

Universidad
Politécnica
de Cartagena



Escuela Técnica Superior
de Ingeniería Industrial

Control de un Robot Paralelo Neumático de Dos Grados de Libertad

Titulación: I.T.I. Esp. Electrónica Ind.
Intensificación: Automática
Alumno/a: Ginés Moreno Martínez
Director/a/s: Julio José Ibarrola Lacalle
Miguel Almonacid Kroeger

Cartagena, 29 de Septiembre de 2009

INDICE

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN	3
1.1.- INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO	5
1.2.- OBJETIVOS DEL PROYECTO	9
1.2.1.- DESARROLLOS ANTERIORES	9
1.2.2.- OBJETIVOS DEL PR	11
1.3.- DOCUMENTACIÓN DEL PROYECTO	12
1.3.1.- MEMORIA DESCRIPTIVA	12
1.3.2.- CD-ROM.....	12
Capítulo 2: DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL ROBOT	14
2.1.- COMPONENTES DEL ROBOT	16
2.1.1.- TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	16
2.1.2.- CILINDROS DE DOBLE EFECTO DNCI-32-300-P-A	18
2.1.3.- CONVERTIDORES DADE-MVC-010.....	20
2.1.4.- VÁLVULAS DE CONTROL PROPORCIONAL MPYE-5-1/8-LF-010-B	25
2.1.5.- CILINDRO DE DOBLE EFECTO CON VÁSTAGO PASANTE DNC-32-100-PPV-A-S2	26
2.1.6.- TRANSMISOR DE POSICIÓN SMAT-8E-S50-IU-M	27
2.1.7.- VÁLVULAS MOFH-3-1/8.....	29
2.1.8.- VÁLVULA REGULADORA DE PRESIÓN LFR-D-MINI	31
2.1.9.- TRANSFORMADOR DE TENSIÓN	31
2.1.10.- OTROS COMPONENTES	32
2.1.11.- CIRCUITOS DE POTENCIA.....	34
2.1.12.- ESQUEMAS ELÉCTRICOS DE LA INSTALACIÓN COMPLETA	35
2.1.13.- ESQUEMA NEUMÁTICO DE LA INSTALACIÓN COMPLETA.....	35
2.2.- ADECUACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL ROBOT	36
2.2.1.- DISEÑO Y CONEXIONADO DEL CIRCUITO UTILIZADO COMO INTERRUPTOR ELÉCTRICO	36
2.2.2.- DESMONTAJE DEL CILINDRO IZQUIERDO DNCI POR LA RUPTURA DE SU SENSOR DE POSICIÓN	38
Capítulo 3: SOFTWARE DESARROLLADO	41
3.1.- SOFTWARE USADO EN EL DESARROLLO DE ROBOWRITER.....	43
3.1.1.- MATLAB.....	43
3.1.2.- ORCAD	45
3.1.3.- FESTO FLUIDSIM.....	46
3.1.4.- AUTOCAD	47
3.2.- ADQUISICIÓN DE DATOS EN MATLAB.....	48
3.2.1.- MOTOR DE ADQUISICIÓN DE DATOS	48
3.2.2.- FUNCIONES MATLAB DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	48
3.3.- PROGRAMAS REALIZADOS PARA EL ROBOT.....	49
3.3.1.- COMPROBACIÓN DE SENSORES	49
3.3.2.- ESTABLECIMIENTO DEL PUNTO DE REFERENCIA	50
3.3.3.- PROGRAMA DE LA CINEMÁTICA DIRECTA	50



3.3.4.- PROGRAMA DE LA CINEMÁTICA INVERSA.....	52
3.3.5.- PROGRAMAS PARA EL CONTROL DE POSICIÓN DE LOS CILINDROS	53
Capítulo 4: IDENTIFICACIÓN DE UN MODELO DEL SISTEMA.....	61
4.1.- PRUEBAS USADAS PARA OBTENER LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA	63
4.2.- MODELO DEL SISTEMA A PARTIR DE GRÁFICAS VELOCIDAD/ TIEMPO.....	63
4.3.- MODELO DEL SISTEMA A PARTIR DE GRÁFICAS POSICIÓN/ TIEMPO.....	70
4.4.- MODELO DEL SISTEMA A PARTIR DE VECTORES DE PULSOS PRBS.....	73
4.5.- REPRESENTACIÓN GRÁFICA CONJUNTA DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA OBTENIDAS	74
Capítulo 5: SINTONIA DE PID PARA EL CONTROL DE UN CILINDRO.....	76
5.1.- CONTROLADORES PID	78
5.1.1.- INTRODUCCIÓN.....	78
5.1.2.- ACCIONES BÁSICAS DE CONTROL PID	78
5.2.- AJUSTES PREVIOS.....	79
5.2.1.- SENSORES EN LOS CILINDROS DNCI	79
5.2.2.- VÁLVULAS PROPORCIONALES MPYE	81
5.2.3.- ESTABLECIMIENTO DE LA PRESIÓN DE FUNCIONAMIENTO Y DEL PERIODO DE MUESTREO	82
5.2.4.- MOVIMIENTO INICIAL DE LOS CILINDROS	85
5.3.- SINTONÍA EXPERIMENTAL DE PID.....	86
Capítulo 6: CONTROL SIMULTÁNEO DE AMBOS CILINDROS.....	89
6.1.- AJUSTES REFERIDOS AL CONTROL SIMULTÁNEO	91
6.1.1.- SINTONIA DE PID PARA EL MOVIMIENTO DE AMBOS CILINDROS.....	93
6.1.2.- NO LINEALIDADES EN EL CONTROL DE LOS CILINDROS.....	95
6.2.- MOVIMIENTO Y ESCRITURA EN EL ESPACIO DE TRABAJO	100
6.2.1.- DIBUJO DE TRAYECTORIAS DE TEST	101
6.2.1.- ESPACIO DE TRABAJO ADECUADO.....	100
Capítulo 7: RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS, CONCLUSIONES Y DESARROLLOS POSTERIORES	103
7.1.- PROBLEMAS Y SU RESOLUCIÓN	105
7.1.1.- PÉRDIDA DEL INTERRUPTOR ELÉCTRICO.....	105
7.1.2.- PÉRDIDA DEL PUNTO DE CALIBRACIÓN EN LOS CILINDROS DNCI	105
7.1.3.- RUPTURA DE LA UNIÓN ATORNILLADA DEL CILINDRO IZQUIERDO CON LA UNIÓN FIJA DE 120 GRADOS	106
7.1.4.- MAL AJUSTE DE LAS VÁLVULAS PROPORCIONALES MPYE.....	107
7.1.5.- RUPTURA DEL SENSOR DE POSICIÓN DEL CILINDRO DNCI IZQUIERDO ...	107
7.2.- CONCLUSIONES.....	108
7.3.- DESARROLLOS POSTERIORES	109



Capítulo 1: INTRODUCCIÓN





1.1.- INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO

El control es la acción o el efecto de poder decidir sobre el desarrollo de un proceso o sistema para que actúe de la forma deseada. Se define un sistema (máquina o proceso) automatizado como aquel capaz de reaccionar de forma automática (sin la intervención del operario) ante los cambios que se producen en el mismo, dando lugar a las acciones adecuadas para cumplir la función para la que ha sido diseñado.

El Control Automático ha tenido un rápido desarrollo en los últimos años. Sin embargo a lo largo del tiempo ha sufrido un proceso de evolución que se inició, aproximadamente, entre los años 300 a.C. y 1200 d.C., la necesidad de los griegos y los árabes por medir de forma exacta el tiempo los llevó a realizar grandes aportaciones a la teoría y a la práctica del control automático. Las primeras aplicaciones se remontan a los mecanismos reguladores con flotador en Grecia. El reloj de Ktesibius (fig. 1.1) fue construido alrededor de 250 a. C. Es considerado el primer sistema de control automático de la historia.

El reloj de agua fue implementado mediante un regulador de flotador, el cual tenía la función de mantener el nivel del agua de un tanque a una profundidad constante. Al ser la profundidad de agua constante, se produce un flujo también constante que atraviesa por un tubo y llena un segundo tanque. Según sea el nivel del segundo tanque

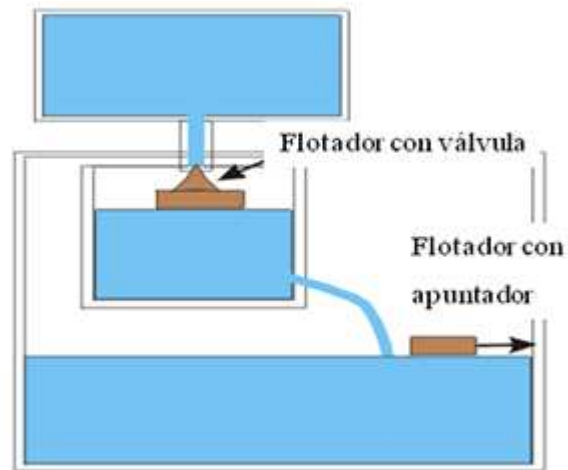


Fig. 1.1. Esquema del reloj de Ktesibius

así será el tiempo transcurrido. El flotador de este reloj funcionaba de manera que mediante una válvula se controlaba el nivel del agua del tanque por lo que la misma se abría en caso de que el nivel del tanque bajara y se cerraba cuando se llegaba al nivel deseado. El flotador era el encargado de medir el nivel del tanque e indicarle a la válvula como debía permanecer.

Durante el primer siglo después de Cristo, los griegos usaron el regulador de flotador para aplicaciones como distribuir el vino en forma automática, se diseñaron sifones para mantener diferencias de nivel constantes entre dos tanques y el sistema se usó también para abrir y cerrar puertas de los templos.

Ya en el primer siglo d.C. fue publicado por Herón de Alejandría un libro titulado *Pneumática*, en el que mostró varios mecanismos de nivel de agua mediante reguladores con flotador.

Entre los años 800 y 1200, varios ingenieros árabes usaron el regulador para relojes de agua y otras aplicaciones. En el mismo periodo, el principio del control de “todo/nada” comenzó a utilizarse.

Con la Revolución Industrial en Europa se logró la introducción de motores principales o máquinas auto-conducidas. Esto vino marcado por la invención de molinos de grano avanzados, hornos, calderas, y el motor de vapor. Estos dispositivos no se podían regular adecuadamente a mano, por lo que surgió una nueva exigencia para los sistemas de control automáticos. Una variedad de dispositivos de control fue inventada, incluyendo los reguladores de flotador, de temperaturas, de presión y dispositivos de control de velocidad.

El primer control realimentado se dio en Europa, el holandés Cornelis Drebbel (1572-1634) construyó cerca de 1618 una incubadora con una realimentación explícita para regular la temperatura. Sin embargo el trabajo más significativo de Drebbel fue el primer submarino útil en 1620, donde también utilizó sistemas realimentados.

También el francés Denis Papin, en 1681, inventó el primer regulador de presión para calderas de vapor. Aunque el primer trabajo significativo en control con realimentación automática fue el regulador centrífugo de James Watt, desarrollado en 1769 (fig. 1.2). Los primeros reguladores de Watt funcionaron satisfactoriamente debido fundamentalmente al considerable rozamiento que presentaban sus mecanismos, haciendo el sistema de por sí estable.



Los reguladores de Watt suministraban una acción de tipo proporcional y el control de velocidad sólo era exacto con una determinada carga mecánica. Además, solamente podían operar en un reducido rango de velocidades y necesitaban un continuo y costoso mantenimiento.

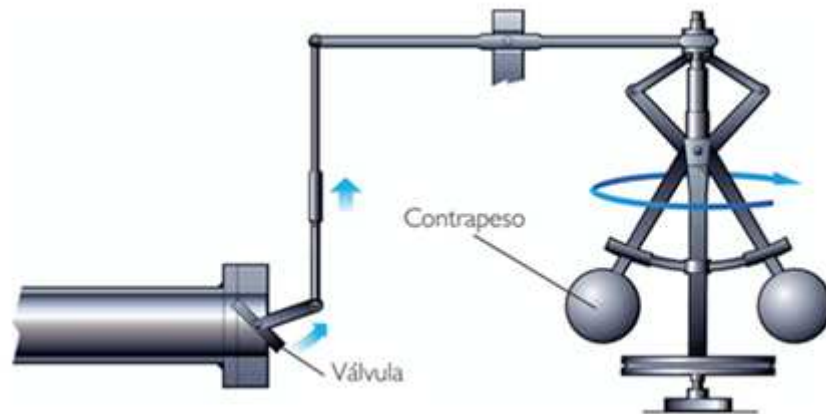


Fig. 1.2. Regulador centrífugo de Watt

En el año 1745, E. Lee inventa un sistema para controlar automáticamente la orientación e inclinación de las aspas de los molinos de viento, de modo que se aprovechara mejor la dirección del viento. Se trataba del primer servomecanismo de posición, hasta finales del siglo XIX el control automático se caracterizó por ser eminentemente intuitivo. El deseo de mejorar las respuestas transitorias y la exactitud de los sistemas de control, obligó a desarrollar la teoría de control.

El primer análisis de control automático es la explicación matemática del regulador centrífugo, por James Clerk Maxwell en 1868, usando el modelo de una ecuación diferencial. Maxwell realizó varias aportaciones al control como el concepto de estabilidad, modelos matemáticos simples, importancia de la acción integral, linealidad, estabilidad como problema algebraico y los criterios de estabilidad para sistemas de primer, segundo y tercer orden.

La primera teoría general sobre control automático, pertenece a Nyquist, en 1932, en el famoso artículo "Teoría de la regeneración ". Este estudio sentó las bases para la determinación de la estabilidad de sistemas sin necesidad de resolver totalmente las ecuaciones diferenciales (mediante excitación sinusoidal permanente).

Bode en la década de 1940 introdujo un método de respuesta en frecuencia más práctico que el de Nyquist, y Evans al principio de la década de los 50 introdujo el método del Lugar de las raíces. Los métodos de respuesta en frecuencia y lugar de las raíces son la base del control clásico.

Durante la segunda guerra mundial se intensificó el desarrollo de sistemas de control, con grandes avances prácticos principalmente en servomecanismos, autopilotos y control de armas. En la posguerra sigue el dominio de los métodos de respuesta en frecuencia y el lugar de las raíces, con importantes avances como el incremento en cursos de control en universidades, rápida diseminación de la nueva teoría de control, mayor interés no bélico en los sistemas de control...

Años después, gracias a la aparición de las computadoras digitales se hizo posible el análisis de sistemas complejos en el dominio del tiempo; desde entonces se ha desarrollado mucho la teoría moderna de control, que está basada en el análisis y síntesis en el dominio del tiempo. Utilizando variables de estado.

Actualmente la tendencia de los sistemas de control es hacia la optimización y hacia la digitalización total de los controladores. En artículos y literatura sobre control es posible observar la gran diversificación del control moderno, como las técnicas de control lineal y no lineal, control óptimo, control robusto, control por inteligencia artificial, control adaptable, control de estructura variable, control de eventos discretos, entre otros. El avance es vertiginoso tanto en teoría como en la práctica del control.

La automatización de los procesos productivos ha sido y sigue siendo posible gracias al desarrollo y abaratamiento de la tecnología necesaria. Algunas de las muchas ventajas del control automático, ya muy difundido, son las siguientes:

- Aumento en la cantidad o número de productos.
- Mejora de la calidad de los productos.
- Mejorar la productividad y reducir costes.
- Reducción de inversión de mano de obra en tareas no especializadas.



- Hacer más flexible el sistema productivo (facilitar los cambios en la producción).

Estos objetivos se han convertido de hecho en requisitos indispensables para mantener la competitividad, por lo que el aumento del nivel de automatización de los procesos es simplemente una necesidad para sobrevivir en el mercado actual.

1.2.- OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1.- DESARROLLOS ANTERIORES

El nacimiento de Robowriter, fue fruto de la iniciativa del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Robowriter fue concebido con la finalidad de describir trayectorias gráficas sobre un papel. Para ello se pensó en un robot paralelo de dos grados de libertad que funciona por actuación neumática sobre los cilindros que lo componen. No obstante, con el fin de cubrir diferentes tareas, se construyó un robot de alta flexibilidad, es decir, que es fácilmente transportable y puede ser utilizado en diferentes posiciones (horizontal, vertical...). De este modo, gracias a la versatilidad de nuestro robot, se pueden realizar otras aplicaciones distintas, con solo cambiar el elemento soporte para la escritura por otro adaptado a diferentes herramientas.

El diseño de Robowriter (fig. 1.3) se inició con en el proyecto realizado por el alumno, **Miguel Torregrosa Puig** (Torregrosa, 2006). Dicho proyecto abarcaba el modelado, simulación y diseño de un robot de actuación neumática de dos grados de libertad. Este proyecto inicial cubrió los siguientes objetivos:

De la parte de modelado:

- Simulación gráfica del robot.
- Planteamiento y resolución de la cinemática Directa.
- Planteamiento y resolución de la cinemática Inversa.

- Representación de los resultados obtenidos en el cálculo del espacio de trabajo.

De la parte correspondiente a la simulación:

- Estudio y características proporcionadas por el fabricante.
- Representación de las posibles posiciones del robot mediante *Matlab*.
- Ensamblaje, planteamiento de las restricciones geométricas y físicas entre piezas y animación gráfica con restricciones de movimiento en el programa *Catia*.

De la parte de diseño:

- Diseño de las piezas necesarias para el funcionamiento del robot.
- Diseño de la estructura que incorpora el robot.
- Diseño básico de la instalación neumática y de control.

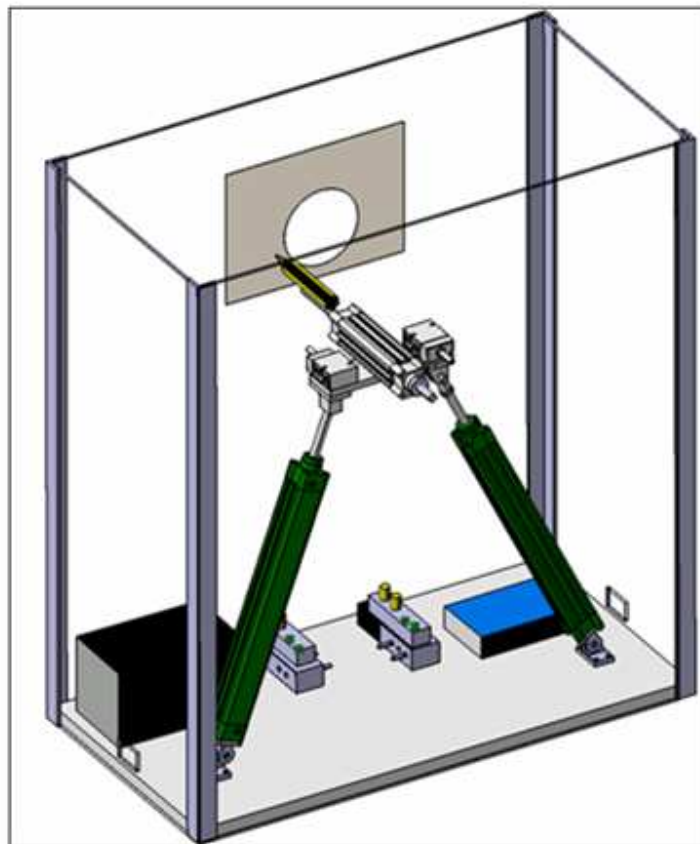


Fig. 1.3. Robowriter

Teniendo como base el proyecto anteriormente mencionado el proyecto del robot fue continuado por el alumno **Alejandro Rosillo Meseguer** (Rosillo, 2007). Este proyecto abarcaba principalmente el montaje físico del robot de estructura paralela y su puesta en marcha. Sus objetivos fueron los siguientes:

- Conexionado eléctrico entre la tarjeta de adquisición de datos, los circuitos de adaptación de tensión, las válvulas y los cilindros.
- Realización del montaje físico de todas las partes que compondrán el robot.
- Programación en Matlab de los controladores PID para la posición de cada uno de los cilindros neumáticos (SISO: *Single Input Single Output/ Entrada Simple Salida Simple*) y creación de una interfaz gráfica con Matlab.
- Comparación y Aplicación de distintos tipos de control.

1.2.2.- OBJETIVOS DEL PROYECTO

Teniendo como base los proyectos anteriormente mencionados, se han fijado para el presente proyecto los siguientes objetivos:

- Puesta a punto de sensores y actuadores, revisión del conexionado eléctrico y neumático de la tarjeta de adquisición de datos, las válvulas, convertidores y cilindros.
- Diseño de unos circuitos nuevos adaptadores de tensión para las válvulas y sintonía de unos PID iniciales a varias presiones de funcionamiento para ver la respuesta del sistema.
- Identificación de un modelo matemático de los dos cilindros mediante métodos experimentales, incluyendo los modelos cruzados de la influencia de cada uno sobre el otro.
- Sintonización de unos buenos controladores PID de cada cilindro (SISO) para una respuesta suave del sistema y la sintonización conjunta de PID (MIMO) para intentar corregir las perturbaciones de uno a otro lo mejor posible.
- Integración de todo el software desarrollado (programas realizados sobre la cinemática directa e inversa del robot, programas realizados para los

controladores PID) para el dibujo de trayectorias tipo test (círculos, cuadrados, etc...) con las que realizar comparación de controladores y estructuras.

1.3.- DOCUMENTACIÓN DEL PROYECTO

1.3.1.- MEMORIA DESCRIPTIVA

La presente memoria resume los planteamientos teóricos, los resultados prácticos obtenidos durante el desarrollo del proyecto y todas las partes de las que se compone. En el capítulo 1 se comentan los desarrollos anteriormente realizados y se presenta el proyecto a realizar. En el capítulo 2 se describen las características que definen a cada uno de los componentes del robot así como su conexionado para un funcionamiento correcto. El capítulo 3 muestra las características del software utilizado y los programas creados en Matlab. En el capítulo 4 se muestra, por medio de varios experimentos, la obtención de las funciones de transferencia del sistema. El capítulo 5 muestra unas primeras sintonizaciones de PID para el manejo de cada cilindro DNCI. En el capítulo 6 se encuentra la sintonización y un buen control del movimiento simultaneo de los cilindros DNCI. En el capítulo 7 se pueden ver los problemas que fueron surgiendo durante el desarrollo del proyecto y su resolución, también se muestran las conclusiones del proyecto y los posibles desarrollos posteriores, algunos de los cuales no pudieron ser abordados por los problemas que surgieron. Se incluyen también unos anexos con dos planos que muestran la conexión neumática y eléctrica del sistema. Además se incorpora un índice y la bibliografía de la memoria.

1.3.2.- CD-ROM

En este soporte informático se incluyen:

- La memoria descriptiva en formato electrónico (Microsoft Word y pdf) y planos de conexiones en Autocad.
- Código fuente de los programas desarrollados.
- Datos obtenidos y gráficas de Matlab de cada día de Laboratorio.



- Manuales de fabricante de cada una de las partes que componen en Robowriter.
- Videos y fotografías sobre las partes y el funcionamiento de nuestro robot.



Capítulo 2: DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL ROBOT





2.1.- COMPONENTES DEL ROBOT

2.1.1.- TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

a) TARJETA *PCI-MIO-16E-1* DE NATIONAL INSTRUMENT

En el proyecto anterior empezó por utilizarse la tarjeta DT9812 de Data Translation pero salió defectuosa por lo que fue cambiada por la tarjeta de datos actual la *PCI-MIO-16E-1* de National Instrument (fig. 2.1). La conexión de esta tarjeta al PC se realiza mediante el puerto PCI, de donde además se obtiene la alimentación necesaria para su funcionamiento. Para su correcto funcionamiento anteriormente se instalaron los respectivos drivers de la tarjeta, con lo que se encuentra lista para su utilización. Para el uso de la tarjeta se conectan las entradas y salidas de la misma a la bornera CB68LP y los datos pasarán de esta bornera a la tarjeta situada en el PC, mediante el cable de conexión R6850 08270201 L (fig.2.2).

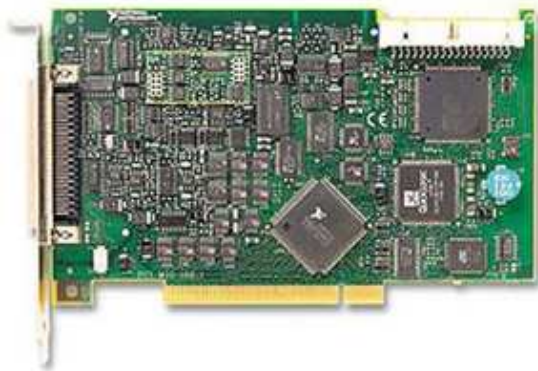


Fig. 2.1. Tarjeta *PCI-MIO-16E-1*



Fig. 2.2. Cable de 68 pines R6850 08270201 L

b) BORNERA CB68LP

Entre los distintos terminales de los que dispone el dispositivo de National Instrument, para realizar nuestro robot se deben utilizar 6 entradas analógicas (AI, conexión en modo diferencial 3 x 2), aunque en nuestro caso se han utilizado 4 entradas analógicas (para los dos sensores de los cilindros DNCI) ya que en nuestro proyecto no se ha tenido en cuenta la entrada analógica (1x2 debido a la conexión en modo diferencial) para el sensor del cilindro de vástago pasante DNC. También se utilizan 2 salidas analógicas (AO) para las válvulas proporcionales MPYE y una salida

digital para establecer el punto de referencia de los cilindros DNCI. Por último, también se deberían utilizar otras 2 salidas digitales para conmutar las válvulas MOFH, aunque en nuestro proyecto no se ha implementado el control del tercer cilindro DNC por lo que no nos han sido necesarias estas dos salidas digitales.

AI 8	34	68	AI 0
AI 1	33	67	AI GND
AI GND	32	66	AI 9
AI 10	31	65	AI 2
AI 3	30	64	AI GND
AI GND	29	63	AI 11
AI 4	28	62	AI SENSE
AI GND	27	61	AI 12
AI 13	26	60	AI 5
AI 6	25	59	AI GND
AI GND	24	58	AI 14
AI 15	23	57	AI 7
AO 0	22	56	AI GND
AO 1	21	55	AO GND
AO EXT REF	20	54	AO GND
P0.4	19	53	D GND
D GND	18	52	P0.0
P0.1	17	51	P0.5
P0.6	16	50	D GND
D GND	15	49	P0.2
+5 V	14	48	P0.7
D GND	13	47	P0.3
D GND	12	46	AI HOLD COMP
PFI 0/AI START TRIG	11	45	EXT STROBE
PFI 1/AI REF TRIG	10	44	D GND
D GND	9	43	PFI 2/AI CONV CLK
+5 V	8	42	PFI 3/CTR 1 SRC
D GND	7	41	PFI 4/CTR 1 GATE
PFI 5/AO SAMP CLK	6	40	CTR 1 OUT
PFI 6/AO START TRIG	5	39	D GND
D GND	4	38	PFI 7/AI SAMP CLK
PFI 9/CTR 0 GATE	3	37	PFI 8/CTR 0 SRC
CTR 0 OUT	2	36	D GND
FREQ OUT	1	35	D GND

Fig. 2.3. Terminales de conexión de la tarjeta PCI-MIO-16E-1

Algo a tener en cuenta sería realizar las conexiones como se especifica en el anexo A.1 y no cambiar el orden de estas o cambiar de entradas y salidas en la tarjeta, ya que si se modifica el orden de alguna conexión habría que cambiar el código de Matlab.



