

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Dpto. de INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA



INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

**MODELADO Y CONTROL ROBUSTO  
DE UN CILINDRO NEUMÁTICO**

**AUTOR:** MANUEL A. FUENTES CHILLARÓN

**TUTOR:** CONCEPCIÓN ALICIA MONJE MICHARET

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Dpto. de INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA



INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

**MODELADO Y CONTROL ROBUSTO  
DE UN CILINDRO NEUMÁTICO**

**AUTOR:** MANUEL A. FUENTES CHILLARÓN

**TUTOR:** CONCEPCIÓN ALICIA MONJE MICHARET

*A mis abuelos Juan y Antonio.*

*Os tenemos presentes.*

# Agradecimientos

---

Al comenzar a escribir estos párrafos se ha establecido en mi mente, de forma casi automática, una imagen de mi primer día de clase cuando comencé a estudiar la Ingeniería Técnica Industrial. Parece mentira que esté redactando los agradecimientos del proyecto fin de carrera de la Ingeniería Industrial.

No puedo evitar acordarme de mis amigos de toda la vida, de mis amigos de la Universidad de Alcalá, de mis amigos de la Universidad Carlos III y de esas personas con las que he pasado buenos momentos y seguiré pasándolos. Todos se merecen ser nombrados en estas líneas.

A mi tutora Concha, ha sido un placer compartir estos meses de trabajo. Gracias por estar siempre dispuesta a responder a mis preguntas y por explicarme todo lo que he aprendido de identificación y control haciendo este trabajo.

A mi familia entera, a mi hermana y mi cuñado y, a esa personita que nos hace tan felices a todos, mi sobrino Óscar. Me encantaría que algún día entendiese este documento. Gracias a todos por confiar en mí y por darme ánimos cuando lo he necesitado.

A mis padres, Manolo y Conchi. Gracias por todo, gracias por los valores que me habéis inculcado, gracias por la educación recibida y, sobretodo, gracias por transmitirme un sentimiento de familia que solo se enseña a base de cariño. Fuisteis los que me animaron a continuar con estos estudios que llegan a su fin, por ello, os dedico este trabajo.

Manuel A. Fuentes Chillarón  
29 de junio de 2009

<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	1
1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO .....	2
<b>2 ELEMENTOS DEL SISTEMA .....</b>	<b>4</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	4
2.2 VÁLVULA PROPORCIONAL DE 5/3 VÍAS.....	5
2.2.1 Conexionado y simbología.....	6
2.3 POTENCIÓMETRO LINEAL.....	7
2.3.1 Conexionado y simbología.....	7
2.4 ACTUADOR LINEAL .....	8
2.4.1 Conexionado y simbología.....	9
2.5 SENSOR DE PRESIÓN.....	9
2.5.1 Conexionado y simbología.....	10
2.6 VÁLVULA DE CIERRE .....	11
2.7 MANÓMETRO .....	11
2.8 REGLA GRADUADA .....	12
2.9 PESO.....	13
2.10 ADAPTADOR DE TENSIONES .....	13
2.10.1 Esquema propuesto.....	14
2.10.2 Simulación del adaptador de tensiones.....	17
2.10.3 Conexionado .....	18
2.11 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS: PCL 818 .....	19
2.11.1 Creación de un diseño.....	19
2.11.2 Configuración .....	20
2.11.2.1 Configuración del bloque ADAPTER.....	20
2.11.2.2 Configuración del bloque RT In.....	22
2.11.2.3 Configuración del bloque RT Out.....	23
2.11.2.4 Escalado de señales.....	23
2.11.3 Conexionado .....	25
<b>3 IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA .....</b>	<b>26</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	26
3.2 IDENTIFICACIÓN EN LAZO ABIERTO .....	26
3.2.1 Esquema Simulink.....	27
3.2.2 Resultados.....	28
3.3 IDENTIFICACIÓN EN LAZO CERRADO.....	29

3.3.1 Identificación en lazo cerrado con escalón .....	29
3.3.1.1 Esquema Simulink .....	29
3.3.1.2 Modelo de la válvula proporcional.....	30
3.3.1.3 Modelo peso – actuador – potenciómetro .....	36
3.3.1.4 Resultados.....	42
3.3.2 Identificación en lazo cerrado con escalón y posición inicial.....	43
3.3.2.1 Esquema Simulink .....	44
3.3.2.2 Resultados.....	44
3.3.3 Identificación en lazo cerrado con rampa y posición inicial.....	46
3.3.3.1 Esquema Simulink .....	46
3.3.3.2 Resultados.....	47
3.3.4 Identificación en lazo cerrado con presión en válvula de mantenimiento menor y posición inicial.....	52
3.3.4.1 Resultados.....	52
<b>4 CONTROL MEDIANTE PID.....</b>	<b>60</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	60
4.2 ESQUEMA DESARROLLADO .....	61
4.3 RESULTADOS OBTENIDOS .....	62
4.4 ANÁLISIS DE PERTURBACIONES .....	67
<b>5 CONTROL FRACCIONARIO.....</b>	<b>69</b>
5.1 INTRODUCCIÓN .....	69
5.2 CÁLCULO DEL CONTROLADOR.....	70
5.3 ESQUEMA DESARROLLADO .....	71
5.4 RESULTADOS OBTENIDOS .....	72
5.5 ANÁLISIS DE PERTURBACIONES .....	76
<b>6 COMPARATIVA ENTRE ESTRATEGIAS.....</b>	<b>78</b>
6.1 INTRODUCCIÓN .....	78
6.2 EQUIVALENCIA ENTRE FRACCIONARIO Y PID .....	78
6.3 RESULTADOS OBTENIDOS .....	79
<b>7 CONCLUSIONES.....</b>	<b>82</b>
<b>8 TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>84</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>86</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 Esquema neumático de la plataforma</i> .....	4
<i>Figura 2.2 Esquema general de la plataforma</i> .....	5
<i>Figura 2.3 Aspecto de la válvula proporcional [1]</i> .....	6
<i>Figura 2.4 Símbolo de la válvula proporcional [1]</i> .....	7
<i>Figura 2.5 Aspecto del potenciómetro lineal [1]</i> .....	7
<i>Figura 2.6 Símbolo del potenciómetro lineal [1]</i> .....	8
<i>Figura 2.7 Aspecto del actuador lineal [1]</i> .....	8
<i>Figura 2.8 Símbolo del actuador lineal [1]</i> .....	9
<i>Figura 2.9 Aspecto del sensor de presión [1]</i> .....	9
<i>Figura 2.10 Característica Presión – Intensidad [1]</i> .....	10
<i>Figura 2.11 Características Presión - Tensión [1]</i> .....	10
<i>Figura 2.12 Símbolo del sensor de presión [1]</i> .....	10
<i>Figura 2.13 Aspecto de la válvula de cierre [1]</i> .....	11
<i>Figura 2.14 Símbolo de la válvula de cierre [1]</i> .....	11
<i>Figura 2.15 Aspecto del manómetro [1]</i> .....	12
<i>Figura 2.16 Símbolo del manómetro</i> .....	12
<i>Figura 2.17 Aspecto de la regla graduada [1]</i> .....	12
<i>Figura 2.18 Símbolo de regla graduada [1]</i> .....	13
<i>Figura 2.19 Aspecto del peso [1]</i> .....	13
<i>Figura 2.20 Circuito propuesto para el adaptador de tensiones</i> .....	14
<i>Figura 2.21 Circuito cortocircuitando la señal Ve</i> .....	15
<i>Figura 2.22 Circuito cortocircuitando la señal 5 V</i> .....	16
<i>Figura 2.23 Simulación del funcionamiento del adaptador de tensiones</i> .....	18
<i>Figura 2.24 Aspecto del adaptador de tensiones</i> .....	19
<i>Figura 2.25 Esquema ejemplo de creación de un modelo</i> .....	19
<i>Figura 2.26 Ventana de selección del driver</i> .....	20
<i>Figura 2.27 Ventana de parámetros de configuración</i> .....	21
<i>Figura 2.28 Ventana de selección de ganancias</i> .....	21
<i>Figura 2.29 Ventana de configuración del bloque RT In</i> .....	23
<i>Figura 2.30 Ventana de configuración del bloque RT Out</i> .....	23
<i>Figura 2.31 Esquema del escalado de la señal de entrada</i> .....	24
<i>Figura 2.32 Esquema del escalado de la señal salida</i> .....	25
<i>Figura 2.33 Aspecto del bornero de la PCL 818</i> .....	25
<i>Figura 3.1 Diagrama de bloques de la identificación en lazo abierto</i> .....	27
<i>Figura 3.2 Esquema de la identificación en lazo abierto</i> .....	27
<i>Figura 3.3 Señales obtenidas de la identificación en lazo abierto</i> .....	28
<i>Figura 3.4 Diagrama de bloque de la identificación en lazo cerrado</i> .....	29
<i>Figura 3.5 Esquema identificación en lazo cerrado con escalón</i> .....	30
<i>Figura 3.6 Datos experimentales de la válvula proporcional</i> .....	32

<i>Figura 3.7 Modelo en Simulink de la válvula proporcional.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.8 Configuración de la zona muerta .....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.9 Configuración de la saturación.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.10 Modelo en Simulink de la válvula proporcional.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.11 Señales obtenidas del modelo Simulink de la válvula proporcional .....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.12 Señales utilizadas en la identificación en lazo cerrado del conjunto peso – actuador – potenciómetro.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.13 Ventana para importar datos en Ident.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.14 Ventana de señales utilizadas en la identificación .....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.15 Ventana de datos cargados en ident.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.16 Linear parametric models .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.17 Ventana de ident del modelo obtenido.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.18 Porcentaje de similitud del modelo .....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.19 Esquema simulación identificación en lazo cerrado con escalón .....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3.20 Señales de la simulación en lazo cerrado con escalón.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3.21 Esquema identificación en lazo cerrado con escalón y posición inicial .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.22 Señales de simulación en lazo cerrado con escalón y posición inicial .....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.23 Presión en la VIA 4 con identificación en lazo cerrado con escalón y posición inicial.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3.24 Esquema Simulink de identificación en lazo cerrado con rampa y posición inicial.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.25 Salidas experimentales de identificación en lazo cerrado con rampa y posición inicial .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.26 Esquema simulación identificación en lazo cerrado con rampa y posición inicial.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3.27 Señales de simulación en lazo cerrado con rampa y posición inicial .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3.28 Señales de simulación en lazo cerrado con rampa desde posición ante incremento de 2 V..</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3.29 Salida de identificación en lazo cerrado con presión 1 bar, escalón y posición inicial.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.30 Señales de simulación en lazo cerrado con presión de 1 bar, escalón y posición inicial .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 3.31 Señales de simulación en lazo cerrado con presión 1 bar, escalón ante incremento de 2 V..</i>	<i>55</i>
<i>Figura 3.32 Lugar de las raíces del modelo obtenido a través de identificación en lazo cerrado con 1 bar, escalón y posición inicial .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 3.33 Ventana process models .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.34 Señales de aproximación según modelos (16) ó (17).....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 3.35 Señales de la simulación con modelos según (16).....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4.1 Esquema para ajuste del controlador PID.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4.2 Configuración del bloque PID .....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4.3 Primeras pruebas con PID.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.4 Sigüientes pruebas con PID .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.5 Mejor resultado con PID ajustado .....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4.6 Esquema de la simulación con PID.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.7 Señales de la simulación con PID .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.8 Salida en presencia y en ausencia de PID.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 4.9 Señales en presencia y en ausencia de perturbación .....</i>	<i>67</i>

<i>Figura 4.10 Planta de la perturbación.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.11 Perfil de la perturbación .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.1 Herramienta para calcular el controlador fraccional .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.2 Esquema para ajustar el controlador fraccional .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.3 Primeras pruebas con controlador fraccionario.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.4 Salida con controlador fraccionario ajustado .....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.5 Simulación con controlador fraccionario .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.6 Señales de la simulación con controlador fraccionario.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.7 Salida con y en ausencia de controlador fraccionario.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.8 Primeras pruebas de robustez con controlador fraccionario.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.9 Sigüientes pruebas de robustez.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 6.1 Resultados en comparativa con controlador fraccionario .....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 6.2 Resultados con PID.....</i>	<i>81</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1 Conexionado de la válvula .....</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 2.2 Conexionado del potenciómetro lineal.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 2.3 Conexionado del sensor de presión.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 2.4 Conexionado del adaptador de tensiones.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 2.5 Ganancias y rangos de lectura.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2.6 Conexionado de la PCL 818 .....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 3.1 Datos experimentales de la válvula proporcional.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 3.2 Polos y ceros del modelo.....</i>	<i>55</i>



# 1 Introducción

## 1.1 Introducción

Los sistemas neumáticos se utilizan frecuentemente en la automatización de maquinaria de producción y en el campo de los controladores neumáticos. Procesos como remachado, perforado, estampado, etc., pueden ser perfectamente automatizados utilizando neumática, siempre y cuando pueda conseguirse un sistema de posicionamiento.

El uso de actuadores neumáticos en aplicaciones industriales ha estado a menudo limitado por la complejidad del sistema de control en comparación con los actuadores eléctricos. Adelantos en tecnología electroneumática han dado por resultado una clase de actuadores proporcionales servoneumáticos controlados electrónicamente y que han sido probados en sistemas de automatización ofreciendo una solución económica.

Las ventajas de los actuadores neumáticos residen en su alta relación fuerza/peso y en su bajo coste, además de su facilidad de mantenimiento y su limpieza en el funcionamiento. Sin embargo, presentan como principal inconveniente su dificultad de control debido a la presencia de no linealidades en todo su recorrido por las propiedades del aire comprimido en su flujo.

Por otro lado, la determinación experimental del modelo del sistema neumático resulta fundamental para el buen diseño de la estrategia de control y del regulador en sí. Además, permite realizar pruebas en ausencia del sistema físico.

## 1.2 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo consiste en realizar un modelado experimental de un sistema compuesto por un cilindro neumático y una válvula proporcional para posteriormente desarrollar diferentes estrategias de control que permitan obtener una buena respuesta del sistema ante perturbaciones, así como una buena precisión en el posicionamiento del mismo.



En primer lugar, se conectará el sistema con un PC a través de la tarjeta de adquisición de datos PCL 818 para poder leer datos y mandar órdenes al sistema. Los rangos de funcionamiento de la PCL 818 y del sistema no son los mismos, por lo que habrá que conseguir compatibilizarlos desarrollando una etapa adaptadora por medio de electrónica básica.

Posteriormente, se desarrollarán diferentes estrategias de identificación con el fin de obtener un modelo sencillo del sistema, así evitaremos trabajar con órdenes elevados en las ecuaciones que lo describen y perder el sentido físico del modelo. Por otro lado, buscaremos unas condiciones óptimas de funcionamiento en las que se minimicen los efectos no lineales característicos de los sistemas neumáticos.

Una vez identificado el sistema, se ajustará experimentalmente un controlador de tipo PID para obtener una dinámica y régimen permanente deseados. Una vez diseñado el controlador, se simulará sobre el modelo obtenido de la identificación y se validarán los resultados.

Por último, desarrollaremos un controlador de orden fraccionario experimentalmente y en simulación. Además, compararemos los resultados con el controlador de tipo PID en términos de robustez y precisión ante cambios en la masa del sistema principalmente.

En definitiva, se pretende analizar si los controladores fraccionarios son tan robustos como para poder absorber las no linealidades características de este tipo de sistemas.

## 1.3 Estructura del proyecto

El capítulo 1 comienza con una breve introducción al proyecto y nos sitúa en el entorno en el que se va a desarrollar. Además, se exponen los objetivos principales y la estructura del mismo.

En el capítulo 2 se trata todo lo referente a la plataforma y a las partes que la componen. Se introduce cada parte y se exponen brevemente las características de cada elemento. Describiremos el funcionamiento y configuración de la tarjeta de adquisición de datos así como la conexión de ésta con la plataforma. En esta sección se ha incluido el diseño de la etapa adaptadora de tensiones entre la tarjeta de



adquisición de datos y el sistema, adjuntando las simulaciones y esquemas para entender su funcionamiento.

La identificación de la plataforma se trata en el capítulo 3. En él incluiremos las diferentes estrategias y herramientas utilizadas para la obtención de la función de transferencia que modela al sistema. También se explicarán todos los parámetros de configuración de los bloques que han intervenido en el proceso.

En el capítulo 4 se explica en qué consiste un regulador de tipo PID, se ajusta experimentalmente un controlador de este tipo y se compara con los resultados obtenidos mediante simulación utilizando el modelo obtenido en el capítulo 3. Además, se estudia el comportamiento del sistema ante cambios en su masa cuando se aplica un controlador de este tipo.

El capítulo 5 contiene todo el estudio realizado con el controlador de orden fraccionario, en la introducción se incluyen unas nociones básicas para saber en qué consiste este tipo de reguladores y cual es su principal característica. Al igual que en el desarrollo del controlador PID, se muestran los resultados experimentales y los simulados y se perturba al sistema para ver como se comporta ante cambios en su configuración.

El capítulo 6 contiene una comparativa en términos de robustez entre el controlador fraccionario y el PID. A partir de las especificaciones con las que se diseñó el controlador fraccionario se obtiene el equivalente en parámetros para el PID. Se mostrarán los resultados obtenidos al perturbar al sistema con los dos controladores ajustados para las mismas especificaciones.

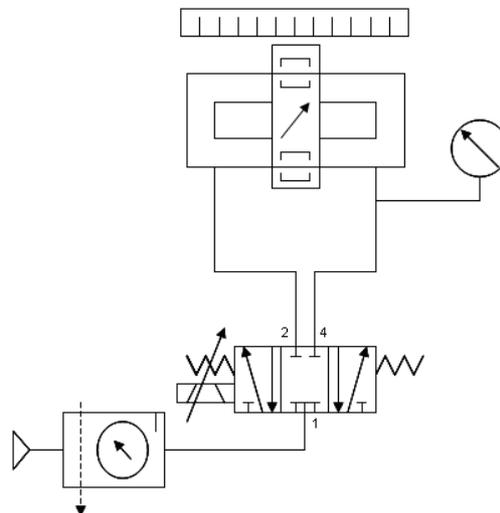
Las conclusiones a las que se han llegado se muestran en el capítulo 7. Mientras que los posibles trabajos futuros y líneas de investigación que se pueden seguir se muestran en el capítulo 8.

Al final del trabajo, se incluyen los anexos y bibliografía que se ha utilizado.

## 2 Elementos del sistema

### 2.1 Introducción

Los elementos que forman el sistema neumático son de la casa FESTO. En la Figura 2.1 se muestra un esquema de las conexiones neumáticas del sistema. En los siguientes epígrafes explicaremos como se conecta cada elemento y algunas características relevantes de su funcionamiento. Para más información sobre estos componentes, se pueden consultar las hojas de catálogo que se proporcionan en los anexos.



**Figura 2.1 Esquema neumático de la plataforma**

La Figura 2.2 representa un diagrama de las conexiones de los elementos del sistema, en él se incluyen las partes neumáticas y las eléctricas. Pretende clarificar el funcionamiento de la plataforma y facilitar la conexión de los elementos que forma el sistema completo.

Desde la tarjeta de adquisición de datos se mandan las órdenes a la válvula proporcional, ésta deja pasar presión por las vías 2 ó 4 en función de la señal que reciba. La presión comunicada a las vías por parte de la válvula proporcional provoca un movimiento del conjunto peso-cilindro. Este conjunto está fijado al peso por lo que en cada movimiento se desplaza el potenciómetro y provoca una tensión a su salida que será leída por la PCL 818.

El diagrama incluye todas las partes que intervienen en el trabajo pero no todas se utilizan siempre. El sensor de presión se utiliza únicamente en una parte de la identificación del sistema pero se ha decidido incluir en el diagrama para mostrar donde se ubica cuando se mencione en la sección correspondiente.

A los conectores de cada componente FESTO le asigna un color, por lo que resulta sencillo identificar cada señal. En el epígrafe correspondiente a cada parte se muestra un cuadro en el que se asocia el color del conector con la señal a la que debe ir conectada.

En este capítulo están descritas todas las partes que componen el sistema, se ha decidido incluir a la PCL 818 en el diagrama para tener una visión global del sistema completo y tener presente que su función es la de leer y escribir señales. En la parte de correspondiente se explicará como funciona y la configuración que se ha hecho de ella para el desarrollo del trabajo.

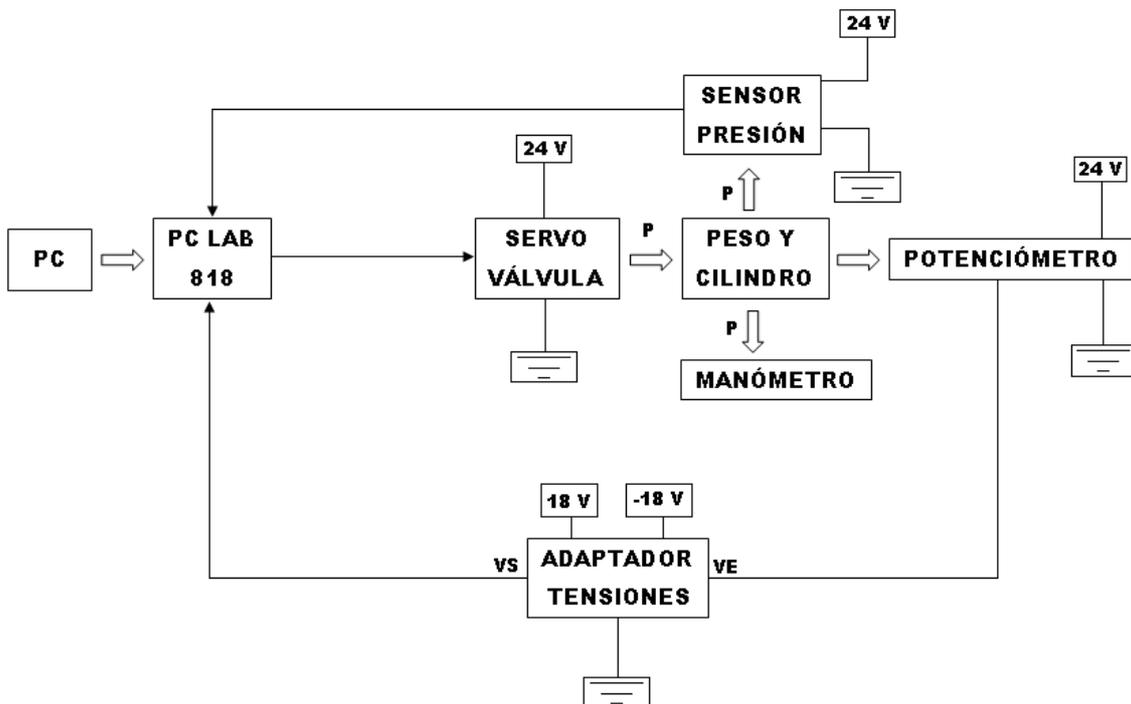


Figura 2.2 Esquema general de la plataforma

## 2.2 Válvula proporcional de 5/3 vías

La válvula distribuidora proporcional, mostrada en la Figura 2.3, convierte una señal de entrada analógica en aperturas de sección de paso adecuadas para cada vía. A la

mitad de su tensión nominal, a 5 V, la válvula asume su posición media neumática en la que el aire no atraviesa la válvula. A 0 V y a 10 V respectivamente, la válvula asume una de sus posiciones extremas, con la máxima sección de paso abierta o cerrada.

Una armadura tubular acciona directamente la corredera de la válvula actuando como un transductor electromecánico. Un regulador electrónico integrado para el recorrido de la corredera permite obtener unas buenas características estáticas y dinámicas. Según las hojas de características:

- Una histéresis por debajo del 0.3%
- Tiempo de accionamiento de 5 ms.
- Frecuencia de funcionamiento próxima a 100Hz.

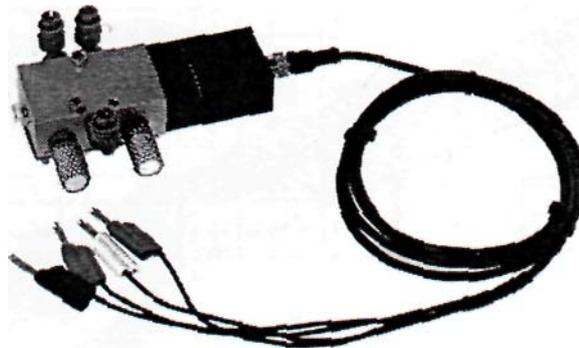


Figura 2.3 Aspecto de la válvula proporcional [1]

### 2.2.1 Conexión y simbología

La asignación de pines y el código de colores para las clavijas del cable se muestran en la Tabla 2.1:

Conexiones	Clavija
Alimentación + 24 V	Rojo
Alimentación 0 V	Azul
Señal de tensión	Negro
Tierra de la señal	Blanco

Tabla 2.1 Conexión de la válvula

El símbolo utilizado a lo largo de todo el documento para referirnos a la válvula proporcional será el mostrado en la Figura 2.4:

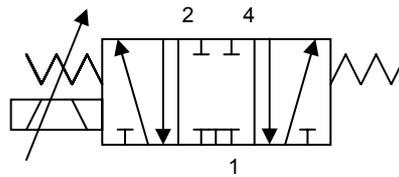


Figura 2.4 Símbolo de la válvula proporcional [1]

## 2.3 Potenciómetro lineal

El potenciómetro lineal suministra una tensión proporcional a la tensión de alimentación y a la posición del patín. Su material resistivo consiste en una capa de plástico conductor, que tiene la ventaja sobre los potenciómetros bobinados de ofrecer una mayor resolución y una duración también mayor. La Figura 2.5 muestra el aspecto físico del potenciómetro.

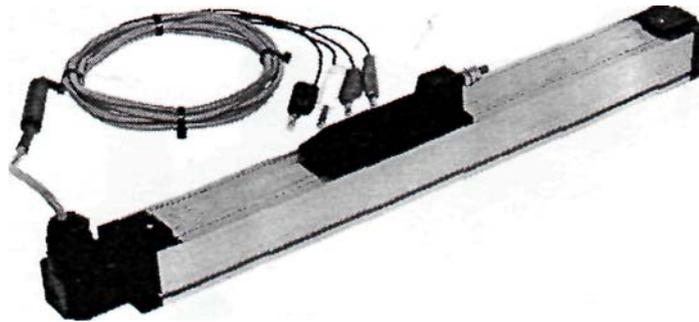


Figura 2.5 Aspecto del potenciómetro lineal [1]

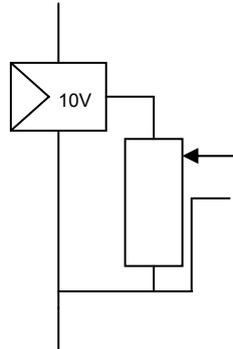
### 2.3.1 Conexión y simbología

La asignación de pines y el código de colores para las clavijas del cable se muestran en la Tabla 2.2:

Conexiones	Clavija
Alimentación +13V a +30V	Rojo
Alimentación 0 V	Azul
Señal de tensión 0V a +10V	Negro
Tierra de la señal	Blanco

Tabla 2.2 Conexión del potenciómetro lineal

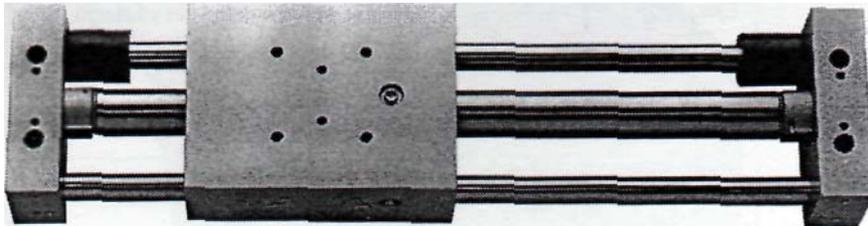
El símbolo utilizado para referirnos al potenciómetro lineal será el mostrado en la Figura 2.6:



**Figura 2.6 Símbolo del potenciómetro lineal [1]**

## 2.4 Actuador lineal

Consiste en un cilindro neumático de doble efecto sin vástago de 200 mm de carrera y 25 mm de diámetro de émbolo. Las cámaras del cilindro se alimentan con aire comprimido por medio de sus dos conexiones. Unos potentes imanes permanentes unen el émbolo interno con la corredera. La velocidad de desplazamiento se halla limitada para que no pueda sobrepasarse la fuerza del acoplamiento magnético. La Figura 2.7 muestra el aspecto del actuador lineal.



**Figura 2.7 Aspecto del actuador lineal [1]**

Dispone de dos guías para aumentar la rigidez. Además, pueden montarse dispositivos adicionales directamente sobre la corredera. Las placas externas tienen agujeros roscados para permitir el montaje de un sistema de medición de la posición. Esto permite montar la escuadra de soporte sobre la corredera como se desee.

En los extremos de las guías se han dispuesto unos topes elásticos para actuar como dispositivos de seguridad. Estos topes amortiguan el impacto de la corredera sobre las placas extremas si el sistema de control falla.

### 2.4.1 Conexionado y simbología

El actuador dispone de enganches de 2.5 mm en los que se pueden insertar los tubos que comunican la presión a través de la válvula proporcional. El símbolo que corresponde al actuador lineal se puede ver en Figura 2.8.

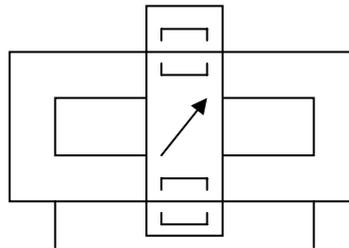


Figura 2.8 Símbolo del actuador lineal [1]

## 2.5 Sensor de presión

Es un sensor de presión relativa con un amplificador y un compensador de temperatura integrados en un cuerpo de aluminio. El cambio de señal producido en el elemento se emite como tensión o como corriente a través de un amplificador hacia el conector exterior. El sensor también suministrará una señal con presiones menores de 0 bares, en este caso no se garantiza la linealidad y la proporcionalidad.

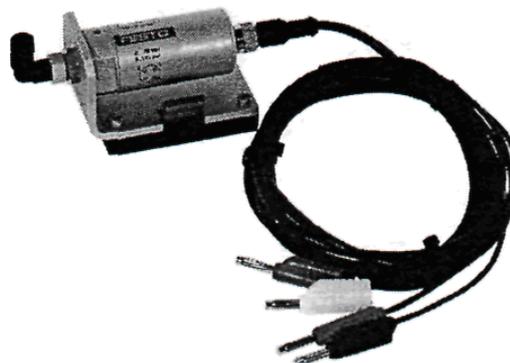


Figura 2.9 Aspecto del sensor de presión [1]

La Figura 2.9 muestra una imagen del sensor de presión. En las curvas características del sensor, Figura 2.10 y Figura 2.11, se puede apreciar que tanto para corriente como para voltaje su ganancia es unitaria.

