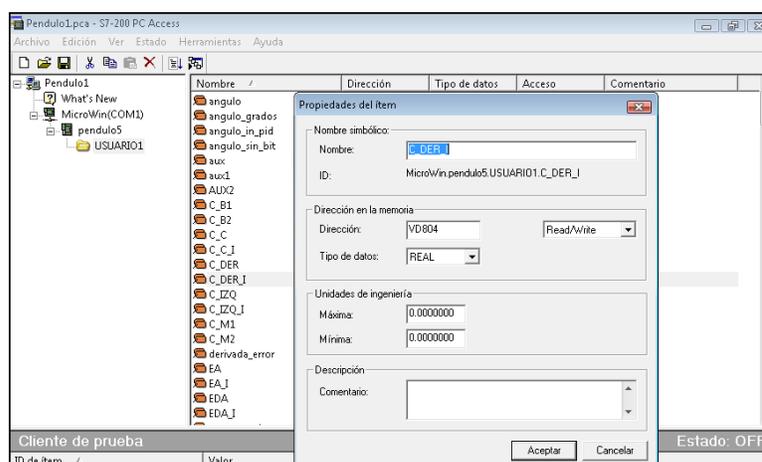


Figura 5.6 Configuración de variables

Después de la configuración, se guarda el proyecto y se abre el programa WinCC. En la pestaña de *Administración de Variables* se elige *OPC* y se selecciona *parámetros del sistema* con lo cual se abre la ventana de administrador de OPC. Desde esa ventana se examina la opción *S7200.OPCServer* y se elige derecho de acceso de lectura y escritura como se ilustra en la Figura 5.7.

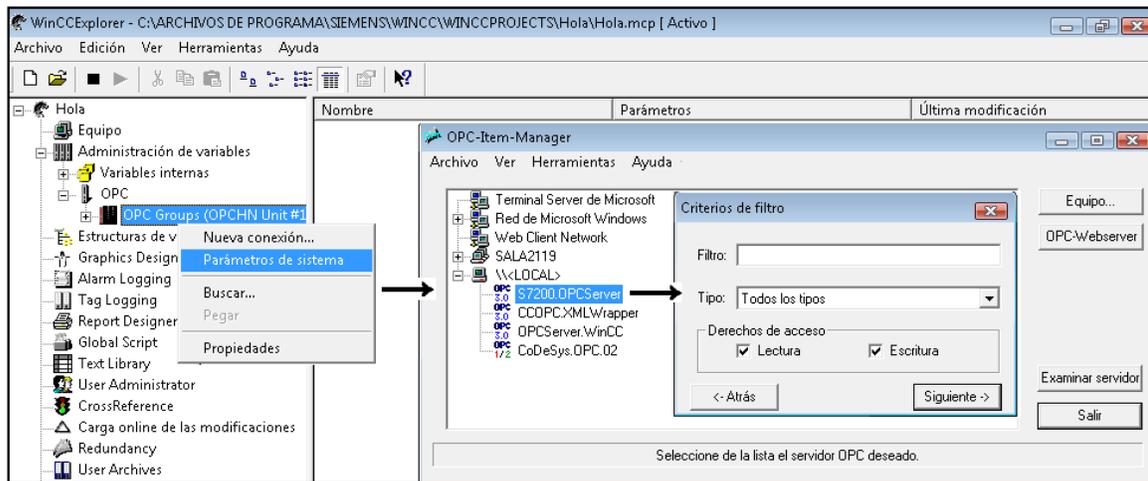


Figura 5.7 Ventana OPC-Item-Manager

Finalmente se busca el proyecto guardado en el S7-200 PC Access y se elige las variables que se desean importar como se puede observar en la Figura 5.8.

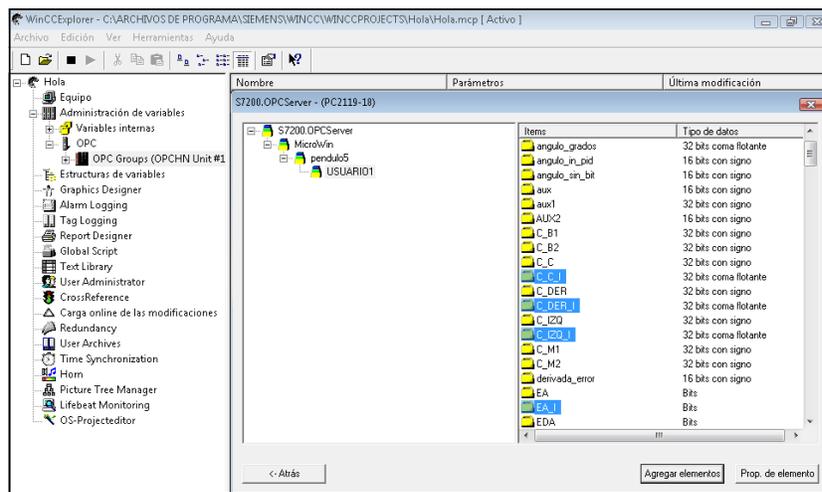


Figura 5.8 Selección de variables a importar

### 5.2.2 Diseño de pantallas y configuración de objetos

En la interfaz, se ha diseñado tres pantallas principales y dos secundarias. La primera pantalla permite elegir entre un controlador PID y un controlador FUZZY como se indica en la Figura 5.9. Por otro lado la configuración de objetos se muestra en la Tabla 5.23.



Figura 5.9 Pantalla de inicio

Tabla 5.23 Configuración de objetos en pantalla de inicio

PANTALLA INICIO		
OBJETO	EVENTO O CONDICIÓN	CONSECUENCIA
Botón <i>CONFIGURAR PID</i>	Clic del ratón	Va a pantalla PID
	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>SEL_PID_I=1</i> (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>SEL_PID_I=0</i> (variable PLC)
Botón <i>CONFIGURAR FUZZY</i>	Clic del ratón	Va a pantalla FUZZY
	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>SEL_FUZZY_I=1</i> (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>SEL_FUZZY_I=0</i> (variable PLC)

La siguiente pantalla principal es la pantalla PID, la cual le permite al usuario mover el carro hasta el extremo de referencia; seleccionar entre controlador PID de ángulo, de posición o ambos;

configurar los parámetros del controlador elegido; iniciar el proceso; detener el proceso y volver a la pantalla de inicio.

La Figura 5.10 indica esta pantalla y la configuración de objetos se puede observar en la Tabla 5.24.

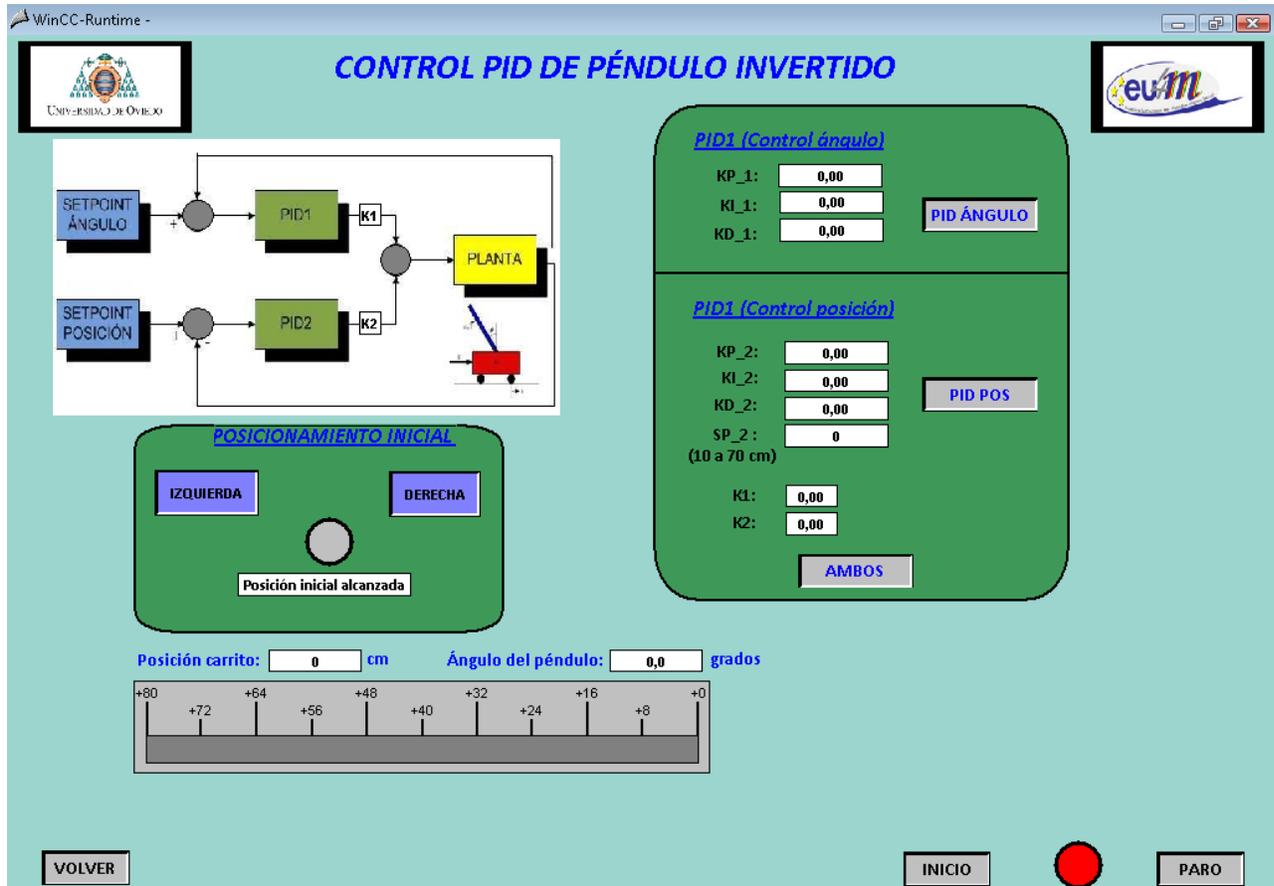


Figura 5.10 Pantalla PID

Tabla 5.24 Configuración de objetos en pantalla PID

PANTALLA PID		
OBJETO	EVENTO O CONDICIÓN	CONSECUENCIA
Botón IZQUIERDA	Pulsar botón izquierdo de ratón	$MOV\_I=1$ (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	$MOV\_I=0$ (variable PLC)
Botón DERECHA	Pulsar botón izquierdo de ratón	$MOV\_D=1$ (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	$MOV\_D=0$ (variable PLC)

<b>PANTALLA PID</b>		
<b>OBJETO</b>	<b>EVENTO O CONDICIÓN</b>	<b>CONSECUENCIA</b>
Círculo <i>Posición inicial alcanzada</i>	¿X_POS_INICIAL=1 AND FDCD=1 AND MOV_I=0?	SI→ color de objeto=amarillo
		NO→ color de objeto=gris
Campo de salida <i>Posición carrito</i>	Cambio en la lectura de variable <i>posición_carrito_cm</i>	Muestra <i>posición_carrito_cm</i> (variable PLC)
Campo de salida <i>Ángulo del péndulo</i>	Cambio en la lectura de variable <i>ángulo_grados</i>	Muestra <i>ángulo_grados</i> (variable PLC)
Barra <i>Posición</i>	Cambio en la lectura de variable <i>posición_carrito_cm</i>	Muestra gráficamente <i>posición_carrito_cm</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>KP_1</i>	Cambio en la escritura de variable <i>KP_I</i>	Escribe en <i>KP_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>KI_1</i>	Cambio en la escritura de variable <i>KI_I</i>	Escribe en <i>KI_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>KD_1</i>	Cambio en la escritura de variable <i>KD_I</i>	Escribe en <i>KD_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>KP_2</i>	Cambio en la escritura de variable <i>KP_P_I</i>	Escribe en <i>KP_P_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>KI_2</i>	Cambio en la escritura de variable <i>KI_P_I</i>	Escribe en <i>KI_P_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>KD_2</i>	Cambio en la escritura de variable <i>KD_P_I</i>	Escribe en <i>KD_P_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>SP_2</i>	Cambio en la escritura de variable <i>SP_P_I</i>	Escribe en <i>SP_P_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>K1</i>	Cambio en la escritura de variable <i>K1_I</i>	Escribe en <i>K1_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>K2</i>	Cambio en la escritura de variable <i>K2_I</i>	Escribe en <i>K2_I</i> (variable PLC)
Botón <i>PID ÁNGULO</i>	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>OK_PID_I</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>OK_PID_I</i> =0 (variable PLC)
	¿OK_PID=1?	SI→ color de objeto=amarillo NO→ color de objeto=gris
Botón <i>PID POS</i>	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>OK_PIDP_I</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>OK_PIDP_I</i> =0 (variable PLC)
	¿OK_PIDP=1?	SI→ color de objeto=amarillo NO→ color de objeto=gris
Botón <i>AMBOS</i>	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>OK_PIDA_I</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>OK_PIDA_I</i> =0 (variable PLC)
	¿OK_PIDA=1?	SI→ color de objeto=amarillo NO→ color de objeto=gris
Botón <i>INICIO</i>	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>INICIO_I</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>INICIO_I</i> =0 (variable PLC)
	¿INICIO=1?	SI→ color de objeto=verde NO→ color de objeto=gris

PANTALLA PID		
OBJETO	EVENTO O CONDICIÓN	CONSECUENCIA
Botón <i>PARO</i>	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>PARO</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>PARO</i> =0 (variable PLC)
	¿ <i>PARO</i> =1?	SI → color de objeto=rojo NO → color de objeto=gris
Círculo <i>Indicador</i>	¿ <i>INICIO</i> =1?	SI → color de objeto=verde
		NO → color de objeto=rojo
Botón <i>VOLVER</i>	Clic del ratón	Va a pantalla <i>INICIO</i>
	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>VOLVER</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>VOLVER</i> =0 (variable PLC)

La última pantalla principal es la pantalla FUZZY, desde la cual el usuario puede hacer el posicionamiento inicial del carro (buscar extremo de referencia); configurar las funciones de pertenencia del algoritmo para una o dos entradas, iniciar o parar el proceso y volver a la pantalla inicial. El diseño de esta pantalla se indica en la Figura 5.11 y su configuración en la Tabla 5.25.

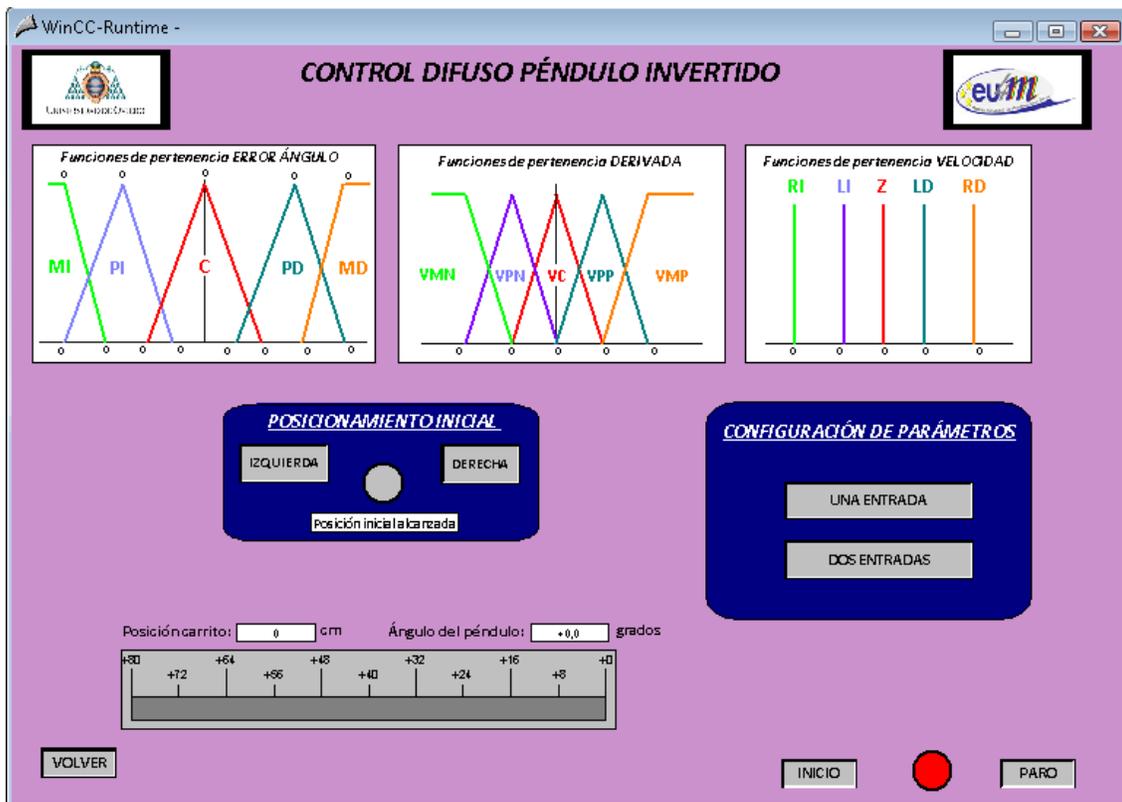


Figura 5.11 Pantalla FUZZY

**Tabla 5.25** Configuración de objetos en pantalla FUZZY

<b>PANTALLA FUZZY</b>		
<b>OBJETO</b>	<b>EVENTO O CONDICIÓN</b>	<b>CONSECUENCIA</b>
Botón <i>IZQUIERDA</i>	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>MOV_I</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>MOV_I</i> =0 (variable PLC)
Botón <i>DERECHA</i>	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>MOV_D</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>MOV_D</i> =0 (variable PLC)
Círculo <i>Posición inicial alcanzada</i>	¿ <i>X_POS_INICIAL</i> =1 AND <i>FD</i> <i>CD</i> =1 AND <i>MOV_I</i> =0?	SI→ color de objeto=amarillo
		NO→ color de objeto=gris
Campo de salida <i>Posición carrito</i>	Cambio en la lectura de variable <i>posición_carrito_cm</i>	Muestra <i>posición_carrito_cm</i> (variable PLC)
Campo de salida <i>Ángulo del péndulo</i>	Cambio en la lectura de variable <i>ángulo_grados</i>	Muestra <i>ángulo_grados</i> (variable PLC)
Barra <i>Posición</i>	Cambio en la lectura de variable <i>posición_carrito_cm</i>	Muestra gráficamente <i>posición_carrito_cm</i> (variable PLC)
Botón <i>UNA ENTRADA</i>	Clic del ratón	<i>EA_VENTANA</i> =1 (variable interna)
	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>EA_I</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>EA_I</i> =0 (variable PLC)
	¿ <i>EA</i> =1?	SI→ color de objeto=amarillo NO→ color de objeto=gris
Botón <i>DOS ENTRADAS</i>	Clic del ratón	<i>EDA_VENTANA</i> =1 (variable interna)
	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>EDA_I</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>EDA_I</i> =0 (variable PLC)
	¿ <i>EDA</i> =1?	SI→ color de objeto=amarillo NO→ color de objeto=gris
Ventana de imagen <i>UNA ENTRADA</i>	¿ <i>EA_VENTANA</i> =1?	SI→ Se visualiza ventada
		NO→ no se visualiza ventada
Ventana de imagen <i>DOS ENTRADAS</i>	¿ <i>EDA_VENTANA</i> =1?	SI→ Se visualiza ventada
		NO→ no se visualiza ventada
Botón <i>INICIO</i>	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>INICIO_I</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>INICIO_I</i> =0 (variable PLC)
	¿ <i>INICIO</i> =1?	SI→ color de objeto=verde NO→ color de objeto=gris
Botón <i>PARO</i>	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>PARO</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>PARO</i> =0 (variable PLC)
	¿ <i>PARO</i> =1?	SI→ color de objeto=rojo NO→ color de objeto=gris
Círculo <i>Indicador</i>	¿ <i>INICIO</i> =1?	SI→ color de objeto=verde
		NO→ color de objeto=rojo
Botón <i>VOLVER</i>	Clic del ratón	Va a pantalla <i>INICIO</i>
	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>VOLVER</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>VOLVER</i> =0 (variable PLC)

Si el usuario elige que el algoritmo solo tenga una entrada, se activa la pantalla secundaria *EA\_VENTANA* que permite configurar los puntos de las funciones de pertenencia de la variable de entrada *error del ángulo* como se muestra en la Figura 5.12 y cuya configuración de objetos se encuentra en la Tabla 5.26.



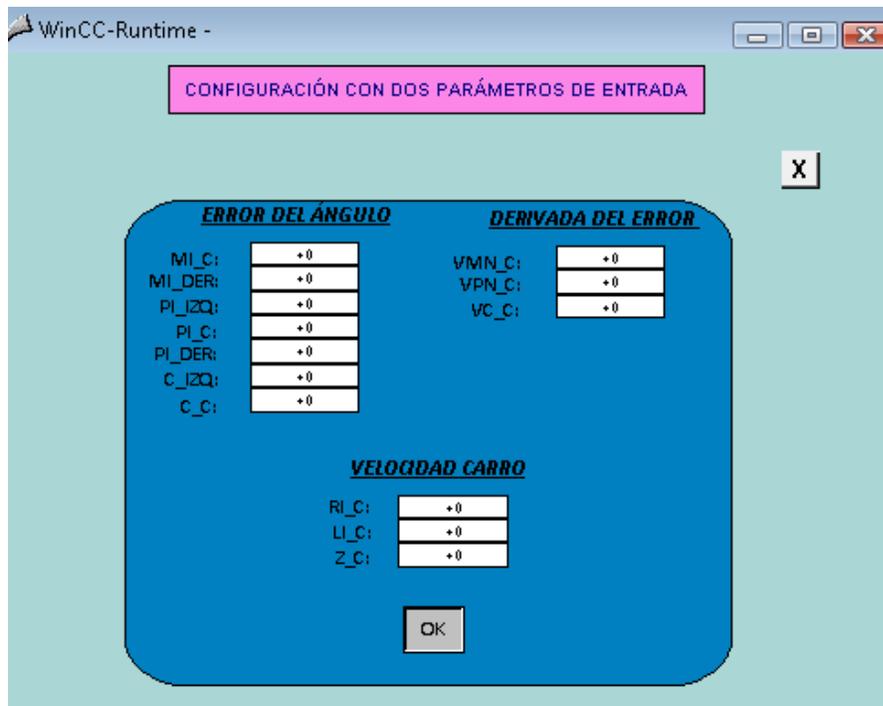
Figura 5.12 Pantalla secundaria EA\_VENTANA

Tabla 5.26 Configuración de objetos de pantalla EA\_VENTANA

PANTALLA EA_VENTANA		
OBJETO	EVENTO O CONDICIÓN	CONSECUENCIA
Campo de entrada <i>MI_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>MI_C_I</i>	Escribe en <i>MI_C_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>MI_DER</i>	Cambio en la escritura de variable <i>MI_DER_I</i>	Escribe en <i>MI_DER_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>PI_IZQ</i>	Cambio en la escritura de variable <i>PI_IZQ_I</i>	Escribe en <i>PI_IZQ_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>PI_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>PI_C_I</i>	Escribe en <i>PI_C_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>PI_DER</i>	Cambio en la escritura de variable <i>PI_DER_I</i>	Escribe en <i>PI_DER_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>C_IZQ</i>	Cambio en la escritura de variable <i>C_IZQ_I</i>	Escribe en <i>C_IZQ_I</i> (variable PLC)

<b>PANTALLA EA_VENTANA</b>		
<b>OBJETO</b>	<b>EVENTO O CONDICIÓN</b>	<b>CONSECUENCIA</b>
Campo de entrada <i>C_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>C_C_I</i>	Escribe en <i>C_C_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>RI_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>RI_C_I</i>	Escribe en <i>RI_C_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>LI_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>LI_C_I</i>	Escribe en <i>LI_C_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>Z_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>Z_C_I</i>	Escribe en <i>Z_C_I</i> (variable PLC)
Botón <i>OK</i>	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>OK_FUZZY_I</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>OK_FUZZY_I</i> =0 (variable PLC)
	¿ <i>OK_FUZZY</i> =1?	SI → color de objeto=amarillo NO → color de objeto=gris
Botón <i>X</i>	Clic del ratón	<i>EA_VENTANA</i> =0 (variable interna)

Por otro lado, cuando se selecciona dos entradas para el controlador se visualiza la pantalla *EDA\_VENTANA*, cuyo diseño se puede observar en la Figura 5.13 y la configuración en la Tabla 5.27.



**Figura 5.13** Pantalla secundaria *EDA\_VENTANA*

**Tabla 5.27** Configuración de objetos de pantalla EDA\_VENTANA

<b>PANTALLA EDA_VENTANA</b>		
<b>OBJETO</b>	<b>EVENTO O CONDICIÓN</b>	<b>CONSECUENCIA</b>
Campo de entrada <i>MI_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>MI_C_I</i>	Escribe en <i>MI_C_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>MI_DER</i>	Cambio en la escritura de variable <i>MI_DER_I</i>	Escribe en <i>MI_DER_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>PI_IZQ</i>	Cambio en la escritura de variable <i>PI_IZQ_I</i>	Escribe en <i>PI_IZQ_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>PI_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>PI_C_I</i>	Escribe en <i>PI_C_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>PI_DER</i>	Cambio en la escritura de variable <i>PI_DER_I</i>	Escribe en <i>PI_DER_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>C_IZQ</i>	Cambio en la escritura de variable <i>C_IZQ_I</i>	Escribe en <i>C_IZQ_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>C_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>C_C_I</i>	Escribe en <i>C_C_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>VMN_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>VMN_C_I</i>	Escribe en <i>VMN_C_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>VPN_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>VPN_C_I</i>	Escribe en <i>VPN_C_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>VC_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>VC_C_I</i>	Escribe en <i>VC_C_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>RI_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>RI_C_I</i>	Escribe en <i>RI_C_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>LI_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>LI_C_I</i>	Escribe en <i>LI_C_I</i> (variable PLC)
Campo de entrada <i>Z_C</i>	Cambio en la escritura de variable <i>Z_C_I</i>	Escribe en <i>Z_C_I</i> (variable PLC)
Botón <i>OK</i>	Pulsar botón izquierdo de ratón	<i>OK_FUZZY_I</i> =1 (variable PLC)
	Soltar botón izquierdo de ratón	<i>OK_FUZZY_I</i> =0 (variable PLC)
	¿ <i>OK_FUZZY</i> =1?	SI → color de objeto=amarillo NO → color de objeto=gris
Botón <i>X</i>	Clic del ratón	<i>EDA_VENTANA</i> =0 (variable interna)

## 6. PRUEBAS Y RESULTADOS

Una vez implementado el programa del PLC y la interfaz de usuario se procede a realizar las pruebas correspondientes al prototipo y mostrar los resultados obtenidos tanto con el controlador PID como con el controlador difuso.

### 6.1 Controlador PID

Como se mencionó en el capítulo anterior, se ha utilizado el asistente de configuración PID para implementar este algoritmo en el PLC. Para la sintonización de los dos lazos de control se tomo en cuenta las reglas heurísticas de la Tabla 2.2 y en base a la respuesta obtenida se fueron ajustando los parámetros. Un limitante durante la sintonización, es el rango de valores permitidos en el asistente PID para los valores de tiempo de acción integral y derivativa, y el tiempo de muestreo (Tabla 6.1).

**Tabla 6.1** Rango permitido para los parámetros

<i>Parámetro</i>	<i>Rango</i>
Ti	0,01 a 9999999 minutos
Td	0,01 a 9999999 minutos
Ts	0,1 a 999999 segundos

#### 6.1.1 Control de posición

El tiempo de muestreo adecuado para el lazo de control de posición debe ser 10 veces menor que el tiempo de subida ante un escalón en lazo abierto. Se considera que el tiempo de subida, es aquel que transcurre desde que la señal alcanza el 10% hasta que alcanza el 90% de la salida. Utilizando el software Matlab es posible visualizar la respuesta escalón del motor, cuyo tiempo de subida es aproximadamente 0,9 seg (Figura 6.1), por lo tanto se requiere un tiempo de establecimiento menor a 0.09 seg. Aún si se coloca el valor mínimo permitido de 0,1 seg en el asistente no se cumple este requisito.

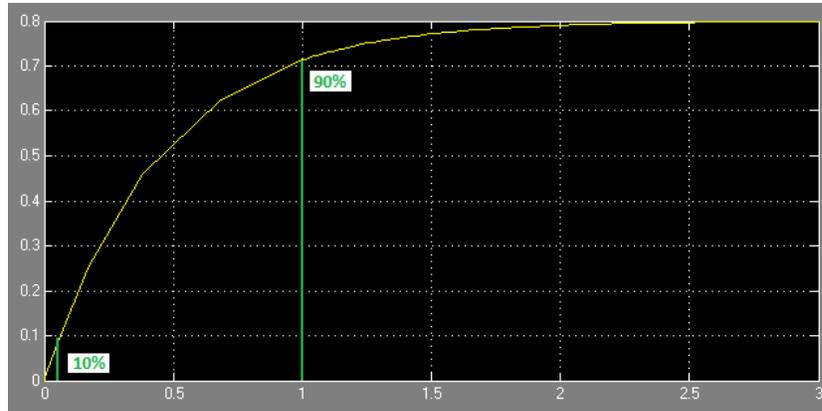


Figura 6.1 Tiempo de subida de la respuesta escalón del motor

### 6.1.1.1 Controlador Proporcional (P)

Tabla 6.2 Control proporcional para la posición del carro

Parámetros	Resultado
Gain=6	Utilizando solo un controlador proporcional, se tiene que existe una pequeña sobreoscilación y que no se logra eliminar el error en estado estable.
Ti=9999999 min	
Td=0 min	
SP=20 cm	
Respuesta	
<p>The response graph shows three signals over a 60-second period. The x-axis is time from 60s to 0s. The left y-axis is a normalized signal from 0.00 to 1.00. The right y-axis shows values from 32000.00 to -32000.00. A green line (SP set point) is constant at 0.20 until 35s, then steps to 0.50. A blue line (OUT señal de salida) is constant at 0.50 until 35s, then steps to 0.20. A red line (PV variable de proceso) is constant at 0.00 until 35s, then rises to 0.50 with a small overshoot and settles at 0.20. A timestamp '15:17:01' is shown at the bottom.</p>	

6.1.1.2 Controlador proporcional-integral (PI)

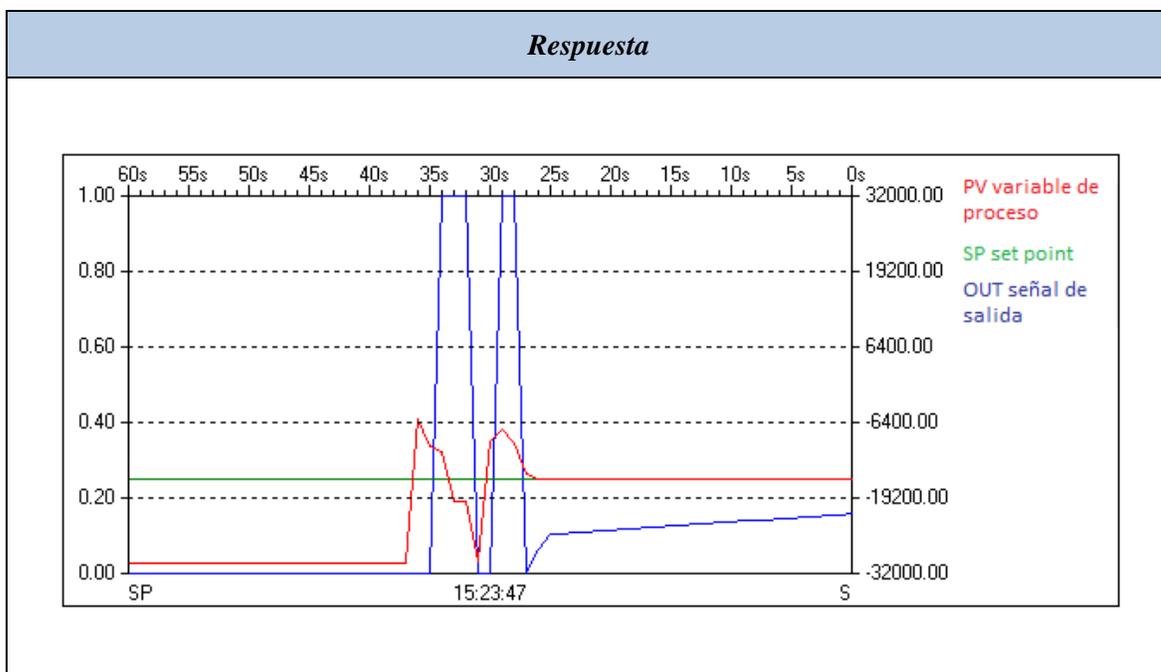
**Tabla 6.3** Control PI para la posición del carro

<i>Parámetros</i>	<i>Resultado</i>
Gain= 6	Se puede observar en la respuesta, que el error en estado estable es cero debido a la acción integral presentando mejores características que el control proporcional.
Ti=0,1 min	
Td=0 min	
SP=20 cm	
<i>Respuesta</i>	

6.1.1.3 Control proporcional-integral-derivativo (PID)

**Tabla 6.4** Control PID para la posición del carro

<i>Parámetros</i>	<i>Resultado</i>
Gain= 6	Con este controlador se elimina el error en estado estable pero se produce muchas oscilaciones antes de alcanzar a la señal del set point.
Ti=0,1 min	
Td=0,1 min	
SP=20 cm	



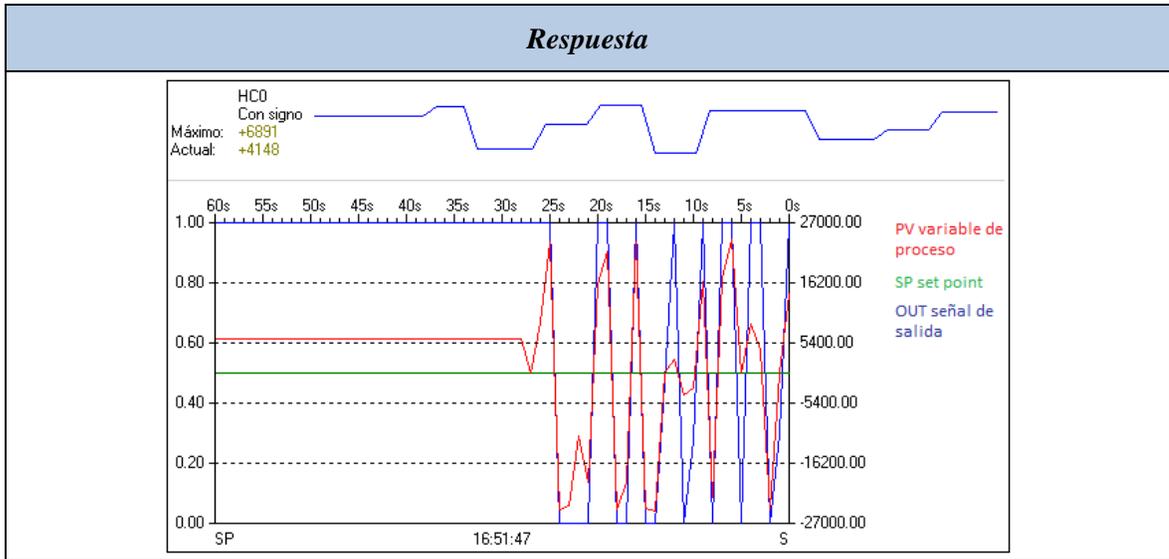
## 6.1.2 Control de ángulo de inclinación del péndulo

Para este controlador, el usuario no puede elegir un valor de set point porque la idea central de este prototipo es mantener el péndulo equilibrado en cero grados. El tiempo de muestreo para este lazo de control es de 0,1 segundos, siendo este parámetro el mínimo permitido en el asistente.

### 6.1.2.1 Control Proporcional (P)

**Tabla 6.5** Control proporcional para el ángulo

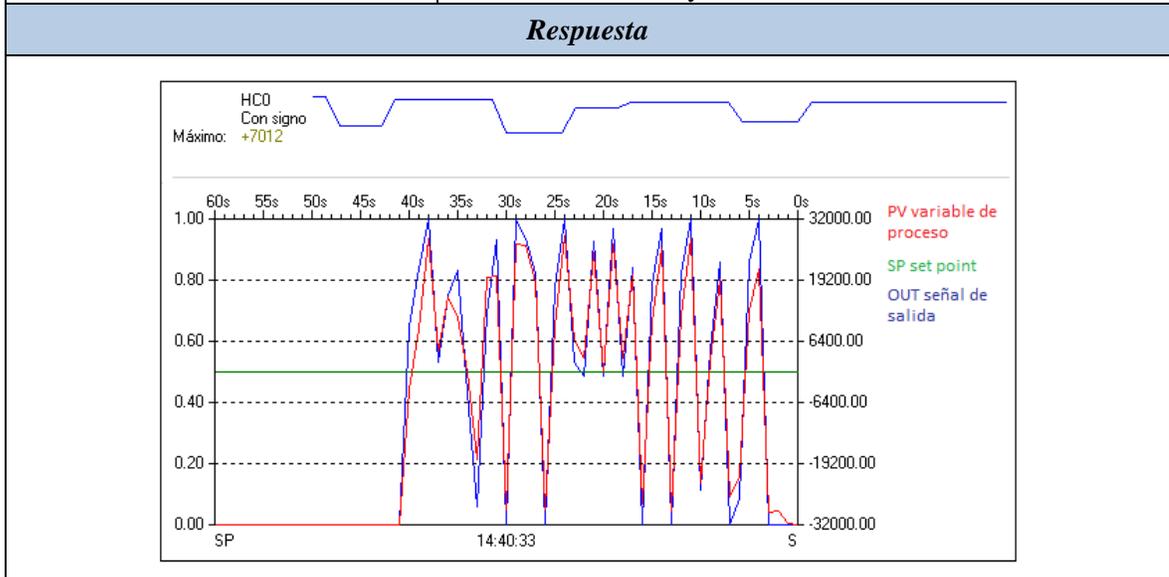
<i>Parámetros</i>	<i>Resultado</i>
Gain= 30	Este controlador no estabiliza el péndulo invertido. Intenta hacer el control pero llega muchas veces a los extremos del prototipo en donde el controlador se deshabilita hasta que el carro se posiciona en el centro, como se observa en la gráfica de HC0.
Ti=9999999 min	
Td=0 min	



6.1.2.2 Controlador proporcional-integral (PI)

Tabla 6.6 Controlador PI para el ángulo

Parámetros	Resultado
Gain= 1,3	El péndulo no se estabiliza, llegando muchas veces a los extremos del prototipo. Lo que se pudo visualizar en esta prueba, es que si inicia el proceso con el péndulo en la posición deseada (cero grados), este controlador mantiene dicha posición. La acción integral generalmente se utiliza en dinámicas lentas y este no es el caso.
Ti=6 min	
Td=0 min	



6.1.2.3 Controlador proporcional-integral-derivativo

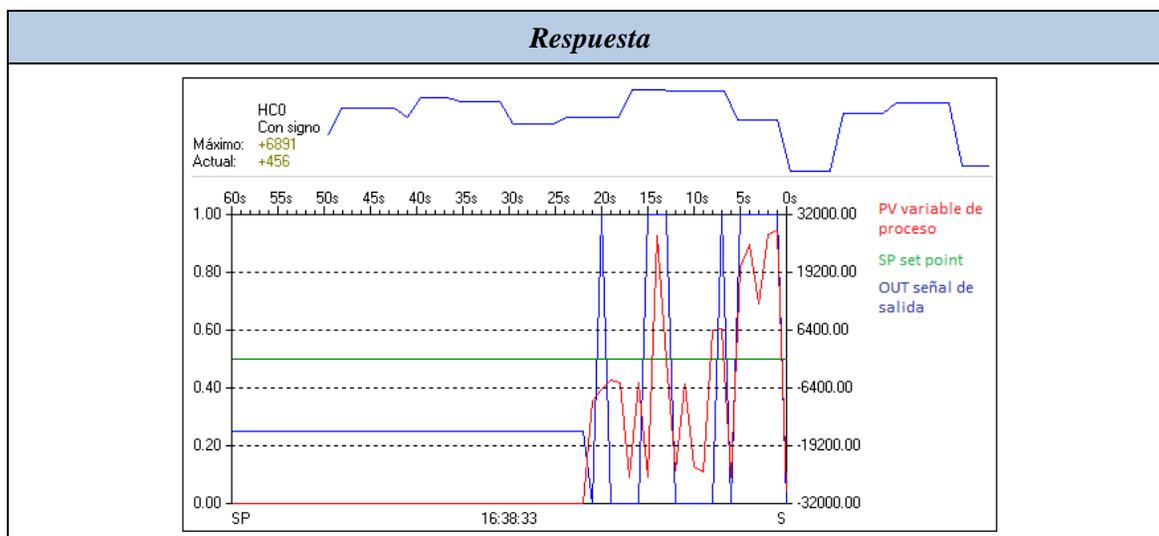
**Tabla 6.7** Control PID para el ángulo

Parámetros	Resultado
Gain= 1,3	Aunque no se logra la estabilización completa, se observa que el péndulo oscila rápidamente en torno al valor deseado con menos aproximaciones a los extremos del prototipo que en los casos anteriores. Si el péndulo inicia en cero grados al activar el controlador, éste no lo mantiene en esa posición.
Ti=9 min	
Td=9 min	
<i>Respuesta</i>	

6.1.2.4 Controlador proporcional-derivativo (PD)

**Tabla 6.8** Controlador PD para el ángulo

Parámetros	Resultado
Gain= 30	Tiene un comportamiento parecido al controlador PID, en este caso el ángulo oscila mucho, pero se llega pocas veces a los extremos del prototipo. Si el péndulo inicia en cero grados al activar el controlador, éste no lo mantiene en esa posición.
Ti=9999999 min	
Td=3 min	

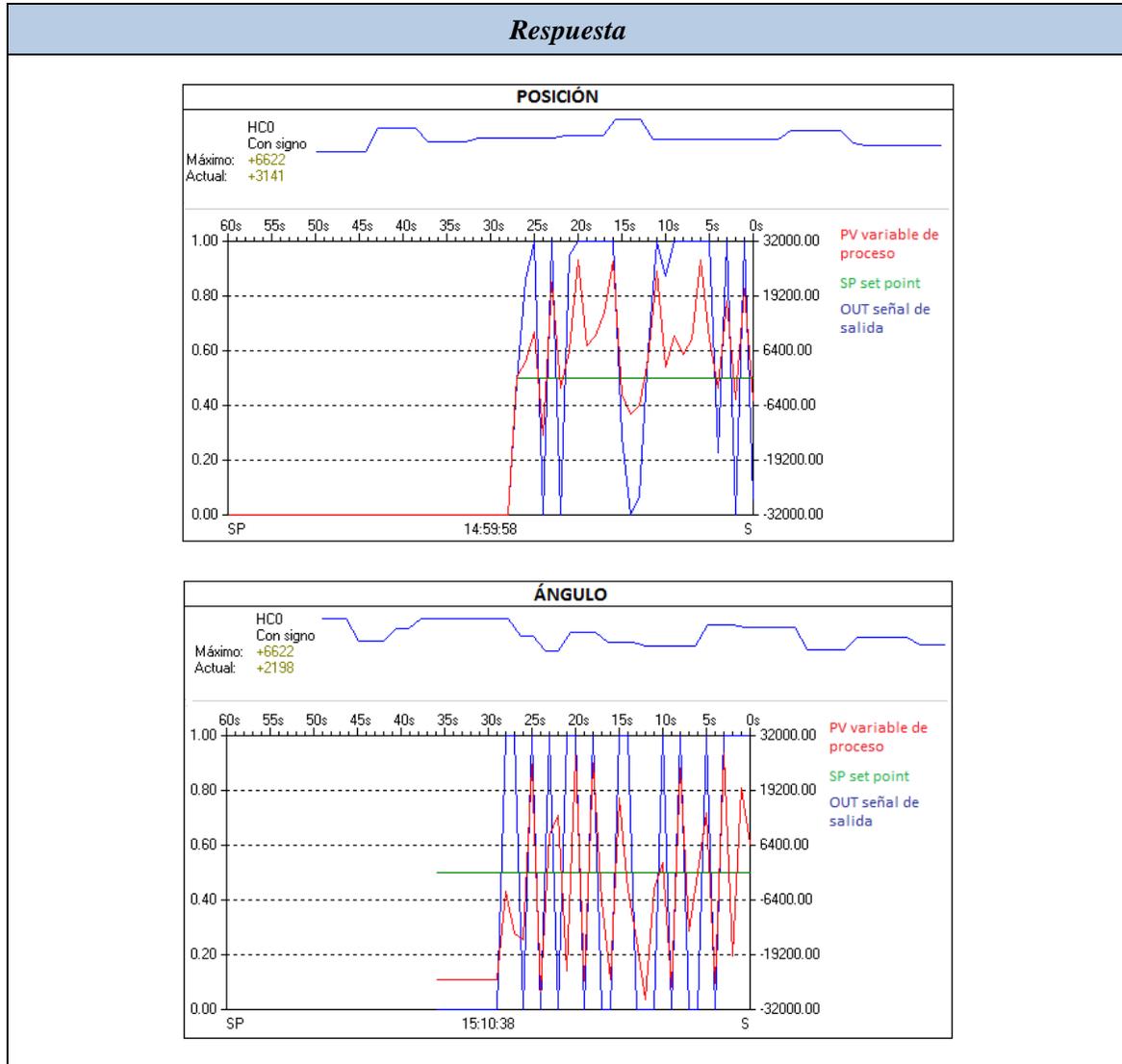


### 6.1.3 Control de posición y ángulo de inclinación del péndulo

Para esta prueba se ha utilizado el controlador P para mantener la posición y el controlador PD para estabilizar el ángulo. En el control de posición no se utiliza la acción integral porque si el péndulo está en uno de sus extremos de apoyo, el carro se mueve indefinidamente en esa dirección y llega un momento en que el error de posición es tan grande que el prototipo no toma en cuenta el control del ángulo. La señal de salida que va hacia el motor, es la suma de las señales de salida de los dos controladores multiplicada cada una por una ganancia ( $K1$  y  $K2$ ) que permite seleccionar la prioridad de los controladores. Si la salida sobrepasa los límites, ésta se satura en  $-32000$  y  $32000$ .

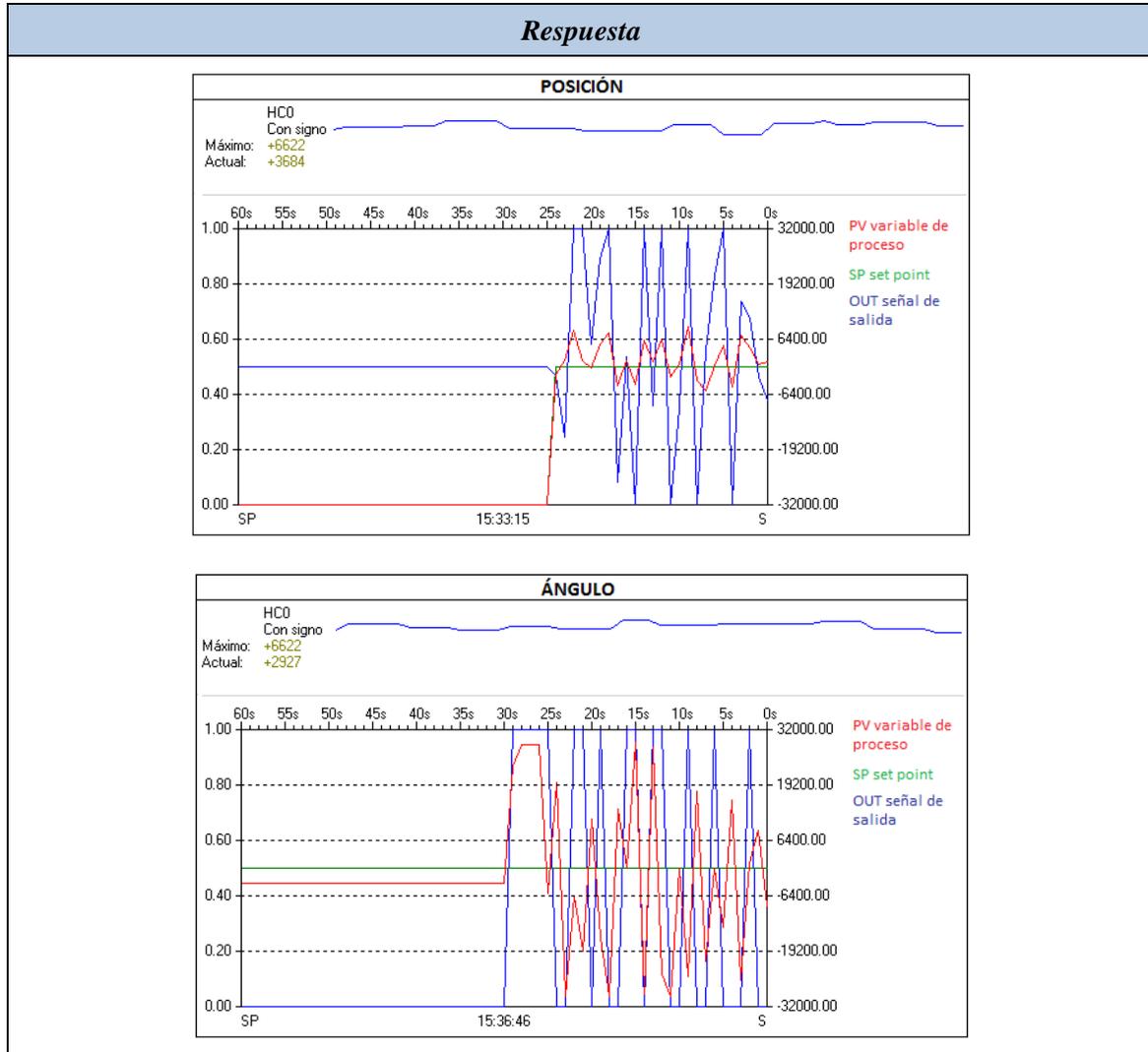
**Tabla 6.9** Control posición y ángulo (predominio ángulo)

Parámetros	Resultado
PID Posición	Se observa que llega muy poco a los extremos del prototipo, especialmente al extremo derecho, esto significa que hay un offset positivo en el control de posición. El ángulo no logra equilibrarse y se mantiene oscilante entre sus límites.
Gain= 10	
Ti=9999999 min	
Td=0 min	
PID Ángulo	
Gain= 150	
Ti=9999999 min	
Td=200 min	
Ganancias	
K1=1,3 y K2=0,7	



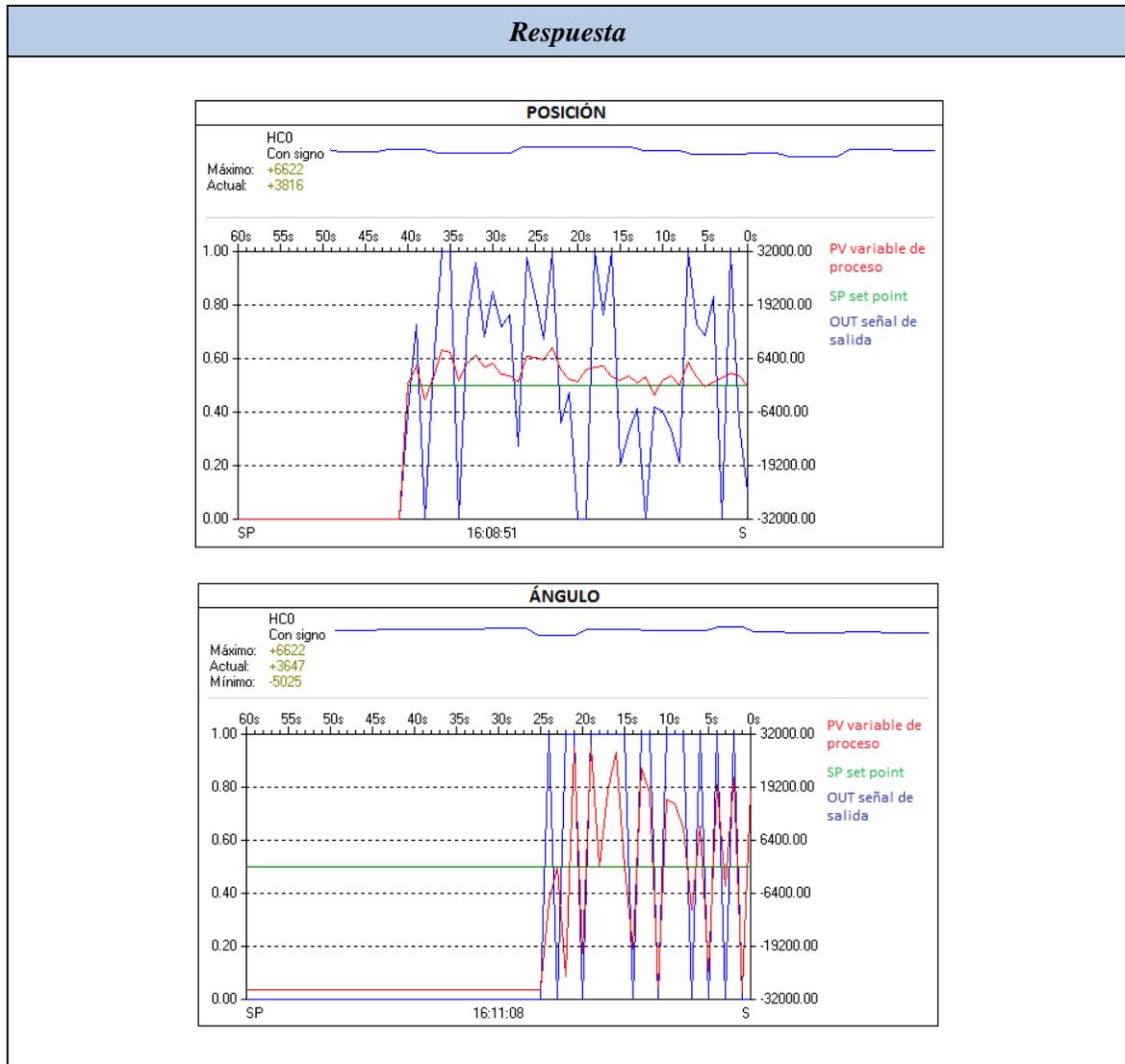
**Tabla 6.10** Control posición y ángulo (sin predominio)

Parámetros	Resultado
PID Posición	En esta prueba, se observa que la posición oscila alrededor del punto de referencia seleccionado en 40 cm y no se acerca a los puntos extremos. El ángulo oscila constantemente y no logra el equilibrio.
Gain= 10	
Ti=9999999 min	
Td=0 min	
PID Ángulo	
Gain= 150	
Ti=9999999 min	
Td=200 min	
Ganancias	
K1=1 y K2=1	



**Tabla 6.11** Control posición y ángulo (predominio posición)

<i>Parámetros</i>	<i>Resultado</i>
PID Posición	Si se utiliza predominio de la posición, se observa que el prototipo oscila alrededor de la referencia de manera no tan brusca como en la prueba anterior. El ángulo no se estabiliza en cero grados teniendo grandes oscilaciones entre los extremos limitantes del movimiento angular.
Gain= 10	
Ti=9999999 min	
Td=0 min	
PID Ángulo	
Gain= 150	
Ti=9999999 min	
Td=200 min	
Ganancias	
K1=0.5 y K2=1.5	



## 6.2 Controlador Difuso

El control difuso implementado, permite tener una o dos entradas (error de ángulo y derivada del error) y una sola salida con cinco funciones de pertenencia cada una. Desde la interfaz se ingresan los puntos básicos para especificar cada función de una manera adecuada. La sintonización de este algoritmo se ha basado principalmente en la observación de la respuesta del prototipo ante diferentes variaciones en los conjuntos difusos y a la experimentación práctica.