Fig. 2.4. Bornera CB68LP

c) CONEXIONADO DE LAS SEÑALES ANALÓGICAS

La conexión de las señales analógicas varía según la naturaleza de la fuente de señal (flotante o referenciada) y el tipo de tarjeta de adquisición de datos. Hay 3 tipos de medida para las entradas analógicas:

- Diferencial.
- RSE (Referenced single ended).
- NRSE (Non-Referenced single ended).

Para los dispositivos de National Instrument, el tipo de señal de entrada puede ser Diferencial, RSE o NRSE. Nosotros usaremos la medida diferencial ya que aísla el ruido en modo común perfectamente y es el mejor método y el más seguro. Su único inconveniente es que precisa de 2 entradas para cada medida. El positivo de la señal va al canal n y el negativo al $n+8$. Por ejemplo, si estamos midiendo por la analog input 0 tendría que colocar el positivo a la patilla AI 0 y el negativo a la AI 8, si midiésemos por el canal 2, sería el positivo al AI 2 y el negativo al AI 10...

2.1.2.- CILINDROS DE DOBLE EFECTO DNCI-32-300-P-A

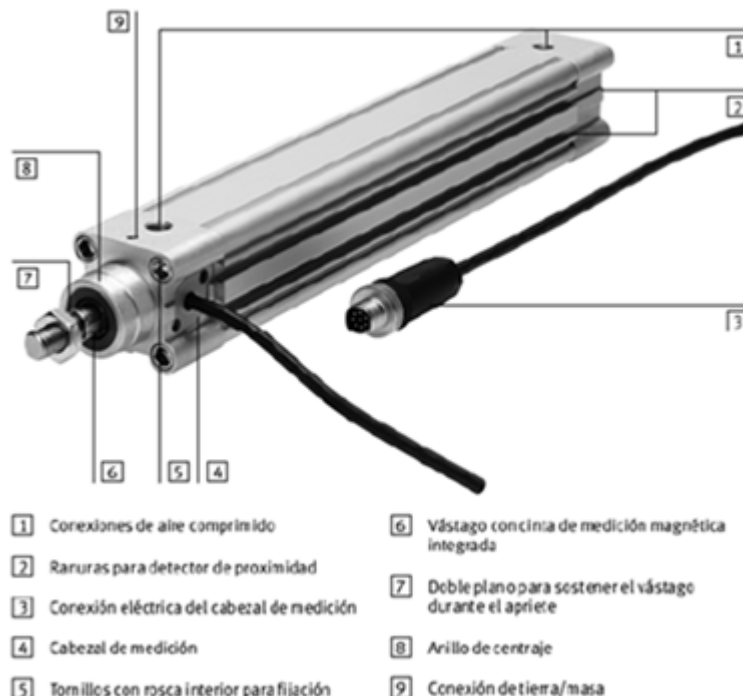


Fig. 2.5. Elementos operativos y conexiones del cilindro DNCI 32-300-P-A

El modelo de cilindro DNCI-32-300-P-A es el que disponemos para los dos cilindros encargados del movimiento del robot en el plano de trabajo, este cilindro dispone de un sensor integrado para medida de desplazamiento. Su sujeción por la parte de abajo se realiza mediante un pasador que lo une con una pieza atornillada a la base del habitáculo del robot. Para unir ambos cilindros por la parte de el vástago se realizó una pieza metálica (fig.2.6) que va roscada en uno de los cilindros (manteniéndolo fijo con un ángulo de 120 grados), mientras que en el otro cilindro la fijación se realiza mediante una especie de articulación, para permitir un buen movimiento en el espacio de trabajo.



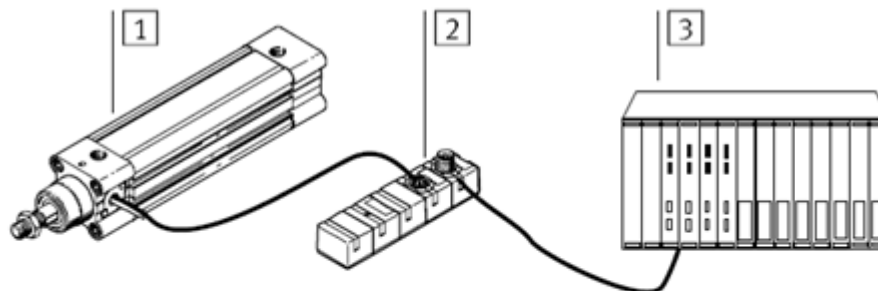
Fig. 2.6. Pieza de unión entre ambos vástagos

El sensor del cilindro genera una onda senoidal y otra cosenoidal y mediante la diferencia de fase entre estas dos señales se consigue conocer la posición del cilindro. A la salida de este sensor será necesario el uso de unos convertidores *DADE-MVC-010* que aumentarán y traducirán esta señal a una señal lineal de 0 a 10 V lo que nos simplifica el trabajo y nos ahorramos algunas entradas analógicas en nuestra tarjeta de adquisición de datos. Para el control de estos cilindros disponemos de una válvula proporcional para cada uno del tipo *MPYE-5-1/8-LF-010-B*.

2.1.3.- CONVERTIDORES DADE-MVC-010

a) CONEXIONADO DE LOS CONVERTIDORES DADE-MCV-010

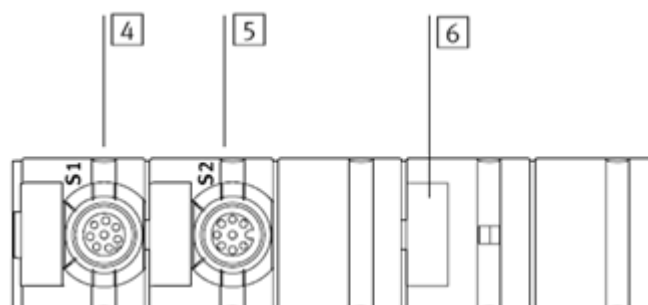
Son unos convertidores que realizan la conversión de los pulsos digitales que le llegan del sensor a una señal entre 0 y 10 V. Su función es adaptar la señal del sensor a la tarjeta de adquisición de datos (fig. 2.7).



- 1 Actuador DNCI-... con vástago y encoder de desplazam. integrado
- 2 Convertidor de valor medido DADE-MVC
- 3 PLC/IPC

Fig. 2.7. Esquema del conexionado al convertidor DADE

Son necesarios dos de estos convertidores DADE-MVC-010 (fig. 2.8) para controlar los dos cilindros DNCI-32-300-P-A.



- 4 S1: Conexión para PLC (con LED verde/rojo)
- 5 S2: Conexión para el encoder de desplazamiento del DNCI-... (con LED amarillo/rojo)
- 6 Etiquetas de identificación ISB-8x20 (accesorios)

Fig. 2.8. Representación de las conexiones y partes del convertidor DADE-MVC-010

La conexión entre estos convertidores y el sensor se realiza directamente mediante el cable S2 y la conexión entre los convertidores y la bornera CB68LP, de la tarjeta de adquisición, se realiza mediante el cable S1 (fig. 2.9), que está compuesto

internamente por 8 cablecillos cada uno con una asignación determinada dependiendo de su color:



Fig. 2.9. Cable S1 de conexión entre el convertidor DADE y la bornera CB68LP

- Cable Blanco: este cable va conectado a 24 V (terminal positivo de la fuente).
- Cable Marrón: es el valor medido por el sensor que varía entre 0 y 10 V, estos dos cables marrones de los dos convertidores van conectados a los bornes AI0 y AI1.
- Cable Verde*: es el cable que se utiliza para comprobar que se ha introducido la señal de referencia (24 V en el cable gris), se encontrará a nivel alto (24 V) tras introducir la entrada de referencia por el cable gris. No lo hemos conectado aunque fue comprobado cuando tuvimos algunos problemas con el sensor.
- Cable Amarillo: son los 0 V de la señal de medida, va unido a los 0 V de alimentación así como a los bornes AI8 y AI9 (debido a la conexión de entradas analógicas en modo diferencial).
- Cable Gris: sirve para establecer el punto de referencia del cilindro, es decir, la posición del vástago donde queremos que el sensor nos marque 0 V, por encima de este punto la salida aumentará hasta alcanzar el valor en el que se estableció el punto de calibración (10 V). Esta señal de referencia se pierde tras una desconexión eléctrica por lo que habrá que referenciar los cilindros cada vez que se conecta la fuente de alimentación. Esta entrada se activa con 24 V D.C. de alimentación por lo que se tuvo que hacer un interruptor electrónico que cambiara la salida de tensión de nuestra tarjeta (entre 0 y 5 V) a valores de 0 y 24 V.

- Cable Rosa: sirve para establecer el punto de calibración, es decir, la posición del vástago donde queremos que el sensor nos marque 10 V. Se diferencia de la entrada de referencia en que es un punto permanente y no se pierde tras una desconexión eléctrica. Este cable permanece desconectado aunque se ha utilizado cuando el sensor nos ha dado problemas y he tenido que realizar otra vez la primera puesta a punto. Esta entrada también necesita 24 V D.C. de alimentación por lo que se ha de activar con el interruptor electrónico.
- Cable Azul*: es el cable que sirve de comprobación de la entrada de calibración (24 V en cable rosa), se encontrará a nivel alto (24 V) tras introducir la entrada de calibración en el cable rosa. No lo hemos conectado aunque fue comprobado cuando tuvimos algunos problemas con el sensor.
- Cable Rojo: va unido al amarillo y a 0V, o lo que es lo mismo, al terminal negativo de la fuente de alimentación.

*Las señales de comprobación son de 24 V, en el caso de que quisiésemos conectarlas a nuestra tarjeta de adquisición se deberían adecuar, mediante unos circuitos nuevos de potencia, a unos rangos de tensión aceptables para nuestra tarjeta (de 4 a 5 V).

b) PUESTA A PUNTO DE LOS CONVERTIDORES DADE-MCV-010

• PRIMERA PUESTA A PUNTO

Esta primera puesta a punto es necesaria al principio de la instalación de los cilindros o cuando la memoria ha sido restablecida, bien por un fallo en el funcionamiento del sensor o porque hemos querido borrar los datos de referencia y calibración para ajustarlos de nuevo. Para esta primera puesta a punto del *DADE-MVC* se debe saber lo siguiente:

- El punto de referencia (referencing).
- Longitud de la carrera de trabajo (calibration).

Y los pasos a realizar en esta primera puesta a punto serían:

- 1) Conecte la tensión de alimentación
- 2) Mueva el *DNCL* al punto de referencia (punto cero de la carrera de trabajo).



- 3) Active la entrada de referencia (cable gris en el S1) por lo menos durante 0,5s.
- 4) Desactive la señal de entrada de referencia. Tras aparecer una señal 1 (retardo 0,1 s) en la salida de referencia (cable verde en el S1), el punto de referencia es guardado (el *DADE* se halla entonces “referenciado”).
- 5) Mueva a la posición final de la carrera de trabajo y asegúrese de que el *DNCl* se haya detenido.
- 6) Active la entrada de calibración (cable rosa en el S1) por lo menos durante 0,5s.
- 7) Desactive la señal de entrada de calibración. Tras aparecer una señal 1 (retardo 0,1 s) en la salida Ready (cable azul en el S1), el punto de calibración es guardado permanentemente (el *DADE* se halla entonces “calibrado”).

• **PUESTA A PUNTO TRAS ENCENDIDO/APAGADO**

Cuando se desactiva la alimentación se pierde el punto de referencia por lo que han de volver a realizarse los pasos anteriores del 1 al 4. Mediante el circuito que se ha realizado que actúa como interruptor electrónico se adecúan las tensiones de salida de la tarjeta a las de entrada del convertidor. Tras esto se realizó un sencillísimo m-file en Matlab, llamado referencia (Apartado 3.3.2 del capítulo 3), que establece automáticamente el punto de referencia en ambos convertidores. Estos convertidores poseen unos LEDs que según el estado del convertidor se iluminan de un color u otro (fig. 2.10) indicando de una forma visual en qué fase del proceso de puesta a punto se encuentran.

	LED		INPUT		OUTPUT	
	S1	S2	Ref	Cal	Ref	Rdy
Primera puesta a punto						
24 V aplicados	verde parpadeante	rojo	0	0	0	0
Inicio referencia	verde	rojo	1	0	0	0
Fin referencia	verde	amarillo	0	0	1	0
Inicio calibración	verde	apagado	0	1	1	0
Fin calibración	verde	apagado	0	0	1	1
Puesta a punto del sistema calibrado						
24 V aplicados	verde parpadeante	apagado	0	0	0	0
Inicio referencia	verde	apagado	1	0	0	0
Fin referencia	verde	apagado	0	0	1	1

Fig. 2.10. Color de los LEDs según el proceso de puesta a punto



c) RESTABLECIMIENTO AL ESTADO DE SUMINISTRO

Para borrar los datos guardados del punto de referencia y del de calibración simplemente se deben introducir 24 V por el cable gris y por el cable rosa simultáneamente durante al menos dos segundos, tras desactivar esta señal los puntos de referencia y calibración se habrán borrado.

d) DIAGNOSIS

En caso de fallo o si el sistema no ha sido calibrado la salida analógica estará en 0 V. Si se supera el punto de calibración la salida dará 10 V y si se supera hacia el lado contrario el punto de referencia la salida será 0 V. En los convertidores se tiene un método rápido de diagnosticar los fallos de forma visual en función a como se iluminen los LEDs (fig.2.11) del convertidor.

LED S1	LED S2	Fallo / Solución	Reposición
Verde	rojo par-padea 1x	Fallo del sensor: Verifique el sensor y el cable	– Desconectar, conectar
Verde	rojo par-padea 2x	Fallo de referencia: El DNCI se ha movido durante Ref = 1. El DNCI debe estar parado. Realice de nuevo la referencia.	– Desconectar, conectar – o entrada de referencia = 1
Verde	rojo par-padea x3	Fallo de calibración: El DNCI se ha movido durante Cal = 1. El DNCI debe estar parado. Realice de nuevo la calibración	– Desconectar, conectar – o entrada de calibración = 1
Verde	rojo par-padea x4	Fallo de incremento: El número de incrementos entre el punto de referencia y el final de la carrera demasiado pequeños (el DNCI no se ha movido). Realice de nuevo la calibración.	– Desconectar, conectar – o entrada de calibración = 1
Rojo	apagado	Subtensión: Verifique la tensión.	– Desconectar, conectar
Verde	rojo	Fallo carrera: Valor de la señal fuera del margen previsto. Verifique los topes o restablezca.	– Desconectar, conectar – o llevar el DNCI al margen permitido – o restablecer
Rojo	rojo	Cortocircuito en la salida: eliminar.	– Desconectar, conectar

Fig. 2.11. Diagnóstico de fallos según el encendido de los LEDs de los convertidores



2.1.4.- VÁLVULAS DE CONTROL PROPORCIONAL MPYE-5-1/8-LF-010-B

a) DESCRIPCIÓN Y CONEXIONADO DE LAS VÁLVULAS MPYE-5-1/8-LF-010-B

Se trata de unas válvulas de 5/3 vías, estas válvulas permiten el paso de una determinada cantidad de aire en función del valor que le llegue por su entrada analógica. Esta señal de entrada analógica permite una regulación progresiva del caudal volumétrico (mediante función progresiva de estrangulamiento) y permiten cambiar también la dirección del caudal volumétrico. La válvula nos sirve al mismo tiempo para regular la velocidad de salida y entrada del vástago del cilindro y para posicionarlo. En el caso de este proyecto se requieren dos válvulas MPYE-5-1/8-LF-010-B (fig. 2.12) para posicionar y controlar la velocidad de cada uno de los dos cilindros de doble efecto.



Fig. 2.12. Válvula proporcional MPYE-5-1/8-LF-010-B

La conexión de este tipo de válvulas a la bornera CB68LP se realiza mediante un cable KMPYE que está compuesto interiormente de 4 cablecillos de colores cada uno con una función determinada:

- Cable Marrón: este cable va conectado al terminal positivo de la fuente de alimentación (24 V).
- Cable Blanco: se conecta al terminal negativo de la fuente (0 V).
- Cable Verde: va unido a la salida analógica A00 o a la A01, una para cada válvula. A este cable la tarjeta de adquisición de datos le proporcionará una señal entre 0 y 10 V dependiendo del valor de la señal de control en cada instante.
- Cable Amarillo: este cable se conecta a los bornes de las masas de salida analógicas (AOGND) de que dispone la tarjeta de adquisición.

b) ELIMINACIÓN DE POSIBLES FALLOS

Problema	Posible causa	Solución
La corredera no se mueve	Falta tensión de alimentación	Controlar la conexión de 24 V de tensión de alimentación
	Falta valor nominal de referencia	Controlar la unidad de mando, controlar la conexión
	Corredera atascada	Enviar la unidad MPYE a Festo
La corredera vibra	Tensión de alimentación demasiado baja	Procurar la alimentación de 17...30 V c.c.
	Falta apantallamiento del cable o conexión deficiente	Colocar apantallamiento en el extremo del cable alejado de la válvula
	Bucle de conexión a tierra	Aislar la unidad MPYE
Cilindro demasiado lento	Estrangulamiento del paso por error de conexionado (racores basculantes)	Recurrir a conexiones de alternativa

Fig. 2.13. Resumen de posibles fallos de las válvulas MPYE y su posible solución

2.1.5.- CILINDRO DE DOBLE EFECTO CON VÁSTAGO PASANTE DNC-32-100-PPV-A-S2

Debido a que se eligieron válvulas digitales para el control del posicionamiento del cilindro encargado de efectuar la presión del lápiz sobre el papel, esto hace que sea muy conveniente que el cilindro encargado de esta tarea sea un cilindro de vástago pasante para que así, al introducir aire a la misma presión por ambos lados del embolo del cilindro, éste permanezca quieto, lo que no ocurre para los cilindros normales debido a que la superficie del émbolo por ambos lados es diferente.

En el caso de que las válvulas todo o nada encargadas del control del cilindro de vástago pasante se cambien por válvulas proporcionales nos será indiferente el uso de un cilindro de vástago pasante u otro normalizado.



Fig. 2.14. Cilindro DNC-32-100-PPV-A-S2



El cilindro para efectuar la presión de la herramienta sobre el papel es el *DNC-32-100-PPV-A-S2* (fig.2.14) que a diferencia de los cilindros DNCl mostrados en el apartado 3.2. éste no posee ningún sistema de medida integrado, por lo que se usará un dispositivo externo el *SMAT-8E-S50-IU-M*.

En este proyecto no se ha tenido en cuenta el control del tercer cilindro (vástago pasante) debido a que no es uno de los objetivos del proyecto, aunque si se ha colocado este cilindro para tener una referencia de donde se situaría la herramienta de escritura y otorgarle un poco de carga a los dos cilindros DNCl, encargados del control de la posición del robot, para mejorar un poco su funcionamiento. Debido a que no se ha tenido en cuenta el control de este cilindro el sensor SMAT y las válvulas MOFH tampoco ha sido necesario conectarlas, aunque en los planos de conexiones y en este capítulo 3 si se ha explicado cómo han de realizarse todas las conexiones pertinentes para su correcto funcionamiento para poder conectarlas en desarrollos posteriores.

2.1.6.- TRANSMISOR DE POSICIÓN SMAT-8E-S50-IU-M

a) DESCRIPCIÓN Y CONEXIONADO DEL SENSOR SMAT-8E-S50-IU-M

Se trata de un sensor *SMAT-8E-S50-IU-M8* (fig. 2.15) que realiza la detección de la posición del cilindro de vástago pasante de manera magnética y transmite la señal de salida a través de 2 salidas analógicas, una de 0 a 10 V y otra de 4 a 20 mA. (Si tenemos en cuenta el control de este tercer cilindro, usaremos únicamente la salida de 0 a 10 V).



Fig. 2.15. Sensor SMAT-8E-S50-IU-M8

La señal de salida es proporcional a la posición siempre que ésta esté dentro del campo de medición. En caso de que el cilindro esté fuera del campo de medida se encenderá un led de color rojo. El sensor se ha anclado al cilindro mediante la colocación dentro de la ranura en T y puede desplazarse para ajustarse al rango de funcionamiento deseado.

La conexión del sensor a la bornera CB68LP, de la tarjeta de adquisición, se realiza mediante un cable compuesto a su vez, interiormente, por 4 cablecillos de colores cada uno con una función determinada:

- Cable Marrón: este cable va unido a los 24 V de la fuente de alimentación.
- Cable Azul: conectado a 0 V de la fuente de alimentación.
- Cable Blanco: salida en corriente proporcional a la posición (No lo usamos).
- Cable Negro: nos proporciona un salida en tensión proporcional a la posición (de 0 a 10 V), este cable va unido a la entrada analógica de la bornera AI2.

A la hora de su puesta en marcha basta con conectar alimentación, cuando se conecta la alimentación se encenderá el LED verde, si también se enciende el LED rojo es debido a que el embolo se encuentra fuera del campo de medición del sensor.

b) SEÑAL DE LAS SALIDAS ANALÓGICAS DEL SENSOR

Señales analógicas		Descripción	*)
0 V	0 mA	no hay señal válida, p.ej. no hay tensión de serviciofuncionamiento	-
1 V	2 mA	tras la conexión de la tensión de funcionamiento servicio, el émbolo se encuentra fuera del campo de medición	A, C
2 V	4 mA	el émbolo abandona el campo de medición en dirección negativa	A
10 V	20 mA	el émbolo abandona el campo de medición en dirección positiva	C
> 2 V ... < 10 V	> 4 mA ... < 20 mA	el émbolo se encuentra dentro del campo de medición en la posición correspondiente	B
*) Véase curva caracterfstica superior.			

Fig. 2.16. Valores proporcionados por el sensor SMAT, dependiendo de la posición del vástago



Dependiendo de la posición en que se encuentre el émbolo del cilindro, el sensor nos proporcionará diferentes valores de tensión (fig. 2.16).

c) SOLUCIÓN A POSIBLES FALLOS

Fallo	Posible causa	Solución
Señal errónea o inesperada en las salidas analógicas	Accionamiento no permitido	Utilizar únicamente accionamientos autorizados (véase catálogo online en: www.festo.com)
	Tensión de servicio funcionamiento por debajo del campo permitido	Tener en cuenta las tolerancias
	Cortocircuito/sobrecarga en la salida correspondiente	Eliminar cortocircuito/sobrecarga
	Rotura de hilo	Sustituir el cable
	Presencia de cuerpos ferrosos ferríticos en el entorno del transmisor de posición (p.ej. elementos de fijación para accionamientos)	Evitar la presencia de cuerpos ferríticos ferrosos en el entorno
	Ajuste del SMAT-8E-... incorrecto	Reajustar el SMAT-8E-...
	Desajuste al apretar el tornillo prisionero	Vigilar que el SMAT-8E no se descentre al apretar el tornillo prisionero
	Señal de medición ruidosa o lenta por instalación incorrecta del filtro en el SPS/IPC	Corregir la instalación del filtro en el SPS/IPC

Fig. 2.17. Posibles soluciones a fallos del sensor SMAT

2.1.7.- VÁLVULAS MOFH-3-1/8

a) DESCRIPCIÓN Y CONEXIONADO DEL LAS VÁLVULAS MOFH-3-1/8

Se utilizan para el control todo o nada del cilindro DNC (vástago pasante). Utilizamos dos válvulas MOFH (fig. 2.18), una para cada una de las cámaras de aire del cilindro DNC. Estas válvulas se activan mediante un accionamiento eléctrico externo.





Fig. 2.18. Válvula MOFH-3-1/8

Las válvulas MOFH-3-1/8 son accionadas eléctricamente al funcionar conjuntamente con los zócalos con cable KMF-1-24-2,5-LED, que a su vez está compuesto, interiormente, de tres cablecillos de colores cuya conexión eléctrica es la siguiente:

- Cable Amarillo-Verde: es el cable GND, que va unido al terminal negativo de la fuente de alimentación.
- Cables Negros (1 y 2): para que la válvula MOFH se encuentre activada es necesario que uno de los cables de color negro esté unido a 0V y el otro a 24V (es indiferente cuál de ellos va a 0 o a 24V).

Si se encuentran conectados de esta forma se encenderá el LED del zócalo, si todos los cables están a 0 V la válvula no estará activa. Para que este tipo de válvulas conmuten es necesario activarlas eléctricamente y a su vez que exista una diferencia de presión entre el conducto de entrada y el conducto de salida de al menos 1,5 bares.

Una de las limitaciones que poseen este tipo de válvulas es que puede no funcionar correctamente debido a la necesidad de existir una diferencia de presión que puede ser superior a la que esté presente en el circuito debido a la presencia de muchos dispositivos consumidores, también en este tipo de válvulas, al contrario que en las proporcionales, no podemos ajustar el caudal de salida.

b) SOLUCIÓN A POSIBLES FALLOS

Funcionamiento defectuoso	Causa posible	Solución
La válvula no conmuta	No se ha observado el margen de presión permisible	Verificar la presión ajustada en el control o antes de la válvula, especialmente si hay conectados muchos dispositivos consumidores.
	Fallo de conexión	Verificar las conexiones neumáticas y eléctricas, si procede.
	Válvula defectuosa	Devolver el producto a Festo para reparar.
Fuerte ruido en la conmutación	Elevado ruido del escape de aire	Utilizar silenciadores.

Fig. 2.19. Posibles soluciones a fallos de la válvula MOFH

2.1.8.- VÁLVULA REGULADORA DE PRESIÓN LFR-D-MINI

Para el robowriter se utiliza esta válvula reguladora LFR-D-MINI (fig. 2.20), que regula la presión del aire comprimido y compensa las fluctuaciones a la entrada; además, efectúa el filtrado de las partículas de suciedad y el condensado de agua por lo que se trata de una unidad muy compacta y completa. Para deducir la presión de funcionamiento se realizaron varias pruebas y aunque al principio se trabajaba con una presión de 3 bares, posteriormente se cambió por una presión de 5 bares ya que nos ofrecía un movimiento más suave (más lineal) del cilindro para bajas velocidades y en definitiva nos ofrecía mejores prestaciones.