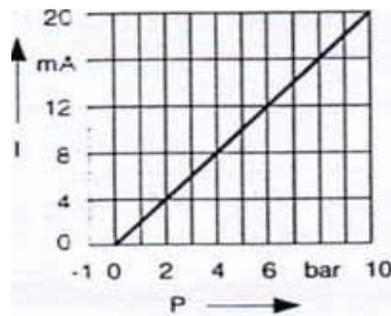


Figura 2.10 Característica Presión – Intensidad [1]

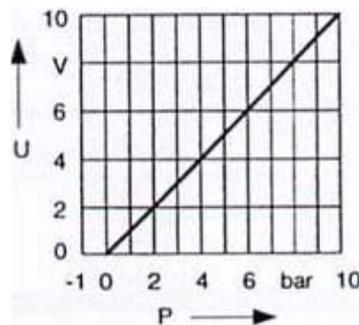


Figura 2.11 Características Presión - Tensión [1]

### 2.5.1 Conexionado y simbología

El símbolo y la nomenclatura de las clavijas se muestran en Figura 2.12 y Tabla 2.3 respectivamente:

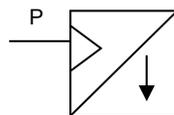


Figura 2.12 Símbolo del sensor de presión [1]

Conexiones	Clavija
Alimentación +24V	Rojo
Alimentación 0 V	Azul
Tensión de salida	Negro
Corriente de salida	Blanco

Tabla 2.3 Conexionado del sensor de presión

## 2.6 Válvula de cierre

El regulador de presión, mostrado en la Figura 2.13, ajusta el aire comprimido a la presión de funcionamiento y compensa las fluctuaciones de la presión. Una flecha en el cuerpo indica el sentido del caudal. La válvula de cierre descarga la presión del sistema. Se acciona manualmente al girar la llave de paso roja, además de cortar el abastecimiento de aire, descarga la presión del sistema.



Figura 2.13 Aspecto de la válvula de cierre [1]

Entre sus características más importantes destaca que el caudal nominal estándar es de 750 l/min. y que las presiones máximas de entrada y de funcionamiento son 16 kPa (16 bar) y 12 kPa (12 bar). El símbolo que lo representa se aprecia en la Figura 2.14.

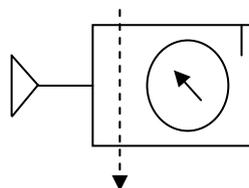


Figura 2.14 Símbolo de la válvula de cierre [1]

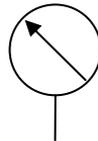
## 2.7 Manómetro

La función del manómetro en el sistema será la de leer la presión del sistema neumático para poder compararla con el sensor de presión. El rango de presiones que

puede mostrar está comprendido entre 0 bar y 10 bar. No se recomienda su uso por encima del 75% del valor final de escala. El manómetro se representa por el símbolo que se muestra en la Figura 2.16 y su aspecto se representa en la Figura 2.15.



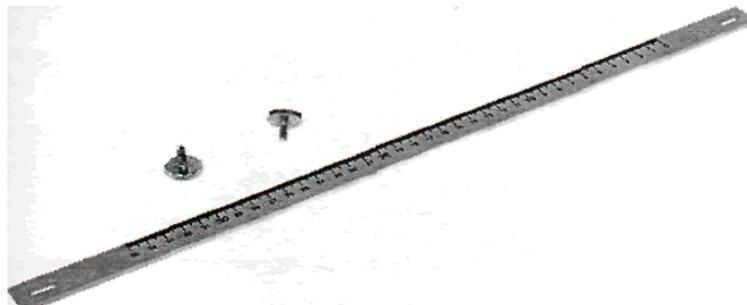
**Figura 2.15 Aspecto del manómetro [1]**



**Figura 2.16 Símbolo del manómetro**

## 2.8 Regla graduada

La regla, expuesta en la Figura 2.17, se usa para medir la posición de la corredera del actuador lineal:



**Figura 2.17 Aspecto de la regla graduada [1]**

Su símbolo es el representado en la Figura 2.18:



Figura 2.18 Símbolo de regla graduada [1]

## 2.9 Peso

Consiste en un peso metálico de 5 Kg., Figura 2.19, con dos tornillos de cabeza redonda y cuatro rebajes para facilitar su manipulación. El peso se utiliza como carga en los ejercicios con actuadores lineales. El peso puede asegurarse por alguno de los siguientes métodos:

1. El peso puede montarse en la corredera de los actuadores lineales. Los dos tornillos de cabeza redonda suministrados deben ser insertados en los agujeros avellanados del peso y atornillados a la corredera.
2. El peso puede montarse en la corredera de los actuadores lineales utilizando una placa intermedia. Los dos tornillos de cabeza redonda suministrados deben ser insertados en los agujeros avellanados del peso y atornillados a la corredera.

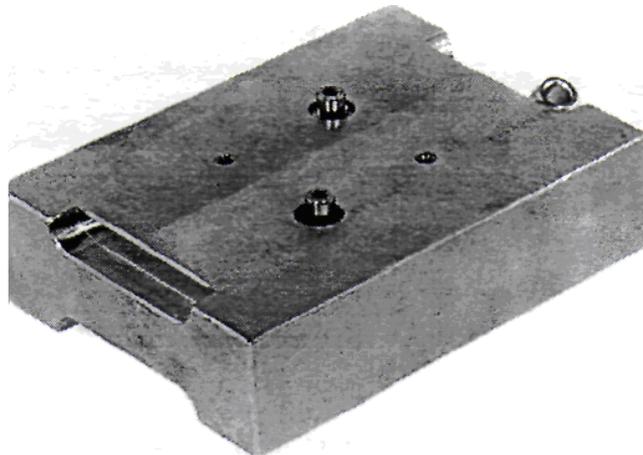


Figura 2.19 Aspecto del peso [1]

## 2.10 Adaptador de tensiones

La forma en la que se comunica el sistema con el PC para darle órdenes de control y para leer señales es a través de una tarjeta de adquisición de datos. Ésta tiene una serie de restricciones de funcionamiento que se explicarán con detalle en el siguiente epígrafe.

La tarjeta de adquisición de datos posee diferentes rangos de tensión para las señales de entrada, siendo el rango comprendido entre  $-5\text{ V}$  y  $+5\text{ V}$  el que mejor se adapta a las condiciones de funcionamiento de nuestra plataforma. A simple vista, este hecho no parece tener mayor relevancia pero si nos fijamos en el rango de tensiones que ofrece el potenciómetro lineal a la salida vemos que su rango es de  $0\text{ V}$  a  $10\text{ V}$ . Por tanto, si queremos leer señales del potenciómetro deberemos implementar un circuito que reste  $5\text{ V}$  a la salida del potenciómetro para adaptarse al rango de tensiones de lectura de la tarjeta de adquisición de datos.

### 2.10.1 Esquema propuesto

El circuito propuesto, se muestra en la Figura 2.20:

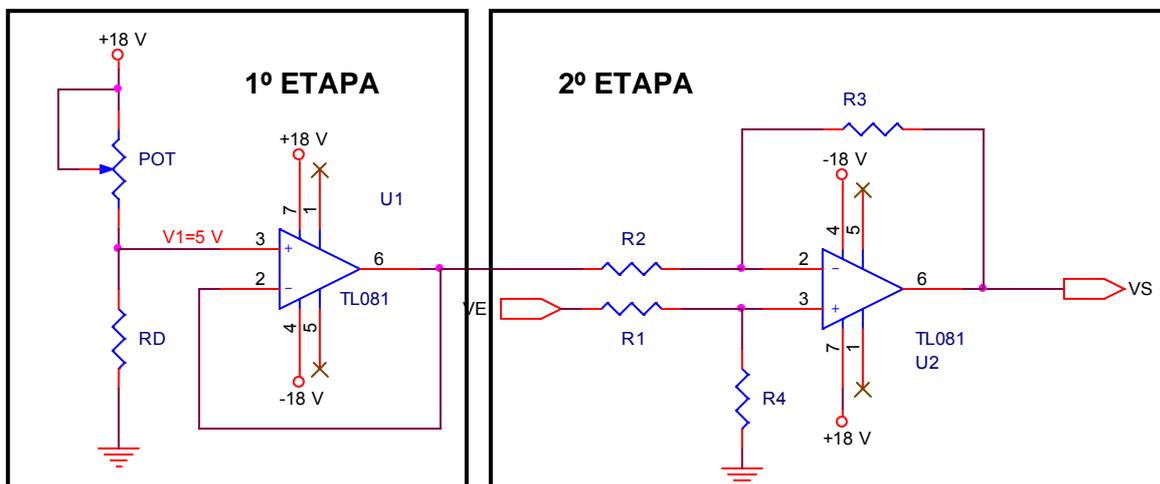


Figura 2.20 Circuito propuesto para el adaptador de tensiones

El circuito posee dos etapas bien diferenciadas. La primera de ellas tiene la función de obtener  $5\text{ V}$  a partir de los  $18\text{ V}$  con los que se alimentan los amplificadores operacionales. Para ello se ha desarrollado un simple divisor de tensión. Los valores de  $R_D$  y  $POT$  se calculan según (1):

$$V_1 = \frac{V_{cc}}{R_d + POT} \cdot POT \quad (1)$$

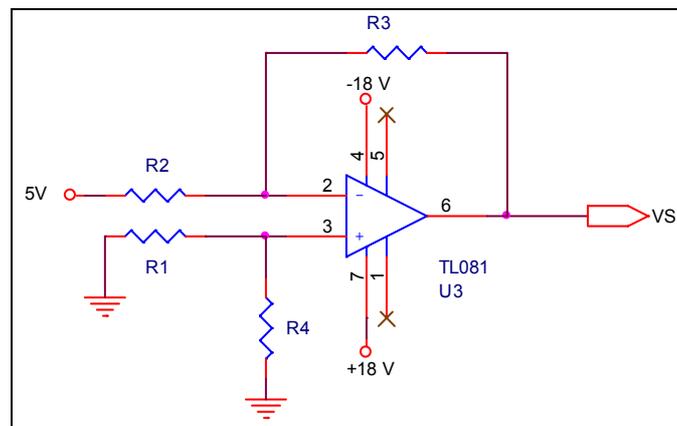
Definiendo los valores de  $V_1$  y  $V_{cc}$  con  $5\text{ V}$  y  $18\text{ V}$  respectivamente, obtenemos la relación mostrada en (2):

$$\frac{R_D}{POT} = 2.6 \quad (2)$$

Si se fija el valor  $R_D$  a  $1K\Omega$ , obtenemos el valor de POT, siendo este de  $2.6 K\Omega$ . La función del amplificador operacional consiste en aislar una etapa de la otra.

La segunda etapa es la encargada de restar los 5 V obtenidos en la etapa anterior. Para llevarlo a cabo, se ha diseñado un circuito restador donde la señal a restar se conecta al pin  $V_E$  mientras que la señal restada se obtiene en el pin  $V_S$ . Si aplicamos el teorema de superposición debemos tener en cuenta la aportación de cada entrada por separado, por ello cortocircuitaremos una entrada y estudiaremos el efecto que tiene la entrada restante sobre la salida.

Si analizamos la contribución de la tensión de 5 V y cortocircuitamos la señal de entrada, el circuito resultante se muestra en la Figura 2.21:



**Figura 2.21 Circuito cortocircuitando la señal  $V_e$**

Siendo la ecuación (3) la que lo describe:

$$V_s = -\frac{R_3}{R_2} \cdot 5 \quad (3)$$

Si analizamos la contribución de la tensión de entrada y cortocircuitamos la señal de 5 V, el circuito queda como se representa en la Figura 2.22:

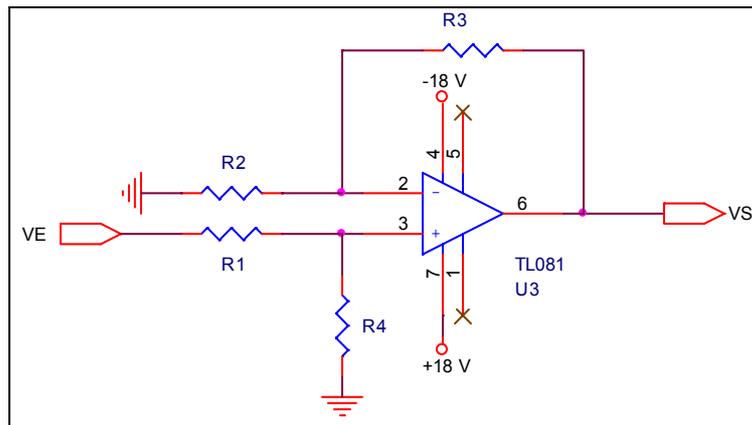


Figura 2.22 Circuito cortocircuitando la señal 5 V

Siendo (4) la expresión que lo describen (4):

$$V_s = \frac{(R_2 + R_3)}{(R_1 + R_4)} \cdot \frac{R_4}{R_2} \cdot V_E \quad (4)$$

Si sumamos (3) y (4), obtenemos que la salida del sistema total es (5):

$$V_s = -\frac{R_3}{R_2} \cdot 5 + \frac{(R_2 + R_3)}{(R_1 + R_4)} \cdot \frac{R_4}{R_2} \cdot V_E \quad (5)$$

No se requiere que la señal de salida experimente ningún tipo de ganancia, simplemente que la señal de salida sea 5 V menor que la señal de entrada, por lo que buscaremos que los coeficientes que multiplican a 5 V y a  $V_E$  sean la unidad. Según (6), las relaciones nos quedan:

$$\begin{aligned} \frac{R_3}{R_2} &= 1 \\ \frac{(R_2 + R_3)}{(R_1 + R_4)} \cdot \frac{R_4}{R_2} &= 1 \end{aligned} \quad (6)$$

Si fijamos, por ejemplo, que el valor de  $R_3$  y de  $R_4$  sea de  $1\text{K}\Omega$ , obtenemos que el valor de las demás resistencias es de un  $1\text{K}\Omega$ . En (7) se muestran los valores de todas las resistencias que intervienen en el circuito.

$$\begin{aligned}R_1 &= 1K\Omega \\R_2 &= 1K\Omega \\R_3 &= 1K\Omega \\R_4 &= 1K\Omega \\R_D &= 1K\Omega \\POT &= 2.6K\Omega\end{aligned}\tag{7}$$

Si sustituimos los valores de (7) en (5) las resistencias, la relación entre la entrada y la salida del adaptador de tensiones nos queda según (8):

$$V_s = V_E - 5\tag{8}$$

### 2.10.2 Simulación del adaptador de tensiones

La lectura y escritura de las señales utilizadas para verificar el funcionamiento del adaptador de tensiones se ha hecho a través de la tarjeta de adquisición de datos que se ha utilizado en el transcurso del trabajo. La tarjeta se explicará con detalle en el siguiente epígrafe. La señal de excitación se ha generado a través de la Toolbox de simulación de sistemas (Simulink) que proporciona MATLAB.

En la Figura 2.23 se muestra el funcionamiento del adaptador de tensiones. En (a) se muestra la señal de entrada con la que se pretende verificar el funcionamiento del adaptador. Esta señal pretende abarcar todo el rango de tensiones que ofrece el potenciómetro a su salida, por lo que se ha elegido una señal con valores comprendidos entre 0 V y 10 V y, arbitrariamente, una frecuencia de 1 Hz. La forma de señal senoidal también se ha elegido al azar ya que se podría haber utilizado una señal cuadrada o triangular.

En (a) se muestra la señal de entrada al adaptador, mientras que en (b) y (c) se muestran las señales que obtendríamos utilizando adaptador y en ausencia del mismo respectivamente. Como puede verse en (c), no se realiza la resta de 5 V y se pierde la parte de señal comprendida entre 5 V y 10 V ya que la tarjeta no puede leer en ese rango de tensiones. Por otro lado, en (b) se muestra la señal completa, ya que en este caso sí se resta la señal (a) para poder adaptarla a todo el rango de lectura de la tarjeta de adquisición de datos.

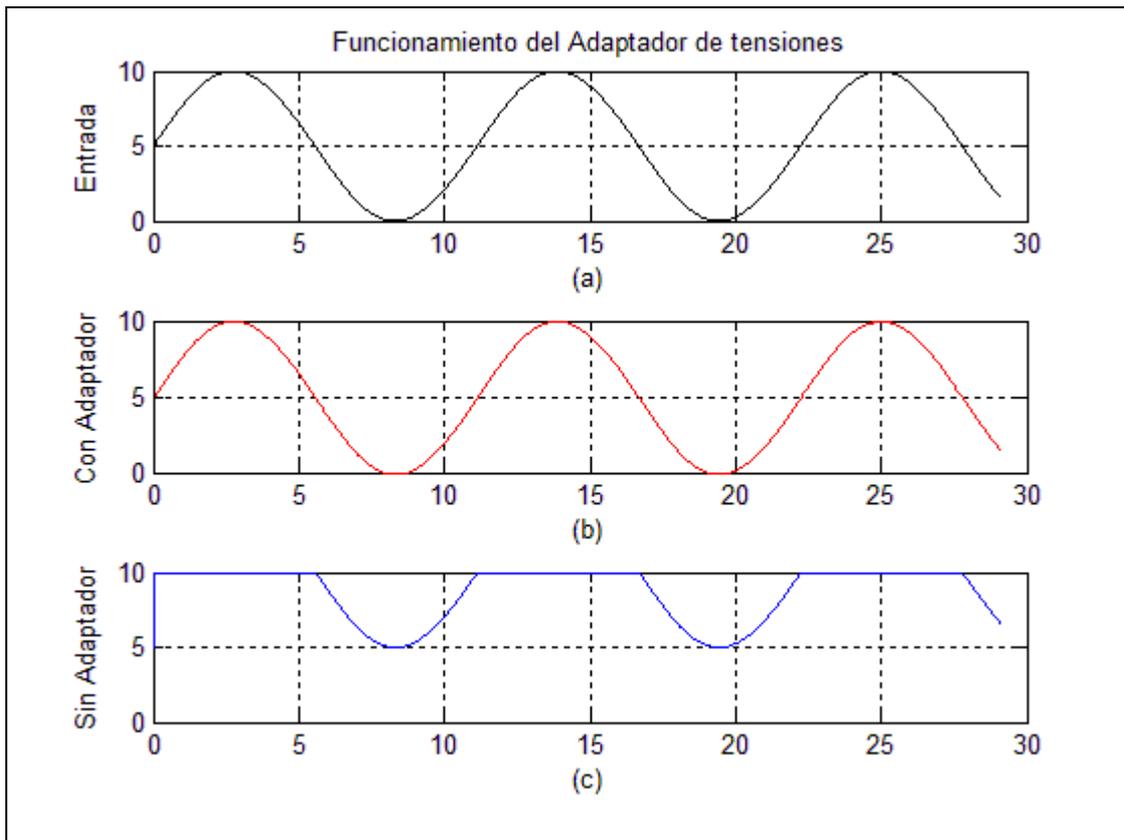


Figura 2.23 Simulación del funcionamiento del adaptador de tensiones

### 2.10.3 Conexionado

La tarjeta tiene tres grupos diferentes de señales: la entrada, la salida y la alimentación. La Tabla 2.4 muestra la forma en la que se conecta el adaptador.

Señal	Conexiones	Clavija
Entrada	Señal entrada	Rojo
	Masa	Negro
Salida	Señal salida	Rojo
	Masa	Negro
Alimentación	18V	Marrón
	-18V	Rojo
	Masa	Amarillo

Tabla 2.4 Conexionado del adaptador de tensiones

El aspecto físico que tiene la tarjeta tras soldarla y probarla es el mostrado en la Figura 2.24. Se han fijado unas etiquetas para facilitar la conexión de la misma a la tarjeta de adquisición de datos y al potenciómetro.

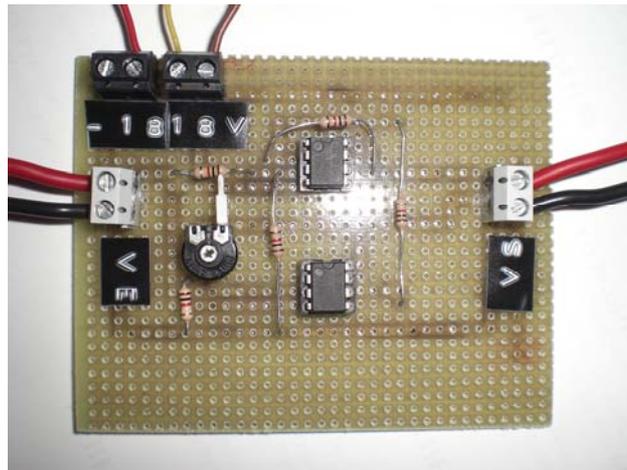


Figura 2.24 Aspecto del adaptador de tensiones

## 2.11 Tarjeta de adquisición de datos: PCL 818

La PCL 818 es un dispositivo capaz de leer y escribir señales analógicas y digitales a través de una computadora. Durante todo el trabajo se han utilizado únicamente señales analógicas.

### 2.11.1 Creación de un diseño

Para crear una aplicación que se comunique con el hardware exterior a través de la PCL 818 se comienza del mismo modo que si se tratase de cualquier trabajo de Simulink. Se puede utilizar cualquiera de los bloques estándar que contiene la biblioteca de Simulink y además se pueden añadir módulos de entrada/salida usando bloques controladores de entrada/salida (I/O Driver Blocks).

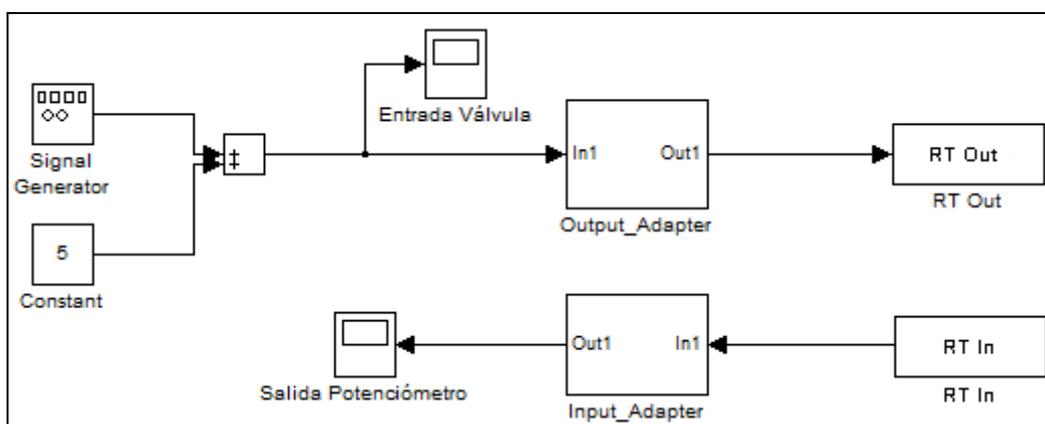


Figura 2.25 Esquema ejemplo de creación de un modelo

La Figura 2.25 es un ejemplo en el que intervienen estos bloques. El esquema escribe en un canal de salida una señal cuadrada por medio de un bloque RT Out y se lee por un canal de entrada a través de un bloque RT In. Los bloques “Output\_Adapter” e “Input\_Adapter” tienen la función, a grandes rasgos, de corresponder la señal tratada en el esquema con la señal leída o escrita real. Estos bloques se explicarán en posteriores epígrafes con detalle.

## 2.11.2 Configuración

Según se ha comentado anteriormente, los bloques controladores pueden ser de dos tipos: RT In (entrada) o RT Out (salida) y se encuentran en la biblioteca Rtwilib de Simulink. Existe otro bloque cuya función es indicar a MATLAB cual es el driver específico para la tarjeta que se está utilizando y establecer la configuración de dicha tarjeta. Este bloque se denomina ADAPTER.

### 2.11.2.1 Configuración del bloque ADAPTER

El bloque ADAPTER es un bloque especial que no se conecta a ningún otro bloque. Cuando se adjunta al fichero Simulink por primera vez aparece en color rojo. Esto es debido a que aún no está configurado. Una vez que se han hecho las configuraciones pertinentes éste pasa a color negro. Para comenzar a configurarlo, se hace doble clic sobre él cuando aún está en rojo. Una vez hecho el doble clic, aparece un cuadro de diálogo que nos indica que seleccionemos el driver para la tarjeta. La Figura 2.26 muestra este cuadro de diálogo.

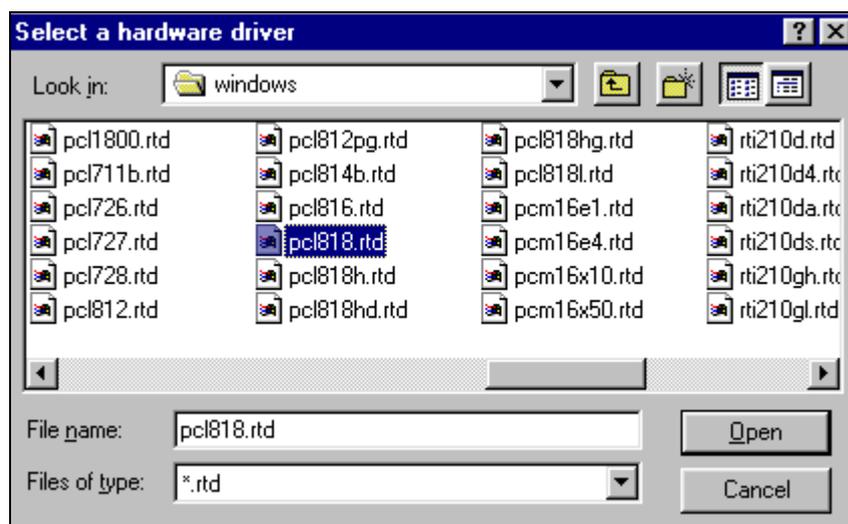


Figura 2.26 Ventana de selección del driver

Ahora, seleccionamos el driver que se corresponde con nuestra tarjeta, en nuestro caso el 'pcl818.rtd'. Una vez que se ha seleccionado un driver concreto, pulsamos 'Open' y aparece un nuevo cuadro de diálogo, Figura 2.27, específico de la tarjeta que se va a utilizar.

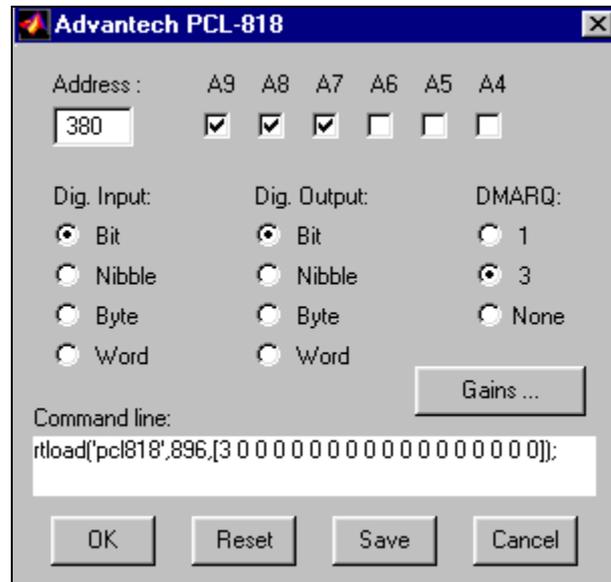


Figura 2.27 Ventana de parámetros de configuración

Aquí se debe configurar la dirección base de la tarjeta señalando a través de tics las etiquetas A4 – A9. La función del bloque DMARQ es gestionar el acceso directo a la memoria y el fabricante por defecto lo selecciona a valor 3. También se debe indicar si la lectura digital se va a realizar por separado o agrupando canales para formar 4 bits (nibble), 8 bits (byte) o 16 bits (word).

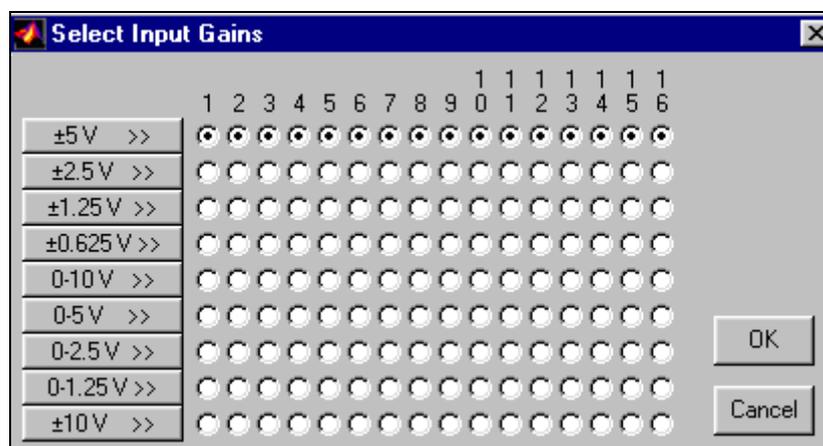


Figura 2.28 Ventana de selección de ganancias

La función de 'Gains' es configurar las ganancias de cada uno de los 16 canales. Al pulsar 'Gains', aparece la siguiente ventana mostrada en la Figura 2.28.

La tarjeta dispone de 16 canales de entrada referenciados a masa u 8 canales diferenciales con 5 ganancias configurables por software. Estas ganancias se deben configurar según el rango de tensión que se vaya a leer. En nuestro caso leeremos los valores que proporciona el potenciómetro, por tanto, el rango está comprendido entre 0 V y 10 V. Observando la Tabla 2.5 vemos que el único rango que cubre los 10 V del potenciómetro es [-5 V, 5 V] ya que [-2.5 V, 2.5 V] no cubre por completo y el [-10 V, 10 V] lo sobrepasa. Los rangos de tensión según la configuración de las ganancias se muestran en la Tabla 2.5:

Ganancias	Rango lectura
x0.5	[-10, 10]
x1	[-5, 5]
x2	[-2.5, 2.5]
x4	[-1.25, 1.25]
x8	[-0.625, 0.625]

Tabla 2.5 Ganancias y rangos de lectura

Una vez que se han configurado todos los parámetros, se pulsa 'OK' y el bloque ADAPTER pasa a color negro.

### 2.11.2.2 Configuración del bloque RT In

Este bloque posee exclusivamente tres parámetros de configuración. El primero de ellos es el tiempo de muestreo, éste debe coincidir con el periodo de muestro que se haya configurado en los parámetros de simulación del esquema Simulink.