6.2.1 Controlador difuso con una sola entrada

Tabla 6.12 Control difuso para entrada de error de ángulo

Parámetros	Resultado
MI_C: -6000	El péndulo se estabiliza después de varias llegadas a los extremos. Se pudo observar que la respuesta dada por el PLC es lenta debido a los cálculos realizados haciendo que la estabilización del ángulo sea complicada a pesar de ajustar los parámetros minuciosamente.
MI_DER: -3000	
PI_IZQ: -6000	
PI_C: 3000	
PI_DER: 0	
C_IZQ: -3000	
C_C: 0	
RI_C: -28000	
LI_C: -21000	
Z_C: 0	
Funciones de Pertenencia	
Respuesta	
<div style="display: flex; flex-direction: column;"> <div style="margin-bottom: 10px;"> <p>angulo:AI\W0 Con signo</p> <p>Máximo: +30550</p> <p>Actual: +14993</p> <p>Mínimo: +0</p> </div> <div> <p>velocidad_motor: Con signo</p> <p>Máximo: +30000</p> <p>Actual: -7041</p> <p>Mínimo: -30000</p> </div> </div>	

### 6.2.2 Controlador difuso con dos entradas

**Tabla 6.13** Control difuso para entrada de error de ángulo y su derivada

<i>Parámetros</i>		<i>Resultado</i>
MI_C: -6000	VMN_C: -6000	Este controlador estabiliza el ángulo tras varios intentos y luego de llegar en algunas ocasiones a los extremos. Si el péndulo se encuentra completamente en vertical cuando se inicia el algoritmo, el controlador logra mantenerlo estable antes muy pequeñas perturbaciones.
MI_DER: -3000	VPN_C: -3000	
PI_IZQ: -6000	VC_C: 0	
PI_C: -3000	RI_C: -32000	
PI_DER: 0	LI_C: -23000	
C_IZQ: -3000	Z_C: 0	
C_C: 0		
<i>Funciones de Pertenencia</i>		
<i>Respuesta</i>		
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>                     ángulo: AIW0                      Con signo                      Máximo: +30822                      Actual: +15449                      Mínimo: +0                 </p> </div> <hr/> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>                     velocidad_motor:..                      Con signo                      Máximo: +32000                      Actual: +0                      Mínimo: -32000                 </p> </div>		

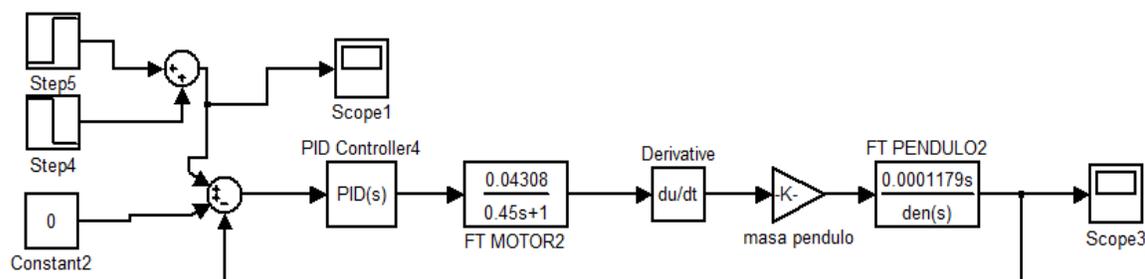
## 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se muestran algunas conclusiones obtenidas después de haber comprobado el funcionamiento del programa en el PLC y su comunicación con la interfaz para implementar los diferentes algoritmos de control en el prototipo de péndulo invertido. Además se plantea algunas ideas de futuros trabajos o mejoras en este sistema para obtener el máximo provecho de esta herramienta de aprendizaje.

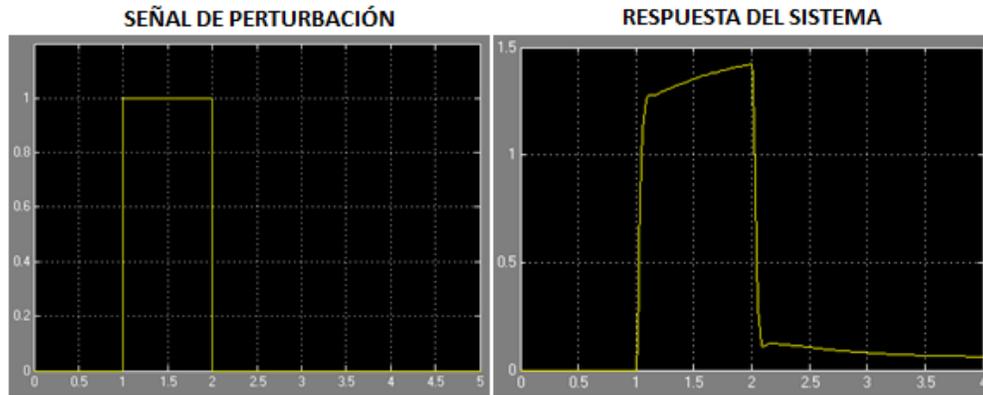
### 7.1 Conclusiones

Una vez que los subsistemas electrónico, de control y mecánico se han implementado adecuadamente para permitir las pruebas de diferentes algoritmos de control se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Los métodos clásicos de control tienen una gran funcionalidad en varios tipos de sistemas, pero presentan ciertas limitaciones en sistemas de tipo MIMO (de sus siglas en inglés multiple input and multiple output) y esto se pudo comprobar al intentar equilibrar el péndulo con el PID. Esto ya se preveía, ya que utilizando el software de simulación Matlab (Figura 7.1) solo se puede estabilizar de manera regular el sistema utilizando altos valores en sus parámetros ( $K_p=580$ ,  $K_i=750$ ,  $K_d=80$ ) y sin saturación de voltaje a la salida del PID como se puede observar en la Figura 7.2.

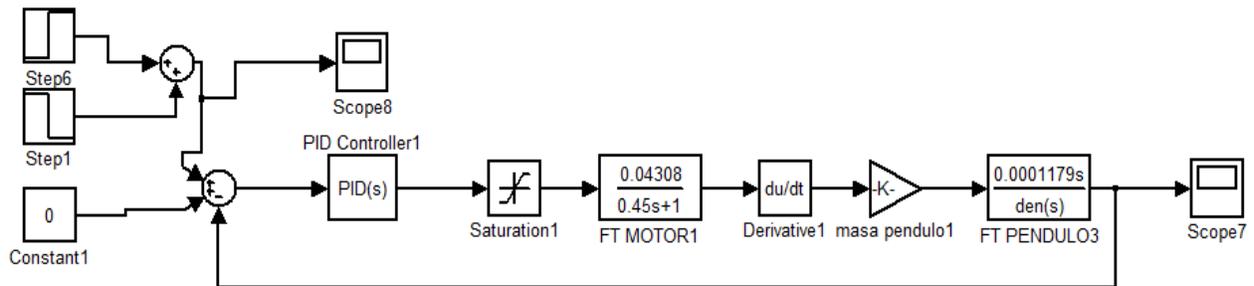


**Figura 7.1** Diagrama de bloques para control del ángulo sin saturación de voltaje

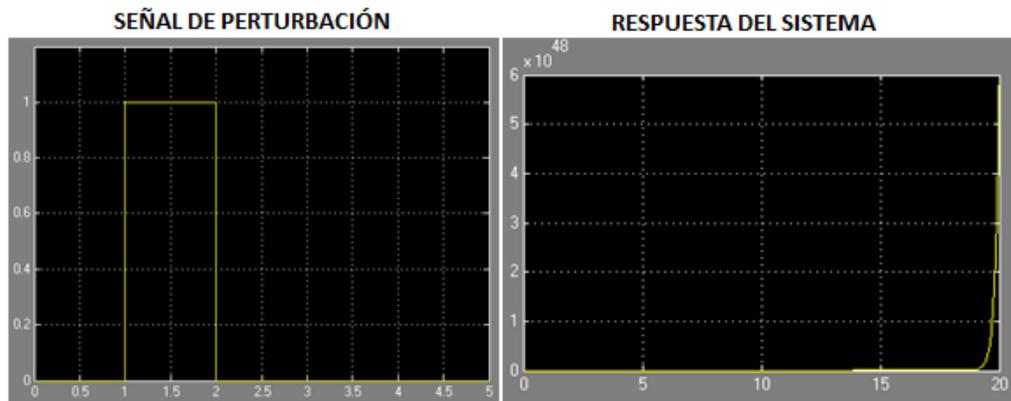


**Figura 7.2** Respuesta del sistema sin saturación de voltaje

Si en el sistema simulado se usa los mismos parámetros de configuración PID y se satura la salida de voltaje en -19V como mínimo y 19V como máximo (Figura 7.3), entonces el péndulo no llega a estabilizarse como se muestra en la Figura 7.4.



**Figura 7.3** Diagrama de bloques para control del ángulo con saturación de voltaje



**Figura 7.4** Respuesta del sistema con saturación de voltaje

- La falta de estabilización del péndulo invertido se debe también a problemas de fricción en el mecanismo, lo que hace que se requiere mayor voltaje para vencer la inercia del carro. El sistema a penas inicia el movimiento cuando se ha colocado un voltaje de 6,38 V en los terminales del motor (tercera parte del voltaje máximo aplicado). Esto implica que bajo este valor el motor no puede mover la carga y la salida de ningún controlador tiene efecto alguno en el sistema si es menor a la mencionada con esto queda limitado el campo de acción del control.
- En cuanto al controlador difuso, la calibración es un proceso que toma un tiempo muy prolongado ya que se basa en ensayos de tipo prueba-error, por lo tanto no se asegura un resultado óptimo inmediatamente. Además el algoritmo de control difuso depende en gran medida de la capacidad del autómeta para realizar operaciones de punto flotante. Esto influye directamente en la cantidad de memoria necesaria y en la rapidez para procesar dichas operaciones.
- Al realizar las pruebas del algoritmo difuso, se pudo percibir que la respuesta mejora si se utiliza las dos entradas y si se hace una distribución de las funciones de pertenencia con mayor concentración en el centro. Mientras más unidas estén las funciones en los valores cercanos al cero, se tiene una mayor resolución o una fusificación más fina en esos rangos.
- Normalmente cuando el sistema oscila mucho o su tiempo de establecimiento es muy grande se hace que las funciones de pertenencia de salida sean más angostas en las áreas cercanas al valor de referencia (0V), pero en nuestro caso como ya se menciona anteriormente si se hace muy estrechas las funciones en torno a ese valor no se tiene ningún efecto de control porque el voltaje sería muy pequeño como para mover el sistema.

## **7.2 *Trabajos futuros***

Un primer paso en los trabajos futuros que se pueden realizar en este prototipo, es utilizar un motor con mayor torque que pueda manejar el movimiento de la carga de forma más adecuada y que permita que valores pequeños en la salida de los controladores tengan un efecto en el sistema.

Además se podría aumentar al actual control difuso dos variables de entrada más (error de posición y derivada) para el control de la posición, aunque esto por otro lado implique más complejidad en las operaciones de punto flotante en el autómata, lo que podría hacer más lento el funcionamiento del algoritmo. Ante esta situación se recomienda utilizar un autómata de mejores características y velocidad de procesamiento.

A futuro también se puede incrementar el número de funciones de pertenencia de las entradas y salidas actuales del prototipo a fin de obtener mayor precisión en el algoritmo difuso. El incremento no debe ser muy grande porque repercute en el tiempo que las operaciones tardan en realizarse en el PLC.

Aunque el controlador clásico PID como el controlador difuso son dos métodos muy apropiados para iniciar el estudio del control en sistemas no lineales inestables, el estudio de este sistema puede extenderse utilizando técnicas de control más avanzadas como reguladores cuadráticos, observadores de estado, reguladores gaussianos, etc., que podrían tener un mejor efecto en esta planta.

## 8. PRESUPUESTO

APARTADO 1: Recursos Humanos .....	138
APARTADO 2: Material inventariable.....	139
APARTADO 3: Material mecánico .....	140
APARTADO 4: Material electrónico y eléctrico .....	143
APARTADO 5: Licencias de Software .....	148
PRESUPUESTO TOTAL .....	149

<b>MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>		<i>“REDISEÑO MECÁNICO Y CONTROL CON UN PLC DE UN PÉNDULO INVERTIDO”</i>			Pág. 138 APARTADO 1: Recursos Humanos			
Nº ORDEN	CONCEPTOS	Nº UNIDADES	FABRICANTE	TIPO	PRECIO UNITARIO MATERIAL	PRECIO UNITARIO MANO OBRA	PRECIO UNITARIO TOTAL	TOTAL
1.01	Horas de planificación del proyecto	40				12		480
1.02	Horas de rediseño mecánico del prototipo	40				12		480
1.03	Horas de diseño electrónico	80				12		960
1.04	Horas de diseño eléctrico	40				12		480
1.05	Horas de diseño mecánico del nuevo prototipo	150				12		1800
1.06	Horas de creación de planos de fabricación	80				12		960
1.07	Horas de montaje y conexionado	24				12		288
1.08	Horas de programación del autómeta e interfaz	160				12		1920
1.09	Horas de pruebas y comprobación de algoritmos	80				12		960
1.10	Horas de mecanografía del documento final	160				12		1920
<b>SUBTOTAL:</b>								<b>10248,00</b>

<b>MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>		<i>“REDISEÑO MECÁNICO Y CONTROL CON UN PLC DE UN PÉNDULO INVERTIDO”</i>			Pág. 139 APARTADO 2: Material inventariable			
Nº ORDEN	CONCEPTOS	Nº UNIDADES	FABRICANTE	TIPO	PRECIO UNITARIO MATERIAL	PRECIO UNITARIO MANO OBRA	PRECIO UNITARIO TOTAL	TOTAL
2.01	Ordenador personal	1	Toshiba	Satellite U505- SP2990R	700		700	700
2.02	Ordenador	1	Acer	-	500		500	500
2.03	PLC S7-200	1	Siemens	6ES7 214 1AD23 0XB0	384,13		384,13	384,13
2.04	Módulo EM-235	1	Siemens	6ES72350KD220XA0	293,36		293,36	293,36
<b>SUBTOTAL:</b>								<b>1877,49</b>

<b>MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>		<i>“REDISEÑO MECÁNICO Y CONTROL CON UN PLC DE UN PÉNDULO INVERTIDO”</i>			Pág. 140 APARTADO 3: Material mecánico			
Nº ORDEN	CONCEPTOS	Nº UNIDADES	FABRICANTE	TIPO	PRECIO UNITARIO MATERIAL	PRECIO UNITARIO MANO OBRA	PRECIO UNITARIO TOTAL	TOTAL
3.01	Rodamiento de bolas ISO 626	2	Inafag	inafag-626	2,78		2,78	5,56
3.02	Rodamiento de bolas ISO 624	2	Inafag	inafag-624	2,78		2,78	5,56
3.03	Polea dentada (15 dientes)	2	Michaud Chailly	a9-21t5-15f	9,06		9,06	18,12
3.04	Motor DC, 24V, 3.6A	1	Parvalux	PBL42-107	150		150	150
3.05	Acoplamiento flexible	1	Ruland	PSMR19-4- 4-SS	77		77	77
3.06	Acoplamiento flexible	1	Ruland	PSMR25-8- 6-SS	88,27		88,27	88,27
3.07	Guía doble sin perforar	1	Igus	WS-10-40- 1000	80,57		80,57	80,57
3.08	Perfil tuerca natural 5 (Aluminio)	1	Item	0.0.425.82	25		25	25
3.09	Perfil de aluminio 5x40x20	1	Item	0.0.370.04	30		30	30
3.10	Cojinetes	2	Igus	WJ200UM- 01-10	5		5	10
3.11	Rodamiento de bolas ISO 61800	2	Inafag	inafag- 61800	2,78		2,78	5,56

<b>MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>		<i>“REDISEÑO MECÁNICO Y CONTROL CON UN PLC DE UN PÉNDULO INVERTIDO”</i>			Pág. 141 APARTADO 3: Material mecánico			
Nº ORDEN	CONCEPTOS	Nº UNIDADES	FABRICANTE	TIPO	PRECIO UNITARIO MATERIAL	PRECIO UNITARIO MANO OBRA	PRECIO UNITARIO TOTAL	TOTAL
3.12	Cojinete de desplazamiento	1	Igus	JSM-0608-10	3,12		3,12	3,12
3.13	Correa dentada T5, 10 mm	1	Michaud Chailly	A8-10T5-1215	7,68		7,68	7,68
3.14	Piezas mecanizadas de Aluminio	24	UNIOVI	NA	20		20	480
3.15	Piezas mecanizadas de Acero	8	UNIOVI	NA	30		30	240
3.16	Piezas prototipadas de polímero	2	UNIOVI	NA	15		30	30
3.17	ISO 4762 M6 x 1 x 16	6	RS	Allen	0,20		0,20	1,20
3.18	ISO 4762 M5 x 0.8 x 20	4	RS	Allen	0,18		0,18	0,72
3.19	ISO 4762 M4 x 0.7 x 10	18	RS	Allen	0,16		0,16	2,88
3.20	ISO 4762 M4 x 0.7 x 16	4	RS	Allen	0,16		0,16	0,64
3.21	ISO 4762 M 3 x 0.5 x 6	11	RS	Allen	0,14		0,14	1,54
3.22	ISO 4762 M3 x 0.5 x 8	24	RS	Allen	0,14		0,14	3,36

<b>MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>		<i>“REDISEÑO MECÁNICO Y CONTROL CON UN PLC DE UN PÉNDULO INVERTIDO”</i>			Pág. 142 APARTADO 3: Material mecánico			
Nº ORDEN	CONCEPTOS	Nº UNIDADES	FABRICANTE	TIPO	PRECIO UNITARIO MATERIAL	PRECIO UNITARIO MANO OBRA	PRECIO UNITARIO TOTAL	TOTAL
3.23	ISO 4762 M3 x 0.5 x 10	6	RS	Allen	0,14		0,14	0,84
3.24	ISO 4762 M2.5 x 0.45 x 8	1	RS	Allen	0,12		0,12	0,12
3.25	ISO 4762 M2 x 0.4 x 10	4	RS	Allen	0,10		0,10	0,40
3.26	ISO 4028 M2.5 x 0.45 x 5	1	RS	Sin cabeza con hueco hexagonal	0,12		0,12	0,12
3.27	ISO 7046 M3 x 0.5 x 8 hueco cruciforme tipo Z	2	RS	Cabeza avellanada	0,14		0,14	0,28
3.28	ISO 7090 Arandela plana para tornillo M6	6	RS	NA	0,05		0,05	0,30
3.29	ISO 4032 Hex Nut M4x0.7	4	RS	NA	0,07		0,07	0,28
3.30	ISO 4032 Hex Nut M6x1	2	RS	NA	0,08		0,08	0,16
<b>SUBTOTAL:</b>							<b>1269,28</b>	

<b>MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>		<i>“REDISEÑO MECÁNICO Y CONTROL CON UN PLC DE UN PÉNDULO INVERTIDO”</i>			Pág. 143 APARTADO 4: Material electrónico y eléctrico			
Nº ORDEN	CONCEPTOS	Nº UNIDADES	FABRICANTE	TIPO	PRECIO UNITARIO MATERIAL	PRECIO UNITARIO MANO OBRA	PRECIO UNITARIO TOTAL	TOTAL
4.01	Terminal estándar WDU 2.5, 24 A	24	Weidmuller	1020000000	0,02		0,02	0,48
4.02	Disyuntor de corriente, tipo B, 10A	1	Square D	SQO110EB6	9,24		9,24	9,24
4.03	Disyuntor de corriente, tipo C, 6A	1	MK	8706S	15,02		15,02	15,02
4.04	Interruptor de balancín	1	Omron	A8WS-1162	4,27		4,27	4,27
4.05	Paro de emergencia 40mm, 1NC	1	Schneider Electric	XB4BT842	26,29		26,29	26,29
4.06	Codificador giratorio incremental	1	Hewlett Packard	HEDS-5540-A11	130,81		130,81	130,81
4.07	Interruptor de fin de carrera	2	Diotronic	DB1CB1RC	3,63		3,63	7,26
4.08	Interruptor de fin de carrera, 15A	2	Honeywell	BZ-2RW863-A2	12,26		12,26	24,52
4.09	Tablero eléctrico 35x35x20	1	Schneider Electric	NSYPLS3636L	40		40	40
4.10	Potenciómetro rotativo lineal 1K $\Omega$	1	Te Connectivity	23ESA102MMF50NF	2,62		2,62	2,62
4.11	Potenciómetro rotativo lineal 1K $\Omega$	1	Bourns	6639S-1-0000102	25,52		25,52	25,52

<b>MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>		<i>“REDISEÑO MECÁNICO Y CONTROL CON UN PLC DE UN PÉNDULO INVERTIDO”</i>			Pág. 144 APARTADO 4: Material electrónico y eléctrico			
Nº ORDEN	CONCEPTOS	Nº UNIDADES	FABRICANTE	TIPO	PRECIO UNITARIO MATERIAL	PRECIO UNITARIO MANO OBRA	PRECIO UNITARIO TOTAL	TOTAL
4.12	Potenciómetro 1 MΩ	1	Bourns	3296Z-1-105LF	1,14		1,14	1,14
4.13	Potenciómetro de 10 KΩ	1	Vishay	T93YA 10K 10%	1,21		1,21	1,21
4.14	Resistencia de 15 KΩ (1/4 W)	1	Multicomp	MCF 0.25W 15K	0,02		0,02	0,02
4.15	Resistencia de 2,7 KΩ (1/4 W)	3	Multicomp	MCF 0.25W 2K7	0,02		0,02	0,06
4.16	Resistencia de 10 KΩ (1/4 W)	2	Multicomp	MCF 0.25W 10K	0,02		0,02	0,04
4.17	Resistencia de 1 KΩ (1/4 W)	2	Multicomp	MCF 0.25W 1K	0,02		0,02	0,04
4.18	Resistencia de 22 Ω (1/4 W)	1	Multicomp	MCF 0.25W 22R	0,02		0,02	0,02
4.19	Resistencia de 1,5 KΩ (1/4 W)	1	Multicomp	MCF 0.25W 1K5	0,02		0,02	0,02
4.20	Resistencia de 100 Ω (1/4 W)	1	Multicomp	MCF 0.25W 100R	0,02		0,02	0,02
4.21	Resistencia de 100 Ω (2 W)	2	Multicomp	MCF 2W 100R	0,19		0,19	0,38
4.22	Resistencia de 1 Ω (10 W)	1	Multicomp	MCPRW0AWJW10JB00	0,24		0,24	0,24

<b>MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>		<i>“REDISEÑO MECÁNICO Y CONTROL CON UN PLC DE UN PÉNDULO INVERTIDO”</i>			Pág. 145 APARTADO 4: Material electrónico y eléctrico			
Nº ORDEN	CONCEPTOS	Nº UNIDADES	FABRICANTE	TIPO	PRECIO UNITARIO MATERIAL	PRECIO UNITARIO MANO OBRA	PRECIO UNITARIO TOTAL	TOTAL
4.23	Amplificador operacional LM358N	1	Texas Instruments	LM358N/NOPB	0,56		0,56	0,56
4.24	Amplificador operacional de alto voltaje PA85	1	Apex	PA85	281,62		281,62	281,62
4.25	Transistor NPN 2N3055	2	Multicomp	2N3055	1,09		1,09	2,18
4.26	Transistor PNP 2N2955	2	Multicomp	2N2955	1,09		1,09	2,18
4.27	Transistor NPN BD135	1	Multicomp	BD135	0,53		0,53	0,53
4.28	Transistor PNP BD136	1	Multicomp	BD136	0,36		0,36	0,36
4.29	Transistor NPN BC547	2	Fairchild Semiconductor	BC547B	0,26		0,26	0,52
4.30	Biestable J-K CD4027	2	Texas Instruments	CD4027BE	0,56		0,56	1,12
4.31	Capacitor cerámico de 68pF	1	Vishay	D680G25C0GH63J5R	0,03		0,03	0,03
4.32	Capacitor electrolítico de 4700 $\mu$ F	4	United chemi- con	ESMG500ELL472MP40S	7,58		7,58	30,32
4.33	Capacitor cerámico 330 nF	4	Multicomp	MC0805B334K500A5.08MM	0,06		0,06	0,24

<b>MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>		<i>“REDISEÑO MECÁNICO Y CONTROL CON UN PLC DE UN PÉNDULO INVERTIDO”</i>			Pág. 146 APARTADO 4: Material electrónico y eléctrico			
Nº ORDEN	CONCEPTOS	Nº UNIDADES	FABRICANTE	TIPO	PRECIO UNITARIO MATERIAL	PRECIO UNITARIO MANO OBRA	PRECIO UNITARIO TOTAL	TOTAL
4.34	Capacitor cerámico 100 nF	7	AVX	SR215E104MAA	0,14		0,14	0,98
4.35	Regulador de voltaje LM7905	1	Fairchild Semiconductor	LM7905CT	0,62		0,62	0,62
4.36	Regulador de voltaje LM7915	1	Texas Instruments	LM7915CT	1,18		1,18	1,18
4.37	Regulador de voltaje LM7805	1	Fairchild Semiconductor	LM7805CT	0,69		0,69	0,69
4.38	Regulador de voltaje LM7815	1	Fairchild Semiconductor	LM7815CT	0,57		0,57	0,57
4.39	Diodo 1N4004	4	Multicomp	1N4004	0,11		0,11	0,44
4.40	Puente rectificador , 35A	1	Multicomp	CM3501	8,06		8,06	8,06
4.41	Disipador para regulador de voltaje	2	Aavid Thermalloy	504102B00000G	0,42		0,42	0,42
4.42	Disipador para amplificador	1	ABL Heatsinks	505403B00000G	2,80		2,80	2,80
4.43	Disipador transistores	2	ABL Heatsinks	520AB1250MB(TO- 3X2)	11,82		11,82	23,64
4.44	Bornes circuito impreso 3 pines	5	Wieland Electric	25.161.0353.0	0,10		0,10	0,50

<b>MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>		<i>“REDISEÑO MECÁNICO Y CONTROL CON UN PLC DE UN PÉNDULO INVERTIDO”</i>			Pág. 147 APARTADO 4: Material electrónico y eléctrico			
Nº ORDEN	CONCEPTOS	Nº UNIDADES	FABRICANTE	TIPO	PRECIO UNITARIO MATERIAL	PRECIO UNITARIO MANO OBRA	PRECIO UNITARIO TOTAL	TOTAL
4.45	Bornes circuito impreso 2 pines	7	Wieland Electric	25.161.0253.0	0,10		0,10	0,70
4.46	Bornes circuito impreso 5 pines	1	Wieland Electric	25.161.0553.0	0,10		0,10	0,10
4.47	Tira de pines hembra, torneado, 2.54 mm	3	Te Connectivity	1-1814655-1	0,2		0,2	0,60
4.48	Puntas para cable AWG 14 (paquete 100 unidades)	1	Multicomp	PTVE2-12	6,53		6,53	6,53
4.49	Puntas para cable AWG 18 (paquete 50 unidades)	2	Te Connectivity	154708	0,54		0,54	1,08
4.50	Transformador, 2 devanados, 18V eficaces	1	-	-	20		20	20
4.51	Riel DIN	3	Phoenix Contact	1207640	2,93		2,93	8,79
4.52	Canaleta ranurada, gris, 37,5x25 1m	2	Beta Duct	07860000	1,23		1,23	2,46
<b>SUBTOTAL:</b>								<b>689,04</b>

<b>MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>		<i>“REDISEÑO MECÁNICO Y CONTROL CON UN PLC DE UN PÉNDULO INVERTIDO”</i>			Pág. 148 APARTADO 5: Licencias de Software			
Nº ORDEN	CONCEPTOS	Nº UNIDADES	FABRICANTE	TIPO	PRECIO UNITARIO MATERIAL	PRECIO UNITARIO MANO OBRA	PRECIO UNITARIO TOTAL	TOTAL
5.01	Matlab	0,25	MathWorks	R2010a	4740		4740	1185
5.02	Solidworks	0,25	SolidWorks Corp.	Académico	79		79	20
5.03	Microsoft office 2010	0,25	Microsoft	Professional plus	395		395	99
5.04	Eagle PCB Software	0,2	Cadsoft	Professional	2132		2132	426,4
5.05	SIMATIC WinCC V6.0	0,3	Siemens	-	1960		1960	588
5.06	Step 7 Micro/WIN 4.0	0,3	Siemens	-	362,88		362,88	108,86
5.07	S7-200 PC Access 1.0	0,3	Siemens	-	4726,08		4726,08	1417,82
<b>SUBTOTAL:</b>							<b>3845,08</b>	

<b>MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>					
<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>					
Nº	NÚMERO DE UNIDADES	DESIGNACIÓN DE LAS OBRAS	PRECIO DE LAS UNIDADES	IMPORTES	
				PARCIALES	TOTALES
				Euros	Euros
1	1	Recursos Humanos	10248,00	10248,00	10248,00
2	1	Material Inventariable	1877,49	1877,49	1877,49
3	1	Material Mecánico	1269,28	1269,28	1269,28
4	1	Material electrónico y eléctrico	689,04	689,04	689,04
5	1	Licencias de Software	3845,08	3845,08	3845,08
Total sin I.V.A					17928,89
I.V.A. (21%)					3765,07
<b>TOTAL</b>					<b>21693,96</b>

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Spong, K. J. Aström, y D. Block. *The Reaction Wheel Pendulum*, Morgan & Claypool Publishers, 2007.
- [2] M. Antonio, C. Márquez, R. Silva y C. Merlo. *Sistemas dinámicos subactuados: Péndulos invertidos*. Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC. México.
- [3] Universidad de Michigan, *Ejemplo: Modelación de un péndulo invertido*. [http://www.ib.cnea.gov.ar/~instyctl/Tutorial\\_Matlab\\_esp/invpen.html](http://www.ib.cnea.gov.ar/~instyctl/Tutorial_Matlab_esp/invpen.html). Acceso el 15/05/2014
- [4] A. Franco García. *Medida del coeficiente de rozamiento por deslizamiento*. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/rozamiento/dinamico/dinamico.htm>. Acceso el 17/05/2014.
- [5] Universidad Miguel Hernández de Elche. Autómatas y Sistemas de Control. *Práctica 6: Identificación Servomotor*. [http://isa.umh.es/asignaturas/asct/practicas\\_control/p06.pdf](http://isa.umh.es/asignaturas/asct/practicas_control/p06.pdf). Acceso el 17/05/2014.
- [6] Universidad de Oviedo. Área de Ingeniería en Sistemas y Automática. *Archivo: IdentificaciónPrimerOrden.png*. <http://isa.uniovi.es/wiki/isa/index.php/Archivo:IdentificacionPrimerOrden.png>. Acceso el 18/05/2014.
- [7] Tangient LLC. <http://control-pid.wikispaces.com/>. Acceso el 18/05/2014.
- [8] F. Morilla García. *El controlador PID*. Dpto. de Informática y Automática de la Universidad Nacional de Educación a Distancia UNED. <http://www.dia.uned.es/~fmorilla/MaterialDidactico/El%20controlador%20PID.pdf>. Acceso el 18/05/2014.
- [9] Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Electrónica. *Reguladores Digitales*. <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/3.2Clase20ReguladoresDigitales.pdf>. Acceso el 20/05/2014.
- [10] G. Tejada. *Tutorial de lógica fuzzy*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Lima. [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/electronica/Agosto\\_2000/pdf/logica%20fuzzy.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/electronica/Agosto_2000/pdf/logica%20fuzzy.pdf). Acceso el 23/05/2014.
- [11] M. Pineda, A. Vivas. *Control de un modelo aerodinámico aplicando sistemas difusos*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2008. <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1082/1/CD-1920.pdf> Acceso el 25/05/2014.
- [12] Universidad de Piura. *Lógica difusa y sistemas de control*. Lima, Perú. [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_185\\_184\\_133\\_1746.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_185_184_133_1746.pdf). Acceso el 26/05/2014.

- [13] Siemens. *Manual del sistema de automatización S7-200*. 2008.
- [14] Universidad Don Bosco. Ingeniería Electrónica. Tema: S7-200, Escalado de valores analógicos. <http://www.udb.edu.sv/udb/archivo/guia/electronica-ingenieria/automatas-programables/2014/i/guia-8.pdf>. Acceso el 28/05/2014.
- [15] ZST Cieszyn. [http://www.zst.cieszyn.pl/mechatr/plc\\_mechatr/s7200analog.pdf](http://www.zst.cieszyn.pl/mechatr/plc_mechatr/s7200analog.pdf). Acceso el 29/05/2014.
- [16] Siemens. Ejemplos S7-200. *Escalado de valores analógicos*. Ejemplo N° 38.
- [17] Universidad Autónoma de Baja California. Tema 7 Etapas de Salida. <http://fcqi.tij.uabc.mx/usuarios/jjesuslg/Tema7.pdf>. Acceso el 31/05/2014.
- [18] A. Pérez Otero. *Desarrollo de la planta experimental 'Péndulo Invertido'*. Universidad de Oviedo. Septiembre 1998.
- [19] J. de Ávila. *Mecánica*. <http://www.tecnologia.maestrojuandeavila.es/temas/mec/mec.htm#mecanismosymaquinas>. Acceso el 31/05/2014.
- [20] Ingemecánica. *Tutorial N° 121, Correas de Transmisión, cálculo y diseño*. <http://www.ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn121.html#seccion23>. Acceso el 02/06/2014.
- [21] <http://dc398.4shared.com/doc/FVNsPpcQ/preview.html>. Acceso el 03/06/2014.
- [22] V. Quilodrán. *Acoplamientos Mecánicos*. Universidad Tecnológica de Chile. <http://mantenimiento6to.wikispaces.com/file/view/acoplamientos.pdf>. Acceso el 03/06/2014.
- [23] [http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/mecanismos/mec\\_cadena-pinon.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/mecanismos/mec_cadena-pinon.htm). Acceso el 05/06/2014.
- [24] Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado. España. <http://almez.pntic.mec.es/jgonza86/Sistemas%20de%20poleas%20y%20correas.htm>. Acceso el 06/06/2014.
- [25] Demo E-Educativa CATEDU. *Transmisión por poleas y correas o cadenas*. Aragón, España. [http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1101/html/3\\_transmision\\_por\\_poleas\\_y\\_correas\\_o\\_cadenas.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1101/html/3_transmision_por_poleas_y_correas_o_cadenas.html). Acceso el 06/06/2014.
- [26] HUANG Chun-E, LI Dong-Hai, SU Yong. *Simulation and Robustness Studies on an Inverted Pendulum*. Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, July 22-24, 2011, Yantai, China.

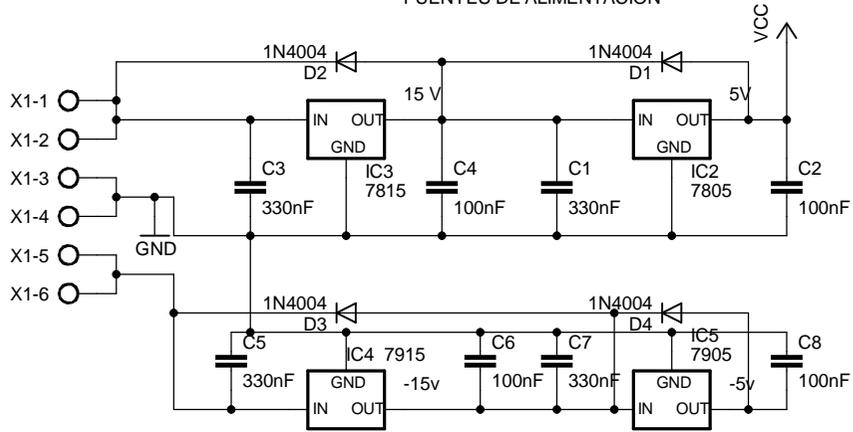
# ANEXOS

# ANEXO I

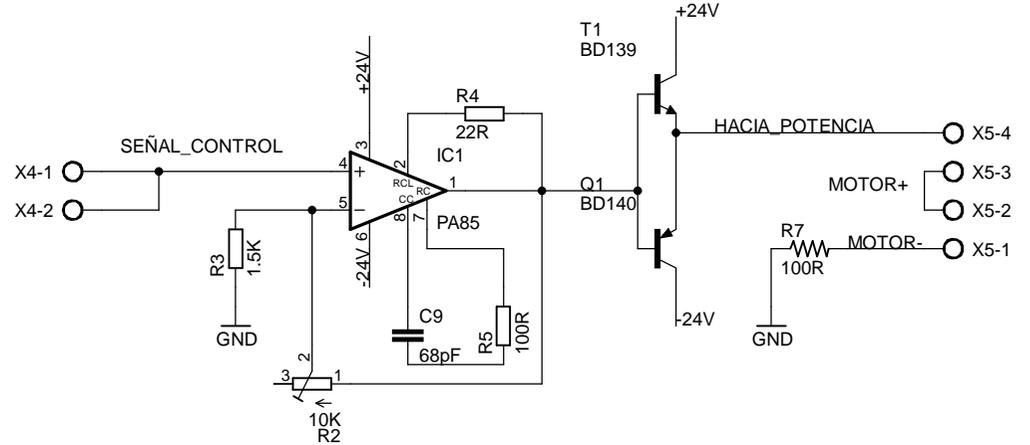
## PLANOS ELECTRÓNICOS Y ELÉCTRICOS

TFM-ELEC-001	Esquemático placa principal
TFM-ELEC-002	Elementos placa principal
TFM-ELEC-003	Placa principal (vista top)
TFM-ELEC-004	Placa principal (vista bottom)
TFM-ELEC-005	Esquemático placa acondicionamiento de encoder
TFM-ELEC-006	Elementos placa acondicionamiento de encoder
TFM-ELEC-007	Circuito impreso placa de acondicionamiento de encoder (vista top)
TFM-ELEC-008	Circuito impreso placa de acondicionamiento de encoder (vista bottom)
TFM-ELEC-009	Diagrama de situación
TFM-ELEC-010	Diagrama unifilar
TFM-ELEC-011-A	Diagrama de conexionado
TFM-ELEC-011-B	Diagrama de conexionado
TFM-ELEC-012-A	Diagrama de conexiones ampliado de tablero eléctrico
TFM-ELEC-012-B	Diagrama de conexiones ampliado y de cableado
TFM-ELEC-013	Listado de componentes

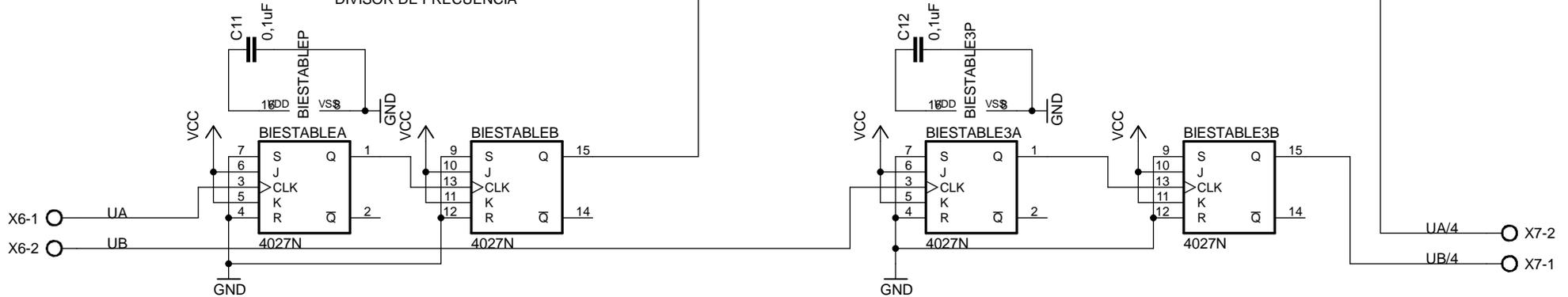
FUENTES DE ALIMENTACION



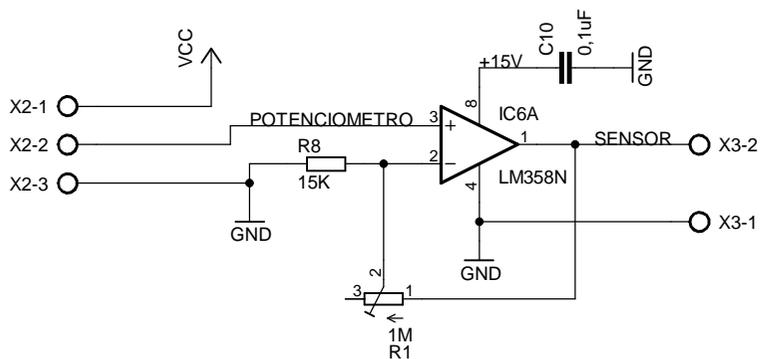
SALIDAS DEL SISTEMA



DIVISOR DE FRECUENCIA

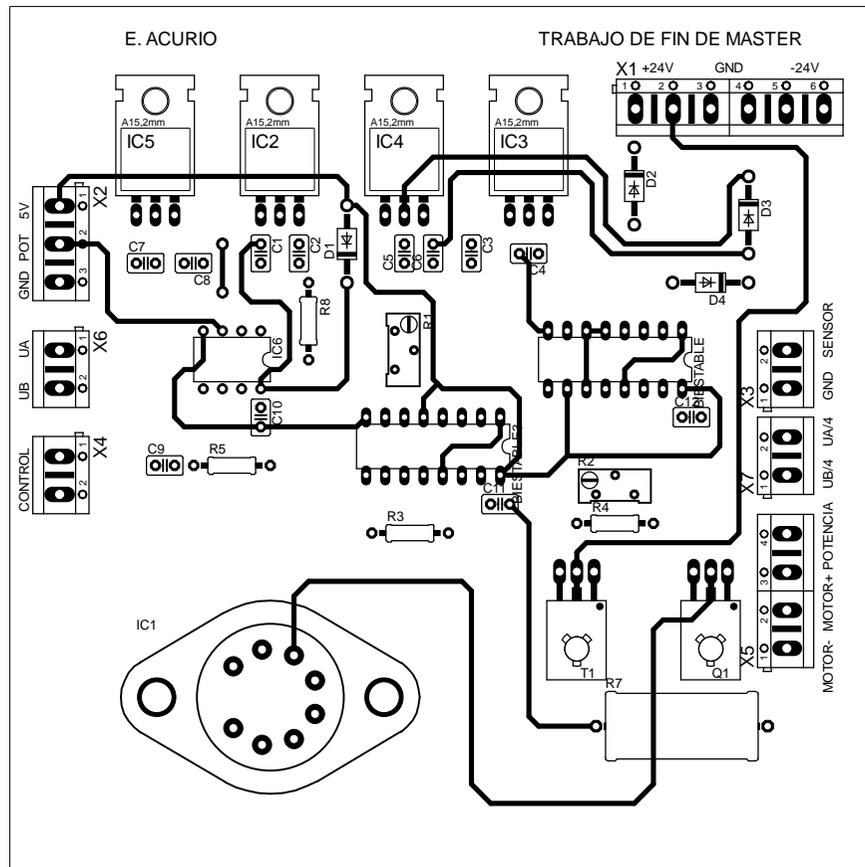


ENTRADAS DEL SISTEMA



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	15-03-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-03-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	08-06-14	J. Sirgo	J.S	
ESCALA	CIRCUITO ESQUEMÁTICO DE PLACA PRINCIPAL			PLANO N°: TFM-ELEC-001
				Sustituye a
				Sustituido por



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

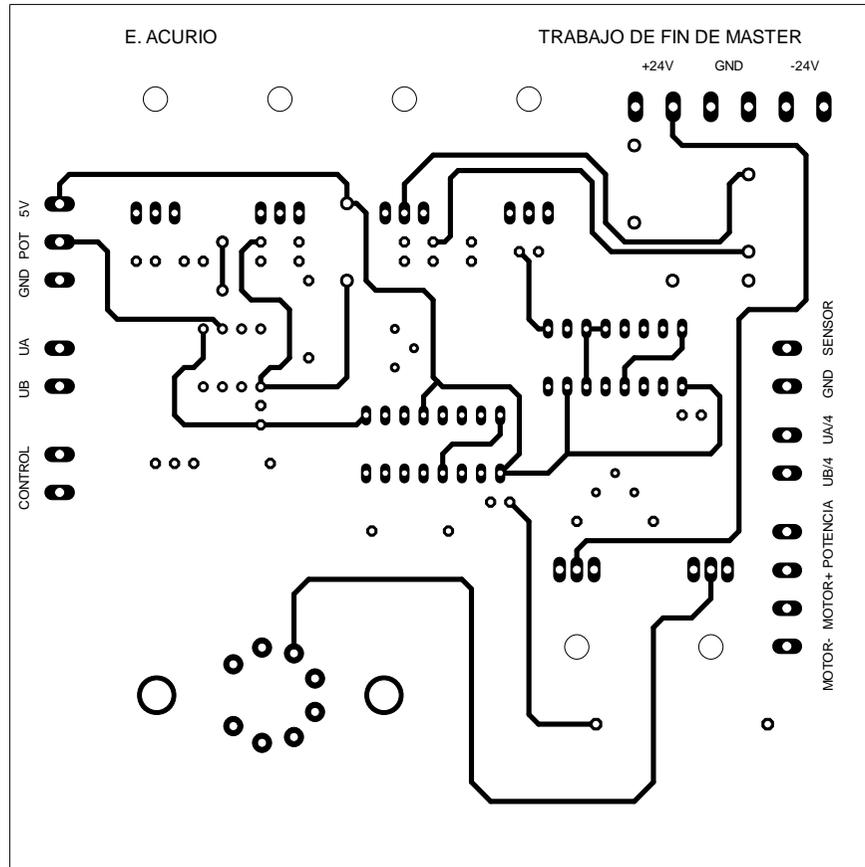
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
Proyectado	15-03-14	E. Acurio	E.A.
Dibujado	20-03-14	E. Acurio	E.A.
Comprobado	08-06-14	J. Sirgo	J.S.

"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"

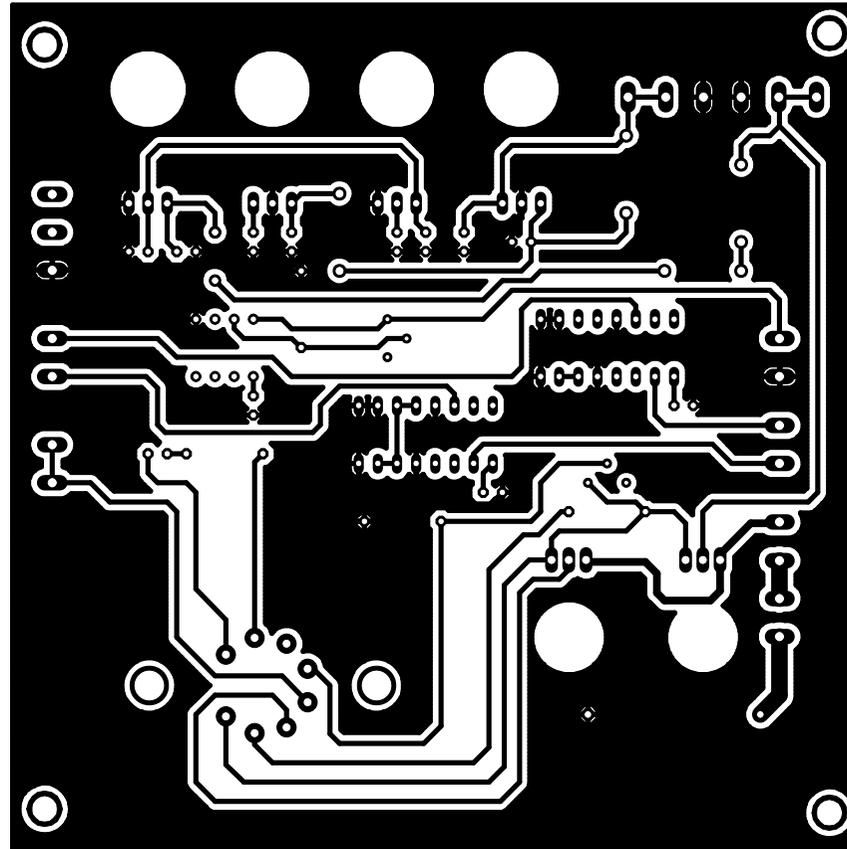
ESCALA  
1:1

CIRCUITO IMPRESO DE PLACA PRINCIPAL  
(ELEMENTOS)

PLANO N°: TFM-ELEC-002  
Sustituye a  
Sustituido por



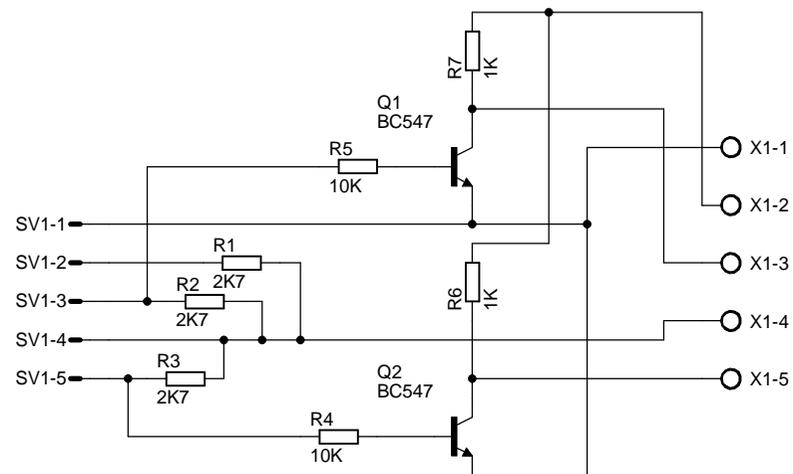
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA				
TRABAJO FIN DE MÁSTER				
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	15-03-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-03-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	08-06-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA	CIRCUITO IMPRESO DE PLACA PRINCIPAL (VISTA TOP)			PLANO N°: TFM-ELEC-003
1:1				Sustituye a
				Sustituido por



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

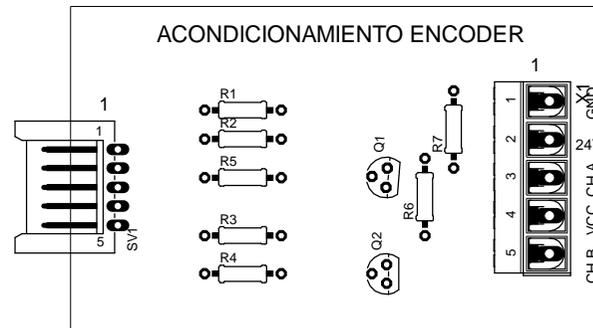
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	15-03-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-03-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	08-06-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	CIRCUITO IMPRESO DE PLACA PRINCIPAL (VISTA BOTTOM)			PLANO N°: TFM-ELEC-004
				Sustituye a
				Sustituido por



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

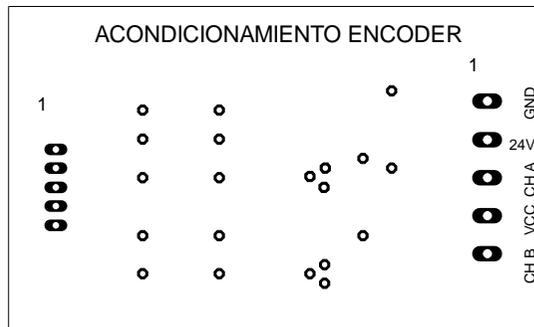
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	15-03-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-03-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	08-06-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA	CIRCUITO ESQUEMÁTICO PLACA DE ACONDICIONAMIENTO DE ENCODER			PLANO N°:TFM-ELEC-005
				Sustituye a
				Sustituido por



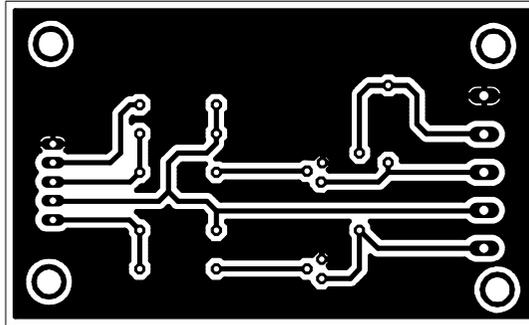
**MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	15-03-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-03-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	08-06-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA	CIRCUITO IMPRESO PLACA DE ACONDICIONAMIENTO DE ENCODER (ELEMENTOS)			PLANO N°: TFM-ELEC-006
1:1				Sustituye a
				Sustituido por

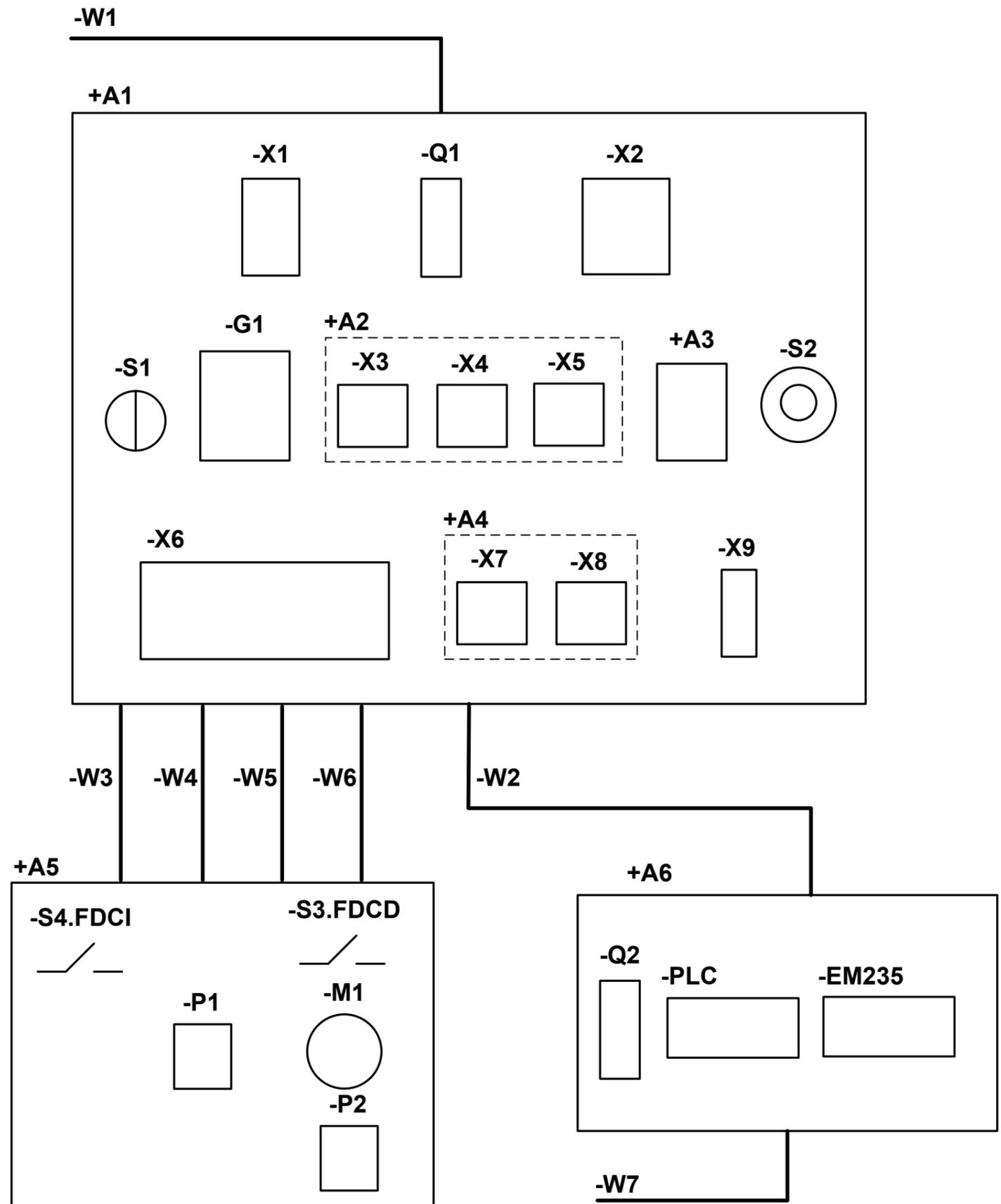


MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA				
TRABAJO FIN DE MÁSTER				
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	15-03-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-03-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	08-06-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA	CIRCUITO IMPRESO PLACA DE ACONDICIONAMIENTO DE ENCODER (VISTA TOP)			PLANO N°: TFM-ELEC-007
1:1				Sustituye a
				Sustituido por