Fig. 2.20. Válvula reguladora LFR-D-MINI

2.1.9.- TRANSFORMADOR DE TENSIÓN

Para la alimentación eléctrica de todos los componentes, excepto la tarjeta de adquisición de datos, que es alimentada a través del puerto PCI del ordenador, necesitaremos una fuente de tensión capaz de suministrar 24 V de corriente continua



D.C. y al menos 3 A de intensidad como podemos comprobar en la tabla 2.1 de consumos:

CONSUMO DE LOS COMPONENTES	
Convertidor DADE-MVC-010	2 X 25 mA = 50 mA
Válvulas proporcionales MPYE 5-1/8-LF-010-B	2 X 833 mA = 1.66 A
Solenoides MOFH-3-1/8	2 X 187 mA = 375 mA
Sensor SMAT-8E-S50-IU-M8	24 mA
TOTAL	2,109* A

Tabla 2.1. Consumo de los componentes

*Aunque en este proyecto no se realice la conexión de las válvulas MOFH y el sensor SMAT, pero debemos tener en cuenta sus consumos para desarrollos posteriores. Todos estos datos han sido obtenidos de las especificaciones técnicas de los componentes, que se encuentran incluidas en el CD-ROM.

2.1.10.- OTROS COMPONENTES

Se disponen de otros componentes (fig. 2.21) en el Robowriter, como puede ser:

- Tubos flexibles.
- Distribuidores múltiples.
- Racores, silenciadores y tapones para las válvulas.



Fig. 2.21. Racor, silenciador y distribuidor

En las figuras 2.22 y 2.23, podemos ver cómo están distribuidos todos los componentes del robowriter, ya conectados y dentro del habitáculo de trabajo:

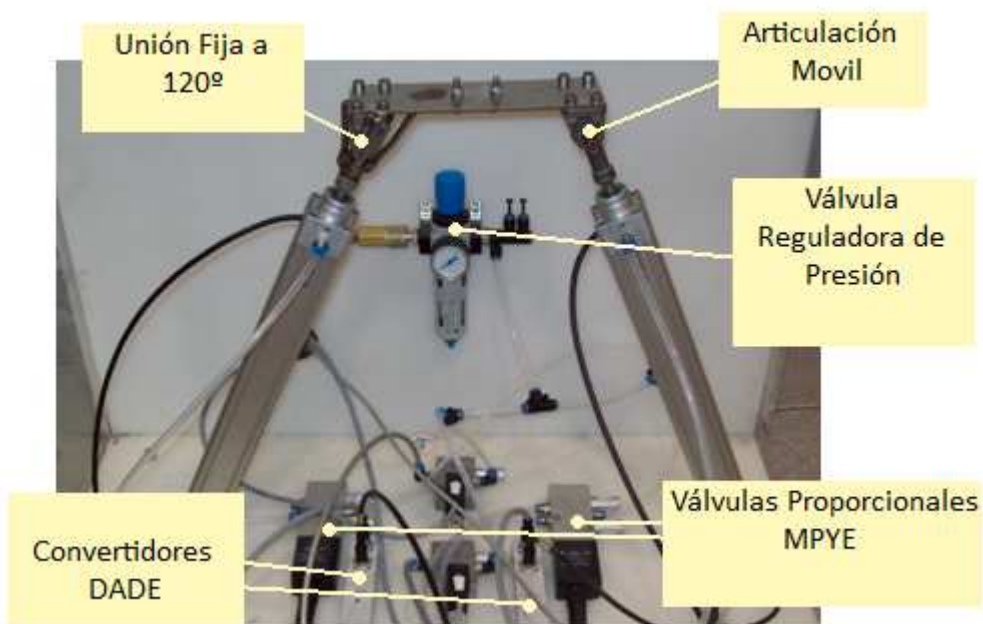


Fig. 2.22. Componentes del Robowriter (1)

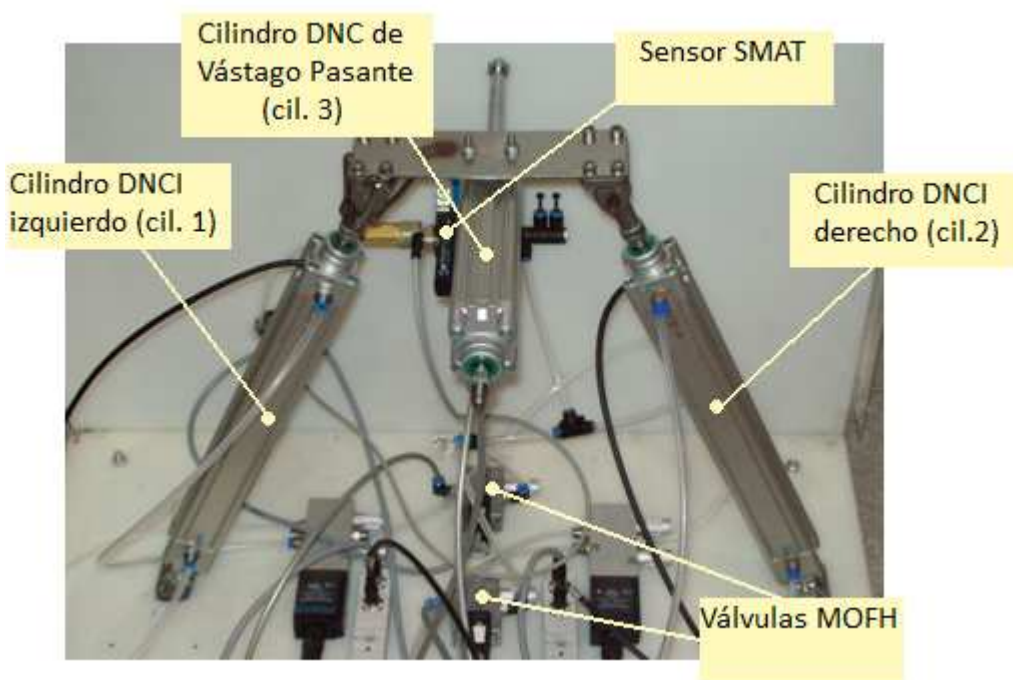


Fig. 2.23. Componentes del Robowriter (2)

2.1.11.- CIRCUITOS DE POTENCIA

La tarjeta de adquisición que se usa, la PCI-MIO-16E-1, dispone de salidas digitales las cuales, cuando están activas, dan valores entre 4.3 y 5.1 V, estos valores de tensión resultan insuficientes para accionar algunos actuadores ya que disponen de unos valores de tensión o corriente muy bajos. Para resolver esto se realizaron, en Rosillo 2007, tres circuitos pequeños de potencia: dos para adaptar la tensión de las salidas digitales a las tensiones de activación de las válvulas MOFH y otro que actúa como interruptor electrónico para activar o no la entrada de referencia, a 24 V, de los dos cilindros DNCl. En la tabla 2.2, se muestran los valores de tensión y corriente para una salida a nivel bajo y a nivel alto en la PCI-MIO-16E-1 de National Instrument:

Salidas Digitales PCI-MIO-16E-1			
High output	4,35 Vmin	High output current (source)	-13 mA
Low output	0,4 Vmax	Low output current (sink)	24 mA

Tabla 2.2. Valores de las salidas digitales de la tarjeta PCI-MIO-16E-1

a) INTERRUPTOR MEDIANTE ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO

Se comprobó que el circuito que actúa como interruptor eléctrico se había perdido por lo que se tuvieron que realizar los cálculos y simulaciones para la creación de un nuevo circuito (Apartado 2.2.1).

b) CIRCUITO ADAPTADOR DE TENSIÓN PARA LA ACTIVACIÓN DE LAS VÁLVULAS MOFH

Se necesitan dos circuitos adaptadores, uno para cada válvula MOFH. De los circuitos para las válvulas MOFH si se dispone, aunque no se han tenido en cuenta en este proyecto ya que no han sido necesarios, una recomendación a la hora de conectarlos sería tomar con un polímetro los valores de tensión que nos ofrecen ya que estos primeros circuitos de potencia

$$R_2 = 128^*$$

$$\beta \cong 50$$

$$I_B \cdot \beta = I_C \quad \longrightarrow \quad I_B \cdot 50 = \frac{24}{128}$$

$$I_B = 3,75 \text{ mA}$$

$$R_1 \cong \frac{2,8 - 0,7}{2 \cdot 10^{-3}} = 1050$$

Utilizando un valor normalizado:

$$R_1 = 1k5 \Omega$$



fueron diseñados para la tarjeta de adquisición de datos de Data Translation que posteriormente fue sustituida por la de National Instrument, y es posible que no sirvieran para la nueva tarjeta y tuvieran que ser realizados de nuevo. Los cálculos que se muestran de estos circuitos fueron realizados anteriormente (Rosillo, 2007). Las conexiones pertinentes para su correcto funcionamiento son muy fáciles de realizar (fig. 2.24).

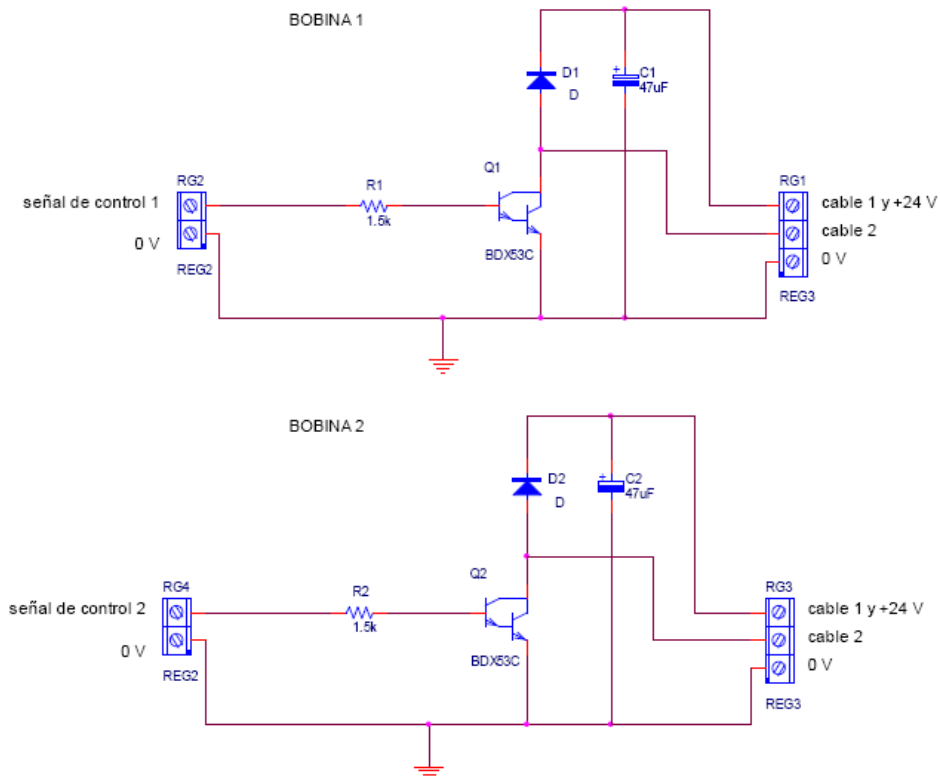


Fig. 2.24. Circuitos adaptadores para las válvulas MOFH

2.1.12.- ESQUEMAS ELÉCTRICOS DE LA INSTALACIÓN COMPLETA

En el anexo A.1 se adjuntan los planos eléctricos de las conexiones que forman el robot.

2.1.13.- ESQUEMA NEUMÁTICO DE LA INSTALACIÓN COMPLETA

En el anexo A.2 se adjunta el plano de conexiones neumáticas de los componentes que forman el robot.



2.2.- ADECUACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL ROBOT

2.2.1.- DISEÑO Y CONEXIONADO DEL CIRCUITO UTILIZADO COMO INTERRUPTOR ELÉCTRICO

Se encontró el problema de que para la realización de este proyecto, el circuito que actúa como interruptor electrónico (fig. 2.25) se había perdido por lo que se tuvieron que pedir los componentes necesarios y diseñar un nuevo circuito para la activación electrónica del punto de referencia.

Para el montaje del pequeño circuito se necesita un transistor BC547B, una resistencia de 47K, otra de 2,2K y un transistor de potencia BC244C. A continuación se muestran los cálculos realizados para el circuito:

$\beta_1 \simeq 50 \longrightarrow$ Para valores de corriente de unos 150 mA (valor aproximado de $I_C(Q_2)$).

$$\beta \simeq 150$$

$$I_1 = \frac{\beta}{\beta_1} = 3 \text{ mA}$$

$$R_2 \leq \frac{24 - 0,7 - 0,2}{3 \cdot 10^{-3}} = 7k7 \longrightarrow \text{En saturación: } V_{BE} = 0,7 \text{ V} \quad V_{CE} = 0,2 \text{ V}$$

Saturación (nivel de salida alto):

$$R_1 \leq \frac{4,95 - 0,7}{\frac{3 \text{ mA}}{150}} = 182k$$

Corte (nivel de salida bajo):

$$R_1 \geq \frac{0,4 - 0,7}{\frac{3 \text{ mA}}{150}} = 15 \text{ k}$$



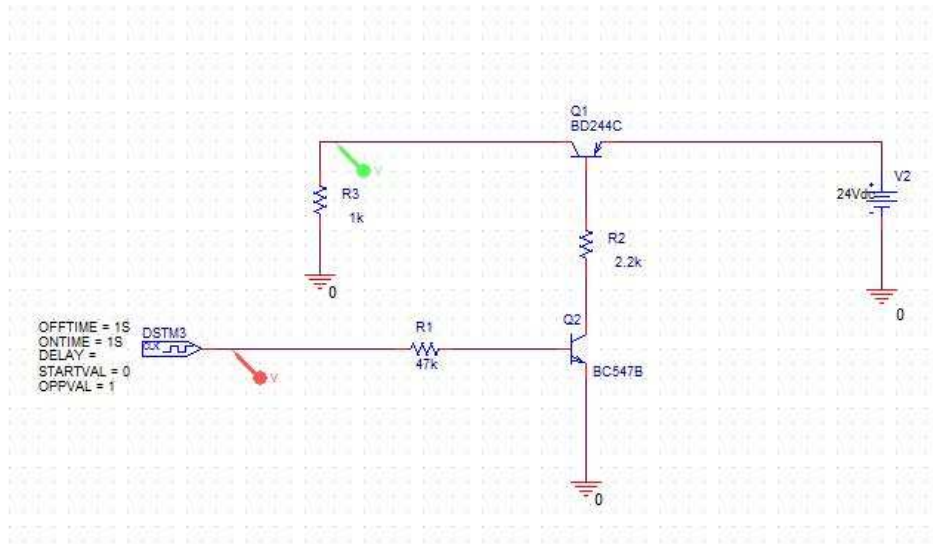


Fig. 2.25. Esquemático del circuito utilizado como interruptor eléctrico

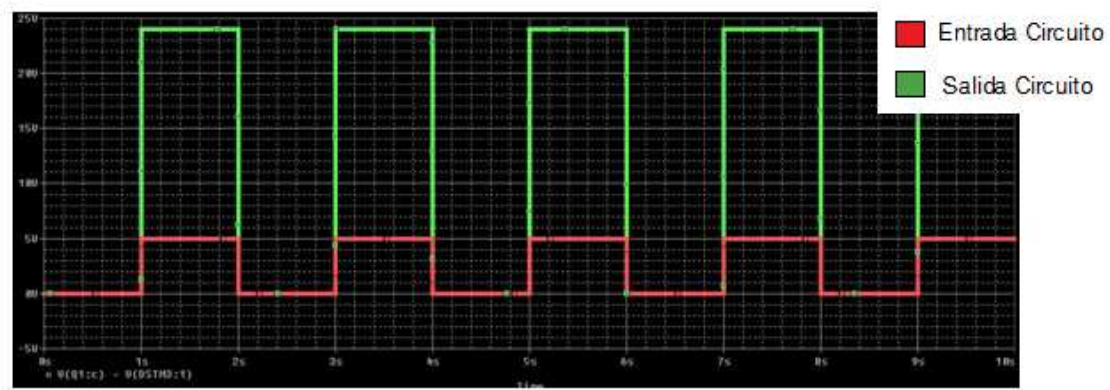


Fig. 2.26. Simulación realizada en Orcad del funcionamiento del circuito

Tras ver que las simulaciones en el Orcad (fig. 2.26) eran correctas, se realizó el montaje del circuito y tras solucionar algún pequeño inconveniente se conectó el circuito (fig. 2.27) y se comprobó que funcionaba perfectamente.



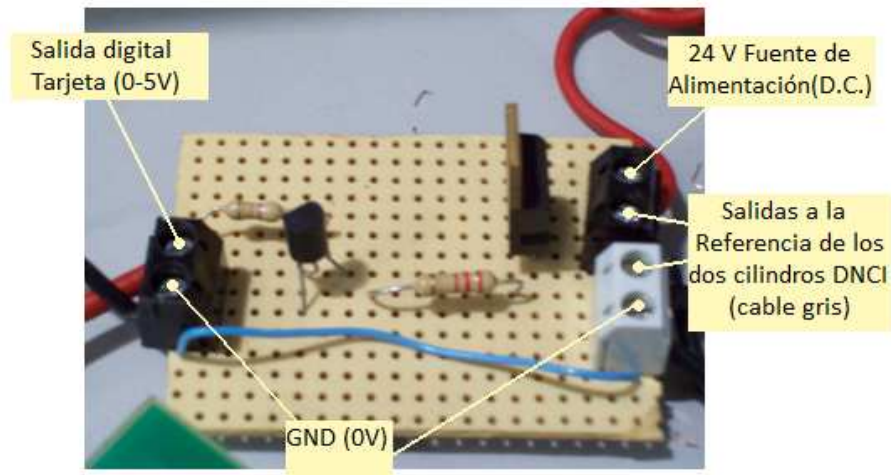


Fig. 2.27. Conexiones del circuito que actúa como interruptor eléctrico

2.2.2.- DESMONTAJE DEL CILINDRO IZQUIERDO DNCI POR LA RUPTURA DE SU SENSOR DE POSICIÓN

Este fallo se produjo debido a la holgura de la unión que cuando se intento apretar fuertemente con el cilindro se torció el vástago del cilindro y parecía que por la junta perdía aire y el sensor no medía la posición tampoco. Fue el problema que más ha tardado en solucionarse ya que se debía de pedir los repuestos a la empresa Festo. Primero se pensó que el problema estaría en las juntas por lo que se pidieron un juego de juntas que tardó un tiempo en llegar.



Fig. 2.28. Grasa, pegamento y juego de juntas (pedido a Festo)

Tras llegar el juego de juntas se procedió a desarmar el cilindro para cambiar la junta de la zona por donde salía el vástago, al ver que el problema seguía sin solucionarse se desarmó completamente el cilindro (fig. 2.29) para cambiar el resto de juntas y se engrasaron mucho más las juntas y el vástago, pero esto tampoco dio resultado. Al intentar poner de nuevo los puntos de calibración de los sensores volvía a dar error. El convertidor mostraba, mediante los leds, que el cilindro no lo habíamos movido o que el punto de inicio (referencia) era el mismo que el punto del final (calibración) del recorrido, cosa que no era cierta.

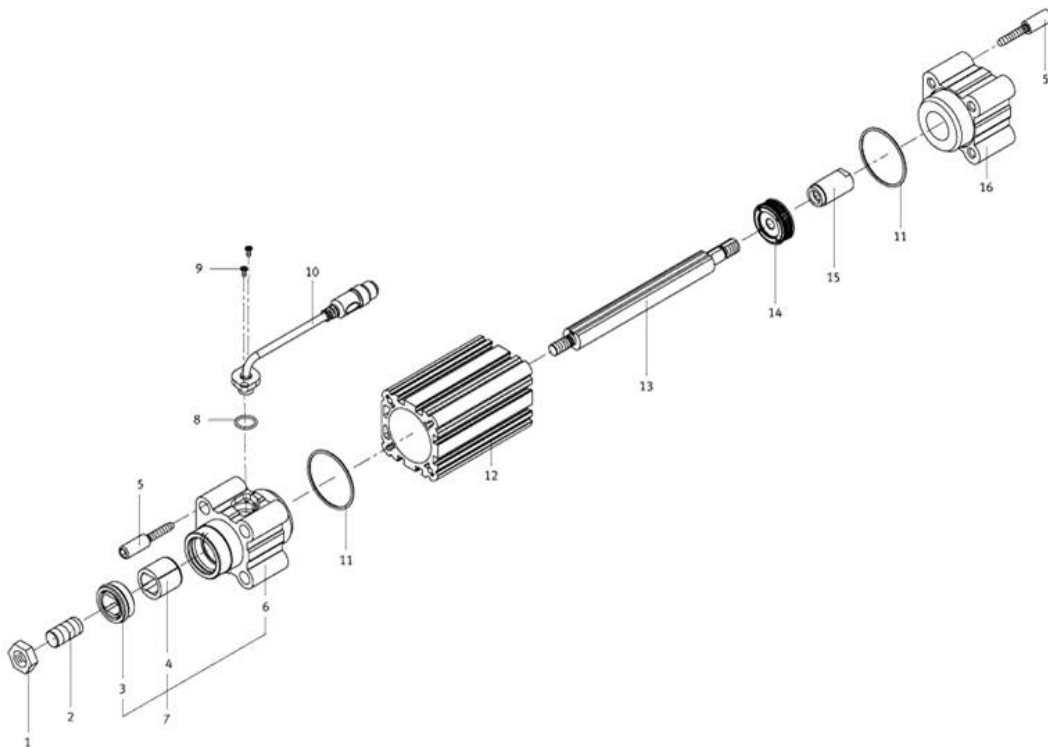


Fig. 2.29. Despiece del cilindro DNCI

Tras haber realizado el desmontaje completo del cilindro y cambiar las juntas sin poder solucionar nada, se pensó que el problema podría estar en el sensor (módulo detector, nº 10). Se realizó el pedido de un módulo detector y un juego de llaves thorex para desmontar el módulo detector del cilindro DNCI.



Fig. 2.30. Sensor dañado del cilindro DNCI

Una vez recibido el sensor se cambió y se realizó de nuevo la primera puesta a punto (establecer punto de referencia y calibración) que se describe en el apartado 2.1.3 (b) de este capítulo. Con el nuevo sensor el problema se encuentra solucionado, aunque la dinámica del sistema ha cambiado un poco al cambiar las juntas del cilindro.

Capítulo 3: SOFTWARE DESARROLLADO





3.1.- SOFTWARE USADO EN EL DESARROLLO DE ROBOWRITER

3.1.1.- MATLAB

a) DESCRIPCIÓN Y MÓTIVOS PARA SU USO

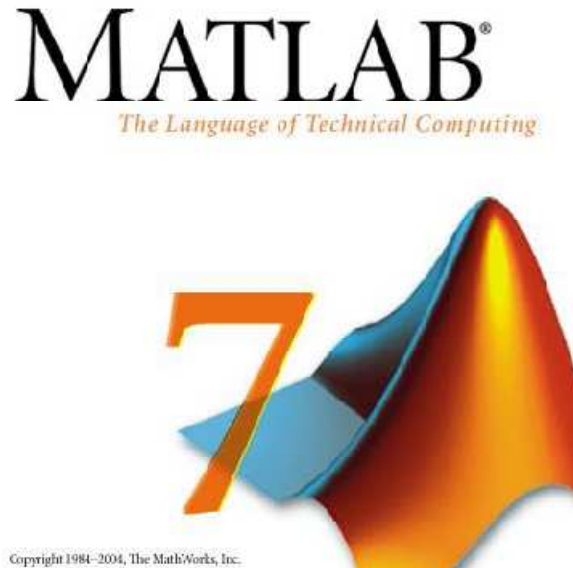


Fig. 3.1. Matlab 7

MATLAB es el nombre abreviado de “MATrix LABoratory”. Es un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices, y por tanto se puede trabajar también con números escalares (tanto reales como complejos), con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas. Matlab es un lenguaje de alto rendimiento para cálculos técnicos que integra:

- Análisis numérico
- Cálculo matricial
- Procesamiento de señales
- Gráficos

Permite resolver muchos problemas numéricos en una fracción del tiempo que llevaría hacerlo en lenguajes como *C*, *Basic* o *Fortran*. Matlab ha evolucionado en los últimos años a partir de la colaboración de muchos usuarios. Uno sus puntos fuertes es que permite construir nuestras propias herramientas reutilizables. Podemos crear fácilmente nuestras propias funciones y programas especiales (conocidos como M-

archivos) en código Matlab, que podemos agrupar en Toolbox (también llamadas librerías), que son una colección especializada de M-archivos para trabajar en clases particulares de problemas como: procesamiento de señales, adquisición de datos, identificación de sistemas, tratamiento de imágenes... En resumen, las prestaciones más importantes de Matlab son:

- Escritura del programa en lenguaje matemático.
- Implementación de las matrices como elemento básico del lenguaje, lo que permite una gran reducción del código, al no necesitar implementar el cálculo matricial.
- Un gran contenido de órdenes específicas, agrupadas en toolboxes.
- Posibilidad de ampliar y adaptar el lenguaje, mediante ficheros de script y funciones .m.

En definitiva *Matlab* es un sistema ideal para desarrollar sistemas avanzados de control.

b) HERRAMIENTAS DE MATLAB UTILIZADAS

La versión de Matlab utilizada ha sido la versión 7.1. Service Pack 3 (fig. 3.1) que nos ofrece compatibilidad con los dispositivos de adquisición de datos que hemos usado, sin embargo, el código podría también ejecutarse sin problemas en versiones anteriores.

El código necesario ha sido realizado en m-files y se ha usado Simulink únicamente como una herramienta de apoyo, con la que se ha simulado el diseño una vez hallada la función de transferencia del sistema de forma aproximada.

Matlab dispone de multitud de toolboxes que facilitan la creación de las aplicaciones ya que incluyen numerosas funciones que nos ahorrará tener que implementarlas. En el código para el funcionamiento del robot se ha hecho uso principalmente del *Data Acquisition toolbox* que lleva implementadas funciones para la adquisición de datos de la tarjeta, utilizadas principalmente para la lectura de entradas y salidas analógicas o digitales.



También se ha utilizado la función “*ident*” de Matlab, como uno de nuestros procedimientos seguidos para sacar una función de transferencia aproximada introduciéndole al robot como referencia un vector de impulsos PRBS.