El segundo parámetro pide especificar a que bloque ADAPTER está asociado el bloque y el último indica el canal que se va a utilizar. Los canales analógicos están numerados desde el canal 1 hasta el canal 16 que es el máximo de canales analógicos de los que dispone la tarjeta. Durante el trabajo se van a necesitar como máximo 2 entradas analógicas por lo que cada parámetro 'Adapter chanel' del bloque RT In que se utilice se numerará con 1 o 2.

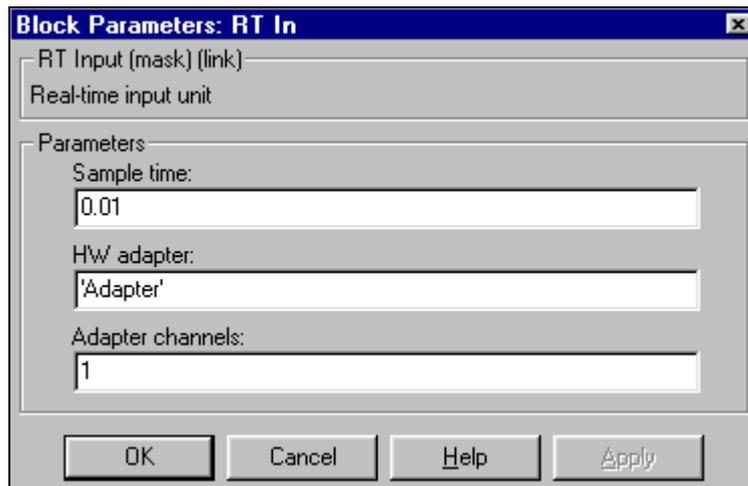


Figura 2.29 Ventana de configuración del bloque RT In

### 2.11.2.3 Configuración del bloque RT Out

El procedimiento de configuración de este bloque es muy similar al anterior. Existen también tres parámetros que representan lo mismo que anteriormente: el tiempo de muestro, el bloque ADAPTER al que está asociado y los canales de salida que se van a utilizar. Al utilizar un único bloque de escritura basta con configurar el bloque 'Adapter Chanel' a 1. La Figura 2.30 muestra como se ha configurado este bloque.

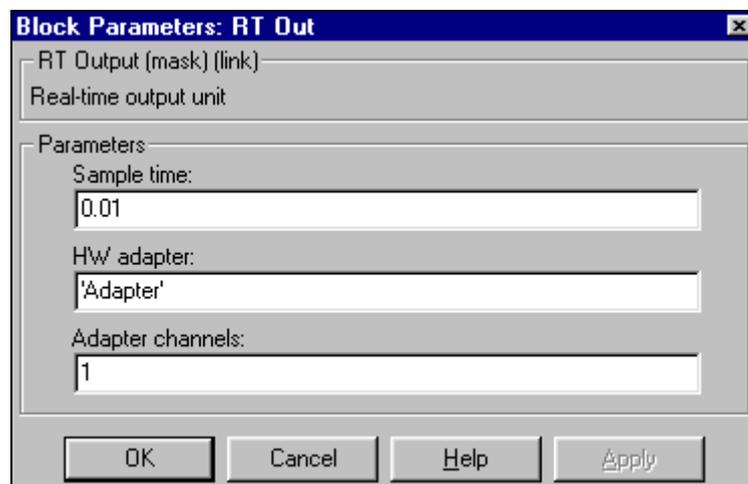


Figura 2.30 Ventana de configuración del bloque RT Out

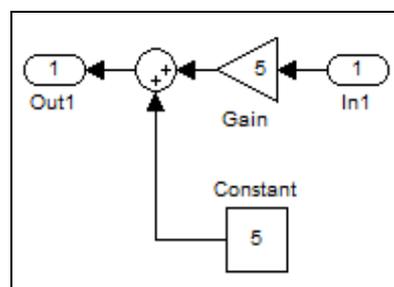
### 2.11.2.4 Escalado de señales

La tarjeta de adquisición de datos trabaja internamente con una convención de rangos normalizados para los bloques RT In y RT Out. Esto implica que la propia PCL 818 le aplica un factor que reduce la tensión de las señales para trabajar con rangos de voltaje reducidos. En nuestro caso está configurada para que trabaje con rangos de

entrada entre  $[-5 \text{ V}, 5 \text{ V}]$  por lo que internamente la tarjeta reducirá este rango a  $[-1 \text{ V}, 1 \text{ V}]$  dividiendo la entrada entre 5.

Para llevar el valor leído por parte de RT In a cualquier bloque de Simulink y que se corresponda con el valor real que ha llegado al bornero de la tarjeta de adquisición de datos, debemos deshacer la reducción de rango que ha hecho internamente la PCL 818 haciendo un escalado de la señal, que consiste en multiplicar por 5 la señal leída del bloque RT In.

Según se comentó en el adaptador de tensiones de la sección 2.10 del presente capítulo, el rango de tensiones del potenciómetro está comprendido entre  $[0 \text{ V}, 10 \text{ V}]$  y para poder adaptarlo al rango de entrada de la tarjeta de adquisición de datos se restó la señal 5 V pasándolo a  $[-5 \text{ V}, 5 \text{ V}]$ . Pues bien, para poder trabajar con la misma señal que nos proporciona el potenciómetro con los bloques del esquema Simulink debemos deshacer la resta que se hizo por hardware sumando 5 V por software una vez hecho el escalado de la señal de entrada. La Figura 2.31 muestra el esquema del escalado de entrada, esta figura se ha obtenido de descender un nivel en el bloque 'Input\_Adapter' que se visualiza en la Figura 2.25.



**Figura 2.31 Esquema del escalado de la señal de entrada**

El bloque de salida analógica se trata del mismo modo. El rango de entrada al bloque debe estar comprendido entre  $[-1 \text{ V}, 1 \text{ V}]$  para que se corresponda con la configuración de la tarjeta, que está configurada entre  $[-5 \text{ V}, 5 \text{ V}]$ . Por este motivo, el bloque escalado a la salida debe restar 5 V y multiplicarlo por 0.2. La Figura 2.32 muestra el 'Output\_Adapter' contenido en la Figura 2.25.

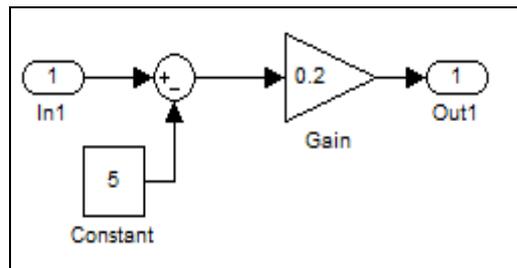


Figura 2.32 Esquema del escalado de la señal salida

### 2.11.3 Conexionado

De la tarjeta de adquisición de datos se disponía de un bornero que facilitaba el conexionado, éste etiqueta a las entradas con la letra B y a las salidas con la letra A, el aspecto del bornero se muestra en Figura 2.33. La Tabla 2.6 muestra las conexiones entre el bornero de la PCL 818 y la plataforma.

Entrada/Salida	PCL 818	Conexión Plataforma
Entrada	B1	Negro Potenciómetro
	B2	Blanco Potenciómetro y Blanco Sensor de Presión
	B3	Negro Sensor de presión
Salida	A4	Negro válvula proporcional
	A5	Blanco válvula proporcional

Tabla 2.6 Conexionado de la PCL 818

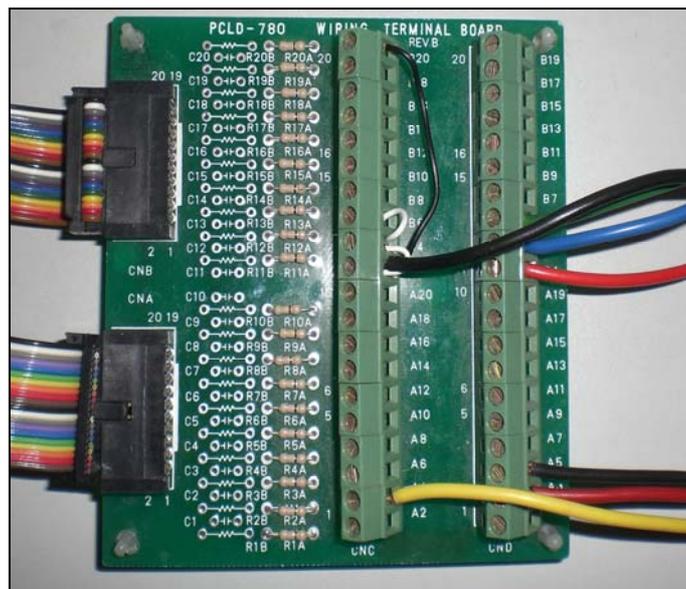


Figura 2.33 Aspecto del bornero de la PCL 818

## 3 Identificación del sistema

### 3.1 Introducción

La identificación de un sistema consiste en obtener cuál es el modelo matemático que determina la relación entre la salida y la entrada. Si se realiza experimentalmente y de forma discreta, tal y como se hará en el desarrollo del trabajo, consiste en la obtención de los parámetros  $a_i$  y  $b_i$  a partir de las señales  $u_i$  e  $y_i$ , de la ecuación:

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_m u(k-m) \quad (9)$$

Resulta fundamental tener en cuenta que en la dinámica de un cilindro neumático intervienen una enorme cantidad de no linealidades que alteran sensiblemente su modelo. Éstas hacen que sea complicado obtener un modelo que se comporte exactamente igual que el sistema real, por lo que trataremos con modelos aproximados.

En el trabajo se han realizado una batería de pruebas experimentales con el objetivo de identificar la función de transferencia que mejor representa el comportamiento dinámico y en régimen permanente del sistema con la premisa de conseguir un modelo de orden reducido para evitar así perder el sentido físico del mismo.

La identificación se ha realizado a través de una Toolbox de MATLAB especializada en la identificación de sistemas. Esta Toolbox se denomina Ident. Permite obtener modelos continuos o discretos con número de polos y ceros configurables por el usuario. En la parte de identificación en lazo cerrado se explica cómo se ha utilizado esta herramienta.

### 3.2 Identificación en lazo abierto

Para la identificación en lazo abierto se excita la plataforma completa a través de la válvula proporcional y se lee el valor que da el potenciómetro a su salida. El modelo que obtengamos incluirá todos los elementos del sistema debido a que se excita a su

entrada y se lee a su salida. En Figura 3.1 se muestra un diagrama de bloques de la identificación en lazo abierto.



Figura 3.1 Diagrama de bloques de la identificación en lazo abierto

### 3.2.1 Esquema Simulink

Se excita la válvula proporcional a través de una entrada escalón de 6 V y se mide la respuesta que proporciona la plataforma a través del potenciómetro. El motivo de excitar con 6 V se debe a que la válvula proporcional posee una zona muerta comprendida entre los 0 V y los 5 V aproximadamente.

Tras varias pruebas sobre la plataforma se comprobó que la tensión de 6 V era el mínimo para conseguir que la masa experimentase movimiento, ya que, además de la zona muerta, también hay que superar la fricción de la masa con los cilindros del actuador lineal. La Figura 3.2 muestra el esquema desarrollado.

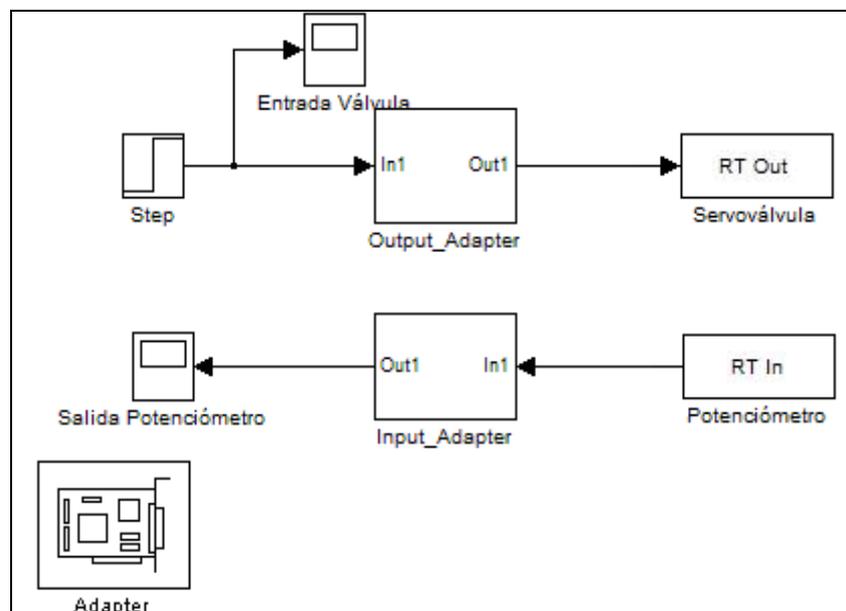


Figura 3.2 Esquema de la identificación en lazo abierto

### 3.2.2 Resultados

Las señales leídas del proceso de identificación en lazo abierto se muestran en la Figura 3.3. Se exponen la entrada aplicada a la válvula proporcional y la salida de la plataforma a través del potenciómetro.

En la parte experimental de la identificación se observa que la masa no se detiene en una posición intermedia y que el movimiento del peso consiste en desplazarse desde un tope al otro. El problema de este hecho es que no se aprecia la dinámica real del sistema ni se visualiza como frena el peso cuando se le pide que se posicione en un lugar concreto, por lo que si identificásemos con estos datos no obtendríamos un modelo fiable.

Para poder visualizar por completo el comportamiento debemos conseguir que éste se detenga en una posición intermedia, sin llegar a saturar mecánicamente la salida del sistema. Para ello, es necesario cerrar el lazo de control, por lo que pasamos a identificar en lazo cerrado.

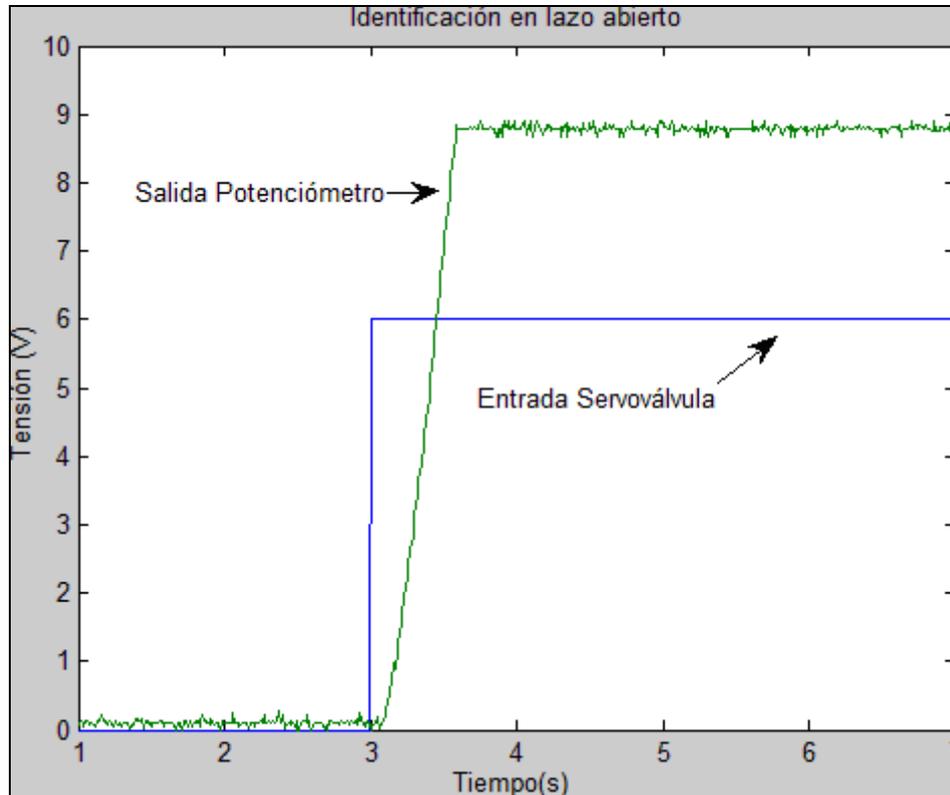


Figura 3.3 Señales obtenidas de la identificación en lazo abierto

Al analizar la Figura 3.3 se puede pensar que la señal de salida no llega a los 10 V que se han comentado anteriormente y que aproximadamente se queda en unos 8.8 V. Este hecho se debe, a que la plataforma posee unos topes que imposibilitan al potenciómetro a moverse libremente y así cubrir todo el rango posible. En la parte de identificación este hecho no resulta relevante pero en la parte de control de la plataforma hay que tener presente que la masa sólo se podrá llevar a posiciones que estén dentro del rango que va de 0 V a 8.8 V

### 3.3 Identificación en lazo cerrado

Una vez cerrado el lazo la masa se detiene. Ahora, podemos obtener un modelo que represente a la plataforma sin el problema anterior. En esta parte, se muestran las estrategias y resultados obtenidos en cada prueba sobre la plataforma en lazo cerrado.

A medida que las pruebas han proporcionado resultados se modificaba la excitación para obtener respuestas que proporcionasen resultados fácilmente analizables y fiables. El esquema genérico seguido durante esta estrategia de identificación se muestra en la Figura 3.4

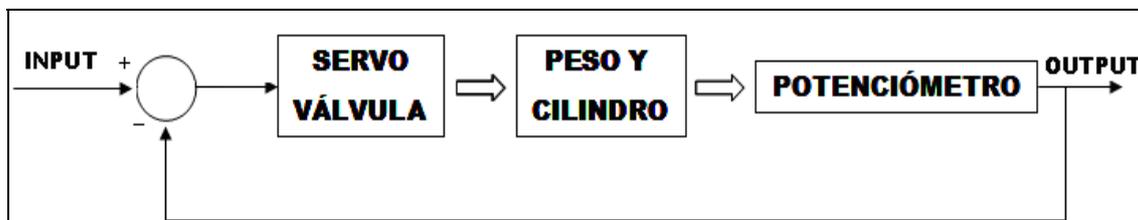


Figura 3.4 Diagrama de bloque de la identificación en lazo cerrado

#### 3.3.1 Identificación en lazo cerrado con escalón

En este caso, al igual que en la identificación en lazo abierto, excitaremos al sistema a través de un escalón, pero esta vez, será de 10 V en lugar de 6 V para asegurar que la masa experimenta un desplazamiento considerable.

##### 3.3.1.1 Esquema Simulink

El lazo se cierra en el esquema Simulink según muestra la Figura 3.5. En este esquema se aprecian diferencias con respecto al de la Figura 3.2, la primera de ellas es el sumador que se encarga de cerrar el lazo y la segunda es que existe otro bloque Input\_Adapter y otro bloque RT In. Este nuevo bloque RT In tiene la función de leer la

tensión que proporciona el sensor de presión tras transformar éste la presión que lee de la VIA 4 de la válvula proporcional a tensión. En la Figura 2.1 se puede apreciar dónde está situado el sensor de presión en esta estrategia de identificación.

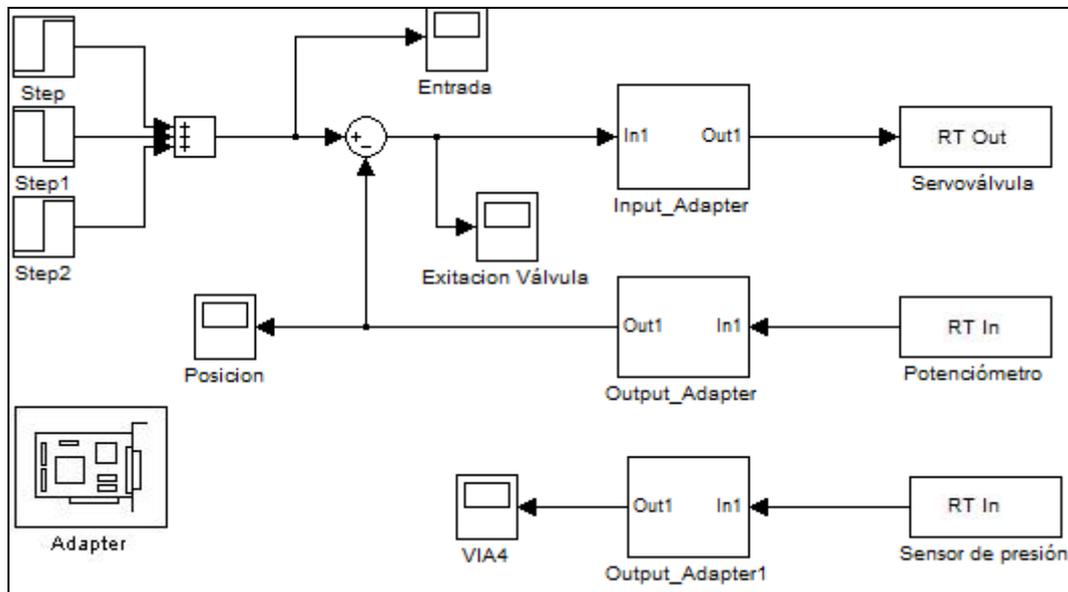


Figura 3.5 Esquema identificación en lazo cerrado con escalón

Para obtener el modelo total del sistema, se optó por modelar la válvula proporcional por un lado y, por otro, modelar el conjunto peso – actuador – potenciómetro. La fundamental ventaja de esta forma de identificación es la portabilidad que se consigue de los elementos que intervienen en el sistema, además del conocimiento que se adquiere de cada parte.

### 3.3.1.2 Modelo de la válvula proporcional

El modelo de la válvula proporcional se obtuvo realizando pruebas experimentales sobre ella. Se excitaba a través de una fuente de alimentación variable y se leía la presión que proporcionaban las VIA 2 y VIA 4 a través de un manómetro. La excitación se realizó aplicando pequeños incrementos de tensión desde 0 V hasta 10 V. La válvula de mantenimiento está ajustada a 6 bares por lo que ésta será la presión máxima que se leerá en los manómetros. La Tabla 3.1 muestra los resultados obtenidos.

En la sección correspondiente a la válvula proporcional del capítulo 2 se expusieron una serie de características, una de ellas fue que presentaba una histéresis del 0.3%. Para comprobar que esta histéresis no plantea problemas en la obtención del modelo,

se optó por leer presión cuando aplicamos tensión de 0 V a 10 V (subiendo) y de 10 V a 0 V (bajando).

VIA 2				VIA 4			
SUBIENDO TENSIÓN		BAJANDO TENSIÓN		SUBIENDO TENSIÓN		BAJANDO TENSIÓN	
V	P	V	P	V	P	V	P
3,00	6,00	7,00	0,00	3,00	0,00	7,00	6,00
4,40	6,00	6,50	0,00	4,00	0,00	6,50	6,00
4,50	5,85	6,00	0,00	4,50	0,50	6,00	6,00
4,60	5,75	5,90	0,00	4,60	1,25	5,70	6,00
4,70	5,37	5,80	0,00	4,70	2,25	5,60	6,00
4,80	5,00	5,70	0,38	4,80	2,75	5,50	5,38
4,90	4,75	5,60	1,13	4,90	3,25	5,40	5,00
5,00	4,25	5,50	2,13	5,00	3,50	5,30	4,63
5,10	4,00	5,40	2,75	5,10	4,00	5,20	4,25
5,20	3,75	5,30	3,25	5,20	4,25	5,10	4,00
5,30	3,25	5,20	3,50	5,30	4,50	5,00	3,50
5,40	2,75	5,10	4,00	5,40	5,00	4,90	3,25
5,50	2,00	5,00	4,25	5,50	5,25	4,80	2,75
5,60	1,00	4,90	4,75	5,60	5,80	4,70	2,00
5,70	0,25	4,80	5,00	5,70	6,00	4,60	1,25
5,80	0,13	4,70	5,50	5,80	6,00	4,50	0,50
5,90	0,10	4,60	5,75	5,90	6,00	4,40	0,25
6,00	0,00	4,50	6,00	6,00	6,00	4,30	0,00
7,00	0,00	3,00	6,00	7,00	6,00	4,00	0,00
8,00	0,00	2,00	6,00	8,00	6,00	3,00	0,00
9,00	0,00	1,00	6,00	9,00	6,00	1,00	0,00

**Tabla 3.1 Datos experimentales de la válvula proporcional**

En este caso, la válvula proporcional posee unas desviaciones muy pequeñas por lo que se puede tratar con un mismo modelo si se sube o se baja tensión. La Figura 3.6 muestra los valores de la Tabla 3.1 sobre una gráfica, de esta forma se aprecia con mayor facilidad el efecto de la histéresis anteriormente citado.

De la Figura 3.6 se pueden sacar una serie de conclusiones. Por un lado, que la válvula proporcional posee zonas muertas y saturaciones y, por otro, que el funcionamiento de cada VIA en el resto de las zonas, que no son muertas ni saturaciones, se puede aproximar a una recta. La pendiente de esa recta se puede calcular por medio de los valores recopilados en la Tabla 3.1. Las pendientes de cada VIA se calculan según las expresiones (10) y (11):

$$K_{VIA2} = \frac{6-0}{6-4.4} = 3.7 \text{ bar/V} \quad (10)$$

$$K_{VIA4} = \frac{6-0}{5.7-4} = 3.5 \text{ bar/V} \quad (11)$$

Las ganancias obtenidas difieren escasamente cuando trabajamos con cada VIA por separado. Esto hace pensar que podemos aproximar a una ganancia media de compromiso que represente a las dos VIAS. Aproximando a un valor intermedio de las dos ganancias, tomaremos el valor de  $K = 3.6 \text{ bar/V}$  para ambas vías.

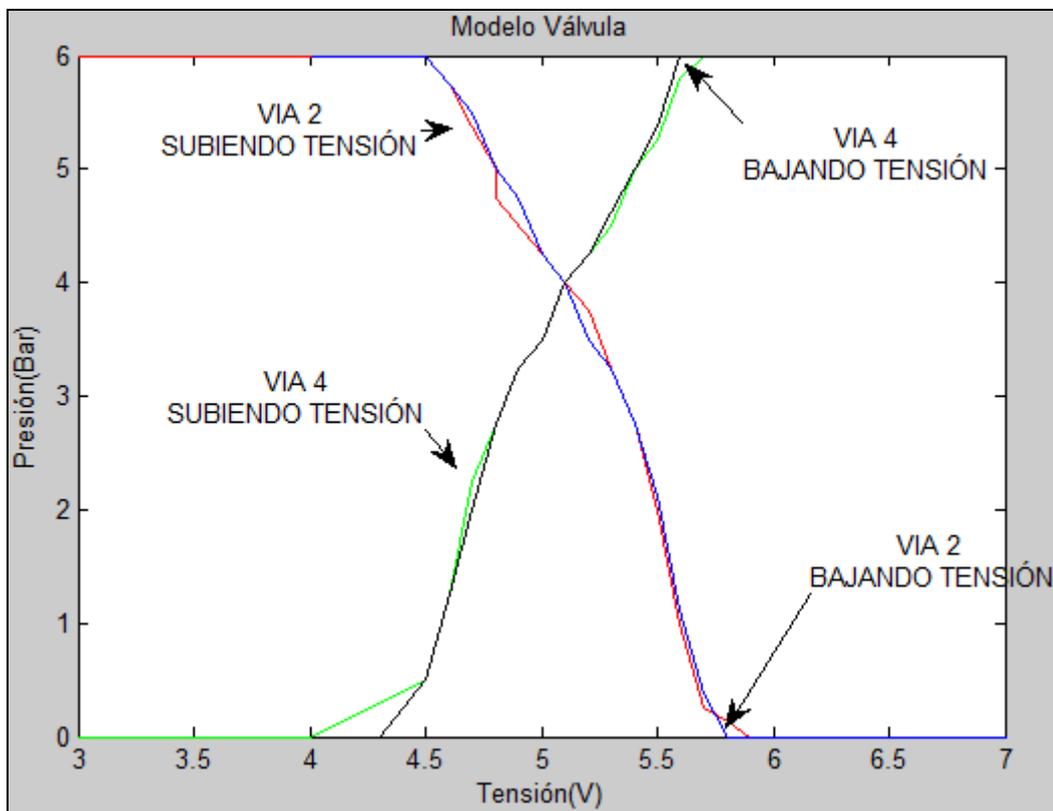
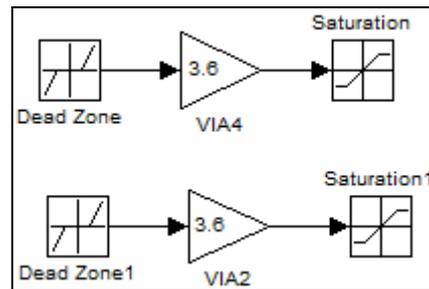


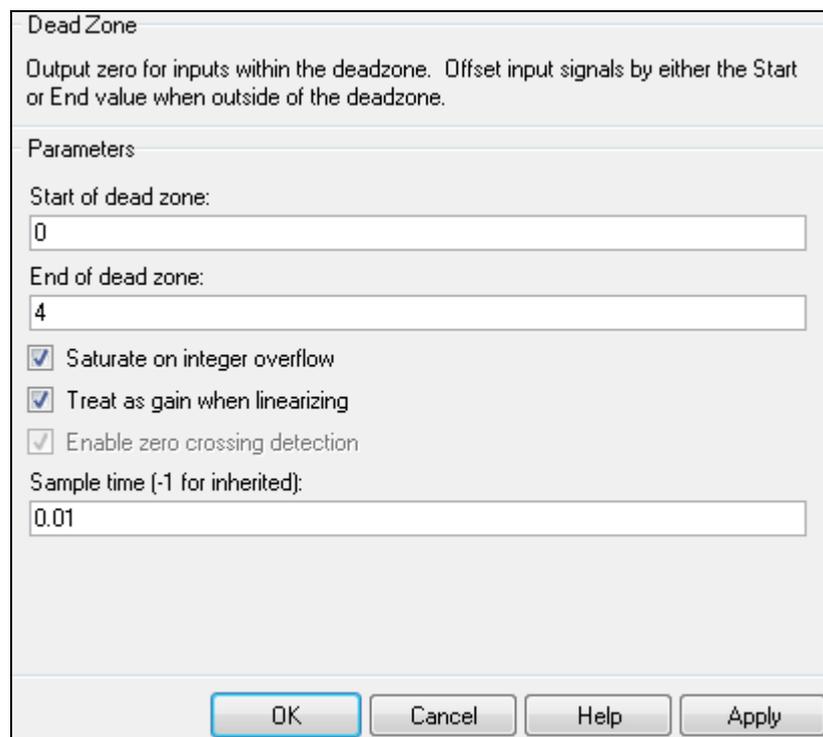
Figura 3.6 Datos experimentales de la válvula proporcional

Las saturaciones y las zonas muertas se pueden modelar a través de bloques de Simulink, por lo que combinando bloques podemos simular el funcionamiento de la válvula proporcional y así verificar el trabajo realizado. El esquema Simulink que modela a la válvula proporcional se muestra en la Figura 3.7



**Figura 3.7 Modelo en Simulink de la válvula proporcional**

La configuración que se ha hecho de la zona muerta correspondiente a la VIA 4 se muestra en la Figura 3.8, como se puede ver en la Tabla 3.1 la válvula proporcional comienza a comunicar aire cuando la tensión de entrada a ésta supera los 4 V. Por ello, se ha establecido que el fin de la zona muerta sea para esa tensión. Es importante tener en cuenta que el tiempo de muestreo que especifiquemos en el bloque debe corresponder con el utilizado en el esquema con el que se han capturado los datos.