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

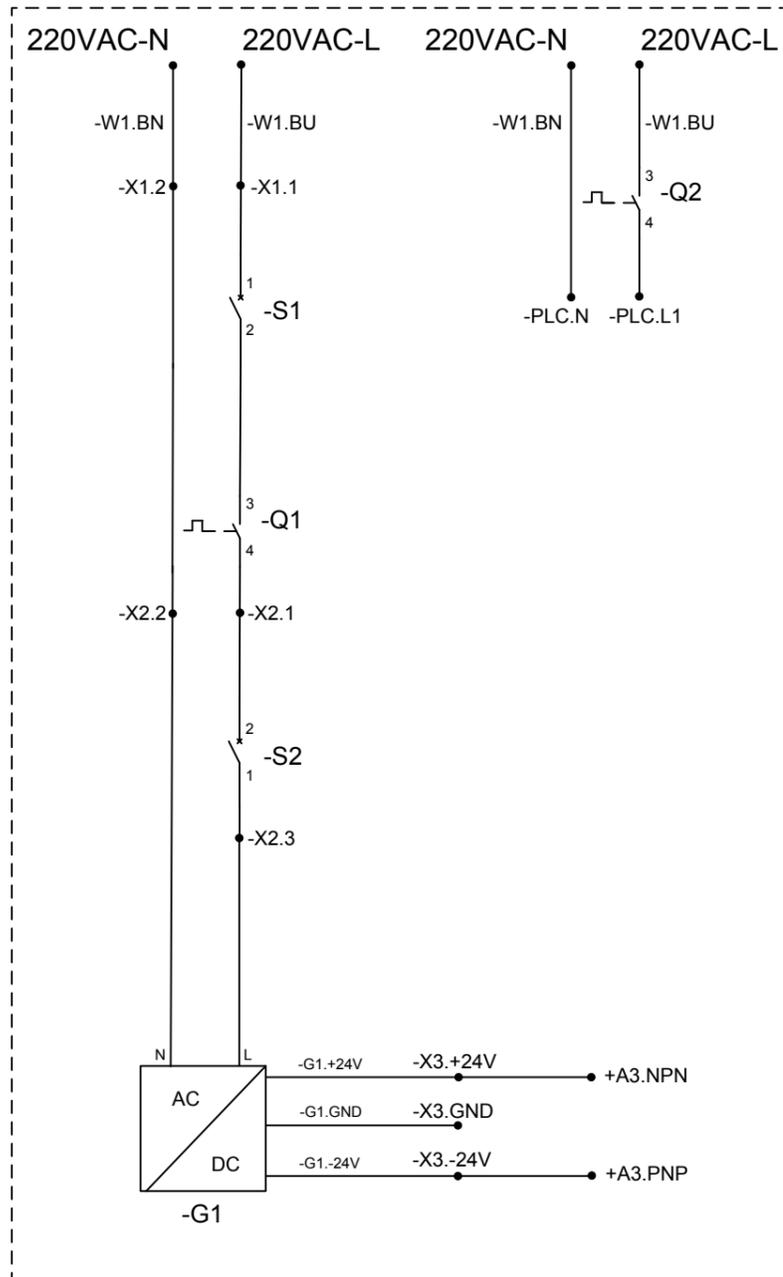
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	15-03-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-03-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	08-06-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	CIRCUITO IMPRESO PLACA DE ACONDICIONAMIENTO DE ENCODER (VISTA BOTTOM)			PLANO N°: TFM-ELEC-008 Sustituye a Sustituido por



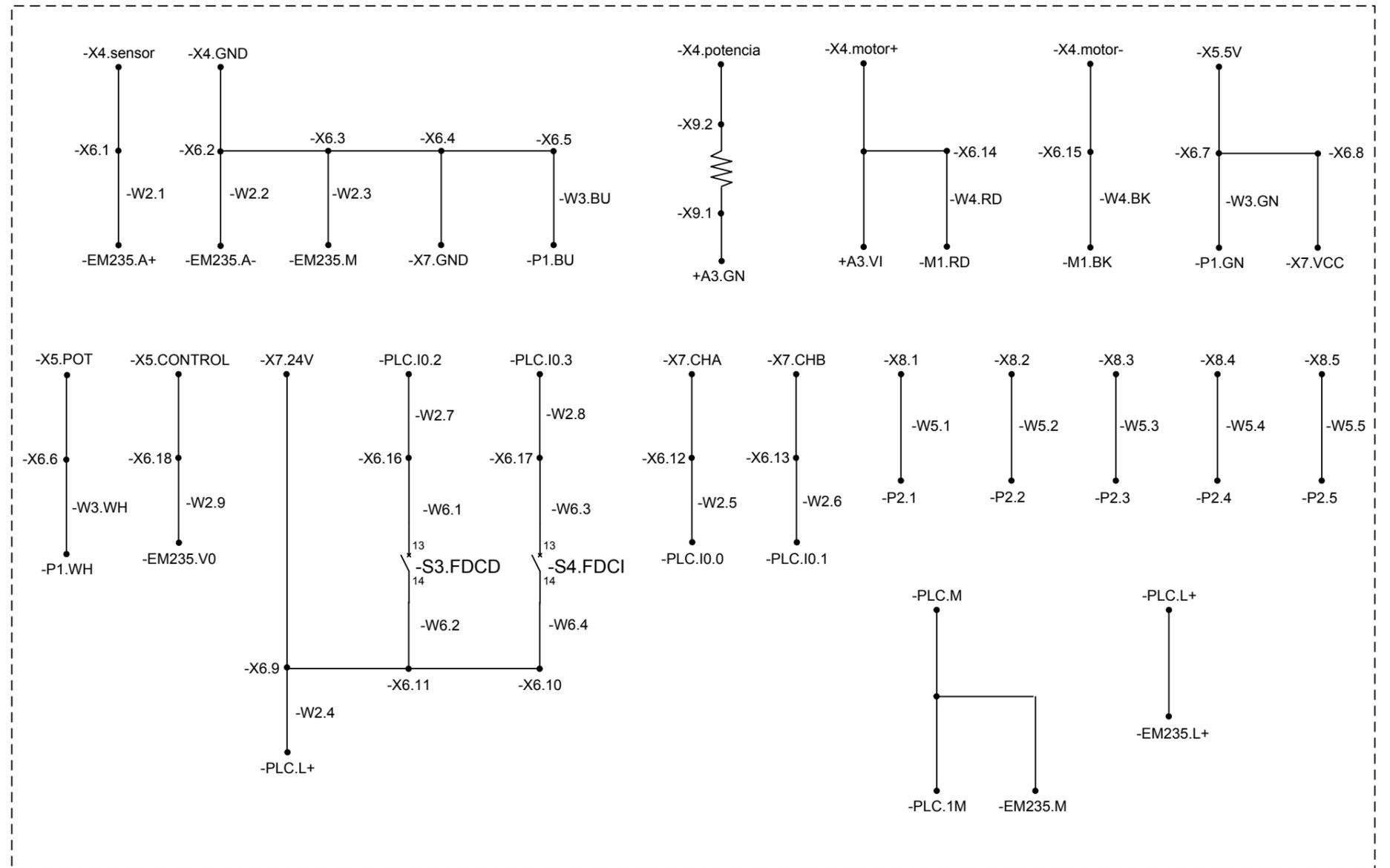
ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
+A1	Tablero eléctrico
-X1	Borneras de entrada 220 VAC
-Q1	Interruptor magnetotérmico
-X2	Borneras de 220 VAC
-S1	Selector ON/OFF
-G1	Fuente de +24VDC / -24VDC
+A2	Placa de control
-X3	Borneras de +24VDC / -24VDC
-X4	Borneras de control del motor
-X5	Borneras para sensor de ángulo
+A3	Transistores de potencia
-S2	Paro de emergencia
-X6	Borneras para cableado externo
+A4	Placa acondicionamiento de encoder
-X7	Borneras placa del encoder
-X8	Borneras placa del encoder
-X9	Bornera resistencia de potencia
+A5	Bloque Motor DC
-M1	Motor DC
-S3.FDCD	Fin de carrera derecho
-S3.FDCI	Fin de carrera izquierdo
-P1	Potenciómetro sensor de ángulo
-P2	Encoder
+A6	Bloque PLC
-Q2	Interruptor Magnetotérmico
PLC	PLC Siemens S7-200
EM235	Módulo de entradas análogas EM235
-W1	Cable de alimentación 220VAC tablero
-W2	Cable de conexión hacia Bloque PLC
-W3	Cable de conexión a potenciómetro
-W4	Cable de conexión a Motor DC
-W5	Cable de conexión a encoder
-W6	Cable de conexión a fines de carrera
-W7	Cable de alimentación 220VAC a PLC

MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA			
TRABAJO FIN DE MÁSTER			
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
Proyectado	01-05-14	E. Acurio	E.A.
Dibujado	20-05-14	E. Acurio	E.A.
Comprobado	10-06-14	J.Sirgo	J.S.
			"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
ESCALA	DIAGRAMA DE SITUACIÓN		
N/A			PLANO N°: TFM-ELEC-009
			Sustituye a
			Sustituido por

### CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN



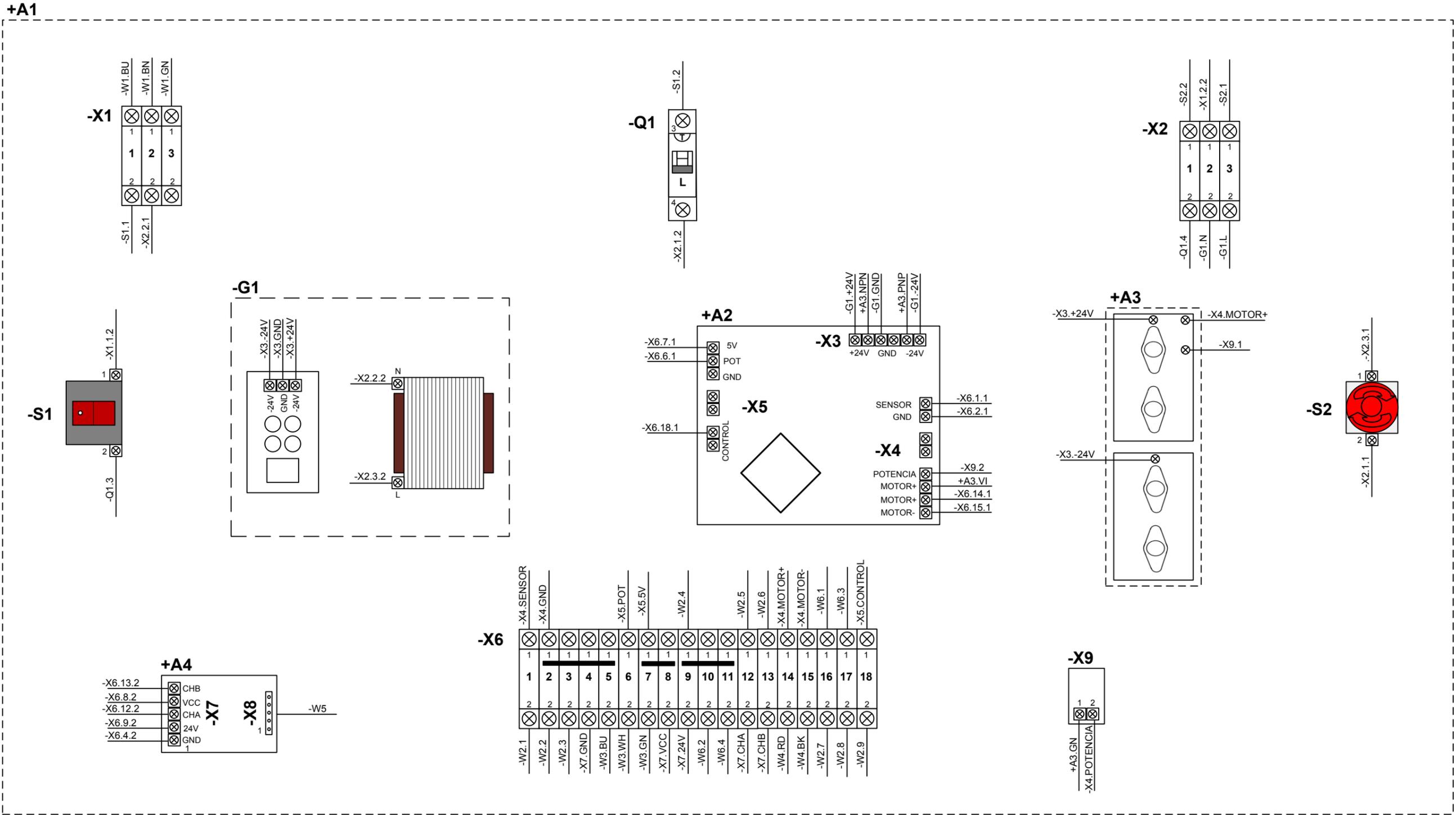
### CIRCUITO DE CONTROL



### MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-05-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-05-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	10-06-14	J.Sirgo	J.S.	
ESCALA N/A	DIAGRAMA UNIFILAR			PLANO N°: TFM-ELEC-010
				Sustituye a
				Sustituido por

# CONEXIONES TABLERO ELÉCTRICO

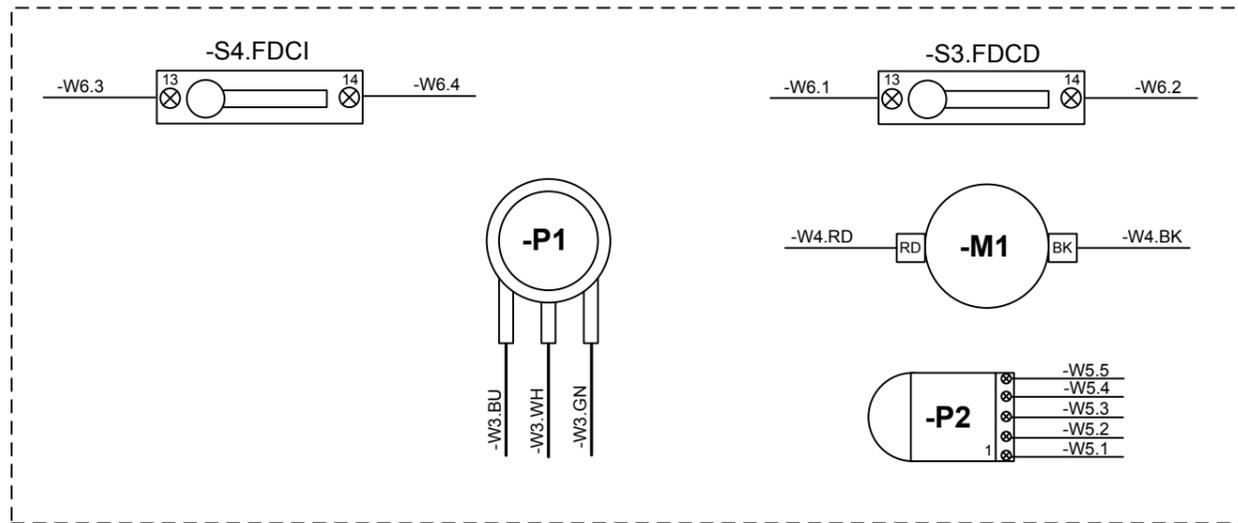


## MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-05-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-05-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	10-06-14	J.Sirgo	J.S.	
ESCALA N/A	DIAGRAMA DE CONEXIONADO			PLANO N°:TFM-ELEC-011-A Sustituye a Sustituido por

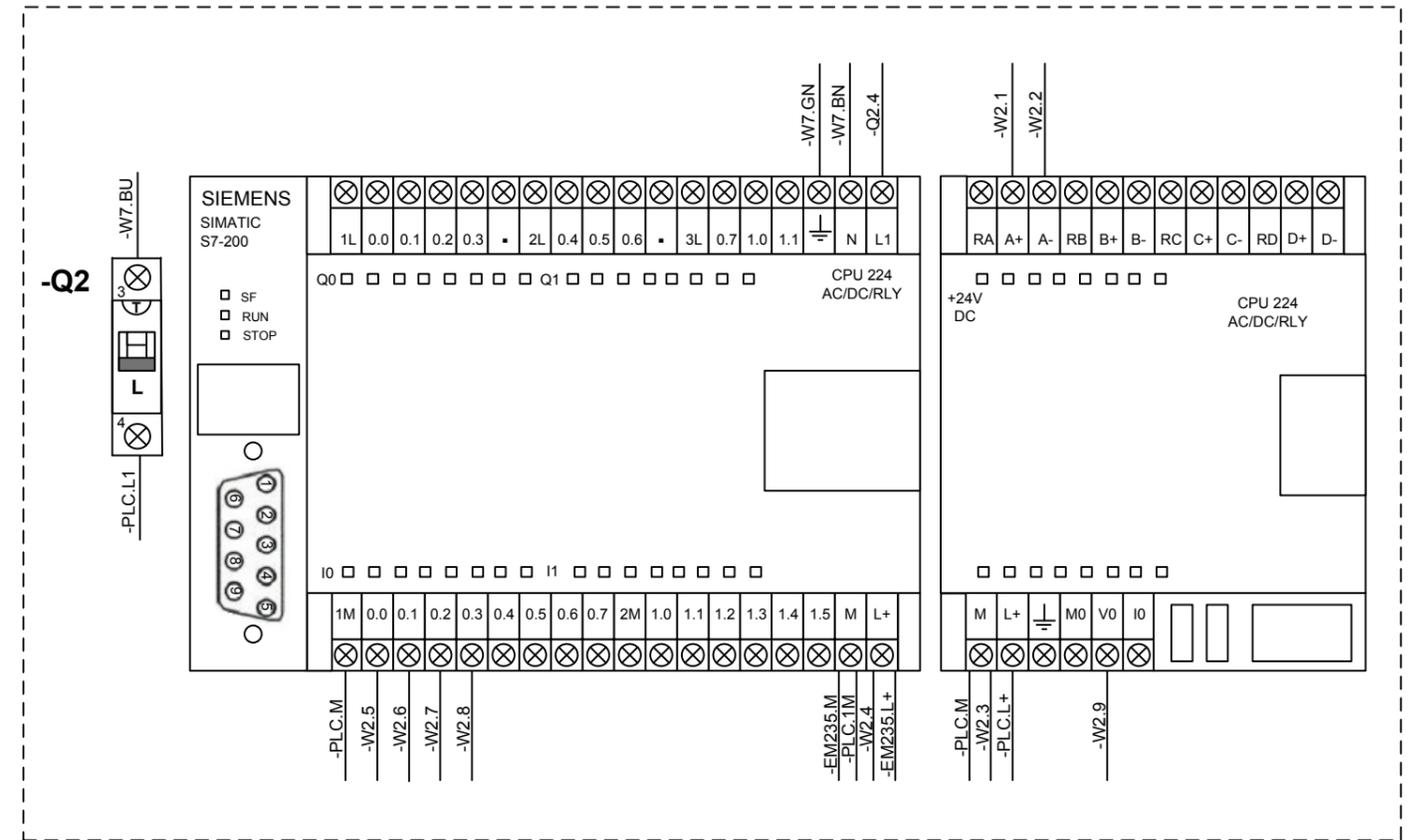
## BLOQUE MOTORE DC

+A5



## BLOQUE PLC

+A6



## MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-05-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-05-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	10-06-14	J.Sirgo	J.S.	
ESCALA N/A	DIAGRAMA DE CONEXIONADO			PLANO N°:TFM-ELEC-011-B Sustituye a Sustituido por

ELEMENTO	CONEXIÓN DESDE	PUNTO CONEXIÓN	BORNERA	PUNTO CONEXIÓN	CONEXIÓN HACIA	DESCRIPCIÓN
<b>-X1</b>	-W1.BU	-X1.1.1	1	-X1.1.2	-S1.1	Conexión de fase a Interruptor ON/OFF
	-W1.BN	-X1.2.1	2	-X1.2.2	-X2.2.1	Conexión de neutro
	-W1.GN	-X1.3.1	3	-X1.3.2	-	Conexión de tierra
<b>-Q1</b>	-S1.2	-Q1.3	-	-Q1.4	-X2.1.2	Conexión de fase a int. magnetotérmico
<b>-X2</b>	-S2.2	-X2.1.1	1	-X2.1.2	-Q1.4	Conexión de fase a int. magnetotérmico
	-X1.2.2	-X2.2.1	2	-X2.2.2	-G1.N	Conexión de neutro a Fuente +-24V
	-S2.1	-X2.3.1	3	-X2.3.2	-G1.L	Conexión de fase a Fuente +-24V
<b>-S1</b>	-X1.1.2	-S1.1	-	-S1.2	-Q1.3	Conexión de fase a Interruptor ON/OFF
<b>-G1</b>	-X3.-24V	-G1.-24V	-	-	-	Conexión de -24V a placa de control
	-X3.GND	-G1.GND	-	-	-	Conexión de GND a placa de control
	-X3.+24V	-G1.+24V	-	-	-	Conexión de +24V a placa de control
	-X2.3.2	-G1.L	-	-	-	Conexión de fase a Fuente +-24V
	-X2.2.2	-G1.N	-	-	-	Conexión de neutro a Fuente +-24V
<b>-X3</b>	-G1.-24V	-X3.-24V	-24V	-	-	Conexión de -24V a placa de control
	+A3.PNP	-X3.-24V	-24V	-	-	Conexión colector de transistores PNP
	-G1.GND	-X3.GND	GND	-	-	Conexión de GND a placa de control
	+A3.NPN	-X3.+24V	+24V	-	-	Conexión colector de transistores NPN
	-G1.+24V	-X3.+24V	+24V	-	-	Conexión de +24V a placa de control
<b>-X4</b>	-X6.1.1	-X4.SENSOR	SENSOR	-	-	Señal sensor acondicionado a EM235
	-X6.2.1	-X4.GND	GND	-	-	Conexión GND a grupo borneras -X6
	-X9.2	-X4.POTENCIA	POTENCIA	-	-	Conexión hacia resistencias
	+A3.VI	-X4.MOTOR+	MOTOR+	-	-	Conexión hacia emisor de transistores
	-X6.14.1	-X4.MOTOR+	MOTOR+	-	-	Señal de control para motor DC
	-X6.15.1	-X4.MOTOR-	MOTOR-	-	-	Señal de control para motor DC
<b>-X5</b>	-X2.8.2	-G3.L	L	-	-	Conexión de fase a fuente 5VDC
	-X2.6.2	-G3.N	N	-	-	Conexión de neutro a fuente 5VDC
	-X1.4.2	-G3.GND	GND	-	-	Conexión de tierra
<b>+A3</b>	-X3.+24V	+A3.NPN	-	-	-	Conexión colector de transistores NPN
	-X3.-24V	+A3.PNP	-	-	-	Conexión colector de transistores PNP
	-X9.1	+A3.GN	-	-	-	Conexión entre resistencias y transistores
	-X4.MOTOR+	+A3.VI	-	-	-	Conexión hacia emisor de transistores
<b>-S2</b>	-X2.3.1	-S2.1	-	-S2.2	-X2.1.1	Conexión de Paro de emergencia
<b>-X7</b>	-X6.4.2	-X7.GND	GND	-	-	Conexión de GND a placa del encoder
	-X6.9.2	-X7.24V	24V	-	-	Conexión de 24V a placa del encoder
	-X6.12.2	-X7.CHA	CHA	-	-	Señal de canal A
	-X6.8.2	-X7.VCC	VCC	-	-	Conexión de 5V a placa del encoder
	-X6.13.2	-X7.CHB	CHB	-	-	Señal de canal B
<b>-X8</b>	-P2.1	-X8.1	1	-	-	Conexión de GND a encoder
	-P2.2	-X8.2	2	-	-	Conexión de 24V a encoder
	-P2.3	-X8.3	3	-	-	Señal de canal A del encoder
	-P2.4	-X8.4	4	-	-	Conexión de 5V a encoder
	-P2.5	-X8.5	5	-	-	Señal de canal B del encoder
<b>-X9</b>	+A3.GN	-X9.1	1	-	-	Conexión entre resistencias y transistores
	-X4.POTENCIA	-X9.2	2	-	-	Conexión hacia resistencias

ELEMENTO	CONEXIÓN DESDE	PUNTO CONEXIÓN	BORNERA	PUNTO CONEXIÓN	CONEXIÓN HACIA	DESCRIPCIÓN
<b>-X6</b>	-X4.SENSOR	-X6.1.1	1	-X6.1.2	-W2.1	Señal de sensor hacia EM235
	-X4.GND	-X6.2.1	2	-X6.2.2	-W2.2	Señal de GND hacia A- de EM235
	-	-X6.3.1	3	-X6.3.2	-W2.3	Señal de GND hacia M de EM235
	-	-X6.4.1	4	-X6.4.2	-X7.GND	Señal de GND hacia placa del encoder
	-	-X6.5.1	5	-X6.5.2	-W3.BU	Señal de GND hacia potenciómetro
	-X5.POT	-X6.6.1	6	-X6.6.2	-W3.WH	Señal analógica del potenciómetro
	-X5.5V	-X6.7.1	7	-X6.7.2	-W3.GN	Señal de 5V hacia potenciómetro
	-	-X6.8.1	8	-X6.8.2	-X7.VCC	Señal de 5V hacia placa del encoder
	-W2.4	-X6.9.1	9	-X6.9.2	-X7.24V	Señal de 24V hacia placa del encoder
	-	-X6.10.1	10	-X6.10.2	-W6.2	Señal de 24V a fin de carrera FDCD
	-	-X6.11.1	11	-X6.11.2	-W6.4	Señal de 24V a fin de carrera FDCI
	-W2.5	-X6.12.1	12	-X6.12.2	-X7.CHA	Señal canal A de la placa del encoder
	-W2.6	-X6.13.1	13	-X6.13.2	-X7.CHB	Señal canal B de la placa del encoder
	-X4.MOTOR+	-X6.14.1	14	-X6.14.2	-W4.RD	Señal de control del motor DC
	-X4.MOTOR-	-X6.15.1	15	-X6.15.2	.W4.BK	Señal de control del motor DC
	-W6.1	-X6.16.1	16	-X6.16.2	-W2.7	Señal de FDCD hacia PLC
	-W6.3	-X6.17.1	17	-X6.17.2	-W2.8	Señal de FDCI hacia PLC
	-X5.CONTROL	-X6.18.1	18	-X6.18.2	.W2.9	Salida analógica del módulo EM235

**MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER**

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-05-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-05-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	10-06-14	J.Sirgo	J.S.	
ESCALA N/A	DIAGRAMA DE CONEXIONES AMPLIADO DE TABLERO ELÉCTRICO			PLANO N°:TFM-ELEC-012-A Sustituye a Sustituido por

ELEMENTO	CONEXIÓN DESDE	PUNTO CONEXIÓN	BORNERA	PUNTO CONEXIÓN	CONEXIÓN HACIA	DESCRIPCIÓN
<b>BLOQUE MOTOR DC</b>						
<b>-S3.FDCD</b>	-W6.1	-S3.13	-	-S3.14	-W6.2	Conexión fin de carrera derecho FDCD
<b>-S4.FDCI</b>	-W6.3	-S4.13	-	-S4.14	-W6.4	Conexión fin de carrera izquierdo FDCI
<b>-M1</b>	-W4.RD	-M1.RD	-	-M1.BK	-W4.BK	Conexión motor DC
<b>-P1</b>	-W3.BU	1	-			Conexión de GND a potenciómetro
	-W3.WH	2	-			Señal de potenciómetro
	-W3.GN	3	-			Conexión de 5V a potenciómetro
<b>-P2</b>	-X8.1	-P2.1	1	-	-	Conexión de GND a encoder
	-X8.2	-P2.2	2	-	-	Señal de canal 0
	-X8.3	-P2.3	3	-	-	Señal de canal A
	-X8.4	-P2.4	4	-	-	Conexión de 5V a encoder
	-X8.5	-P2.5	5	-	-	Señal de canal B
<b>BLOQUE PLC</b>						
<b>-PLC</b>	-Q2.4	-PLC.L1	L1	-	-	Conexión de fase a PLC
	-W7.BN	-PLC.N	N	-	-	Conexión de neutro a PLC
	-W7.GN	-PLC.TIERRA	TIERRA	-	-	Conexión de tierra a PLC
	-PLC.M	-PLC.1M	1M	-	-	Conexión de masa a entradas del PLC
	-W2.5	-PLC.I0.0	I0.0	-	-	Señal de canal A del encoder
	-W2.6	-PLC.I0.1	I0.1	-	-	Señal de canal B del encoder
	-W2.7	-PLC.I0.2	I0.2	-	-	Señal de fin de carrera FDCD
	-W2.8	-PLC.I0.3	I0.3	-	-	Señal de fin de carrera FDCI
	-PLC.1M	-PLC.M	M	-PLC.M	-EM235.M	Conexión de masa a EM235
	-W2.4	-PLC.L+	L+	-PLC.L+	-EM235.L+	Conexión de 24V a EM235 y a tablero
<b>-EM235</b>	-PLC.M	-EM235.M	M	-EM235.M	-W2.3	Conexión de masa a EM235 y a tablero
	-PLC.L+	-EM235.L+	L+	-	-	Conexión de 24V a EM235
	-W2.9	-EM235.V0	V0	-	-	Salida análoga para controlar motor DC
	-W2.1	-EM235.A+	A+	-	-	Entrada análoga del potenciómetro
	-W2.2	-EM235.A-	A-	-	-	Señal de GND del potenciómetro

DENOMINACIÓN CABLE	HILO	CONECTA DESDE	CONECTA A	DESCRIPCIÓN
<b>-W1</b>	-W1.BU	220 V	-X1.1.1	Alimentación 220V a tablero (FASE)
	-W1.BN	NEUTRO	-X1.2.1	Alimentación 220V A tablero (NEUTRO)
	-W1.GN	TIERRA	-X1.3.1	Señal de TIERRA a tablero
<b>-W2</b>	-W2.1	-X6.1.2	-EM235.A+	Señal análoga del potenciómetro
	-W2.2	-X6.2.2	-EM235.A-	Señal GND del potenciómetro
	-W2.3	-X6.3.2	-EM235.M	Conexión de GND entre EM235 y tablero
	-W2.4	-X6.9.1	-PLC.L+	Conexión de 24V entre PLC y tablero
	-W2.5	-X6.12.1	-PLC.I0.0	Señal de canal A de encoder
	-W2.6	-X6.13.1	-PLC.I0.1	Señal de canal B de encoder
	-W2.7	-X6.16.2	-PLC.I0.2	Señal de fin de carrera FDCD
	-W2.8	-X6.17.2	-PLC.I0.3	Señal de fin de carrera FDCI
	-W2.9	-X6.18.2	-EM235.V0	Salida análoga para control de motor DC
<b>-W3</b>	-W3.BU	Potenciómetro	-X6.5.2	Conexión GND a potenciómetro
	-W3.WH	Potenciómetro	-X6.6.2	Señal análoga del potenciómetro
	-W3.GN	Potenciómetro	-X6.7.2	Conexión 5V a potenciómetro
<b>-W4</b>	-W4.RD	-M1.RD	-X6.14.2	Señal de voltaje para motor DC
	-W4.BK	-M1.BK	-X6.15.2	Señal de voltaje para motor DC
<b>-W5</b>	-W5.1	-P2.1	-X8.1	Conexión GND a encoder
	-W5.2	-P2.2	-X8.2	Señal canal 0
	-W5.3	-P2.3	-X8.3	Señal canal A
	-W5.4	-P2.4	-X8.9	Conexión 5V a encoder
	-W5.5	-P2.5	-X8.10	Señal canal B
<b>-W6</b>	-W6.1	-S3.FDCD.13	-X6.16.1	Conexión FDCD hacia entrada de PLC
	-W6.2	-S3.FDCD.14	-X6.10.2	Conexión FDCD a 24V
	-W6.3	-S4.FDCI.13	-X6.17.1	Conexión FDCI hacia entrada de PLC
	-W6.4	-S4.FDCI.14	-X6.11.2	Conexión FDCI a 24V
<b>-W7</b>	-W1.BU	220 V	-PLC.L1	Alimentación 220V a PLC (FASE)
	-W1.BN	NEUTRO	-PLC.N	Alimentación 220V A PLC (NEUTRO)
	-W1.GN	TIERRA	-PLC.TIERRA	Señal de TIERRA a PLC

**MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER**

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-05-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-05-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	10-06-14	J.Sirgo	J.S.	
ESCALA N/A	DIAGRAMA DE CONEXIONES AMPLIADO Y DE CABLEADO			PLANO N°:TFM-ELEC-012-B Sustituye a Sustituido por

## LISTADO DE COMPONENTES

ELEMENTO	NOMBRE	FABRICANTE	CÓDIGO	SUMINISTRADOR	CÓDIGO	# UNIDADES	DESCRIPCIÓN
-X1, -X2, -X6	WDU 2.5, standard terminal, 24 A	WEIDMULLER	1020000000	RS COMPONENTS	425-190A	24	Borneras
-Q1	Disyuntor de corriente, tipo B, 10A	SQUARE D	SQO110EB6	RS COMPONENTS	340-5149	1	Disyuntor
-Q2	Disyuntor de corriente, tipo C, 6A	MK	8706S	RS COMPONENTS	381-5782	1	Disyuntor
-S1	Interruptor de balancín	OMRON	A8WS-1162	RS COMPONENTS	707-3339	1	Interruptor ON-OFF
-S2	Paro de emergencia 40mm, 1NC	SCHNEIDER ELECTRIC	XB4BT842	RS COMPONENTS	795-1318	1	Paro de emergencia
-S3.FDCD, -S3.FDCI	Interruptor final de carrera, 15 A	HONEYWELL	BZ-2RW863-A2	RS COMPONENTS	691-7210	2	Finales de carrera
-P2	Codificador giratorio incremental	HEWLETT PACKARD	HEDS-5540-A11	RS COMPONENTS	171-2108	1	Encoder
-PLC	S7200, CPU-224, 24I/O	SIEMENS	6ES7 214 1BD23 0XB0	RS COMPONENTS	488-6814	1	PLC
-EM235	Módulo E/S, S7-200 series, -10 a 10 V	SIEMENS	6ES72350KD220XA0	RS COMPONENTS	434-1838	1	Módulo EM235

### MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	
Proyectado	01-05-14	E. Acurio	E.A.	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Dibujado	20-05-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	10-06-14	J.Sirgo	J.S.	
ESCALA N/A	LISTADO DE COMPONENTES			PLANO N°: TFM-ELEC-013 Sustituye a Sustituido por

# ANEXO II

## PLANOS MECÁNICOS

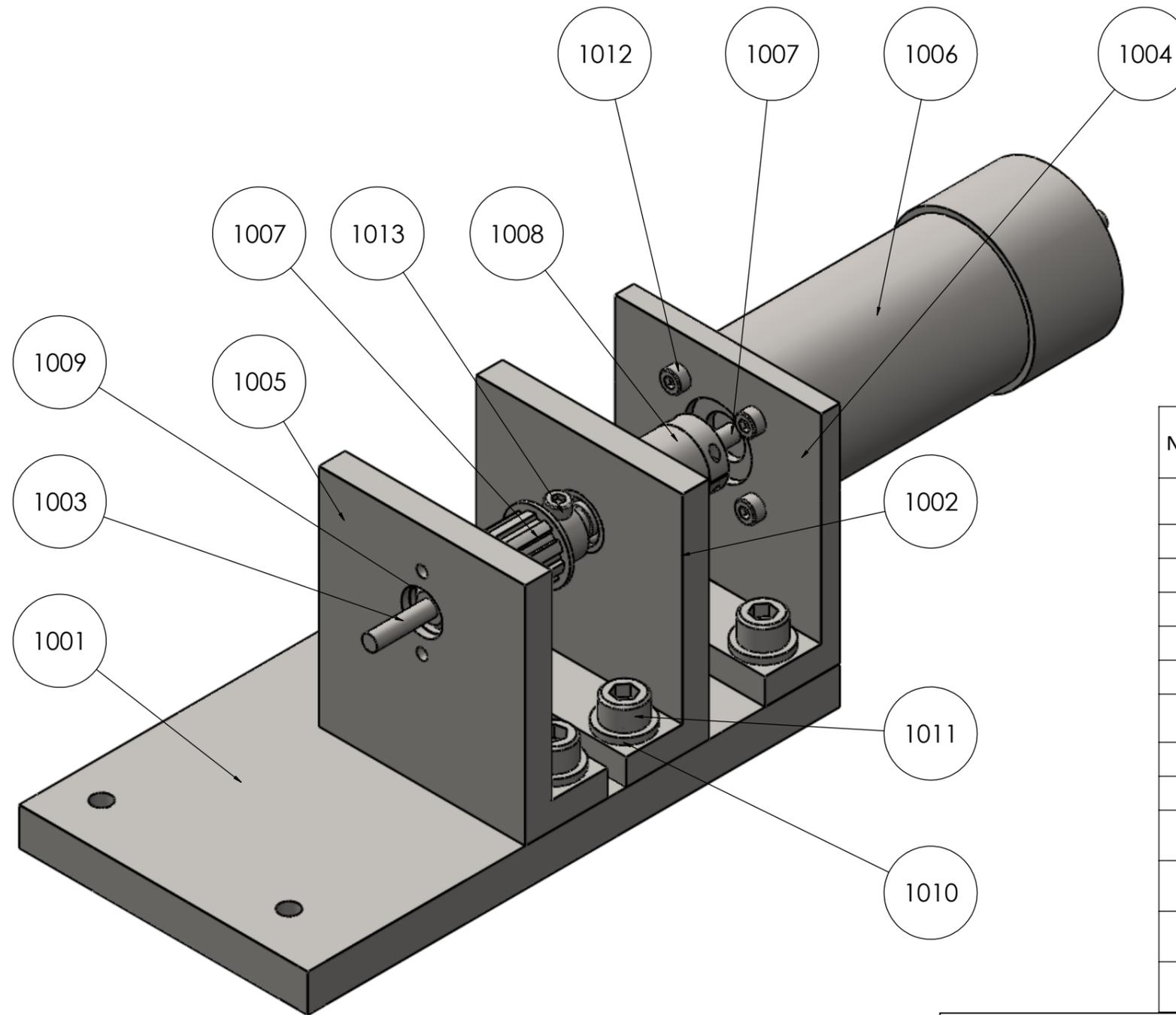
### *PROTOTIPO ACTUAL*

TFM-MEC-100	Conjunto servomotor-mecanismo
TFM-MEC-1001	Base de soporte del motor
TFM-MEC-1002	Soporte motor 2
TFM-MEC-1003	Árbol de rodamientos
TFM-MEC-1004	Soporte motor 1
TFM-MEC-1005	Soporte motor 3

### *NUEVO PROTOTIPO*

TFM-MEC-N-001	Ensamble nuevo completo
TFM-MEC-N-100	Conjunto motor-mecanismo
TFM-MEC-N-1001	Polea 1
TFM-MEC-N-1002	Eje 1
TFM-MEC-N-1003	Soporte FDC (Soporte de fin de carrera)
TFM-MEC-N-1004	Soporte de rodamiento
TFM-MEC-N-1005	Soporte de rodamiento 2
TFM-MEC-N-1006	Tapa posterior
TFM-MEC-N-1007	Tapa superior
TFM-MEC-N-1008	Soporte de acoplamiento
TFM-MEC-N-1009	Base lateral
TFM-MEC-N-200	Conjunto carro-guía
TFM-MEC-N-2001	Soporte de árbol
TFM-MEC-N-2002	Árbol de rodamientos
TFM-MEC-N-2003	Péndulo

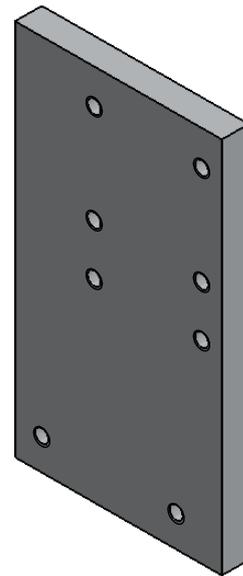
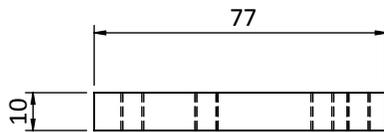
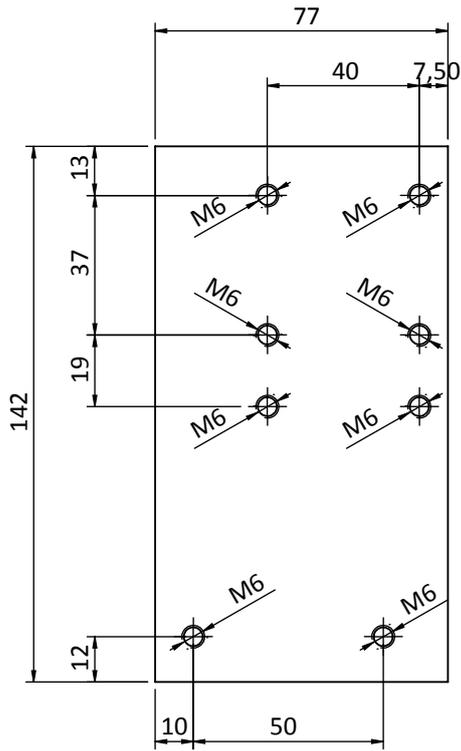
TFM-MEC-N-2004	Base
TFM-MEC-N-2005	Pieza de soporte del potenciómetro
TFM-MEC-N-2006	Pieza de apriete inferior
TFM-MEC-N-2007	Pieza de apriete superior
TFM-MEC-N-2008	Pieza para limitar ángulo
TFM-MEC-N-2009	Riel doble
TFM-MEC-N-2010	Perfil de tornillo
TFM-MEC-N-300	Conjunto de polea conducida
TFM-MEC-N-3001	Soporte 1
TFM-MEC-N-3002	Soporte FDC (Soporte de fin de carrera)
TFM-MEC-N-3003	Eje 2
TFM-MEC-N-3004	Polea mecanizada
TFM-MEC-N-3005	Pieza de ajuste
TFM-MEC-N-3006	Tapa posterior
TFM-MEC-N-3007	Tapa superior
TFM-MEC-N-3008	Base lateral



N.º DE PIEZA	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL	PLANO	CANTIDAD
1001	base_motor	Al	TFM-MEC-1001	1
1002	soporte_motor_2	Al	TFM-MEC-1002	1
1003	arbol_rodamientos	Al	TFM-MEC-1003	1
1004	soporte_motor_1	Al	TFM-MEC-1004	1
1005	soporte_motor_3	Al	TFM-MEC-1005	1
1006	motor	Comercial		1
1007	polea_dentada_motor	Comercial	-	1
1008	acoplamiento_flexible	Comercial		1
1009	rodamiento_pequeño	Comercial	-	2
1010	B18.22M - Plain washer, 6 mm, narrow	Comercial	-	6
1011	B18.3.1M - 6 x 1 x 16 Hex SHCS -- 16NHX	Comercial	-	6
1012	B18.3.1M - 3 x 0.5 x 10 Hex SHCS -- 10NHX	Comercial		4
1013	B18.3.1M - 3 x 0.5 x 6 Hex SHCS -- 6NHX	Comercial	-	1

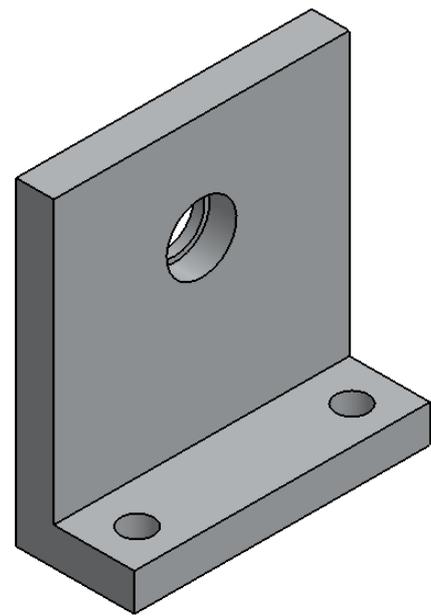
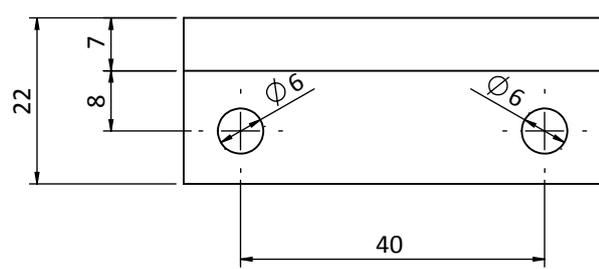
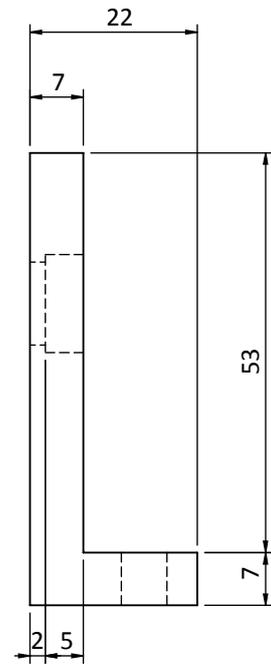
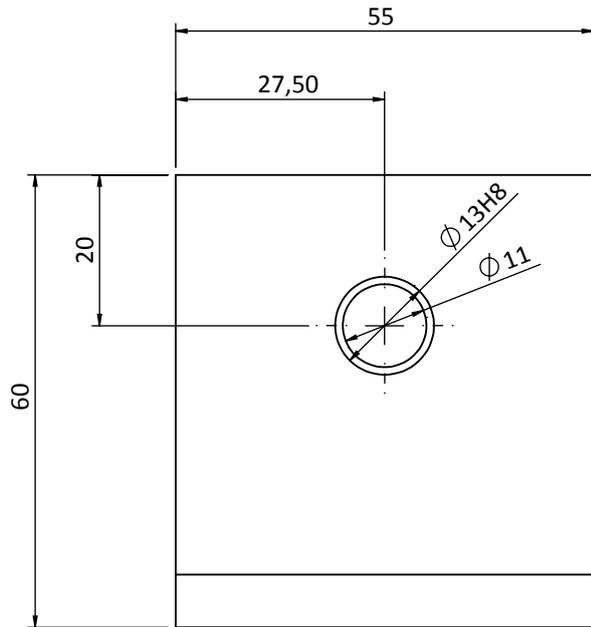
**MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER**

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-03-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	10-03-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	11-04-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA	conjunto servomotor-mecanismo			PLANO N°: TFM-MEC-100
1:1				Sustituye a
				Sustituido por



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

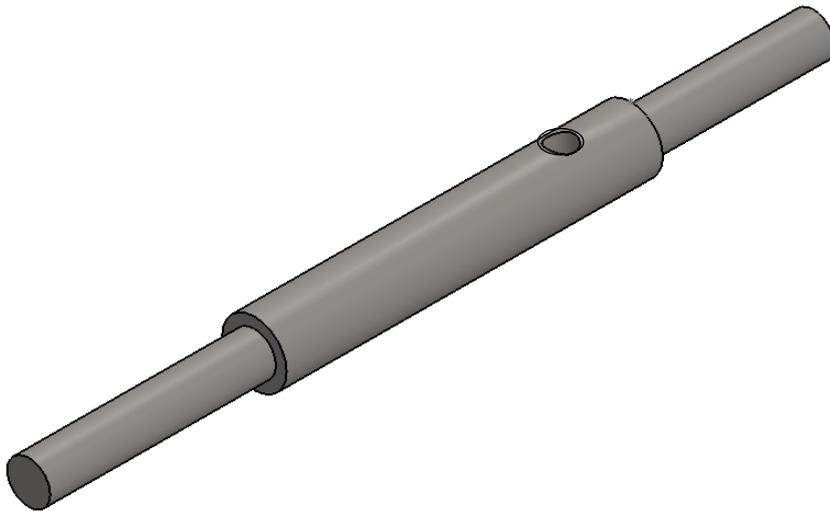
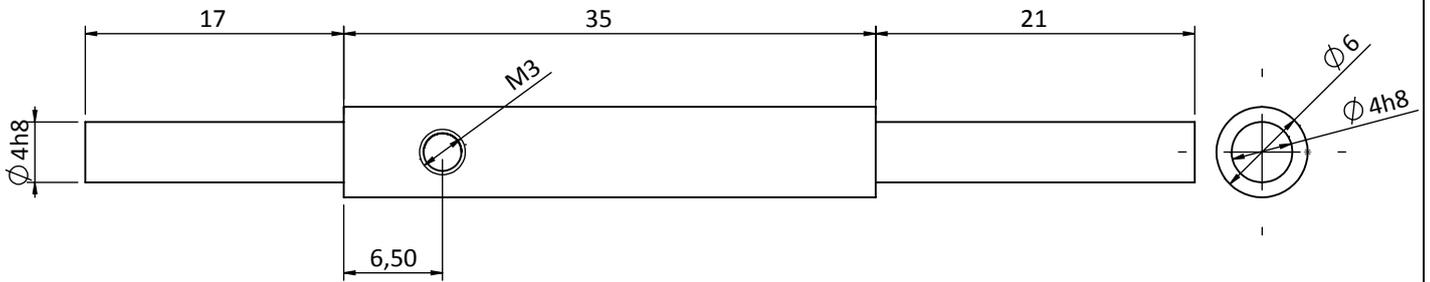
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-03-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	15-03-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	11-04-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA	base_motor			PLANO N°: TFM-MEC-1001
1:2				Sustituye a
				Sustituido por



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

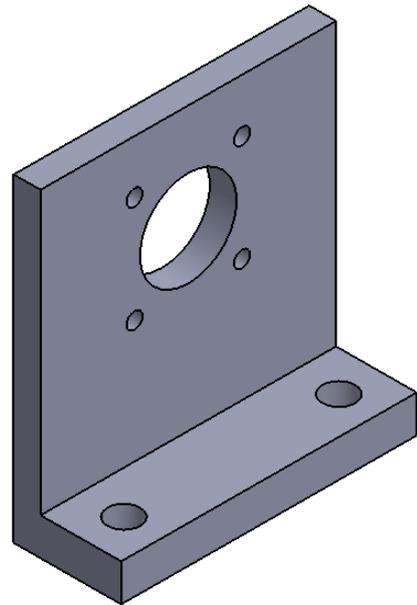
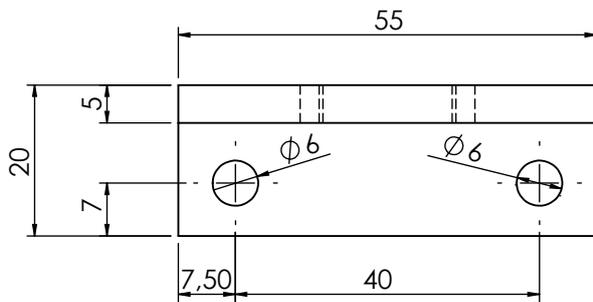
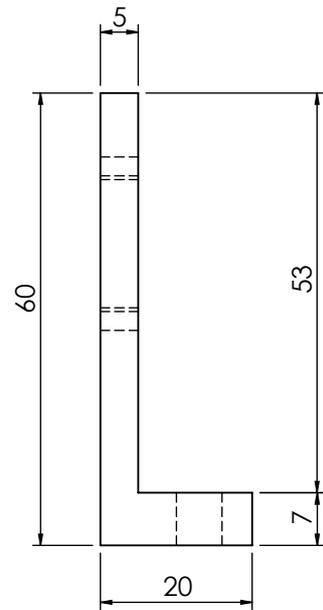
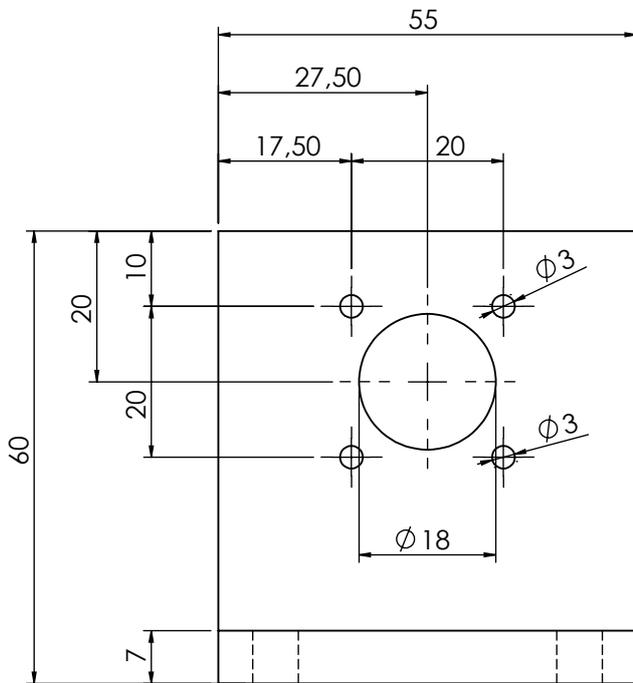
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-03-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	15-03-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	11-04-14	J. Sirgo	J.S.	