3.1.2.- ORCAD

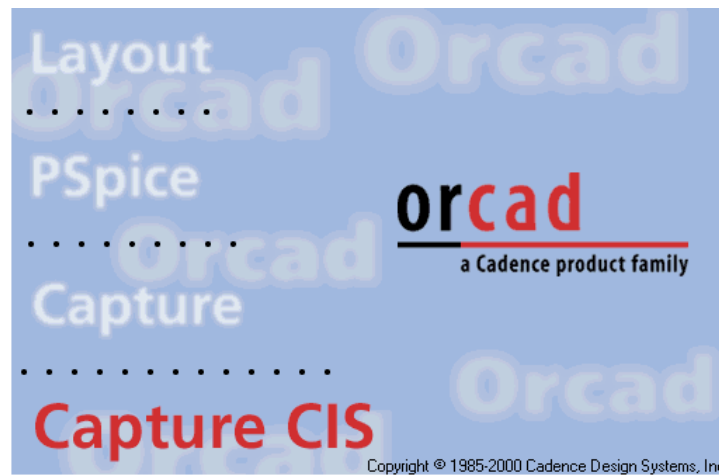


Fig. 3.2. Orcad Capture

Orcad (fig. 3.2) es una de las más completas aplicaciones dedicadas al diseño de circuitos electrónicos, permite realizar esquemas eléctricos, diseño de placas de circuito impreso y diferentes simulaciones electrónicas.

Con este programa se ha realizado el esquemático y simulación del circuito eléctrico que actúa como interruptor de accionamiento para introducir la señal necesaria que establece la referencia de los dos cilindros *DNCI*, señal que también fué utilizada para establecer los puntos de calibración de los cilindros *DNCI* en ciertos instantes en los que se desajustó alguno de los cilindros.



3.1.3.- FESTO FLUIDSIM



Fig. 3.3. Festo Fluidsim

Este programa fue desarrollado por la empresa de automatismos y neumática FESTO y entre sus características más importantes se encuentran:

- Ofrece la posibilidad de crear y simular circuitos de electroneumática.
- Posee una biblioteca de componentes neumáticos y eléctricos muy completa para la creación de circuitos nuevos.
- Durante la animación, los conductos y cilindros aparecen coloreados, según el estado de cada uno.
- El usuario puede controlar la velocidad de la simulación (con funciones como paso a paso, pausa...).
- Las válvulas y los interruptores accionados manualmente pueden ser conmutados mediante un clic del ratón.
- Muestra con aparatos de medición los valores exactos de presión, fluido y corriente.
- Guarda una proporción del tiempo real durante la animación.
- Ofrece también el apoyo necesario para el conocimiento básico de la neumática, en un menú denominado “Didáctica”, que puede ser muy útil a la

hora de explicar y entender los distintos contenidos relacionados con este tema y un apartado denominado “*Descripción del componente*”, donde explica cómo son los distintos componentes de los circuitos.

En lo que concierne a este proyecto con FESTO Fluidsim (fig. 3.3) se ha realizado una simulación de nuestro proceso y se ha simplificado la realización de los esquemas neumáticos del mismo.

3.1.4.- AUTOCAD



Fig. 3.4. Autocad 2007

AutoCAD es un programa de diseño asistido por ordenador (CAD "Computer Aided Design"; en inglés, Diseño Asistido por Computador) para dibujo en 2D y 3D. Actualmente es desarrollado y comercializado por la empresa Autodesk. En lo que concierne a nuestro proyecto, se ha utilizado la versión Autocad 2007 (fig. 3.4) y ha sido utilizado para realizar los planos de las conexiones eléctricas y neumáticas.

3.2.- ADQUISICIÓN DE DATOS EN MATLAB

3.2.1.- MOTOR DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El motor de adquisición de datos (o simplemente motor) es un *MEX-file* o enlace de librería dinámica “*dynamic link library*” (DLL) que:

- Almacena los objetos de los dispositivos y les asocia valores a las propiedades que controlan la aplicación de adquisición de datos.
- Controla la sincronización de eventos.
- Controla el almacenamiento de los datos adquiridos o puestos en cola.

Mientras el motor realiza estas tareas, puedes usar *Matlab* para otras labores tales como el análisis de los datos adquiridos. En otras palabras, el motor y *Matlab* son asíncronos.

3.2.2.- FUNCIONES MATLAB DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Las funciones disponibles en el *Data Acquisition Toolbox* con las que adquirir o enviar datos mediante nuestro dispositivo son las siguientes:

FUNCIÓN	FINALIDAD	AI	A0	DIO
FLUSHDATA	Borra los datos del motor de adquisición de datos.	X		
GETSAMPLE	Adquiere inmediatamente una muestra.	X		
GETDATA	Extrae datos, tiempo e información del evento desde el motor de adquisición de datos.	X		
GETVALUE	Lee valores de las líneas			X
PEEKDATA	Muestra el dato adquirido mas recientemente	X		
PUTSAMPLE	Saca una muestra inmediatamente		X	
PUTDATA	Pone datos a la cola del motor para una eventual salida		X	
PUTVALUE	Escribe valores a las líneas			X

Tabla 3.1. Funciones para la adquisición o el envío de datos con el *Data Acquisition Toolbox* de *Matlab*

Otras funciones también usadas, del *Data Acquisition Toolbox*, en nuestros programas son las siguientes (usadas fundamentalmente para la creación de objetos analógicos y digitales de entrada y salida):



FUNCIÓN	FINALIDAD	AI	A0	DIO
ANALOGINPUT	Crea un objeto de entrada analógica.	X		
ANALOGOUTPUT	Crea un objeto de salida analógica.		X	
DIGITALIO	Crea un objeto de entrada/salida digital.			X
ADDCHANNEL	Añade canales de hardware para objetos de entrada o salida analógicas.	X	X	
ADDLINE	Añade líneas de hardware para objetos de i/o digital.			X
ISLOGGING	Determina si la entrada analógica está cogiendo datos (retorna un 1 si se están cogiendo datos).	X		
ISSENDING	Determina si se están enviando datos por las líneas de salida analógicas (retorna un 1 si se están enviando datos).		X	
ISRUNNING	Indica si se está ejecutando un objeto (retorna un 1 si se está ejecutando).	X	X	X
START	Comienza a ejecutarse el objeto.	X	X	X
STOP	Deja de ejecutarse el objeto.	X	X	X

Tabla 3.2. Otras funciones del Data Acquisition Toolbox de Matlab

3.3.- PROGRAMAS REALIZADOS PARA EL ROBOT

3.3.1.- COMPROBACIÓN DE SENSORES

Este pequeño *Script de código en Matlab* nos será útil cuando conectemos algún nuevo sensor a las entradas analógicas del dispositivo de adquisición de datos, con él podemos realizar una prueba y ver si los resultados se corresponden con lo que debe marcar el sensor, si no es así, posiblemente, la conexión del sensor no es la correcta y puede que esté apareciendo una *señal de ruido* junto a la señal del sensor.

Debemos indicar el canal en el cual deseamos tomar medidas, en este ejemplo aparece indicado el canal 0. Si el dispositivo utilizado no es de *National Instrument* debemos indicar el driver de la tarjeta y el número de Id puede variar.

```
ai = analoginput('nidaq',1)           % ('driver',nº de ID)
chans_i = addchannel(ai,0)           % (objeto, nº de canal)

set(ai, 'SampleRate', 30)            % nº muestras por segundo
set(ai, 'SamplesPerTrigger', 300)
```

```

set(chans_i, 'SensorRange', [0 10])
set(chans_i, 'InputRange', [0 10])
set(chans_i, 'UnitsRange', [0 10])

start(ai);

h=getdata(ai,300);           % adquiere datos del sensor
plot(h);                    % muestra los datos

stop(ai);
delete(ai);

```

3.3.2.- ESTABLECIMIENTO DEL PUNTO DE REFERENCIA

Se realizó esta pequeña función para establecer de forma automática desde Matlab el punto de referencia de los sensores de ambos cilindros DNCl, ya que este se pierde tras una desconexión eléctrica.

Es un programa muy básico en el que simplemente se envía una señal por una salida digital durante un corto espacio de tiempo, para llamar a la función se debe escribir “referencia()”:

```

function referencia()

dio = digitalio('nidaq',1); %creo objeto de i/o digital
addline(dio,2,0,'out');    %creo línea de salida

putvalue(dio,1)           % valor 1 en cable gris establece punto referencia
tic
for i=1:8000^2            % contador de más de 2 seg. Para que se referencie
end
putvalue(dio,0)           %pone 0 V en la salida digital
toc

delete(dio)
clear dio

```

3.3.3.- PROGRAMA DE LA CINEMÁTICA DIRECTA

En esta función de Matlab se realiza el proceso para conocidas las coordenadas articulares $d1$ y $d2$ (posiciones del vástago de los cilindros), obtener la posición cartesiana (x_p , y_p) del efector final en el espacio de trabajo.



Para facilitar y simplificar al máximo la programación utilizada, se ha creado un archivo en el que vienen definidos todos los parámetros geométricos del robot. De esta manera, en todos los archivos creados para la resolución, tanto de la cinemática directa como de la inversa, lo primero que hará Matlab será leer el archivo parámetros.m:

```
a=60;           % cm
b=20;

factor=0.5;
sit=b*(factor);% cm
%tita2= 1,3089969389957471826927680763665;

tita3=2*pi/3;  %radianes
l=50;          % cm
g=9.81;        %aceleracion de la gravedad (m/s^2)
```

Para el cálculo de la cinemática directa crearemos una función que tomando como entrada las coordenadas articulares devolverá la posición del efector final. El desarrollo de este código es el siguiente (su sintaxis sería cdir(d1,d2)):

```
%programacion del espacio de trabajo del robot
function P=cdir(d1,d2)
format long
parametros
upa=sqrt((l+d1)^2+(b^2)-(2*(l+d1)*b*cos(tita3)));
upb=(l+d2);
tita2=pi-(tita3);
xa=0;
ya=0;
xb=a;
yb=0;
%2*(xb-xa)*x+2*(yb-ya)*y+R-S=0;
R=(xa^2)+(ya^2)-upa^2;
S=(xb^2)+(yb^2)-upb^2;
M=(ya-yb)/(xb-xa);
N=(1/2)*((S-R)/(xb-xa));
%p*(y^2) + q*y + r = 0
p=(M^2)+1;
q=2*((M*N)-(M*xa)-ya);
r=(N^2)-(2*N*xa)+R;
z=(q^2-4*p*r);
if z>=0
    yd=(-q+sqrt(q^2-4*p*r))/(2*p);
    y2=(-q-sqrt(q^2-4*p*r))/(2*p);
    xd=M*yd+N;
    x2=M*y2+N;

%PRIMERA OPCION
%calculo del angulo tita2
d=sqrt((xd^2)+(yd^2));
```

```

alfa=atan(yd/xd)
beta=acos((b^2-(l+d1)^2-d^2)/(-2*d*(l+d1)))
tita2=alfa+beta
xc=(l+d1)*cos(tita2);
yc=(l+d1)*sin(tita2);
if yc>=0
    %calculo de la posicion del actuador
    fi=tita2+tita3-pi;
    xp=xc+(sit)*cos(fi)
    yp=yc+(sit)*sin(fi)

    %representacion de los brazos del robot
    xe = [xa xc xd xb];
    ye = [ya yc yd yb];
    axis([0,50,0,80])
    xlabel('distancia horizontal (cm)');
    ylabel('distancia vertical (cm)');
    %subplot(2,1,2),
    plot(xe, ye, 'color', 'r');
    hold on

    %representamos el punto de actuacion del actuador
    axis([-20,80,0,80])
    xlabel('distancia horizontal (cm)');
    ylabel('distancia vertical (cm)');
    %subplot(2,1,1),
    plot(xp, yp, 'x', 'color', 'b')
    hold on
else
    disp('disposicion fisica imposible')
end
end
P=[xp,yp]

```

3.3.4.- PROGRAMA DE LA CINEMÁTICA INVERSA

En el problema inverso de la cinemática se encuentra la solución a la determinación de las variables articulares d_1 y d_2 , conocida la posición del actuador. Se puede plantear también desde el punto de vista siguiente: si se quiere que el efector final se sitúe en una posición del plano determinada, ¿qué longitudes d_1 y d_2 deberán extenderse los cilindros para alcanzar esa posición?

La solución a este problema viene, al igual que la cinemática directa, determinada mediante razonamientos geométricos. Esta vez, se parte de los valores (x_p, y_p) conocidos, para llegar al valor de d_1 y d_2 . El desarrollo de este código es el siguiente (su sintaxis sería $\text{cinv}(X_p, Y_p)$):



```
function Q=cinv (xp,yp)
format long
parametros
q1=0;
q2=0;
%parametros geometricos necesarios
alfa=atan(yp/xp);
d=sqrt((yp^2)+(xp^2));
beta=asin((sit*sin(tita3))/d)
tita2=alfa+beta;
fi=tita2+tita3-pi;
%calculo del punto C para calcular d1
xc=xp-sit*cos(fi)
yc=yp-sit*sin(fi)
m=sqrt((yc^2)+(xc^2))
d1=m-l
%calculo del punto D para calcular d2
xd=xp+sit*cos(fi)
yd=yp+sit*sin(fi)
n=sqrt((yd^2)+(a-xd)^2)
d2=n-l;
q1=d1;
q2=d2;
Q=[q1,q2]
```

3.3.5.- PROGRAMAS PARA EL CONTROL DE POSICIÓN DE LOS CILINDROS

a) FUNCIÓN PID

Esta función es a la que se llama para controlar la posición de los cilindros, la sintaxis de la función es $[ai, ao] = \text{PID}()$ y se ejecuta lo siguiente:

```
function [ai, ao] = inicioPID()
clear all

%declara las variables
global S_REFERENCIA1;
global S_REFERENCIA2;
global SALIDA1;
global SALIDA2;
global INTEGRAL;
global N_MUESTRA;
global S_CONTROL1;
global S_CONTROL2;
global ai;
global ao;
global xp;
global yp;
%Asignación dinámica de las variables
S_CONTROL1=[];
S_CONTROL2=[];
S_REFERENCIA1=[];
```



```

S_REFERENCIA2=[];
SALIDA1=[];
SALIDA2=[];

%inicia N_MUESTRA e INTEGRAL
N_MUESTRA = 1;
INTEGRAL = [0 0];

%crea los objetos ai y ao y asigna los canales
ao = analogoutput('nidaq',1);
ai = analoginput('nidaq',1);
chans_o = addchannel(ao,0:1);
chans_i = addchannel(ai,0:1);

%Ajusta los rangos de las entradas a los de los sensores
set(chans_i, 'SensorRange', [0 10]);
set(chans_i, 'InputRange', [0 10]);
set(chans_i, 'UnitsRange', [0 10]);

%ajusta los rangos de salida a los de los actuadores
set(chans_o, 'OutputRange', [0 10]);
set(chans_o, 'UnitsRange', [0 10]);

% Frecuencia de muestreo (Hertzios)
set(ai, 'SampleRate', 30);
ai.SamplesAcquiredFcnCount = 1;
% Función que implementa el algoritmo de control
ai.SamplesAcquiredFcn = {@callback_PID, ao};
%Numero de muestras que se van a adquirir en cada disparo "Trigger"
set(ai, 'SamplesPerTrigger', inf);
%set(ai, 'triggerrepeat', inf);

%putsample(ao, 0);
%start(ao);
start(ai);
tic

```

b) FUNCIÓN CALLBACK_PID

Esta función es llamada por la función PID por cada muestra adquirida, contiene los parámetros de los controladores, la eliminación de las zonas muertas, la saturación y se ha incluido el programa de la cinemática directa para pasar el movimiento de los cilindros a coordenadas del espacio de trabajo y poder representar el dibujo que realice el tercer cilindro en una gráfica. El código de esta función es:

```

function callback_PID(obj,event, ao)

%Declaración de variables
global REFERENCIA1;
global REFERENCIA2;

```



```

global N_MUESTRA;
global INTEGRAL;
global S_CONTROL1;
global S_CONTROL2;
global S_REFERENCIA1;
global S_REFERENCIA2;
global SALIDA1;
global SALIDA2;
global U;
%global xe;
%global ye;
global xp;
global yp;
global d1;
global d2;
global sal;
persistent E_k1;
global EJEX;
global EJEY;

EJEX=[33.236:1:55.375];
EJEY = 55.375;
%E_k1 es el error en la muestra anterior para N_MUESTRA==1 valdra 0
if (N_MUESTRA == 1)
    E_k1 =[0 0];
end

%Situa los valores de los distintos canales de ai en la variable sal
sal=getsample(obj);

%parametros
a=60; % cm
b=20;
factor=0.5;
sit=b*(factor);% cm
%tita2= 1,3089969389957471826927680763665;
tita3=2*pi/3; %radianes
l=50; % cm
g=9.81; %aceleracion de la gravedad (m/s^2)

%function Q=cinv (xp,yp)
%format long
%parametros
%q1=0;
%q2=0;

%parametros geometricos necesarios
%alfa=atan(EJEY/EJEX);
%d=sqrt((EJEY^2)+(EJEX^2));
%beta=asin((sit*sin(tita3))/d)
%tita2=alfa+beta;
%fi=tita2+tita3-pi;
%calculo del punto C para calcular d1
%xc=xp-sit*cos(fi)
%yc=yp-sit*sin(fi)
%m=sqrt((yc^2)+(xc^2))
%d1=m-l
    
```




```

%calculo del punto D para calcular d2
%xd=xp+sit*cos(fi)
%yd=yp+sit*sin(fi)
%n=sqrt((yd^2)+(a-xd)^2)
%d2=n-1;
%q1=d1;
%q2=d2;
%Q=[q1,q2]

REFERENCIA1=[3*ones(1,100) 4.91*ones(1,100) 5.942*ones(1,100)
3*ones(1,100)];
REFERENCIA2=[3*ones(1,100) 1.877*ones(1,100) 6.4*ones(1,100)
3*ones(1,100)];
%7.633*ones(1,100)
%5.41*ones(1,100)
%valores de los PID, podemos ajustarlo para obtener una respuesta
diferente

Kp(1)=3.5;
Ki(1)=0;
Kd(1)=0.02;

Kp(2)=3;
Ki(2)=0;
Kd(2)=0.02;

%IMPLEMENTACION DEL CILINDRO 1

SALIDA1(N_MUESTRA) = sal(1);
S_REFERENCIA1(N_MUESTRA)=REFERENCIA1(N_MUESTRA);

%Posicion
Y_k(1) = sal(1);
%Error
E_k(1) = REFERENCIA1(N_MUESTRA)-Y_k(1);
%Integral
INTEGRAL(1) = INTEGRAL(1) + E_k(1);

%Señal de control
%U(1) = Kp(1) * E_k(1) + Ki(1) * INTEGRAL(1) + Kd(1) * (E_k(1) -
E_k1(1))/(1/30);

%para ver si eliminamos la zona muerta
if REFERENCIA1(N_MUESTRA)-
0.14<Y_k(1)&REFERENCIA1(N_MUESTRA)+0.14>Y_k(1)
U(1)=-0.1;
else
U(1) = Kp(1) * E_k(1) + Ki(1) * INTEGRAL(1) + Kd(1) * (E_k(1)
- E_k1(1))/(1/30);
end

%La señal de control oscila en torno al cero
%Saturacion que mantiene la señal de control en valores entre -5y5
if U(1)>5
U(1)=5;
elseif U(1)<-5

```



```

U(1)=-5;
end

%Sumamos 5 para que el valor que introducimos al actuador sea
entre 0
%y 10
U(1) = U(1)+5;

%Si la señal esta saturada evitamos que INTEGRAL aumente su valor
if U(1)>=6 | U(1)<=4.2
INTEGRAL(1) = INTEGRAL(1) - E_k(1);
end

%Para valores mayores a 9.8 o menores que 0.2 la valvula vibra
if U(1)>6
U(1)=6;
elseif U(1)<4.2
U(1)=4.2;
end

%IMPLEMENTACION DEL CILINDRO 2

SALIDA2(N_MUESTRA) = sal(2);
S_REFERENCIA2(N_MUESTRA)=REFERENCIA2(N_MUESTRA);

%Posicion
Y_k(2) = sal(2);
%Error
E_k(2) = REFERENCIA2(N_MUESTRA)-Y_k(2);
%Integral
INTEGRAL(2) = INTEGRAL(2) + E_k(2);

%Señal de control
%U(2) = Kp(2) * E_k(2) + Ki(2) * INTEGRAL(2) + Kd(2) * (E_k(2) -
E_k1(2))/(1/30);

%para ver si eliminamos la zona muerta
if REFERENCIA2(N_MUESTRA)-
0.14<Y_k(2)&REFERENCIA2(N_MUESTRA)+0.14>Y_k(2)&REFERENCIA2(N_MUESTRA)<
=6.5
U(2)=0.045;
else if REFERENCIA2(N_MUESTRA)-
0.14<Y_k(2)&REFERENCIA2(N_MUESTRA)+0.14>Y_k(2)&REFERENCIA2(N_MUESTRA)>
6.5
U(2)=-0.03;
else U(2) = Kp(2) * E_k(2) + Ki(2) * INTEGRAL(2) + Kd(2) *
(E_k(2) - E_k1(2))/(1/30);
end
end
%U(2) = Kp(2) * E_k(2) + Ki(2) * INTEGRAL(2) + Kd(2) * (-
Y_k(1))/(1/30);
%La señal de control oscila en torno al cero
%Saturacion que mantiene la señal de control en valores entre -5 y
5
if U(2)>5
U(2)=5;
elseif U(2)<-5

```



```

U(2)=-5;
end

%Sumamos 5 para que el valor que introducimos al actuador sea
entre 0
%y 10
U(2) = U(2)+5;

%Si la señal esta saturada evitamos que INTEGRAL aumente su valor
if U(2)>=5.8 | U(2)<=4.2
INTEGRAL(2) = INTEGRAL(2) - E_k(2);
end

%Para valores mayores a 9.8 o menores que 0.2 la valvula vibra
if U(2)>5.8
U(2)=5.8;
elseif U(2)<4.2
U(2)=4.2;
end

%ha finalizado la implementación de los cilindros
% U(1)=5;
%U(2)=5.045;

S_CONTROL1(1,N_MUESTRA)= [U(1)];
S_CONTROL2(1,N_MUESTRA)= [U(2)];

putsample(ao, [U(1) U(2)]);

d1(N_MUESTRA)=(SALIDA1(N_MUESTRA)*30)/10;
d2(N_MUESTRA)=(SALIDA2(N_MUESTRA)*30)/10;

upa=sqrt((1+d1(N_MUESTRA))^2+(b^2)-
(2*(1+d1(N_MUESTRA))*b*cos(tita3)));
upb=(1+d2(N_MUESTRA));
tita2=pi-(tita3);
xa=0;
ya=0;
xb=a;
yb=0;
%2*(xb-xa)*x+2*(yb-ya)*y+R-S=0;
R=(xa^2)+(ya^2)-upa^2;
S=(xb^2)+(yb^2)-upb^2;
M=(ya-yb)/(xb-xa);
N=(1/2)*((S-R)/(xb-xa));
%p*(y^2) + q*y + r = 0
p=(M^2)+1;
q=2*((M*N)-(M*xa)-ya);
r=(N^2)-(2*N*xa)+R;
z=(q^2-4*p*r);
if z>=0
yd=(-q+sqrt(q^2-4*p*r))/(2*p);
y2=(-q-sqrt(q^2-4*p*r))/(2*p);
xd=M*yd+N;
x2=M*y2+N;

%PRIMERA OPCION

```



```

%calculo del angulo tita2
d=sqrt((xd^2)+(yd^2));
alfa=atan(yd/xd);
beta=acos((b^2-(l+d1(N_MUESTRA))^2-d^2)/(-
2*d*(l+d1(N_MUESTRA))));
tita2=alfa+beta;
xc=(l+d1(N_MUESTRA))*cos(tita2);
yc=(l+d1(N_MUESTRA))*sin(tita2);
if yc>=0
    %calculo de la posicion del actuador
    fi=tita2+tita3-pi;
    xp(N_MUESTRA)=xc+(sit)*cos(fi);
    yp(N_MUESTRA)=yc+(sit)*sin(fi);

    %representacion de los brazos del robot
    %xe = [xa xc xd xb];
    %ye = [ya yc yd yb];
    %axis([0,50,0,80])
    %xlabel('distancia horizontal (cm)');
    %ylabel('distancia vertical (cm)');
    %subplot(2,1,2),
    %plot(xe, ye, 'color', 'r');
    %hold on

    %representamos el punto de actuacion del actuador
    %axis([-20,80,0,80])
    %xlabel('distancia horizontal (cm)');
    %ylabel('distancia vertical (cm)');
    %subplot(2,1,1),
    %plot(xp, yp, 'x', 'color', 'b')
    %hold on
else
    disp('disposicion fisica imposible')
end
end
end

```

```
E_k1 = E_k;
```

```
N_MUESTRA = N_MUESTRA + 1;
```

c) FUNCIÓN FINALIZA

Esta función se ejecuta cuando se desea finalizar la ejecución del programa del PID, se eliminan los objetos analógicos y digitales, se retraen los cilindros y se nos muestran las gráficas de datos que tengamos configuradas. Su sintaxis es `finaliza(ai, ao)` y al escribirla se ejecuta este código:

```
function finaliza(ai, ao)
toc
```

```
%Declaracion de variables
```

```

global SALIDA1;
global S_REFERENCIAL1;
global S_CONTROL1;
global S_REFERENCIAL2;
global SALIDA2;
global S_CONTROL2;
global xp;
global yp;
global d1;
global d2;

%Devuelve el cilindro a la posición inicial
putsample(ao,[4,4]);

%Para y elimina los objetos ai y ao
stop(ai);
stop(ao);
delete(ai);
delete(ao);

%Muestra por pantalla los resultados del cilindro 1
figure()
plot(S_REFERENCIAL1,'r');
hold on;

plot(S_CONTROL1,'g');
hold on;

plot(SALIDA1);
hold on;
legend('Referencia','Señal de control','Posición')
xlabel('Numero de muestras')
ylabel('Voltaje, V')

%muestra los resultados del cilindro 2
figure()
%hold on
plot(S_REFERENCIAL2,'r');
hold on;
plot(S_CONTROL2,'g');
hold on;
plot(SALIDA2,'b');
hold on;
legend('Referencia','Señal de control','Posición');
xlabel('Numero de muestras')
ylabel('Voltaje, V')

%representamos el punto de actuacion del actuador
figure();
axis([-20,80,0,80])
    xlabel('distancia horizontal (cm)');
    ylabel('distancia vertical (cm)');
    %subplot(2,1,1),
    plot(xp,yp,'r')

hold on
plot(33.236,55.375,43.236,55.375,43.236,65.375,33.236,55.375,'b');

```



Capítulo 4: IDENTIFICACIÓN DE UN MODELO DEL SISTEMA





4.1.- PRUEBAS USADAS PARA OBTENER LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA

Se realizaron muchos métodos experimentales (fig. 4.1) para conseguir una función de transferencia aceptable de los cilindros DNCI.