Dead Zone

Output zero for inputs within the deadzone. Offset input signals by either the Start or End value when outside of the deadzone.

Parameters

Start of dead zone:  
0

End of dead zone:  
4

Saturate on integer overflow

Treat as gain when linearizing

Enable zero crossing detection

Sample time (-1 for inherited):  
0.01

OK Cancel Help Apply

**Figura 3.8 Configuración de la zona muerta**

La zona muerta de la VIA 2 se configura de la misma forma. Hay que tener en cuenta que en este caso la zona muerta comienza en, aproximadamente, 5.8 V según refleja

la Tabla 3.1. En las simulaciones que se realicen de la plataforma tomaremos únicamente el modelo correspondiente a la VIA 4.

La Figura 3.9 muestra la configuración del bloque saturación. Éste se configura análogamente al anterior, se indica cual es el límite máximo al que se desea que saturate. Se debe configurar el límite superior a la configuración que se haya hecho de la válvula de mantenimiento.

Anteriormente se ha comentado que la válvula de mantenimiento está ajustada a una presión de 6 bares, por lo que éste será el límite máximo para ambas vías. Con el periodo de muestro ocurre lo mismo que en el caso anterior, por ello está configurado de la misma forma. Si trabajásemos con señales continuas deberíamos tener en el periodo de muestro un -1.

Tanto en el bloque saturación como en el bloque de la zona muerta existen otros parámetros adicionales que no se modificarán. Además, en ambos bloques el límite inferior será cero ya que no se aplicarán tensiones de entrada negativas ni tampoco tiene sentido tratar con presiones negativas.

Saturation

Limit input signal to the upper and lower saturation values.

Parameters

Upper limit:  
6

Lower limit:  
0

Treat as gain when linearizing

Enable zero crossing detection

Sample time (-1 for inherited):  
0.01

OK Cancel Help Apply

**Figura 3.9 Configuración de la saturación**

Para verificar el funcionamiento del modelo de la válvula proporcional se ha desarrollado un esquema que simula su funcionamiento (Figura 3.10). Se introduce una rampa y se observa que en el bloque Scope se representan señales aproximadas a las que proporciona la válvula proporcional experimentalmente.

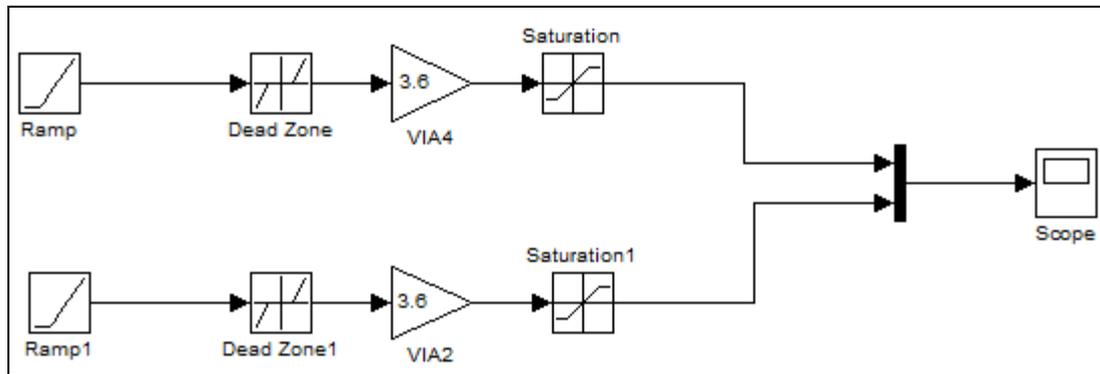


Figura 3.10 Modelo en Simulink de la válvula proporcional

Las señales que aparecen en el Scope de la Figura 3.10 se muestran en la Figura 3.11. Si se comparan con la Figura 3.6 se puede apreciar que el modelo es fiable debido a que ambas gráficas poseen semejanzas notables.

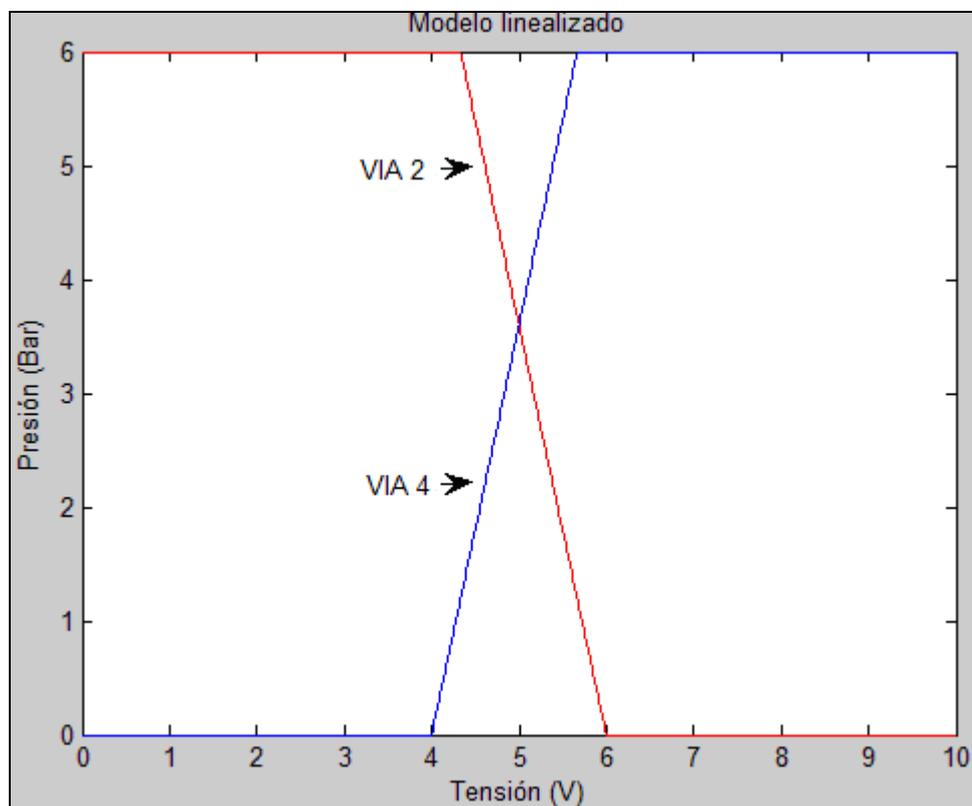


Figura 3.11 Señales obtenidas del modelo Simulink de la válvula proporcional

Es importante resaltar que el modelo de la válvula está linealizado y que se trata de una válvula neumática, por lo que posee los correspondiente problemas de no linealidades característicos de este tipo de sistemas. Estos dos factores hacen que el modelo no se comporte exactamente igual que la válvula física.

Se pensó en modelar a la válvula como un sistema de primer orden para poder así aproximar de mejor forma, pero se desestimó esta opción ya que perderíamos las ventajas que tiene tratar con un bloque ganancia. Además incrementaríamos el orden a la ecuación que describe al sistema completo por lo que incumpliríamos una de las premisas que se fijaron al inicio del trabajo.

### 3.3.1.3 Modelo peso – actuador – potenciómetro

Anteriormente se ha explicado que en el modelo Simulink correspondiente a la identificación en lazo cerrado se ha incluido otro bloque RT In. La finalidad de este bloque es leer la tensión que transforma el sensor de presión a partir de la presión que recibe. La relación entre la presión de entrada y la tensión de salida es uno, por tanto, el voltaje a la salida será del mismo valor que la presión que lee.

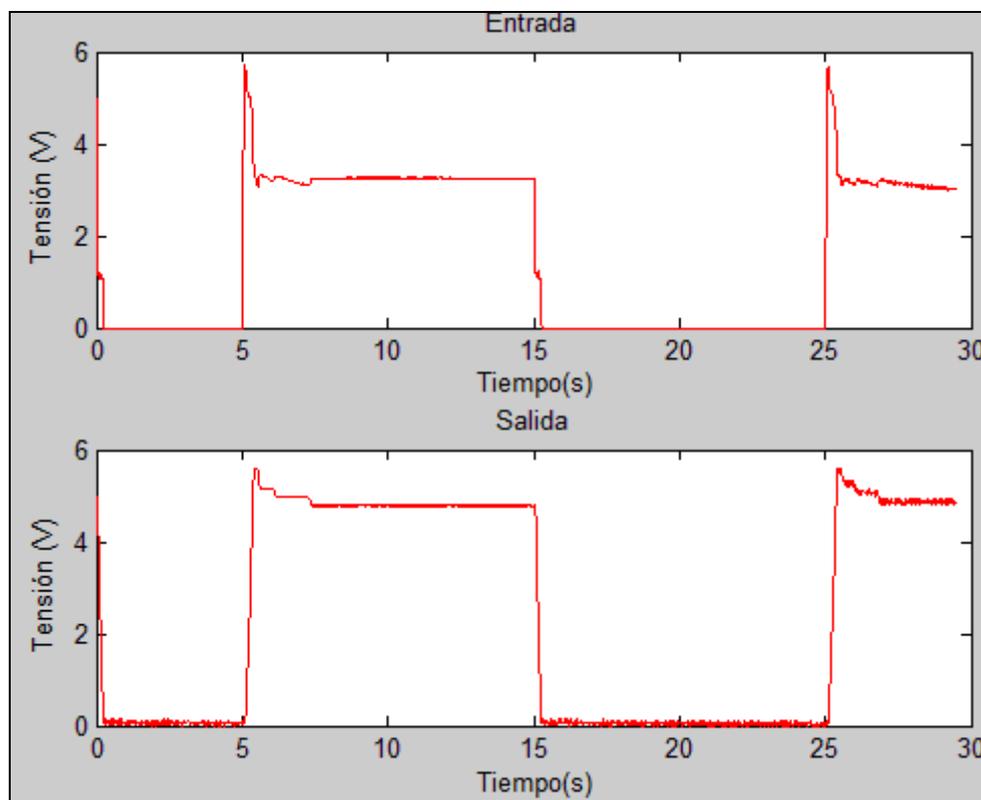
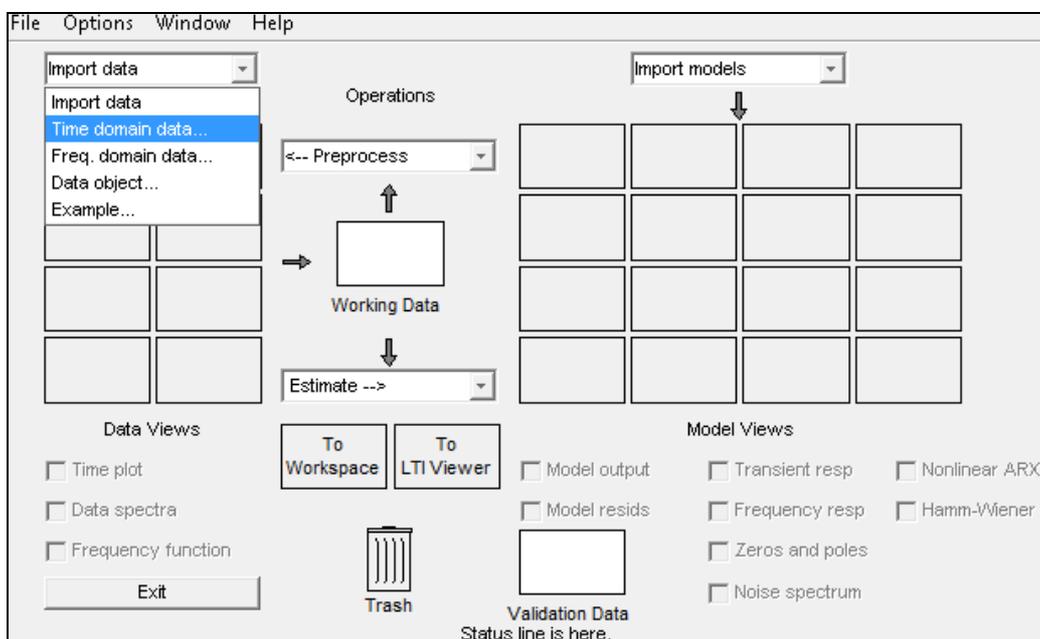


Figura 3.12 Señales utilizadas en la identificación en lazo cerrado del conjunto peso – actuador – potenciómetro

La señal equivalente de la presión se utiliza como entrada para identificar el conjunto peso – actuador – potenciómetro, mientras que como salida se utiliza la señal que se lee del potenciómetro. Estas señales se muestran en la Figura 3.12.

Para identificar el sistema se utiliza la Toolbox de identificación de sistemas Ident. Para arrancar esta herramienta se teclea `ident` desde la línea de comandos de MATLAB, pulsando `intro` aparece la imagen de la Figura 3.13. Desde esta pantalla seleccionamos ‘Time domain data’ para importar los datos de los que se pretende obtener un modelo.



**Figura 3.13 Ventana para importar datos en Ident**

Una vez seleccionada la pestaña ‘Time domain data’, aparece la ventana de la Figura 3.14. En esta ventana se debe indicar las señales de entrada y de salida que se van a utilizar en la identificación. Como input utilizaremos la tensión equivalente a la presión que entra al cilindro a través de la VIA 4 y como output la lectura que se ha hecho del potenciómetro.

El periodo de muestreo conviene que coincida con el periodo de muestro configurado en los parámetros de simulación del esquema utilizado para capturar los datos, ya que si fuese mayor perderíamos información y si fuese menor incrementaríamos el procesamiento innecesariamente. En nuestro caso será de 0.01 seg. También permite definir el nombre para el conjunto de datos correspondientes con la entrada y salida

especificadas como input y output. Una vez parametrizado todo se pulsa 'Import' y se llega a la ventana de la Figura 3.15.

**Data Format for Signals**

Time-Domain Signals

**Workspace Variable**

Input: entradacilc(:,2)  
 Output: salidalc(:,2)

**Data Information**

Data name: mydata  
 Starting time: 1  
 Sampling interval: 0.01  
More

Import
Reset

Close
Help

Figura 3.14 Ventana de señales utilizadas en la identificación

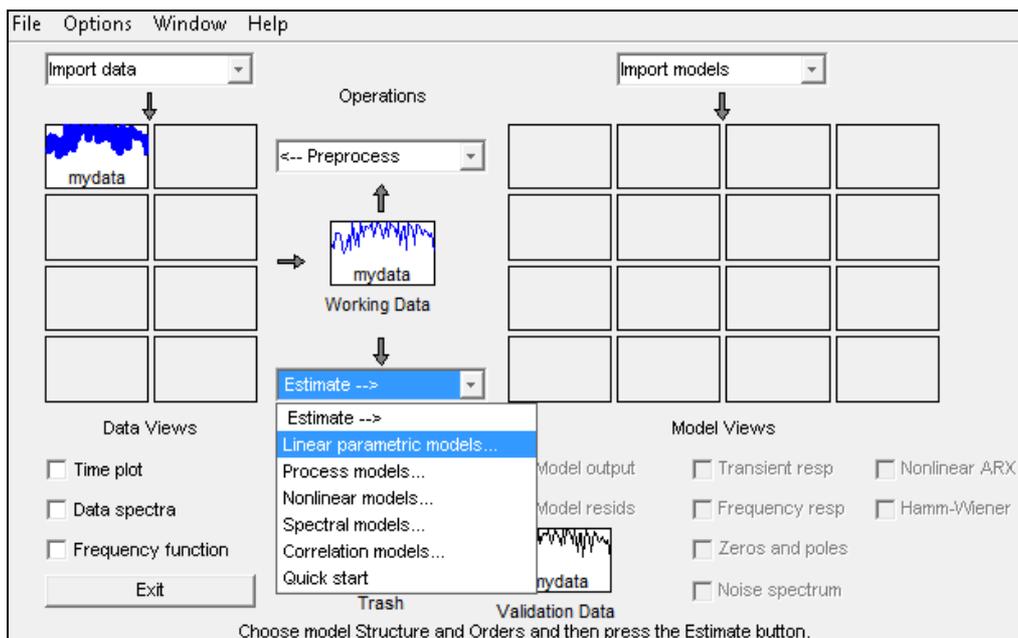
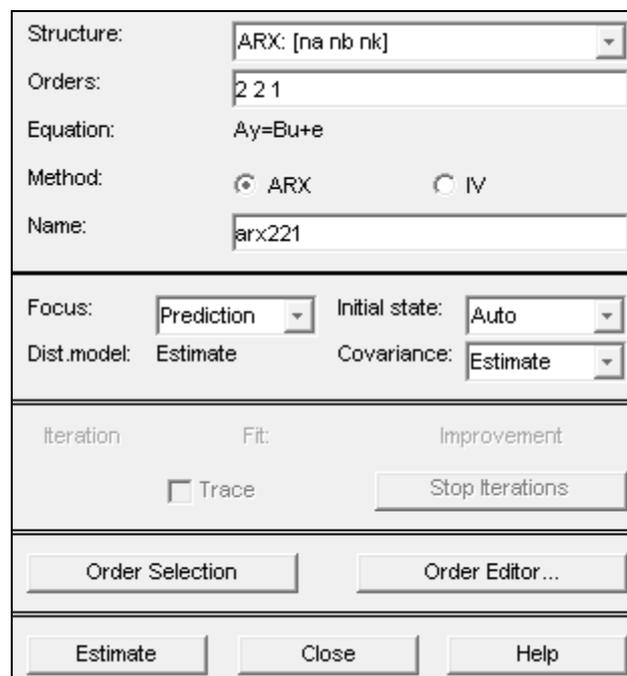


Figura 3.15 Ventana de datos cargados en ident

En la Figura 3.15 aparecen los datos cargados con el nombre de 'mydata', sobre estos datos se pueden realizar un serie de preprocesos como pueden ser un filtrado, transformación de datos, etc... En nuestro trabajo no se hará preprocesado alguno.

Si se pulsa sobre la pestaña 'Estimate' de la Figura 3.15, aparecen todas las posibles estrategias de identificación. Durante todo el trabajo se ha utilizado la 'Linear parametric models'. Si pulsamos sobre 'Linear parametric models' aparece la ventana de la Figura 3.16, en la que se puede configurar la estructura del modelo buscado.



**Figura 3.16 Linear parametric models**

Existen diferentes estructuras para formar el modelo, de todas las posibles se eligieron los modelos ARX. Estos modelos identifican a través del método de mínimos cuadrados, que consisten en calcular los coeficientes  $A(q)$  y  $B(q)$  de la ecuación  $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$ . En el campo 'Orders' se configuran los órdenes de los polinomios  $A(q)$  y  $B(q)$ . Si elevásemos estos ordenes obtendríamos modelos más aproximados. Una vez configurados se pulsa 'Estimate' y nos lleva a la pantalla de la Figura 3.17.

La Figura 3.17 muestra el modelo obtenido a partir de los pasos hechos en las etapas previas. En la parte de 'Model Views' se pueden representar diferentes figuras que muestran características del modelo obtenido. Por ejemplo, se puede representar la

respuesta que obtiene el modelo ante la entrada utilizada para identificar y la proximidad que tiene éste con respecto a la salida real expresada en términos de porcentaje (Figura 3.18), los polos y los ceros que posee, la respuesta en frecuencia a través del diagrama de Bode, etc. Estas gráficas se pueden ver o cerrar haciendo un simple clic en la casilla correspondiente.

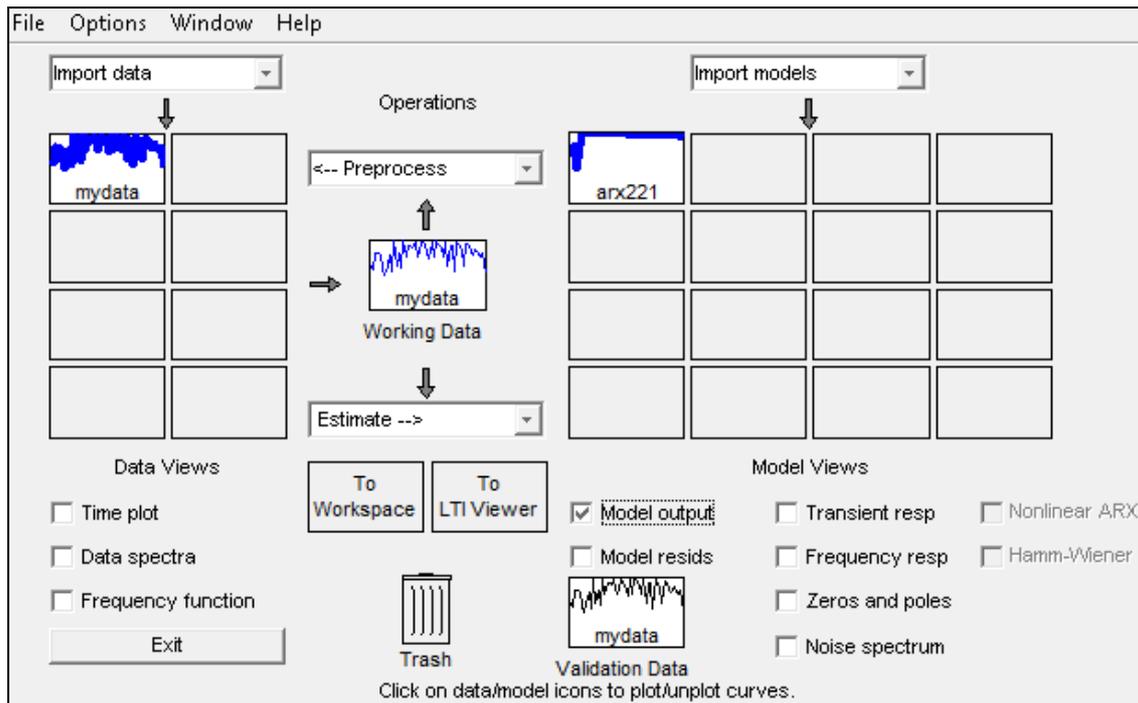


Figura 3.17 Ventana de ident del modelo obtenido

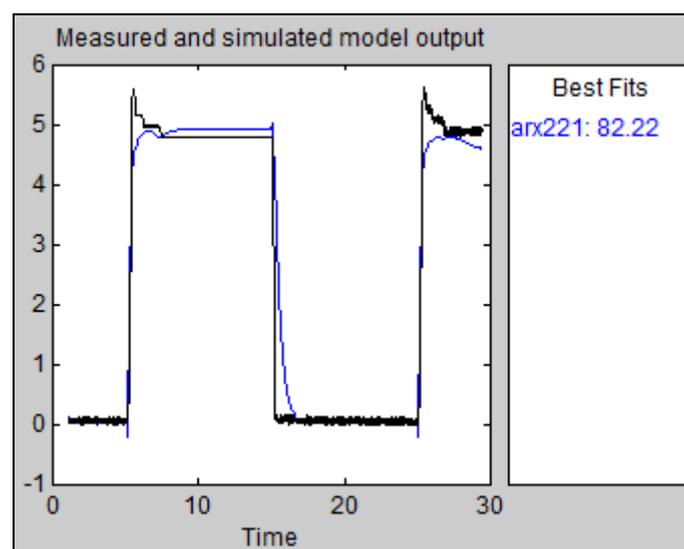


Figura 3.18 Porcentaje de similitud del modelo



Para poder trabajar con el modelo obtenido desde la ventana de comandos, éste se puede enviar al espacio de trabajo arrastrándolo a la casilla 'To Workspace'.

Desde el espacio de trabajo de MATLAB se puede abrir el modelo exportado desde Ident tecleando en la línea de comando el nombre del modelo, en nuestro caso arx221.

Discrete-time IDPOLY model:  $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$

$A(q) = 1 - 1.026 q^{-1} + 0.04917 q^{-2}$

$B(q) = -0.1008 q^{-1} + 0.1358 q^{-2}$

Estimated using ARX from data set mydata

Loss function 0.00169539 and FPE 0.00170015

Sampling interval: 0.01

A través de la función 'polydata' de MATLAB se pueden obtener los vectores que contienen los coeficientes del numerador y denominador para poder hacer uso de ellos a través de Simulink o para obtener la función de transferencia del modelo a través de la instrucción 'tf'. Las instrucciones utilizadas para crear el modelo son las siguientes.

```
[dend,numd]=polydata(arx221)
```

```
Gz=tf(numd,dend,0.01)
```

El resultado de estas instrucciones es (12):

$$G(z) = \frac{-0.06592 z + 0.0972}{z^2 - 1.162 z + 0.1827} \quad (12)$$

Durante el desarrollo del trabajo se ha trabajado con señales discretas, ya que la PCL 818 lee y escribe los datos de forma discreta y con periodo de muestro de 0.01 seg. También se puede transformar al dominio continuo la función de transferencia por medio de la función de MATLAB 'd2c' (discrete to continuos)(13).

```
Gc=d2c(Gz,'zoh')
```

El argumento 'zoh' le indica a 'd2c' el método de conversión que se desea que se utilice, en nuestro caso a través de un retenedor de orden cero.

$$G(s) = \frac{-17.97s + 652.9}{s^2 + 170s + 437.1} \quad (13)$$

### 3.3.1.4 Resultados

Para verificar el funcionamiento de los modelos se ha realizado un esquema Simulink que simula a la plataforma completa. En este esquema se incluyen los modelos de la válvula proporcional y del conjunto peso – actuador – potenciómetro. Los valores de numd y dend se encuentran en el espacio de trabajo de MATLAB y se han obtenido a través de las funciones anteriormente citadas. El esquema se presenta en la Figura 3.19

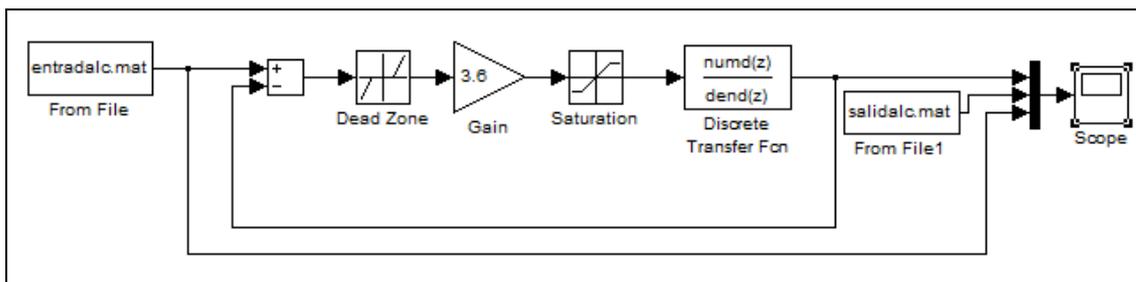


Figura 3.19 Esquema simulación identificación en lazo cerrado con escalón

En el Scope de la Figura 3.19 se visualizan 3 señales. La primera de ellas es la entrada con la que se excitó a la plataforma experimentalmente y con la que también se excita al modelo de la plataforma completa, la segunda de ellas es la salida que se leyó de la plataforma experimentalmente y la tercera es la salida que proporciona el modelo en simulación al excitarlo con la entrada antes mencionada. Estas señales se muestran en la Figura 3.20.

De la Figura 3.20 se pueden sacar una serie de conclusiones. La primera de ellas es que la salida experimental posee una dinámica que no se corresponde fielmente a la dinámica que proporciona el modelo en simulación. Además, el valor en régimen permanente difiere del experimental.

Por otro lado, en este método de identificación no se aprecia cual es la dinámica de la masa cuando le pedimos que se posicione desde una referencia de 10 V a otra de 0 V

debido a que existe un tope que le impide moverse con libertad. Esto hace que el modelo sólo sea útil si deseamos posicionar desde 0 V a 10 V.

Estos dos inconvenientes hacen que busquemos otra estrategia que mejore los problemas que han surgido en este caso. Para ello modificaremos la excitación de la plataforma según se comenta en el siguiente epígrafe.

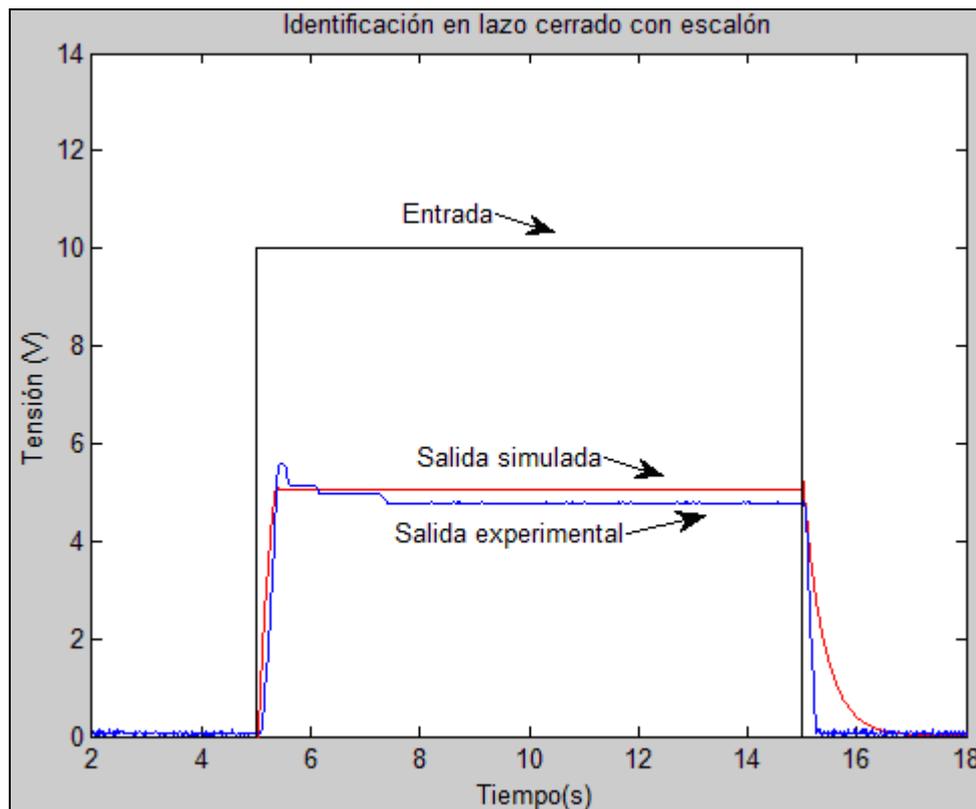


Figura 3.20 Señales de la simulación en lazo cerrado con escalón

### 3.3.2 Identificación en lazo cerrado con escalón y posición inicial

Para mejorar las condiciones anteriormente utilizadas, optamos por llevar la masa a una posición inicial y desde esa posición aplicar incrementos de tensión con el fin de visualizar la dinámica con menor brusquedad que en el caso anterior.