ESCALA 1:1	soporte_motor_2	PLANO N°: TFM-MEC-1002
		Sustituye a
		Sustituido por



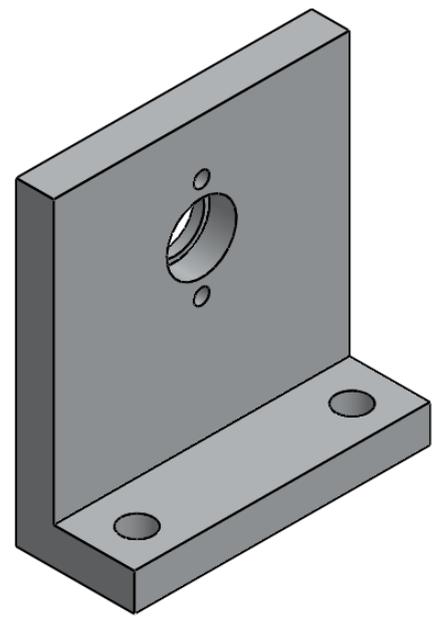
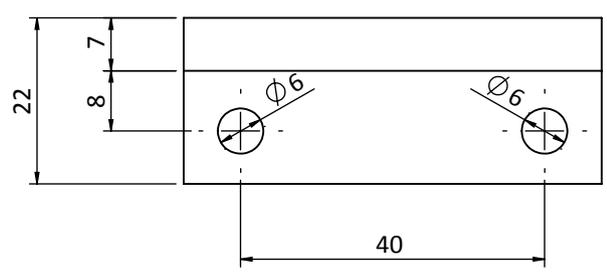
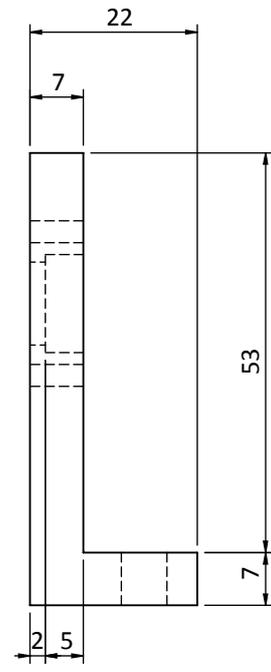
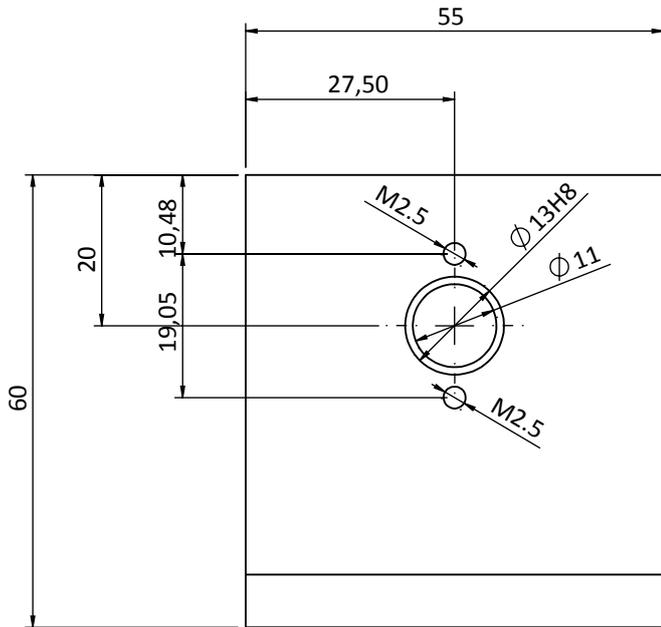
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-03-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	10-03-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	11-04-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA	arbol_rodamientos			PLANO N°: TFM-MEC-1003
2:1				Sustituye a
				Sustituido por



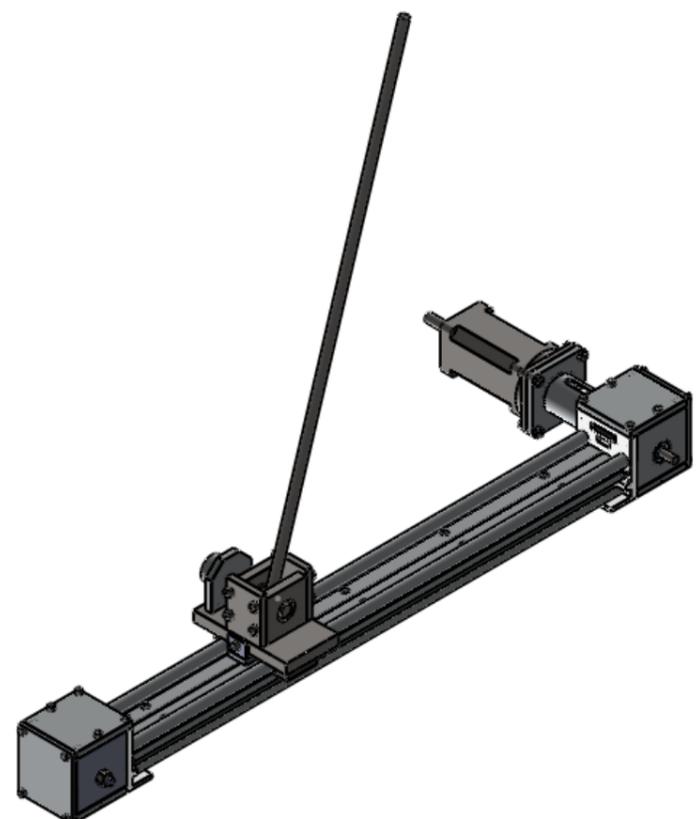
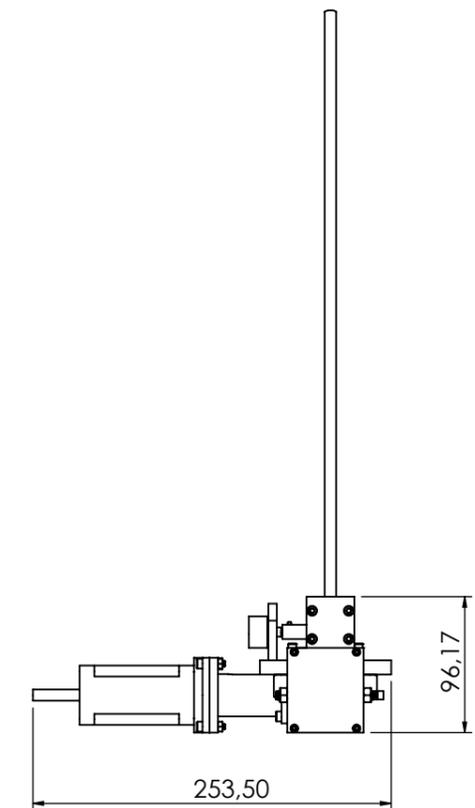
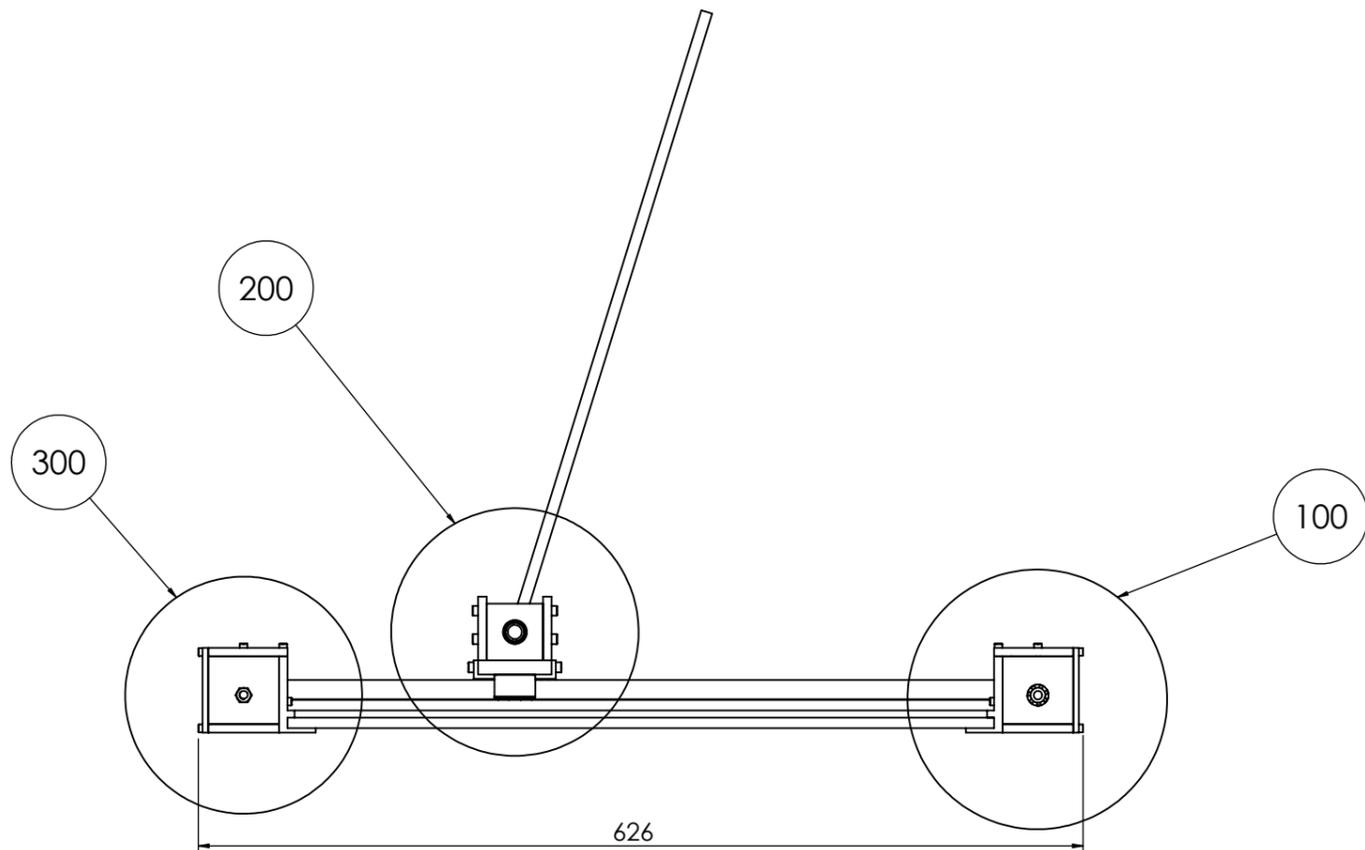
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-03-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	10-03-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	11-04-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA	soporte_motor_1			PLANO N°: TFM-MEC-1004
1:1				Sustituye a
				Sustituido por



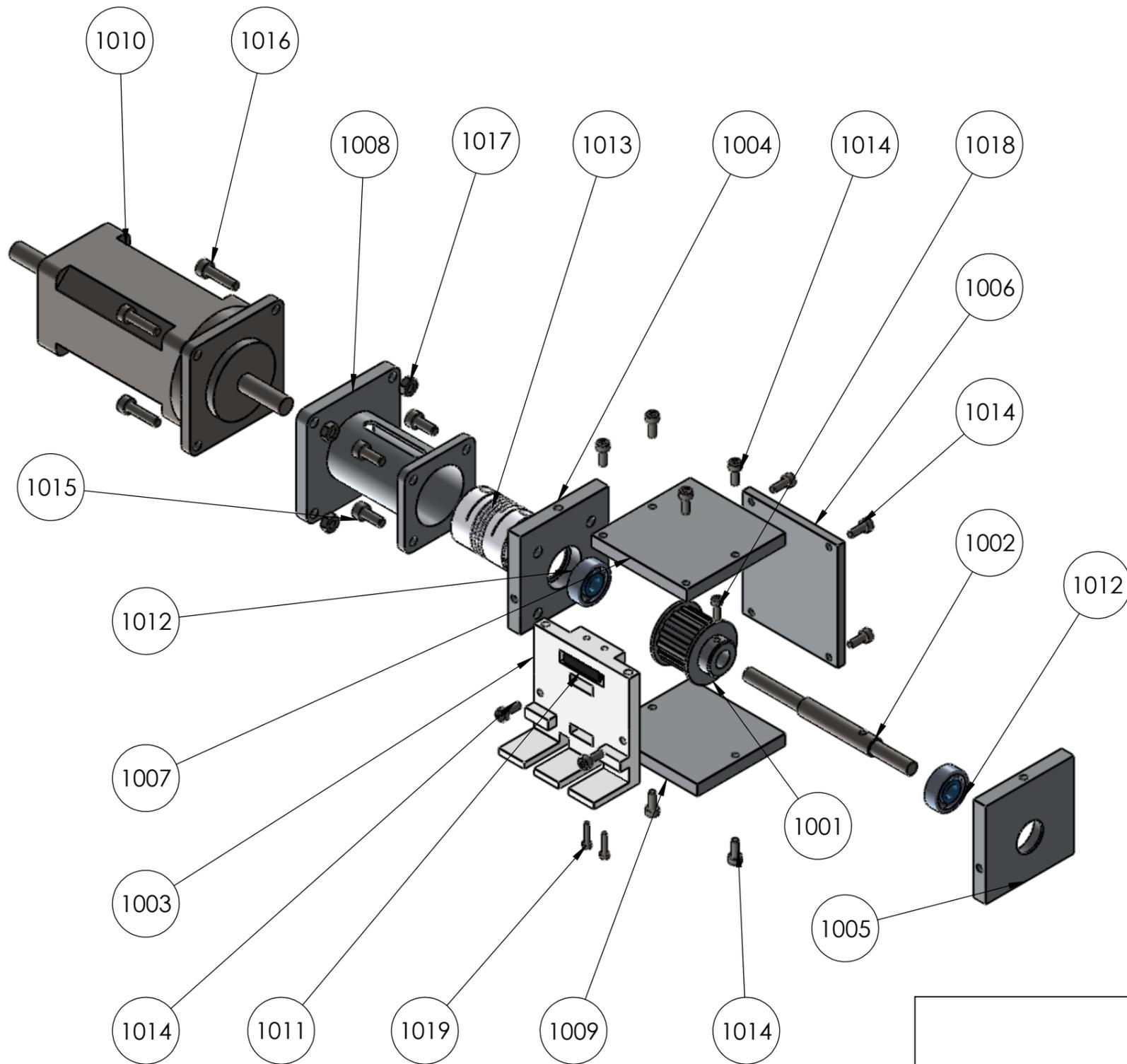
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-03-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	15-03-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	11-04-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA	soporte_motor_3			PLANO N°: TFM-MEC-1005
1:1				Sustituye a
				Sustituido por



N° DE CONJUNTO	NOMBRE	PLANO
100	Conjunto acoplamiento-motor	TFM-MEC-N-100
200	Conjunto carro-guía lineal	TFM-MEC-N-200
300	Conjunto polea conducida	TFM-MEC-N-300

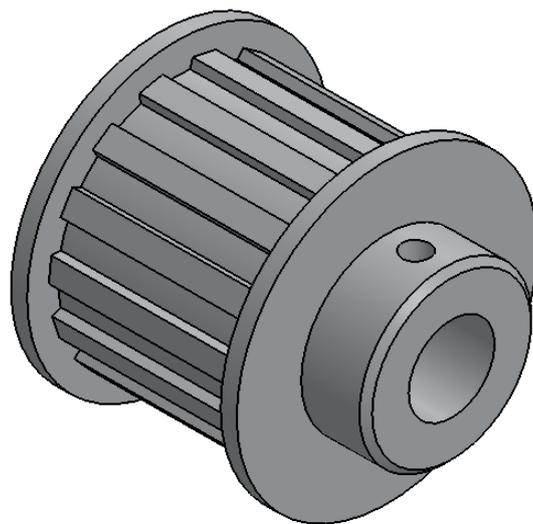
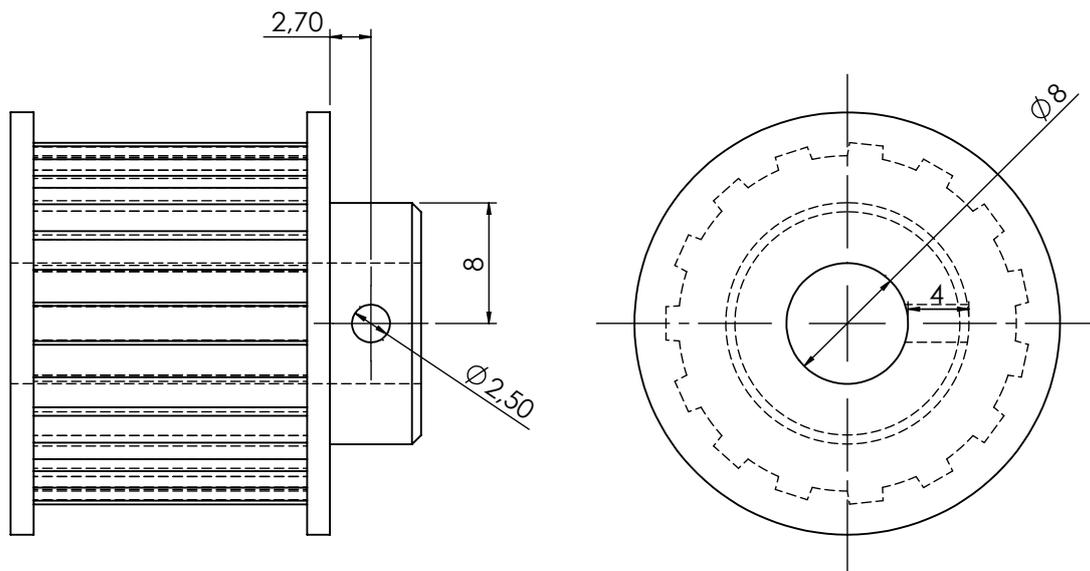
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA TRABAJO FIN DE MÁSTER				
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA	Ensamble_completo			PLANO N°: TFM-MEC-N-001
1:5				Sustituye a
				Sustituido por



N.º PIEZA	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL (Nº PLANO)	CANTIDAD
1001	polea1	Comercial (TFM-MEC-N-1001)	1
1002	eje1	Acero (TFM-MEC-N-1002)	1
1003	soporte_FDC	Polímero (TFM-MEC-N-1003)	1
1004	soporte_rodamiento	Al (TFM-MEC-N-1004)	1
1005	soporte_rodamiento2	Al (TFM-MEC-N-1005)	1
1006	tapa_posterior	Al (TFM-MEC-N-1006)	1
1007	tapa_superior	Al (TFM-MEC-N-1007)	1
1008	soporte_acoplamiento	Al (TFM-MEC-N-1008)	1
1009	base_lateral	Al (TFM-MEC-N-1009)	1
1010	ensamble_motor	Comercial	1
1011	fin_carrera	Comercial	1
1012	inafag_626_8h7nhevu4uflqs2xvbfv8t5d6	Comercial	2
1013	acoplamiento PSMR25-8-6-SS	Comercial	1
1014	B18.3.1M - 3 x 0.5 x 8 Hex SHCS -- 8NHX	Comercial	12
1015	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 10 Hex SHCS -- 10NHX	Comercial	4
1016	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 16 Hex SHCS -- 16NHX	Comercial	4
1017	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M4 x 0.7 --D-N	Comercial	4
1018	B18.3.1M - 2.5 x 0.45 x 8 Hex SHCS -- 8NHX	Comercial	1
1019	B18.3.1M - 2 x 0.4 x 10 Hex SHCS -- 10NHX	Comercial	2

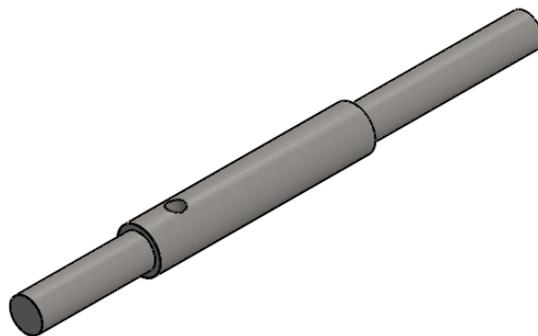
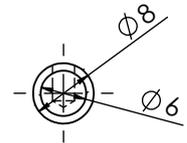
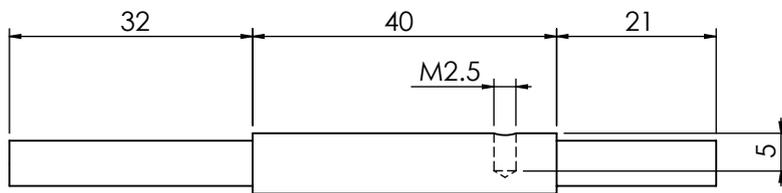
**MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER**

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:2	conjunto motor-mecanismo			PLANO N°: TFM-MEC-N-100
				Sustituye a
				Sustituido por



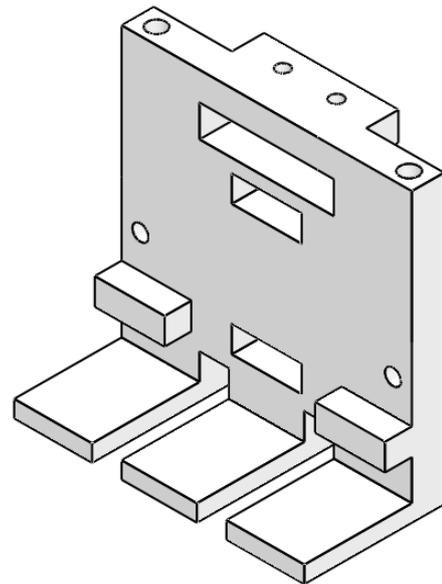
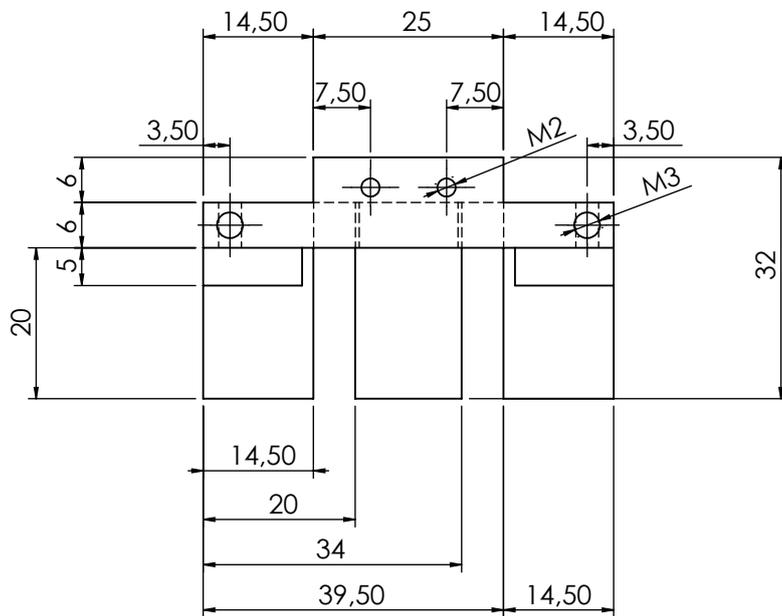
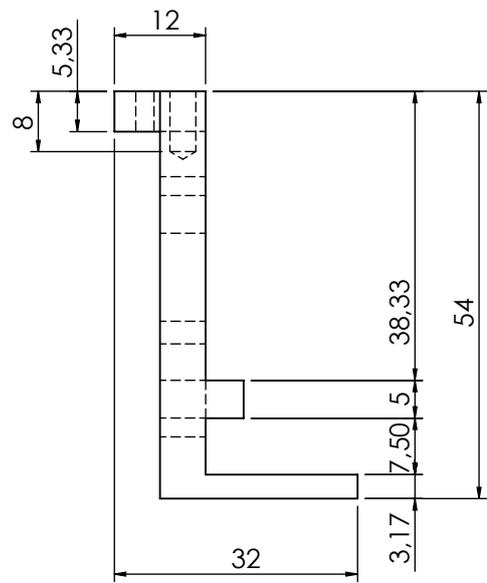
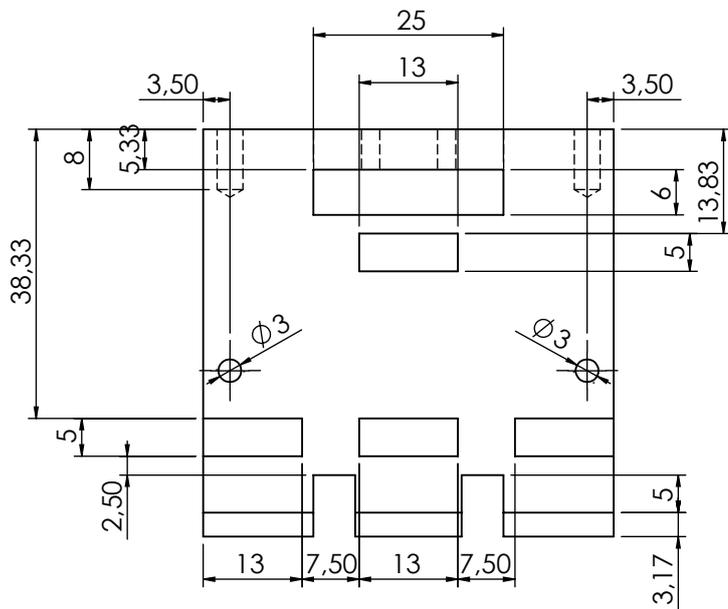
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA	polea1			PLANO N°: TFM-MEC-N-1001
2:1				Sustituye a
				Sustituido por



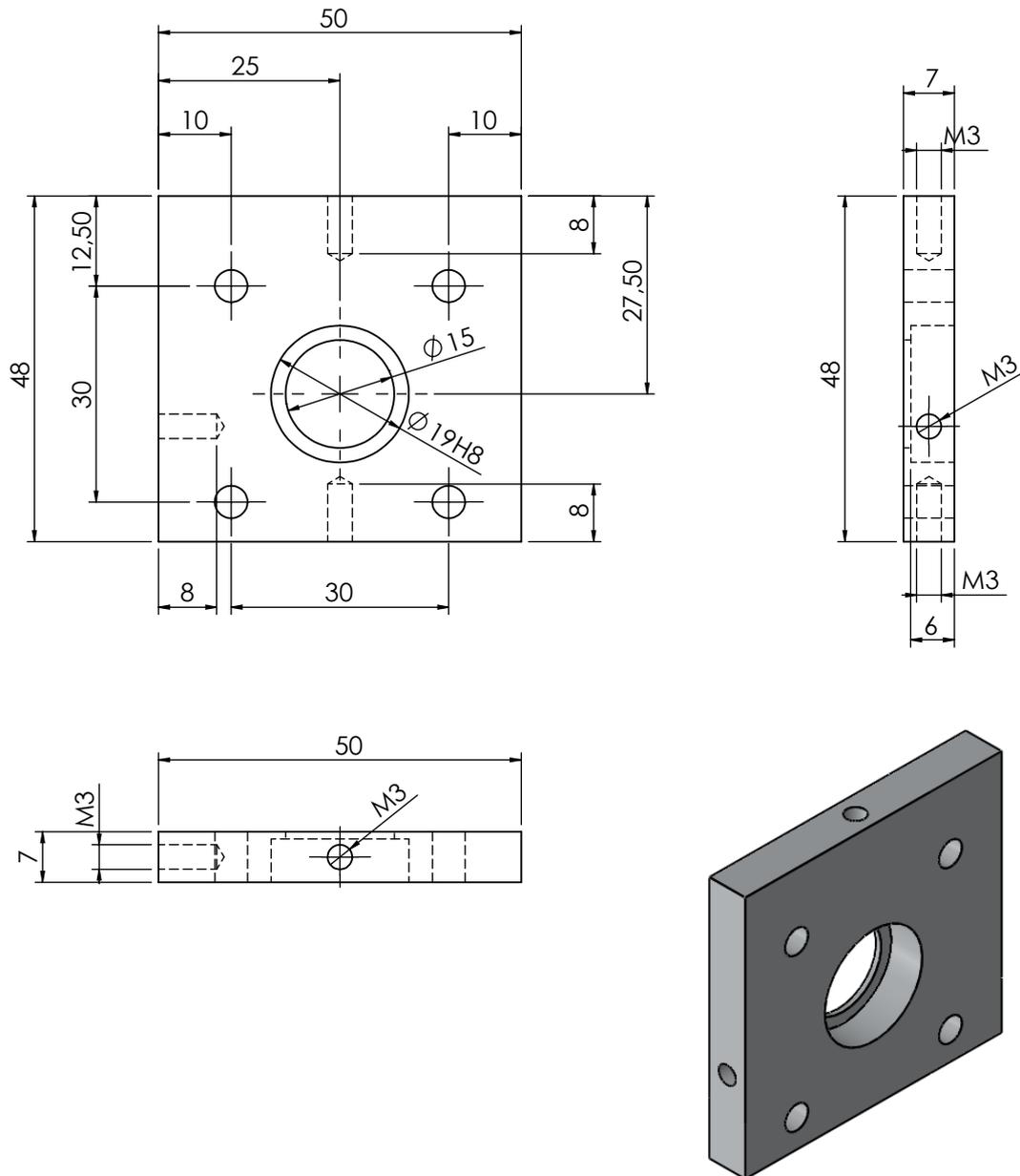
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	eje1			PLANO N°: TFM-MEC-N-1002
				Sustituye a
				Sustituido por



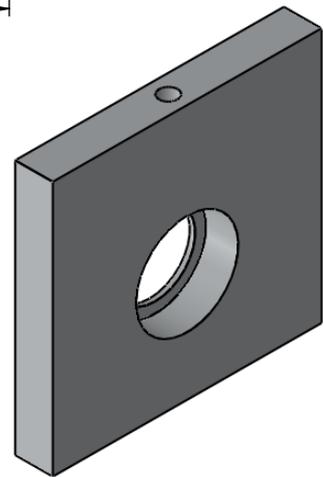
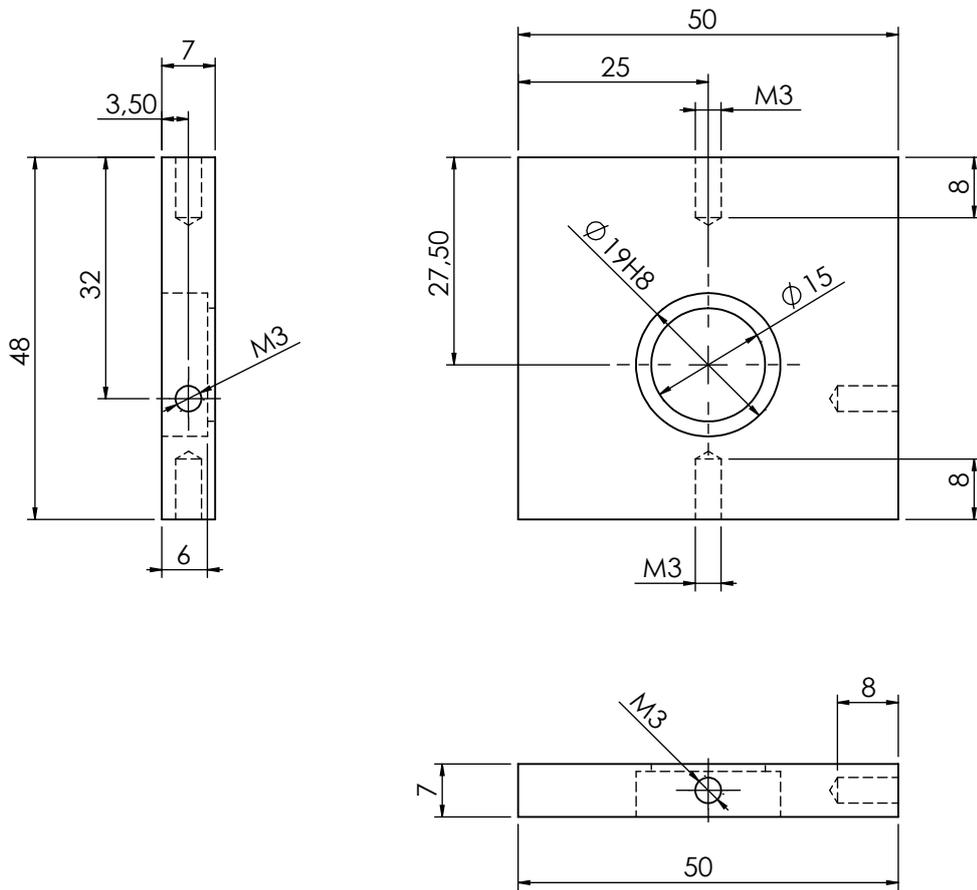
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	soporte_FDC			PLANO N°: TFM-MEC-N-1003
				Sustituye a
				Sustituido por



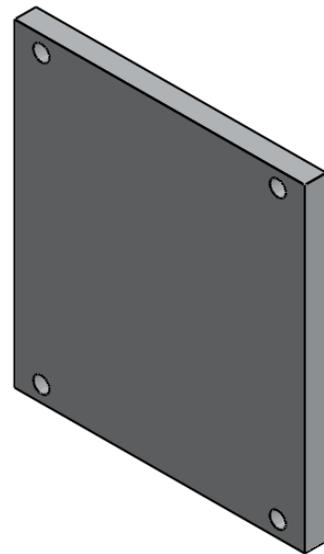
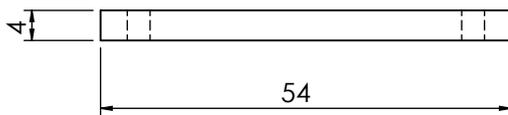
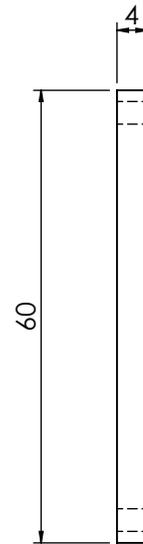
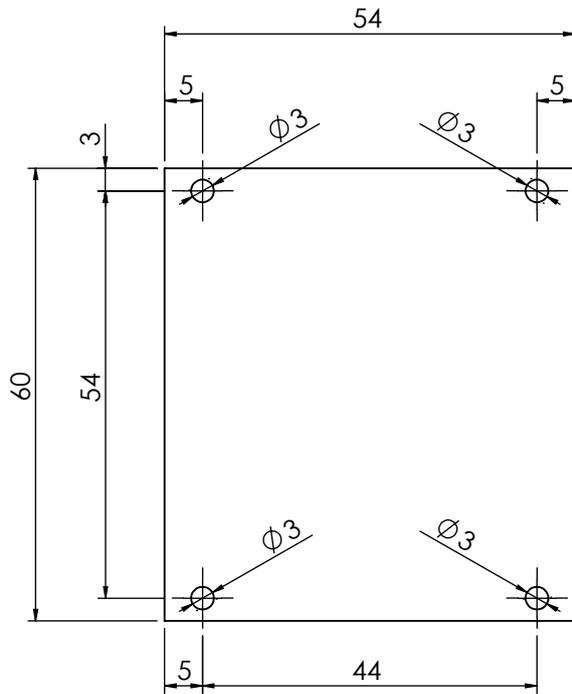
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	soporte_rodamiento			PLANO N°: TFM-MEC-N-1004
				Sustituye a
				Sustituido por



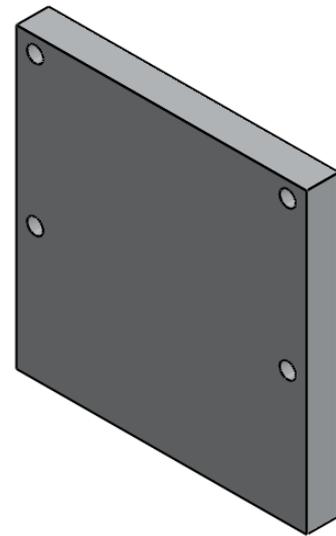
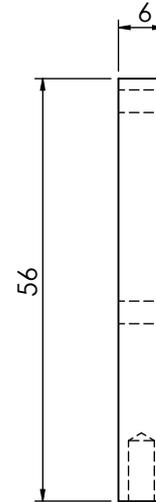
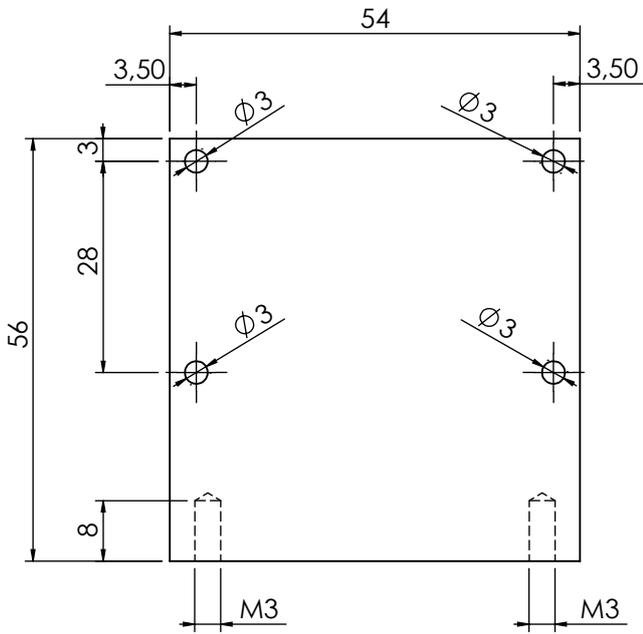
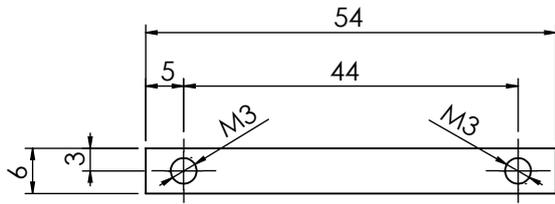
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	soporte_rodamiento2			PLANO N°: TFM-MEC-N-1005
				Sustituye a
				Sustituido por



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

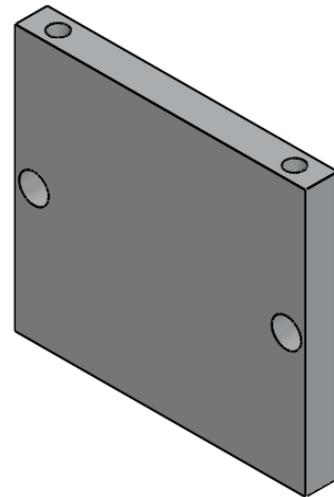
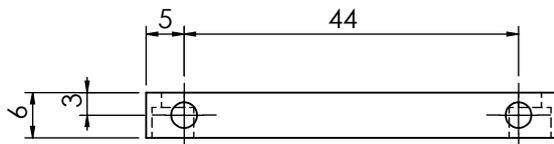
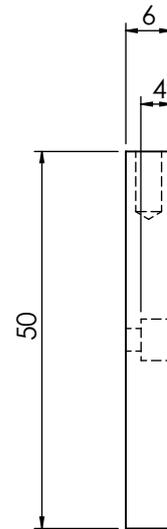
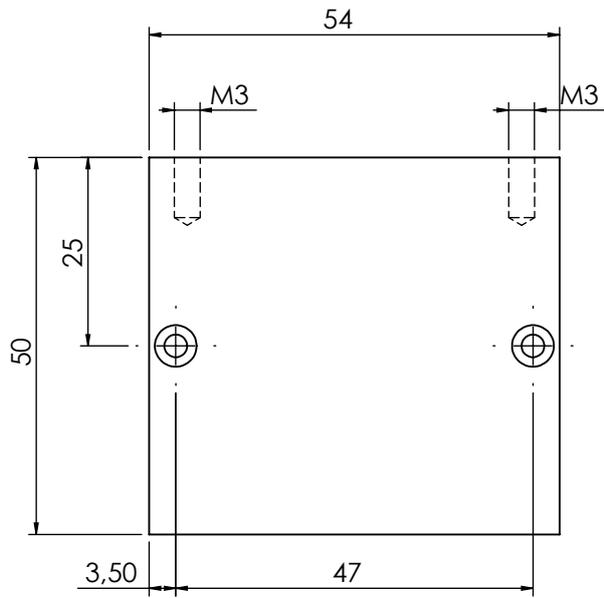
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	tapa_posterior			PLANO N°: TFM-MEC-N-1006
				Sustituye a
				Sustituido por



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

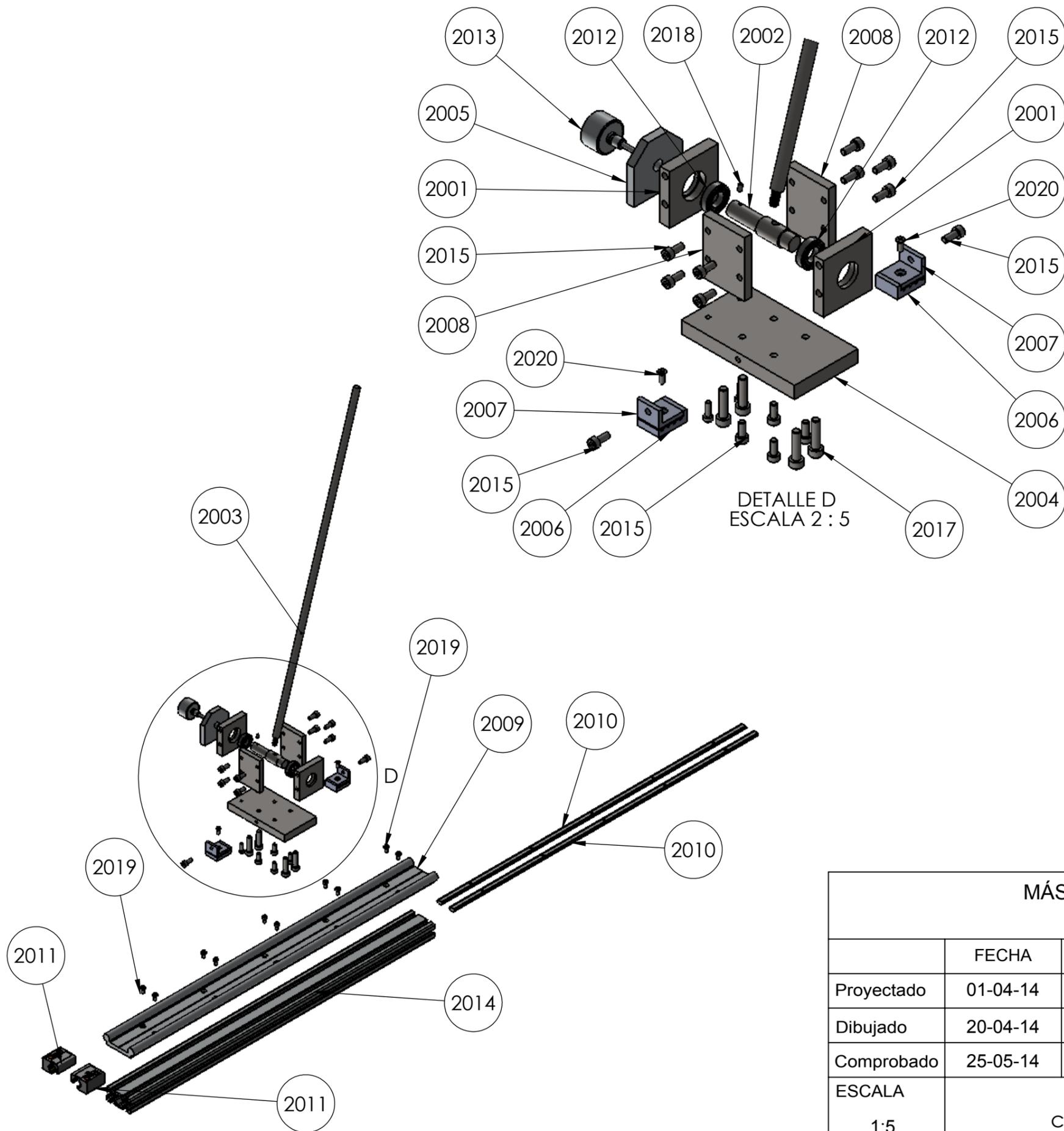
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	tapa_superior			PLANO N°: TFM-MEC-N-1007
				Sustituye a
				Sustituido por





MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

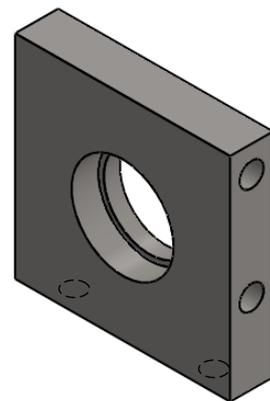
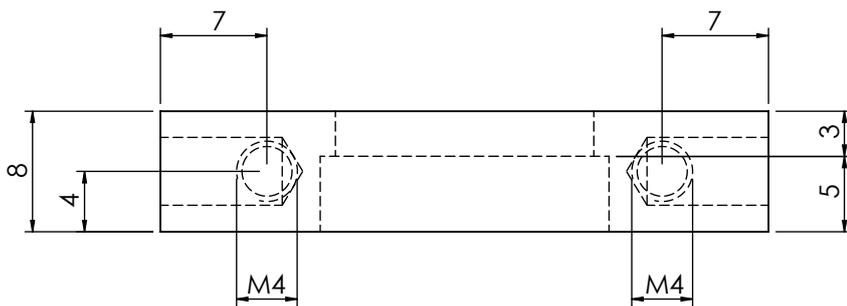
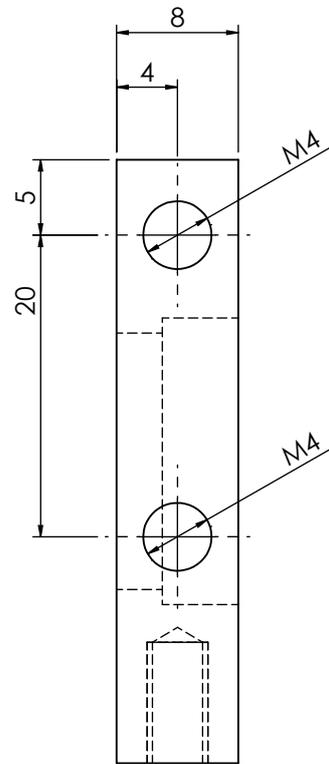
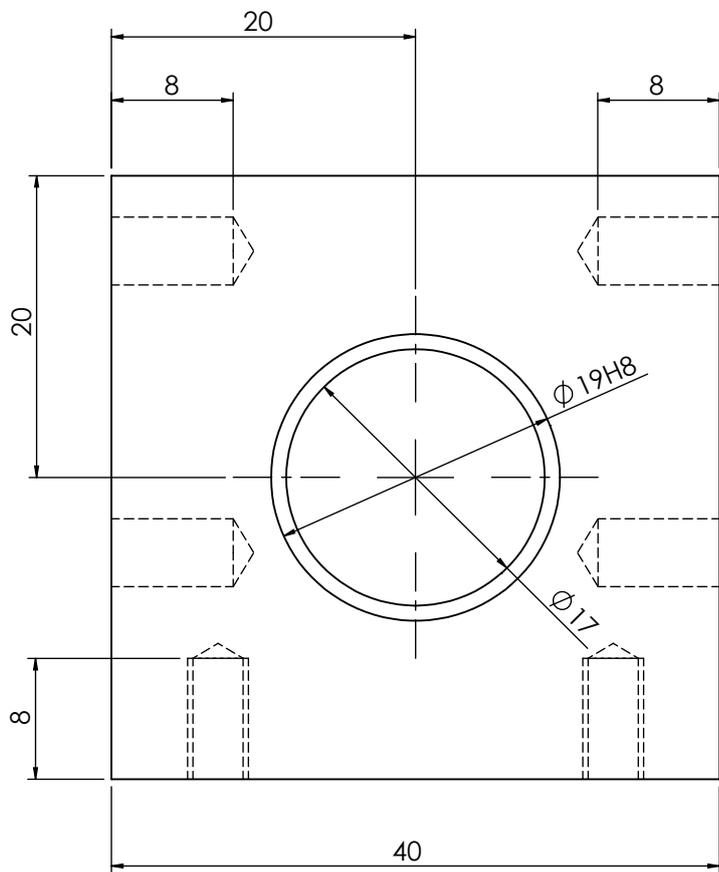
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	base_lateral			PLANO N°: TFM-MEC-N-1009
				Sustituye a
				Sustituido por



N.º DE PIEZA	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL (Nº PLANO)	CANTIDAD
2001	soporte_arbol	Acero (TFM-MEC-N-2001)	2
2002	arbol_rodamientos	Acero (TFM-MEC-N-2002)	1
2003	pendulo_1	Acero (TFM-MEC-N-2003)	1
2004	base	Acero (TFM-MEC-N-2004)	1
2005	pieza_potenciometro	Al (TFM-MEC-N-2005)	1
2006	pieza_apriete_inferior	Al (TFM-MEC-N-2006)	2
2007	pieza_apriete_superior	Al (TFM-MEC-N-2007)	2
2008	pieza_limite_angulo	Acero (TFM-MEC-N-2008)	2
2009	riel_doble_1	Comercial (TFM-MEC-N-2009)	1
2010	perfil_tornilo51	Comercial (TFM-MEC-N-2010)	2
2011	cojinete	Comercial	2
2012	inafag_61800_3km1sgasz6fugaxu60oyrchvt_01	Comercial	2
2013	potenciometro	Comercial	1
2014	Perfil_5_40x20_1	Comercial	1
2015	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 10 Hex SHCS -- 10NHX	Comercial	14
2016	B18.3.1M - 3 x 0.5 x 10 Hex SHCS -- 10NHX	Comercial	2
2017	B18.3.1M - 5 x 0.8 x 20 Hex SHCS -- 20NHX	Comercial	4
2018	B18.3.6M - M2.5 x 0.45 x 5 Hex Socket Oval Pt. SS --N	Comercial	1
2019	B18.3.1M - 3 x 0.5 x 6 Hex SHCS -- 6NHX	Comercial	10
2020	B18.6.7M - M3 x 0.5 x 8 Type I Cross Recessed FHMS --8N	Comercial	2

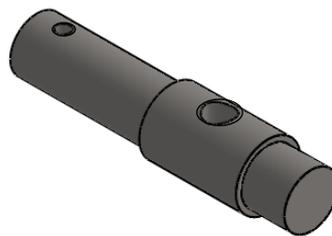
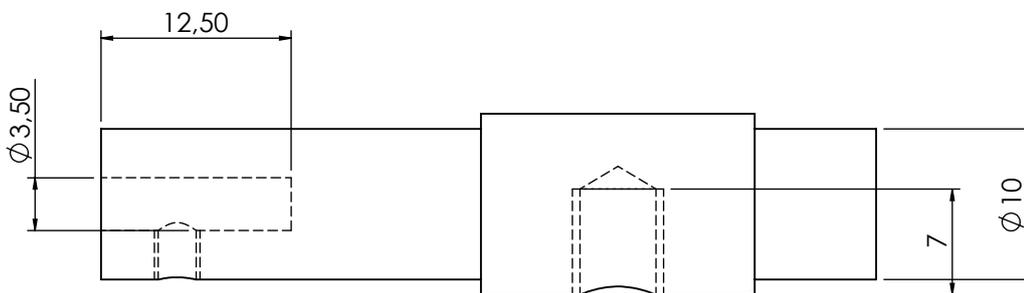
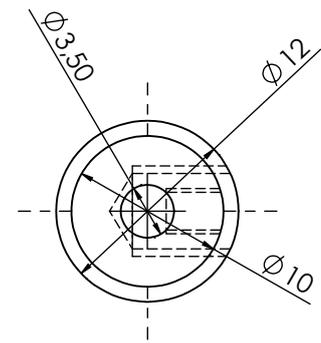
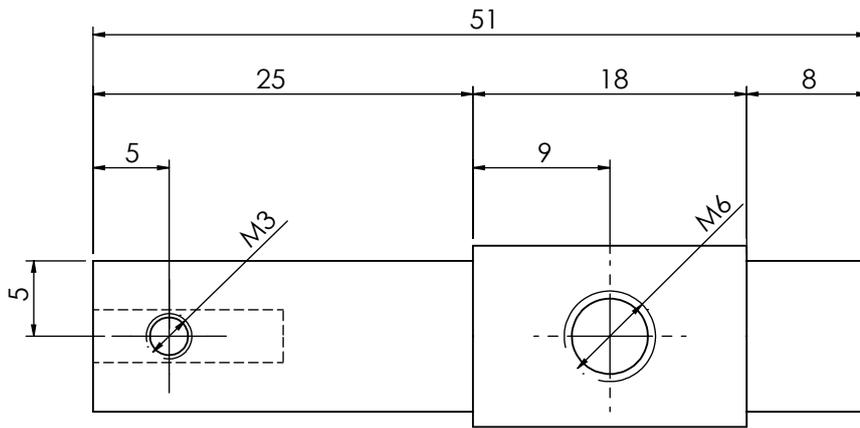
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA	conjunto carro-guia			PLANO N°: TFM-MEC-N-200
1:5				Sustituye a
				Sustituido por



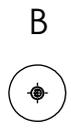
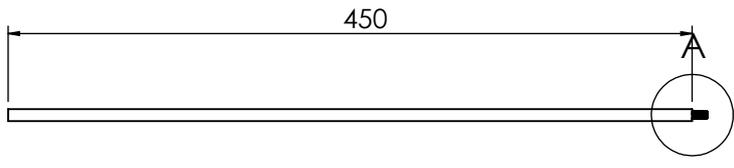
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	02-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	21-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 2:1	soporte_arbol			PLANO N°: TFM-MEC-N-2001
				Sustituye a
				Sustituido por

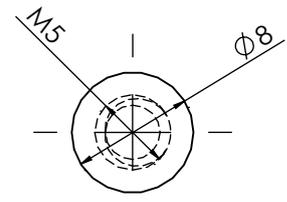


MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

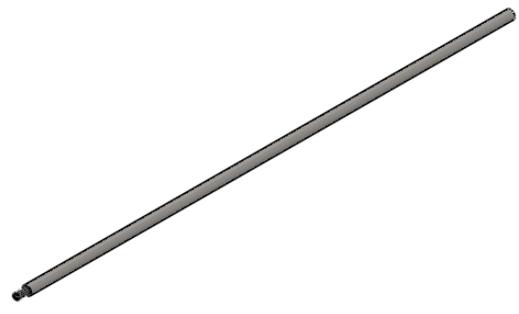
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	02-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	21-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 2:1	arbol_rodamientos			PLANO N°: TFM-MEC-N-2002
				Sustituye a
				Sustituido por



DETALLE A  
ESCALA 2 : 1

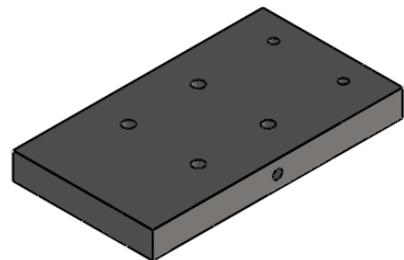
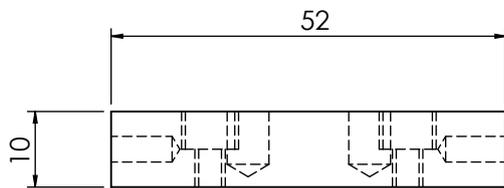
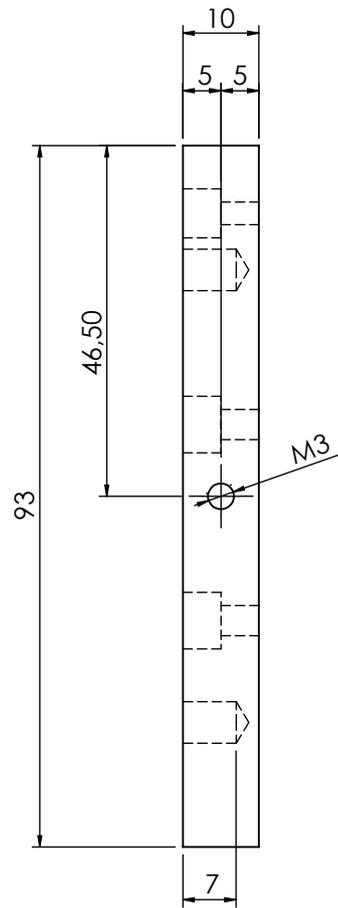
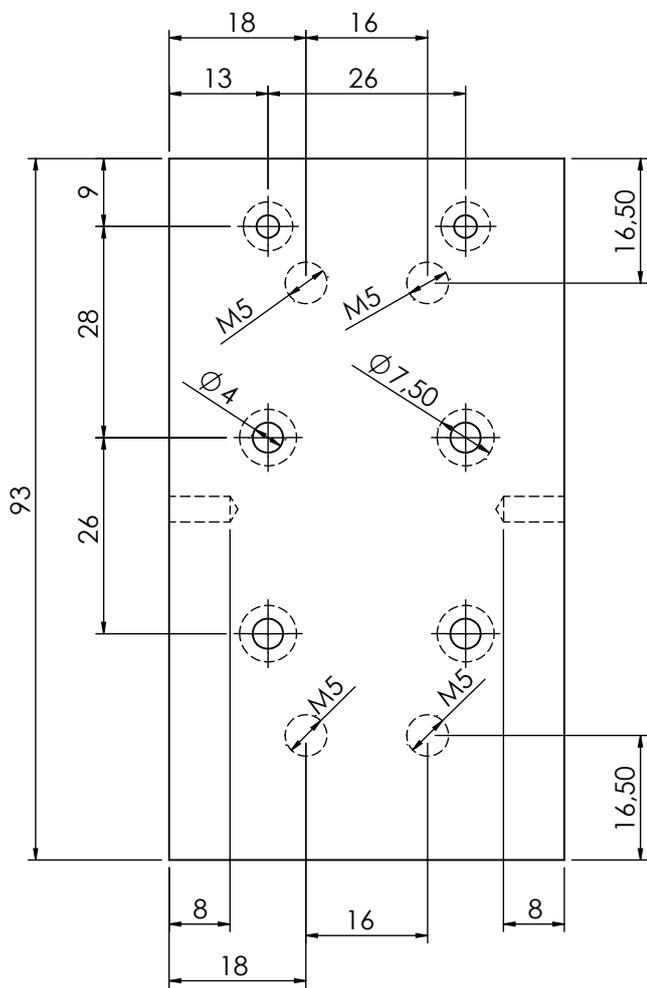