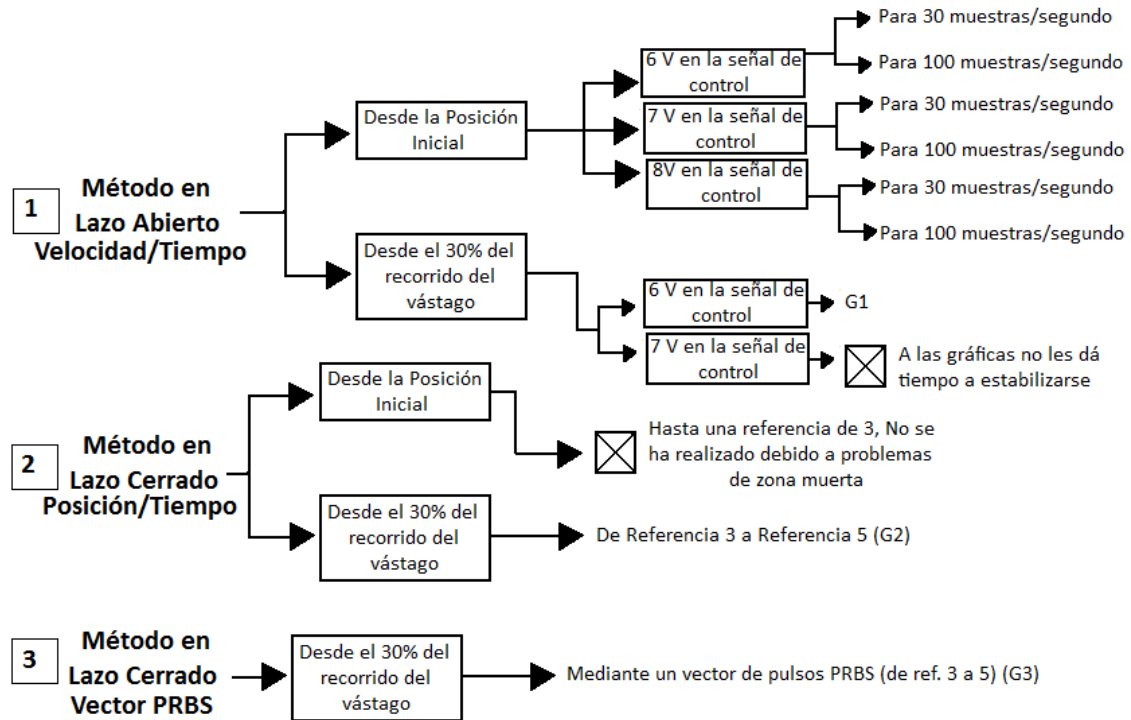


Fig. 4.1. Métodos que se han realizado para calcular las funciones de transferencia

NOTA: Todas las pruebas del esquema anterior se han realizado para obtener la función de transferencia en ambos cilindros DNCI.

4.2.- MODELO DEL SISTEMA A PARTIR DE GRÁFICAS VELOCIDAD/ TIEMPO

Para realizar este experimento en lazo abierto se ponía la señal de control a un determinado valor fijo, bien a 6, 7 u 8 es decir, para diferentes aperturas de la válvula proporcional MPYE, lo que provoca diferentes velocidades. Para poder mostrar la gráfica de la velocidad con respecto al tiempo, se cogen los incrementos en la posición del cilindro por cada muestra y se dividen entre los incrementos de tiempo:

```
incdat=dat(2:length(dat))-dat(1:length(dat)-1);
```

```
inct=t(2:length(t))-t(1:length(t)-1);%dat = vector posición cada punto
```



```
vel=incdat./inct;
```

La función de transferencia la sacamos aproximando nuestras graficas velocidad/tiempo a un sistema de primer orden sacando nuestra cte. de tiempo (63% del valor final) y nuestra ganancia. Las pruebas para sacar las gráficas de velocidad se realizaron para ambos cilindros y para unas frecuencias de muestreo de 30 y 100 muestras por segundo.

- Cilindro 1 a una velocidad de 6 V(fig. 4.2)

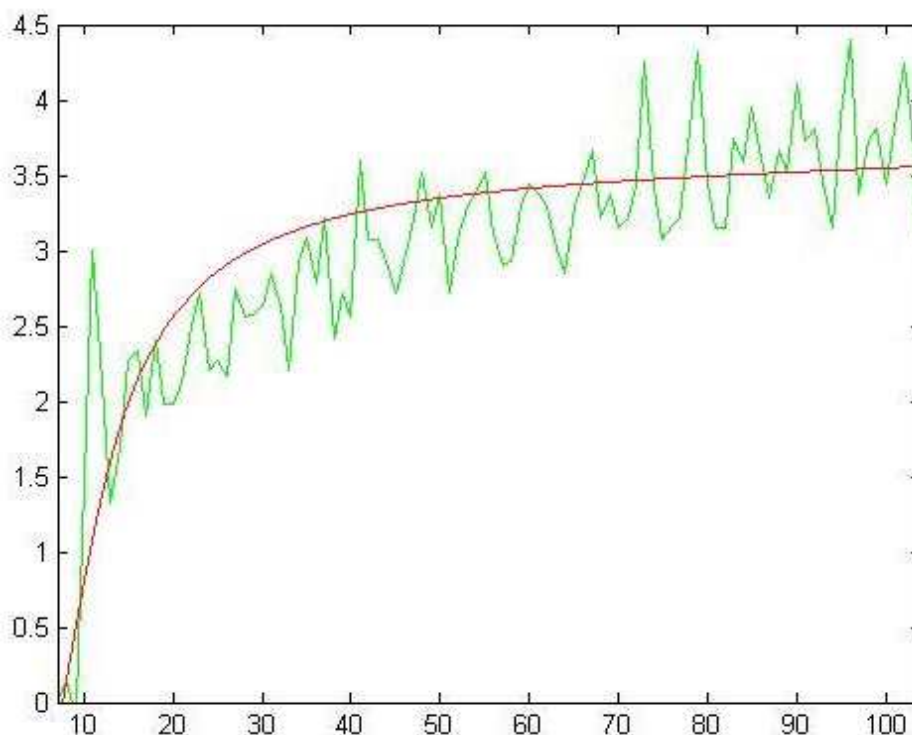


Fig. 4.2. Validación de datos velocidad/tiempo a 6V, en la señal de control, en el cilindro 1

$K = 3.6,$ $63\% \text{ DE } 3.6 = 2.268$

→ 7.5 MUESTRAS, EN SEGUNDOS = $7.5/30 = 0.25 \text{ sg}$

$$t.f. = \frac{3.6}{1 + 0.25s}$$



- Cilindro 1 a una velocidad de 7 V (fig. 4.3)

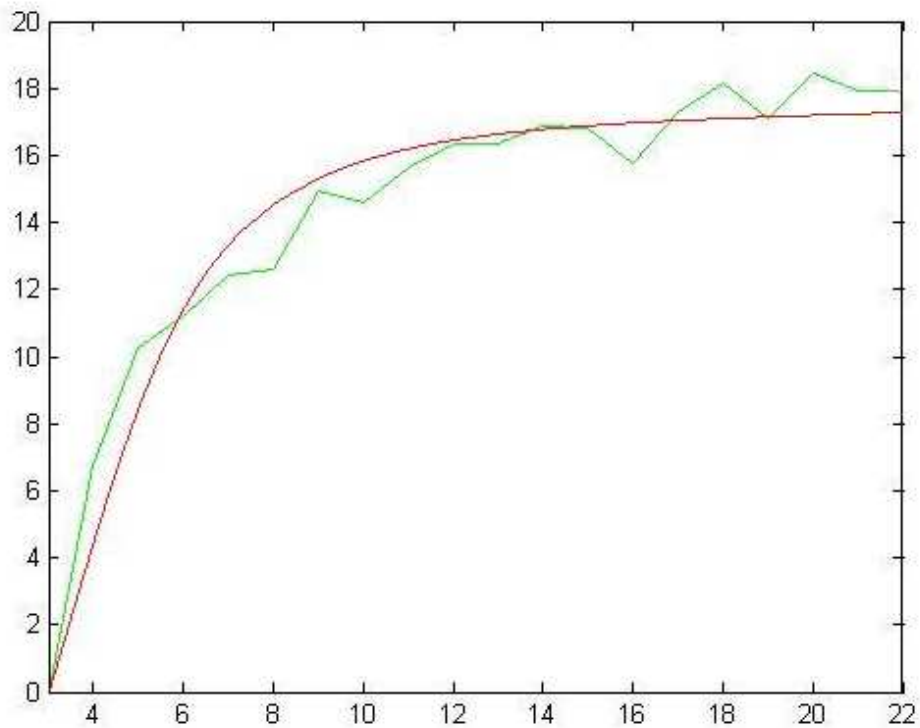


Fig. 4.3. Validación de datos velocidad/tiempo a 7V, en la señal de control, en el cilindro 1

$$K = 17.3/2 = 8.65$$

$$63\% \text{ de } 17.3 = 10.899$$

$$\rightarrow 2.8 \text{ MUESTRAS, EN SEGUNDOS} = 2.8/30 = 0.093 \text{ sg}$$

$$t.f. = \frac{8.65}{1 + 0.093s}$$



- Cilindro 1 a una velocidad de 8V (fig. 4.4)

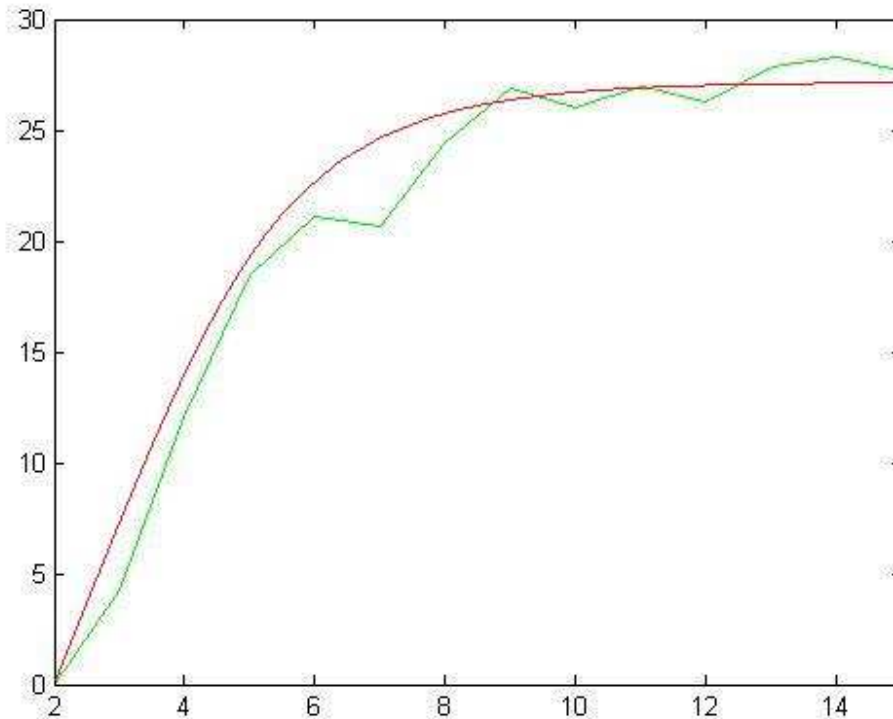


Fig. 4.4. Validación de datos velocidad/tiempo a 8V, en la señal de control, en el cilindro 1

$$K = 27/3 = 9$$

$$63\% \text{ de } 27 = 17.01$$

$$\rightarrow 2.65 \text{ MUESTRAS, EN SEGUNDOS SON } = 2.65/30 = 0.0883 \text{ sg}$$

$$t.f. = \frac{9}{1 + 0.0883s}$$

Los mismos cálculos también se realizaron para el cilindro derecho e incluso estas pruebas también se realizaron para una frecuencia de muestreo de 100 muestras por segundo y los cálculos en las gráficas se realizaron de forma análoga en ambos cilindros, al final los datos de las diferentes funciones de transferencia se recogen en estas tablas:



CILINDRO 1

	30 MUESTRAS POR SEGUNDO	100 MUESTRAS POR SEGUNDO
ESCALÓN 6V	$t.f. = \frac{3.6}{1 + 0.25s}$	$t.f. = \frac{3.8}{1 + 0.31s}$
ESCALÓN 7V	$t.f. = \frac{8.65}{1 + 0.093s}$	$t.f. = \frac{8.75}{1 + 0.085s}$
ESCALÓN 8V	$t.f. = \frac{9}{1 + 0.0883s}$	$t.f. = \frac{9.167}{1 + 0.055s}$

Tabla 4.1. Funciones de transferencia para el cilindro 1 en las pruebas de lazo abierto (velocidad)

CILINDRO 2

	30 MUESTRAS POR SEGUNDO	100 MUESTRAS POR SEGUNDO
ESCALÓN 6V	$t.f. = \frac{7.5}{1 + 0.163s}$	$t.f. = \frac{7.65}{1 + 0.17s}$
ESCALÓN 7V	$t.f. = \frac{10.6}{1 + 0.067s}$	$t.f. = \frac{10.6}{1 + 0.075s}$
ESCALÓN 8V	$t.f. = \frac{9.93}{1 + 0.06s}$	$t.f. = \frac{10.167}{1 + 0.052s}$

Tabla 4.2. Funciones de transferencia para el cilindro 2 en las pruebas de lazo abierto (velocidad)

Como se puede ver el sistema para unas velocidades bajas tiene menor ganancia y mayor cte. de tiempo que para unas velocidades altas, por lo tanto el comportamiento de los cilindros es diferente dependiendo del caudal de aire que les llegue por parte de la válvula proporcional MPYE. Al observar las gráficas al principio se pensó que el sistema podía tener un pequeño tiempo de retardo, pero no es así, simplemente lo que ocurre es que el sistema tarda un tiempo en reaccionar ya que



hasta que no pasan unas pocas muestras tanto la señal de control como la posición del cilindro no experimentan ningún cambio.

Como el sistema no se comporta igual si el vástago sale desde el inicio, debe vencer mayor resistencia, o si el vástago está fuera, se va a tomar el 30% del recorrido del cilindro como la posición inicial para el movimiento de los mismos, y vemos que las gráficas de la velocidad desde la posición 3 se pueden aproximar por un sistema de segundo orden y se sacan las funciones de transferencia, por ejemplo para el cilindro derecho a 6 V de entrada en la válvula MPYE y a 3 bares (fig. 4.5), quedaría:

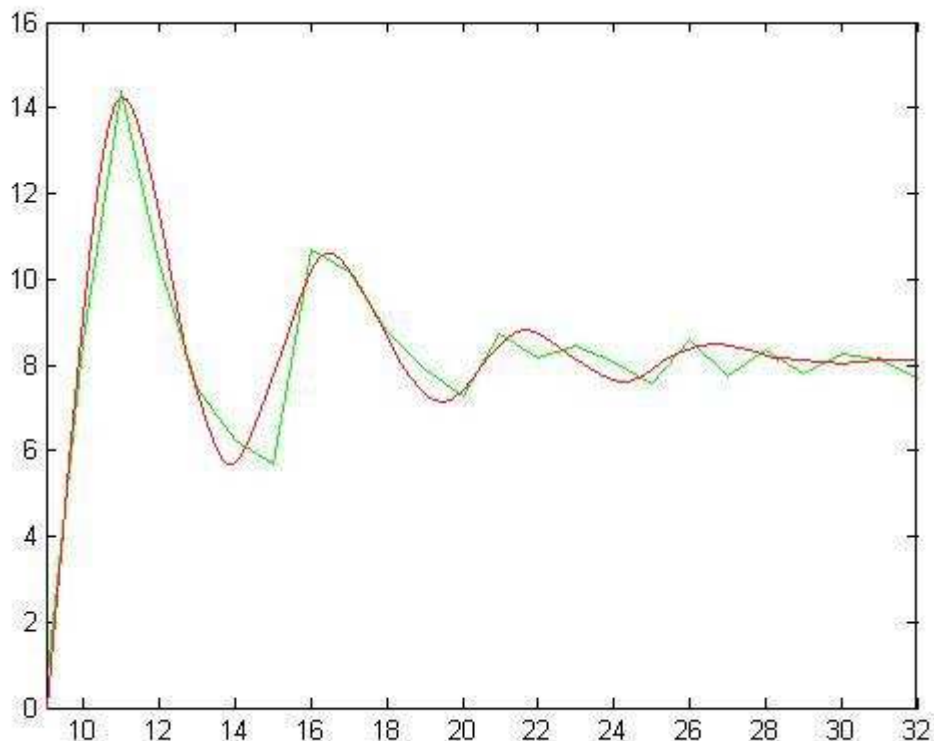


Fig. 4.5. Validación de datos velocidad/tiempo a 6V desde la posición 3

En un sistema de segundo orden, la función de transferencia característica viene dada por:

$$t.f. = \frac{KW_n^2}{s^2 + 2\varepsilon W_n s + W_n^2} \quad (1)$$



El sistema tiene una ganancia de $K=8.1$, y el máximo sobrepico es:

$$Mp = \frac{\text{Valor Sobrepico} - \text{Valor Estacionario}}{\text{Valor Estacionario} - \text{Valor inicial}} = \frac{14.1 - 8.1}{8.1 - 0} = 0.741$$

Para sacar el coeficiente de amortiguamiento se utiliza la fórmula del máximo valor de pico, dato que conocemos:

$$Mp = e^{-\frac{\varepsilon\pi}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}}$$

$$\ln(Mp) = -\frac{\varepsilon\pi}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \rightarrow (\ln(Mp))^2 = \frac{\varepsilon^2\pi^2}{(1-\varepsilon^2)} \rightarrow (\ln(Mp))^2 - (\ln(Mp))^2 \varepsilon^2 = \varepsilon^2\pi^2$$

$$(\ln(0.741))^2 - (\ln(0.741))^2 \varepsilon^2 = 9.87\varepsilon^2 \rightarrow \boxed{\varepsilon = \sqrt{\frac{0.08985}{9.96}} = 0.095}$$

Ahora con el tiempo de pico sacamos el valor de la frecuencia natural

$$tp = \frac{\text{Numero de muestras hasta el sobrepico}}{n^{\circ} \text{ muestras por segundo}} = \frac{2.8}{30} = 0.093 \text{ sg}$$

$$tp = \frac{\pi}{W_d} \rightarrow W_d = 33.66$$

Para sacar la frecuencia:

$$W_d = W_n\sqrt{1 - \varepsilon^2} \rightarrow \boxed{W_n = 33.813}$$

Los datos calculados se sustituyen en la ecuación del sistema de segundo orden (1), y queda:

$$\boxed{G1(cil.2) = \frac{9260.8}{S^2 + 6.42S + 1143.32}}$$

Para el cilindro primero, el izquierdo, se realizan los cálculos de forma idéntica y la función de transferencia sacada es:



$$G1(\text{cil. 1}) = \frac{3171.96}{s^2 + 8.58s + 737.66}$$

Se intentó sacar estas funciones de transferencia para unas velocidades mayores pero el cilindro sale muy rápido y no da tiempo a estabilizarse la señal de velocidad. También se realizaron algunas pruebas desconectando el cilindro opuesto al que se quiera sacar la función de transferencia pero se vio que no influía mucho si el otro cilindro se mantiene fijo.

Estos experimentos en lazo abierto de velocidad no se pueden considerar muy fiables, debido ya sea, a errores en los incrementos de tiempo, a ruidos o a algún dato imprevisto surgido durante las pruebas.

4.3.- MODELO DEL SISTEMA A PARTIR DE GRÁFICAS POSICIÓN/ TIEMPO

Primero se realizaron estos experimentos de la posición con el vástago retraído totalmente pero el sistema debido a que no se comporta igual con el vástago ya fuera que si tiene que salir las pruebas se realizaron tomando como posición inicial el 30% de la carrera del vástago (9 cm).

Este experimento se realiza en lazo cerrado, es decir, el PID controla en cada momento la posición del cilindro. Se sacan las gráficas de la posición del cilindro con respecto al tiempo para una referencia cualquiera. La función de transferencia la sacamos aproximando nuestras gráficas posición/tiempo a un sistema de segundo orden sacando nuestra frecuencia y nuestro coeficiente de amortiguamiento como se hizo en el apartado anterior, la diferencia es que de esta forma se obtiene la función de transferencia pero de lazo cerrado, que para un controlador tipo P sería:

$$t. f. = \frac{K_p G(s)}{1 + K_p G(s)}, \text{ de aquí debo sacar la función de transferencia en lazo abierto, o sea}$$

$G(s)$. Para el primer cilindro (fig. 4.6), el izquierdo, con una presión de 3 bares y desde



la posición tomada como inicio (cilindro al 30% de su recorrido) su función de transferencia sería:

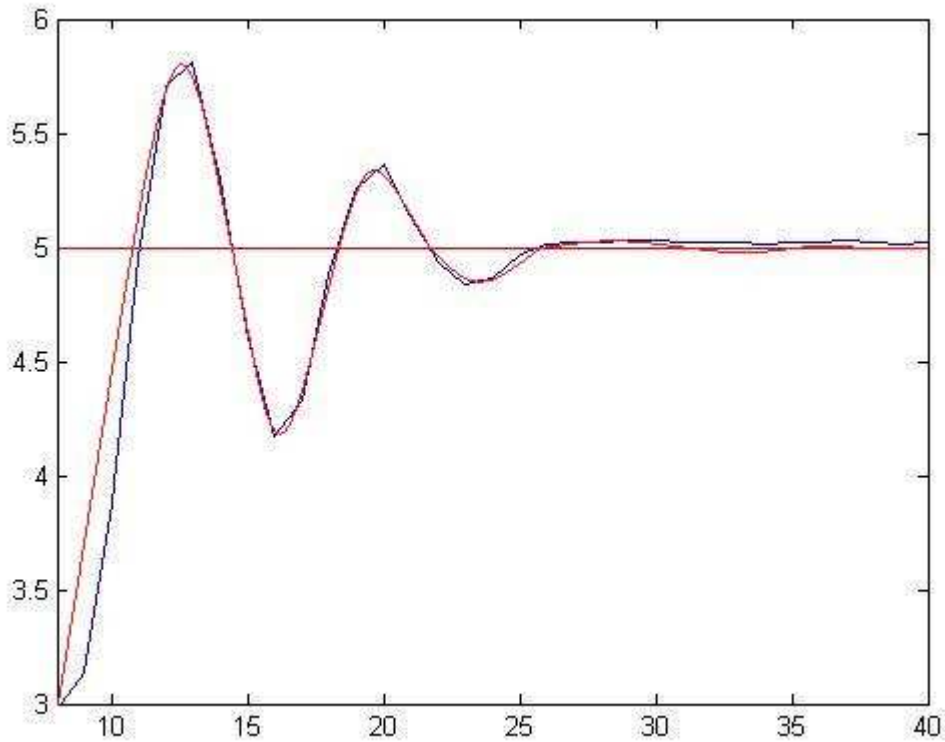


Fig. 4.6. Validación de datos posición/tiempo desde la posición 3 para el cilindro 1

En un sistema de segundo orden, la función de transferencia característica viene dada por:

$$t. f. = \frac{KW_n^2}{s^2 + 2\varepsilon W_n s + W_n^2} \quad (1)$$

El sistema tiene una ganancia de $K=8.1$, y el máximo sobrepico es:

$$Mp = \frac{\text{Valor Sobrepico} - \text{Valor Estacionario}}{\text{Valor Estacionario} - \text{Valor inicial}} = \frac{5.807 - 5}{5 - 3} = 0.4035$$

Para sacar el coeficiente de amortiguamiento se utiliza la fórmula del máximo valor de pico, dato que conocemos:

$$Mp = e^{-\frac{\varepsilon\pi}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}}$$



$$\ln(Mp) = -\frac{\varepsilon\pi}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \rightarrow (\ln(Mp))^2 = \frac{\varepsilon^2\pi^2}{(1-\varepsilon^2)} \rightarrow (\ln(Mp))^2 - (\ln(Mp))^2 \varepsilon^2 = \varepsilon^2\pi^2$$

$$(\ln(0.4035))^2 - (\ln(0.4035))^2 \varepsilon^2 = 9.87\varepsilon^2 \rightarrow \boxed{\varepsilon = 0.278}$$

Ahora con el tiempo de pico sacamos el valor de la frecuencia natural

$$tp = \frac{\text{Numero de muestras hasta el sobrepico}}{n^{\circ} \text{ muestras por segundo}} = \frac{5}{30} = 0.166 \text{ seg}$$

$$tp = \frac{\pi}{W_d} \rightarrow W_d = 18.85 \text{ rad/seg}$$

Para sacar la frecuencia:

$$W_d = W_n \sqrt{1-\varepsilon^2} \rightarrow \boxed{W_n = 19.62 \text{ rad/seg}}$$

Los datos calculados se sustituyen en la ecuación del sistema de segundo orden (1), y aproximadamente nos queda:

$$\boxed{t.f. (cil. 1) = \frac{385.08}{s^2 + 10.91s + 385.08}}$$

Pero como hemos comentado esta es la función de transferencia en lazo cerrado, debemos sacar la función de transferencia en lazo abierto, para un controlador proporcional con $K_p=1.4$:

$$t.f. = \frac{K_p G(s)}{1 + K_p G(s)}$$

La igualamos con la función de transferencia en lazo cerrado y obtenemos $G(s)$

$$\frac{K_p G(s)}{1 + K_p G(s)} = \frac{385.08}{s^2 + 10.91s + 385.08} \rightarrow \boxed{G2(s) = \frac{275.06}{s(s+10.91)}}$$



Para el segundo cilindro, el izquierdo, se realizan los cálculos de forma idéntica y las funciones de transferencia tanto para lazo cerrado como para lazo abierto aproximadamente nos quedan:

$$t.f.(cil. 2) = \frac{481.4}{S^2 + 13.077S + 481.4}$$

$$G2(s) = \frac{343.86}{S(S + 13.077)}$$

Se sacaron muchísimas gráficas de la posición y se calcularon muchas funciones de transferencia y al final se eligieron las que más coincidían unas con otras, mediante unas comparaciones en simulink.

4.4.- MODELO DEL SISTEMA A PARTIR DE VECTORES DE PULSOS PRBS

El último experimento para sacar una función de transferencia válida es mediante la introducción a nuestros cilindros de un vector de impulsos PRBS (Pseudo Random Binary Signal), se toman los datos de la respuesta de la posición de nuestros cilindros tras introducirles

este vector y mediante el ident de Matlab se nos saca en tiempo discreto una función de transferencia del sistema. Este experimento lo ideal es realizarlo en lazo abierto pero para nuestro sistema esto no es posible ya que el vástago tiene una longitud determinada y

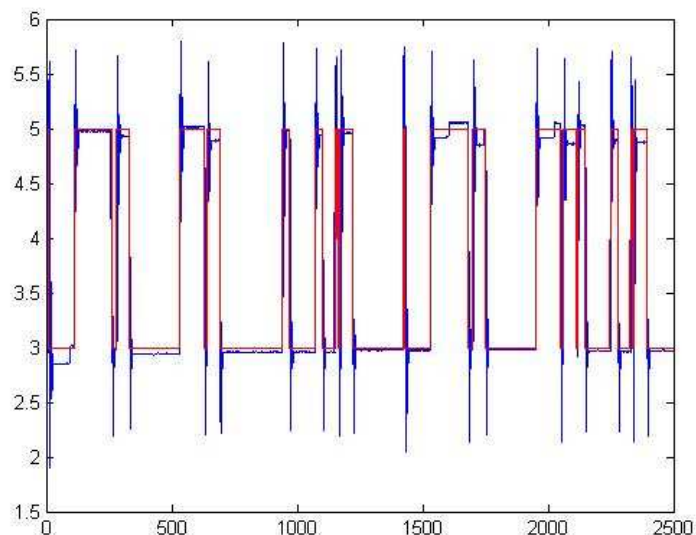


Fig. 4.7. Respuesta de uno de los cilindros a un vector de impulsos PRBS



llegaría al final de su recorrido en cada impulso por lo que no tendría un comportamiento lineal por ello se optó por realizar el experimento en lazo cerrado entre dos valores de referencia, por ejemplo 3 y 5.