Llevar a la masa a una posición intermedia en la que tenga libertad de movimiento en ambos sentidos nos permite apreciar la dinámica del sistema hacia cualquier sentido en el que se desee posicionar.

### 3.3.2.1 Esquema Simulink

El esquema para esta estrategia es similar al empleado en el caso anterior, la diferencia principal es que el primer escalón lleva a la masa a la posición intermedia anteriormente citada. El resto de escalones se encargan de sumar y restar los incrementos de tensión que provocan el movimiento en ambos sentidos.

Al igual que en el esquema anterior también existe una entrada adicional que se encarga de leer la presión que se le aplica a través de la VIA 4 de la válvula proporcional a la masa. La Figura 3.21 muestra el esquema utilizado en este caso.

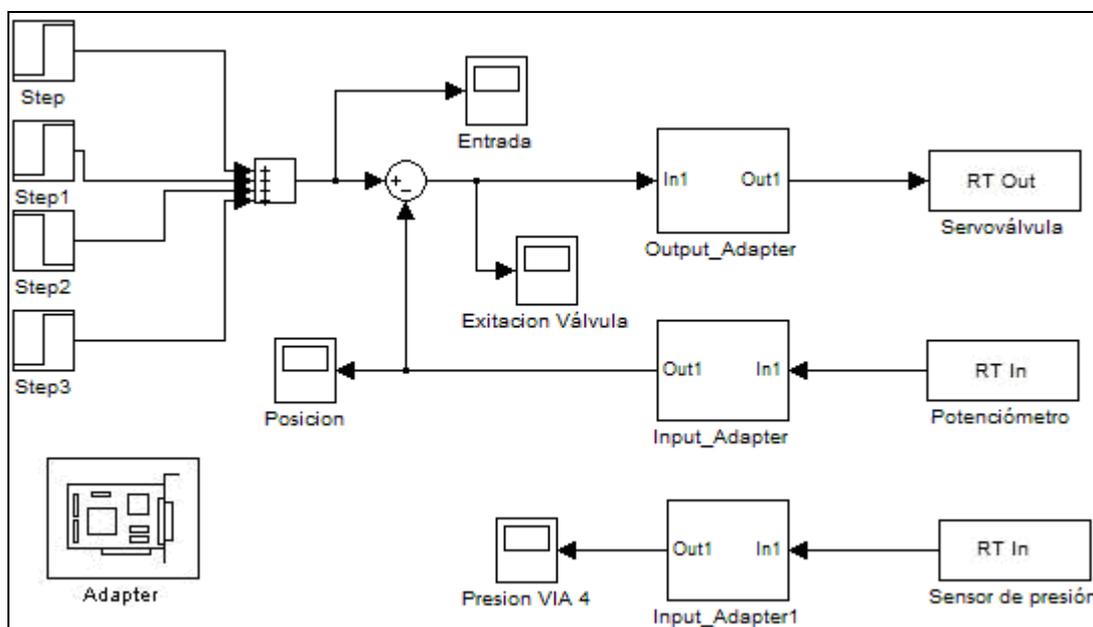


Figura 3.21 Esquema identificación en lazo cerrado con escalón y posición inicial

### 3.3.2.2 Resultados

Para verificar el resultado de esta estrategia, se ha utilizado el mismo esquema que en la Figura 3.19. El modelo de la válvula proporcional es el mismo que en el caso de la simulación anterior mientras que el modelo del conjunto peso – actuador – potenciómetro se ha elaborado de nuevo con las señales obtenidas tras modificar la excitación. El nuevo modelo también se ha realizado a través de la herramienta Ident.

Las señales tras la simulación se muestran en la Figura 3.22. En este caso el resultado de la señal simulada no es tan bueno como el que se podría esperar. En las pruebas experimentales se apreció que una vez que la masa se detenía y se pretendía volver a posicionar ésta experimentaba la misma dinámica que experimentó sin

posicionar previamente por lo que no hemos conseguido minimizar este efecto. Además, la dinámica que presenta la salida experimental resulta difícil de modelar con modelos de orden reducido ya que presenta sobreoscilaciones visibles.

Las sobreoscilaciones se deben principalmente a la inercia que presenta la masa cuando se le ordena que se posicione. La solución pasa por conseguir que la masa se mueva con mayor uniformidad, es decir, que el posicionamiento se produzca de una forma menos extrema. Por ejemplo, se podría disminuir la presión de la válvula de mantenimiento o hacer que los incrementos de la tensión de excitación a la válvula proporcional sean menores.

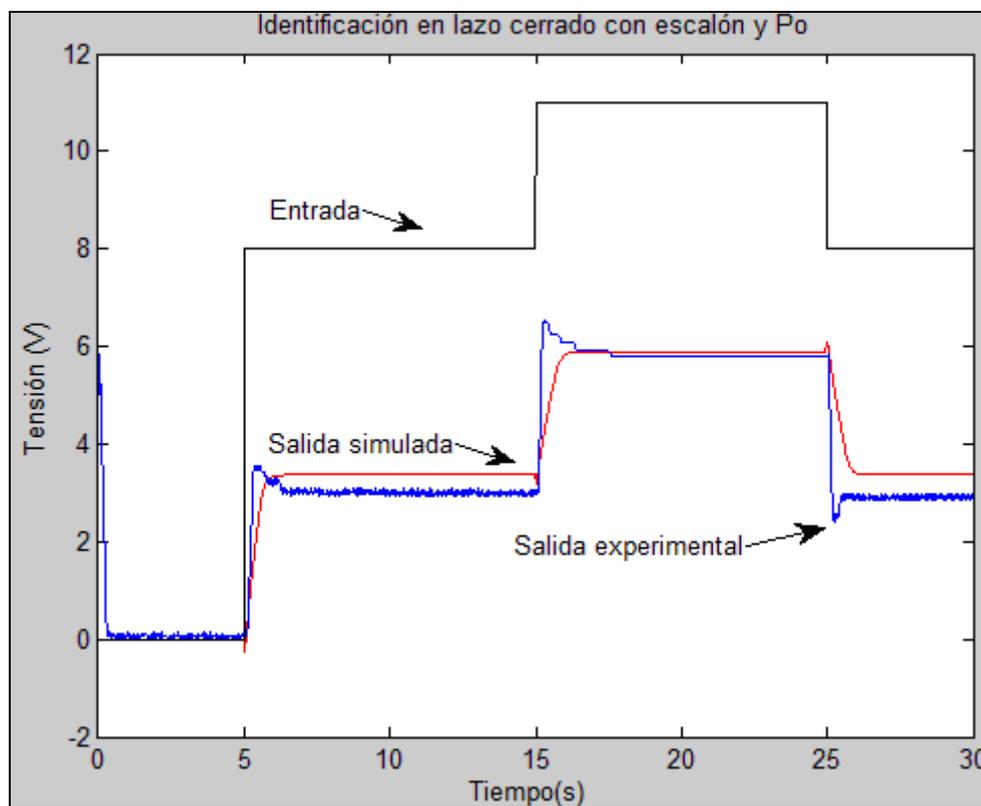
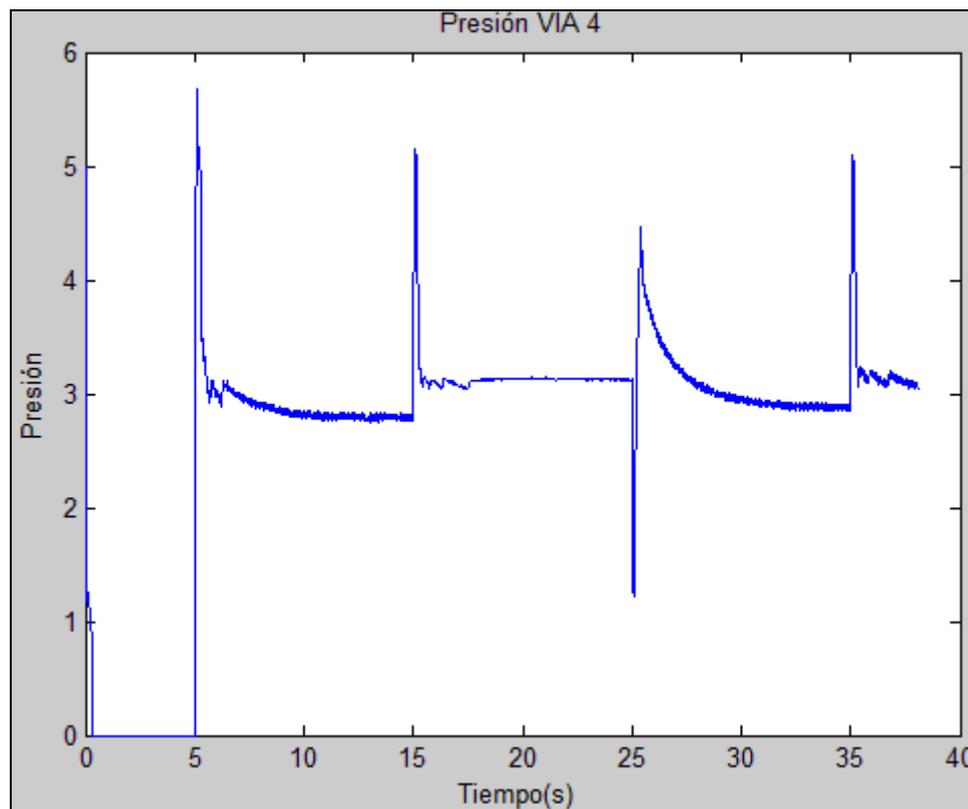


Figura 3.22 Señales de simulación en lazo cerrado con escalón y posición inicial

Se analizó la señal de presión de la VIA 4 para buscar posibles soluciones y se apreció que ésta tiene unas dinámicas muy abruptas (Figura 3.23) difíciles de modelar. Identificar con esas dinámicas tan extremas complica obtener una buena aproximación del modelo. En el siguiente epígrafe se propone una nueva estrategia de excitación y configuración de la plataforma para conseguir paliar los problemas hasta ahora vistos.



**Figura 3.23 Presión en la VIA 4 con identificación en lazo cerrado con escalón y posición inicial**

### 3.3.3 Identificación en lazo cerrado con rampa y posición inicial

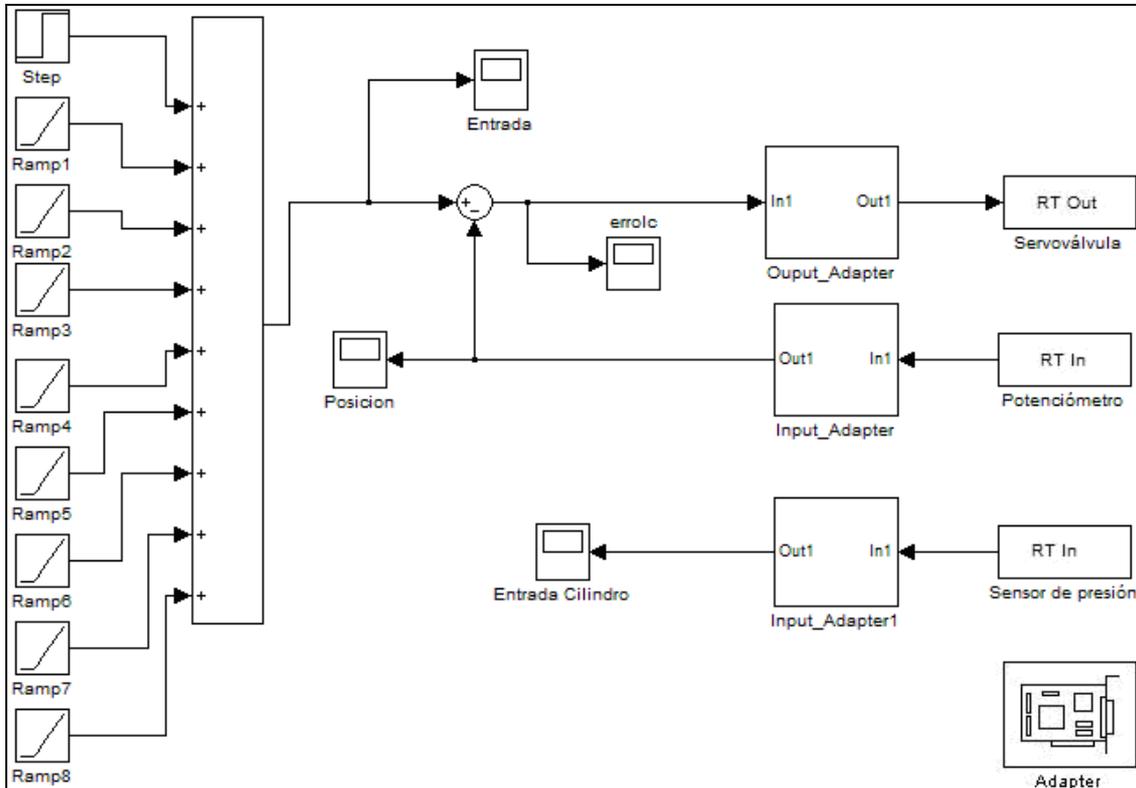
La opción propuesta para minimizar la sobreoscilación fue excitar a la plataforma por medio de una señal rampa con pendiente múltiplo del período de muestreo, es decir, que en cada período de muestro se incrementase la señal de tensión que excita a la válvula proporcional. De esta forma la excitación a la plataforma será más uniforme y las inercias disminuirán.

En esta estrategia también posicionamos a la masa en una posición intermedia en la que se pueda apreciar la dinámica en cualquier sentido de movimiento. Las rampas se aplicaron en ambos sentidos con el fin de identificar para cualquier caso el comportamiento de la plataforma.

#### 3.3.3.1 Esquema Simulink

El esquema desarrollado en Simulink se muestra en la Figura 3.24. Al igual que los otros esquemas también incluye la entrada de presión de la VIA 4 para poder identificar el modelo del conjunto peso – actuador – potenciómetro de forma independiente.

El bloque Step se encarga de posicionar a la masa en la posición intermedia y los bloques Ramp se encargan de hacer las rampas positivas o negativas para excitar a la válvula proporcional.



**Figura 3.24** Esquema Simulink de identificación en lazo cerrado con rampa y posición inicial

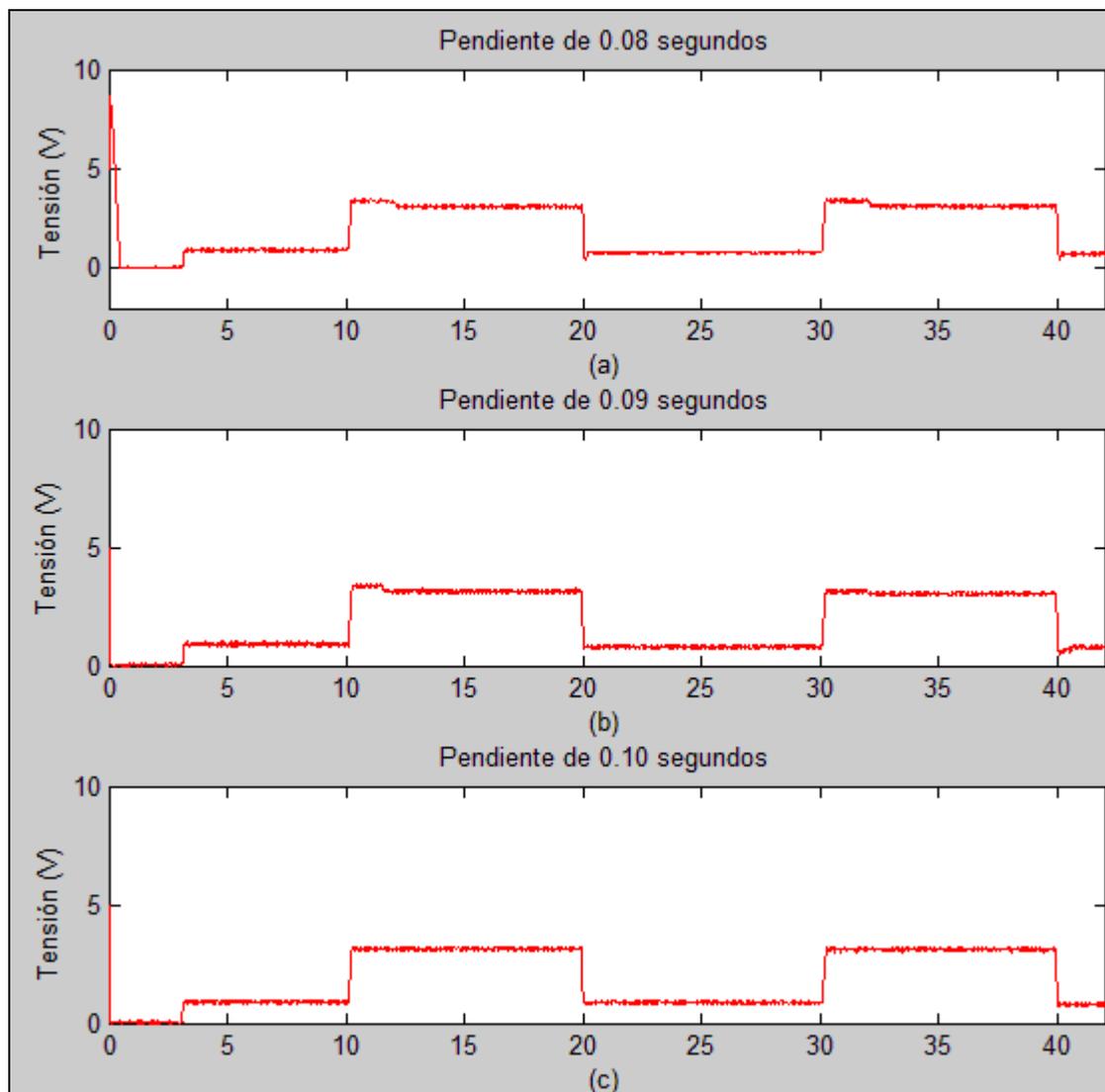
### 3.3.3.2 Resultados

Se realizaron una batería de pruebas para estudiar con que pendiente se minimizaban los efectos de la inercia y se obtenían mejores resultados. Como premisa se estipuló que las pendientes fuesen múltiplo del periodo de muestreo.

La primera prueba que se realizó fue con múltiplo 1, por lo que la rampa que excita a la válvula proporcional se incrementaba en un voltio por cada periodo de muestreo. Las siguientes pruebas hacían que la señal de excitación se incremente en 1 voltio cada 2 periodos de muestreo, y así sucesivamente hasta encontrar con qué múltiplo del periodo de muestreo se obtiene la mejor respuesta.

En los bloques rampa hay que especificar la rampa que se desea que tenga ese bloque, por lo que hay que calcular la pendiente de la rampa haciendo la inversa del tiempo que tarda la señal en subir 1 V.

Una vez hechas varias pruebas se apreció que los efectos de la inercia se minimizaban notablemente con rampas cuyos múltiplos eran de 8, 9 y 10 periodos de muestreo, es decir, cuando se incrementaba 1 voltio cada 0.08, 0.09 y 0.1 segundos.



**Figura 3.25 Salidas experimentales de identificación en lazo cerrado con rampa y posición inicial**

Los datos experimentales obtenidos tras las pruebas realizadas con las diferentes rampas se muestran en la Figura 3.25. En (a) se muestra la respuesta obtenida con

una rampa que se incrementa 1 V a los 0.08 segundos, mientras que (b) y (c) lo incrementan en 0.09 y 0.10 segundos respectivamente.

El primer buen resultado que se obtuvo se muestra en (a). De (a) se puede ver que la dinámica cuando se posiciona desde la derecha a la izquierda, correspondiente al intervalo comprendido entre los 15 y 25 segundos, tiene una pequeña sobreoscilación que es considerablemente menor que las experimentadas en pruebas anteriores por lo que se ha mejorado este aspecto.

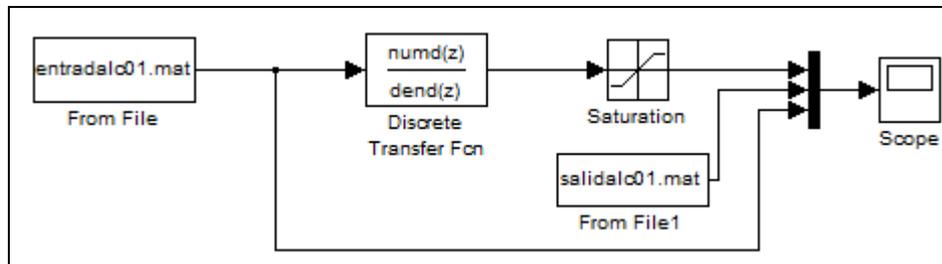
Posteriormente, se modificó la pendiente de las rampas para llevarlo a una múltiplo de 9 veces el periodo de muestreo y ver que aspecto se mejoraba o empeoraba, de esta prueba se obtuvo (b). Haciendo el mismo análisis de (b) que en (a) vemos que en este caso la masa sobreoscila también en el intervalo de 15 a 25 segundos pero mejora notablemente en el intervalo de 5 a 15, que corresponde al posicionamiento de izquierda a derecha. Con estos dos resultados se han obtenido dinámicas fácilmente modelables para cualquier posición y en cualquier sentido. Se podría pensar en obtener un modelo para plataforma dependiendo de hacia donde quisiéramos posicionar a la masa y desde donde parta. Pero utilizar dos modelos diferentes para la plataforma puede resultar engorroso, por lo que se decidió seguir haciendo pruebas y así obtener una solución de compromiso para cualquier posición y sentido.

La siguiente prueba realizada se presenta en (c). En ella se muestra el mejor resultado que se ha obtenido. Se puede apreciar que la masa no sobreoscila en ningún sentido y que se comporta como si se tratase de un sistema que no presenta inercia alguna. Por lo que éstas serán las señales que se utilizarán en la identificación.

Según se comentó anteriormente, la señal de presión de la VIA 4 posee unas dinámicas abruptas difíciles de modelar. Para solucionar este problema se ha decidido identificar en lazo cerrado por completo, sin identificaciones intermedias del conjunto peso – actuador – potenciómetro.

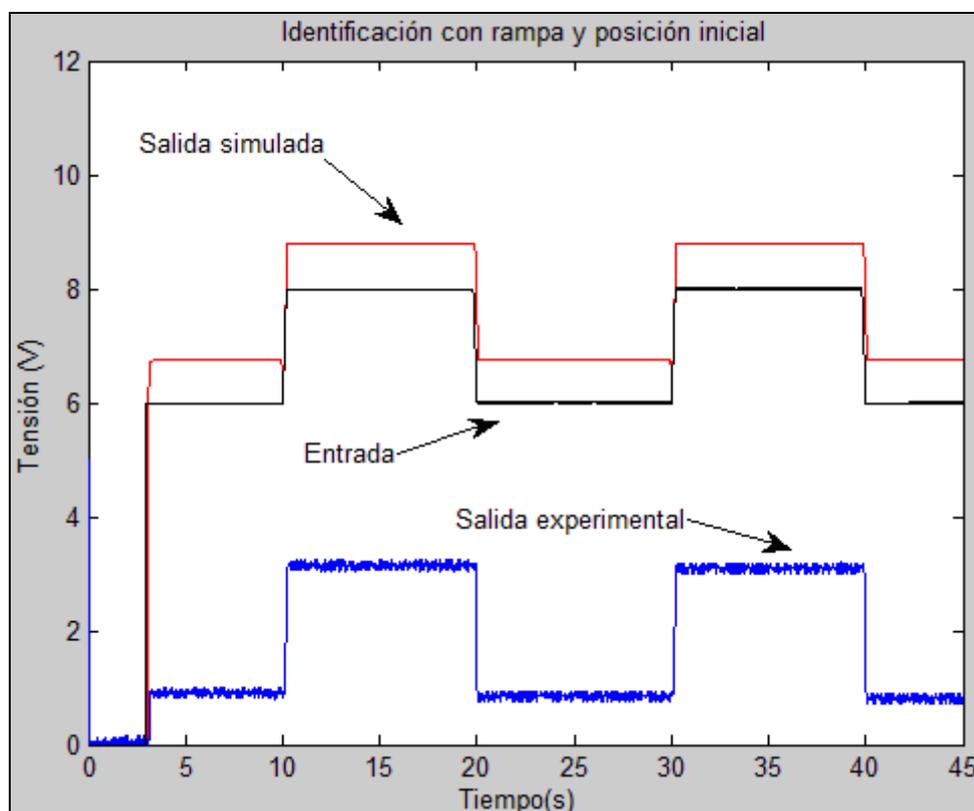
El esquema desarrollado en Simulink para verificar el funcionamiento del modelo se muestra en la Figura 3.26. Esta vez se identifica el sistema completo por lo que el modelo obtenido representa a toda la plataforma, por ello no aparece el modelo de la válvula proporcional. Existe un bloque saturación que se encarga de limitar la salida

máxima que puede dar la plataforma que son 8.8 V según se ha comentado anteriormente.



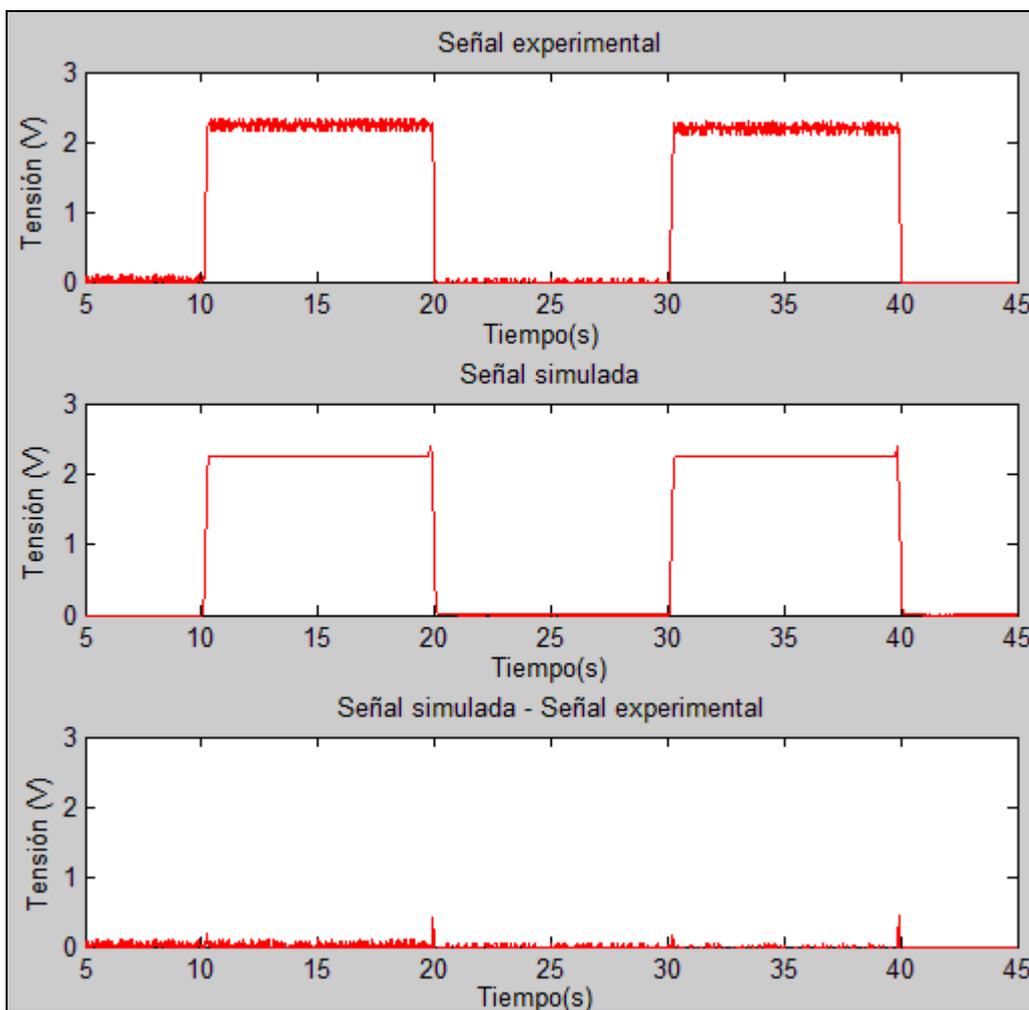
**Figura 3.26** Esquema simulación identificación en lazo cerrado con rampa y posición inicial

La Figura 3.27 muestra las señales obtenidas tras simular el modelo. Se puede ver que la dinámica del sistema se ha mejorado notablemente ya que se aproxima fielmente a la salida experimental. Por otro lado, el régimen permanente de la señal simulada supera al permanente de la señal de experimental, este hecho se debe a que en el modelo no se ha tenido en cuenta ni tampoco modelado la fricción. La mejora del régimen permanente será tarea de los controladores de los capítulos 4 y 5.



**Figura 3.27** Señales de simulación en lazo cerrado con rampa y posición inicial

Con el fin de visualizar la verdadera respuesta que proporciona el modelo, se realizó una simulación adicional sobre él. Esta simulación pretende visualizar, como se comporta el modelo cuando se aplican incrementos de tensión sobre la válvula proporcional. El resultado de esta simulación se muestra en la Figura 3.28, en la primera gráfica se muestra la señal experimental que proporciona la plataforma al aplicar un incremento de 2 V, la segunda muestra la respuesta que proporciona el modelo en simulación al aplicar el mismo incremento y la tercera gráfica representa una diferencia entre las dos primeras.



**Figura 3.28** Señales de simulación en lazo cerrado con rampa desde posición ante incremento de 2 V

Como puede verse, la diferencia entre ambas es pequeña y perfectamente asumible por lo que el modelo obtenido en esta estrategia cumple los requisitos que buscábamos.