DETALLE B  
ESCALA 2 : 1



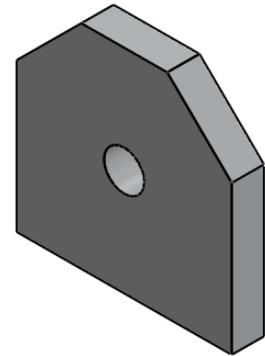
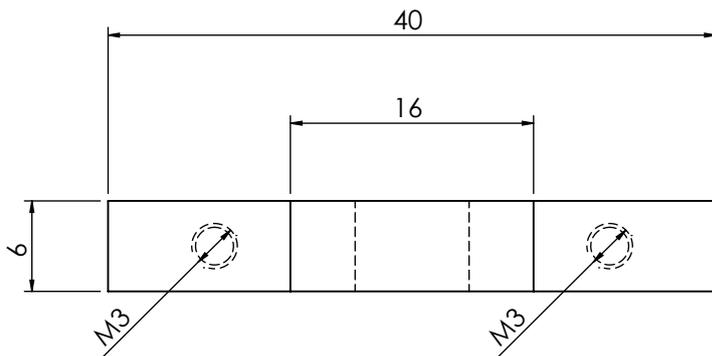
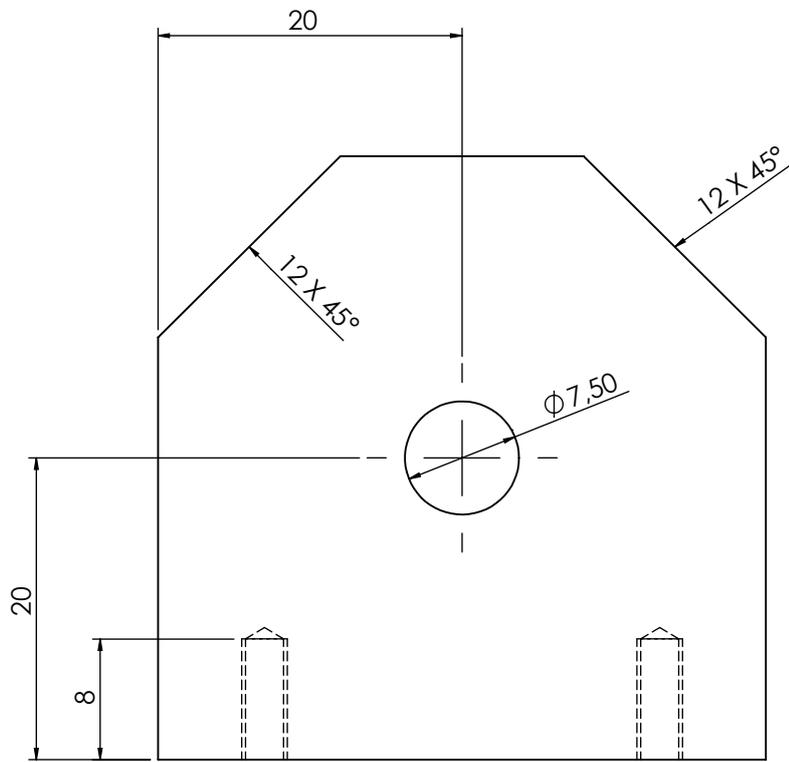
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	02-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	21-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:5	pendulo_1			PLANO N°: TFM-MEC-N-2003
				Sustituye a
				Sustituido por



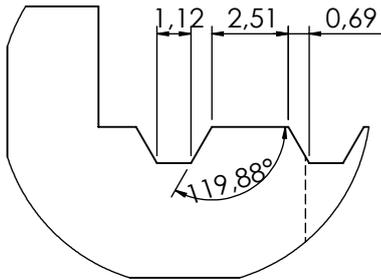
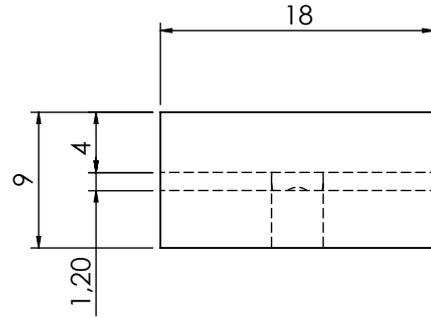
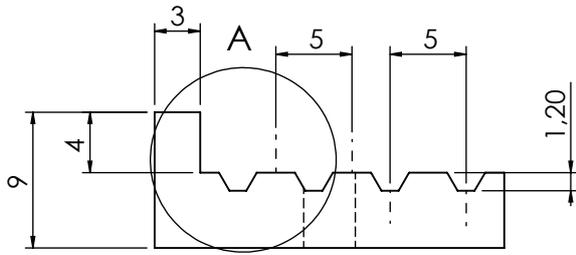
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	02-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	21-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA	base			PLANO N°: TFM-MEC-N-2004
1:1				Sustituye a
				Sustituido por

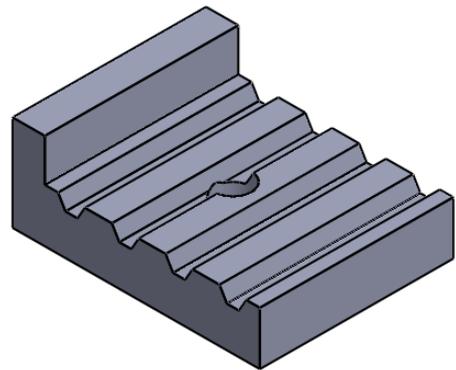
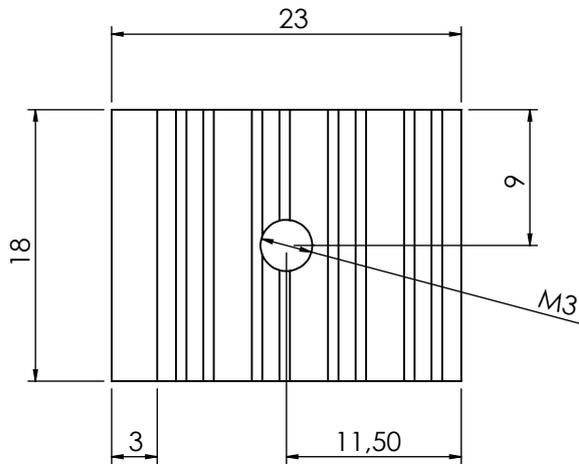


MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	02-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	21-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 2:1	pieza_potenciometro			PLANO N°: TFM-MEC-N-2005
				Sustituye a
				Sustituido por

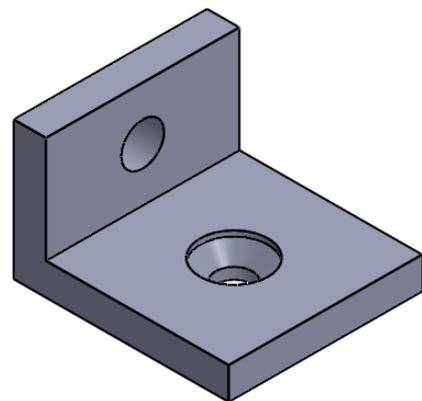
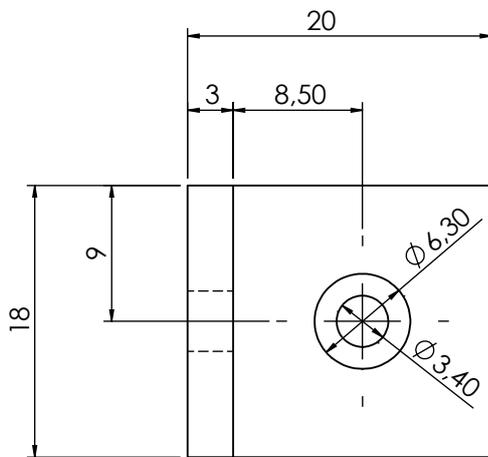
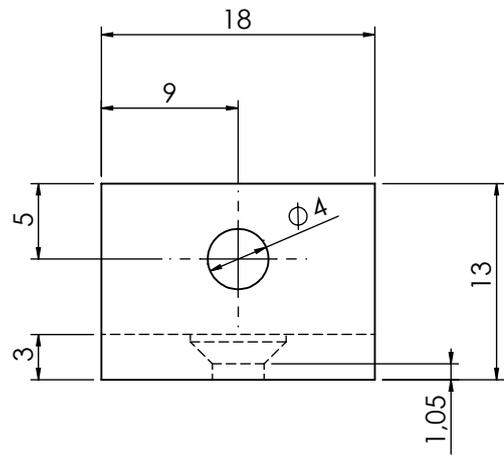
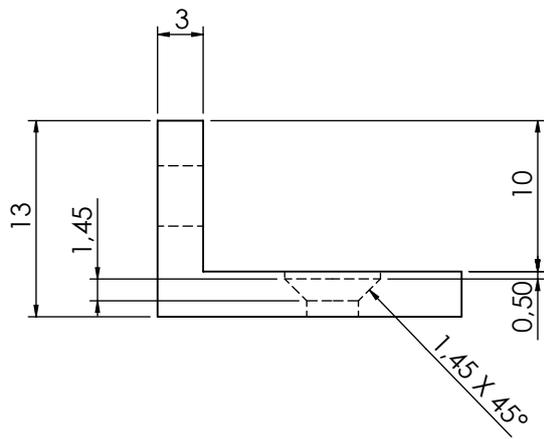


DETALLE A  
ESCALA 4 : 1



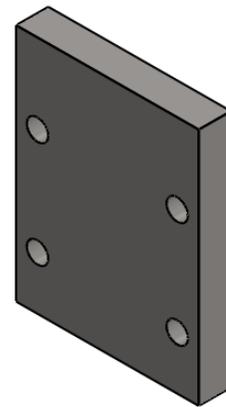
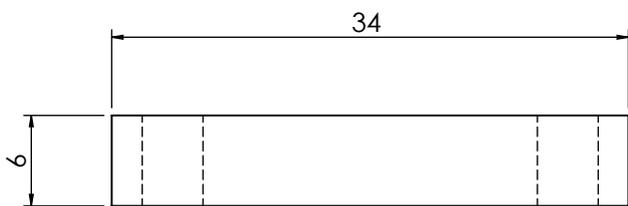
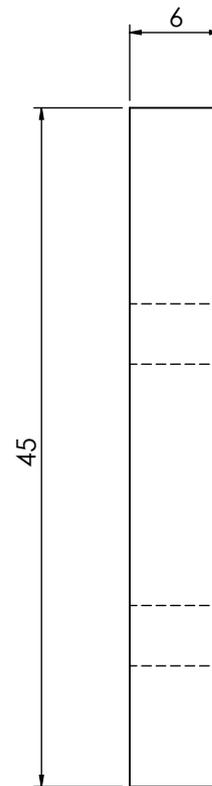
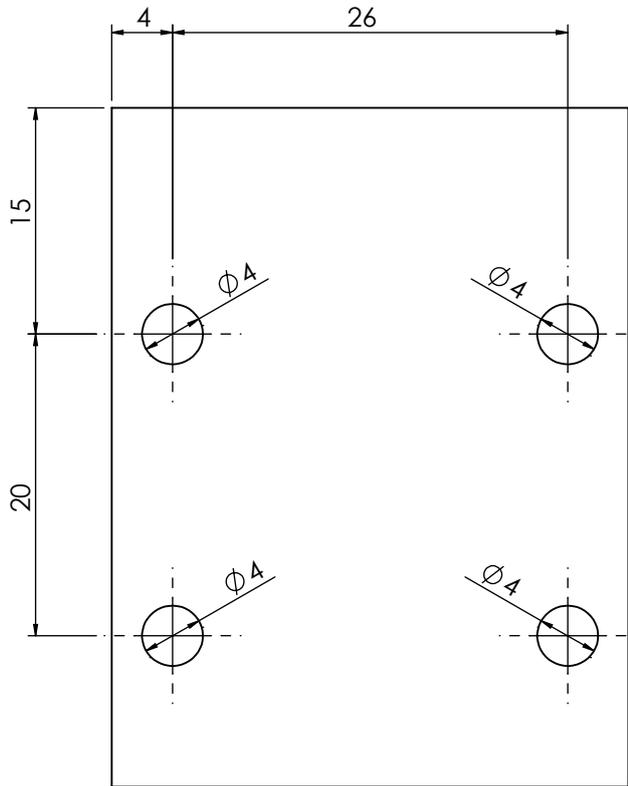
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	21-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 2:1	pieza_apriete_inferior			PLANO N°: TFM-MEC-N-2006
				Sustituye a
				Sustituido por



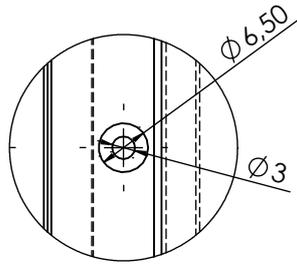
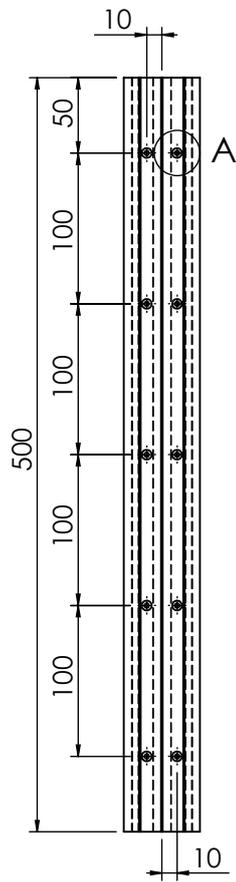
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	02-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	21-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 2:1	pieza_apriete_superior			PLANO N°: TFM-MEC-N-2007
				Sustituye a
				Sustituido por

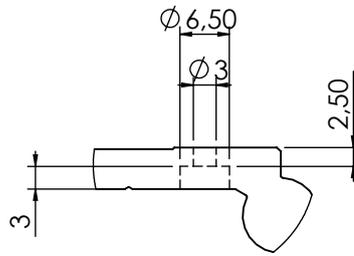
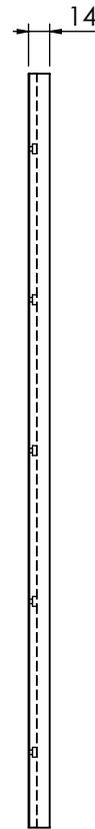


MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

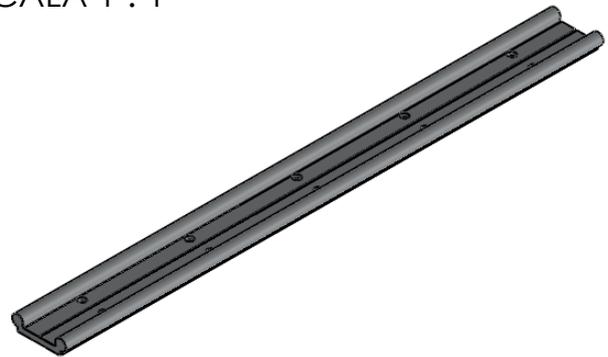
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	02-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	21-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 2:1	pieza_limite_angulo			PLANO N°: TFM-MEC-N-2008
				Sustituye a
				Sustituido por



DETALLE A  
ESCALA 1 : 1

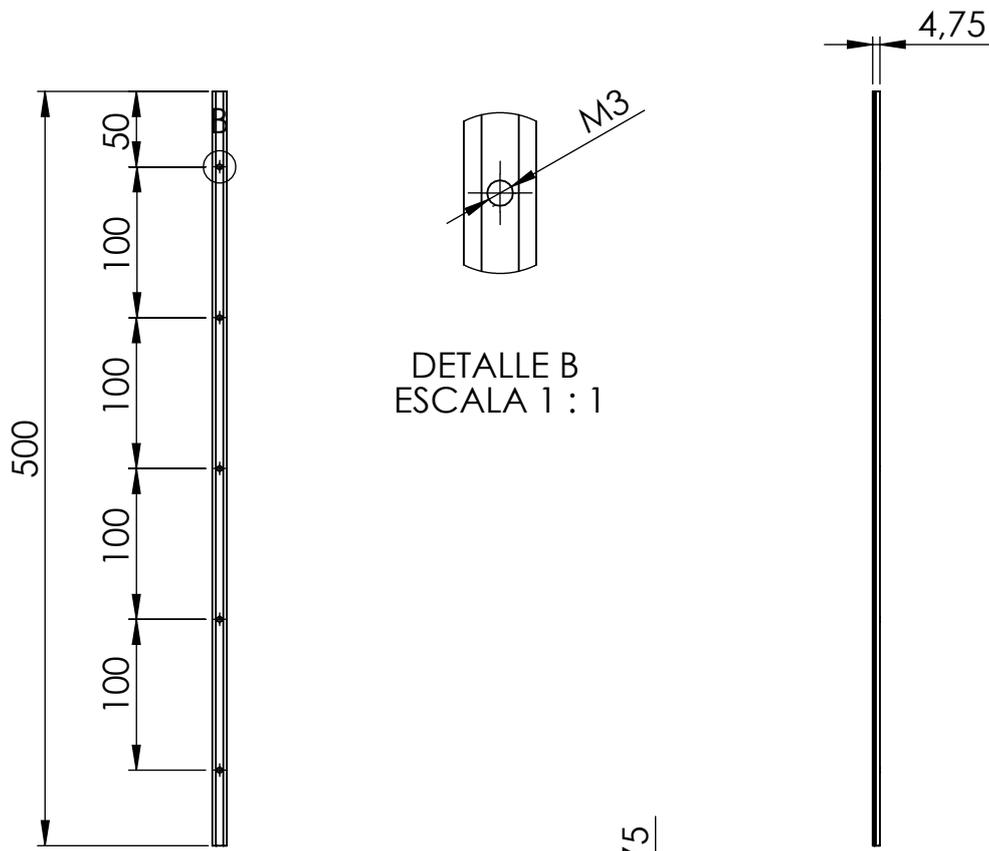


DETALLE B  
ESCALA 1 : 1

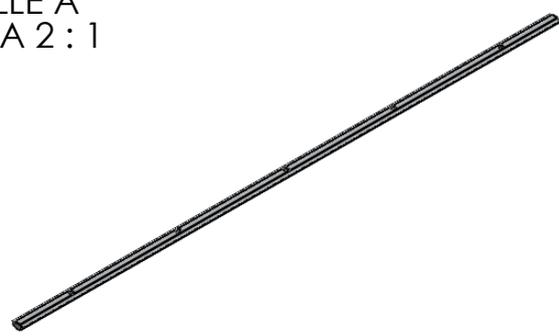
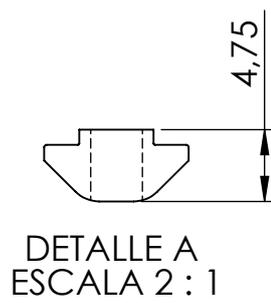


MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:5	riel_doble_1			PLANO N°: TFM-MEC-N-2009
				Sustituye a
				Sustituido por

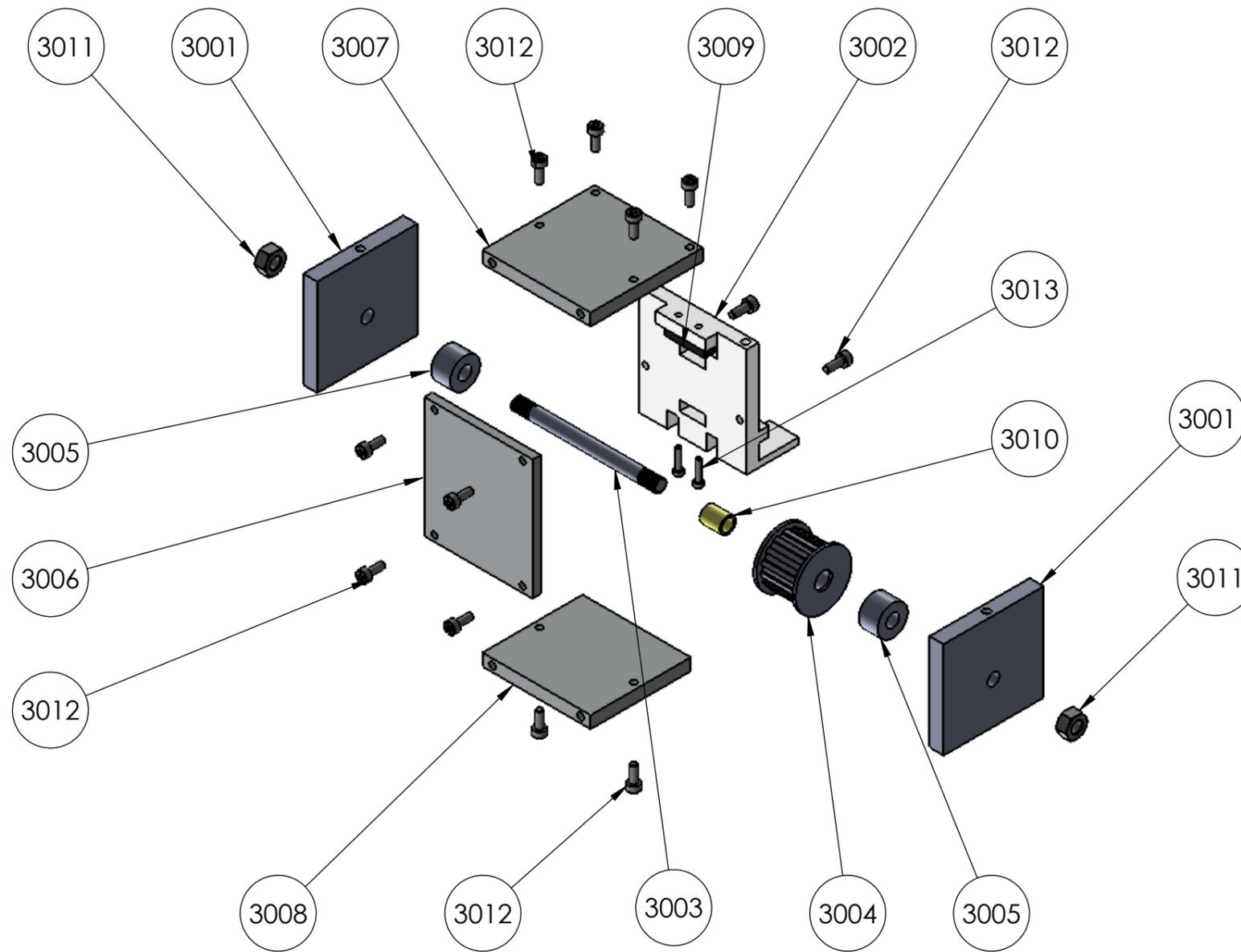


⊕ A



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

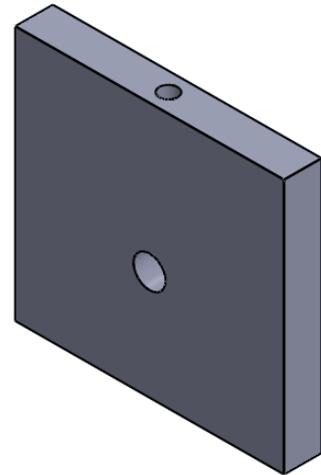
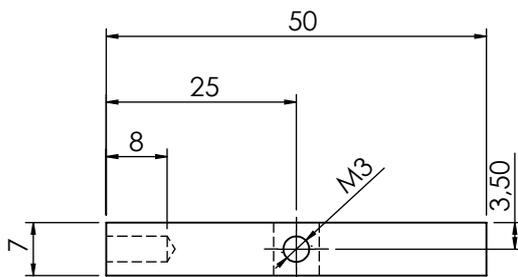
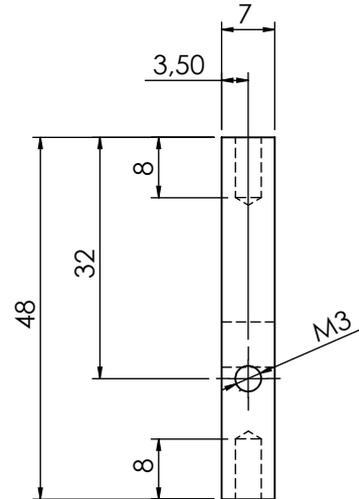
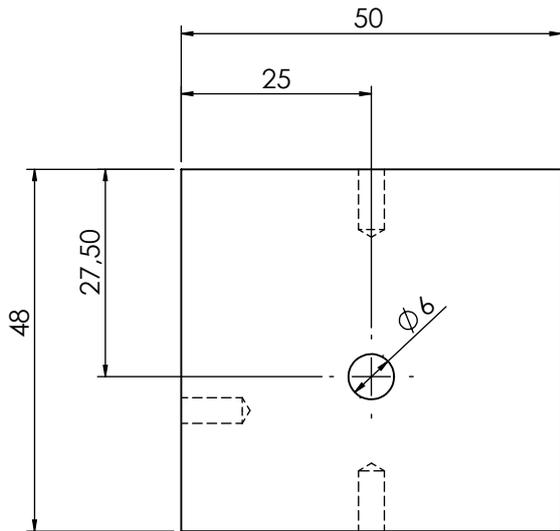
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:5	perfil_tornilo51			PLANO N°: TFM-MEC-N-2010
				Sustituye a
				Sustituido por



N.º DE PIEZA	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL (Nº PLANO)	CANTIDAD
3001	soporte1	AI (TFM-MEC-N-3001)	2
3002	soporte_FDC	polímero (TFM-MEC-N-3002)	1
3003	eje2	AI (TFM-MEC-N-3003)	1
3004	polea_mecanizada	Comercial (TFM-MEC-N-3004)	1
3005	ajuste1	AI (TFM-MEC-N-3005)	2
3006	tapa_posterior	AI (TFM-MEC-N-3006)	1
3007	tapa_superior	AI (TFM-MEC-N-3007)	1
3008	base_lateral	AI (TFM-MEC-N-3008)	1
3009	fin_carrera	Comercial	1
3010	igus_jsm-0608-10_edqvof99603q0sqda7ckd7zz	Comercial	1
3011	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M6 x 1 --D-N	Comercial	2
3012	B18.3.1M - 3 x 0.5 x 8 Hex SHCS - 8NHX	Comercial	12
3013	B18.3.1M - 2 x 0.4 x 10 Hex SHCS -- 10NHX	Comercial	2

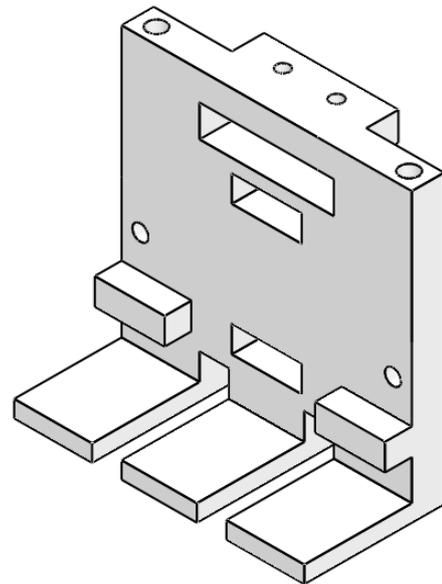
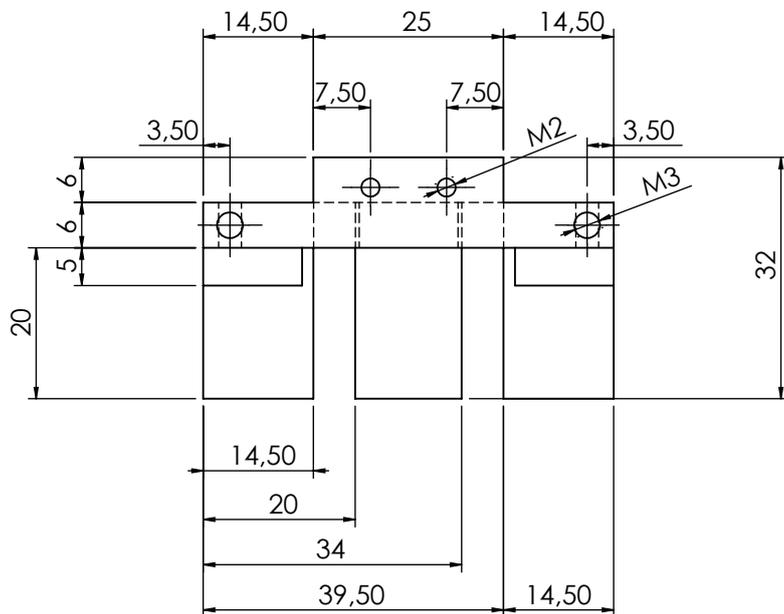
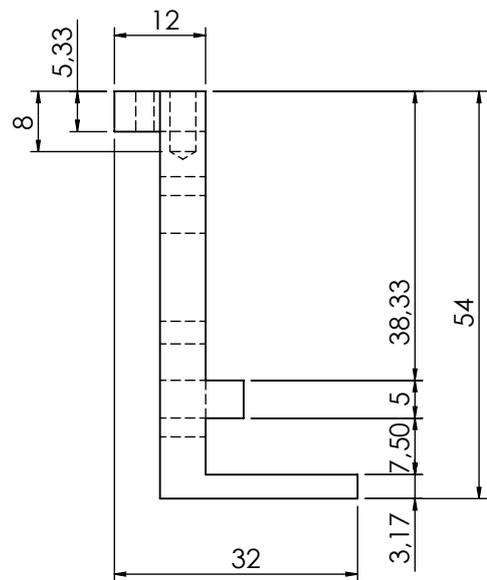
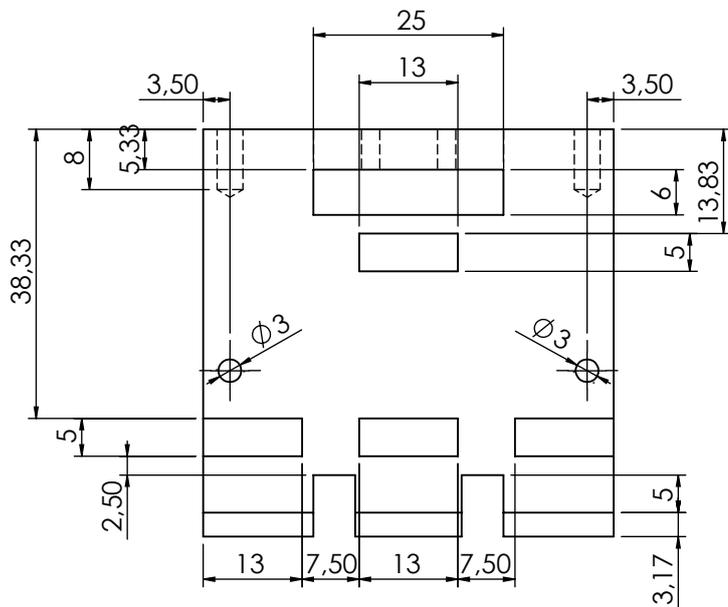
**MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER**

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:2	conjunto polea conducida			PLANO N°: TFM-MEC-N-300
				Sustituye a
				Sustituido por



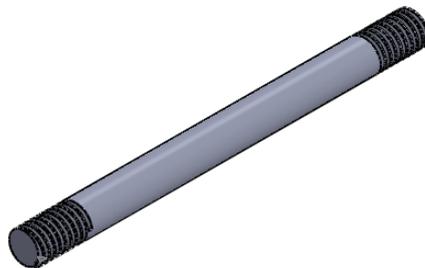
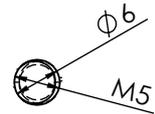
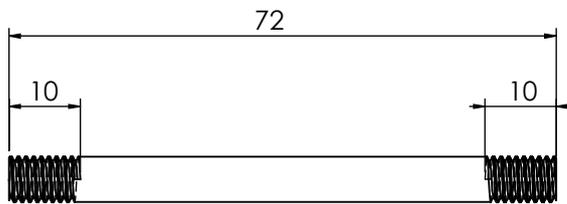
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	02-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	21-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	soporte1			PLANO N°: TFM-MEC-N-3001
				Sustituye a
				Sustituido por



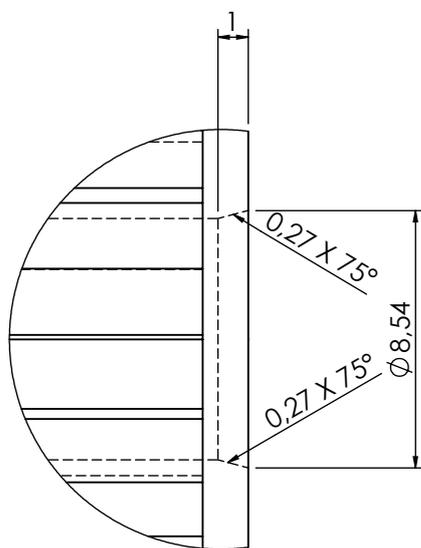
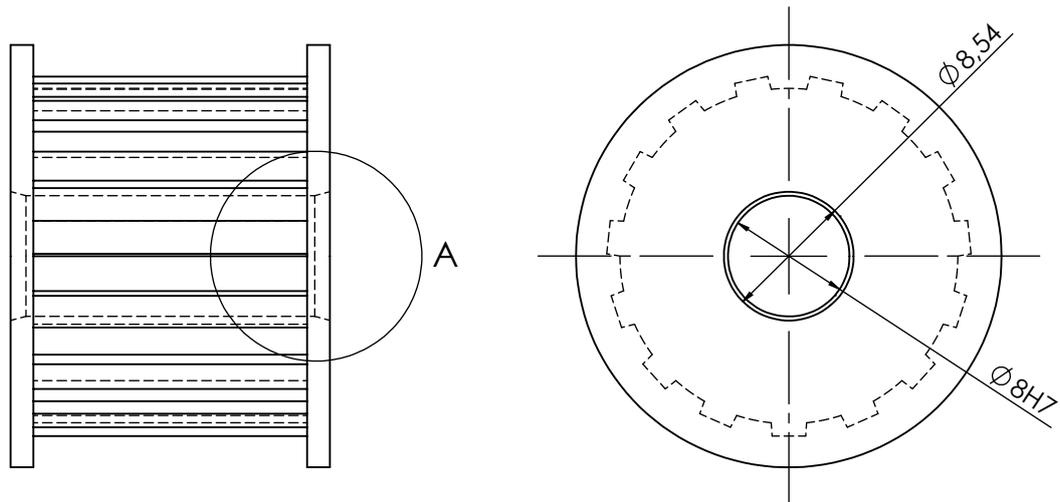
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	soporte_FDC			PLANO N°: TFM-MEC-N-3002
				Sustituye a
				Sustituido por

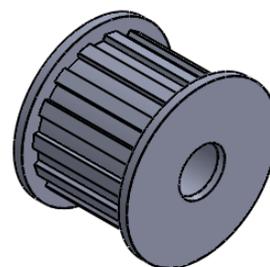


MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	02-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	21-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	eje2			PLANO N°: TFM-MEC-N-3003
				Sustituye a
				Sustituido por

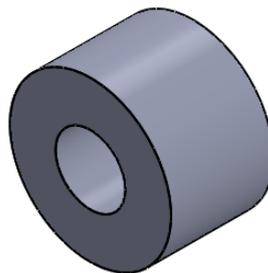
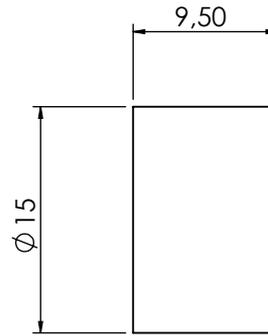
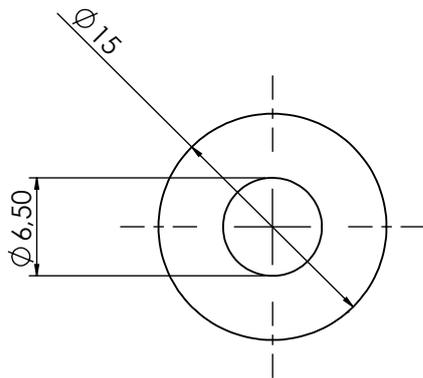


DETALLE A  
ESCALA 4 : 1



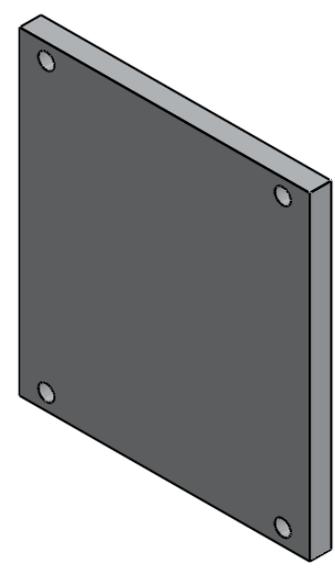
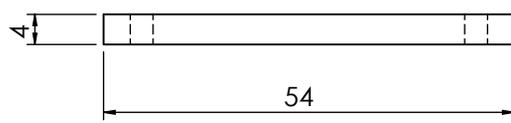
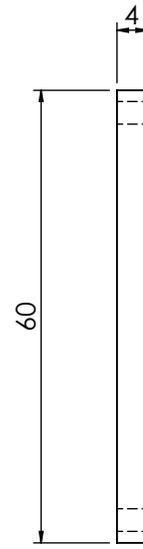
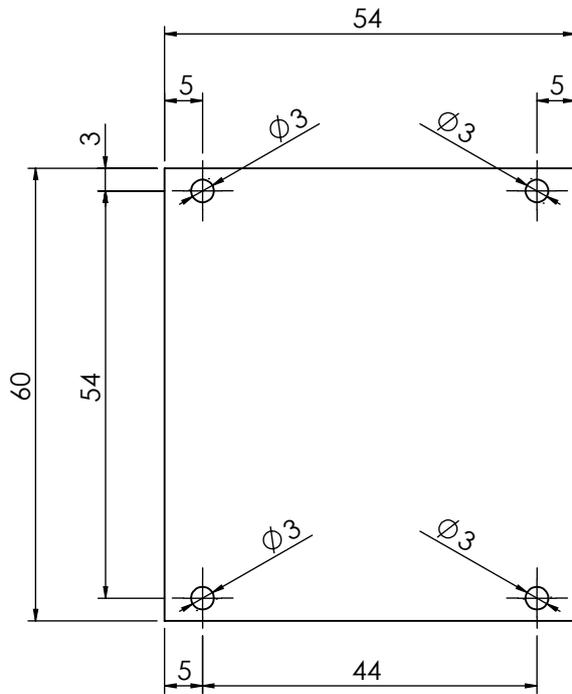
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	02-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	21-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 2:1	polea_mecanizada			PLANO N°: TFM-MEC-N-3004
				Sustituye a
				Sustituido por



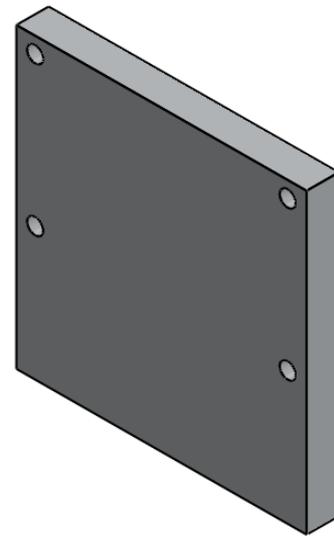
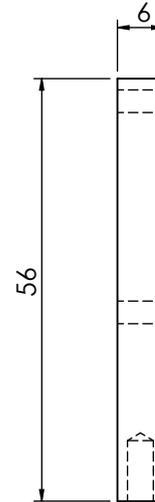
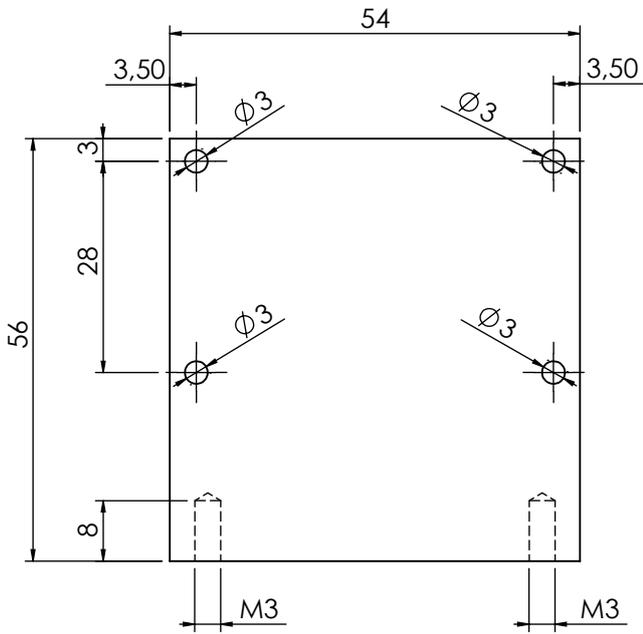
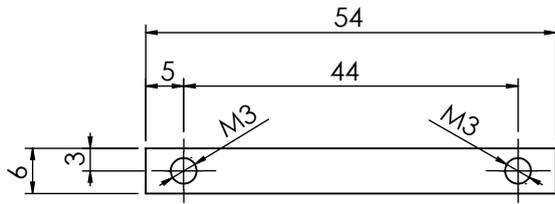
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	02-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	21-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 2:1	ajuste1			PLANO N°: TFM-MEC-N-3005
				Sustituye a
				Sustituido por



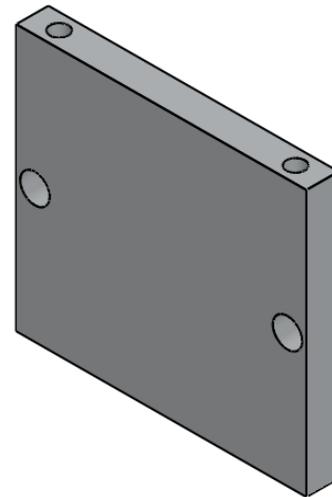
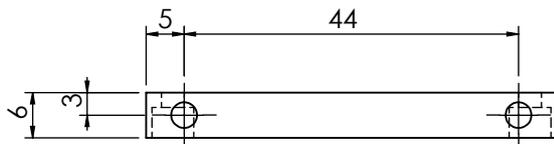
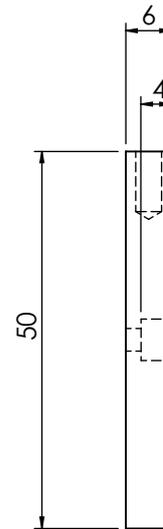
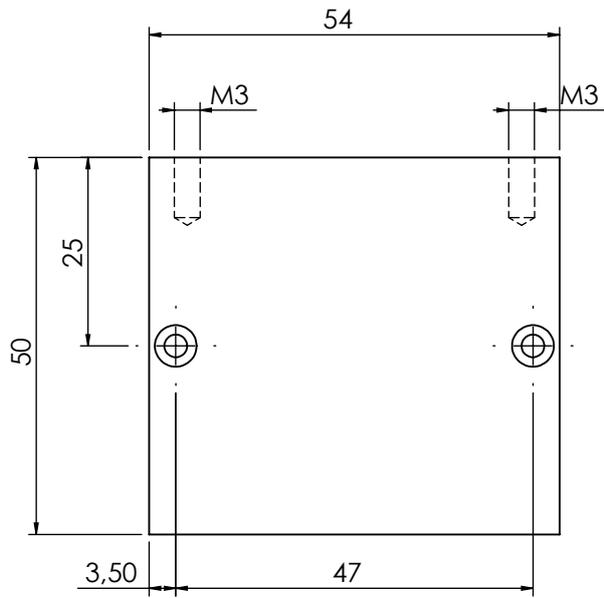
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	tapa_posterior			PLANO N°: TFM-MEC-N-3006
				Sustituye a
				Sustituido por



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	tapa_superior			PLANO N°: TFM-MEC-N-3007
				Sustituye a
				Sustituido por



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	"Rediseño mecánico y control con un PLC de un péndulo invertido"
Proyectado	01-04-14	E. Acurio	E.A.	
Dibujado	20-04-14	E. Acurio	E.A.	
Comprobado	25-05-14	J. Sirgo	J.S.	
ESCALA 1:1	base_lateral			PLANO N°: TFM-MEC-N-3008
				Sustituye a
				Sustituido por

# **ANEXO III**

## **HOJAS DE DATOS**

Amplificador de alto voltaje PA85

Encoder HEDS-5540-A11

Regulador de voltaje LM78XX

Regulador de voltaje LM79XX

Motor PBL42-87

Servomotor RS130ER1000

Transistor NPN 2N3055

Transistor PNP 2N2955

Transistor NPN BD135

Transistor PNP BD136

Acoplamiento flexible PSMR19-4-4-SS

Acoplamiento flexible PSMR19-8-6-SS

# PA85 • PA85A

## FEATURES

- HIGH VOLTAGE — 450V ( $\pm 225V$ )
- HIGH SLEW RATE —  $1000V/\mu S$
- HIGH OUTPUT CURRENT — 200mA

## APPLICATIONS

- HIGH VOLTAGE INSTRUMENTATION
- PIEZO TRANSDUCER EXCITATION
- PROGRAMMABLE POWER SUPPLIES UP TO 430V
- ELECTROSTATIC TRANSDUCERS & DEFLECTION

## DESCRIPTION

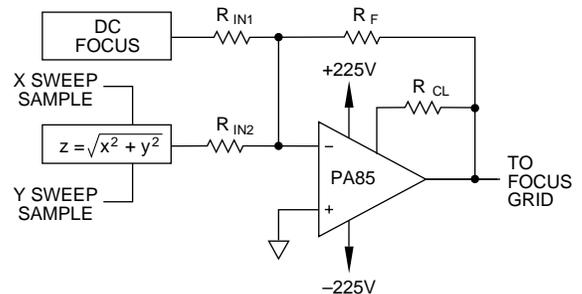
The PA85 is a high voltage, high power bandwidth MOSFET operational amplifier designed for output currents up to 200mA. Output voltages can swing up to  $\pm 215V$  with a dual supply and up to +440 volts with a single supply. The safe operating area (SOA) has no second breakdown limitations and can be observed with all types of loads by choosing an appropriate current limiting resistor. High accuracy is achieved with a cascode input circuit configuration. All internal biasing is referenced to a bootstrapped zener-MOSFET current source. As a result, the PA85 features an unprecedented supply range and excellent supply rejection. The MOSFET output stage is biased on for linear operation. External compensation provides user flexibility.

This hybrid circuit utilizes thick film (cermet) resistors, ceramic capacitors and silicon semiconductor chips to maximize reliability, minimize size and give top performance. Ultrasonically bonded aluminum wires provide reliable interconnections at all operating temperatures. The 8-pin TO-3 package is hermetically sealed and electrically isolated. The use of compressible isolation washers voids the warranty.

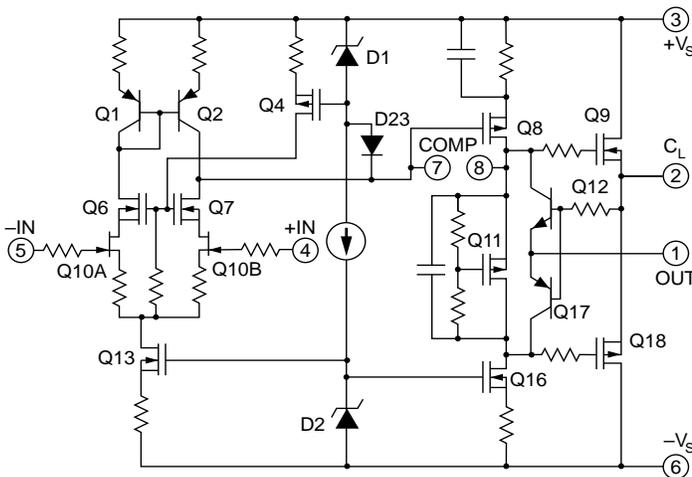


## TYPICAL APPLICATION

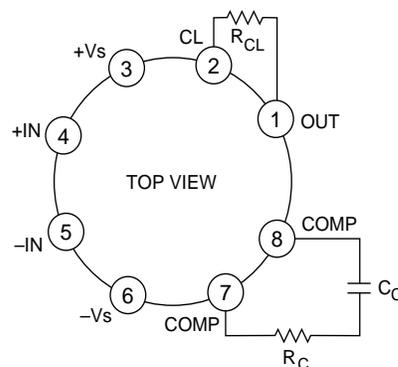
Dynamic focusing is the active correction of focusing voltage as a beam traverses the face of a CRT. This is necessary in high resolution flat face monitors since the distance between cathode and screen varies as the beam moves from the center of the screen to the edges. PA85 lends itself well to this function since it can be connected as a summing amplifier with inputs from the nominal focus potential and the dynamic correction. The nominal might be derived from a potentiometer, or perhaps automatic focusing circuitry might be used to generate this potential. The dynamic correction is generated from the sweep voltages by calculating the distance of the beam from the center of the display.



## EQUIVALENT SCHEMATIC



## EXTERNAL CONNECTIONS



PHASE COMPENSATION		
Gain	C <sub>C</sub>	R <sub>C</sub>
1	68pF	100Ω
20	10pF	330Ω
100	3.3pF	0Ω

C<sub>C</sub> RATED FOR FULL SUPPLY VOLTAGE

# PA85 • PA85A

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS SPECIFICATIONS

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

SUPPLY VOLTAGE, +V <sub>S</sub> to -V <sub>S</sub>	450V
OUTPUT CURRENT, continuous within SOA	200mA
POWER DISSIPATION, continuous @ T <sub>C</sub> = 25°C <sup>2</sup>	30W
INPUT VOLTAGE, differential	±25V
INPUT VOLTAGE, common mode	±V <sub>S</sub>
TEMPERATURE, pin solder - 10s max	300°C
TEMPERATURE, junction <sup>2</sup>	150°C
TEMPERATURE, storage	-65 to +150°C
OPERATING TEMPERATURE RANGE, case	-55 to +125°C

### SPECIFICATIONS

PARAMETER	TEST CONDITIONS <sup>1</sup>	PA85			PA85A			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
<b>INPUT</b>								
OFFSET VOLTAGE, initial			.5	2		.25	.5	mV
OFFSET VOLTAGE, vs. temperature	Full temperature range		10	30		5	10	μV/°C
OFFSET VOLTAGE, vs. supply			3	10		*	*	μV/V
OFFSET VOLTAGE, vs. time			75			*	*	μV/√kh
BIAS CURRENT, initial <sup>3</sup>			5	50		3	10	pA
BIAS CURRENT, vs. supply			.01			*	*	pA/V
OFFSET CURRENT, initial <sup>3</sup>			10	100		3	30	pA
INPUT IMPEDANCE, DC			10 <sup>11</sup>			*	*	Ω
INPUT CAPACITANCE			4			*	*	pF
COMMON MODE VOLTAGE RANGE <sup>4</sup>		±V <sub>S</sub> -12				*	*	V
COMMON MODE REJECTION, DC	V <sub>CM</sub> = ±90V	90	110			*	*	dB
NOISE	100kHz BW, R <sub>S</sub> = 1KΩ, C <sub>C</sub> = 10pf		1			*	*	μVrms
<b>GAIN</b>								
OPEN LOOP, @ 15Hz	R <sub>L</sub> = 2KΩ, C <sub>C</sub> = OPEN	96	111		*	*		dB
GAIN BANDWIDTH PRODUCT at 1MHz	R <sub>L</sub> = 2KΩ, C <sub>C</sub> = 3.3pf		100			*	*	MHz
POWER BANDWIDTH	C <sub>C</sub> = 10pf		300			*	*	kHz
	C <sub>C</sub> = 3.3pf		500			*	*	kHz
	Full temperature range		60			*	*	°
<b>PHASE MARGIN</b>								
								°
<b>OUTPUT</b>								
VOLTAGE SWING <sup>4</sup>	I <sub>O</sub> = ±200mA	±V <sub>S</sub> -10	±V <sub>S</sub> -6.5		*	*		V
VOLTAGE SWING <sup>4</sup>	I <sub>O</sub> = ±75mA	±V-8.5	±V <sub>S</sub> -6.0		*	*		V
VOLTAGE SWING <sup>4</sup>	I <sub>O</sub> = ±20mA	±V-8.0	±V <sub>S</sub> -5.5		*	*		V
CURRENT, continuous	T <sub>C</sub> = 85°C	±200				*	*	mA
SLEW RATE, A <sub>V</sub> = 20	C <sub>C</sub> = 10pf		400			*	*	V/μs
SLEW RATE, A <sub>V</sub> = 100	C <sub>C</sub> = OPEN		1000		700	*	*	V/μs
CAPACITIVE LOAD, A <sub>V</sub> = +1	Full temperature range	470			*		*	pf
SETTLING TIME to .1%	C <sub>C</sub> = 10pf, 2V step		1			*	*	μs
RESISTANCE, no load	R <sub>CL</sub> = 0		50			*	*	Ω
<b>POWER SUPPLY</b>								
VOLTAGE <sup>6</sup>	Full temperature range	±15	±150	±225	*	*	*	V
CURRENT, quiescent			21	25		*	*	mA
<b>THERMAL</b>								
RESISTANCE, AC, junction to case <sup>5</sup>	Full temperature range, F > 60Hz			2.5			*	°C/W
RESISTANCE, DC, junction to case	Full temperature range, F < 60Hz			4.2			*	°C/W
RESISTANCE, junction to air	Full temperature range		30				*	°C/W
TEMPERATURE RANGE, case	Meets full range specifications	-25		+85	*		*	°C

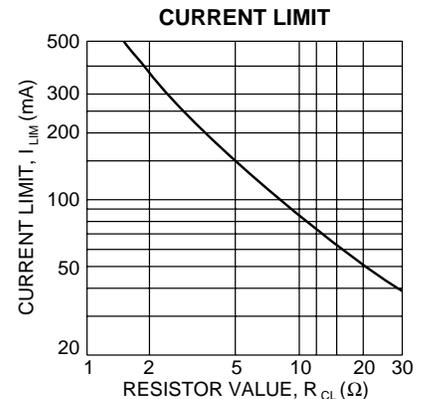
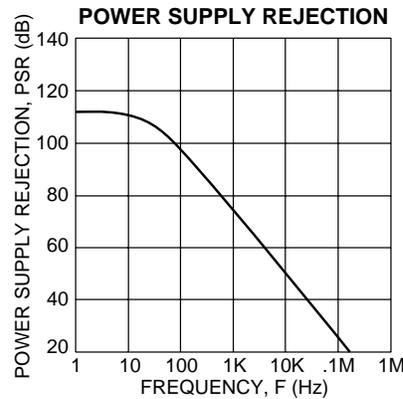
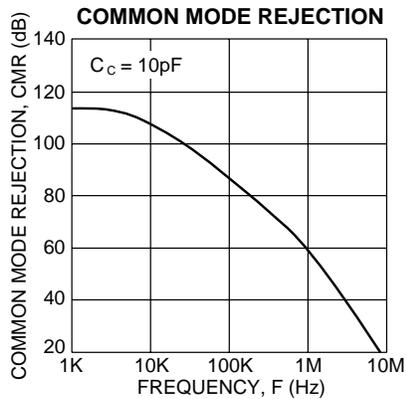
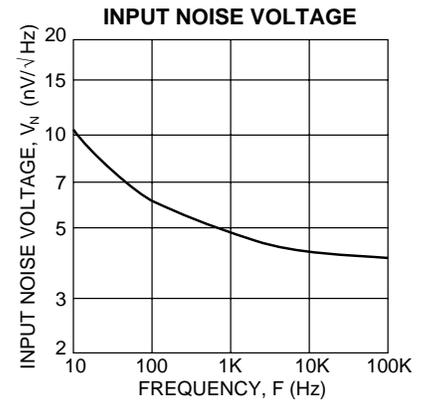
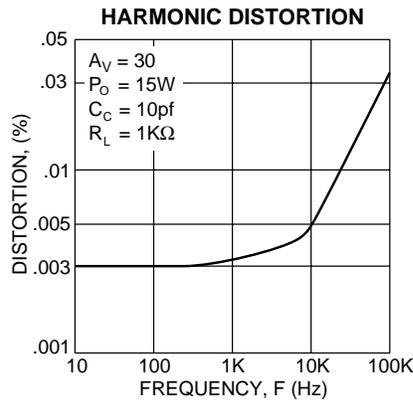
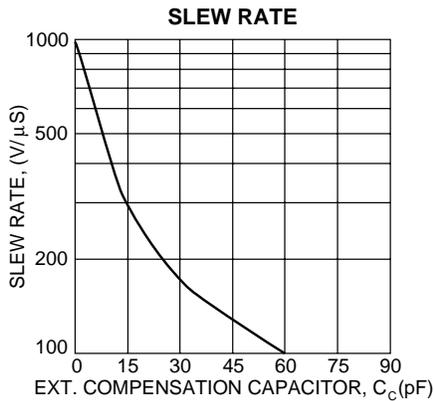
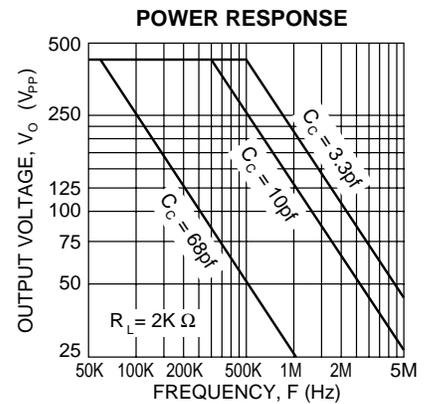
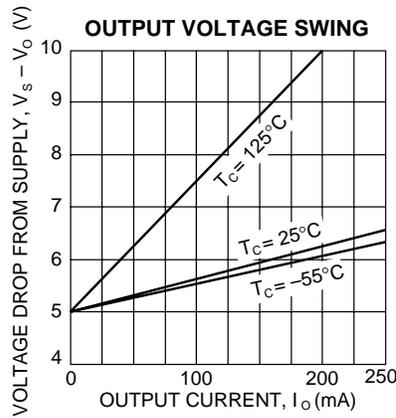
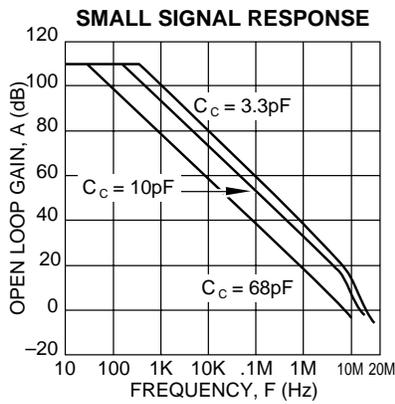
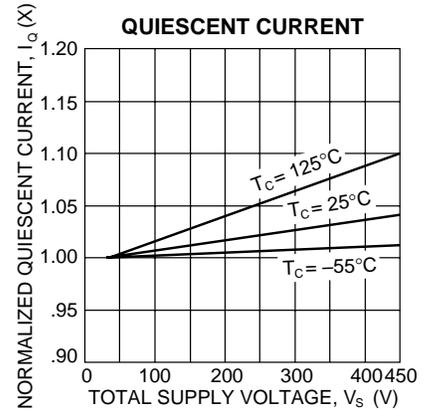
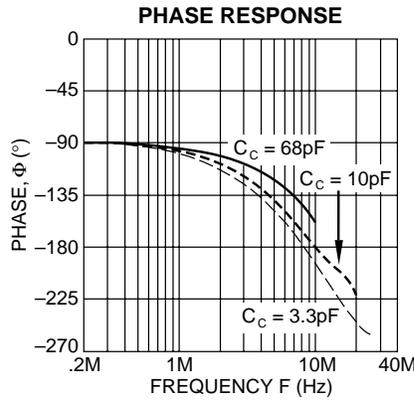
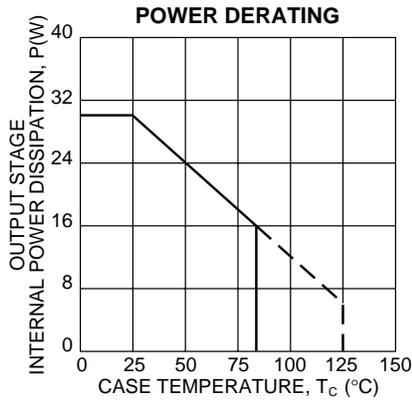
NOTES: \* The specification of PA85A is identical to the specification for PA85 in applicable column to the left.