Con los datos del ident se sacaron estas funciones de transferencia:

$$\text{Cilindro 1} \rightarrow G3 = \frac{4.25S+273.386}{S(S+10.724)}$$

$$\text{Cilindro 1} \rightarrow G3 = \frac{4.795S+312.5}{S(S+12.36)}$$

4.5.- REPRESENTACIÓN GRÁFICA CONJUNTA DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA OBTENIDAS

Una vez se sacaron, por todos los métodos experimentales anteriores, las funciones de transferencia, estas se introdujeron, en lazo abierto, en un diagrama de bloques (fig. 4.8) en Simulink para realizar unas comparaciones de ellas. Por ejemplo para el cilindro 2:

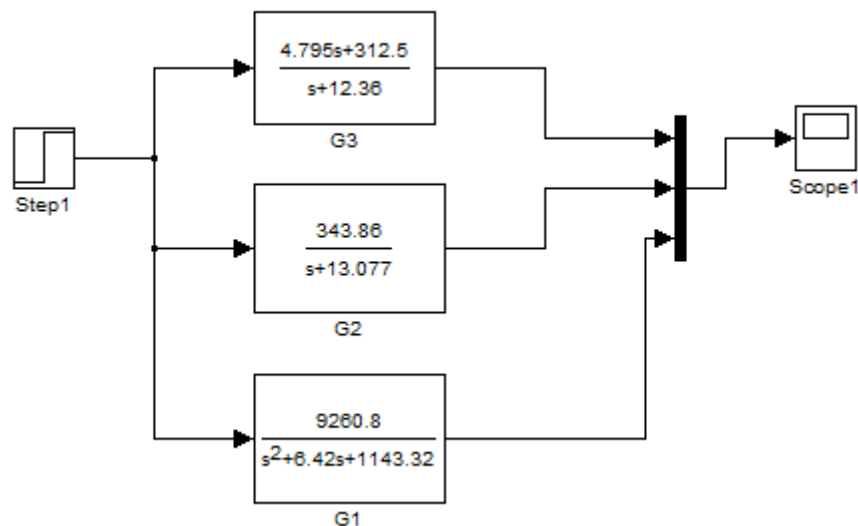


Fig. 4.8. Comparación en Simulink de las funciones de transferencia (en lazo abierto)

El Scope nos quedará:

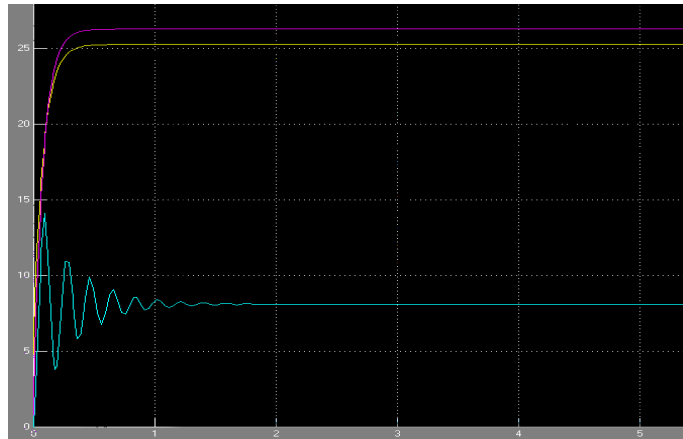


Fig. 4.9. Respuesta de las funciones de transferencia a un escalón unitario

Como se puede ver en la figura 4.9, hay gran diferencia entre los valores sacados en los experimentos de lazo cerrado y el valor sacado en los de lazo abierto (azul). Pero como se ha comentado anteriormente estos experimentos en lazo abierto de velocidad/tiempo no los podemos considerar muy fiables, debido a errores en los incrementos de tiempo, a ruidos o a algún dato atípico surgido durante las pruebas. Por lo tanto nos quedaremos con las funciones en transferencia de lazo cerrado, G2 y G3 (fig. 4.10).

En el cilindro 1 las funciones de transferencia son prácticamente iguales, que en el cilindro 2, y por lo tanto a la hora de comparar los datos en Simulink sus resultados son aproximadamente idénticos.

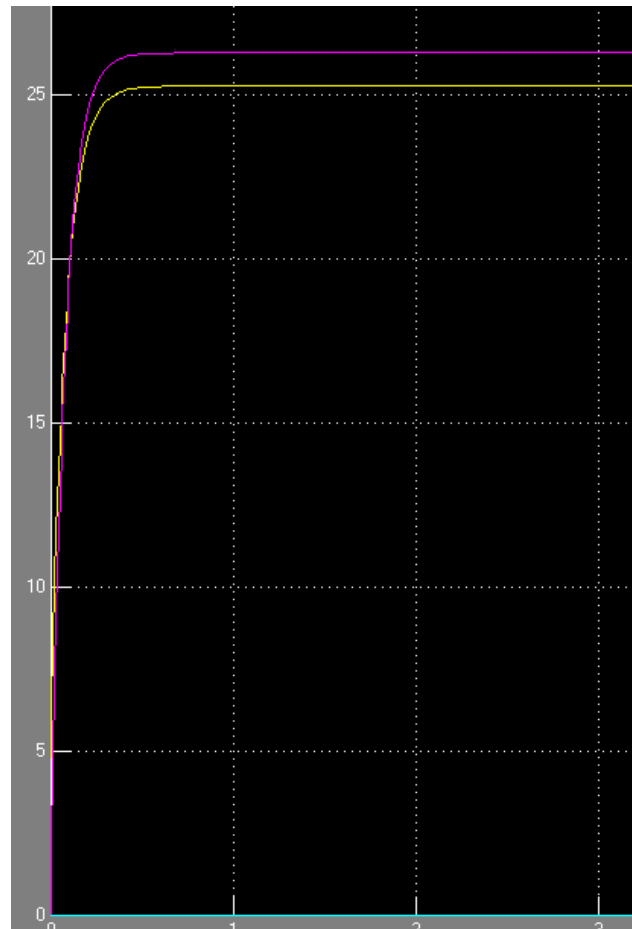


Fig. 4.10. Respuesta de las F. T. de los experimentos en lazo cerrado



Capítulo 5: SINTONIA DE PID PARA EL CONTROL DE UN CILINDRO





5.1.- CONTROLADORES PID

5.1.1.- INTRODUCCIÓN

Son los controladores más utilizados en toda clase de industrias, es interesante señalar que más de la mitad de los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control PID o PID modificado y dan unas prestaciones suficientemente buenas para la mayoría de sistemas de control. La utilidad de los controles PID estriba en que se aplican en forma casi general a la mayoría de los sistemas de control. En particular, cuando el modelo matemático de la planta no se conoce y, por lo tanto, no se pueden emplear métodos de diseño analíticos, es cuando los controles PID resultan más útiles.

5.1.2.- ACCIONES BÁSICAS DE CONTROL PID

Siendo:
$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp\left(1 + \frac{1}{TiS} + TdS\right)$$

la función de transferencia del controlador PID, donde:

$Ki = Kp \frac{1}{Ti}$ y $Kd = KpTd$ son parámetros del PID cuyo efecto sobre el sistema al modificarlos se puede resumir en la tabla

Acción de Control	Tiempo de Subida	Sobrepico	Tiempo de establecimiento	Error Estacionario
Si Kp Aumenta	Disminuye	Aumenta	Cambia poco	Disminuye
Si Ki Aumenta	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Eliminado
Si Kd Aumenta	Cambia poco	Disminuye	Disminuye	Cambia poco

Tabla 5.1. Cambio en la dinámica del sistema al variar los parámetros PID



5.2.- AJUSTES PREVIOS

5.2.1.- SENSORES EN LOS CILINDROS DNCI

Una vez se establecieron todas las conexiones de nuestro robowriter, se realizaron unas pruebas, en diferentes posiciones del vástago (fig. 5.1 y fig. 5.2), de los sensores de los cilindros DNCI, para ver que realizaban la lectura de la posición de forma correcta.

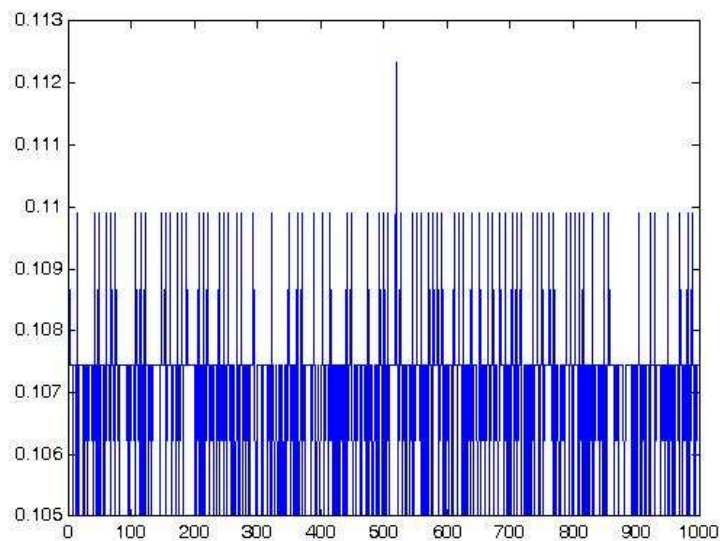


Fig. 5.1. Posición inicial del primer cilindro DNCI (izquierdo)

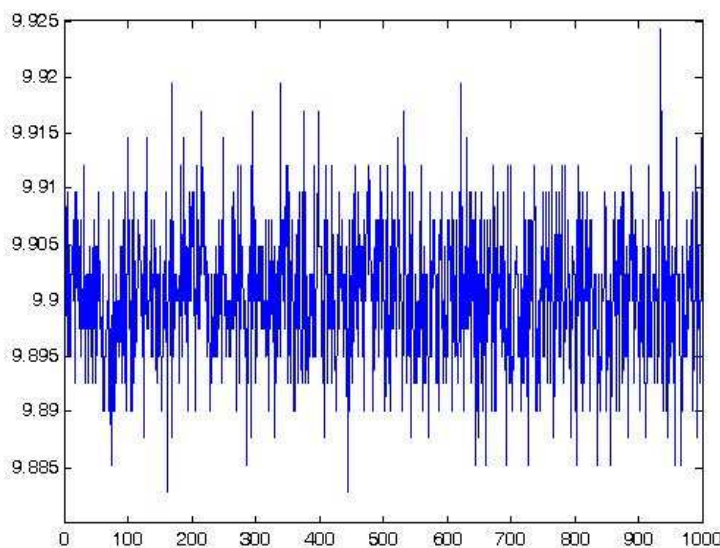


Fig. 5.2. Posición final del primer cilindro DNCI (izquierdo)

Se han tomado un buen número de muestras en ambos cilindros, la amplitud de las señales va variando aunque como se puede ver, la amplitud de estas respecto al punto medio es muy pequeña, estas pequeñas variaciones de amplitud se deben al ruido. Los resultados en los sensores de ambos cilindros son prácticamente iguales. Por último, se movieron los cilindros manualmente para ver la respuesta del sensor (fig. 5.3 y fig. 5.4), y se comprobó que la respuesta en los dos sensores de los cilindros es la misma.

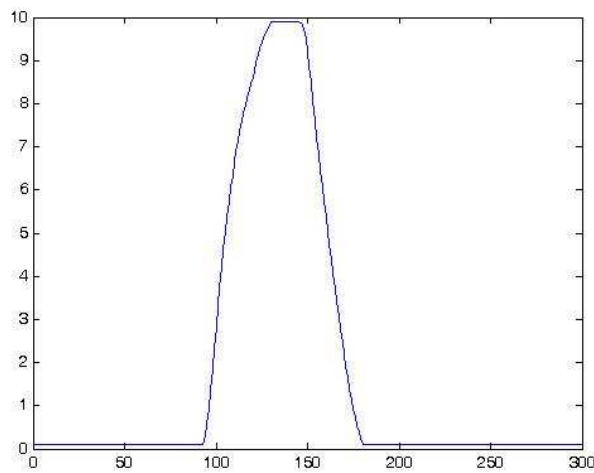


Fig. 5.3. Cilindro movido del inicio hasta el final y otra vez de nuevo al inicio

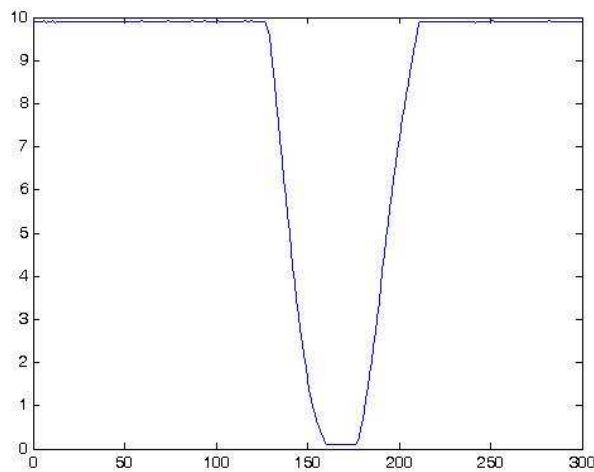


Fig. 5.4. Cilindro movido del final hasta el inicio y de vuelta otra vez al final

5.2.2.- VÁLVULAS PROPORCIONALES MPYE

Tras ver que funcionaban los sensores de ambos cilindros se comprobaron las válvulas proporcionales MPYE, para saber exactamente su funcionamiento ya que es necesario conocerlas exactamente para una buena programación en el código de Matlab. Tras realizar las conexiones de una de las válvulas, con Putsample se van sacando datos por una de las salidas analógicas, de la tarjeta de adquisición de datos, hacia la válvula proporcional y se elaboró una tabla del comportamiento de la válvula para el rango de valores de salida (0 a 10 V):

TENSIÓN A LA VALVULA	COMPORTAMIENTO DEL CILINDRO
DE 5.1 a 10 V	El vástago del cilindro avanza, para una tensión cercana a 5 va más despacio, en cambio, para una tensión de 10 avanza con su máxima velocidad.
5 V	Lo normal es que la válvula se quede en su posición intermedia, el vástago ni avanza ni retrocede.
DE 0 a 4.9 V	El vástago del cilindro retrocede, para una tensión cercana a 5 va más despacio, en cambio, para una tensión de 0 retrocede con su máxima velocidad.

Tabla 5.2. Comportamiento de la válvula en función de los rangos de tensión

*Las pruebas se realizaron a una presión de 3 bares.

Estos rangos de tensiones dependiendo de la válvula pueden variar un poco por lo que se debe ajustar cada válvula exactamente. Para unas presiones de aire algo bajas (1 a 3 bares) es posible que no se cumplan exactamente estos rangos de tensiones, mientras que para unas presiones más altas (4 a 6 bares), las válvulas se ajustan mucho mejor a estos rangos de valores.

Una recomendación a tener en cuenta sería conectar primero la alimentación de corriente continua que la presión de aire comprimido, ya que se deben referenciar los cilindros y si se conectara la presión antes, el cilindro puede moverse bruscamente y golpear fuertemente debido a que las válvulas se encuentren en una posición determinada. También es posible que al conectar la alimentación se oiga como una



especie de zumbido realizado por las válvulas, pero una vez que empiezan a conmutar se elimina este ruido por completo.

5.2.3.- ESTABLECIMIENTO DE LA PRESIÓN DE FUNCIONAMIENTO Y DEL PERIODO DE MUESTREO

a) PRESIÓN DE FUNCIONAMIENTO

Se ha subido posteriormente la presión de funcionamiento a 5 bares y ejecutando las referencias anteriores, se comprueba que las diferencias de trabajar con una presión u otra es muy poca (fig. 5.5 y fig. 5.6), simplemente a una presión mayor el sistema responde con algo más de rapidez, al principio se trabajó con una presión de 3 bares pero, posteriormente, cuando se introdujo la saturación para un movimiento suave de los cilindros se paso a elegir como presión de funcionamiento del cilindro la de 5 bares.

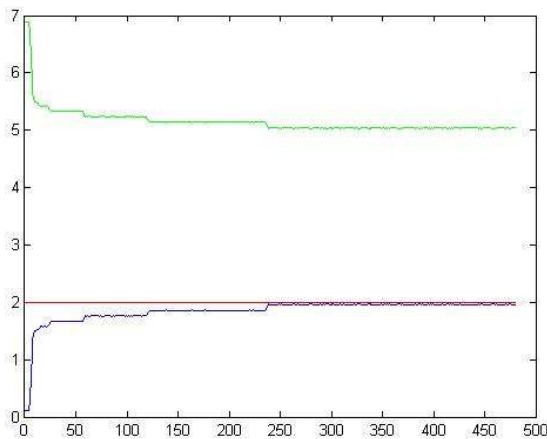


Fig. 5.5. Prueba a 3 bares

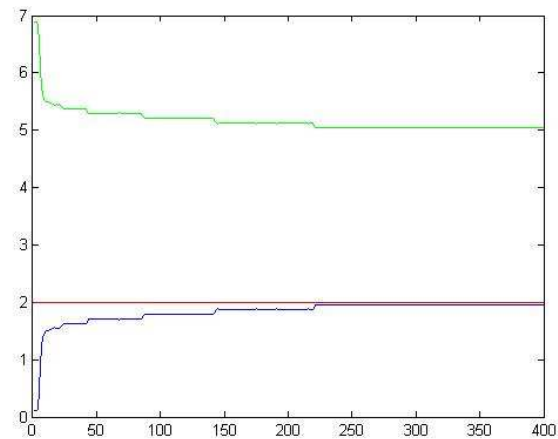


Fig. 5.6. Prueba a 5 bares

b) PERIODO DE MUESTREO

Se realizaron varias pruebas de la respuesta del sistema a varias frecuencias de muestreo para comprobar a que frecuencia realmente se notaban cambios significativos y cuál era la frecuencia de muestreo más correcta para el funcionamiento de nuestro Robowriter, las pruebas para varias frecuencias de muestreo se realizaron con un PID de $k_p=1.6$ y $k_d=0.01$ a una referencia de 2:



- Para 10 muestras por segundo (fig. 5.7)

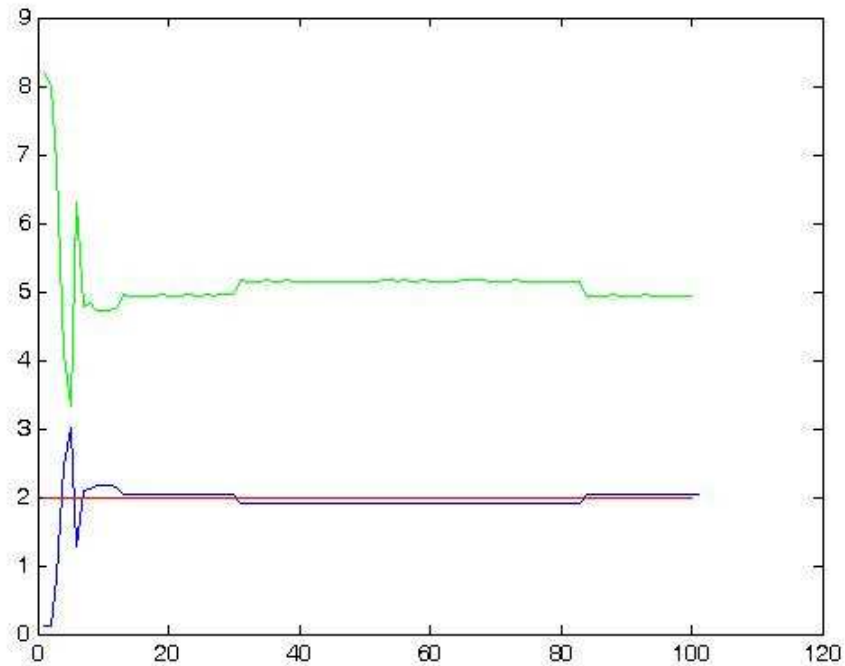


Fig. 5.7. Respuesta del sistema a 10 muestras por segundo

- Para 30 muestras por segundo (fig. 5.8).

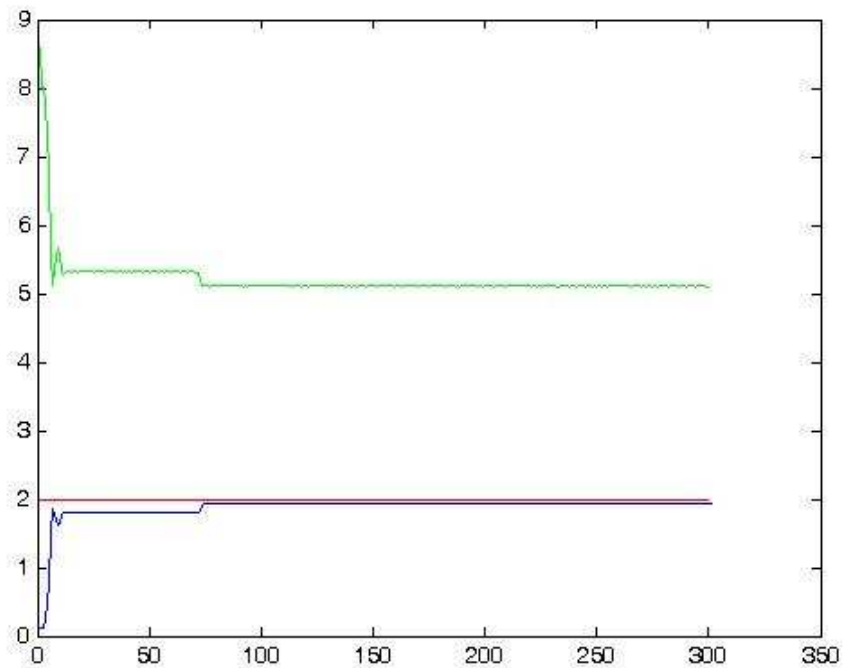


Fig. 5.8. Respuesta del sistema a 30 muestras por segundo



- Para 100 muestras por segundo (fig. 5.9).

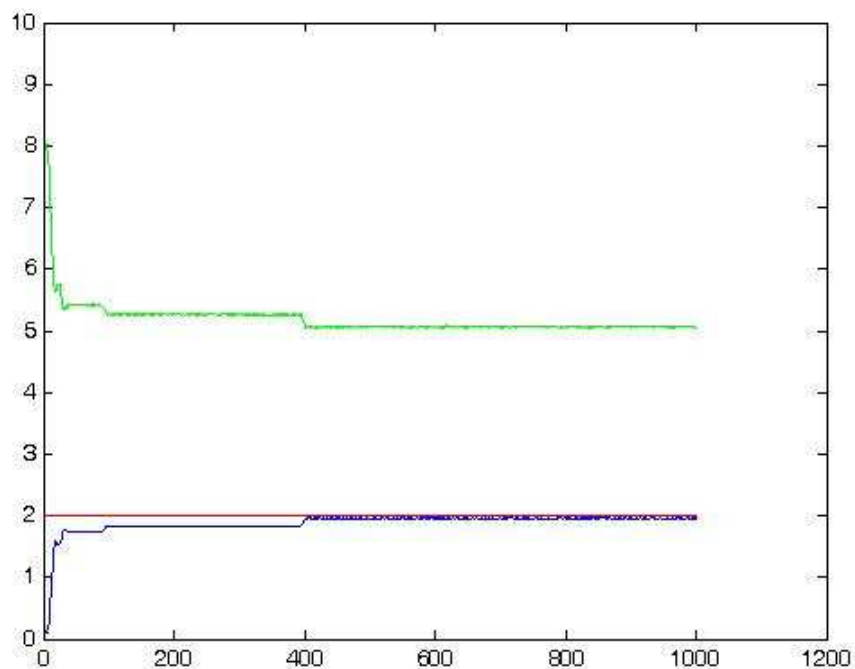


Fig. 5.9. Respuesta del sistema a 100 muestras por segundo

- Para 500 muestras por segundo (fig. 5.10).

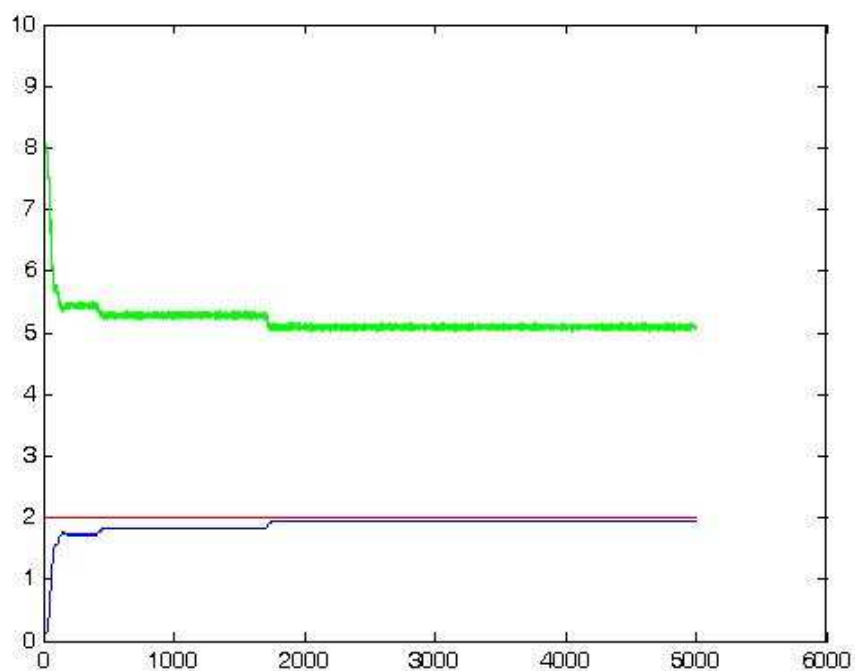


Fig. 5.10. Respuesta del sistema a 500 muestras por segundo



De las pruebas se observa que apenas hay diferencia entre algunos periodos de muestreo aunque vemos que 10 muestras por segundo no son suficientes y con 500 muestras no tengo una señal de control nítida ni que se mantenga constante (la válvula vibra), como vemos la mejor respuesta la obtendríamos al trabajar con 30 muestras por segundo.