### **3.3.4 Identificación en lazo cerrado con presión en válvula de mantenimiento menor y posición inicial**

Tras la estrategia de identificación mediante las rampas se pensó que las órdenes de posicionamiento a la plataforma se realizan a través de escalones y que sería bueno obtener un modelo que hubiese sido excitado a través de escalones.

Para minimizar los efectos de inercia, esta vez se redujo la presión de la válvula de mantenimiento. Durante todo el trabajo esta presión ha sido fija y de 6 bares ya que ésta ha sido la presión que se ha utilizado en estudios previos sobre la plataforma.

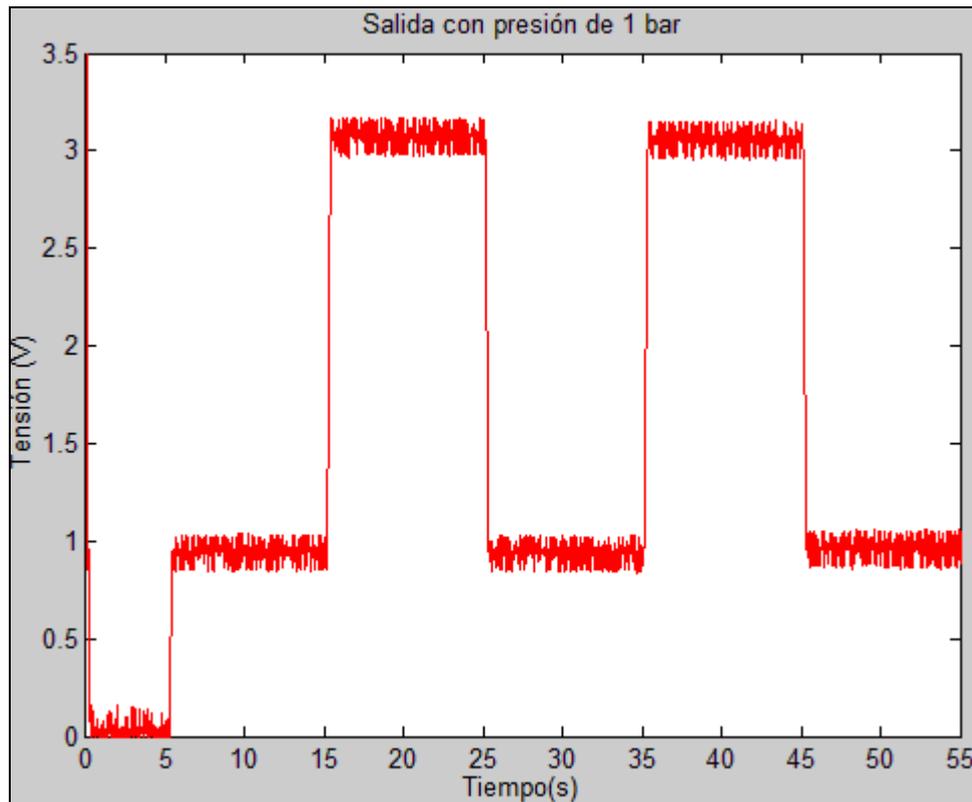
Utilizar una presión menor también reduce la presión que las VIAS comunican a la masa. La masa tiene un peso de 5 Kg por lo que para moverla debe de comunicarse una presión mínima. Además, esa presión debe superar la fricción que existe entre la masa y los cilindros del actuador lineal. Para averiguar que presión mínima hace que la masa experimente movimiento se comenzó disminuyendo la presión de la válvula de mantenimiento 1 en un bar y se excitaba a través de la PCL 818, así sucesivamente hasta llegar a una presión que fuese insuficiente para mover el conjunto. Esa presión mínima es de 1 bar. Si se configura la válvula de mantenimiento con una presión menor de un 1 bar, la masa no se moverá.

Esta vez, el esquema Simulink es el mismo que el de la Figura 3.21, la excitación a la plataforma es la misma que en el caso anterior. Únicamente se ha modificado la presión de la válvula de mantenimiento.

#### **3.3.4.1 Resultados**

La señal de salida que se obtiene se muestra en la Figura 3.29. La salida no experimenta sobreoscilaciones por lo que se ha conseguido el objetivo que se había marcado al inicio de estas pruebas. Además, mientras se desarrollaban estas pruebas, se aprecia como la masa se mueve con mayor uniformidad, al contrario que en las anteriores en las que la masa se movía bruscamente.

Por las mismas razones que en el epígrafe anterior, se ha decidido identificar a la plataforma completa en lazo cerrado, sin identificaciones intermedias. La herramienta utilizada es la misma para identificar (Ident) y el esquema para verificar el funcionamiento es el mismo que en la Figura 3.26.

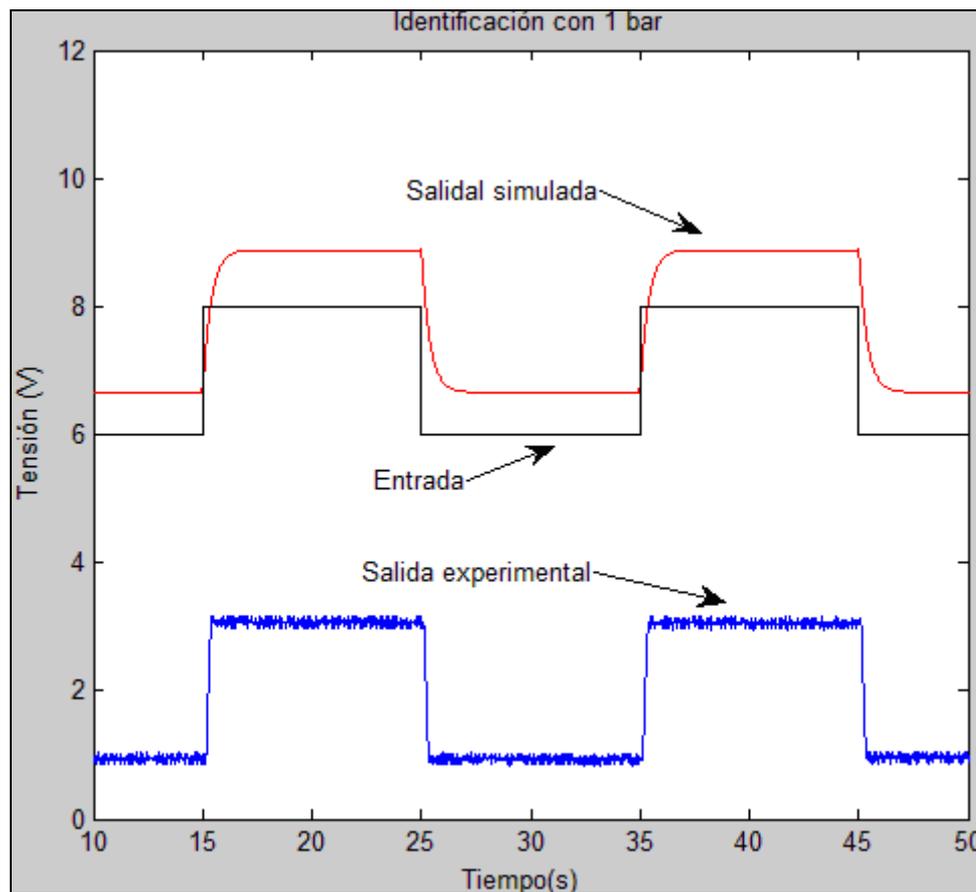


**Figura 3.29 Salida de identificación en lazo cerrado con presión 1 bar, escalón y posición inicial**

Las señales que se obtienen tras simular el modelo se muestran en la Figura 3.30 Al igual que en la Figura 3.27 la señal simulada sobrepasa al régimen permanente de la señal experimental por el mismo motivo que en el caso anterior, la fricción. El efecto que la fricción tiene sobre la plataforma no está incluido en la simulación del modelo, ya que tampoco era premisa de este trabajo llegar a ese nivel de detalle en la identificación de la plataforma.

Este será el modelo y las condiciones de presión que se utilizarán en el desarrollo de los controladores de los capítulos 4 y 5 tanto en simulación como en experimentación, ya que aproxima en la medida que nos interesa al modelo real de la plataforma.

Por los mismos motivos y el a través del mismo procedimiento que en el caso anterior, se realizó una simulación de la plataforma verificando como sería la salida simulada ante incrementos en la entrada desde el reposo. La Figura 3.31 muestra las señales obtenidas.



**Figura 3.30** Señales de simulación en lazo cerrado con presión de 1 bar, escalón y posición inicial

Al igual que en el caso anterior se muestra en primer lugar la señal experimental, en segundo lugar la señal obtenida del modelo en simulación y en tercer lugar el error entre las dos anteriores.

La ecuación que describe a este modelo en el dominio discreto es:

$$G(z) = \frac{-0.003309z + 0.04624}{z^2 - 0.553z + 0.04624} \quad (14)$$

Si pasamos al dominio continuo esta función de transferencia a través de las funciones de MATLAB explicadas en epígrafes anteriores, ésta nos queda:

$$G(s) = \frac{1.023s^2 - 2030s + 3.269e005}{s^3 + 177.9s^2 + 1.069e005 + 3.028e005} \quad (15)$$

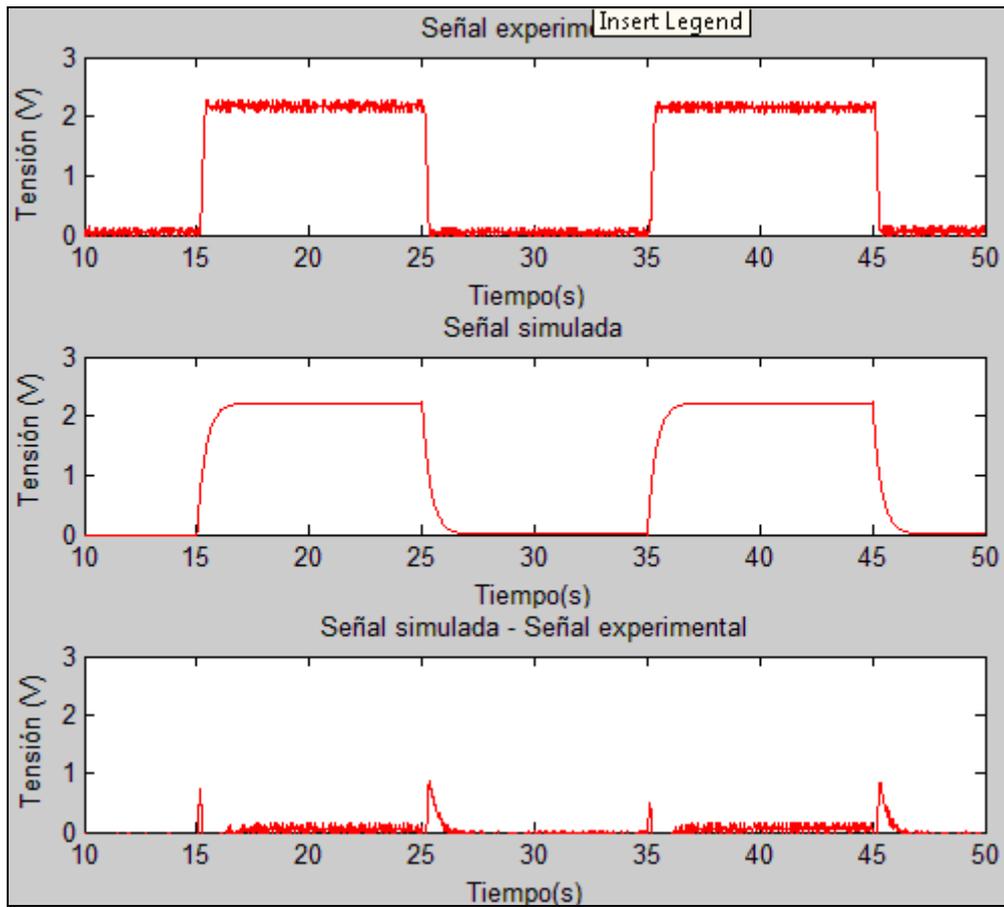
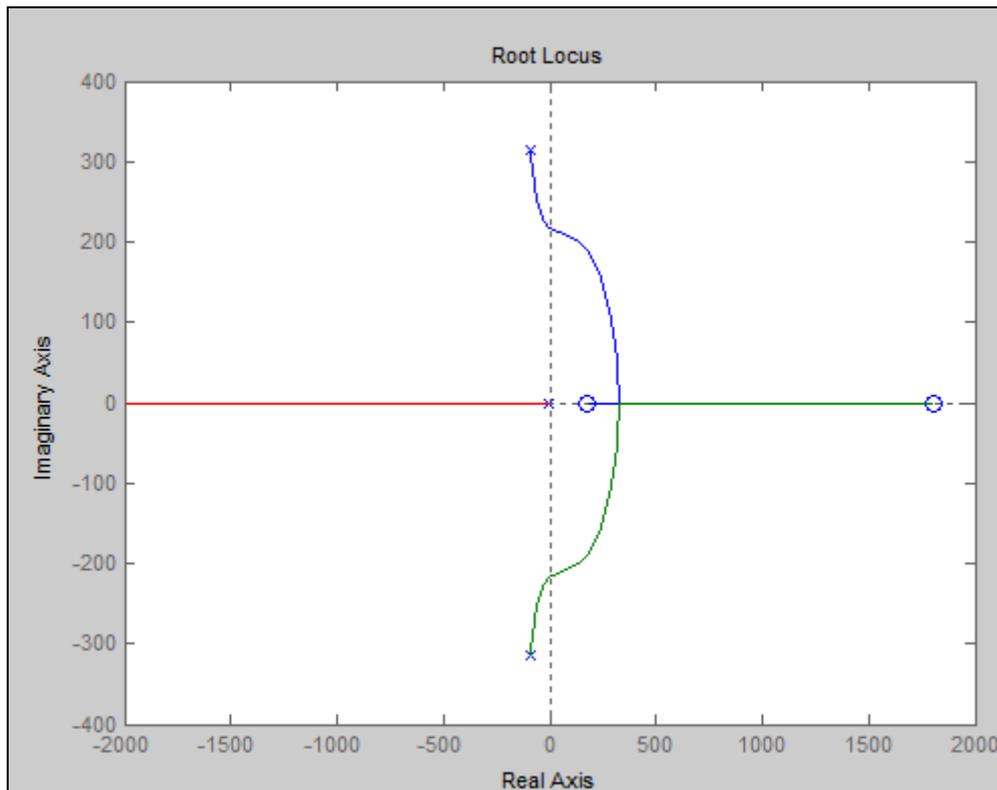


Figura 3.31 Señales de simulación en lazo cerrado con presión 1 bar, escalón ante incremento de 2 V

El lugar de las raíces del sistema se muestra en la Figura 3.32. Los polos y ceros del sistema son (Tabla 3.2):

CEROS	POLOS
1.0e+003 *	1.0e+002 *
18076	-0.8753 + 3.1423i
0.1768	-0.8753 - 3.1423i
	-0.0285

Tabla 3.2 Polos y ceros del modelo



**Figura 3.32 Lugar de las raíces del modelo obtenido a través de identificación en lazo cerrado con 1 bar, escalón y posición inicial**

Según se ha explicado anteriormente estas son las condiciones de presión óptimas para obtener un modelo que cumpla las premisas. En el capítulo 5 se hará un control a través de un PID fraccionario y la herramienta de la que se dispone para realizar el controlador de este tipo tiene automatizado el cálculo del controlador si las funciones de transferencias tienen la forma de (16) ó (17). El método en el que se basa la herramienta puede obtener un PID fraccionario de cualquier función de transferencia si se realizan una serie de modificaciones sobre ella. Para evitar realizar modificaciones, se intentará obtener un modelo que se asemeje a (16) (un polo) ó a (17) (un polo y un polo en el origen) a partir de las condiciones óptimas de funcionamiento de la plataforma. El  $e^{-Ls}$  mostrado en ambas expresiones representa retardos. En nuestros modelos no existen retardos, por lo que el valor de L será cero.

$$G_1(s) = \frac{k}{\tau \cdot s + 1} \cdot e^{-Ls} \quad (16)$$

$$G_2(s) = \frac{k}{s \cdot (\tau \cdot s + 1)} \cdot e^{-Ls} \quad (17)$$

Por este motivo, debemos obtener una función de transferencia a través de Ident que aproxime correctamente y que cumpla las premisas del párrafo anterior. Para ello, se va a proceder de una forma un poco diferente. Esta vez, vamos a utilizar una utilidad de Ident que obtiene modelos en el dominio continuo con número de polos y ceros configurables por el usuario en lugar de utilizar modelos arx.

Sobre la pantalla que se muestra en la Figura 3.15, seleccionamos 'Process models' en lugar de seleccionar 'Linear parametric models' y llegamos a la pantalla de la Figura 3.33. La importación de los datos a Ident y los posibles preprocesados son los mismos que en los casos anteriores.

Model Transfer Function		Parameter Known	Value	Initial Guess	Bounds	
$\frac{K}{s(1 + T_{p1} s)}$		K	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Auto	[-Inf Inf]
		Tp1	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	Auto	[0.001 Inf]
		Tp2	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0"/>	0	[0.001 Inf]
		Tp3	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0"/>	0	[0.001 Inf]
		Tz	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0"/>	0	[-Inf Inf]
		Td	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0"/>	0	[0 0.3]
Poles 1 <input type="text"/> All real <input type="text"/>		Initial Guess <input checked="" type="radio"/> Auto-selected <input type="radio"/> From existing model: <input type="text"/> <input type="radio"/> User-defined: Value-->Initial Guess <input type="text"/>				
Disturbance Model: <input type="text" value="None"/> Focus: <input type="text" value="Simulation"/>		Initial state: <input type="text" value="Auto"/>		Covariance: <input type="text" value="Estimate"/> <input type="button" value="Options..."/>		
Iteration      Fit:      Improvement <input type="checkbox"/> Trace <input type="button" value="Stop Iterations"/>						
Name: <input type="text" value="P11"/>		<input type="button" value="Estimate"/>		<input type="button" value="Close"/> <input type="button" value="Help"/>		

Figura 3.33 Ventana process models

En la parte superior izquierda de la Figura 3.33 se puede configurar cómo queremos que sea nuestro modelo. En nuestro caso, probaremos con dos tipos de modelo, el primero será con un único polo y el segundo con dos polos, estando uno de ellos en el origen. Las aproximaciones que se obtuvieron con ambos modelos se muestran en la Figura 3.34.

La señal P1 corresponde a la salida utilizando el modelo descrito en (16) y la señal P1I corresponde a la salida utilizando el modelo de la expresión (17). Según se aprecia en la Figura 3.34 la salida que mejor ajusta (con proximidad del 86.93 %) es la P1, por lo que el modelo que utilizaremos será de la forma mostrada en (16).

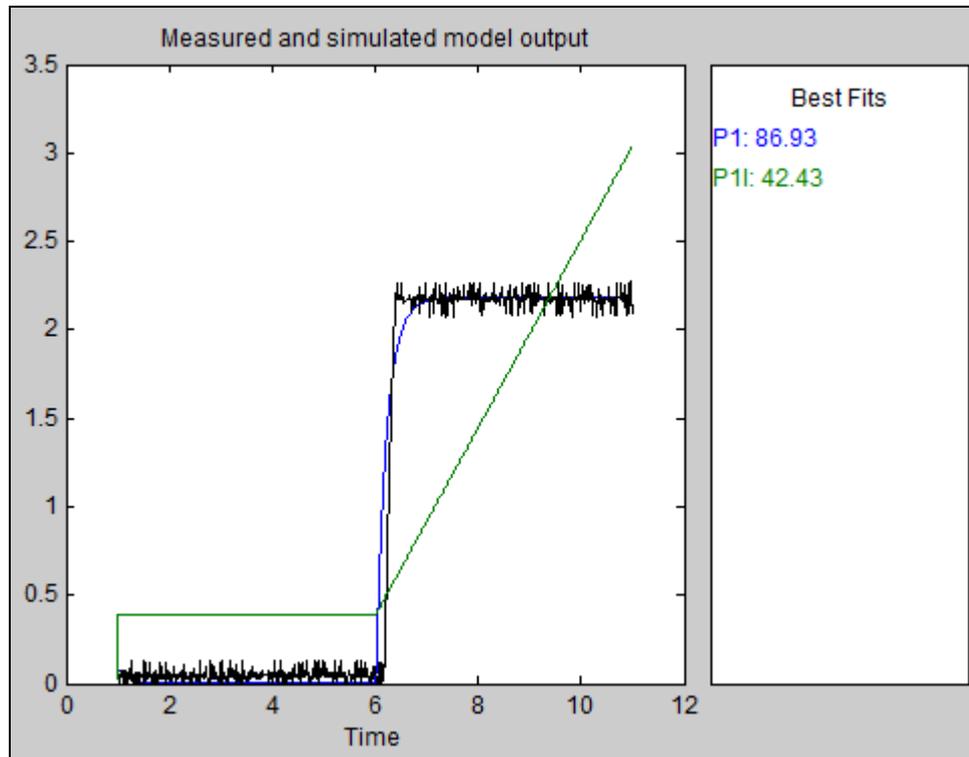


Figura 3.34 Señales de aproximación según modelos (16) ó (17)

Al igual que en los casos anteriores, podemos visualizar el modelo obtenido arrastrándolo hacia la casilla 'To Workspace'. El modelo se muestra en (18), este posee un único polo en  $-4.8223$  y ningún cero por lo que será un modelo estable.

$$G(s) = \frac{1.0908}{1 + 0.2074s} \quad (18)$$

Al igual que en la Figura 3.31 y Figura 3.28 se han realizado unas representaciones en las que se muestran cómo es la señal simulada con respecto a la señal experimental ante incrementos en la entrada. La primera gráfica de las 3 muestra la señal experimental, la segunda de ellas muestra la señal obtenida a través del modelo mostrado en (18) y la tercera es la diferencia entre las dos anteriores. En la tercera gráfica se aprecia que el error entre ambas es pequeño, aunque puntualmente se hace

aproximadamente uno, por lo que podemos darlo como modelo óptimo para las premisas estipuladas. El modelo mostrado en (18) se utilizará para el desarrollo en simulación de ambos controladores.

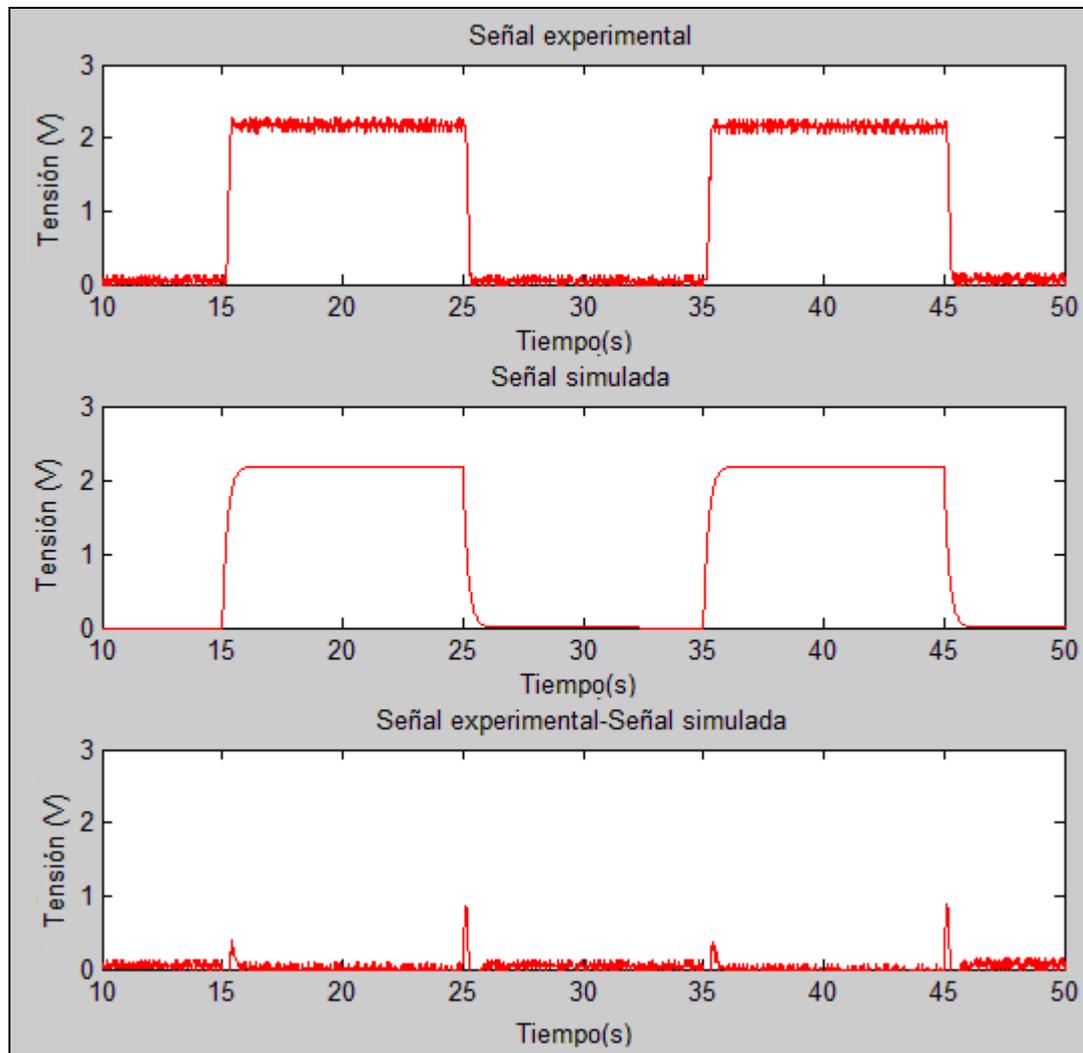


Figura 3.35 Señales de la simulación con modelos según (16)

## 4 Control mediante PID

### 4.1 Introducción

El controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo), de lejos, es el algoritmo de control más común. Numerosos lazos control utilizan este algoritmo. Puede ser implementado de diferentes maneras: como controlador individual, como parte de un paquete de control digital directo o como parte de un sistema de control distribuido. Su estudio puede ser abordado desde múltiples puntos de vista. La expresión genérica de un PID se muestra en (19),

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (19)$$

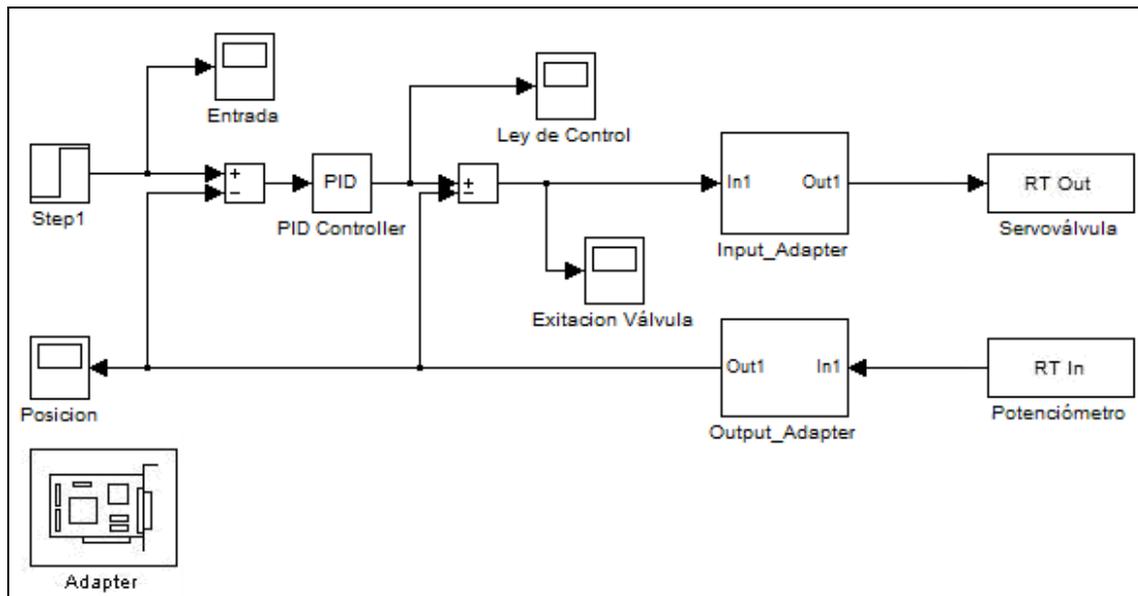
donde  $u(t)$  es la variable de control y  $e(t)$  es el error de control dado por la diferencia entre la señal de referencia y la salida del sistema realimentado. Según (19), la variable de control es una suma de tres términos: el término K, que es proporcional al error; el término I, que es proporcional a la integral del error; y el término D, que es proporcional a la derivada del error. Los 3 parámetros que los definen son: la ganancia proporcional K, el tiempo integral  $T_i$  y el tiempo derivativo  $T_d$ .

Es un controlador que puede hacer que el error en estado estacionario entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta sea cero, siendo la acción integral la encargada de realizar esta tarea. Además, el controlador posee la capacidad de anticipar el futuro a través de la acción derivativa. La acción proporcional afecta a la rapidez sobre la salida del proceso.

Los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de muchas aplicaciones en la industria, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite (en general procesos que pueden ser descritos por dinámicas de primer y segundo orden), y los requerimientos de desempeño son modestos, generalmente limitados a especificaciones del comportamiento del error en estado estacionario y una rápida respuesta a cambios en la señal de referencia.

## 4.2 Esquema desarrollado

El esquema desarrollado para realizar el PID se muestra en la Figura 4.1. El lazo se cierra a través de otro bloque sumador mientras que para ajustar el controlador se ha hecho uso de un bloque PID que Simulink.