- Unless otherwise noted: T<sub>C</sub> = 25°C, compensation = C<sub>C</sub> = 68pF, R<sub>C</sub> = 100Ω. DC input specifications are ± value given. Power supply voltage is typical rating.
- Long term operation at the maximum junction temperature will result in reduced product life. Derate internal power dissipation to achieve high MTTF. Ratings apply only to output transistors. An additional 10W may be dissipated due to quiescent power.
- Doubles for every 10°C of temperature increase.
- +V<sub>S</sub> and -V<sub>S</sub> denote the positive and negative power supply rail respectively.
- Rating applies if the output current alternates between both output transistors at a rate faster than 60Hz.
- Derate max supply rating .625 V/°C below 25°C case. No derating needed above 25°C case.

### CAUTION

The PA85 is constructed from MOSFET transistors. ESD handling procedures must be observed.

The internal substrate contains beryllia (BeO). Do not break the seal. If accidentally broken, do not crush, machine, or subject to temperatures in excess of 850°C to avoid generating toxic fumes.



### GENERAL

Please read the "General Operating Considerations" section, which covers stability, supplies, heatsinking, mounting, current limit, SOA interpretation, and specification interpretation. Additional information can be found in the application notes. For information on the package outline, heatsinks, and mounting hardware, consult the "Accessory and Package Mechanical Data" section of the handbook.

### CURRENT LIMIT

For proper operation, the current limit resistor ( $R_{CL}$ ) must be connected as shown in the external connection diagram. The minimum value is 1.4 ohm, however for optimum reliability the resistor value should be set as high as possible. The value is calculated as follows; with the maximum practical value of 30 ohms.

$$R_{CL} = \frac{.7}{I_{LIM} - .016}$$

### SAFE OPERATING AREA (SOA)

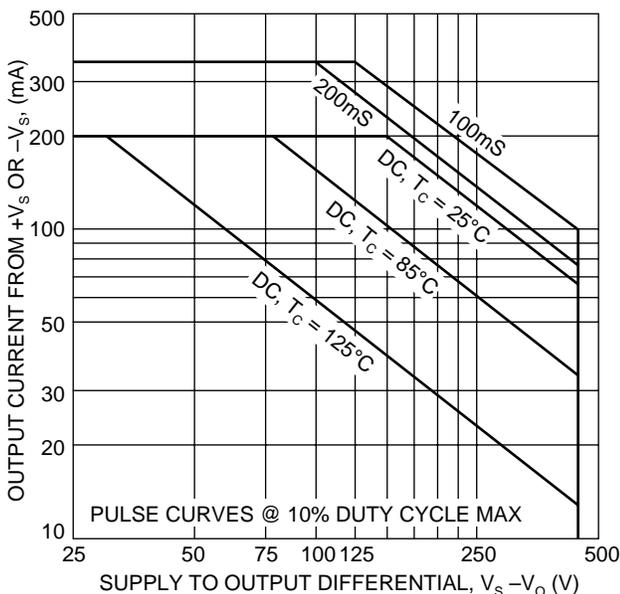
The MOSFET output stage of this power operational amplifier has two distinct limitations:

1. The current handling capability of the MOSFET geometry and the wire bonds.
2. The junction temperature of the output MOSFETs.

NOTE: The output stage is protected against transient flyback. However, for protection against sustained, high energy flyback, external fast-recovery diodes should be used.

### SAFE OPERATING CURVES

The safe operating area curves define the maximum additional internal power dissipation the amplifier can tolerate when it produces the necessary output to drive an external load. This is not the same as the absolute maximum internal



power dissipation listed elsewhere in the specification since the quiescent power dissipation is significant compared to the total.

### INPUT PROTECTION

Although the PA85 can withstand differential voltages up to  $\pm 25V$ , additional external protection is recommended. Since the PA85 is a high speed amplifier, low leakage, low capacitance JFETs connected as diodes are recommended (e.g. 2N4416, Q1-Q4 in Figure 2). The differential input voltage will be clamped to  $\pm 1.4V$ . This is sufficient overdrive to produce maximum power bandwidth.

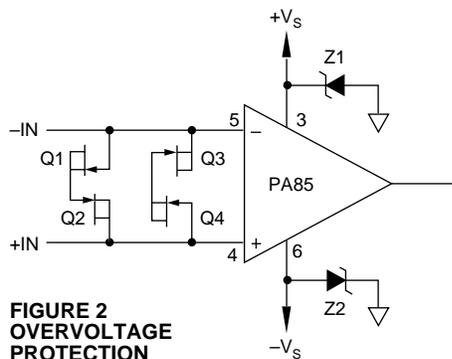
### POWER SUPPLY PROTECTION

Unidirectional zener diode transient suppressors are recommended as protection on the supply pins. The zeners clamp transients to voltages within the power supply rating and also clamp power supply reversals to ground. Whether the zeners are used or not, the system power supply should be evaluated for transient performance including power-on overshoot and power-off polarity reversals as well as line regulation.

Conditions which can cause open circuits or polarity reversals on either power supply rail should be avoided or protected against. Reversals or opens on the negative supply rail is known to induce input stage failure. Unidirectional transzorbos prevent this, and it is desirable that they be both electrically and physically as close to the amplifier as possible.

### STABILITY

The PA85 is externally compensated and performance can be tailored to the application. Use the graphs of small signal response and power response as a guide. The compensation capacitor  $C_c$  must be rated at 500V working voltage. An NPO capacitor is recommended. The compensation network  $C_c R_c$  must be mounted closely to the amplifier pins 7 and 8 to avoid spurious oscillation.



**FIGURE 2**  
OVERVOLTAGE PROTECTION

This datasheet has been download from:

[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)

Datasheets for electronics components.

# Quick Assembly Two and Three Channel Optical Encoders

## Technical Data

**HEDM-550X/560X**  
**HEDS-550X/554X**  
**HEDS-560X/564X**

### Features

- **Two Channel Quadrature Output with Optional Index Pulse**
- **Quick and Easy Assembly**
- **No Signal Adjustment Required**
- **External Mounting Ears Available**
- **Low Cost**
- **Resolutions Up to 1024 Counts Per Revolution**
- **Small Size**
- **-40°C to 100°C Operating Temperature**
- **TTL Compatible**
- **Single 5 V Supply**

### Description

The HEDS-5500/5540, HEDS-5600/5640, and HEDM-5500/5600 are high performance, low cost, two and three channel optical incremental encoders. These encoders emphasize high reliability, high resolution, and easy assembly.

Each encoder contains a lensed LED source, an integrated circuit

with detectors and output circuitry, and a codewheel which rotates between the emitter and detector IC. The outputs of the HEDS-5500/5600 and HEDM-5500/5600 are two square waves in quadrature. The HEDS-5540 and 5640 also have a third channel index output in addition to the two channel quadrature. This index output is a 90 electrical degree, high true index pulse which is generated once for each full rotation of the codewheel.

The HEDS series utilizes metal codewheels, while the HEDM series utilizes a film codewheel allowing for resolutions to 1024 CPR. The HEDM series is nont available with a third channel index.

These encoders may be quickly and easily mounted to a motor. For larger diameter motors, the HEDM-5600, and HEDS-5600/5640 feature external mounting ears.

The quadrature signals and the index pulse are accessed through



five 0.025 inch square pins located on 0.1 inch centers.

Standard resolutions between 96 and 1024 counts per revolution are presently available. Consult local Hewlett-Packard sales representatives for other resolutions.

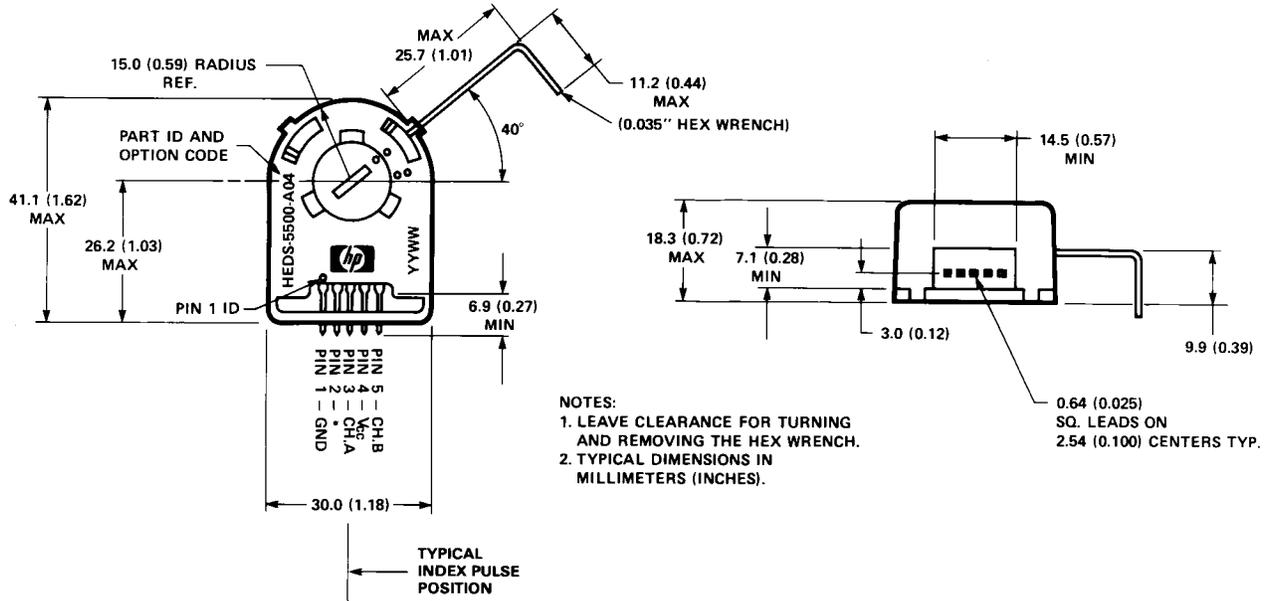
### Applications

The HEDS-5500, 5540, 5600, 5640, and the HEDM-5500, 5600 provide motion detection at a low cost, making them ideal for high volume applications. Typical applications include printers, plotters, tape drives, positioning tables, and automatic handlers.

*ESD WARNING: NORMAL HANDLING PRECAUTIONS SHOULD BE TAKEN TO AVOID STATIC DISCHARGE.*

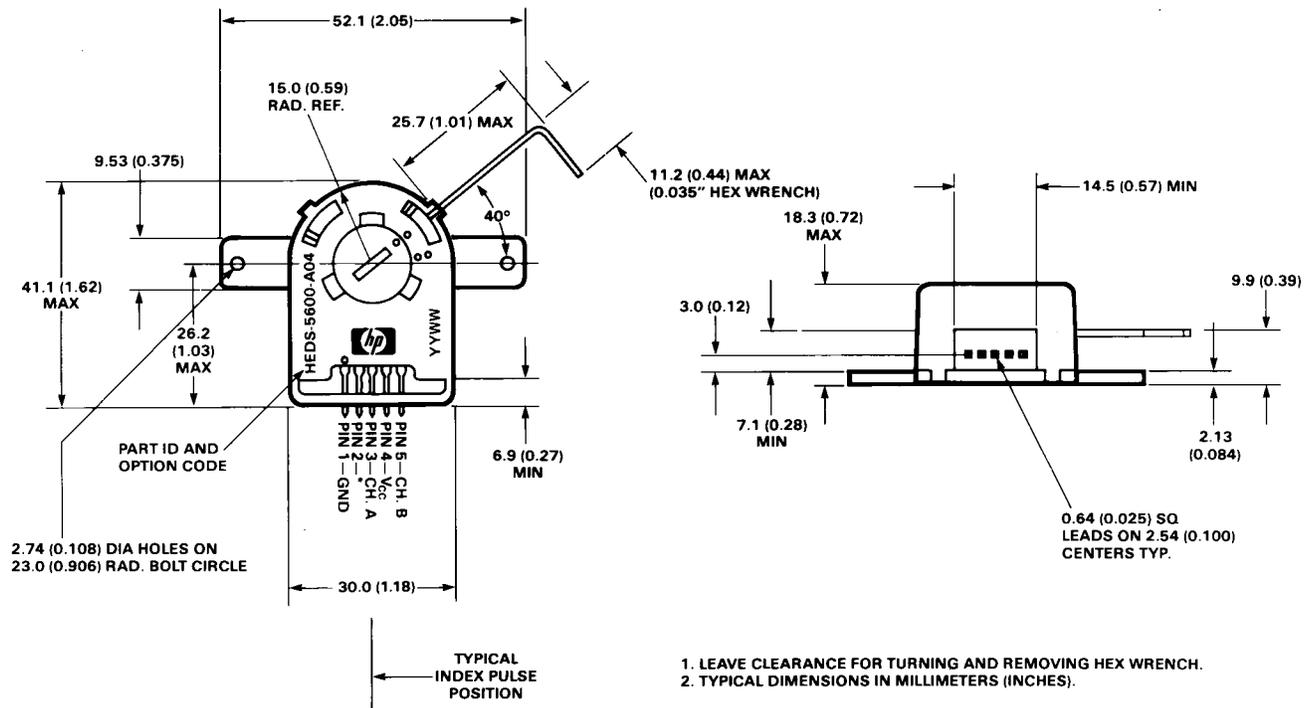
# Package Dimensions

## HEDS-5500/5540, HEDM-5500



\*Note: For the HEDS-5500 and HEDM-5500, Pin #2 is a No Connect. For the HEDS-5540, Pin #2 is CH. I, the index output.

## HEDS-5600/5640, HEDM-5600



\*Note: For the HEDS-5600 and HEDM-5600, Pin #2 is a No Connect. For the HEDS-5640, Pin #2 is CH. I, the index output.

MOTION SENSING AND CONTROL

## Theory of Operation

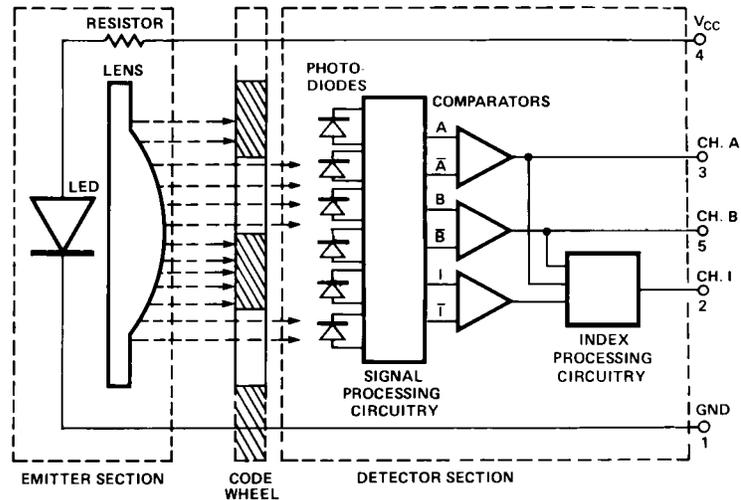
The HEDS-5500, 5540, 5600, 5640, and HEDM-5500, 5600 translate the rotary motion of a shaft into either a two- or a three-channel digital output.

As seen in the block diagram, these encoders contain a single Light Emitting Diode (LED) as its light source. The light is collimated into a parallel beam by means of a single polycarbonate lens located directly over the LED. Opposite the emitter is the integrated detector circuit. This IC consists of multiple sets of photodiodes and the signal processing circuitry necessary to produce the digital waveforms.

The codewheel rotates between the emitter and detector, causing the light beam to be interrupted by the pattern of spaces and bars on the codewheel. The photodiodes which detect these interruptions are arranged in a pattern that corresponds to the radius and design of the codewheel. These detectors are also spaced such that a light period on one pair of detectors corresponds to a dark period on the adjacent pair of detectors. The photodiode outputs are then fed through the signal processing circuitry resulting in A,  $\bar{A}$ , B and  $\bar{B}$  (also I and  $\bar{I}$  in the HEDS-5540 and 5640). Comparators receive these signals and produce the final outputs for channels A and B. Due to this integrated phasing technique, the digital output of channel A is in quadrature with that of channel B (90 degrees out of phase).

In the HEDS-5540 and 5640, the output of the comparator for I and  $\bar{I}$  is sent to the index processing circuitry along with the outputs of channels A and B.

## Block Diagram



NOTE: CIRCUITRY FOR CH. I IS ONLY IN HEDS-5540 AND 5640 THREE CHANNEL ENCODERS.

The final output of channel I is an index pulse  $P_0$  which is generated once for each full rotation of the codewheel. This output  $P_0$  is a one state width (nominally 90 electrical degrees), high true index pulse which is coincident with the low states of channels A and B.

## Definitions

**Count (N):** The number of bar and window pairs or counts per revolution (CPR) of the codewheel.

**One Cycle (C):** 360 electrical degrees ( $^{\circ}$ e), 1 bar and window pair.

**One Shaft Rotation:** 360 mechanical degrees, N cycles.

**Position Error ( $\Delta\theta$ ):** The normalized angular difference between the actual shaft position and the position indicated by the encoder cycle count.

**Cycle Error ( $\Delta C$ ):** An indication of cycle uniformity. The difference between an observed shaft angle which gives rise to one electrical cycle, and the nominal angular increment of  $1/N$  of a

revolution.

**Pulse Width (P):** The number of electrical degrees that an output is high during 1 cycle. This value is nominally  $180^{\circ}$ e or  $1/2$  cycle.

**Pulse Width Error ( $\Delta P$ ):** The deviation, in electrical degrees, of the pulse width from its ideal value of  $180^{\circ}$ e.

**State Width (S):** The number of electrical degrees between a transition in the output of channel A and the neighboring transition in the output of channel B. There are 4 states per cycle, each nominally  $90^{\circ}$ e.

**State Width Error ( $\Delta S$ ):** The deviation, in electrical degrees, of each state width from its ideal value of  $90^{\circ}$ e.

**Phase ( $\phi$ ):** The number of electrical degrees between the center of the high state of channel A and the center of the high state of channel B. This value is nominally  $90^{\circ}$ e for quadrature output.

**Phase Error ( $\Delta\phi$ ):** The deviation of the phase from its ideal value of  $90^{\circ}$ e.

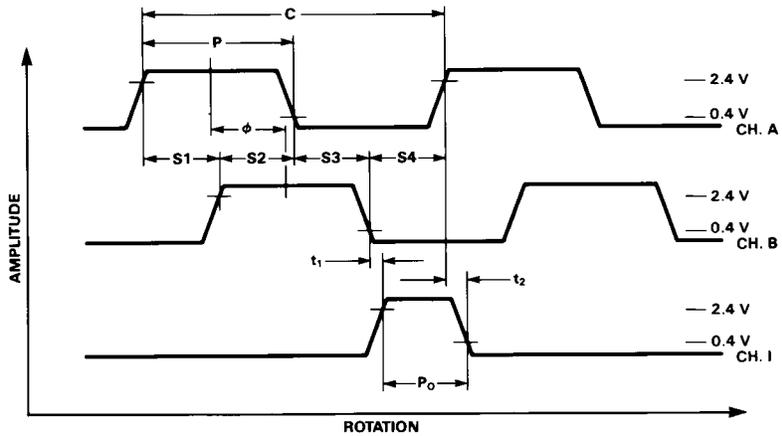
### Absolute Maximum Ratings

Parameter	HEDS-55XX/56XX	HEDM-550X/560X
Storage Temperature, $T_S$	-40°C to 100°C	-40°C to +70°C
Operating Temperature, $T_A$	-40°C to 100°C	-40°C to +70°C
Supply Voltage, $V_{CC}$	-0.5 V to 7 V	-0.5 V to 7 V
Output Voltage, $V_O$	-0.5 V to $V_{CC}$	-0.5 V to $V_{CC}$
Output Current per Channel, $I_{OUT}$	-1.0 mA to 5 mA	-1.0 mA to 5 mA
Vibration	20 g, 5 to 1000 Hz	20 g, 5 to 1000 Hz
Shaft Axial Play	$\pm 0.25$ mm ( $\pm 0.010$ in.)	$\pm 0.175$ mm ( $\pm 0.007$ in.)
Shaft Eccentricity Plus Radial Play	0.1 mm (0.004 in.) TIR	0.04 mm (0.0015 in.) TIR
Velocity	30,000 RPM	30,000 RPM
Acceleration	250,000 rad/sec <sup>2</sup>	250,000 rad/sec <sup>2</sup>

*Direction of Rotation:* When the codewheel rotates in the counter-clockwise direction (as viewed from the encoder end of the motor), channel A will lead channel B. If the codewheel rotates in the clockwise direction, channel B will lead channel A.

*Index Pulse Width ( $P_O$ ):* The number of electrical degrees that an index output is high during one full shaft rotation. This value is nominally 90° or 1/4 cycle.

### Output Waveforms



## Recommended Operating Conditions

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Notes
Temperature HEDS Series	T <sub>A</sub>	-40		100	°C	
Temperature HEDM Series	T <sub>A</sub>	-40		70	°C	non-condensing atmosphere
Supply Voltage	V <sub>CC</sub>	4.5	5.0	5.5	Volts	Ripple < 100 mV <sub>p-p</sub>
Load Capacitance	C <sub>L</sub>			100	pF	2.7 kΩ pull-up
Count Frequency	f			100	kHz	Velocity (rpm) x N/60
Shaft Perpendicularity Plus Axial Play (HEDS Series)				± 0.25 (± 0.010)	mm (in.)	6.9 mm (0.27 in.) from mounting surface
Shaft Eccentricity Plus Radial Play (HEDS Series)				0.04 (0.0015)	mm (in.) TIR	6.9 mm (0.27 in.) from mounting surface
Shaft Perpendicularity Plus Axial Play (HEDM Series)				± 0.175 (± 0.007)	mm (in.)	6.9 mm (0.27 in.) from mounting surface
Shaft Eccentricity Plus Radial Play (HEDM Series)				0.04 (0.0015)	mm (in.) TIR	6.9 mm (0.27 in.) from mounting surface

**Note:** The module performance is guaranteed to 100 kHz but can operate at higher frequencies. 2.7 kΩ pull-up resistors required for HEDS-5540 and 5640.

## Encoding Characteristics

Encoding Characteristics over Recommended Operating Range and Recommended Mounting Tolerances unless otherwise specified. Values are for the worst error over the full rotation.

Part No.	Description	Sym.	Min.	Typ.*	Max.	Units
HEDS-5500 HEDS-5600 (Two Channel)	Pulse Width Error	ΔP		7	45	°e
	Logic State Width Error	ΔS		5	45	°e
	Phase Error	Δφ		2	20	°e
	Position Error	ΔΘ		10	40	min. of arc
	Cycle Error	ΔC		3	5.5	°e
HEDM-5500 HEDM-5600 (Two Channel)	Pulse Width Error	ΔP		10	45	°e
	Logic State Width Error	ΔS		10	45	°e
	Phase Error	Δφ		2	15	°e
	Position Error	ΔΘ		10	40	min. of arc
	Cycle Error	ΔC		3	7.5	°e
HEDS-5540 HEDS-5640 (Three Channel)	Pulse Width Error	ΔP		5	35	°e
	Logic State Width Error	ΔS		5	35	°e
	Phase Error	Δφ		2	15	°e
	Position Error	ΔΘ		10	40	min. of arc
	Cycle Error	ΔC		3	5.5	°e
	Index Pulse Width	P <sub>0</sub>	55	90	125	°e
	CH. I rise after CH. A or CH. B fall	-25°C to +100°C -40°C to +100°C	t <sub>1</sub> t <sub>1</sub>	10 -300	100 100	250 250
CH. I fall after CH. B or CH. A rise	-25°C to +100°C -40°C to +100°C	t <sub>2</sub> t <sub>2</sub>	70 70	150 150	300 1000	ns ns

**Note:** See Mechanical Characteristics for mounting tolerances.

\*Typical values specified at V<sub>CC</sub> = 5.0 V and 25°C.

## Electrical Characteristics

Electrical Characteristics over Recommended Operating Range.

Part No.	Parameter	Sym.	Min.	Typ.*	Max.	Units	Notes
HEDS-5500	Supply Current	$I_{CC}$		17	40	mA	
HEDS-5600	High Level Output Voltage	$V_{OH}$	2.4			V	$I_{OH} = -40 \mu\text{A max.}$
	Low Level Output Voltage	$V_{OL}$			0.4	V	$I_{OL} = 3.2 \text{ mA}$
	Rise Time	$t_r$		200		ns	$C_L = 25 \text{ pF}$
	Fall Time	$t_f$		50		ns	$R_L = 11 \text{ k}\Omega \text{ pull-up}$
HEDS-5540	Supply Current	$I_{CC}$	30	57	85	mA	
HEDS-5640	High Level Output Voltage	$V_{OH}$	2.4			V	$I_{OH} = -200 \mu\text{A max.}$
HEDM-5500	Low Level Output Voltage	$V_{OL}$			0.4	V	$I_{OL} = 3.86 \text{ mA}$
HEDM-5600	Rise Time	$t_r$		180		ns	$C_L = 25 \text{ pF}$
	Fall Time	$t_f$		40		ns	$R_L = 2.7 \text{ k}\Omega \text{ pull-up}$
HEDM-5500	Supply Current	$I_{CC}$	30	57	85	mA	
HEDM-5600	High Level Output Voltage	$V_{OH}$	2.4			V	$I_{OH} = -40 \mu\text{A max.}$
	Low Level Output Voltage	$V_{OL}$			0.4	V	$I_{OL} = 3.86 \text{ mA}$
	Rise Time	$t_r$		180		ns	$C_L = 25 \text{ pF}$
	Fall Time	$t_f$		40		ns	$R_L = 3.2 \text{ k}\Omega \text{ pull-up}$

\*Typical values specified at  $V_{CC} = 5.0 \text{ V}$  and  $25^\circ\text{C}$ .

## Mechanical Characteristics

Parameter	Symbol	Dimension	Tolerance <sup>[1]</sup>	Units
Codewheel Fits These Standard Shaft Diameters		2 3 4 5 6 8	+0.000 -0.015	mm
		5/32 1/8 3/16 1/4	+0.0000 -0.0007	in
Moment of Inertia	J	0.6 (8.0 x 10 <sup>-6</sup> )		g-cm <sup>2</sup> (oz-in-s <sup>2</sup> )
Required Shaft Length <sup>[2]</sup>		14.0 (0.55)	± 0.5 (± 0.02)	mm (in.)
Bolt Circle <sup>[3]</sup>	2 screw mounting	19.05 (0.750)	± 0.13 (± 0.005)	mm (in.)
	3 screw mounting	20.90 (0.823)	± 0.13 (± 0.005)	mm (in.)
	external mounting ears	46.0 (1.811)	± 0.13 (± 0.005)	mm (in.)
Mounting Screw Size <sup>[4]</sup>	2 screw mounting	M 2.5 or (2-56)		mm (in.)
	3 screw mounting	M 1.6 or (0-80)		mm (in.)
	external mounting ears	M 2.5 or (2-56)		mm (in.)
Encoder Base Plate Thickness		0.33 (0.130)		mm (in.)
Hub Set Screw		(2-56)		(in.)

### Notes:

1. These are tolerances required of the user.
2. The HEDS-55X5 and 56X5, HEDM-5505, 5605 provide an 8.9 mm (0.35 inch) diameter hole through the housing for longer motor shafts. See Ordering Information.
3. The HEDS-5540 and 5640 must be aligned using the aligning pins as specified in Figure 3, or using the alignment tool as shown in "Encoder Mounting and Assembly". See also "Mounting Considerations."
4. The recommended mounting screw torque for 2 screw and external ear mounting is 1.0 kg-cm (0.88 in-lbs). The recommended mounting screw torque for 3 screw mounting is 0.50 kg-cm (0.43 in-lbs).

## Electrical Interface

To insure reliable encoding performance, the HEDS-5540 and 5640 three channel encoders require 2.7 kΩ (± 10%) pull-up resistors on output pins 2, 3, and 5 (Channels I, A, and B) as shown in Figure 1. These pull-up resistors should be located as

close to the encoder as possible (within 4 feet). Each of the three encoder outputs can drive a single TTL load in this configuration.

The HEDS-5500, 5600, and HEDM-5500, 5600 two channel encoders do not normally require pull-up resistors. However, 3.2 kΩ

pull-up resistors on output pins 3 and 5 (Channels A and B) are recommended to improve rise times, especially when operating above 100 kHz frequencies.

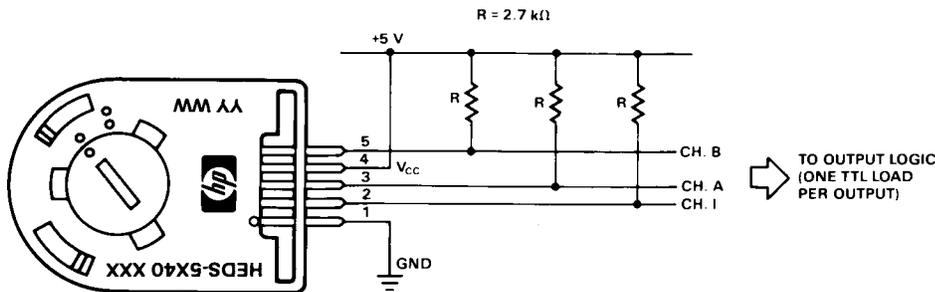


Figure 1. Pull-up Resistors on HEDS-5X40 Encoder Outputs.

### Mounting Considerations

The HEDS-5540 and 5640 three channel encoders and the HEDM Series high resolution encoders must be aligned using the aligning pins as specified in Figure 3, or using the HEDS-8910 Alignment Tool as shown in Encoder Mounting and Assembly.

The use of aligning pins or alignment tool is recommended but not required to mount the HEDS-5500 and 5600. If these

two channel encoders are attached to a motor with the screw sizes and mounting tolerances specified in the mechanical characteristics section without any additional mounting bosses, the encoder output errors will be within the maximums specified in the encoding characteristics section.

The HEDS-5500 and 5540 can be mounted to a motor using either the two screw or three screw

mounting option as shown in Figure 2. The optional aligning pins shown in Figure 3 can be used with either mounting option.

The HEDS-5600, 5640, and HEDM-5600 have external mounting ears which may be used for mounting to larger motor base plates. Figure 4 shows the necessary mounting holes with optional aligning pins and motor boss.

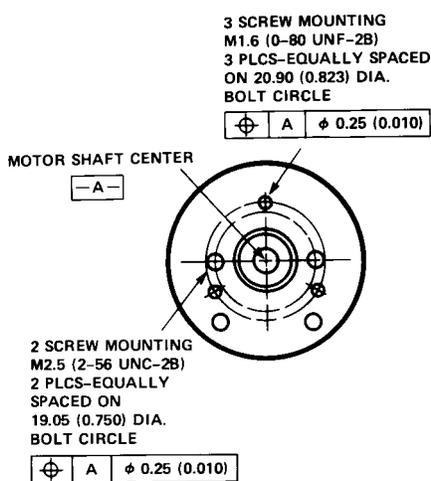


Figure 2. Mounting Holes.

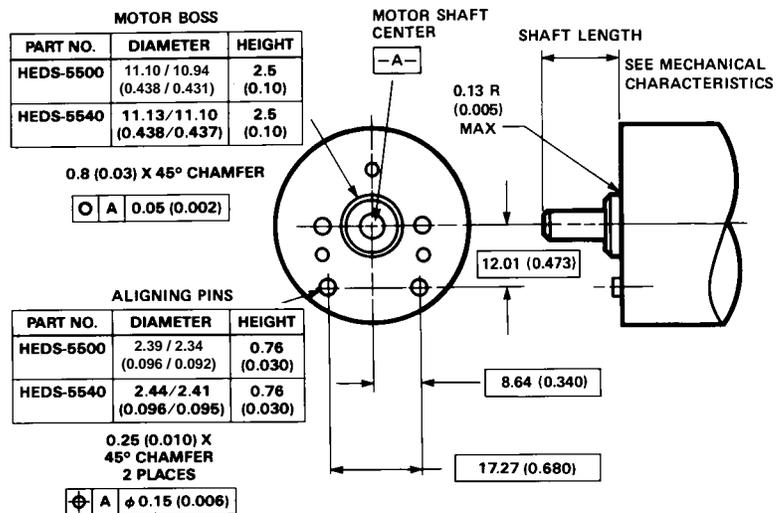


Figure 3. Optional Mounting Aids.

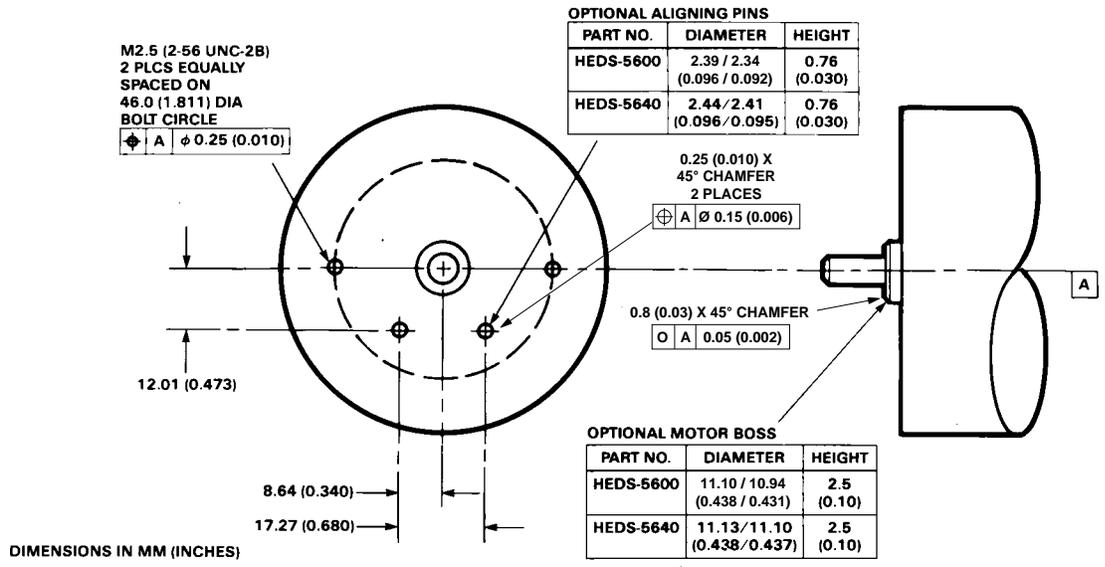
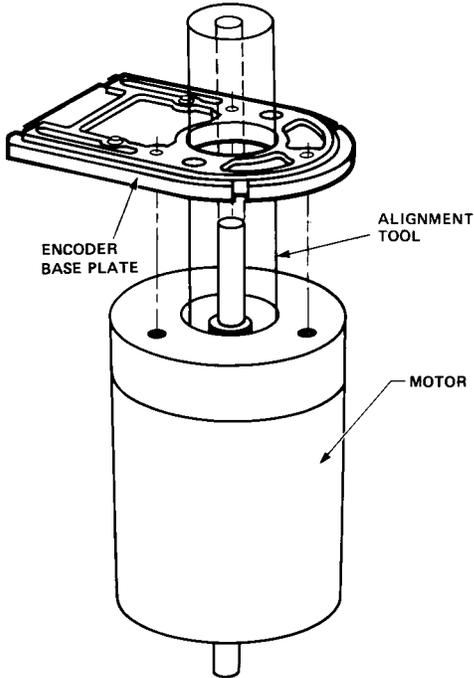


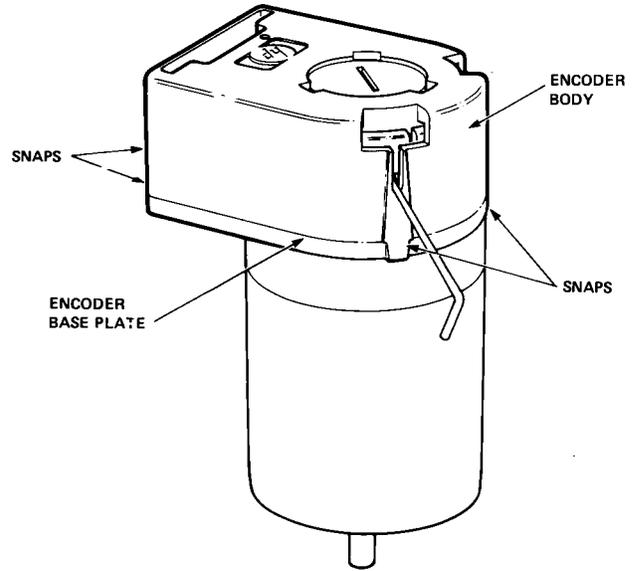
Figure 4. Mounting with External Ears.

## Encoder Mounting and Assembly

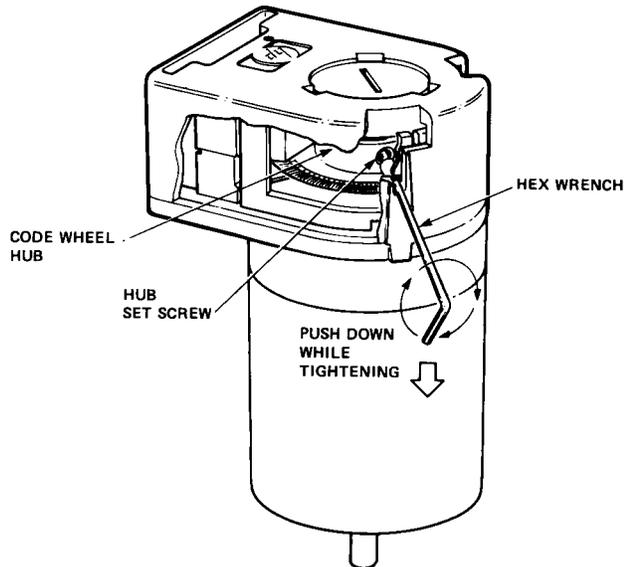


1. For HEDS-5500 and 5600: Mount encoder base plate onto motor. Tighten screws. Go on to step 2.

1a. For HEDS-5540, 5640 and HEDM-5500, 5600: Slip alignment tool onto motor shaft. With alignment tool in place, mount encoder baseplate onto motor as shown above. Tighten screws. Remove alignment tool.



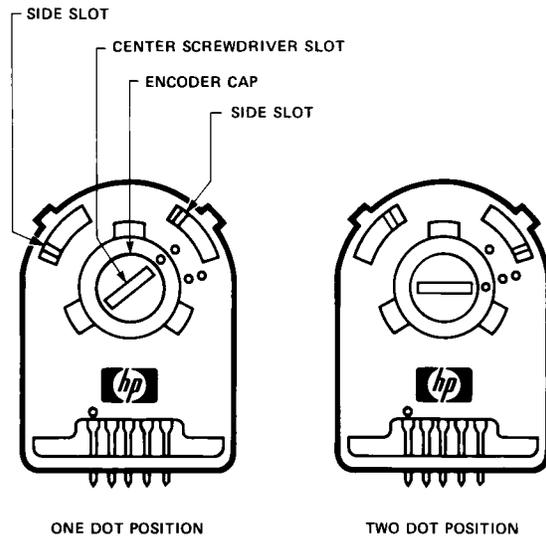
2. Snap encoder body onto base plate locking all 4 snaps.



3a. Push the hex wrench into the body of the encoder to ensure that it is properly seated into the code wheel hub set screws. Then apply a downward force on the end of the hex wrench. This sets the code wheel gap by levering the code wheel hub to its upper position.

3b. While continuing to apply a downward force, rotate the hex wrench in the clockwise direction until the hub set screw is tight against the motor shaft. The hub set screw attaches the code wheel to the motor's shaft.

3c. Remove the hex wrench by pulling it straight out of the encoder body.



4. Use the center screwdriver slot, or either of the two side slots, to rotate the encoder cap dot clockwise from the one dot position to the two dot position. Do not rotate the encoder cap counterclockwise beyond the one dot position.

The encoder is ready for use!

## Connectors

Manufacturer	Part Number
AMP	103686-4 640442-5
Dupont/Berg	65039-032 with 4825X-000 term.
HP (designed to mechanically lock into the HEDS-5XXX, HEDM-5X0X Series)	HEDS-8902 (2 ch.) with 4-wire leads
	HEDS-8903 (3 ch.) with 5-wire leads
Molex	2695 series with 2759 series term.

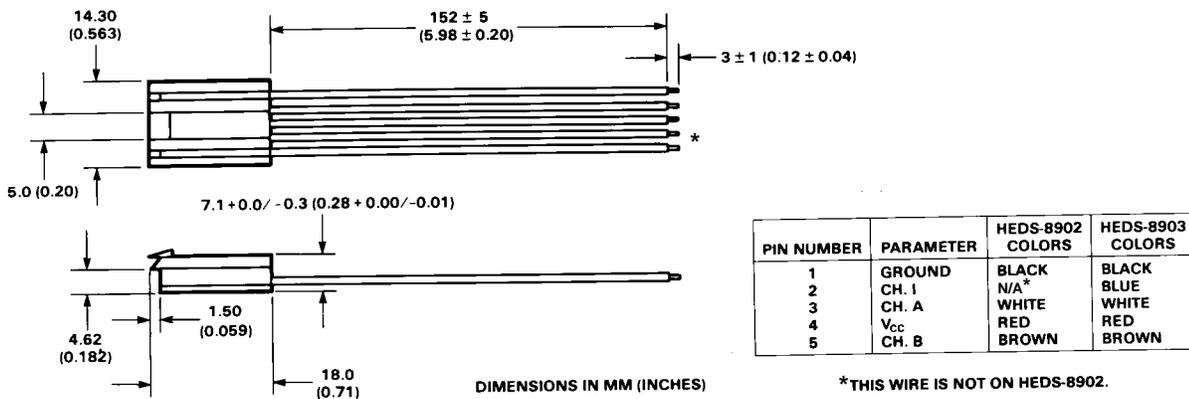
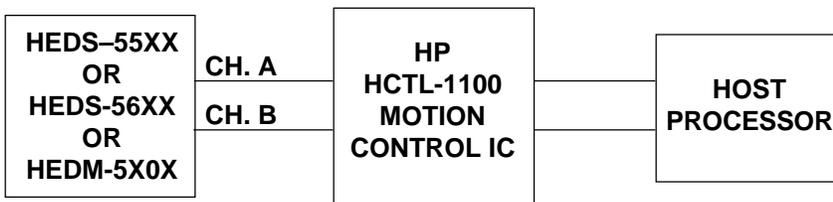
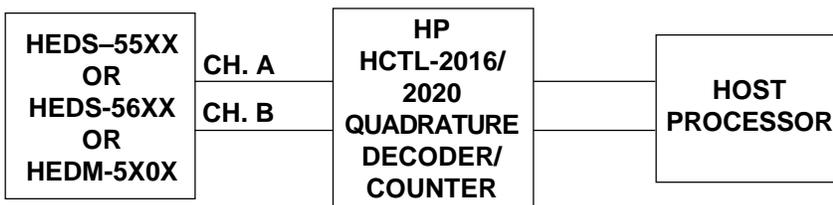


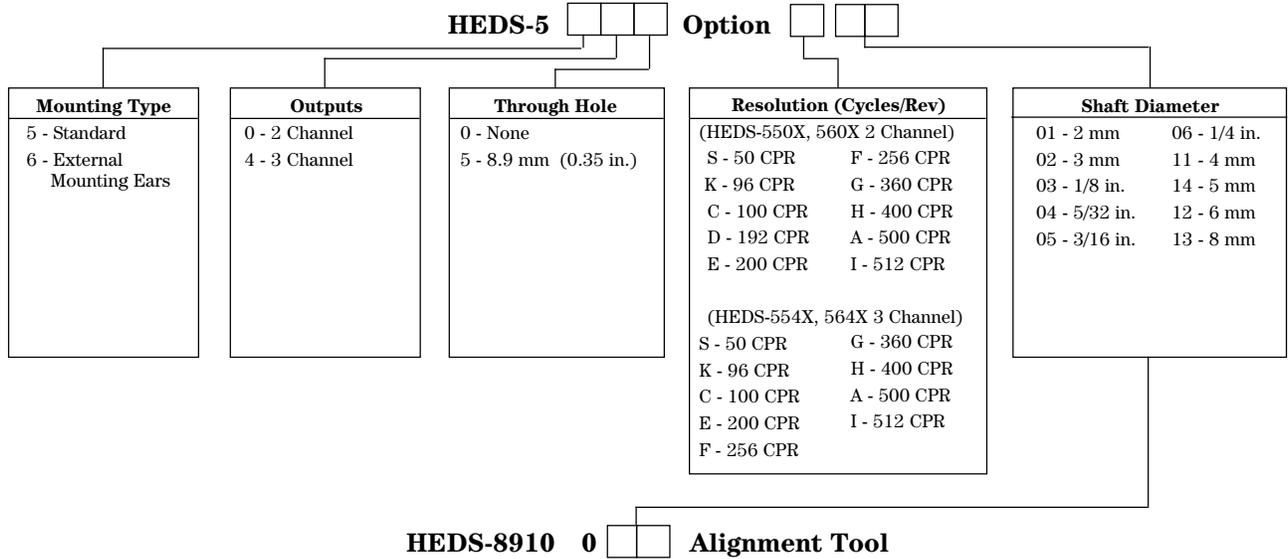
Figure 5. HEDS-8902 and 8903 Connectors.

## Typical Interfaces



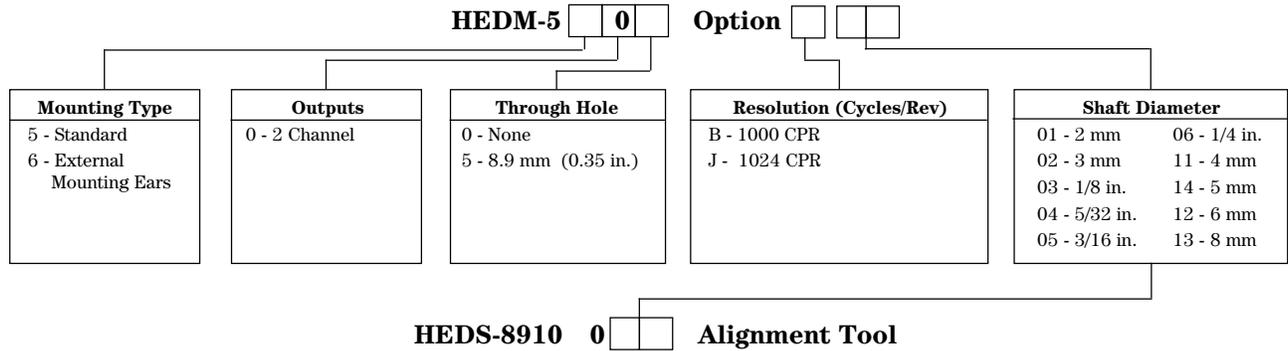
## Ordering Information

### Encoders with Metal Codewheels



(Included with each order of HEDS-554X/564X three channel encoders)

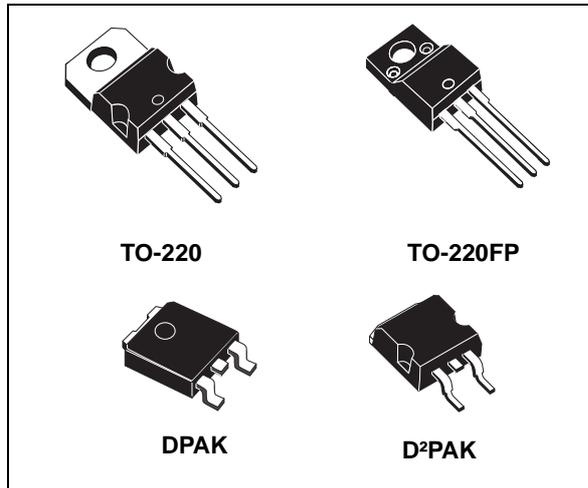
### Encoders with Film Codewheels



(Included with each order of HEDM-550X/560X two channel encoders)

## Positive voltage regulator ICs

Datasheet - production data



### Description

The L78 series of three-terminal positive regulators is available in TO-220, TO-220FP, D<sup>2</sup>PAK and DPAK packages and several fixed output voltages, making it useful in a wide range of applications.

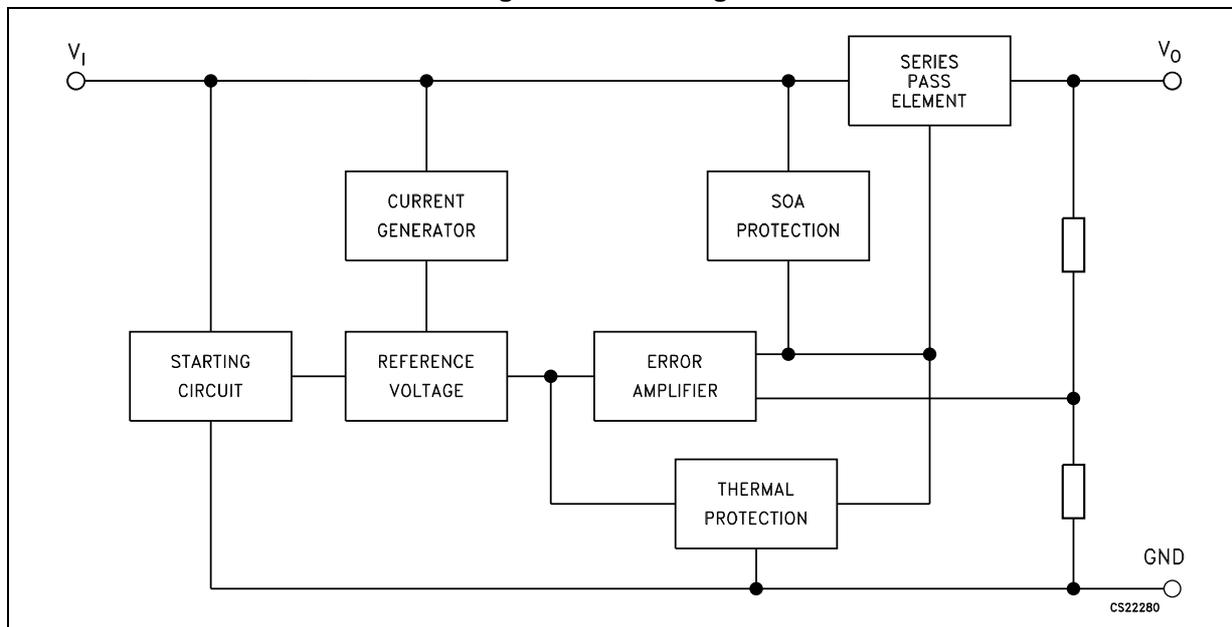
These regulators can provide local on-card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation. Each type embeds internal current limiting, thermal shutdown and safe area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1 A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltage and currents.