Nota: Hay que tener en cuenta al cambiar el periodo de muestreo que también se debe cambiar en la fórmula del PID.

5.2.4.- MOVIMIENTO INICIAL DE LOS CILINDROS

Para las pruebas de los programas básicos PID se copian los archivos m-file PID, Callback_PID y Finaliza al directorio de trabajo. Para probar estos programas para el control de la posición de un cilindro se llama a la función PID, esta función llama por cada muestra tomada, del sensor de posición, a la función callback_PID automáticamente, y cuando se quiera parar la ejecución del programa se llama a la función Finaliza que me devuelve en gráficas la respuesta del sistema.

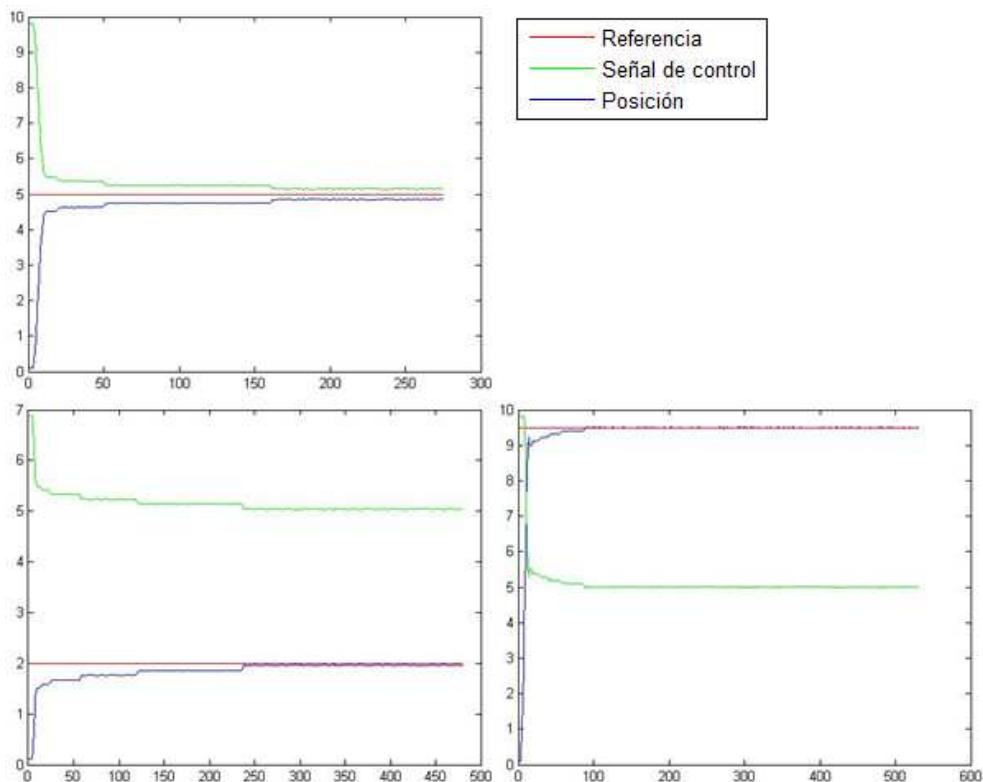


Fig. 5.11. Respuesta inicial del cilindro izquierdo para varias referencias

Se realizaron varias pruebas variando la referencia en ambos cilindros con unos valores del controlador de $P=1$ $I=0$ $D=0$ y una presión de 3 bares. En el cilindro izquierdo se establecieron unas referencias de 5, 2 y 9.5 (fig. 5.11) y posteriormente se probaron las mismas referencias en el derecho, comprobando que no había gran diferencia entre ambos.

En las figuras anteriores se observa como para unas referencias bajas los cilindros tardan más en alcanzar el valor de consigna y mientras que para unas referencias grandes alcanzan el valor de consigna rápidamente, esto es debido a que para unas referencias grandes la válvula proporcional deja pasar un gran caudal de aire (la señal de control es mayor) y el cilindro lleva una gran velocidad mientras que para las referencias bajas la válvula estrangula y solo deja pasar una determinada cantidad de aire (la señal de control es más baja) por lo que el cilindro avanza más lentamente.

5.3.- SINTONÍA EXPERIMENTAL DE PID

La sintonía de nuestros PID se ha realizado de modo experimental, probando varios valores y obteniendo la respuesta que nos ofrecía cada uno de ellos, las primeras pruebas para controlar nuestros cilindros, se realizaron con un controlador proporcional.

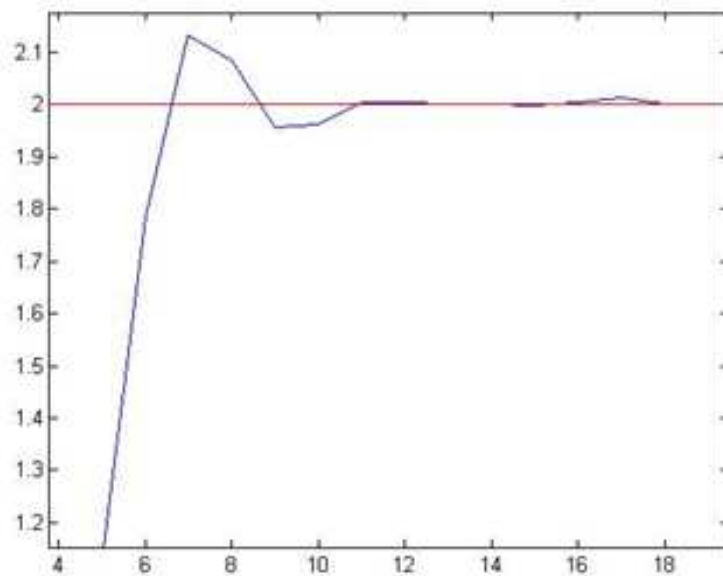


Fig. 5.12. Respuesta uno de los cilindros con una $K_p = 2$



Se hicieron pruebas con $K_p=1$, pero el cilindro respondía demasiado lento, con $K_p=5$, pero el sistema se volvía inestable, e intentado ajustar a un valor adecuado al final se optó por una $K_p=2$, que nos ofrecía un compromiso entre velocidad y estabilidad (fig. 5.12).

Tras estas pruebas se pasó a introducirle al PID una pequeña cantidad en la parte derivativa, pero ha de ser una cantidad muy pequeña ya que si no el sistema se vuelve inestable, se comprobó que el sobrepico disminuía con un término derivativo del 0.05. Al realizar estas pruebas de PID se nota como el sistema responde de una forma diferente para referencias bajas que para referencias medias o altas, para unas referencias bajas el sistema es más lento y necesitaría una K_p mayor en cambio para referencias altas con esa K_p tan grande el sistema se volvería inestable por lo que hay que buscar un compromiso. No es recomendable ajustar mucho los valores del controlador PID al límite de la estabilidad ya que cualquier mínima variación podría llevar a nuestro sistema a la inestabilidad, por estas razones la $k_p < 1.8$.

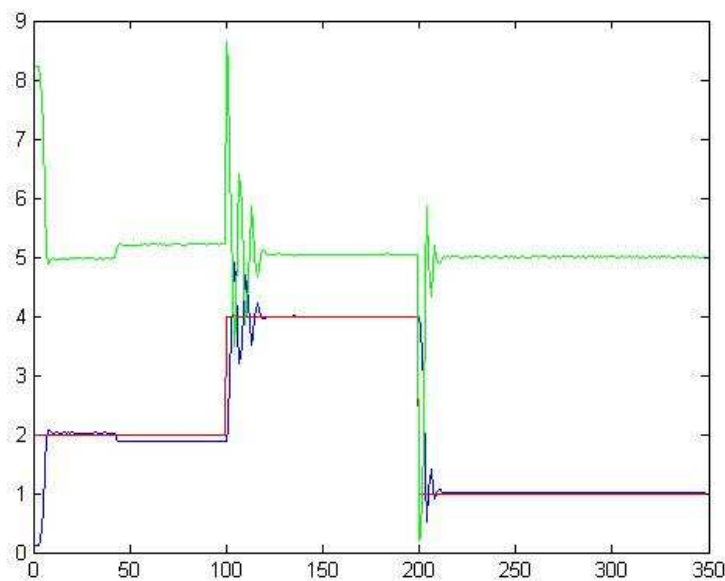


Fig. 5.13. Respuesta de uno de los cilindros con el vástago en una posición diferente a la inicial

El cilindro izquierdo como se comentó anteriormente se comporta de una forma más lenta que el derecho por lo tanto su K_p debe ser algo mayor para intentar igualar el comportamiento de ambos cilindros. También se realizaron varias pruebas

con diferentes escalones de referencia, el mejor PID que se pudo ajustar era: $K_p=1.7$, $K_i=0.0015$ y $K_d=0,00015$

Si el cilindro ya está fuera (no está en la pos.0) a la hora de mandarle una referencia, le costará menos llegar a ella, ya que no tiene que vencer la oposición que tiene al principio para salir, y nos aparece un mayor sobrepico (fig. 5.13). En cambio, si tuviera que alcanzar la referencia desde 0, al tener que vencer esa resistencia el sistema tardaría mas en llegar a la referencia y prácticamente sin oscilación.



Capítulo 6: CONTROL SIMULTÁNEO DE AMBOS CILINDROS





6.1.- AJUSTES REFERIDOS AL CONTROL SIMULTÁNEO

Aunque los cilindros se muevan a la vez, sus controladores PID son independientes en cada uno. El movimiento de un cilindro perturba la posición del otro, esto es lo que se conoce como un sistema MIMO (Multiple Input Multiple Output) o sistemas multivariables, en nuestro caso 2 variables de entrada y 2 de salida (fig. 6.1).

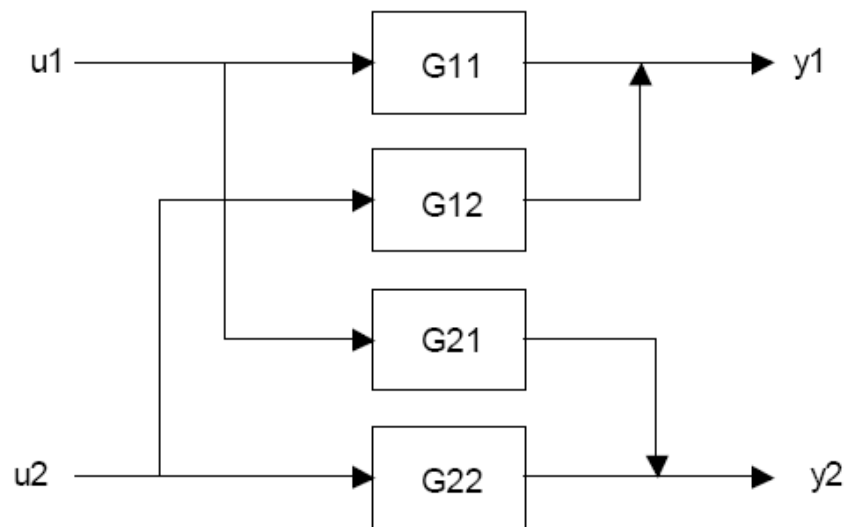


Fig. 6.1. Sistema multivariable de dos entradas y dos salidas (Robowriter)

Para sacar el modelo de las funciones de transferencia cruzadas (G12 y G21) se optó por realizar varias pruebas de vectores PRBS, moviendo primero ambos cilindros a la posición 3 (inicio). En estas pruebas primero se introdujo un vector de impulsos PRBS en el cilindro 1, luego en el cilindro 2 y después se introdujeron dos vectores de impulsos diferentes a la vez en ambos cilindros, para ver el movimiento de uno y como perturba la posición en el otro (fig. 6.2 y fig. 6.3). Con todos estos datos y la ayuda del ident de Matlab se pensaban obtener las funciones de transferencia de las perturbaciones del sistema, pero el proceso de obtención de estas funciones se complicó y no se tuvo tiempo para realizar un desacoplo en condiciones de los lazos. Debido a esto se consideran estas funciones cruzadas como perturbaciones de un cilindro al otro.

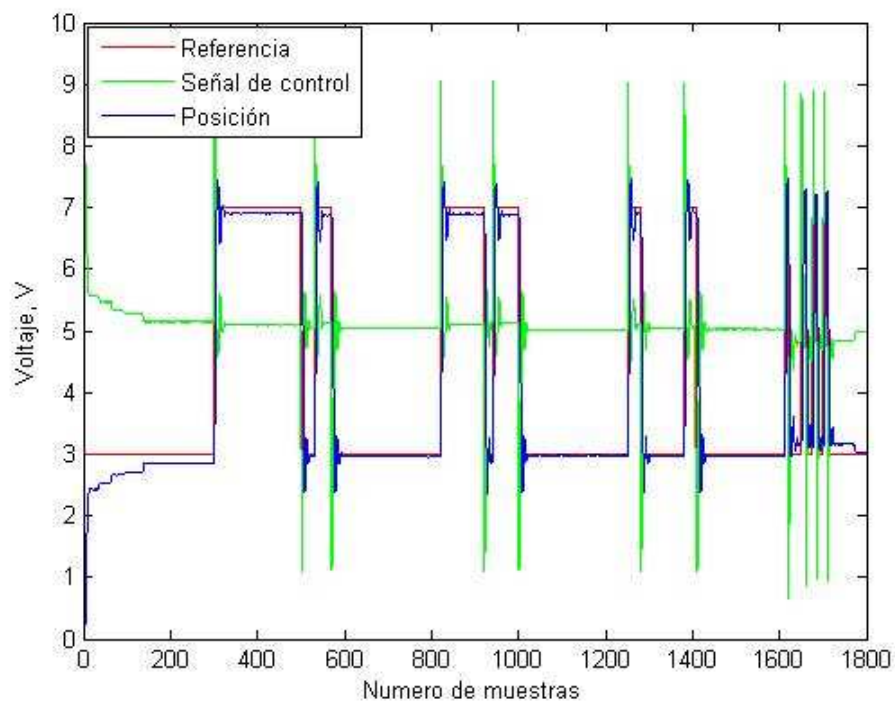


Fig. 6.2. Respuesta del cilindro 1 tras introducirle un vector PRBS

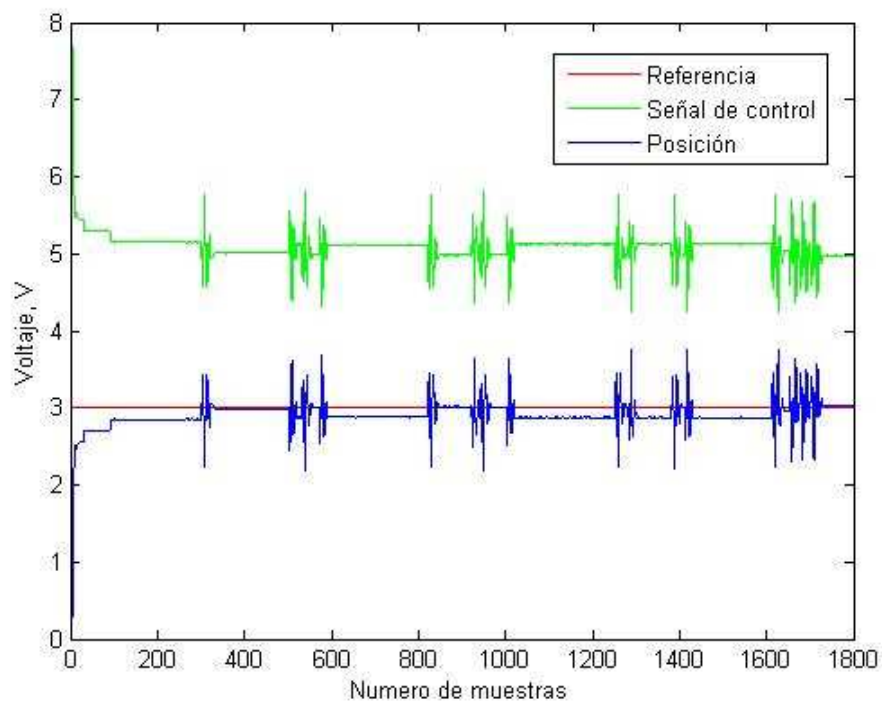


Fig. 6.3. Perturbaciones aparecidas en el cilindro 2 tras la introducción de un vector PRBS en el cilindro 1

6.1.1.- SINTONIA DE PID PARA EL MOVIMIENTO DE AMBOS CILINDROS

Después de las pruebas de PID individuales he probado a mover ambos cilindros a la vez y poniéndole un mismo valor de tensión a las válvulas de los dos me he dado cuenta que el derecho avanza antes que el izquierdo, si quisiera un movimiento simultaneo al derecho debería ponerle un poco mas de tensión que al izquierdo o bien aumentar en algo mas su ganancia.

Los PID individuales de cada cilindro cuando se mueven ambos cilindros a la vez para los mismos valores no se comportan de igual forma ya que cada cilindro al moverse es perturbado por el movimiento del otro por lo que se deben ajustar unos nuevos valores de PID individuales de cada cilindro. Los dos programas de PID de cada cilindro se introducen en un mismo programa para poder realizar el movimiento simultáneo de ambos cilindros. Hice pruebas de muchos valores para los controladores y a varias referencias introduciendo un bajo valor también en la parte derivativa pero el sistema para algunos valores se me hacía inestable (fig. 6.4) haciendo balancearse mucho el robowriter en uno de estos movimientos se borraron los datos de uno de los sensores de un cilindro por lo que se tuvo que establecer de nuevo el punto de referencia y el punto de calibración. Al ponerle a ambos cilindros referencias parecidas el sistema es más estable pero cuando la referencia en un cilindro es muy diferente a la otra el sistema es más propenso a volverse inestable. En principio se eligió una K_p de 1.6.

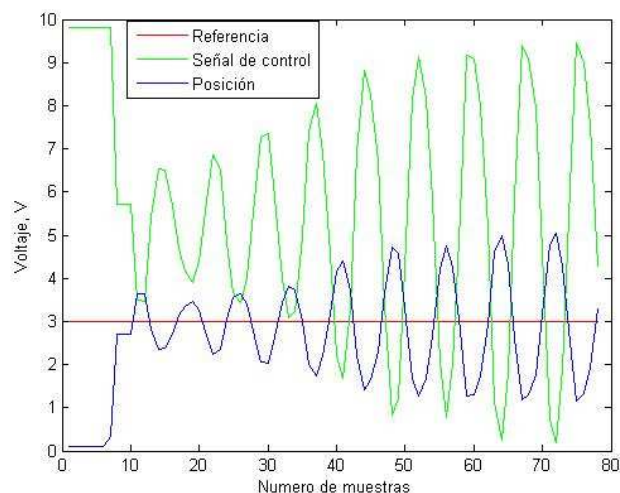


Fig. 6.4. Sistema inestable por valores inadecuados de PID



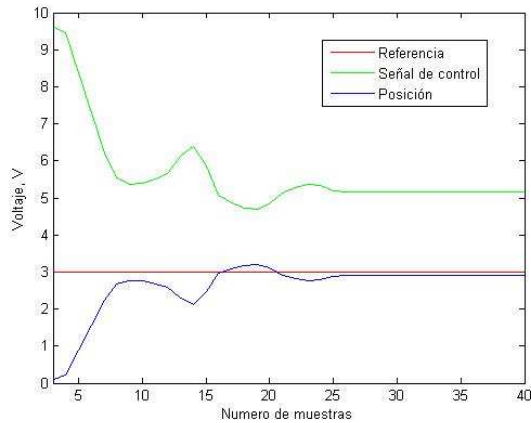


Fig. 6.5. Movimiento del cilindro 1 a una referencia de 3 perturbado por el cilindro 2

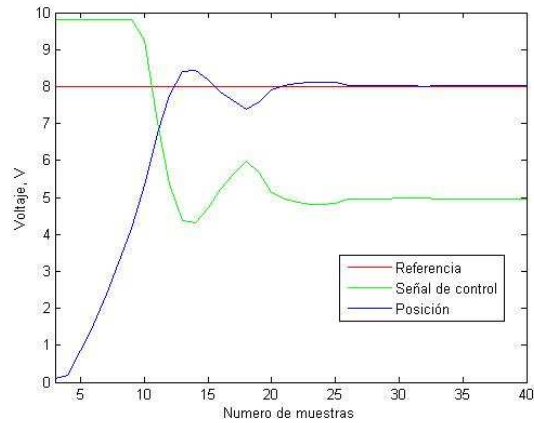


Fig. 6.6. Movimiento del cilindro 1 a una referencia de 8 perturbado por el cilindro 2

Como se puede ver en las figuras anteriores (fig. 6.5 y fig. 6.6), cuando el cilindro 2 tiene su sobrepico (muestra 15 aprox.) provoca una perturbación en el cilindro uno y viceversa. Para ver aun más este efecto dejamos un cilindro fijo a la posición tomada como inicio (30% del recorrido) y movemos el otro cilindro para ver la perturbación como se produce (fig. 6.7 y fig. 6.8)

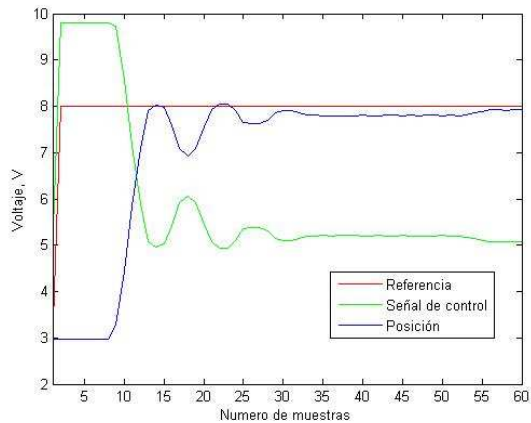


Fig. 6.7. Movimiento del cilindro 1 a una referencia de 8 perturbado por el cilindro 2

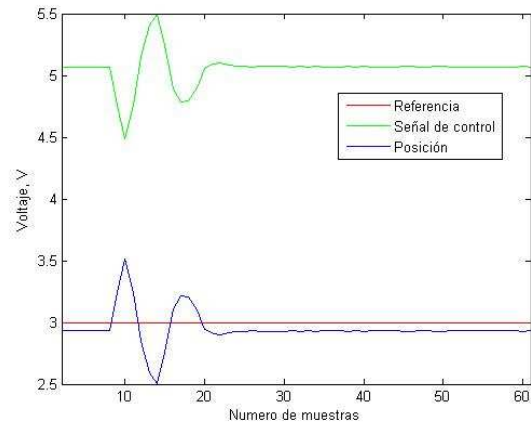


Fig. 6.8. Perturbación surgida en el cilindro 2 debido al movimiento en el cilindro 1

Se puede ver como cuando empieza a moverse el primer cilindro (muestra 10), provoca una perturbación en el segundo, que el PID del segundo intenta corregir produciendo a su vez unas perturbaciones en el primero.

6.1.2.- NO LINEALIDADES EN EL CONTROL DE LOS CILINDROS

a) CAMBIO DE LA PRESIÓN DE FUNCIONAMIENTO

Durante todas las pruebas del funcionamiento que se han realizado se ha visto que el movimiento de ambos cilindros es muy brusco no tiene precisión ninguna para poder seguir limpiamente una trayectoria, una de las medidas que se tomó para intentar mejorar el funcionamiento fue aumentar la presión de funcionamiento y bajar la ganancia (Kp) del PID. Se realizaron diferentes pruebas con varias presiones y varias ganancias:

- Con una $k=0.6$ y una presión de 1 bar (fig. 6.9).

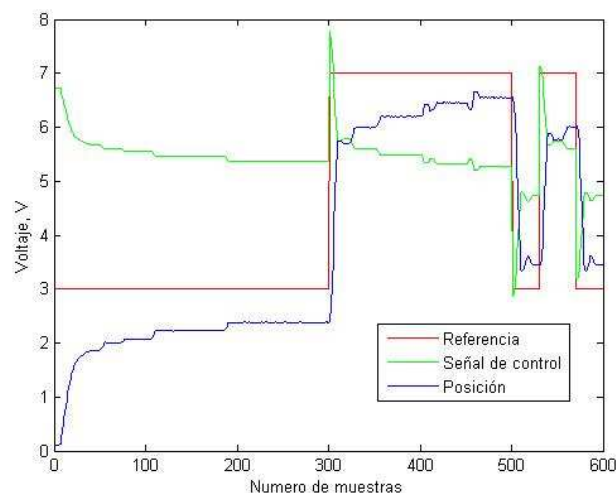


Fig. 6.9. Respuesta de uno de los cilindros a la presión de 1 bar

- Con una $k=0.6$ y una presión de 3 bares (fig. 3.10).

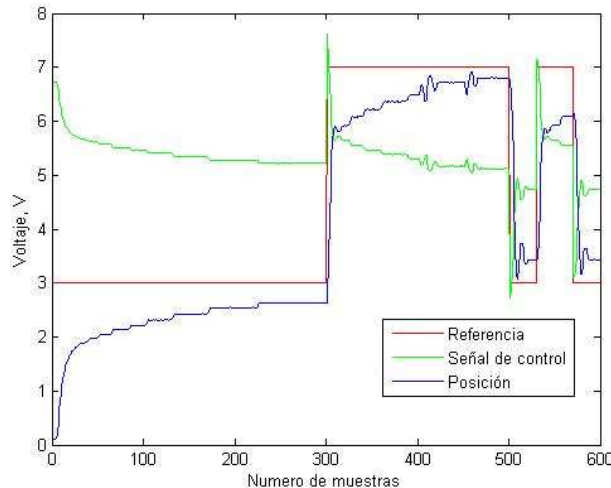


Fig. 6.10. Respuesta de uno de los cilindros a la presión de 3 bares

Para una presión mayor el sistema responde más rápidamente y avanza más suavemente. Por lo tanto aunque todas las pruebas y cálculos anteriores se han realizado a 3 bares, hemos adoptado una presión de 5 bares ya que nos ofrece una respuesta algo mejor.

b) SATURACIÓN DEL CAUDAL DE AIRE EN LAS VÁLVULAS MPYE

Debido al funcionamiento tan abrupto de los cilindros, se pensó como idea para eliminar que golpearan fuertemente, saturar las aberturas de las válvulas proporcionales MPYE a un valor, para que así no se alcancen velocidades altas en la salida y en el retroceso del cilindro para y tenga un funcionamiento de forma suave. Después de muchas pruebas realizadas se consideró que para el primer cilindro la salida de la señal de control (entrada de la válvula MPYE), se sitúa entre 4.2 y 6 V y para el segundo cilindro la señal de control la saturamos entre 5.8 y 4.2 V, la diferencia de 0.2 V es debida a que el cilindro dos (derecho) es algo más rápido e intentamos ajustar la velocidad de ambos para que salgan a la vez. Con esta saturación en la señal de control se nota una gran mejoría en el movimiento del cilindro de forma suave por el espacio de trabajo. Al introducir esta saturación se han sintonizado de nuevo los PID ajustándose al nuevo funcionamiento de ambos cilindros, los valores ajustados para los PID fueron:

PID cilindro 1 \rightarrow $K_p=3.5$, $K_i=0$, $K_d=0.02$



PID cilindro 2 → $K_p=3$, $K_i=0$, $K_d=0.02$

La menor ganancia del cilindro dos es para lo que se ha comentado anteriormente para que al ser el primer cilindro más lento ambos tengan una misma respuesta simultánea. El problema de que el primer cilindro sea más lento se debe a la válvula proporcional de este primer cilindro que cierra algo más que la válvula proporcional del segundo cilindro.