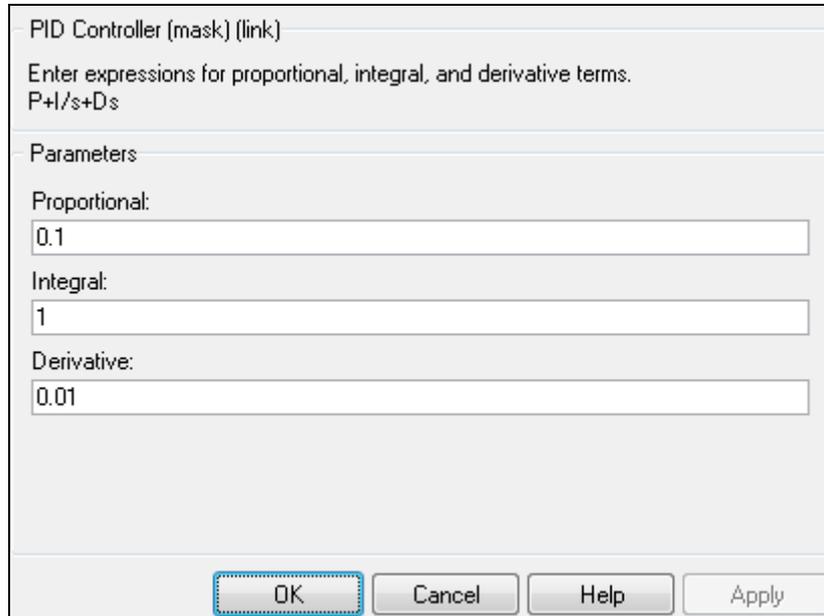
**Figura 4.1 Esquema para ajuste del controlador PID**

El bloque PID resulta sencillo de manejar, simplifica el manejo y desarrollo de este tipo de controlador. Consta de 3 parámetros de configuración que corresponden a la contribución de cada uno de los parámetros de los que consta un PID: el primero de ellos es la contribución del término proporcional, el segundo es la contribución de la parte integral y el tercero corresponde a la parte derivativa. La Figura 4.2 muestra como se configura este bloque.

El proceso de obtención de los 3 parámetros de los que consta el PID se ha realizado de forma experimental. Cerrando el lazo según muestra la Figura 4.1, se probaron valores aleatorios de cada uno de los parámetros y posteriormente se modificaban estos individualmente o conjuntamente hasta llegar a unos resultados en los que la plataforma se comportaba según las premisas impuestas en términos de dinámica y régimen permanente.

En el esquema de la Figura 4.1 se puede apreciar que se han incluido varios Scope. El Scope para visualizar la ley de control a la salida del controlador se ha incluido con el

fin de apreciar si la tensión que proporciona a la salida el controlador satura al rango de la tarjeta de adquisición de datos. En caso que sucediese este hecho, el controlador estaría mal ajustado.



**Figura 4.2 Configuración del bloque PID**

## 4.3 Resultados obtenidos

Durante el ajuste del controlador el principal problema que nos encontramos fue que cuando se aproximaba a la referencia de posición que le indicábamos comenzaba a oscilar, Figura 4.3, haciéndose un sistema críticamente estable. A partir de este momento comenzamos a disminuir las contribuciones proporcional y derivativa del bloque PID y se vio que el sistema oscilaba con menor frecuencia (Figura 4.4).

Otro problema fue que el sistema no tolera que la contribución derivativa tuviese valores por encima de cero. A través de los cables que conectan a la PCL 818 con la plataforma existe ruido y el efecto de éste sobre el controlador hace que la plataforma de control salga del control.

Por otra parte, a medida que aumentábamos la contribución proporcional, la plataforma oscilaba con mayor frecuencia pero llegaba con mayor rapidez a la posición de referencia. Se prefirió ajustar al régimen permanente por lo que también se comenzó a también la contribución proporcional.

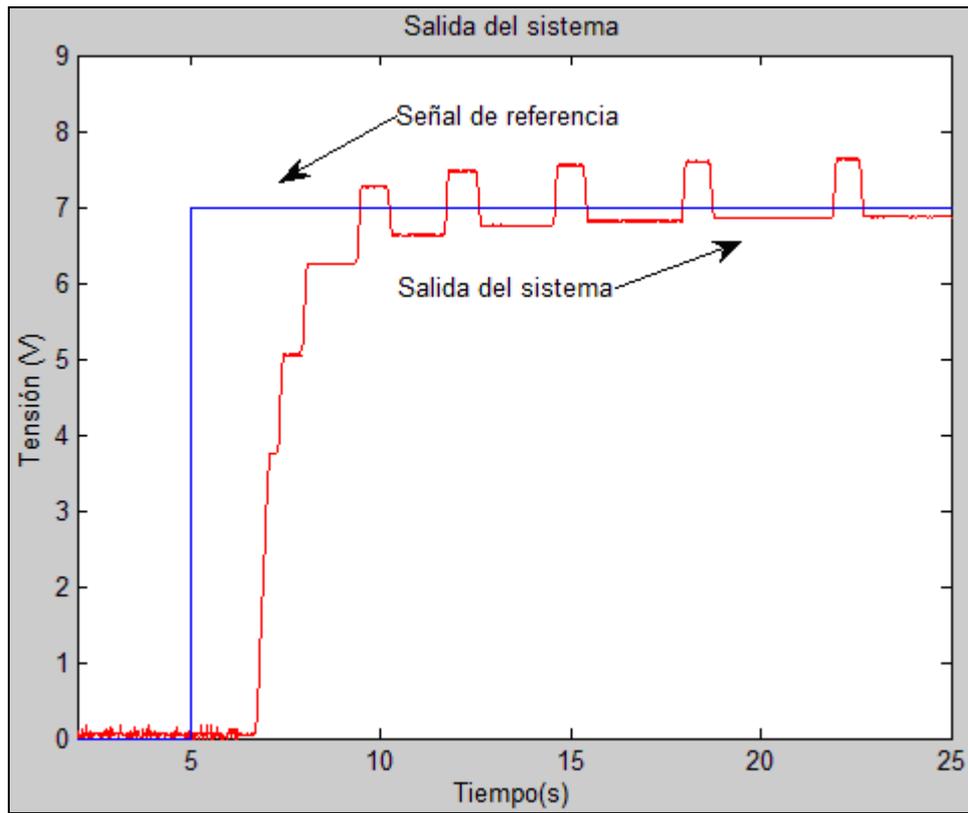


Figura 4.3 Primeras pruebas con PID

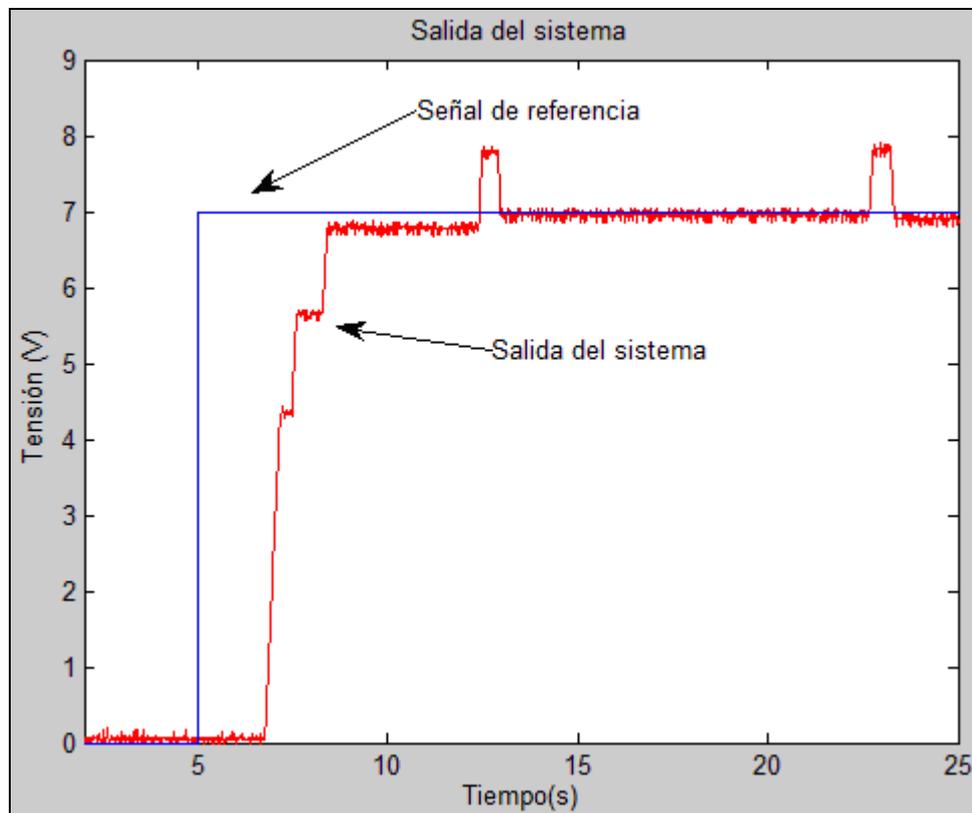


Figura 4.4 Sigüientes pruebas con PID

Disminuyendo la parte derivativa y proporcional, nos aproximábamos a un PID integral puro, ya que únicamente consta de parte integral. Esta configuración sobre el PID fue la que mejor ajustó, porque pasados 20 segundos no había oscilado en ningún instante. La Figura 4.5 muestra la respuesta que se consiguió por medio del PID integral puro.

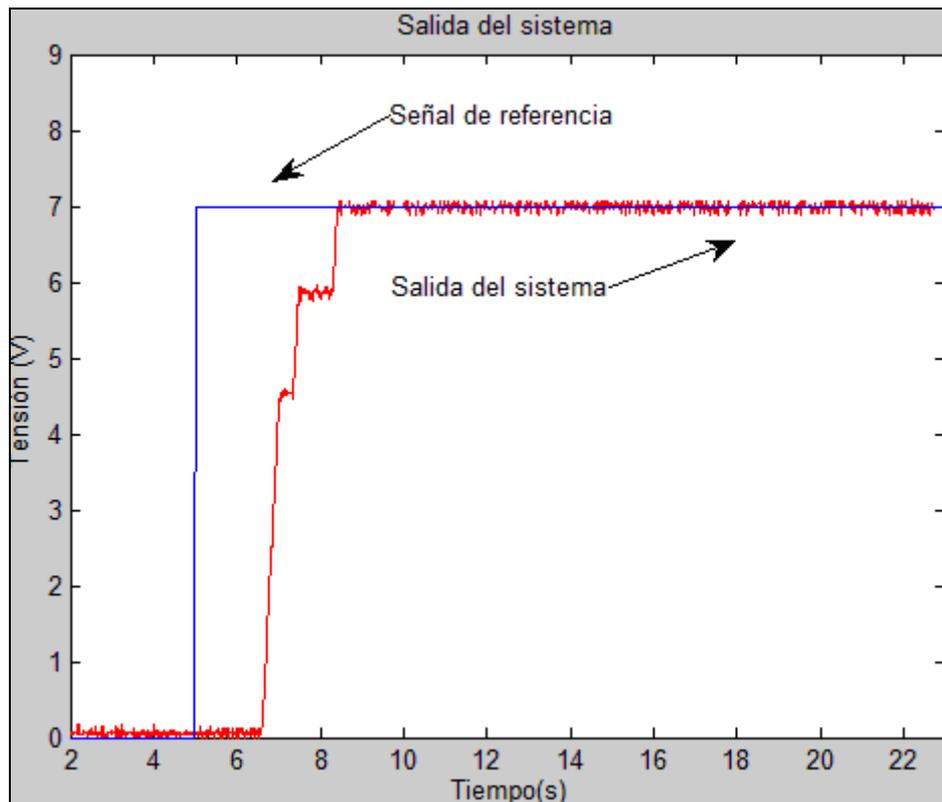


Figura 4.5 Mejor resultado con PID ajustado

La función de transferencia genérica del bloque PID,  $C(s)$ , que se muestra en sus parámetros de configuración, tiene el aspecto mostrado en (20). P corresponde a la contribución proporcional e I y D a las contribuciones integral y derivativa respectivamente.

$$C(s) = P + \frac{I}{s} + D \cdot s \quad (20)$$

En nuestro caso, las contribuciones P y D son cero por lo que la expresión de nuestro controlador es (21).

$$C(s) = \frac{1}{s} \quad (21)$$

Como en casos anteriores, se ha realizado una simulación para verificar el funcionamiento del PID calculado. Si la respuesta se ajusta a la experimental, también nos servirá para confirmar que el modelo obtenido es correcto. La Figura 4.6 muestra el esquema utilizado para simular el funcionamiento del PID. Los vectores  $numd$  y  $dend$  son los coeficientes de la función de transferencia mostrada en (14).

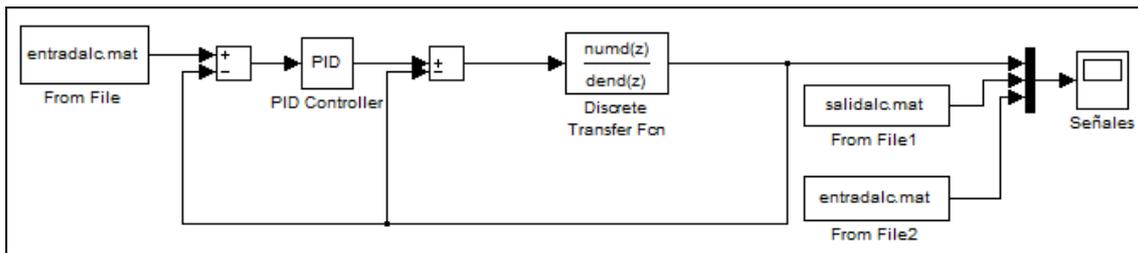


Figura 4.6 Esquema de la simulación con PID

Las señales que se visualizan en el Scope de la Figura 4.6 se muestran en la Figura 4.7. Como puede apreciarse, el régimen permanente se ajusta perfectamente. La señal experimental es más rápida que la simulada, este hecho era esperado ya que el efecto proporcional se ha anulado para evitar que sobreoscile.

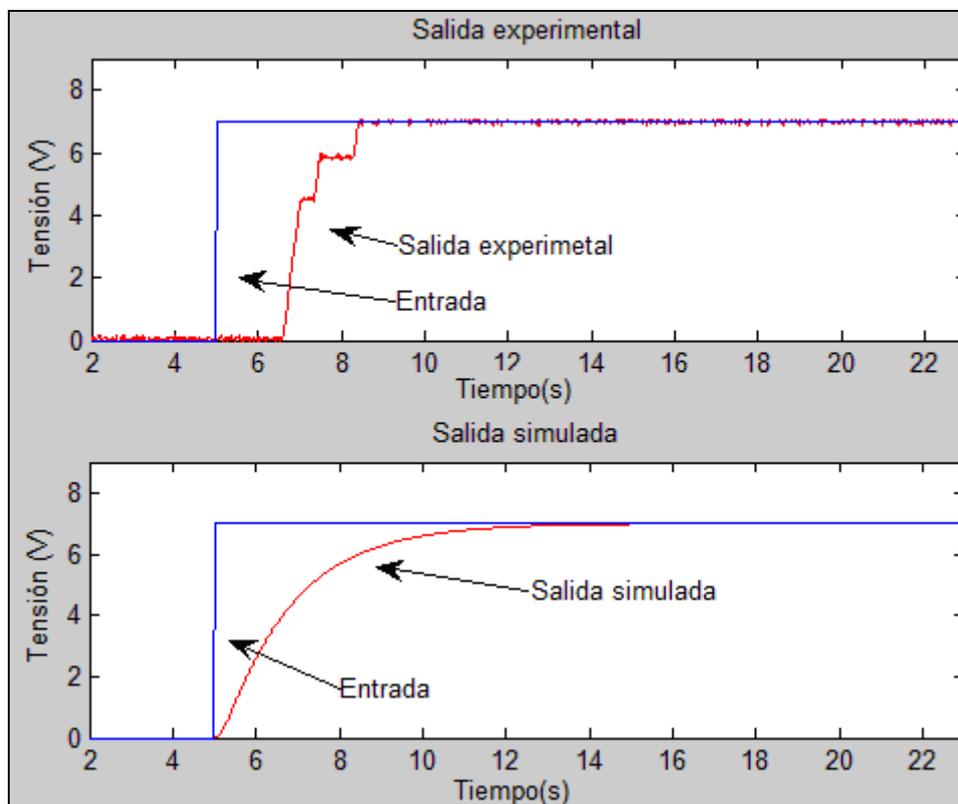


Figura 4.7 Señales de la simulación con PID

El motivo de que la rapidez del sistema en simulación y en experimentación difiera se debe a que en el modelo no se han tenido en cuenta las no linealidades de las que consta esta plataforma. Tampoco era objetivo del trabajo hacer corresponder fielmente la experimentación con la simulación. Bastaba con establecer un control sobre la plataforma y ver que su modelo proporciona una respuesta similar. Controlar esta plataforma resulta una tarea complicada y cualquier control que se pueda hacer sobre ella se considera un buen objetivo.

Para visualizar la mejora que se ha alcanzado gracias al control mediante el PID ajustado se ha realizado la representación mostrada en la Figura 4.8. Ésta muestra una comparativa entre la salida de la plataforma en presencia y en ausencia del controlador.

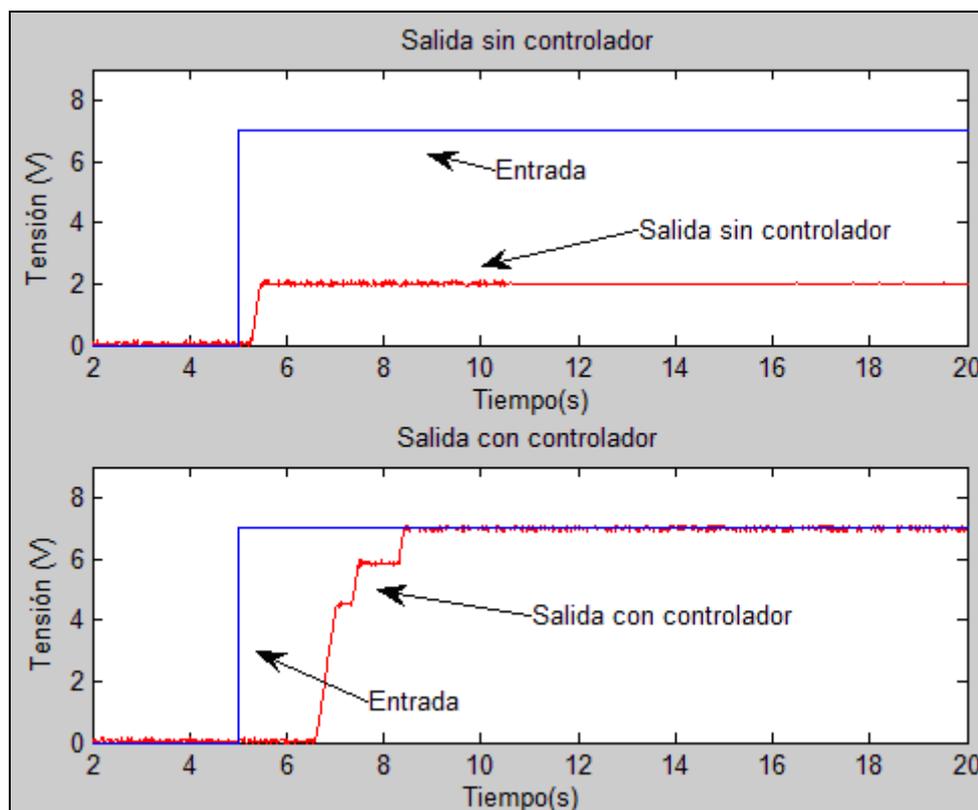


Figura 4.8 Salida en presencia y en ausencia de PID

En presencia de controlador, la plataforma se posiciona en el lugar indicado por la señal referencia (7 V) mientras que en ausencia de controlador la plataforma no llega en ningún caso a la posición que se le ha indicado a través de la señal de referencia.

## 4.4 Análisis de perturbaciones

Otro objetivo del trabajo consistía en comprobar la robustez del controlador diseñado ante perturbaciones externas, la perturbación consiste básicamente en modificar el peso que se desliza a través del actuador lineal.

La perturbación (Figura 4.10 y Figura 4.11) es un peso adicional que se atornilla por medio de tornillos con cabeza allén al peso que se desliza por el actuador. Este peso adicional pesa 5 Kg., por lo que la plataforma deberá mover un total de 10 Kg. El controlador probado es el mismo que muestra la expresión (21) mientras que el esquema utilizado para realizar las pruebas es el mostrado en la Figura 4.1. Los resultados obtenidos tras perturbar al sistema se muestran en la Figura 4.9.

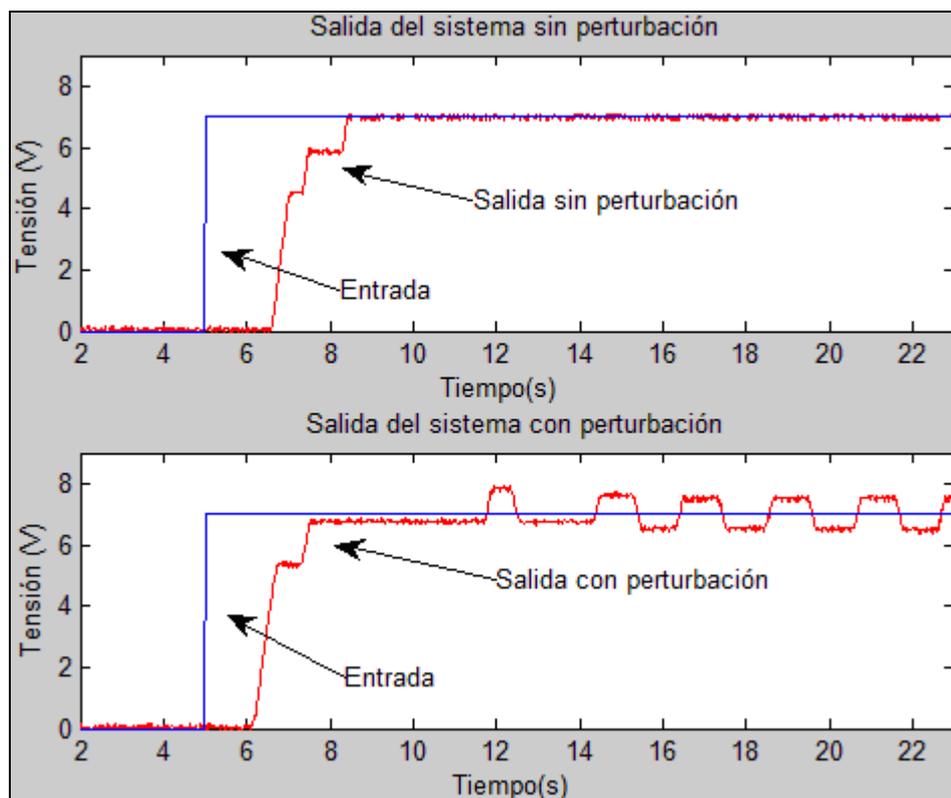
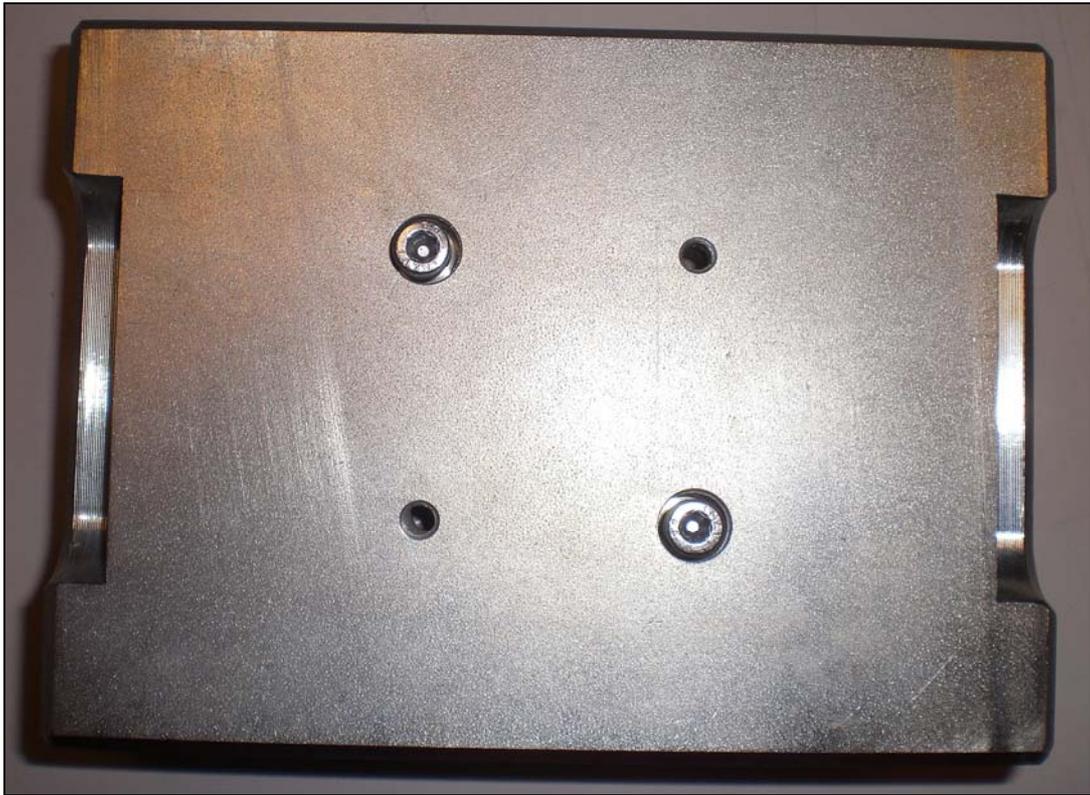
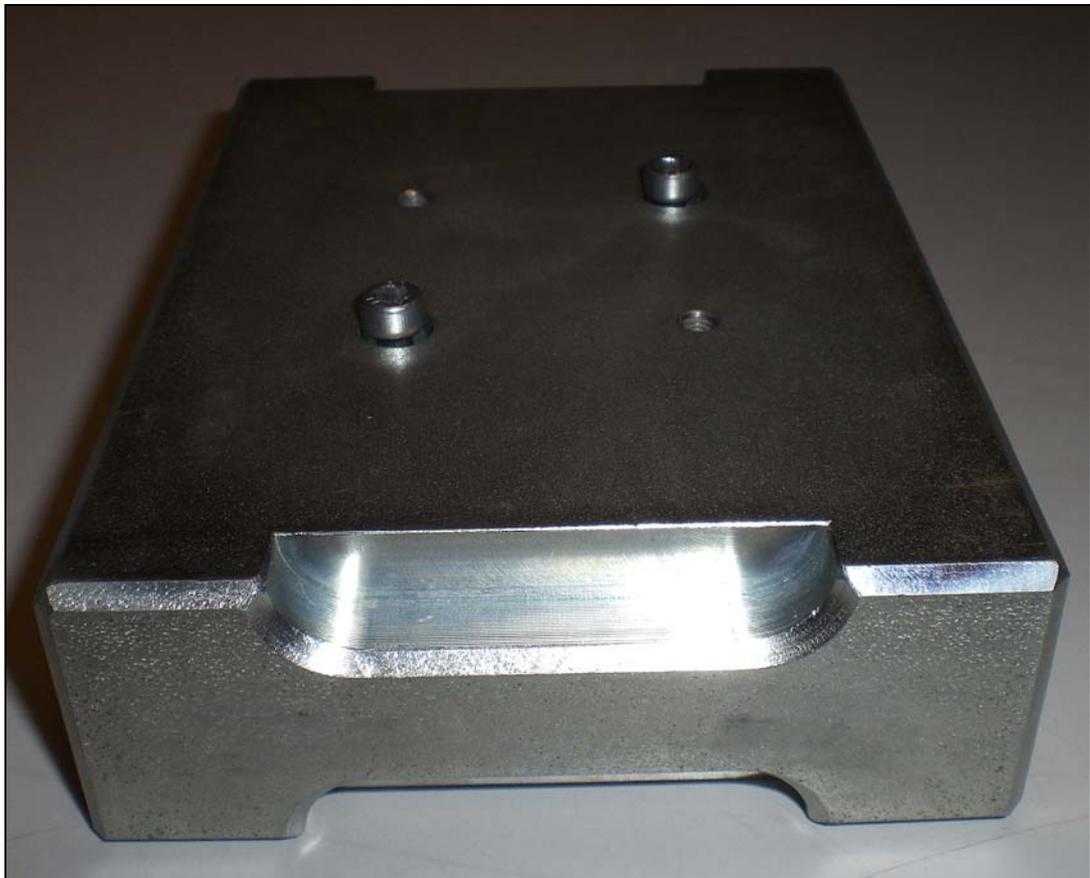


Figura 4.9 Señales en presencia y en ausencia de perturbación

Como puede apreciarse la plataforma comienza a oscilar cuando la perturbación entra en juego, era de esperar ya que el control implementado era sencillo y no aporta ningún método que trate el efecto de las perturbaciones. El control que se aplicará en el capítulo 5 se encargará de reducir estos efectos.



**Figura 4.10 Planta de la perturbación**



**Figura 4.11 Perfil de la perturbación**

## 5 Control fraccionario

### 5.1 Introducción

En esta parte del trabajo se desarrolla un controlador fraccionario  $PI^\lambda D^\mu$  que consiste en un PID cuyas respectivas partes integrales o derivativas son de órdenes no enteros. La expresión que representa a un controlador de orden fraccional se refleja en (22). Los valores de  $\lambda$  y  $\mu$  son números no enteros.

$$C(s) = k_c x^\mu \left( \frac{\lambda_1 s + 1}{s} \right)^\lambda \left( \frac{\lambda_2 s + 1}{x \lambda_2 + 1} \right)^\mu \quad (22)$$

Como se puede observar en la expresión (22), el controlador posee dos partes bien diferenciadas mostradas en las expresiones (23) y (24). La ecuación (23) corresponde a la parte integral mientras que la expresión (24) pertenece a la parte derivativa más un filtro.

$$PI^\lambda = \left( \frac{\lambda_1 s + 1}{s} \right)^\lambda \quad (23)$$

$$PD^\mu = k_c x^\mu \left( \frac{\lambda_2 s + 1}{x \lambda_2 + 1} \right) \quad (24)$$

La principal característica de este tipo de controladores es su gran robustez. Esta robustez se consigue haciendo que, en torno a una frecuencia de corte dada se produzca un llano en la representación en frecuencia de la fase del sistema. De esta forma, se conseguirá que a variaciones de ganancia, que provocan un desplazamiento de la representación de ganancia en frecuencia, el sistema presente una respuesta de sobreoscilación similar.

Para conseguir el llano de la fase en la representación en frecuencia, la parte integral (23) es la encargada de cancelar la pendiente de la fase de la planta a través de otra pendiente de la misma magnitud y signo contrario. Esto garantiza la robustez del

sistema ante cambio en la ganancia. Una vez cancelada la pendiente, la parte derivativa mostrada en (24) será la encargada de ajustar el controlador para los requisitos buscados por el usuario.