### Features

- Output current up to 1.5 A
- Output voltages of 5; 6; 8; 8.5; 9; 12; 15; 18; 24 V
- Thermal overload protection
- Short circuit protection
- Output transition SOA protection
- 2 % output voltage tolerance (A version)
- Guaranteed in extended temperature range (A version)

# 1 Diagram

Figure 1. Block diagram



## 2 Pin configuration

Figure 2. Pin connections (top view)

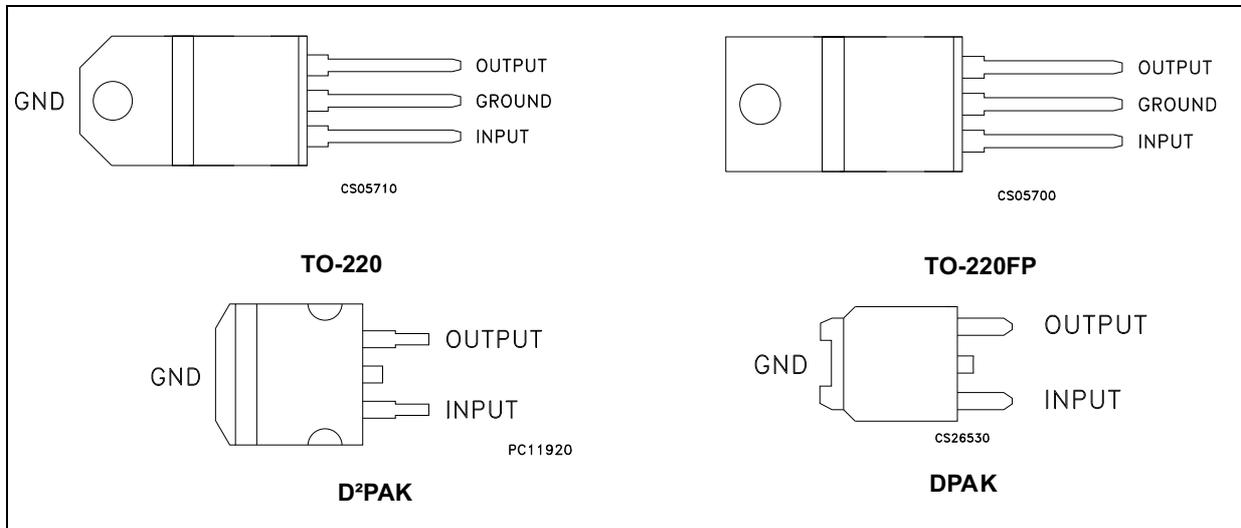
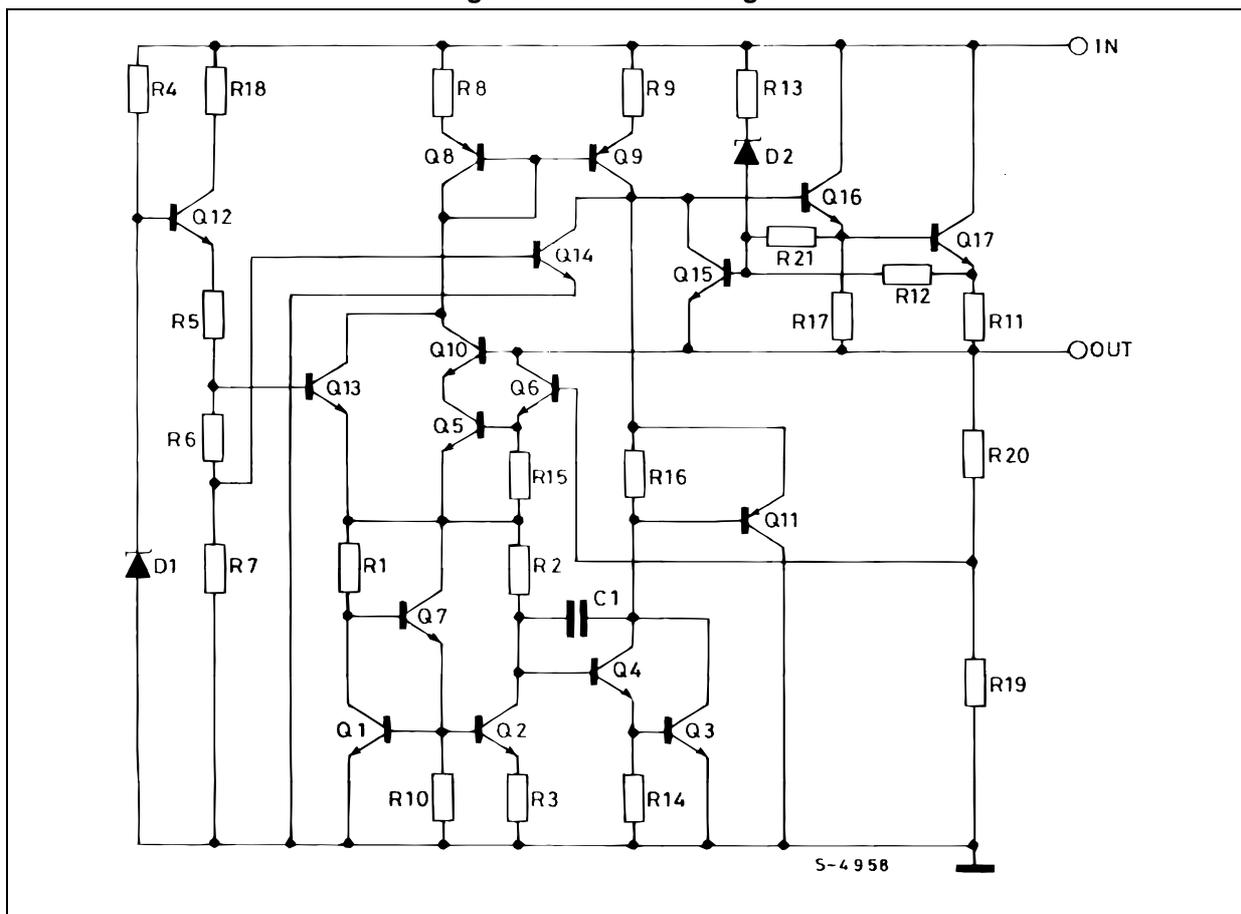


Figure 3. Schematic diagram



### 3 Maximum ratings

Table 1. Absolute maximum ratings

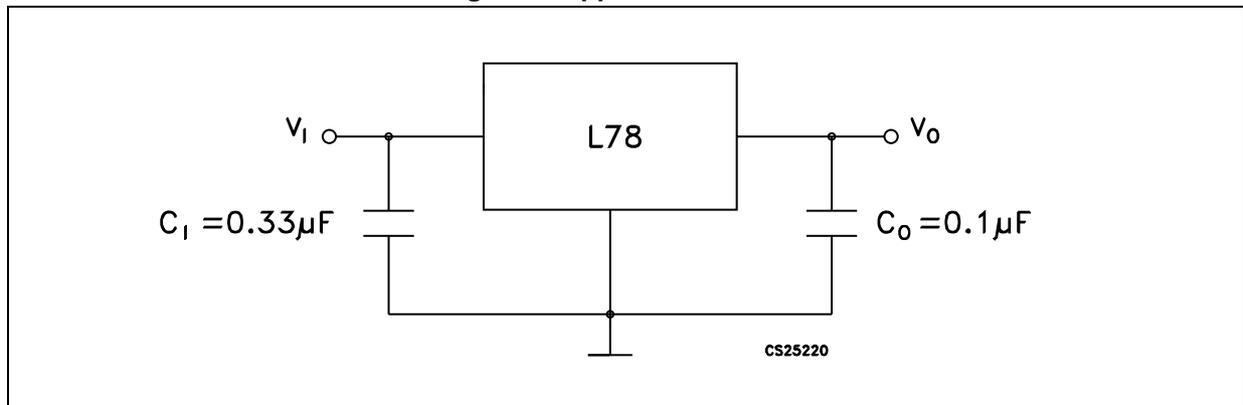
Symbol	Parameter		Value	Unit
V <sub>I</sub>	DC input voltage	for V <sub>O</sub> = 5 to 18 V	35	V
		for V <sub>O</sub> = 20, 24 V	40	
I <sub>O</sub>	Output current		Internally limited	
P <sub>D</sub>	Power dissipation		Internally limited	
T <sub>STG</sub>	Storage temperature range		-65 to 150	°C
T <sub>OP</sub>	Operating junction temperature range	for L78xxC, L78xxAC	0 to 125	°C
		for L78xxAB	-40 to 125	

Note: Absolute maximum ratings are those values beyond which damage to the device may occur. Functional operation under these condition is not implied.

Table 2. Thermal data

Symbol	Parameter	D <sup>2</sup> PAK	DPAK	TO-220	TO-220FP	Unit
R <sub>thJC</sub>	Thermal resistance junction-case	3	8	5	5	°C/W
R <sub>thJA</sub>	Thermal resistance junction-ambient	62.5	100	50	60	°C/W

Figure 4. Application circuits



# 4 Test circuits

Figure 5. DC parameter

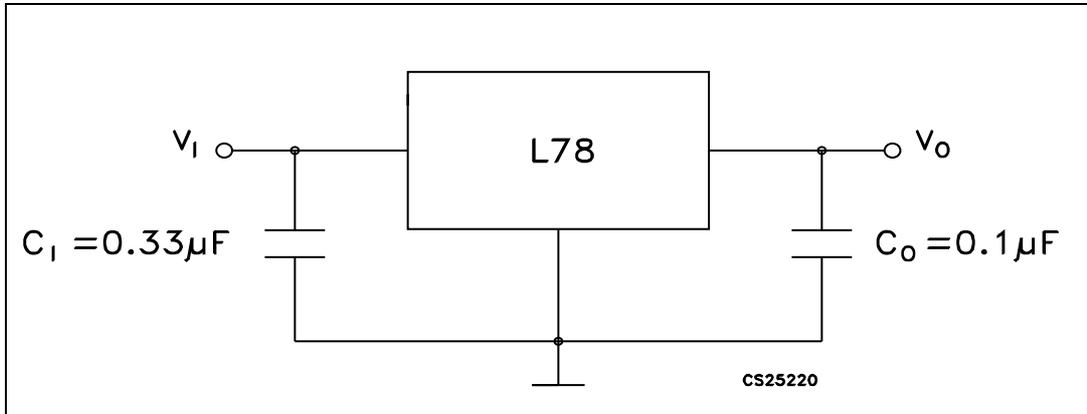


Figure 6. Load regulation

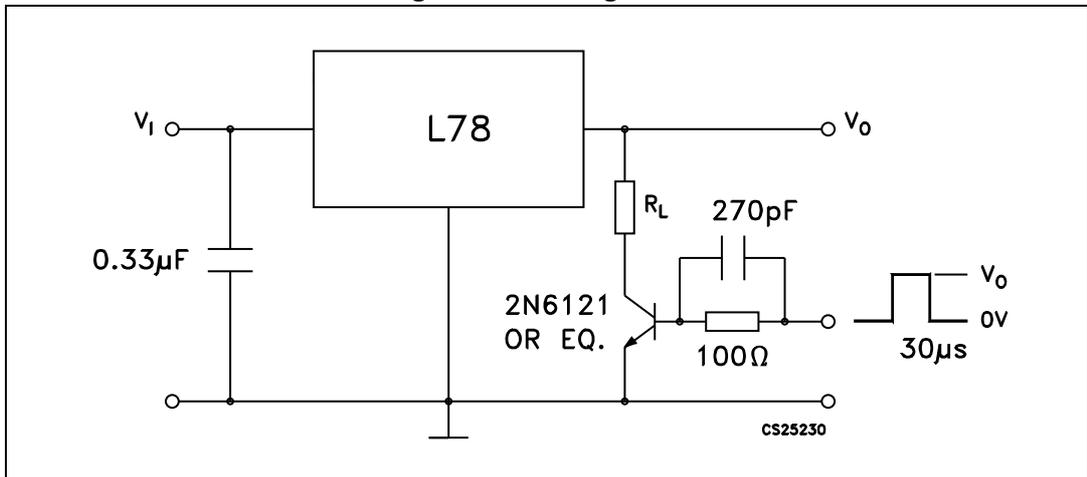
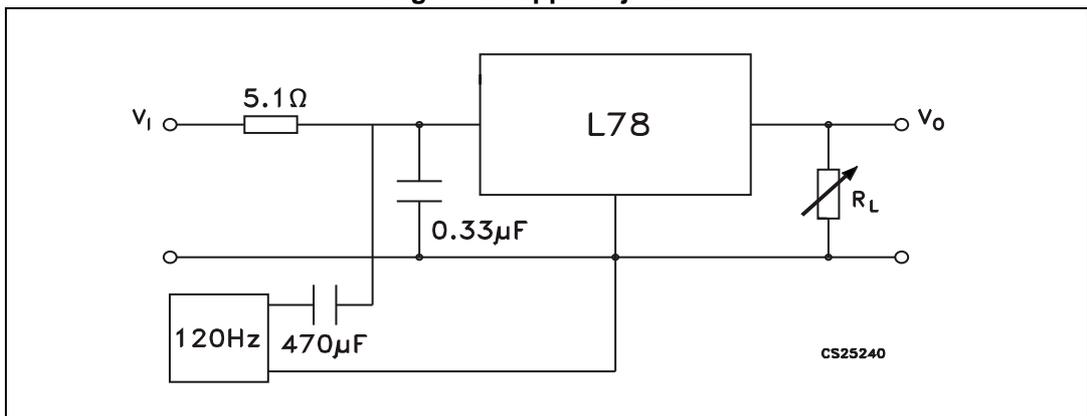


Figure 7. Ripple rejection



## 5 Electrical characteristics

$V_I = 10\text{ V}$ ,  $I_O = 1\text{ A}$ ,  $T_J = 0\text{ to }125\text{ °C}$  (L7805AC),  $T_J = -40\text{ to }125\text{ °C}$  (L7805AB), unless otherwise specified<sup>(a)</sup>.

**Table 3. Electrical characteristics of L7805A**

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_O$	Output voltage	$T_J = 25\text{ °C}$	4.9	5	5.1	V
$V_O$	Output voltage	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ , $V_I = 7.5\text{ to }18\text{ V}$	4.8	5	5.2	V
$V_O$	Output voltage	$I_O = 1\text{ A}$ , $V_I = 18\text{ to }20\text{ V}$ , $T_J = 25\text{ °C}$	4.8	5	5.2	V
$\Delta V_O^{(1)}$	Line regulation	$V_I = 7.5\text{ to }25\text{ V}$ , $I_O = 500\text{ mA}$ , $T_J = 25\text{ °C}$		7	50	mV
		$V_I = 8\text{ to }12\text{ V}$		10	50	mV
		$V_I = 8\text{ to }12\text{ V}$ , $T_J = 25\text{ °C}$		2	25	mV
		$V_I = 7.3\text{ to }20\text{ V}$ , $T_J = 25\text{ °C}$		7	50	mV
$\Delta V_O^{(1)}$	Load regulation	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$		25	100	mV
		$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$ , $T_J = 25\text{ °C}$		30	100	
		$I_O = 250\text{ to }750\text{ mA}$		8	50	
$I_q$	Quiescent current	$T_J = 25\text{ °C}$		4.3	6	mA
					6	mA
$\Delta I_q$	Quiescent current change	$V_I = 8\text{ to }23\text{ V}$ , $I_O = 500\text{ mA}$			0.8	mA
		$V_I = 7.5\text{ to }20\text{ V}$ , $T_J = 25\text{ °C}$			0.8	mA
		$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$			0.5	mA
SVR	Supply voltage rejection	$V_I = 8\text{ to }18\text{ V}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $I_O = 500\text{ mA}$		68		dB
$V_d$	Dropout voltage	$I_O = 1\text{ A}$ , $T_J = 25\text{ °C}$		2		V
eN	Output noise voltage	$T_A = 25\text{ °C}$ , $B = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$		10		$\mu\text{V}/V_O$
$R_O$	Output resistance	$f = 1\text{ kHz}$		17		$\text{m}\Omega$
$I_{sc}$	Short circuit current	$V_I = 35\text{ V}$ , $T_A = 25\text{ °C}$		0.2		A
$I_{scp}$	Short circuit peak current	$T_J = 25\text{ °C}$		2.2		A
$\Delta V_O/\Delta T$	Output voltage drift			-1.1		$\text{mV}/\text{°C}$

1. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

a. Minimum load current for regulation is 5 mA.

$V_I = 23\text{ V}$ ,  $I_O = 1\text{ A}$ ,  $T_J = 0\text{ to }125\text{ °C}$  (L7815AC),  $T_J = -40\text{ to }125\text{ °C}$  (L7815AB), unless otherwise specified<sup>(f)</sup>.

Table 8. Electrical characteristics of L7815A

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_O$	Output voltage	$T_J = 25\text{ °C}$	14.7	15	15.3	V
$V_O$	Output voltage	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ , $V_I = 17.9\text{ to }28\text{ V}$	14.4	15	15.6	V
$V_O$	Output voltage	$I_O = 1\text{ A}$ , $V_I = 28\text{ to }30\text{ V}$ , $T_J = 25\text{ °C}$	14.4	15	15.6	V
$\Delta V_O^{(1)}$	Line regulation	$V_I = 17.9\text{ to }30\text{ V}$ , $I_O = 500\text{ mA}$ , $T_J = 25\text{ °C}$		13	150	mV
		$V_I = 20\text{ to }26\text{ V}$		16	150	mV
		$V_I = 20\text{ to }26\text{ V}$ , $T_J = 25\text{ °C}$		6	75	mV
		$V_I = 17.5\text{ to }30\text{ V}$ , $T_J = 25\text{ °C}$		13	150	mV
$\Delta V_O^{(1)}$	Load regulation	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$		25	100	mV
		$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$ , $T_J = 25\text{ °C}$		30	100	
		$I_O = 250\text{ to }750\text{ mA}$		10	50	
$I_q$	Quiescent current	$T_J = 25\text{ °C}$		4.4	6	mA
					6	mA
$\Delta I_q$	Quiescent current change	$V_I = 17.5\text{ to }30\text{ V}$ , $I_O = 500\text{ mA}$			0.8	mA
		$V_I = 17.5\text{ to }30\text{ V}$ , $T_J = 25\text{ °C}$			0.8	mA
		$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$			0.5	mA
SVR	Supply voltage rejection	$V_I = 18.5\text{ to }28.5\text{ V}$ , $f = 120\text{ Hz}$ , $I_O = 500\text{ mA}$		58		dB
$V_d$	Dropout voltage	$I_O = 1\text{ A}$ , $T_J = 25\text{ °C}$		2		V
eN	Output noise voltage	$T_A = 25\text{ °C}$ , $B = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$		10		$\mu\text{V}/V_O$
$R_O$	Output resistance	$f = 1\text{ kHz}$		19		$\text{m}\Omega$
$I_{sc}$	Short circuit current	$V_I = 35\text{ V}$ , $T_A = 25\text{ °C}$		0.2		A
$I_{scp}$	Short circuit peak current	$T_J = 25\text{ °C}$		2.2		A
$\Delta V_O/\Delta T$	Output voltage drift			-1		$\text{mV}/\text{°C}$

1. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

f. Minimum load current for regulation is 5 mA.

## LM79XX Series 3-Terminal Negative Regulators

 Check for Samples: [LM7905](#), [LM7912](#), [LM7915](#)

### FEATURES

- Thermal, Short Circuit and Safe Area Protection
- High Ripple Rejection
- 1.5A Output Current
- 4% Tolerance on Preset Output Voltage

### DESCRIPTION

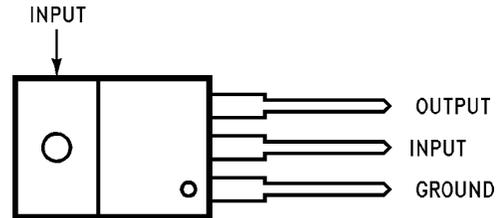
The LM79XX series of 3-terminal regulators is available with fixed output voltages of  $-5V$ ,  $-12V$ , and  $-15V$ . These devices need only one external component—a compensation capacitor at the output. The LM79XX series is packaged in the TO-220 power package and is capable of supplying 1.5A of output current.

These regulators employ internal current limiting safe area protection and thermal shutdown for protection against virtually all overload conditions.

Low ground pin current of the LM79XX series allows output voltage to be easily boosted above the preset value with a resistor divider. The low quiescent current drain of these devices with a specified maximum change with line and load ensures good regulation in the voltage boosted mode.

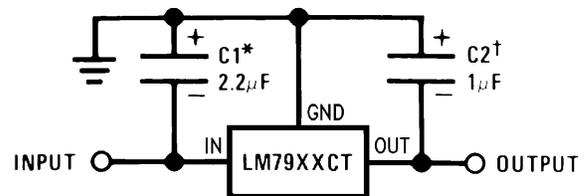
For applications requiring other voltages, see LM137 datasheet.

### Connection Diagram



**Figure 1. TO-220 Package Front View**  
See Package Number NDE0003B

### Typical Applications



\*Required if regulator is separated from filter capacitor by more than 3". For value given, capacitor must be solid tantalum. 25µF aluminum electrolytic may be substituted.

†Required for stability. For value given, capacitor must be solid tantalum. 25µF aluminum electrolytic may be substituted. Values given may be increased without limit.

For output capacitance in excess of 100µF, a high current diode from input to output (1N4001, etc.) will protect the regulator from momentary input shorts.

**Figure 2. Fixed Regulator**



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

All trademarks are the property of their respective owners.



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS<sup>(1)</sup>

Input Voltage	
( $V_o = -5V$ )	-25V
( $V_o = -12V$ and $-15V$ )	-35V
Input-Output Differential	
( $V_o = -5V$ )	25V
( $V_o = -12V$ and $-15V$ )	30V
Power Dissipation <sup>(2)</sup>	Internally Limited
Operating Junction Temperature Range	0°C to +125°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	230°C

- (1) Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is intended to be functional, but do not ensure Specific Performance limits. For ensured specifications and test conditions, see the Electrical Characteristics.
- (2) Refer to [DESIGN CONSIDERATIONS](#) for details.

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Conditions unless otherwise noted:  $I_{OUT} = 500mA$ ,  $C_{IN} = 2.2\mu F$ ,  $C_{OUT} = 1\mu F$ ,  $0^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C$ , Power Dissipation  $\leq 1.5W$ .

Part Number			LM7905C			Units
Output Voltage			-5V			
Input Voltage (unless otherwise specified)			-10V			
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	
$V_o$	Output Voltage	$T_J = 25^\circ C$ $5mA \leq I_{OUT} \leq 1A$ , $P \leq 15W$	-4.8	-5.0	-5.2	V
			-4.75		-5.25	V
				( $-20 \leq V_{IN} \leq -7$ )		V
$\Delta V_o$	Line Regulation	$T_J = 25^\circ C$ , <sup>(1)</sup>		8	50	mV
				( $-25 \leq V_{IN} \leq -7$ )		V
				2	15	mV
		( $-12 \leq V_{IN} \leq -8$ )		V		
$\Delta V_o$	Load Regulation	$T_J = 25^\circ C$ , <sup>(1)</sup> $5mA \leq I_{OUT} \leq 1.5A$ $250mA \leq I_{OUT} \leq 750mA$		15	100	mV
				5	50	mV
$I_Q$	Quiescent Current	$T_J = 25^\circ C$		1	2	mA
$\Delta I_Q$	Quiescent Current Change	With Line			0.5	mA
		With Load, $5mA \leq I_{OUT} \leq 1A$			0.5	mA
$V_n$	Output Noise Voltage Ripple Rejection	$T_A = 25^\circ C$ , $10Hz \leq f \leq 100Hz$ $f = 120Hz$		125		$\mu V$
			54	66		dB
	Dropout Voltage	$T_J = 25^\circ C$ , $I_{OUT} = 1A$		1.1		V
$I_{OMAX}$	Peak Output Current	$T_J = 25^\circ C$		2.2		A
	Average Temperature Coefficient of Output Voltage	$I_{OUT} = 5mA$ , $0^\circ C \leq T_J \leq 100^\circ C$		0.4		mV/°C

- (1) Regulation is measured at a constant junction temperature by pulse testing with a low duty cycle. Changes in output voltage due to heating effects must be taken into account.

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

 Conditions unless otherwise noted:  $I_{OUT} = 500\text{mA}$ ,  $C_{IN} = 2.2\mu\text{F}$ ,  $C_{OUT} = 1\mu\text{F}$ ,  $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$ , Power Dissipation  $\leq 1.5\text{W}$ .

Part Number			LM7912C			LM7915C			Units
Output Voltage			-12V			-15V			
Input Voltage (unless otherwise specified)			-19V			-23V			
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
$V_O$	Output Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	-11.5	-12.0	-12.5	-14.4	-15.0	-15.6	V
		$5\text{mA} \leq I_{OUT} \leq 1\text{A}$ ,	-11.4		-12.6	-14.25		-15.75	V
		$P \leq 15\text{W}$	$(-27 \leq V_{IN} \leq -14.5)$			$(-30 \leq V_{IN} \leq -17.5)$			V
$\Delta V_O$	Line Regulation	$T_J = 25^\circ\text{C}$ , <sup>(1)</sup>	5		80	5		100	mV
			$(-30 \leq V_{IN} \leq -14.5)$			$(-30 \leq V_{IN} \leq -17.5)$			V
			3		30	3		50	mV
			$(-22 \leq V_{IN} \leq -16)$			$(-26 \leq V_{IN} \leq -20)$			V
$\Delta V_O$	Load Regulation	$T_J = 25^\circ\text{C}$ , <sup>(1)</sup> $5\text{mA} \leq I_{OUT} \leq 1.5\text{A}$ $250\text{mA} \leq I_{OUT} \leq 750\text{mA}$		15	200		15	200	mV
				5	75		5	75	mV
$I_Q$	Quiescent Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$		1.5	3		1.5	3	mA
$\Delta I_Q$	Quiescent Current Change	With Line	0.5			0.5			mA
		With Load, $5\text{mA} \leq I_{OUT} \leq 1\text{A}$	$(-30 \leq V_{IN} \leq -14.5)$			$(-30 \leq V_{IN} \leq -17.5)$			V
$V_n$	Output Noise Voltage Ripple Rejection	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $10\text{Hz} \leq f \leq 100\text{Hz}$ $f = 120\text{Hz}$	300			375			$\mu\text{V}$
			54	70		54	70		dB
	Dropout Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$ , $I_{OUT} = 1\text{A}$	$(-25 \leq V_{IN} \leq -15)$			$(-30 \leq V_{IN} \leq -17.5)$			V
			1.1			1.1			V
$I_{OMAX}$	Peak Output Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$		2.2			2.2		A
	Average Temperature Coefficient of Output Voltage	$I_{OUT} = 5\text{mA}$ , $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq 100^\circ\text{C}$		-0.8			-1.0		mV/°C

(1) Regulation is measured at a constant junction temperature by pulse testing with a low duty cycle. Changes in output voltage due to heating effects must be taken into account.

## DESIGN CONSIDERATIONS

The LM79XX fixed voltage regulator series has thermal overload protection from excessive power dissipation, internal short circuit protection which limits the circuit's maximum current, and output transistor safe-area compensation for reducing the output current as the voltage across the pass transistor is increased.

Although the internal power dissipation is limited, the junction temperature must be kept below the maximum specified temperature (125°C) in order to meet data sheet specifications. To calculate the maximum junction temperature or heat sink required, the following thermal resistance values should be used:

Package	Typ $\theta_{JC}$ °C/W	Max $\theta_{JC}$ °C/W	Typ $\theta_{JA}$ °C/W	Max $\theta_{JA}$ °C/W
TO-220	3.0	5.0	60	40

$$P_{D\text{ MAX}} = \frac{T_{J\text{ MAX}} - T_A}{\theta_{JC} + \theta_{CA}} \text{ or } \frac{T_{J\text{ MAX}} - T_A}{\theta_{JA}}$$

$$\theta_{CA} = \theta_{CS} + \theta_{SA} \text{ (without heat sink)} \quad (1)$$

Solving for  $T_J$ :

$$T_J = T_A + P_D (\theta_{JC} + \theta_{CA})$$

or

$$= T_A + P_D \theta_{JA} \text{ (without heat sink)}$$

where

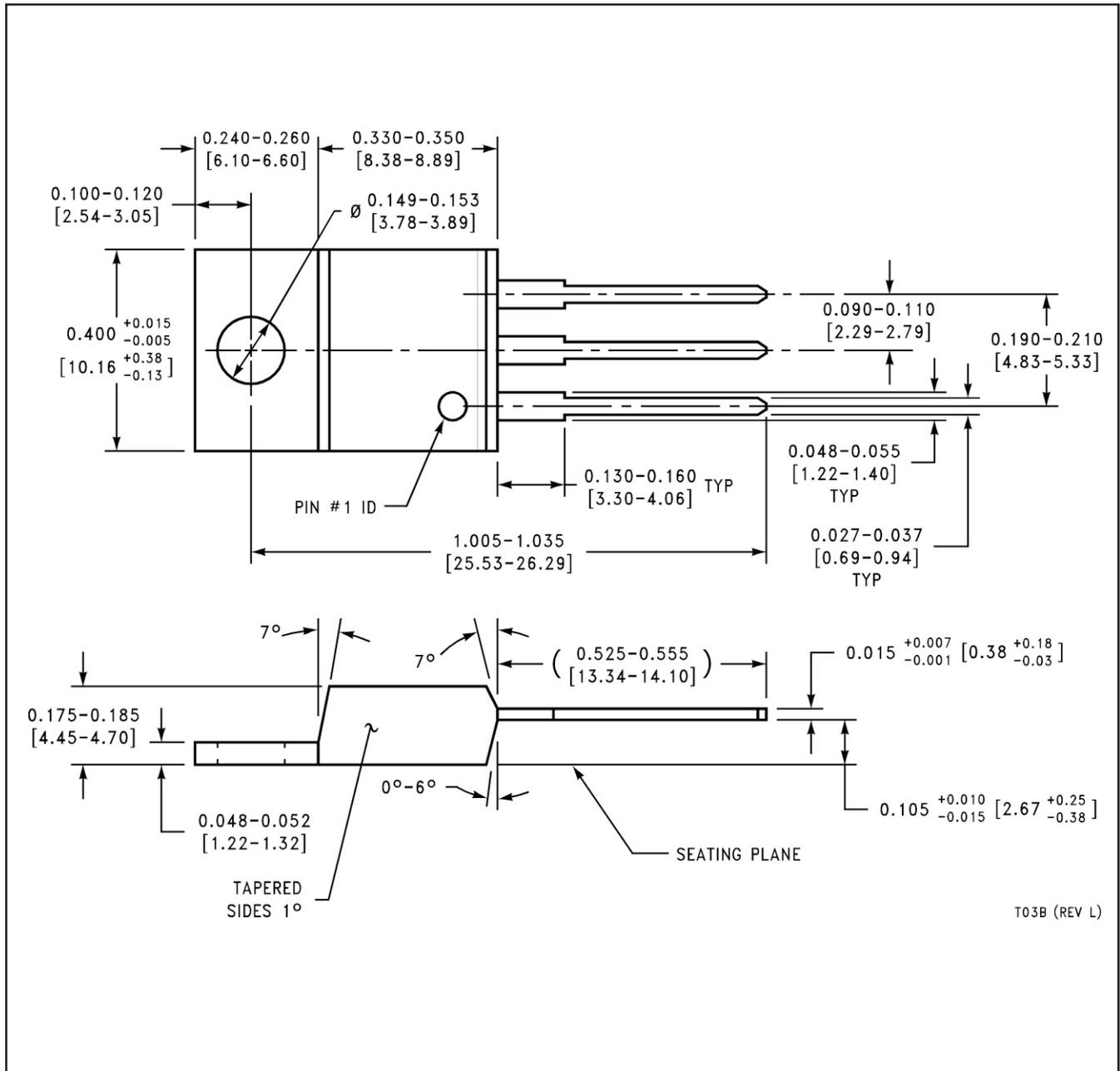
- $T_J$  = Junction Temperature
- $T_A$  = Ambient Temperature
- $P_D$  = Power Dissipation
- $\theta_{JA}$  = Junction-to-Ambient Thermal Resistance
- $\theta_{JC}$  = Junction-to-Case Thermal Resistance
- $\theta_{CA}$  = Case-to-Ambient Thermal Resistance
- $\theta_{CS}$  = Case-to-Heat Sink Thermal Resistance
- $\theta_{SA}$  = Heat Sink-to-Ambient Thermal Resistance

### Typical Applications

Bypass capacitors are necessary for stable operation of the LM79XX series of regulators over the input voltage and output current ranges. Output bypass capacitors will improve the transient response by the regulator.

The bypass capacitors, (2.2µF on the input, 1.0µF on the output) should be ceramic or solid tantalum which have good high frequency characteristics. If aluminum electrolytics are used, their values should be 10µF or larger. The bypass capacitors should be mounted with the shortest leads, and if possible, directly across the regulator terminals.

NDE0003B





Moteurs C.C. Brushless

Motoréducteurs Brushless

V.01.08

# PARVALUX

[www.parvalux.fr](http://www.parvalux.fr)

4 rue Guynemer – 78280 Guyancourt

Tél : 01 30 43 72 73 – Fax : 01 30 44 10 63

Email : [parvalux@parvalux.fr](mailto:parvalux@parvalux.fr)

# PBL42 motor data



- 42 mm square motors in 4 different lengths
- Continuous torque 0.0625 - 0.2 Nm
- 300 mm flying leads terminated in single 8-way in-line pluggable terminal block connector
- Insulation class F
- Environmental protection IP54 (IP50 at exposed motor shafts)
- Available with or without controller and gearbox
- Standard gearbox range: S, SWS. Other gearboxes available.
- Alternative mechanical interfaces available

## PBL42 motors

Motor type		PBL42-47	PBL42-67	PBL42-87	PBL42-107
Max rated speed	rpm	4000	4000	4000	4000
Rated torque	Nm	0.0625	0.125	0.17	0.2
Rated power at max rated speed	W	26	52	71	84
Peak torque	Nm	0.188	0.375	0.555	0.75
DC bus voltage nominal	V	24	24	24	24
Back EMF	V/krpm	4	4	4	4
Torque constant	Nm/A	0.047	0.047	0.047	0.047
Rated current	A rms	1.3	2.7	3.6	4.3
Current for peak torque	A rms	4.4	8.9	13	18
Stator resistance (25 °C)	ohms	1.7	0.85	0.5	0.36
Number of poles		8	8	8	8
Dimension 'A'	mm	47	67	87	107
Inertia	gcm <sup>2</sup>	32	56	80	104
Weight	kg	0.39	0.56	0.73	0.9
Connector size - pin pitch	mm	3.5	3.5	5.08	5.08

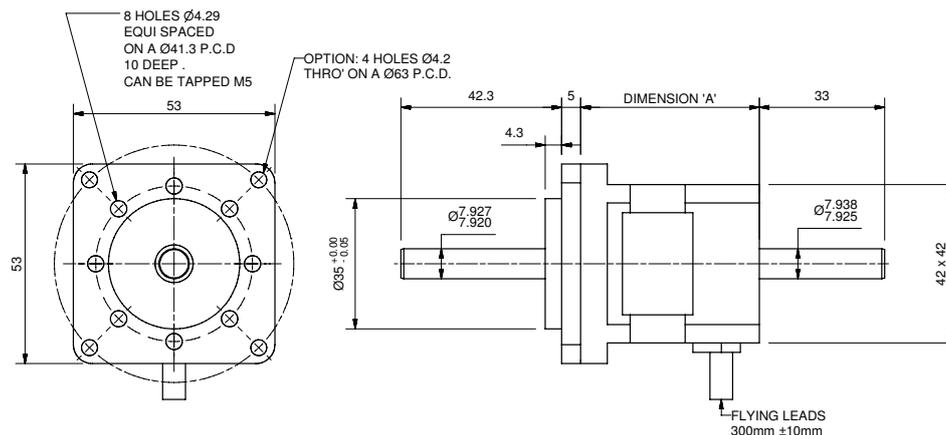
## PBL42 motor and controller packages

Motor type		PBL42-47	PBL42-67	PBL42-87	PBL42-107
Controller type		PBLC542-47-24	PBLC542-67-24	PBLCN42-87-24	PBLCB42-107-24
Controller type/drawing ref.		S	S	N	B
Max rated speed	rpm	4000	4000	4000	4000
Rated torque	Nm	0.0625	0.125	0.17	0.2
15 minute rating	Nm	0.078	0.16	0.23	0.31
Peak torque (duration 6 seconds)	Nm	0.125	0.25	0.37	0.5
DC bus voltage nominal	V	24	24	24	24
DC bus voltage min-max	V	16-32	16-32	16-32	16-32
DC bus current at no load and max rated speed	A	0.07	0.1	0.13	0.16
DC bus current at rated torque and max rated speed	A	1.8	3.3	4.3	5
Controller cont. current	A	2.5	5	7.5	10
Controller peak current	A	5	10	15	20

- Maximum speed is reduced if DC bus voltage is below the nominal value
- General tolerance on data is +/- 10%
- Values shown are at normal operating temperature unless stated

## Outline drawing - PBL42 with standard shaft

Option - available without rear shaft



# Technical Information

## Connector wiring

Pin		Description	Wire colour	Wire type	Wire size	
(single connector)	(2 connectors)				(PBL42/60)	(PBL86)
1	1	Motor phase U	YEL	UL1332	AWG18	AWG16
2	2	Motor phase V	RED	UL1332	AWG18	AWG16
3	3	Motor phase W	BLK	UL1332	AWG18	AWG16
4	1	Hall sensor 0V	BLK	UL1332	AWG22	AWG22
5	2	Hall sensor U	BLU	UL1332	AWG22	AWG22
6	3	Hall sensor V	GRN	UL1332	AWG22	AWG22
7	4	Hall sensor W	WHT	UL1332	AWG22	AWG22
8	5	Hall sensor supply	RED	UL1332	AWG22	AWG22

## Motor Commutation

For clockwise rotation, motor phases are powered according to the table.

For anticlockwise rotation, HIGH and LOW phases are interchanged.

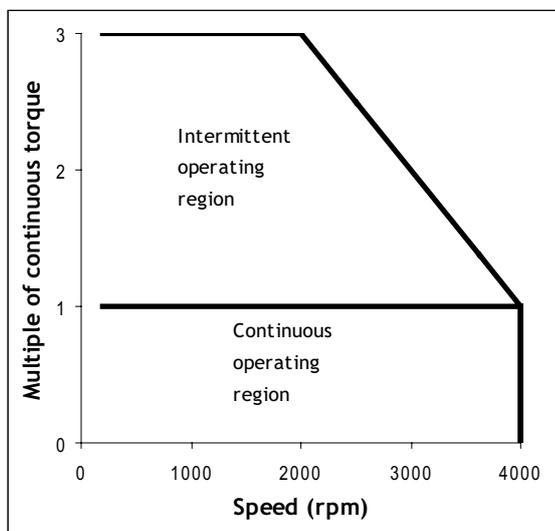
Hall sensor outputs			Motor phases powered		
Hall U	Hall V	Hall W	Phase U	Phase V	Phase W
1	0	0	HIGH	X	LOW
1	1	0	X	HIGH	LOW
0	1	0	LOW	HIGH	X
0	1	1	LOW	X	HIGH
0	0	1	X	LOW	HIGH
1	0	1	HIGH	LOW	X

## Typical torque/speed characteristics of motor

### PBL42/60 motor only

Continuous rated torque available up to 4000 rpm

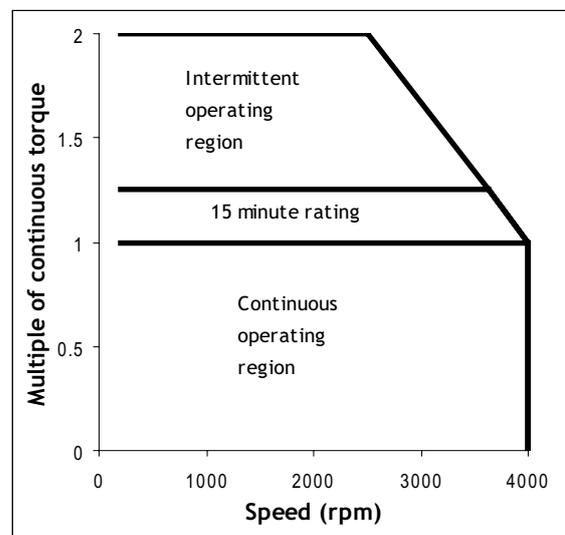
Peak torque 3x continuous torque up to 2000 rpm



### PBL42/60 motor and controller package

Continuous rated torque available up to 4000 rpm

Peak torque 2x continuous torque up to 2500 rpm



# RS

DC SERVOMOTORS  
HIGH DYNAMIC  
0.05 to 13 Nm



PARVEX



PARVEX company is a leader in the motion control industry-particularly with quality and innovation. One of the many products from PARVEX is the modern range of DC Servomotors.

## FEATURES

- ◆ Increased power/weight ratio compared to RX range
- ◆ Low time constant and very high performance.
- ◆ Smaller size to meet your exact requirements
- ◆ Complete motor range from 0.055 to 13 Nm. (0,50 lb-in to 115 lb-in)
- ◆ Strict quality control at all stages of manufacture.
- ◆ Ball-bearings lubricated for life
- ◆ Excellent slow and smooth running characteristics.
- ◆ Designed for advanced servomechanisms and robotics.
- ◆ The most competitive performance/price ratio.

## CONSTRUCTION

- ◆ 4 poles servomotor with rare earth magnets.
- ◆ Protection
  - IP 40 (RS1 to RS4).                      IP44 as option
  - IP 54 (RS5 and RS6).                    IP55 as option
- ◆ Insulation : F class
- ◆ Cable length 1 meter

## COMPLIANCE WITH “ CE ”STANDARDS

RS (except RS6) servomotors meet directive 73/23/ECC dated 19th February 1973 (amended by directive 93/68/EEC dated 22 July 1993) and comply with standards EN 60034-1 and IEC 34-1/1994.

Compliance with these standards requires installation in accordance with our recommendations. In addition, installation must be on a mechanical support providing good thermal conduction and not exceeding 40° C in the vicinity of the motor flange.

**Applications** : high-dynamic servomechanisms, spark erosion machine, pick and place, small robotics applications, gantry cranes, office technology

## ACCESSORIES

### PRECISION TACHOMETER

The PARVEX tachometers, designed for high precision, are built on a hollow shaft in order to increase the stiffness

Motor	Tacho	Voltage gradient	Resistance at 25°C	Inertia	Weight
		Volt/1000 rpm	ohm	Kgm <sup>2</sup> .10 <sup>-5</sup>	kg
RS1	TBN 103	3	60	0.1	0.1
RS2...RS4	TBN 206	6	47	0.5	0.2
RS5 + RS6	TBN 306	6	14.6	2.5	0.3

### RESOLVER

RS servomotors (except RS1) may be fitted with a resolver. The signals emitted by the resolver generate a speed information (role usually fulfilled by a tachometric dynamo) and may also be used for elaborating information simulating an optical encoder (1024 lines per revolution).

### HOLDING BRAKE

The brake is primarily a holding brake. Do not use for dynamic braking. Brake applied on de-energization.

Motor	Holding torque		Voltage (±10%)	Rated current	Inertia	Weight
	at 20°C	at 100°C				
	Nm	Nm	V=	A	Kgm <sup>2</sup> .10 <sup>-5</sup>	kg
RS2	0.6	0.55	24	0.34	0.2	0.2
RS3 + RS4	1.5	1.4	24	0.46	0.6	0.18
RS5	6	5.5	24	0.54	5.3	0.45
RS6	12	11.5	24	0.88	15.7	0.9

### INCREMENTAL ENCODER

All models provide complementary outputs, marker and line drivers, 5 V supply.

Coonection	K9	C4	C6 B
A	White	Braun	5
$\bar{A}$	White/Black	Green	6
B	Blue	Grey	8
$\bar{B}$	Blue/White	Rosa	1
mark0	Green	Red	3
mark0	Green/White	Black	4
+5 V Supply	Red	Braun/Green	12
+5 V feedback	-	Blue	2
0 V Supply	Black	White/Green	10
0 V feedback	-	White	11

The space saving K9 encoder is directly mounted on the motor shaft, therefore avoiding axial loading.

The C4 encoder has a hollow shaft and flexible mounting arrangement which allows a very compact design.

The C6B is fully protected (IP 65) by a cast aluminium cover.

Motor	Encoder	Connection	Resolution		Inertia	Weight
			Standard	Option		
RS1...RS4	K9	Cable 1m	500	250	0.03	0.07
RS1...RS4	C4	Cable 1m	500	1000-2000	0.23	0.20
RS5 + RS6	C6 B	Connector	500-1000	2500-5000	0.3	0.45

C6 B



PPR can be multiplied by 4 by the CNC.

# PERFORMANCE

Data (40°C ambient) From factor ≤ 1.02	Continuous torque at low speed		Continuous current at low speed		Rated voltage	Rated speed	Peak current at low speed	E.M.F. at 1000 rpm (25°C)	Torque constant (25°C)		Armature resistance (25°C)	Armature inductance	Inertia		Thermal time constant	Thrust load		Radial load **		Weight				
	Mo	Nm	Io	A					U	N			Imax	Ke		Nm/A	lb.in./A	Rb	L		J	kg.m <sup>2</sup> x 10 <sup>-5</sup>	lb.in.sec	Tth
RS 110 M	CE	0,05	0,44	1,5	20,7	3000	4	3,85	0,037	0,327	4,5	1,6	0,24	0,2	4,2	3	6,74	6	13,2	0,27	1			
RS 120 G	CE	0,092	0,81	2,3	21,2	3000	7	4,4	0,042	0,37	2,3	1,1	0,41	0	5,2	3	6,74	6	13,5	0,36	0,8			
RS 130 E	CE	0,13	1,15	2,7	23,7	3000	9	5,3	0,051	0,451	1,93	1	0,58	0,5	6	3	6,74	6	13,2	0,45	1			
RS 210 L	CE	0,11	0,97	2,5	24	3000	7	5	0,048	0,42	2,33	1,1	1,3	1	5	10	22,5	18	40,5	0,54	1,2			
RS 220 F	CE	0,225	2	4,1	25,4	3000	12	6	0,057	0,504	1,12	0,65	1,95	1,7	6,9	10	22,5	18	39,7	0,7	2			
RS 220 K	CE	0,232	2,05	2,8	38,6	3000	8	9,2	0,088	0,78	2,7	1,53	1,95	2	6,9	10	22,5	18	40,5	0,7	1,6			
RS 230 C	CE	0,31	2,74	5,6	24	3000	18	6	0,057	0,504	0,67	0,42	2,6	2,3	7,5	10	22,5	18	39,7	0,86	2			
RS 240 B	CE	0,39	3,45	6	27,6	3000	20	7,2	0,068	0,6	0,68	0,45	3,25	3	7,5	10	22,5	18	40,5	1	2,2			
RS 310 N	CE	0,28	2,5	2,6	49	3000	7	12,3	0,117	1,04	3,64	4,4	5,4	4,8	9	15	33,7	28	61,7	0,9	2			
RS 320 H	CE	0,54	4,8	4,5	49	3000	13	13,3	0,127	1,12	1,52	2,2	8,3	7	7	15	33,7	28	62,9	1,3	2,9			
RS 330 E	CE	0,78	6,9	5,9	51	3000	18,5	14,3	0,137	1,21	1	1,65	11	9,7	6,2	15	33,7	28	61,7	1,6	4			
RS 340 C	CE	0,98	8,7	6,9	53	3000	23	15,3	0,146	1,29	0,8	1,4	14	12	6	15	33,7	28	62,9	2	4,5			
RS 410 R	CE	0,48	4,25	3,6	60	3000	10	15,6	0,15	1,33	2,47	4,2	13,7	12,1	14	20	45	40	88,2	1,2	3			
RS 420 J	CE	0,93	8,2	6,2	60	3000	19	16,6	0,16	1,42	0,96	1,9	22,5	20	12,5	20	45	40	89,9	1,8	4			
RS 430 F	CE	1,3	11,5	8,1	43	2000	28	17,5	0,167	1,48	0,59	1,33	31	27,4	11,5	20	45	40	88,2	2,4	5			
RS 430 H	CE	1,36	12	6,6	78	3000	21	22,5	0,215	1,9	0,94	2,2	31	27	11,5	20	45	40	89,9	2,4	5,4			
RS 440 G	CE	1,74	15,4	7	90	3000	24	27	0,256	2,27	0,9	2,2	40	35,4	10,5	20	45	40	88,2	3	7			
RS 510 L	CE	1,9	16,8	7,9	82	2700	21	26,6	0,254	2,25	0,71	3,6	100	89	18	23	51,7	70	157	5,1	11,5			
RS 520 G	CE	3,1	27,4	10,9	92	2700	32	31	0,296	2,62	0,4	2,34	135	119	17,8	23	51,7	70	154	6,3	14			
RS 530 E	CE	4	35,4	13	97	2700	42	33	0,32	2,83	0,29	1,74	170	150	19	23	51,7	70	157	7,5	17			
RS 540 C	CE	5	44,3	15	104	2700	50	36	0,344	3,04	0,225	1,5	205	181	20,6	23	51,7	70	154	8,7	19			
RS 620 G	-	8	70,8	22,3	100	2400	82	38,5	0,37	3,27	0,155	1,78	530	469	26,7	26	58,5	80	180	11,5	26			
RS 630 F	-	10,8	95,6	25	100	2000	90	46	0,44	3,89	0,134	1,62	680	602	31	26	58,5	80	176	14	31			
RS 640 E	-	13	115	28	105	2000	90	49	0,47	4,16	0,12	1,38	830	735	32,7	26	58,5	80	180	16,3	36,6			

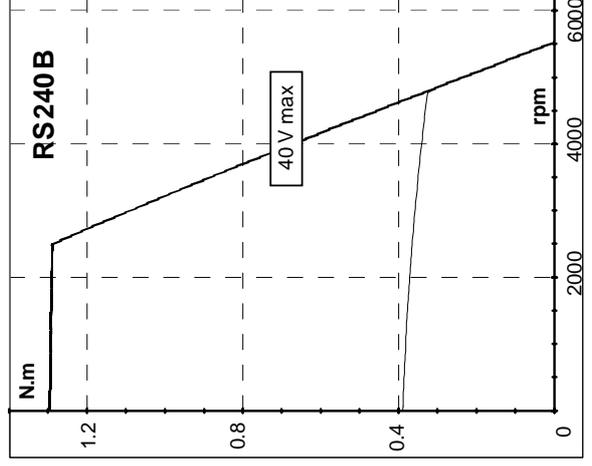
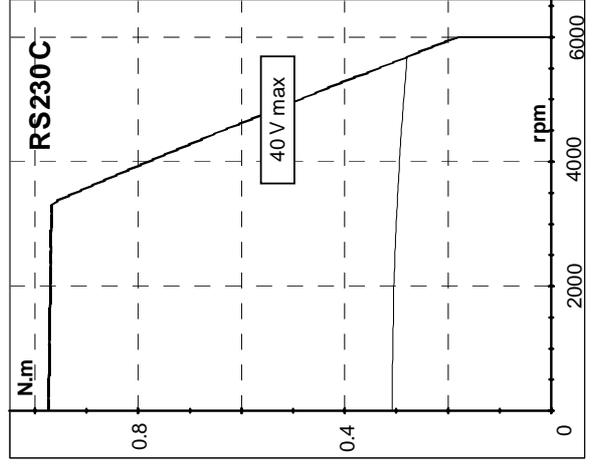
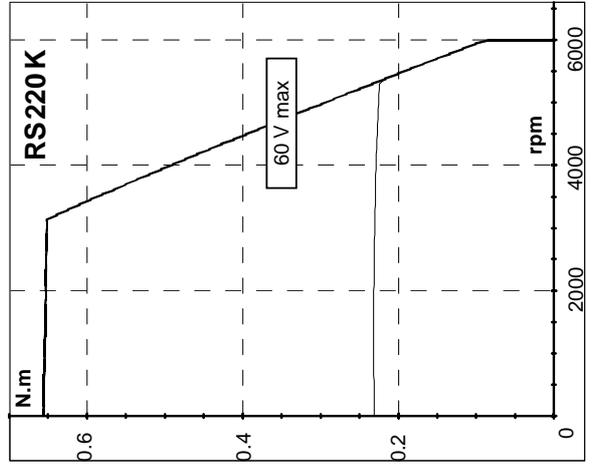
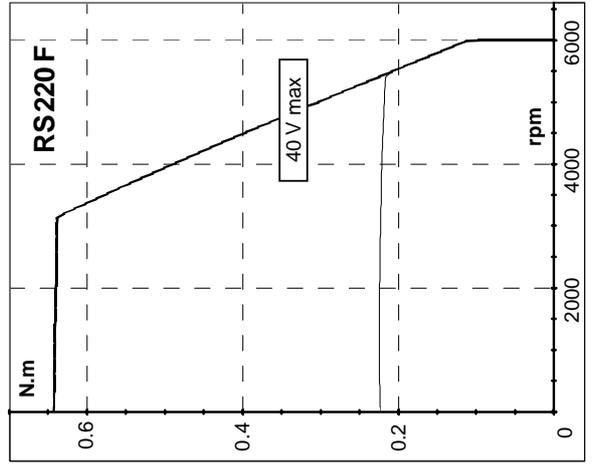
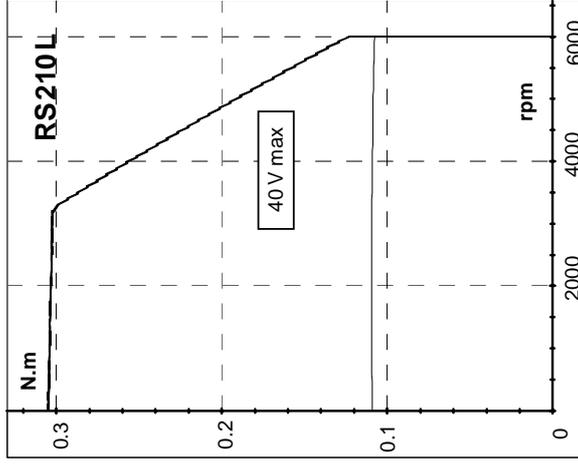
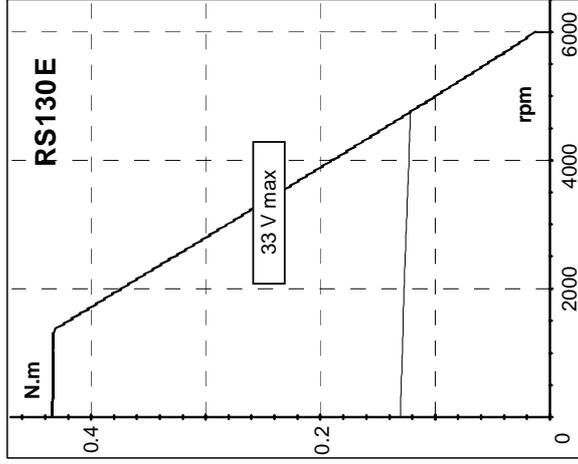
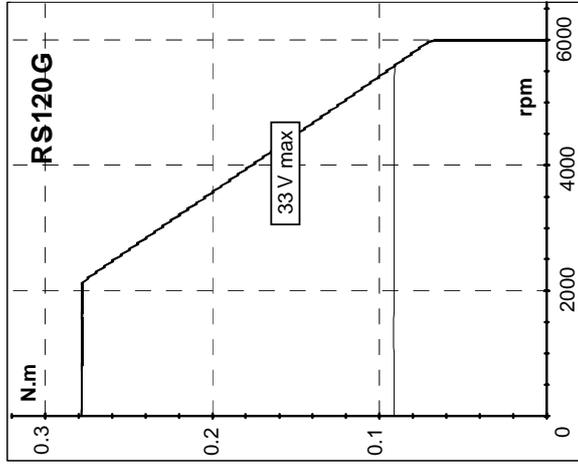
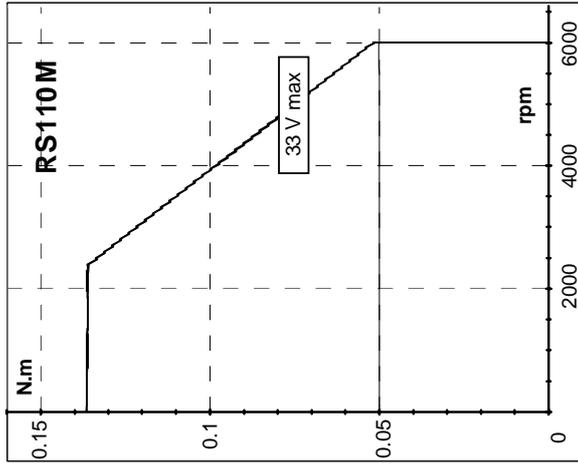
\* not cumulative

\*\* at half shaft length

# Performance curves

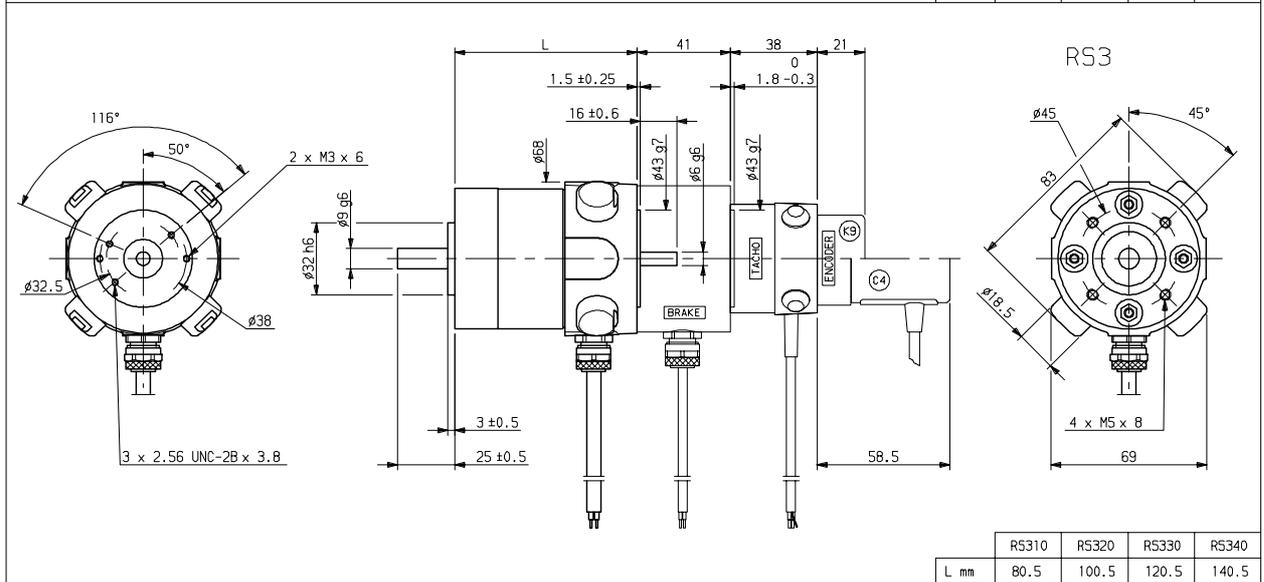
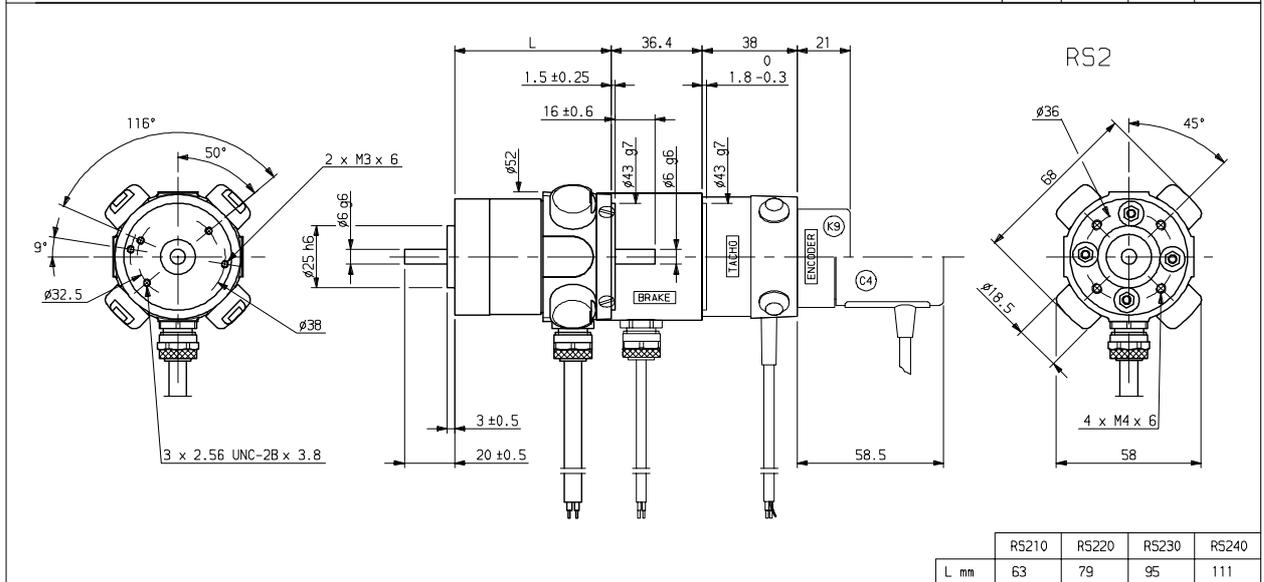
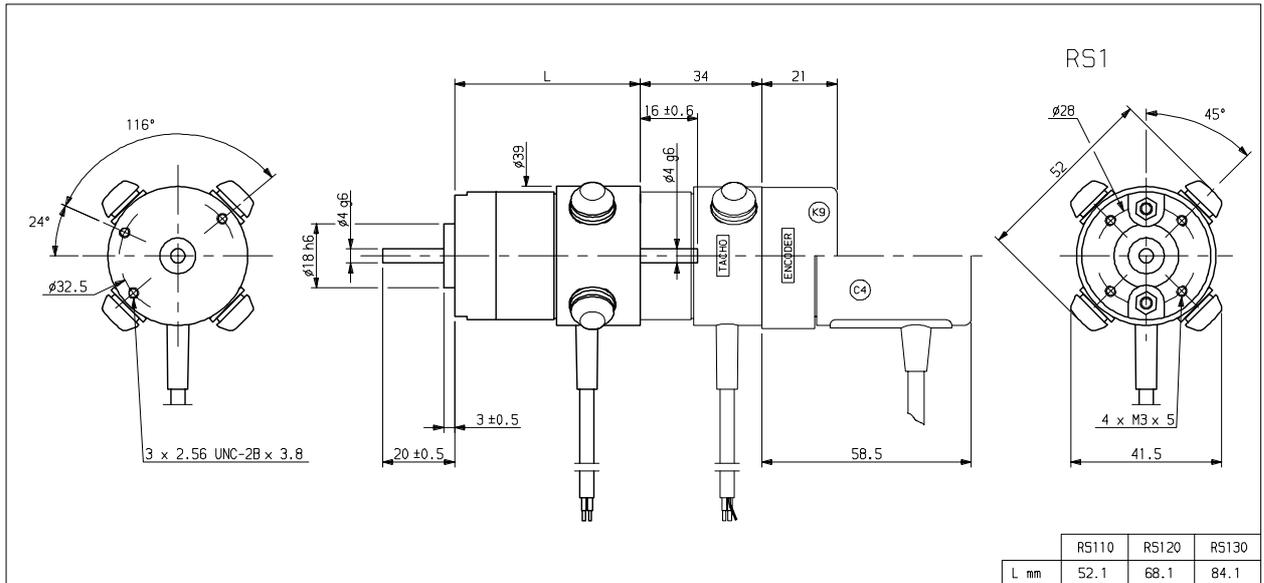
— thermal continuous duty

— intermittent duty



# DIMENSIONS

## MOTOR + BRAKE + TACHO + ENCODER



# 2N3055(NPN), MJ2955(PNP)

Preferred Device

## Complementary Silicon Power Transistors

Complementary silicon power transistors are designed for general-purpose switching and amplifier applications.