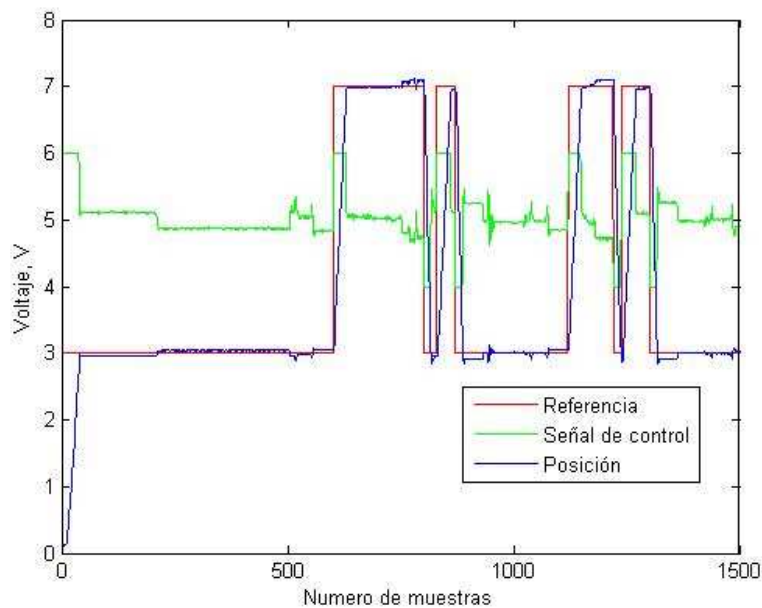


Fig. 6.11. Respuesta de uno de los cilindros con la saturación en su válvula proporcional

El sistema responde rápidamente y sin sobreoscilaciones bruscas (fig. 6.11) aunque se producen vibraciones en torno a los valores de consigna debido al problema de la zona muerta. La saturación ha sido una solución pero también se podría intentar a introducir en vez de escalones, rampas en el sistema para que el sistema pueda seguir la consigna más suavemente.

c) ELIMINACIÓN DE LA ZONA MUERTA DE LAS VÁLVULAS MPYE

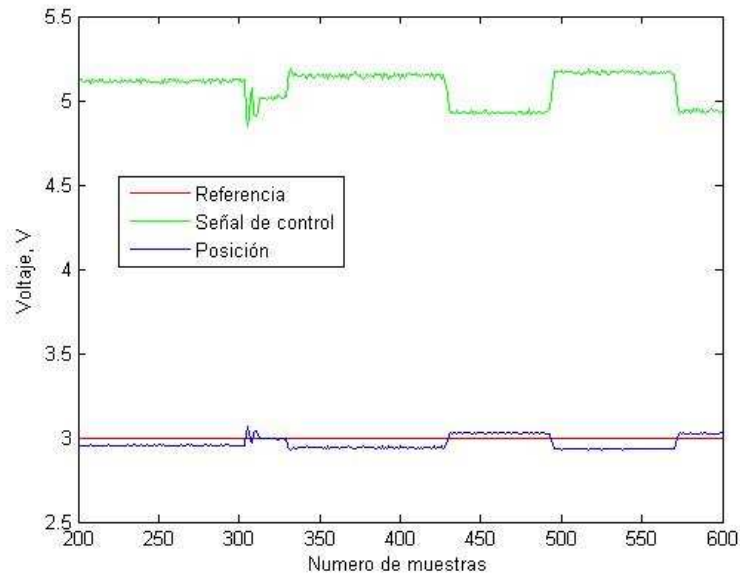


Fig. 6.12. Efecto de la zona muerta

Como se puede ver, el cilindro cuando intenta ajustarse mucho a la referencia la válvula no tiene la precisión suficiente para ajustarse del todo y al intentar ajustarse, debido a lo que le manda la señal de control, se pasa de la referencia y así sucesivamente, es el denominado error de la zona muerta, que es tan pequeña que la válvula no puede ajustarse para una apertura tan baja. Para intentar solucionar el problema de la zona muerta, se observó que las válvulas no cerraban exactamente a 5 V, así para cada cilindro:

- La válvula del cilindro 1 cierra para 4.9 V
- La válvula del cilindro 2 posee una dinámica especial, cuando el vástago está por debajo de la posición 6.5 (65% del recorrido del cilindro) la válvula 2 cierra a 5.045 V, mientras que si el vástago está por encima del 65% de su recorrido la válvula cierra a 4.97 V, esto es debido a que el cilindro no aguanta el mismo peso a unas posiciones que a otras y a que las válvulas tampoco están muy bien reguladas.

Tras tener los valores a los que cerraban las válvulas se estableció, en el código del programa (capítulo 4), la condición de que si el cilindro se encontraba entre la referencia-0.14 y referencia+0.14 establecemos a la salida de la señal de control que va



a la válvula proporcional el valor para que la válvula quede cerrada. En el caso del primer cilindro bastará con esta condición:

```

if REFERENCIA1(N_MUESTRA) -
0.14 < Y_k(1) & REFERENCIA1(N_MUESTRA) + 0.14 > Y_k(1)
    U(1) = -0.1;
else
    U(1) = Kp(1) * E_k(1) + Ki(1) * INTEGRAL(1) + Kd(1) * (E_k(1)
- E_k1(1)) / (1/30);
end
    
```

Para el segundo cilindro al no cerrar igual dependiendo de la posición en que se encuentre el vástago, su condición será:

```

if REFERENCIA2(N_MUESTRA) -
0.14 < Y_k(2) & REFERENCIA2(N_MUESTRA) + 0.14 > Y_k(2) & REFERENCIA2(N_MUESTRA) <
= 6.5
    U(2) = 0.045;
else if REFERENCIA2(N_MUESTRA) -
0.14 < Y_k(2) & REFERENCIA2(N_MUESTRA) + 0.14 > Y_k(2) & REFERENCIA2(N_MUESTRA) >
6.5
    U(2) = -0.03;
else U(2) = Kp(2) * E_k(2) + Ki(2) * INTEGRAL(2) + Kd(2) *
(E_k(2) - E_k1(2)) / (1/30);
end
end
    
```

Con estas condiciones en el código del programa se han conseguido eliminar los efectos de la zona muerta.cil1:

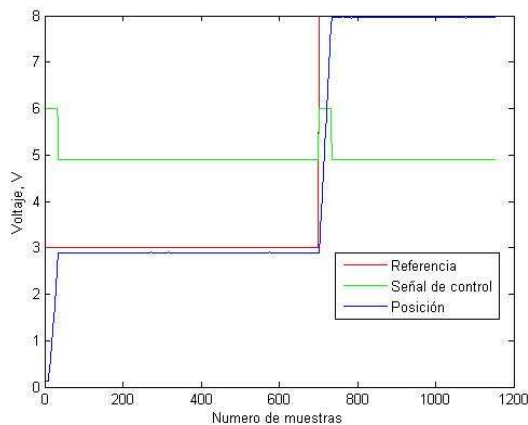


Fig. 6.13. Respuesta del cilindro 1 sin zona muerta ni sobreoscilación

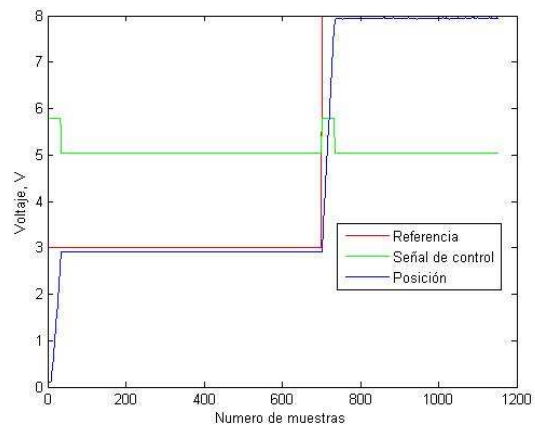


Fig. 6.14. Respuesta del cilindro 1 sin zona muerta ni sobreoscilación



Como se puede comprobar en las figuras anteriores (fig. 6.13 y fig. 6.14) el comportamiento de ambos cilindros ahora mismo es idéntico y sin problemas de zona muerta ni sobreoscilaciones.

6.2.- MOVIMIENTO Y ESCRITURA EN EL ESPACIO DE TRABAJO

6.2.1.- ESPACIO DE TRABAJO ADECUADO

Se comprobaron, en Torregrosa 2005, mediante los cálculos realizados con Matlab, de manera gráfica, que un papel DIN A-4 apaisado estaría todo él dentro del espacio de trabajo del robot (fig. 6.15). Así pues como podemos ver en la figura, con nuestra geometría del robot obtenemos un espacio de trabajo idóneo:

- Ángulo fijo=120º
- Distancia entre apoyos $a=60$
- Longitud del eslabón de unión $b=20$ cm



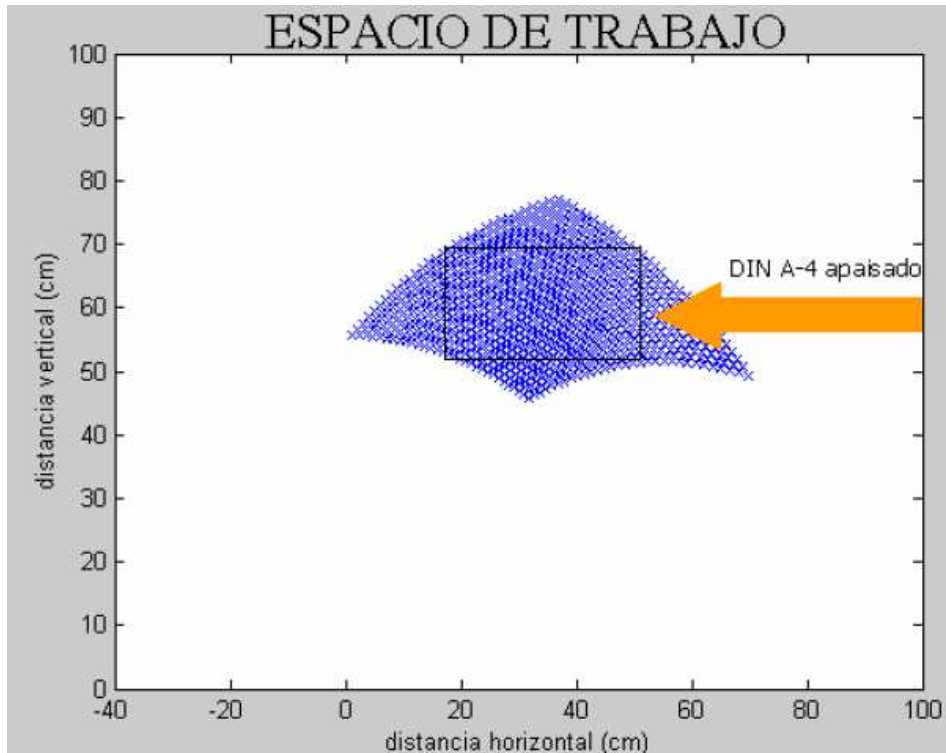


Fig. 6.15. Espació de trabajo para nuestro Robowriter

El ángulo fijo de la unión a 120 grados se comprobó que era el idóneo para establecer un buen espacio de trabajo, por ejemplo si este ángulo se cambiara a 100 grados, un folio A-4 no entraría totalmente dentro del espacio de trabajo.

6.2.1.- DIBUJO DE TRAYECTORIAS DE TEST

Con los valores de PID ajustados anteriormente, cuando se quiere que se realicen movimientos por todo el espacio de trabajo el sistema se vuelve inestable sobre todo para el caso más desfavorable que sería el movimiento de un cilindro hacia arriba y el otro hacía abajo, esto nos obligó a tener que sintonizar unos nuevos PID. Para el cilindro 1 $\rightarrow K_p(1)=2.5$, $K_i(1)=0$, $K_d(1)=0.01$ y para el cilindro 2 $\rightarrow K_p(2)=2$, $K_i(2)=0$, $K_d(2)=0.01$;

Tras sintonizar los PID, se introdujo el programa de la cinemática directa (apartado 3.3.3 del capítulo 3) en nuestro programa de control de la posición de los cilindros. Esto se realizo para que en cada muestra tomada de la posición de los cilindros se saquen sus coordenadas en el espacio de trabajo y se pueda mostrar en

una gráfica la trayectoria real que lleva el tercer cilindro (encargado de llevar el lápiz). Como prueba se pasaron las coordenadas de un cuadrado (de los 4 vértices), por medio del programa de la cinemática inversa (apartado 3.3.4 del capítulo 3), a valores de posición de los cilindros y se introducen al programa Callback_PID.

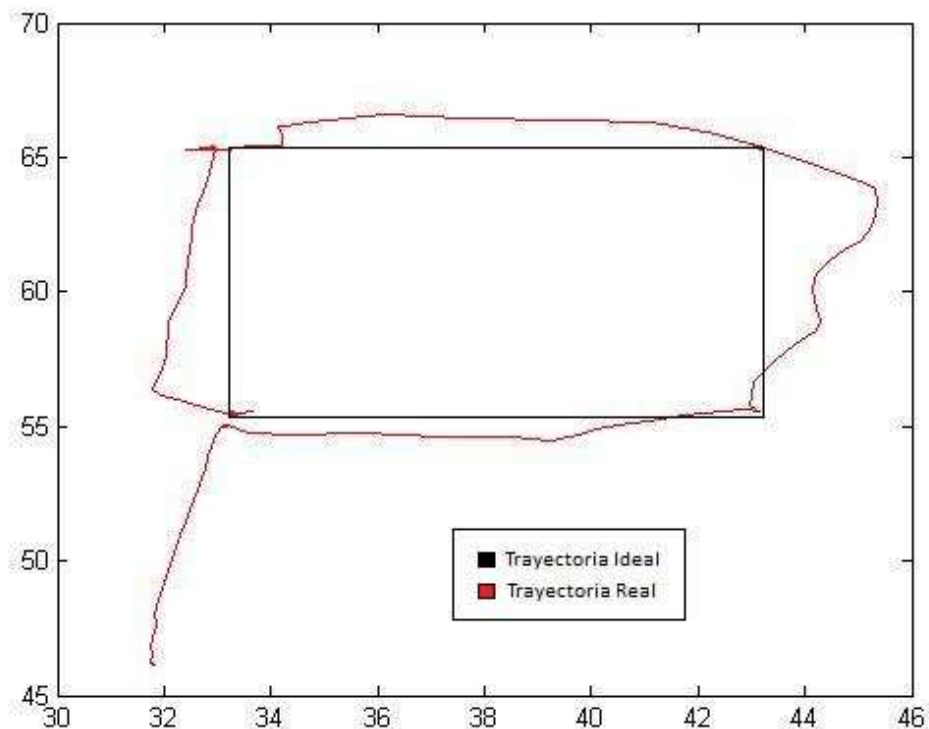


Fig. 6.16. Cuadrado realizado por Robowriter conocidos 4 puntos (vértices)

Como se puede observar, en la figura anterior (fig. 6.16), prácticamente se alcanzan los puntos que se han introducido, es decir los vértices, aunque como vemos la trayectoria no es rectilínea, una solución a esto sería realizar la introducción de el cuadrado con muchos puntos cogidos en intervalos pequeños para que el sistema los pueda seguir y vaya describiendo una trayectoria recta. Aunque aún no se han podido realizar estas pruebas.

También debería introducir el programa de la cinemática inversa en nuestro programa del PID, para que pueda introducir las coordenadas que quiera dibujar y el programa las convierta a valores de posición de los vástagos de los cilindros y que así las entienda y pueda seguir esas referencias. Pero esto no se ha podido realizar por falta de tiempo, debido a los fallos surgidos durante el desarrollo de este proyecto.



Capítulo 7: RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS, CONCLUSIONES Y DESARROLLOS POSTERIORES





7.1.- PROBLEMAS Y SU RESOLUCIÓN

7.1.1.- PÉRDIDA DEL INTERRUPTOR ELÉCTRICO

Al comenzar la realización del proyecto, como es normal, primero se comprueba que está todo el material y se notó que faltaba el circuito que actuaba como interruptor eléctrico para referenciar los cilindros DNCI, por lo que se tuvo que realizar de nuevo el montaje y el diseño de un circuito, que adapte los niveles de tensión de las salidas digitales de la tarjeta, a 24 V de la entrada de referencia de cada cilindro. Se pueden ver los cálculos, el esquema y el montaje del circuito en el apartado 2.2.1 del capítulo 2.

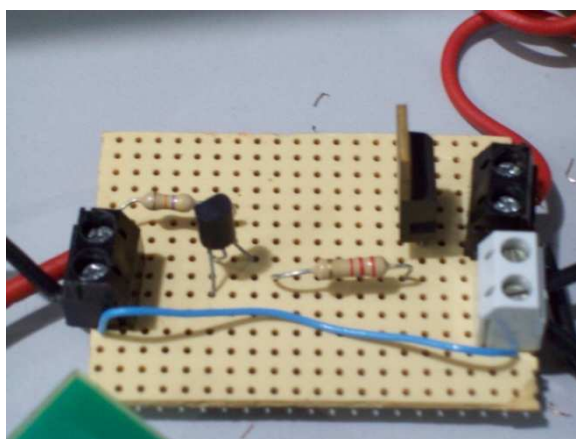


Fig. 7.1. Circuito del interruptor eléctrico

7.1.2.- PÉRDIDA DEL PUNTO DE CALIBRACIÓN EN LOS CILINDROS DNCI

Durante unas de las muchas pruebas que se realizaron a los cilindros para la sintonía experimental de PID, el sistema se nos volvía inestable descontrolándose por completo el movimiento de los cilindros DNCI. En algunos de estos vaivenes los sensores de los cilindros de doble efecto perdieron el punto de calibración por lo que se tenían que volver a establecer los puntos de referencia y calibración a través del cable de los convertidores DADE, proceso que se realiza de la forma indicada en el apartado 2.1.3 del capítulo 2.

7.1.3.- RUPTURA DE LA UNIÓN ATORNILLADA DEL CILINDRO IZQUIERDO CON LA UNIÓN FIJA DE 120 GRADOS

En una de las pruebas que se realizaron para determinar la función de transferencia de cada cilindro, mediante un vector de pulsos PRBS, se desenchajó un poco la unión y al siguiente movimiento la unión atornillada del vástago del primer cilindro con la unión fija se partió, de tal forma que dentro de la rosca de la unión fija se quedo el trozo de tornillo partido del vástago del cilindro.

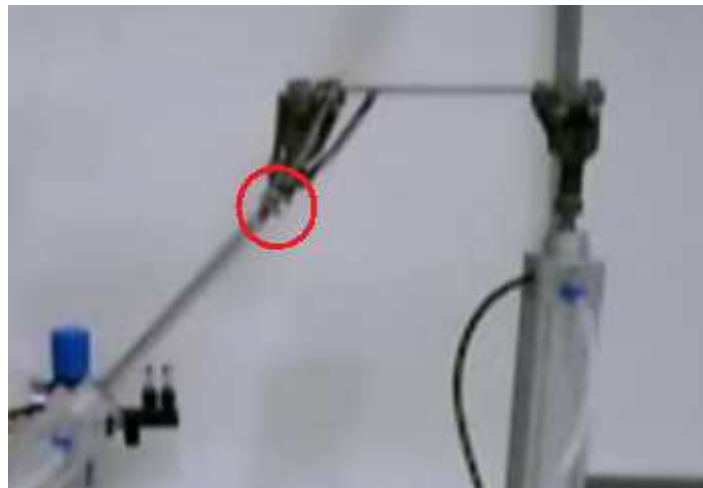


Fig. 7.2. Unión de los cilindros justo antes de producirse la ruptura

Para intentar solucionar este problema se pensó en sacar el tornillo roto que se encontraba dentro de la unión fija y acto seguido volver a roscar esta unión al trozo de rosca del tornillo que había quedado en la punta del vástago. Uno de los profesores del departamento comentó que se llevara la unión fija al edificio de I+D+I de la UPCT, pues allí hay un operario en un taller de máquina-herramienta que nos sacaría el tornillo de dentro de la unión, y así fue. Tras haber sacado el tornillo se utilizó una lima para quitar una pequeña rugosidad que había surgido, por culpa de la ruptura, en la punta del vástago. Por último se volvió a roscar la unión fija al trozo de rosca que quedaba en nuestro cilindro, solucionando el problema. Como curiosidad al sacar el tornillo que se había partido se observó que este tornillo era hueco por dentro mientras que la parte que no se había partido y que permanecía en el cilindro era totalmente maciza por lo que se pensó que podría haber sido un problema en la fabricación del mismo.

7.1.4.- MAL AJUSTE DE LAS VÁLVULAS PROPORCIONALES MPYE

Este problema surgió cuando se quiso solucionar el fallo de la zona muerta en los cilindros para su mejor control (apartado 6.1.2 (c) del capítulo 6). Se observó que aunque las válvulas proporcionales, para una tensión de 5 V, no deberían permitir el paso de aire, en realidad, si que dejan pasar una muy pequeña cantidad de aire por lo que al cabo de un tiempo el cilindro se nos mueve. Para intentar solucionar este problema se realizaron muchísimas pruebas para ver a que tensión se mantenían cerradas, pero aunque se consiguió encontrar esta tensión, la válvula del cilindro derecho tenía la peculiaridad de que si el vástago estaba retraído o muy poco fuera, cerraba a una tensión y si se encontraba al final de su recorrido o casi, la válvula proporcional cerraba a otra tensión diferente. Estas dificultades obligaron a introducir unas condiciones en el código de Matlab para que fueran solucionadas.

Otro de los fallos de estas válvulas, en este caso la del cilindro izquierdo es que cuando se le conecta la presión de aire comprimido antes que la alimentación de 24 V, el cilindro izquierdo avanza rápidamente lo que quiere decir que la válvula no se encuentra cerrada cuando se le desconecta la tensión. También, como curiosidad, al conectar la alimentación se oye un zumbido en estas válvulas MPYE que al cabo de un tiempo desaparece.

Una solución para evitar tantos problemas podría ser: limpiar las válvulas interiormente porque puede ser que no lleguen a cerrar bien si tienen suciedad, introducir unas nuevas válvulas o bien lo que se ha realizado, la introducción de condiciones en el código del programa para que cierren adecuadamente.

7.1.5.- RUPTURA DEL SENSOR DE POSICIÓN DEL CILINDRO DNCI IZQUIERDO

Este problema fue el de mas difícil solución ya que no se supo en un principio a que se debía, asique se realizaron varios intentos sobre cómo solucionar el problema (Apartado 2.2.2, Capítulo 2).



7.2.- CONCLUSIONES

En el desarrollo del presente proyecto se han puesto a punto todos los sensores y actuadores y se ha realizado correctamente el conexionado del robowriter para su óptimo funcionamiento. Se han controlado mediante unos PID la posición de cada cilindro, aunque solo ha hecho falta una parte proporcional y derivativa (PD). El control de cada cilindro individual con un PD ha sido bastante rápido y bueno, lo que es un reflejo de las buenas prestaciones que poseen los controladores PID en la mayoría de sistemas de control. Sin embargo, al tratar de controlar dos cilindros que dependen uno del otro, los resultados no han resultado tan satisfactorios, aunque sí han sido aceptables. Se ha comprobado al depurar muchos errores del funcionamiento de ambos cilindros que se puede conseguir un movimiento de los mismos de forma suave y fluida.

Se pudo ver al calcular las funciones de transferencia que el sistema ofrecía bastantes problemas para obtenerlas ya que muchos resultados no nos eran coincidentes aunque al final por varios métodos se pudo conseguir un modelo aceptable, en cambio cuando se intentó sacar un modelo de las perturbaciones de un cilindro al otro los datos se fueron complicando y al final no dio tiempo a realizar nada más. Al final de nuestro proyecto se cogieron los programas de la cinemática directa e inversa y se integraron en nuestro sistema para conseguir que el sistema pueda dibujar unas figuras usadas como patrón. Como consecuencia se pudo observar que debemos tomar muchos puntos en un dibujo para que pueda seguir esa trayectoria.

En conclusión se puede decir que el desarrollo del proyecto ha tenido muchas complicaciones pero aun así ha servido fundamentalmente para comprobar la robustez de los controladores PID e intentar controlar el funcionamiento de este sistema MIMO (de dos entradas y dos salidas) de forma eficiente.



7.3.- DESARROLLOS POSTERIORES

- En un futuro se deberían realizar más pruebas y dibujar nuevas figuras con nuestro proyecto. Se debería intentar algo más avanzado como fotografiar una silueta, obtener de ella su contorno y que el robowriter pueda dibujarlo.

- Se debería también probar a quitar la saturación y en vez de introducirle escalones al sistema, introducir rampas para que los cilindros puedan seguir mejor el valor de consigna y se obtenga un funcionamiento suave sin necesidad de meter términos no lineales (saturación).

- Se debería contemplar para desarrollos posteriores una técnica para el desacoplo de los dos cilindros y poder reducir la perturbación de uno al otro de la forma más eficiente, o bien introduciendo unas funciones de transferencia como etapas anteriores o utilizando un único controlador PID que nos saque el error directamente de nuestro dibujo en el plano y en función del error aporte a un cilindro y a otro un porcentaje de la señal de control para poder seguir de una forma eficaz la referencia.

- Una mejora también sería sustituir el control mediante PID por técnicas de control adaptativo más adecuadas como control predictivo MPC (Model Predictive Control).



BIBLIOGRAFÍA

- Katsuhiko Ogata, (2003), *Ingeniería de control moderna*, (4ª edición), Pearson.
- Aström, K.J.; Hägglund, T., (2005), *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, (3ª edición), ISA
- Torregrosa, M., (2006), “Modelado, simulación y diseño de un robot de actuación neumática de dos grados de libertad”, UPCT.
- Rosillo, A., (2007), “Montaje, programación y puesta en marcha de un robot neumático de estructura paralela”, UPCT.
- Espinosa, J., (2003), “Control Lineal de Sistemas Multivariables”.
- Apuntes de la Asignatura, de 3º I.T.I. Electrónica Industrial, Técnicas Avanzadas de Control.
- Contenidos, ejemplos y demostraciones incluidos en la ayuda de Matlab.
- <http://www.sapiensman.com>
- <http://www.festo.com>