### Features

- DC Current Gain –  $h_{FE} = 20-70 @ I_C = 4 \text{ A dc}$
- Collector–Emitter Saturation Voltage –  
 $V_{CE(sat)} = 1.1 \text{ Vdc (Max) @ } I_C = 4 \text{ A dc}$
- Excellent Safe Operating Area
- Pb–Free Packages are Available\*

### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector–Emitter Voltage	$V_{CEO}$	60	Vdc
Collector–Emitter Voltage	$V_{CER}$	70	Vdc
Collector–Base Voltage	$V_{CB}$	100	Vdc
Emitter–Base Voltage	$V_{EB}$	7	Vdc
Collector Current – Continuous	$I_C$	15	A dc
Base Current	$I_B$	7	A dc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate Above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	115 0.657	W W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	–65 to +200	$^\circ\text{C}$

Maximum ratings are those values beyond which device damage can occur. Maximum ratings applied to the device are individual stress limit values (not normal operating conditions) and are not valid simultaneously. If these limits are exceeded, device functional operation is not implied, damage may occur and reliability may be affected.

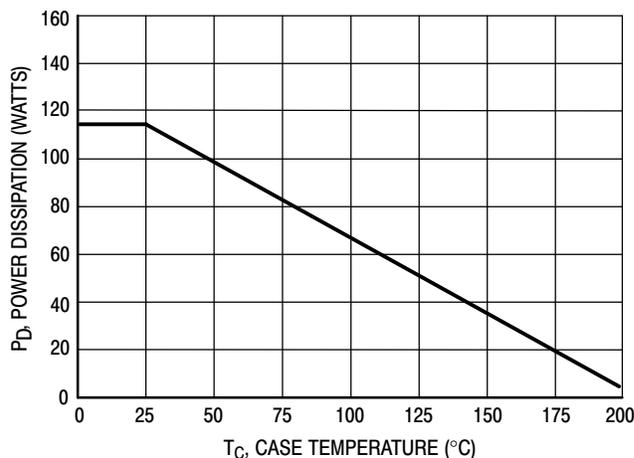


Figure 1. Power Derating

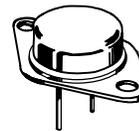
\*For additional information on our Pb–Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

## 15 AMPERE POWER TRANSISTORS COMPLEMENTARY SILICON 60 VOLTS, 115 WATTS



TO-204AA (TO-3)  
CASE 1-07  
STYLE 1

### MARKING DIAGRAM



xxxx55 = Device Code  
xxxx = 2N30 or MJ20  
G = Pb–Free Package  
A = Location Code  
YY = Year  
WW = Work Week  
MEX = Country of Origin

### ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
2N3055	TO–204AA	100 Units / Tray
2N3055G	TO–204AA (Pb–Free)	100 Units / Tray
MJ2955	TO–204AA	100 Units / Tray
MJ2955G	TO–204AA (Pb–Free)	100 Units / Tray

Preferred devices are recommended choices for future use and best overall value.

## 2N3055(NPN), MJ2955(PNP)

### Thermal Characteristics

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	1.52	$^{\circ}C/W$

### Electrical Characteristics ( $T_C = 25^{\circ}C$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
----------------	--------	-----	-----	------

#### OFF CHARACTERISTICS\*

Collector-Emitter Sustaining Voltage (Note 1) ( $I_C = 200$ mAdc, $I_B = 0$ )	$V_{CEO(sus)}$	60	–	Vdc
Collector-Emitter Sustaining Voltage (Note 1) ( $I_C = 200$ mAdc, $R_{BE} = 100 \Omega$ )	$V_{CER(sus)}$	70	–	Vdc
Collector Cutoff Current ( $V_{CE} = 30$ Vdc, $I_B = 0$ )	$I_{CEO}$	–	0.7	mAdc
Collector Cutoff Current ( $V_{CE} = 100$ Vdc, $V_{BE(off)} = 1.5$ Vdc) ( $V_{CE} = 100$ Vdc, $V_{BE(off)} = 1.5$ Vdc, $T_C = 150^{\circ}C$ )	$I_{CEX}$	–	1.0 5.0	mAdc
Emitter Cutoff Current ( $V_{BE} = 7.0$ Vdc, $I_C = 0$ )	$I_{EBO}$	–	5.0	mAdc

#### ON CHARACTERISTICS\* (Note 1)

DC Current Gain ( $I_C = 4.0$ Adc, $V_{CE} = 4.0$ Vdc) ( $I_C = 10$ Adc, $V_{CE} = 4.0$ Vdc)	$h_{FE}$	20 5.0	70 –	–
Collector-Emitter Saturation Voltage ( $I_C = 4.0$ Adc, $I_B = 400$ mAdc) ( $I_C = 10$ Adc, $I_B = 3.3$ Adc)	$V_{CE(sat)}$	–	1.1 3.0	Vdc
Base-Emitter On Voltage ( $I_C = 4.0$ Adc, $V_{CE} = 4.0$ Vdc)	$V_{BE(on)}$	–	1.5	Vdc

#### SECOND BREAKDOWN

Second Breakdown Collector Current with Base Forward Biased ( $V_{CE} = 40$ Vdc, $t = 1.0$ s, Nonrepetitive)	$I_{s/b}$	2.87	–	Adc
---	-----------	------	---	-----

#### DYNAMIC CHARACTERISTICS

Current Gain – Bandwidth Product ( $I_C = 0.5$ Adc, $V_{CE} = 10$ Vdc, $f = 1.0$ MHz)	$f_T$	2.5	–	MHz
*Small-Signal Current Gain ( $I_C = 1.0$ Adc, $V_{CE} = 4.0$ Vdc, $f = 1.0$ kHz)	$h_{fe}$	15	120	–
*Small-Signal Current Gain Cutoff Frequency ( $V_{CE} = 4.0$ Vdc, $I_C = 1.0$ Adc, $f = 1.0$ kHz)	$f_{hfe}$	10	–	kHz

\*Indicates Within JEDEC Registration. (2N3055)

1. Pulse Test: Pulse Width  $\leq 300 \mu s$ , Duty Cycle  $\leq 2.0\%$ .

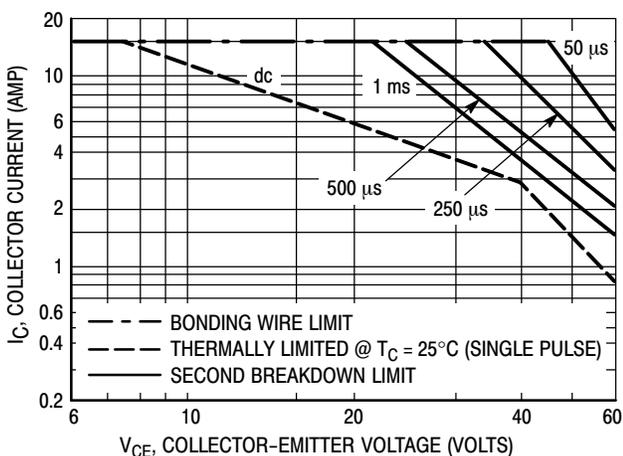
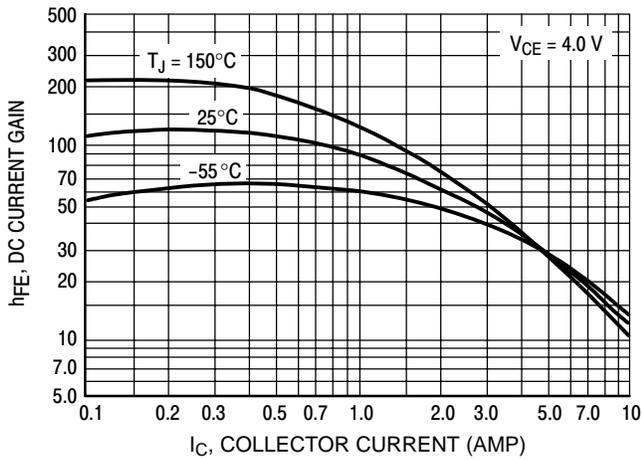


Figure 2. Active Region Safe Operating Area

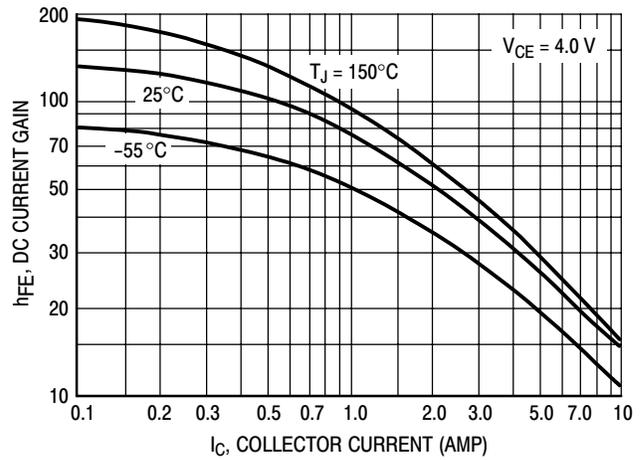
There are two limitations on the power handling ability of a transistor: average junction temperature and second breakdown. Safe operating area curves indicate  $I_C - V_{CE}$  limits of the transistor that must be observed for reliable operation; i.e., the transistor must not be subjected to greater dissipation than the curves indicate.

The data of Figure 2 is based on  $T_C = 25^{\circ}C$ ;  $T_{J(pk)}$  is variable depending on power level. Second breakdown pulse limits are valid for duty cycles to 10% but must be derated for temperature according to Figure 1.

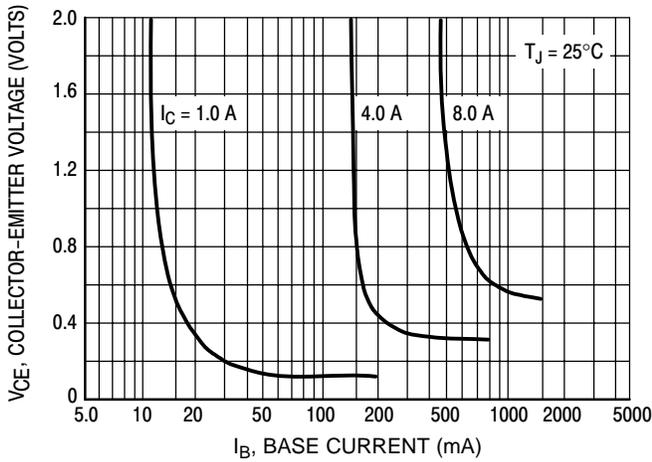
## 2N3055(NPN), MJ2955(PNP)



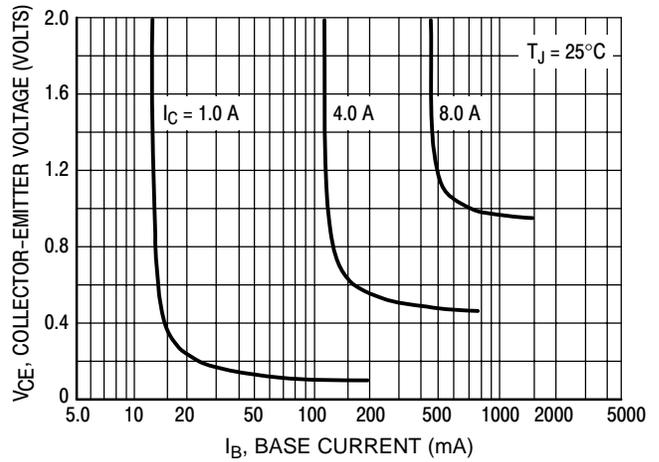
**Figure 3. DC Current Gain, 2N3055 (NPN)**



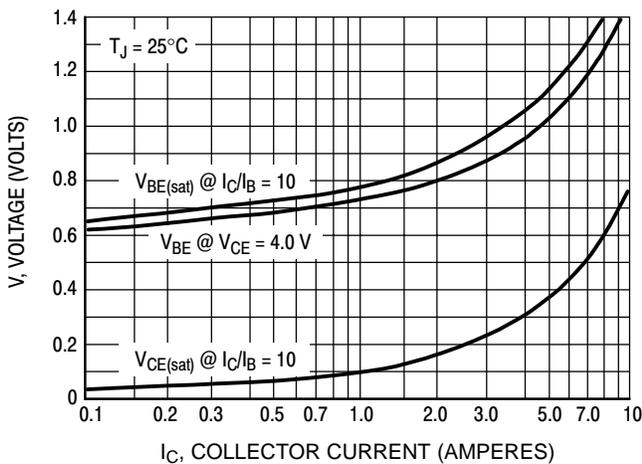
**Figure 4. DC Current Gain, MJ2955 (PNP)**



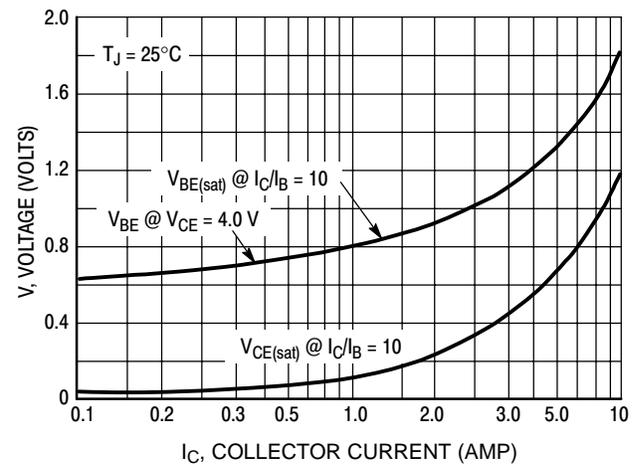
**Figure 5. Collector Saturation Region, 2N3055 (NPN)**



**Figure 6. Collector Saturation Region, MJ2955 (PNP)**



**Figure 7. "On" Voltages, 2N3055 (NPN)**

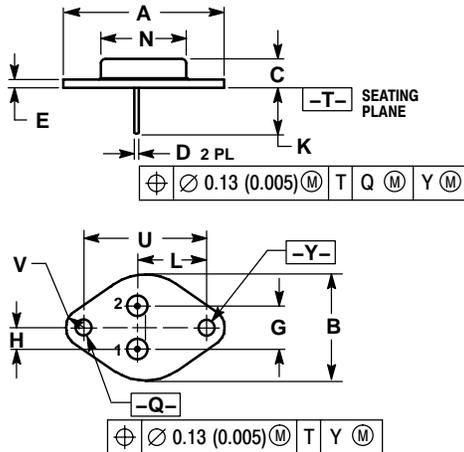


**Figure 8. "On" Voltages, MJ2955 (PNP)**

# 2N3055(NPN), MJ2955(PNP)

## PACKAGE DIMENSIONS

TO-204 (TO-3)  
CASE 1-07  
ISSUE Z



### NOTES:

- DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
- CONTROLLING DIMENSION: INCH.
- ALL RULES AND NOTES ASSOCIATED WITH REFERENCED TO-204AA OUTLINE SHALL APPLY.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.550 REF		39.37 REF	
B	---	1.050	---	26.67
C	0.250	0.335	6.35	8.51
D	0.038	0.043	0.97	1.09
E	0.055	0.070	1.40	1.77
G	0.430 BSC		10.92 BSC	
H	0.215 BSC		5.46 BSC	
K	0.440	0.480	11.18	12.19
L	0.665 BSC		16.89 BSC	
N	---	0.830	---	21.08
Q	0.151	0.165	3.84	4.19
U	1.187 BSC		30.15 BSC	
V	0.131	0.188	3.33	4.77

### STYLE 1:

- PIN 1. BASE
  - EMITTER
- CASE: COLLECTOR

ON Semiconductor and are registered trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

### PUBLICATION ORDERING INFORMATION

**LITERATURE FULFILLMENT:**  
Literature Distribution Center for ON Semiconductor  
P.O. Box 61312, Phoenix, Arizona 85082-1312 USA  
**Phone:** 480-829-7710 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada  
**Fax:** 480-829-7709 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada  
**Email:** orderlit@onsemi.com

**N. American Technical Support:** 800-282-9855 Toll Free  
USA/Canada

**Japan:** ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center  
2-9-1 Kamimeguro, Meguro-ku, Tokyo, Japan 153-0051  
**Phone:** 81-3-5773-3850

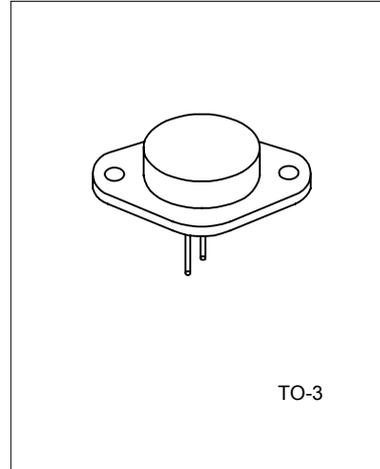
**ON Semiconductor Website:** <http://onsemi.com>

**Order Literature:** <http://www.onsemi.com/litorder>

For additional information, please contact your local Sales Representative.

## SILICON PNP TRANSISTORS

The UTC 2N2955 is a silicon PNP transistor in TO-3 metal case. It is intended for power switching circuits, series and shunt regulators, output stages and high fidelity amplifiers.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (  $T_a=25^{\circ}\text{C}$  , unless otherwise specified )

PARAMETERS	SYMBOL	VALUE	UNITS
Collector-Base Voltage	$V_{CB0}$	100	V
Collector-Emitter Voltage	$V_{CE0}$	60	V
Emitter-Base Voltage	$V_{EB0}$	7	V
Collector-Emitter Voltage	$V_{CEV}$	70	V
Collector Current	$I_c$	15	A
Collector Peak Current(1)	$I_{CM}$	15	A
Base Current	$I_B$	7	A
Base Peak Current(1)	$I_{BM}$	15	A
Total Dissipation at $T_a=25^{\circ}\text{C}$	$P_{tot}$	115	W
Storage Temperature	$T_{STG}$	-65 to 200	$^{\circ}\text{C}$
Max. Operating Junction Temperature	$T_J$	200	$^{\circ}\text{C}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS( $T_a=25^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
OFF CHARACTERISTICS						
Collector-Emitter Sustaining Voltage	$V_{CE0(sus)}$	$I_c=200\text{mA}, I_B=0\text{V}$	60			V
Collector-Emitter Sustaining Voltage	$V_{CER(sus)}$	$I_c=0.2\text{A}, R_{BE}=100\text{ Ohms}$	70			V
Collector Cut-off Current	$I_{CEO}$	$V_{CE}=30\text{V}, I_B=0$			0.7	mA
Collector Cut-off Current	$I_{CEX}$	$V_{CE}=100\text{V}, V_{BE(off)}=1.5\text{V}.$ $V_{CE}=100\text{V}, V_{BE(off)}=1.5\text{V},$ $T_a=150^{\circ}\text{C}$			1.0 5.0	mA
Emitter Cut-off Current	$I_{EBO}$	$V_{BE}=7\text{V}, I_C=0$			5.0	mA
ON CHARACTERISTICS						
DC Current Gain(note)	$h_{FE}$	$I_c=4\text{A}, V_{CE}=4\text{V},$ $I_c=10\text{A}, V_{CE}=4\text{V}$	20 5		70	
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_c=4\text{A}, I_B=400\text{mA}$ $I_c=10\text{A}, I_B=3.3\text{A}$			1.1 3.0	V

# UTC2N2955

# SILICON PNP TRANSISTOR

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
Base-Emitter On Voltage	V <sub>BE(on)</sub>	I <sub>c</sub> =4A, V <sub>CE</sub> =4V			1.5	V
SECOND BREAKDOWN						
Second Breakdown Collector with Base Forward Biased	I <sub>s/b</sub>	V <sub>CE</sub> =60V, T=1.0s, Non-repetitive	2.87			A
DYNAMIC CHARACTERISTICS						
Current Gain-Bandwidth Product	f <sub>T</sub>	I <sub>c</sub> =0.5A, V <sub>CE</sub> =10V, f=1MHz	2.5			MHz
Small-Signal Current Gain	h <sub>FE</sub>	I <sub>c</sub> =1A, V <sub>CE</sub> =4V, f=1kHz	15		120	
Small-Signal Current Gain Cut-off Frequency	f <sub>HFE</sub>	I <sub>c</sub> =1A, V <sub>CE</sub> =4V F=1.0kHz	10			kHz

Note(1): Pulse Test: Puls Width ≤ 300μs, Duty Cycle ≤ 2%

This datasheet has been download from:

[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)

Datasheets for electronics components.

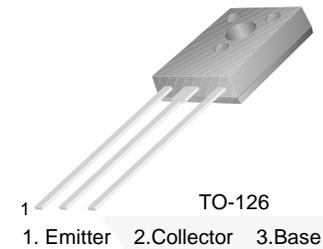
# BD135 / 137 / 139 NPN Epitaxial Silicon Transistor

## Features

- Complement to BD136, BD138 and BD140 respectively

## Applications

- Medium Power Linear and Switching



## Ordering Information

Part Number	Marking	Package	Packing Method
BD13516S	BD135-16	TO-126 3L	Bulk
BD1356STU	BD135-6		Rail
BD13510STU	BD135-10		Bulk
BD13516STU	BD135-16		Rail
BD13716STU	BD137-16		Bulk
BD13710STU	BD137-10		Rail
BD13716S	BD137-16		Bulk
BD13916STU	BD139-16		Rail
BD13910S	BD139-10		Bulk
BD13916S	BD139-16		Rail
BD1396STU	BD139-6		Bulk
BD13910STU	BD139-10		Rail

## Absolute Maximum Ratings

Stresses exceeding the absolute maximum ratings may damage the device. The device may not function or be operable above the recommended operating conditions and stressing the parts to these levels is not recommended. In addition, extended exposure to stresses above the recommended operating conditions may affect device reliability. The absolute maximum ratings are stress ratings only. Values are at  $T_C = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted.

Symbol	Parameter	Value	Units
$V_{CBO}$	Collector-Base Voltage	BD135	45
		BD137	60
		BD139	80
$V_{CEO}$	Collector-Emitter Voltage	BD135	45
		BD137	60
		BD139	80
$V_{EBO}$	Emitter-Base Voltage	5	V
$I_C$	Collector Current (DC)	1.5	A
$I_{CP}$	Collector Current (Pulse)	3.0	A
$I_B$	Base Current	0.5	A
$P_C$	Device Dissipation	$T_C = 25^\circ\text{C}$	12.5
		$T_A = 25^\circ\text{C}$	1.25
$T_J$	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
$T_{STG}$	Storage Temperature	- 55 to +150	$^\circ\text{C}$

## Electrical Characteristics

Values are at  $T_C = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted.

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
$V_{CEO(sus)}$	Collector-Emitter Sustaining Voltage	$I_C = 30\text{ mA}, I_B = 0$	BD135	45		
			BD137	60		
			BD139	80		
$I_{CBO}$	Collector Cut-off Current	$V_{CB} = 30\text{ V}, I_E = 0$			0.1	$\mu\text{A}$
$I_{EBO}$	Emitter Cut-off Current	$V_{EB} = 5\text{ V}, I_C = 0$			10	$\mu\text{A}$
$h_{FE1}$	DC Current Gain	$V_{CE} = 2\text{ V}, I_C = 5\text{ mA}$	25			
$h_{FE2}$		$V_{CE} = 2\text{ V}, I_C = 0.5\text{ A}$	25			
$h_{FE3}$		$V_{CE} = 2\text{ V}, I_C = 150\text{ mA}$	40		250	
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 500\text{ mA}, I_B = 50\text{ mA}$			0.5	V
$V_{BE(on)}$	Base-Emitter On Voltage	$V_{CE} = 2\text{ V}, I_C = 0.5\text{ A}$			1	V

## $h_{FE}$ Classification

Classification	6	10	16
$h_{FE3}$	40 ~ 100	63 ~ 160	100 ~ 250

## Typical Performance Characteristics

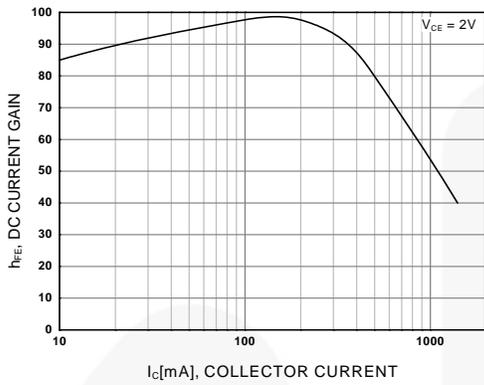


Figure 1. DC current Gain

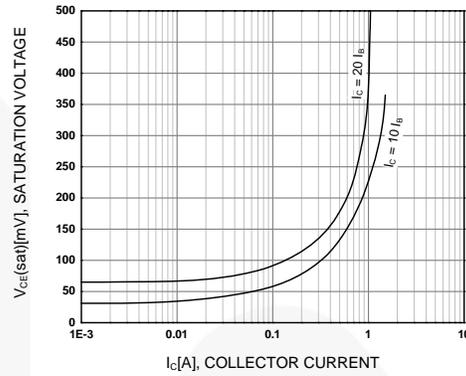


Figure 2. Collector-Emitter Saturation Voltage

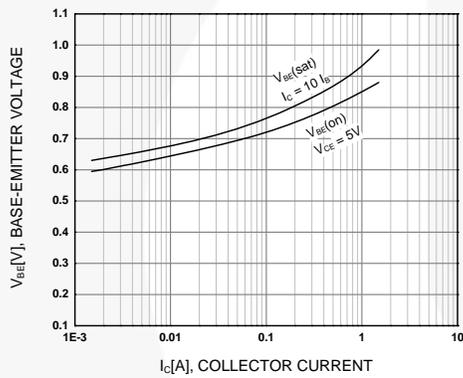


Figure 3. Base-Emitter Voltage

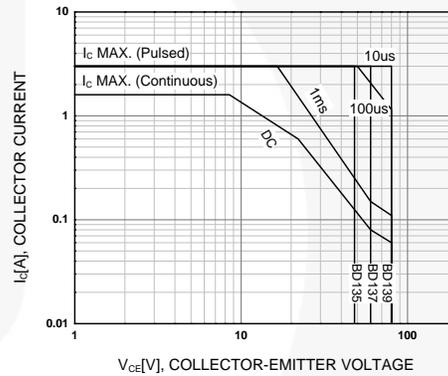


Figure 4. Safe Operating Area

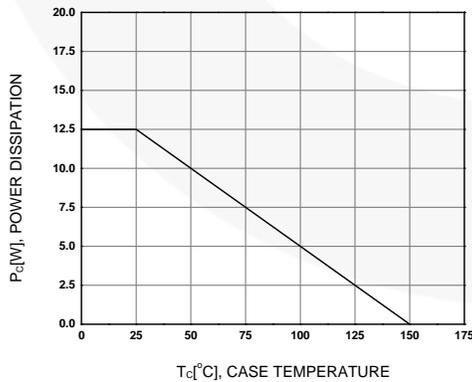
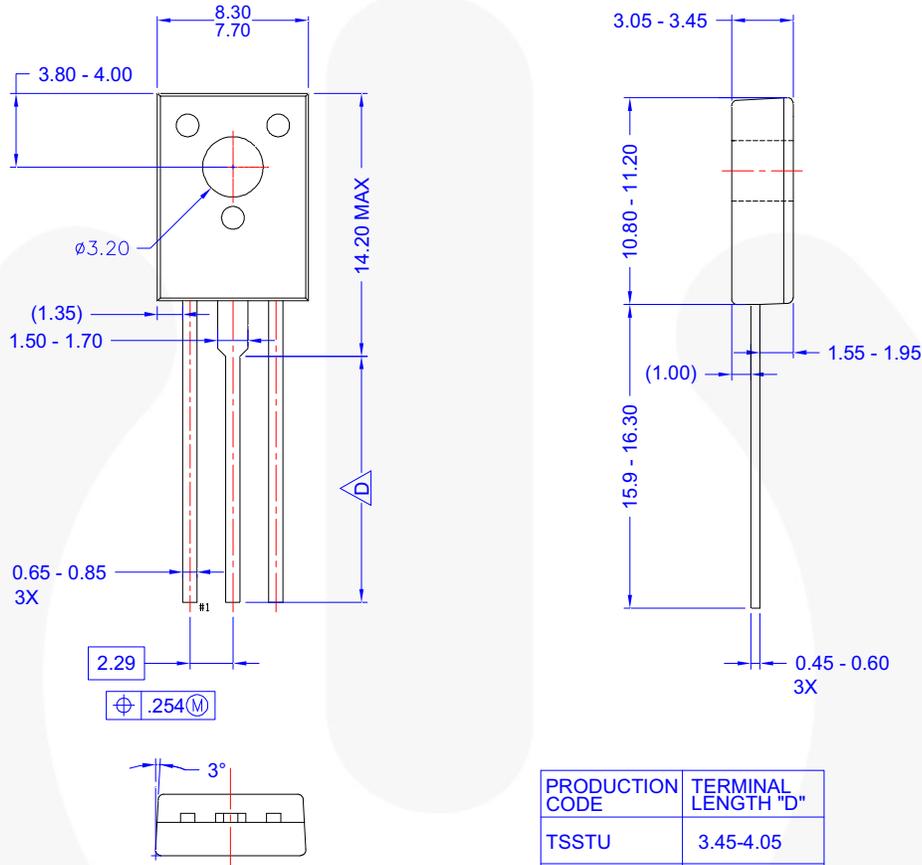


Figure 5. Power Derating

Physical Dimensions

TO-126 3L



- NOTES:
- A) THIS PACKAGE DOES NOT COMPLY TO ANY CURRENT PACKAGING STANDARD.
  - B) ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
  - C) DIMENSIONS ARE EXCLUSIVE OF BURRS, MOLD FLASH, AND TIE BAR EXTRUSIONS.
  - D) FOR TERMINAL LENGTH SEE TABLE
  - E) DRAWING FILE NAME AND REVISION : MKT-TO126AArev1

Figure 6. TO-126 (SOT-32) UNIFIED DRAWING (TSTU, TSSTU, STANDARD)

Package drawings are provided as a service to customers considering Fairchild components. Drawings may change in any manner without notice. Please note the revision and/or date on the drawing and contact a Fairchild Semiconductor representative to verify or obtain the most recent revision. Package specifications do not expand the terms of Fairchild's worldwide terms and conditions, specifically the warranty therein, which covers Fairchild products.

Always visit Fairchild Semiconductor's online packaging area for the most recent package drawings:  
<http://www.fairchildsemi.com/dwg/TO/TO126AA.pdf>

For current tape and reel specifications, visit Fairchild Semiconductor's online packaging area:  
[http://www.fairchildsemi.com/packing\\_dwg/PKG-TO126AA\\_BK.pdf](http://www.fairchildsemi.com/packing_dwg/PKG-TO126AA_BK.pdf)



**TRADEMARKS**

The following includes registered and unregistered trademarks and service marks, owned by Fairchild Semiconductor and/or its global subsidiaries, and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

2Cool™	FPS™		Sync-Lock™
AccuPower™	F-PFS™	PowerTrench®	
AX-CAP®*	FRFET®	PowerXS™	TinyBoost®
BitSiC™	Global Power Resource <sup>SM</sup>	Programmable Active Droop™	TinyBuck®
Build it Now™	GreenBridge™	QFET®	TinyCalc™
CorePLUS™	Green FPS™	QS™	TinyLogic®
CorePOWER™	Green FPS™ e-Series™	Quiet Series™	TINYOPTO™
CROSSVOLT™	Gmax™	RapidConfigure™	TinyPower™
CTL™	GTO™		TinyPWM™
Current Transfer Logic™	IntelliMAX™	Saving our world, 1mW/W/kW at a time™	TinyWire™
DEUXPEED®	ISOPLANAR™	SignalWise™	TranSiC™
Dual Cool™	Making Small Speakers Sound Louder and Better™	SmartMax™	TriFault Detect™
EcoSPARK®	MegaBuck™	SMART START™	TRUECURRENT®*
EfficientMax™	MICROCOUPLER™	Solutions for Your Success™	µSerDes™
ESBC™	MicroFET™	SPM®	
	MicroPak™	STEALTH™	UHC®
Fairchild®	MicroPak2™	SuperFET®	Ultra FRFET™
Fairchild Semiconductor®	MillerDrive™	SuperSOT™-3	UniFET™
FACT Quiet Series™	MotionMax™	SuperSOT™-6	VCX™
FACT®	mWSaver®	SuperSOT™-8	VisualMax™
FAST®	OptoHiT™	SupreMOS®	VoltagePlus™
FastvCore™	OPTOLOGIC®	SyncFET™	XS™
FETBench™	OPTOPLANAR®		

\* Trademarks of System General Corporation, used under license by Fairchild Semiconductor.

**DISCLAIMER**

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION, OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS. THESE SPECIFICATIONS DO NOT EXPAND THE TERMS OF FAIRCHILD'S WORLDWIDE TERMS AND CONDITIONS, SPECIFICALLY THE WARRANTY THEREIN, WHICH COVERS THESE PRODUCTS.

**LIFE SUPPORT POLICY**

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION.

As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury of the user.
2. A critical component in any component of a life support, device, or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

**ANTI-COUNTERFEITING POLICY**

Fairchild Semiconductor Corporation's Anti-Counterfeiting Policy. Fairchild's Anti-Counterfeiting Policy is also stated on our external website, [www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com), under Sales Support.

Counterfeiting of semiconductor parts is a growing problem in the industry. All manufacturers of semiconductor products are experiencing counterfeiting of their parts. Customers who inadvertently purchase counterfeit parts experience many problems such as loss of brand reputation, substandard performance, failed applications, and increased cost of production and manufacturing delays. Fairchild is taking strong measures to protect ourselves and our customers from the proliferation of counterfeit parts. Fairchild strongly encourages customers to purchase Fairchild parts either directly from Fairchild or from Authorized Fairchild Distributors who are listed by country on our web page cited above. Products customers buy either from Fairchild directly or from Authorized Fairchild Distributors are genuine parts, have full traceability, meet Fairchild's quality standards for handling and storage and provide access to Fairchild's full range of up-to-date technical and product information. Fairchild and our Authorized Distributors will stand behind all warranties and will appropriately address any warranty issues that may arise. Fairchild will not provide any warranty coverage or other assistance for parts bought from Unauthorized Sources. Fairchild is committed to combat this global problem and encourage our customers to do their part in stopping this practice by buying direct or from authorized distributors.

**PRODUCT STATUS DEFINITIONS**

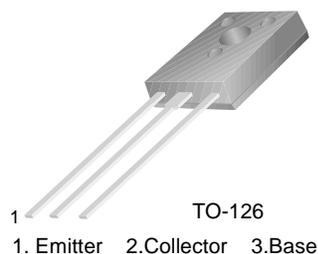
**Definition of Terms**

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative / In Design	Datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	Datasheet contains preliminary data; supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice to improve design.
No Identification Needed	Full Production	Datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice to improve the design.
Obsolete	Not In Production	Datasheet contains specifications on a product that is discontinued by Fairchild Semiconductor. The datasheet is for reference information only.

## BD136/138/140

### Medium Power Linear and Switching Applications

- Complement to BD135, BD137 and BD139 respectively



### PNP Epitaxial Silicon Transistor

#### Absolute Maximum Ratings $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
$V_{CBO}$	Collector-Base Voltage : BD136	- 45	V
	: BD138	- 60	V
	: BD140	- 80	V
$V_{CEO}$	Collector-Emitter Voltage : BD136	- 45	V
	: BD138	- 60	V
	: BD140	- 80	V
$V_{EBO}$	Emitter-Base Voltage	- 5	V
$I_C$	Collector Current (DC)	- 1.5	A
$I_{CP}$	Collector Current (Pulse)	- 3.0	A
$I_B$	Base Current	- 0.5	A
$P_C$	Collector Dissipation ( $T_C=25^\circ\text{C}$ )	12.5	W
$P_C$	Collector Dissipation ( $T_a=25^\circ\text{C}$ )	1.25	W
$T_J$	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
$T_{STG}$	Storage Temperature	- 55 ~ 150	$^\circ\text{C}$

#### Electrical Characteristics $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
$V_{CEO(sus)}$	* Collector-Emitter Sustaining Voltage : BD136 : BD138 : BD140	$I_C = - 30\text{mA}, I_B = 0$	- 45			V
			- 60			V
			- 80			V
$I_{CBO}$	Collector Cut-off Current	$V_{CB} = - 30\text{V}, I_E = 0$			- 0.1	$\mu\text{A}$
$I_{EBO}$	Emitter Cut-off Current	$V_{EB} = - 5\text{V}, I_C = 0$			- 10	$\mu\text{A}$
$h_{FE1}$ $h_{FE2}$ $h_{FE3}$	* DC Current Gain	$V_{CE} = - 2\text{V}, I_C = - 5\text{mA}$ $V_{CE} = - 2\text{V}, I_C = - 0.5\text{A}$ $V_{CE} = - 2\text{V}, I_C = - 150\text{mA}$	25 25 40		250	
$V_{CE(sat)}$	* Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = - 500\text{mA}, I_B = - 50\text{mA}$			- 0.5	V
$V_{BE(on)}$	* Base-Emitter ON Voltage	$V_{CE} = - 2\text{V}, I_C = - 0.5\text{A}$			- 1	V

\* Pulse Test: PW=350 $\mu\text{s}$ , duty Cycle=2% Pulsed

#### $h_{FE}$ Classification

Classification	6	10	16
$h_{FE3}$	40 ~ 100	63 ~ 160	100 ~ 250

# Typical Characteristics

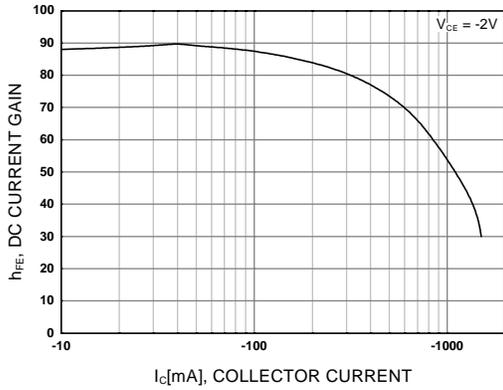


Figure 1. DC current Gain

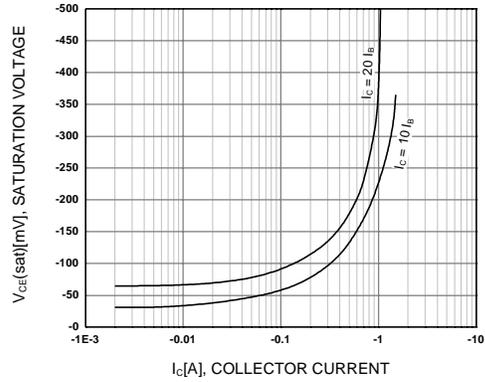


Figure 2. Collector-Emitter Saturation Voltage

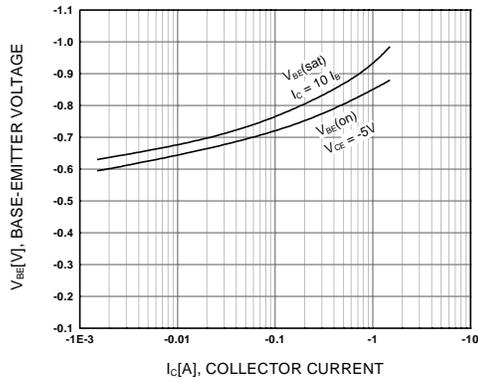


Figure 3. Base-Emitter Voltage

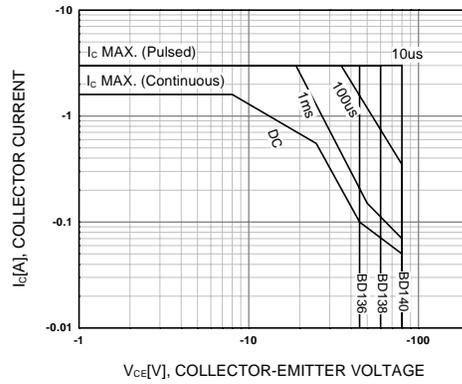


Figure 4. Safe Operating Area

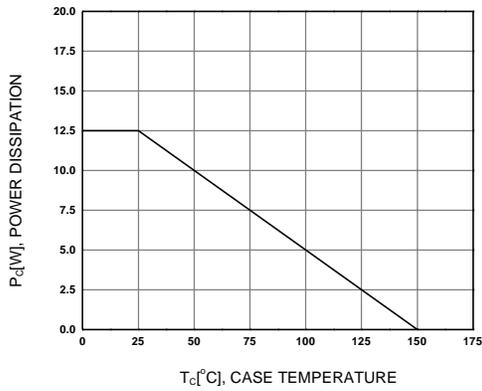
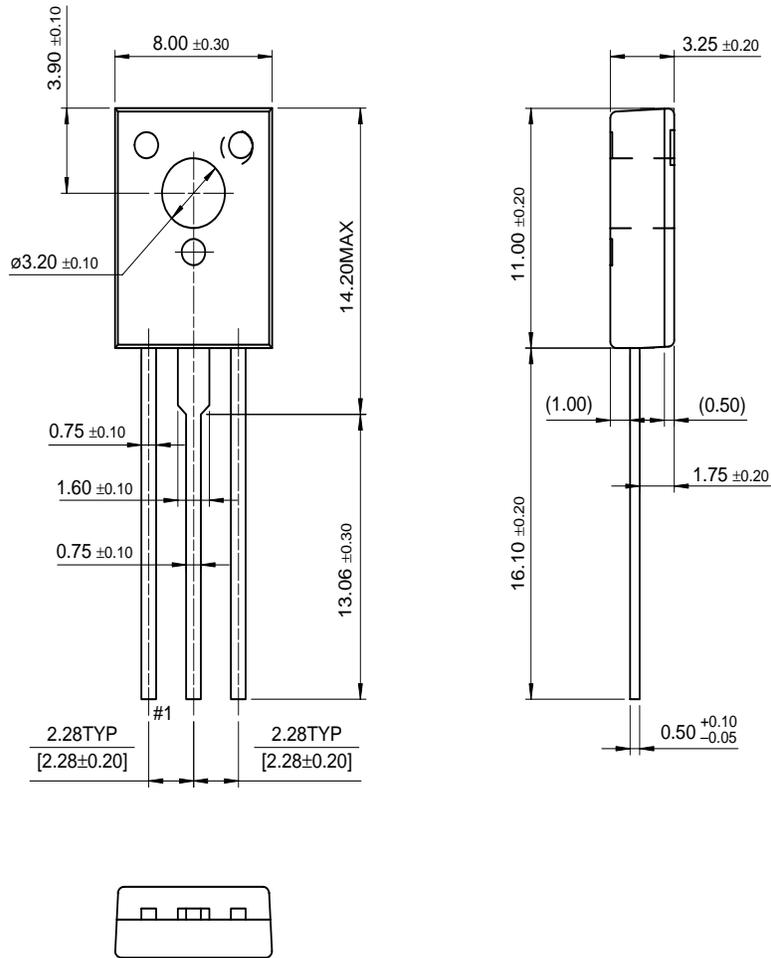


Figure 5. Power Derating

# Package Dimensions

BD136/138/140

## TO-126



Dimensions in Millimeters

## TRADEMARKS

The following are registered and unregistered trademarks Fairchild Semiconductor owns or is authorized to use and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

ACEx™	HiSeC™	SuperSOT™-8
Bottomless™	ISOPLANAR™	SyncFET™
CoolFET™	MICROWIRE™	TinyLogic™
CROSSVOLT™	POP™	UHC™
E <sup>2</sup> CMOS™	PowerTrench®	VCX™
FACT™	QFET™	
FACT Quiet Series™	QS™	
FAST®	Quiet Series™	
FASTr™	SuperSOT™-3	
GTO™	SuperSOT™-6	

## DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

## LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL.

As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

## PRODUCT STATUS DEFINITIONS

### Definition of Terms

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative or In Design	This datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	This datasheet contains preliminary data, and supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
No Identification Needed	Full Production	This datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
Obsolete	Not In Production	This datasheet contains specifications on a product that has been discontinued by Fairchild semiconductor. The datasheet is printed for reference information only.



Carefully Made Shaft Collars and Couplings  
Since 1937

Language Search Ruland.com

View Cart (0) | Your Account

Hello, Maribel Mendez Log Out

Products

Technical Info

About Us

Resources

Contact Us

## Beam Coupling

**SAVE ON FREIGHT FOR WEB ORDERS**  
Domestic – Order over \$50 FREE  
International – \$35 flat rate

### PSMR19-4-4-SS - Beam Coupling



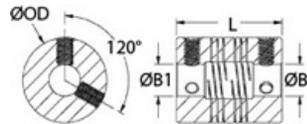
1

**Availability: Built to Order**  
Typical Lead Time: 0-2 Days

BETTER PRICING MAY BE AVAILABLE THROUGH YOUR LOCAL DISTRIBUTOR

Product Number:	PSMR19-4-4-SS
Product Type:	Beam Coupling
Style:	Set Screw
Material:	303 Stainless Steel
Finish:	Bright
Manufacturer:	Ruland Manufacturing
Country of Origin:	USA

Choose a CAD format



**Dimensions**

Bore B1:	4 mm
Bore B2:	4 mm
Outer Diameter OD:	19.1 mm
Length L:	22.9 mm
Shaft Penetration:	9.80 mm

**Fastening Hardware**

Forged Set Screw:	M4
Screw Material:	Alloy Steel
Screw Finish:	Black Oxide
Seating Torque:	0.57 Nm
Hex Wrench:	1.3 mm

**Torque Specifications**

Static Torque:	2.60 Nm
Dynamic Torque Non-Reversing:	1.30 Nm
Dynamic Torque Reversing:	0.65 Nm

**Misalignment**

Angular Misalignment:	3°
Parallel Misalignment:	0.20 mm
Axial Motion:	0.13 mm

**Additional Information**

Torsional Stiffness:	1.34 Deg/Nm
Moment of Inertia:	2.048 x10 <sup>-6</sup> kg-m <sup>2</sup>
Maximum Speed:	6,000 RPM
Bore Tolerance:	+.025mm / -.000mm
Temperature Range:	-40°F to 350°F -40°C to 176°C
Weight:	0.162 lbs
RoHS2:	<a href="#">Compliant</a>
REACH:	<a href="#">Compliant</a>
Installation Instructions:	<a href="#">Click Here</a>

Note 1: Torque ratings are at maximum misalignment.

Note 2: Performance ratings are for guidance only. The user must determine suitability for a particular application.

Note 3: Torque ratings for the couplings are based on the physical limitations/failure point of the machined beams. Under normal/typical conditions the hubs are capable of holding up to the rated torque of the machined beams. In some cases, especially when the smallest standard bores are used or where shafts are undersized, slippage on the shaft is possible below the rated torque of the machined beams. Keyways are available to provide additional torque capacity in the shaft/hub connection when required. Please consult technical support for more assistance.

For warranty/disclaimer information visit [www.ruland.com/warranty](http://www.ruland.com/warranty)

Print Email Link Add to Favorites

<< [Back to PSMR Product Page](#)



© 2014 All Rights Reserved | [sales@ruland.com](mailto:sales@ruland.com) | 508-485-1000 | [Privacy Policy](#) | [Warranty Policy](#)



Shaft Collar | One-Piece Shaft Collar | Two-Piece Split Collar | Quick Clamp Shaft Collar | Rigid Shaft Coupling  
Bellows Coupling | Flexible Beam Coupling | Oldham Coupling | Curved Jaw Coupling | Disc Coupling



Carefully Made Shaft Collars and Couplings  
Since 1937

Language ▼

Buscar Ruland

[View Cart \(0\)](#) | [Sign In or Register](#)

Registered users receive a 5% discount

Productos

Información Técnica

Descargas

Quiénes Somos

Contacto

## Acoplamiento Flexible

### PSMR25-8-6-SS - Acoplamiento Flexible



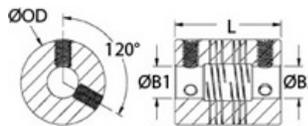
1

**Availability: Built to Order**

Typical Lead Time: 0-2 Days

BETTER PRICING MAY BE AVAILABLE THROUGH YOUR LOCAL DISTRIBUTOR

Clave de producto:	PSMR25-8-6-SS
Tipo de producto:	Acoplamiento Flexible
Tipo:	Tornillo de Fijación
Material:	Acero Inoxidable 303 (DIN 1.4305)
Acabado:	Brillante
País de origen:	Estados Unidos



#### Medidas

Agujero B1:	8 mm
Agujero B2:	6 mm
Diámetro externo OD:	25,4 mm
Longitud L:	31,8 mm
Penetración del eje:	13,84 mm

#### Tornillos

Material del tornillo:	Acero aleado
Acabado de los tornillos:	Óxido negro
Torque de apretamiento:	2,2 Nm
Llave Allen:	2,0 mm

#### Transmision de Par

Par estatico:	4,97 Nm
Par dinámico (sin inversión):	2,49 Nm
Par dinámico (movimiento inversible):	1,24 Nm

#### Misalignment

Desalineación angular:	3°
Desalineación paralela:	0,38 mm
Movimiento axial:	0,25 mm

#### Información adicional

Rigidez torsional:	0,83 Deg/Nm
Momento de inercia:	9,275 x10 <sup>-6</sup> kg-m <sup>2</sup>
Velocidad máxima:	6.000 RPM
Tolerancia del agujero:	+0,025mm / -0,000mm
Rango de temperatura:	-40°F to 350°F -40°C to 176°C
Peso:	0,369 lbs / 0,167 kg
RoHS2:	<a href="#">Compatible</a>
REACH:	<a href="#">Compatible</a>
Instrucciones de instalación:	<a href="#">Haga clic aquí</a>

Nota 1: Valores de par son a máxima desalineación.

Nota 2: Los valores presentados son únicamente una orientación, el usuario debe determinar si son adecuados para la aplicación particular.

Nota 3: Los valores de par de los acoplamientos se basan en las limitaciones físicas de las entalladuras. En condiciones normales/típicas los cubos son capaces de aguantar hasta el par nominal de las entalladuras. En algunos casos, especialmente cuando se utilizan los agujeros más pequeños o cuando los ejes son mas angostos de los agujeros, el deslizamiento del eje es posible aun por debajo del par nominal de las entalladuras. Cubos con chaveteros para aumentar la capacidad de par proporcionando una mejor conexión eje/cubo están disponibles cuando sea necesario. Favor de consultar nuestro soporte técnico para obtener más información.

Para obtener información sobre la garantía favor de [haga clic aquí](#)

Imprimir

Enviar por Correo

Añadir a Favoritos

<< [Volver](#)