## 5.2 Cálculo del controlador

El cálculo del controlador se realiza a través de una aplicación que facilita el proceso de cálculo. Según se comentó en el epígrafe 3.3.4 del capítulo 3, el método en el que se basa acepta cualquier tipo de función de transferencia, pero esta aplicación solo acepta funciones de transferencia de la misma forma que las mostradas en la parte 'Plant' que se muestra en la Figura 5.1

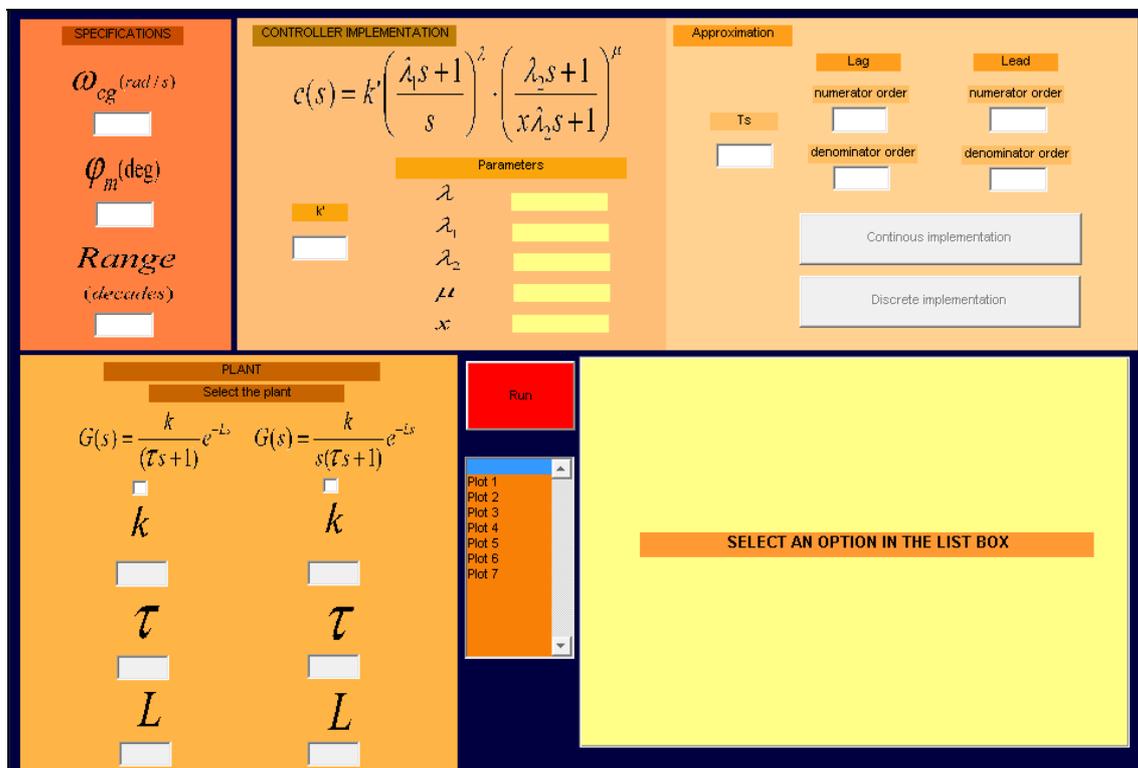


Figura 5.1 Herramienta para calcular el controlador fraccional

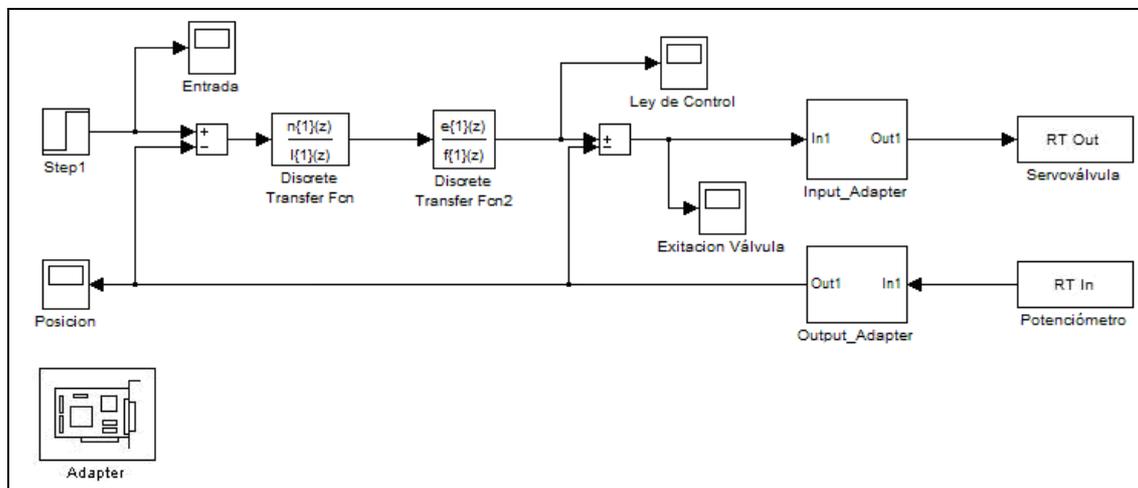
En la Figura 5.1 se muestra la interfaz resultante de lanzar la aplicación. En la parte 'Specifications' se configura la frecuencia a la que se desea que se produzca el llano en la representación de la fase además del margen de fase deseado. En la parte 'Plant', se selecciona una de las dos plantas posibles para posteriormente introducir los valores que corresponden a la función de transferencia de nuestro modelo (18).

El valor de  $k$  de la parte 'Controller Implementation' también es un parámetro de configuración mientras que los valores de  $\lambda$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\mu$  y  $x$  son los valores que devuelve la aplicación tras calcular el controlador. El bloque 'Approximation' se encarga de aproximar la función de transferencia del controlador con los valores de  $\lambda$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\mu$  y  $x$  a vectores de coeficientes que representan a los polinomios del numerador y denominador resultados. Así se podrán realizar simulaciones o verificar el funcionamiento experimentalmente.

El valor de 'Ts' es el tiempo de muestreo para pasar de dominio continuo a discreto. Una vez realizadas las configuraciones oportunas se pincha 'Run' y automáticamente se calculan los valores del numerador y denominador en ambos dominios. En la parte inferior de la derecha se pueden ver diferentes representaciones en frecuencia.

### 5.3 Esquema desarrollado

La Figura 5.2 muestra el esquema seguido para comprobar el funcionamiento del controlador fraccional.



**Figura 5.2 Esquema para ajustar el controlador fraccional**

La aplicación anteriormente explicada calcula los valores de los coeficientes y los designa con los nombres  $n$ ,  $l$ ,  $e$  y  $f$  a través de dos funciones de transferencia que diferencian claramente la parte derivativa ( $n$  y  $l$ ) e integral ( $e$  y  $f$ ).

Simplemente incluyendo dos funciones de transferencia y nombrando numerador y denominador correctamente se representa fácilmente el controlador ya que los valores numéricos que representan a los identificadores  $n$ ,  $l$ ,  $e$ ,  $f$  están guardados en el espacio de trabajo de MATLAB.

## 5.4 Resultados obtenidos

Se probaron diferentes configuraciones del controlador hasta encontrar aquella que mejor ajuste al régimen permanente y dinámica deseada. Las primeras pruebas mostraron, al igual que en el caso del PID, que la plataforma oscilaba en torno al lugar donde se desea que se posicione. La Figura 5.3 muestra los resultados obtenidos tras las primeras pruebas.

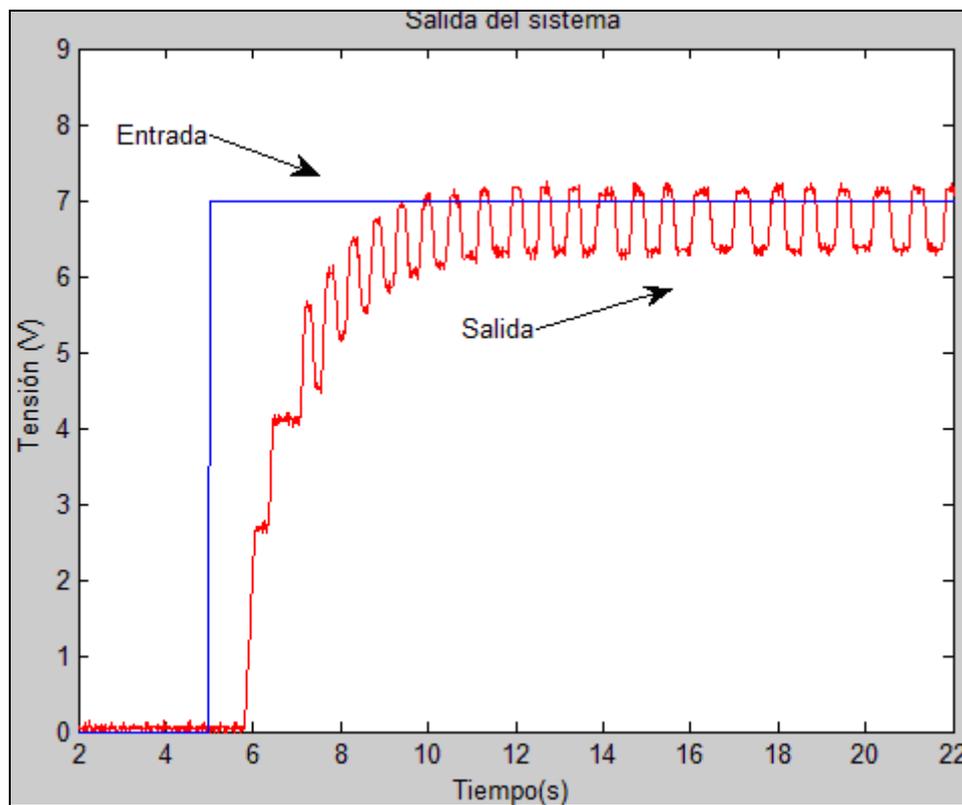
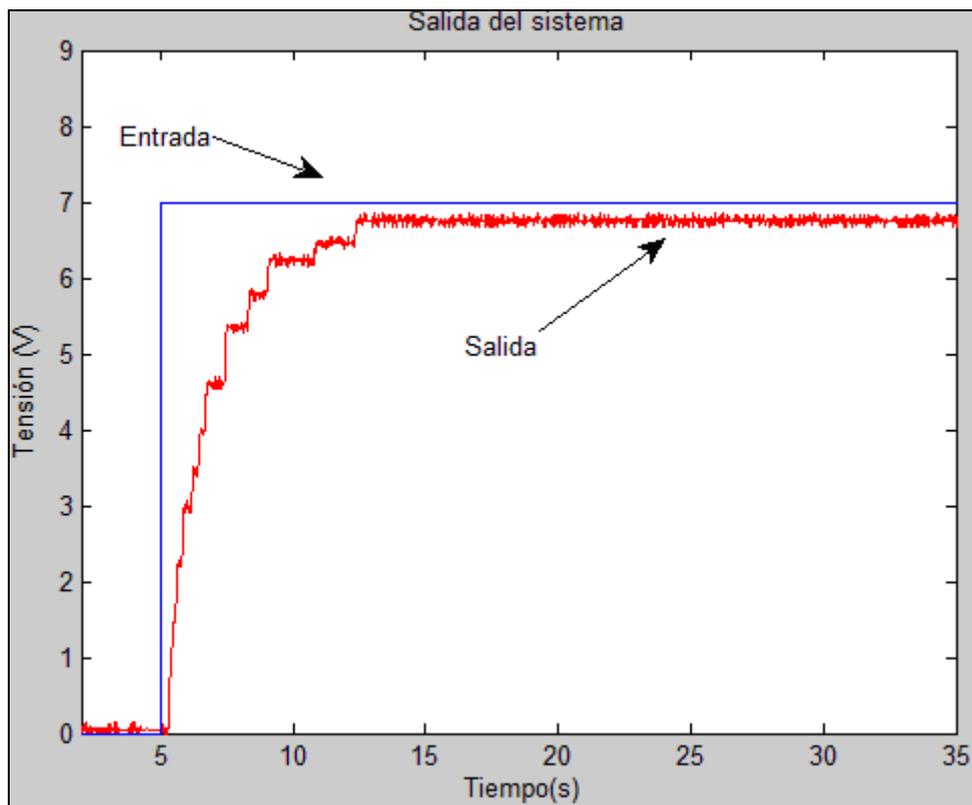


Figura 5.3 Primeras pruebas con controlador fraccionario

Tras varias pruebas se llegó al resultado que se muestra en la Figura 5.4, éste fue el mejor resultado que se obtuvo. En este caso, la masa no oscila en torno al punto de posicionamiento y la aproximación que se tiene sobre el régimen permanente tiene un error de aproximadamente 0.2 V sobre el valor de la referencia.

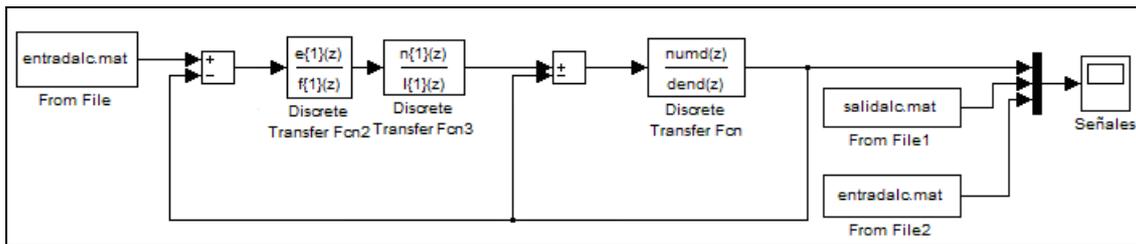


**Figura 5.4 Salida con controlador fraccionario ajustado**

La frecuencia de corte elegida es de 2 rad/s y la especificación de margen de fase es tal que el sistema sea presente una respuesta sobreamortiguada. Si sustituimos los valores de  $\lambda$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\mu$  y  $x$  que nos devuelve la aplicación sobre la expresión (22) tras configurar la herramienta para las premisas estipuladas en el diseño, la función de transferencia del controlador obtenido la podemos ver en (25).

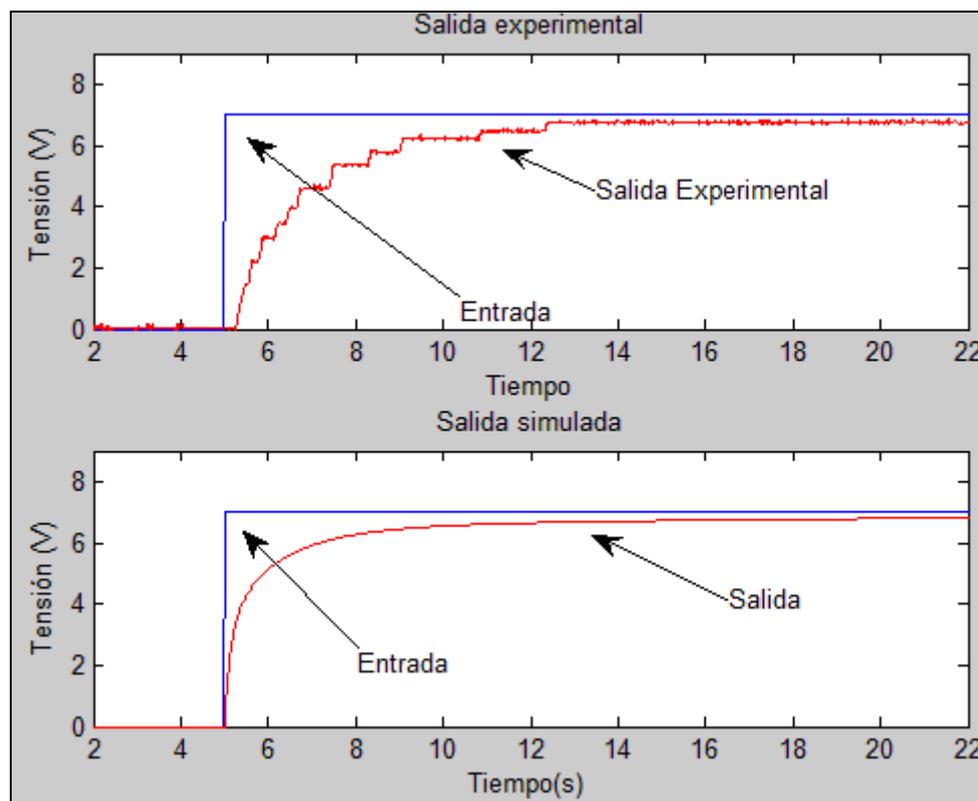
$$C(s) = \left( \frac{0.5s + 1}{s} \right)^{0.707} \left( \frac{6.27s + 1}{0.2735s + 1} \right)^{-0.099} \quad (25)$$

Al igual que en casos anteriores, se ha realizado una simulación para verificar el funcionamiento del controlador fraccional obtenido. Los vectores numd y dend son los coeficientes de la función de transferencia mostrada en (18) transformados a dominio discreto. Los valores n, l, e y f son los coeficientes de la aproximación realizada por la aplicación para calcular el controlador fraccional. El esquema de simulación del controlador fraccionario se muestra en la Figura 5.5.



**Figura 5.5 Simulación con controlador fraccionario**

Las señales que se visualizan en el Scope de la Figura 5.5 se muestran en la Figura 5.6. En ellas se puede apreciar que el sistema simulado es más rápido que el experimental. Al igual que en el caso del PID del capítulo anterior, este hecho es comprensible y esperado ya que el modelo con el que se ha simulado no incluye los efectos de la fricción ni de otras no linealidades que lo hacen más lento.

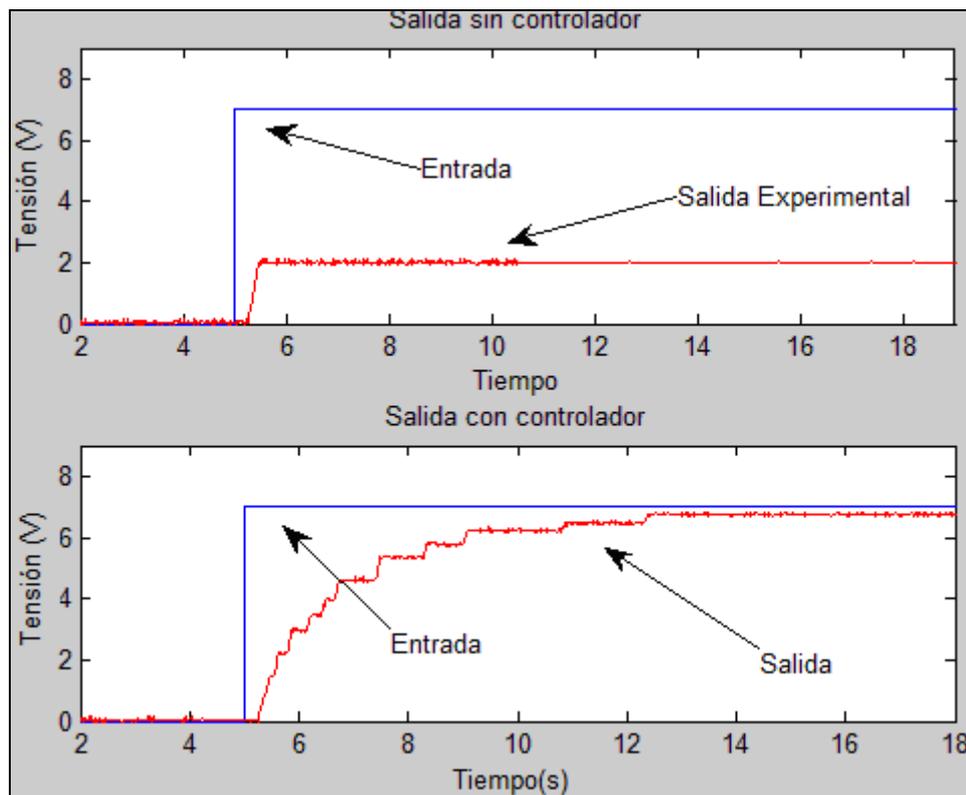


**Figura 5.6 Señales de la simulación con controlador fraccionario**

El régimen permanente del sistema simulado y el experimental son muy parejos ya que ambos tienen un error del orden de 0.2 V. Por los motivos explicados relativos al régimen permanente y a la rapidez del sistema, podemos asegurar que la simulación y

la parte experimental tienen unas semejanzas aceptables ya que las diferencias existentes son esperadas.

Al igual que en el caso de PID, se ha conseguido controlar el sistema para que sea capaz de posicionarse en un lugar concreto. Con el fin de apreciar la mejora que se ha producido en el sistema gracias al controlador fraccional se ha representado las señales que se aprecian en la Figura 5.7



**Figura 5.7 Salida con y en ausencia de controlador fraccionario**

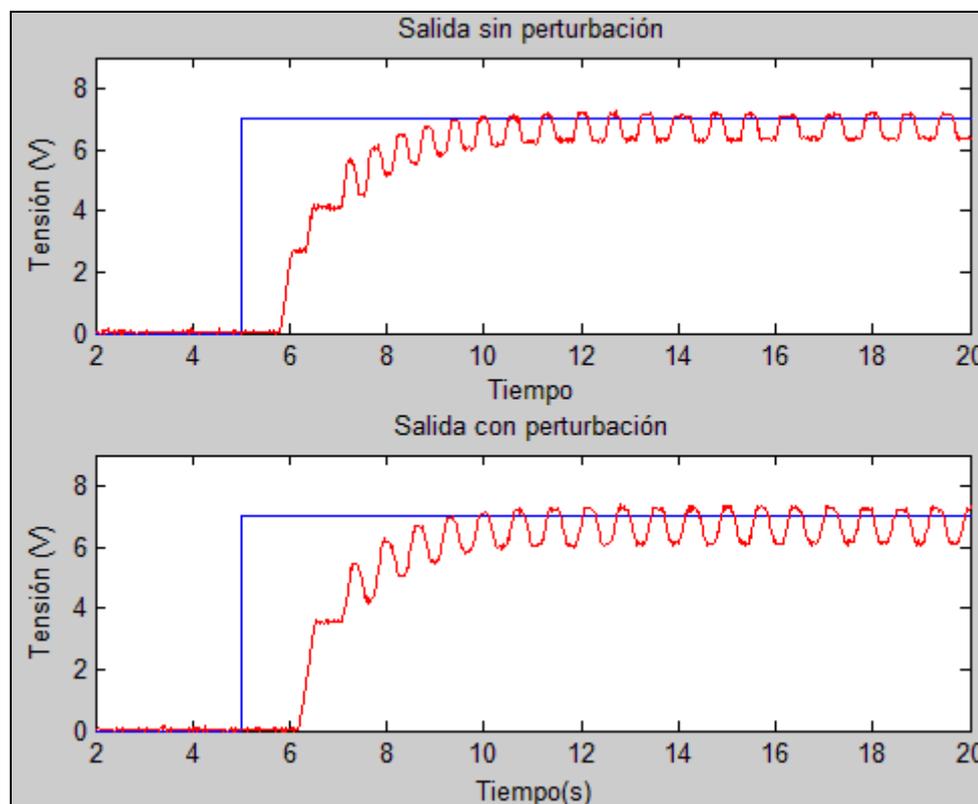
En la Figura 5.7 se muestran las señales que se obtienen al intentar controlar el sistema en presencia y ausencia del controlador. Como se puede apreciar, la mejora del régimen permanente es notable ya que se aproxima al valor dado en la referencia. Por otra parte, el sistema es más lento ya que al poder posicionarse en una posición más lejana el sistema tarda mayor cantidad de tiempo en llevar a la posición deseada.

Cabe resaltar aquí que la no eliminación total de error en estado estacionario se debe a la implementación de la acción integral fraccionaria que no es objeto de estudio en este proyecto.

## 5.5 Análisis de perturbaciones

Se decidió hacer una batería de pruebas sobre este tipo de controladores con el fin de apreciar cuan robustos son. Las pruebas, al igual que en el caso del PID, consistían en perturbar al sistema por medio de una masa adicional. Esta masa es la misma que la utilizada para perturbar al PID.

Una primera prueba consistió en ajustar el controlador para que el sistema oscilase y comprobar que el sistema presenta una amplitud en la oscilación muy similar en presencia de perturbación o en su ausencia. Esta primera prueba que se realizó se muestra en la Figura 5.8.



**Figura 5.8** Primeras pruebas de robustez con controlador fraccionario

En la Figura 5.8 se puede apreciar que la oscilación es muy pareja en ambos casos y de, aproximadamente, la misma amplitud. La perturbación no causa cambios apreciables en el comportamiento del sistema.

Si perturbamos al sistema cuando controlamos al sistema por medio del controlador mostrado en (25), es decir, con un ajuste ambicioso sobre el régimen permanente y dinámica, obtenemos la respuesta mostrada en la Figura 5.9. Como se puede apreciar, la respuesta cuando se perturba al sistema y en su ausencia es muy similar.

Según las dos pruebas mostrada en la Figura 5.8 y la Figura 5.9. Podemos sacar dos conclusiones claras. La primera de ellas es que el método de diseño de controladores PID fraccionario es eficaz y la segunda ellas es que el controlador fraccionario permite un comportamiento más robusto del sistema ante cambios en la ganancia.

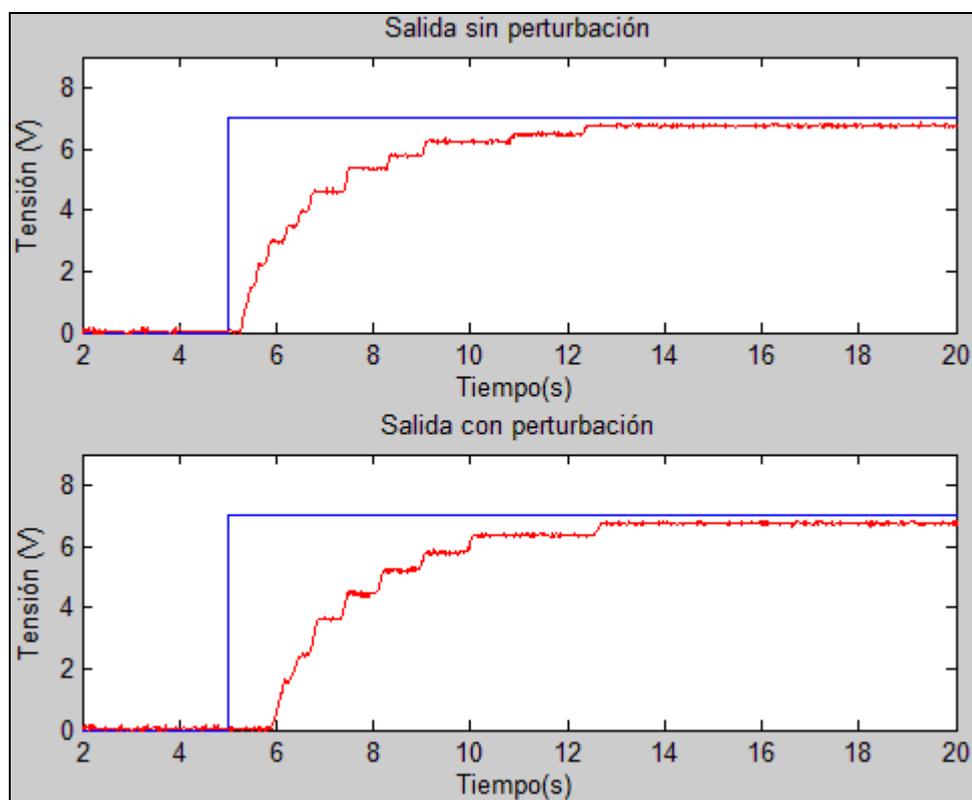


Figura 5.9 Sigüientes pruebas de robustez

## 6 Comparativa entre estrategias

### 6.1 Introducción

En esta parte del trabajo, se realizará una comparación entre las dos estrategias de control utilizadas. En los dos capítulos anteriores, cada controlador posee un modelo de función de transferencia diferente por lo que la cantidad de polos y ceros de cada controlador hacen que la plataforma responda de diferente manera.

Establecer una comparativa con los resultados de los capítulos anteriores no sería totalmente acertado ya que los dos controladores no están ajustados para las mismas especificaciones. Para establecer una comparativa real, a partir de las especificaciones con las que se ajustó el controlador fraccionario deberemos hallar su equivalente para los parámetros  $K_p$ ,  $K_d$  y  $K_i$  del PID.

### 6.2 Equivalencia entre fraccionario y PID

El controlador fraccional se configuró para un margen de fase  $70^\circ$  y para una frecuencia de corte de 2 rad/s. A partir de estas especificaciones y las ecuaciones (26) y (27), podemos obtener los parámetros equivalentes para el controlador PID.

$$|F(s)|_{w=w_c} = 1 \quad (26)$$

$$\angle F(s)|_{w=w_c} = -\pi + MF \quad (27)$$

siendo  $F(s)$  (28), el producto de la función de transferencia en lazo abierto del sistema y del controlador. Sabiendo que el controlador tiene una función de transferencia mostrada en (29) y el modelo en lazo abierto del sistema a controlar es la expresión mostrada en (18) las ecuaciones que nos quedan son (30) y (31).

$$F(s) = G(s) \cdot C(s) \quad (28)$$

$$C(s) = K_p + K_d + \frac{K_i}{s} \quad (29)$$

$$\left| \left( \frac{1.0908}{1+0.2074s} \right) \cdot \left( K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \right) \right|_{w=w_c} = 1 \quad (30)$$

$$\angle \left( \frac{1.0908}{1+0.2074s} \right) \cdot \left( K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \right)_{w=w_c} = -\pi + \frac{70 \cdot 2\pi}{360} \quad (31)$$

Haciendo el cambio  $s = jw$  y despejando los valores de  $K_p$ ,  $K_d$  y  $K_i$  de las expresiones (30) y (31) se obtienen los parámetros para configurar el PID. Disponemos únicamente de dos ecuaciones mientras que los parámetros a obtener son tres. Para solucionar este problema, fijaremos un valor y a partir de él obtendremos los dos restantes.

El valor fijado de los tres posibles ha sido el valor de  $K_d$  ya que se vio en el ajuste del PID que ejercía un efecto negativo sobre el control. Haciendo la componente derivativa nula, los parámetros para configurar el bloque PID en Simulink son.

$$\begin{aligned} K_p &= 0.78 \\ K_d &= 0 \\ K_i &= 1.23 \end{aligned} \quad (32)$$

Con estos parámetros, ya tenemos el equivalente entre el controlador fraccionario y el controlador de tipo PID, ahora sí podremos establecer comparativas con las mismas especificaciones.

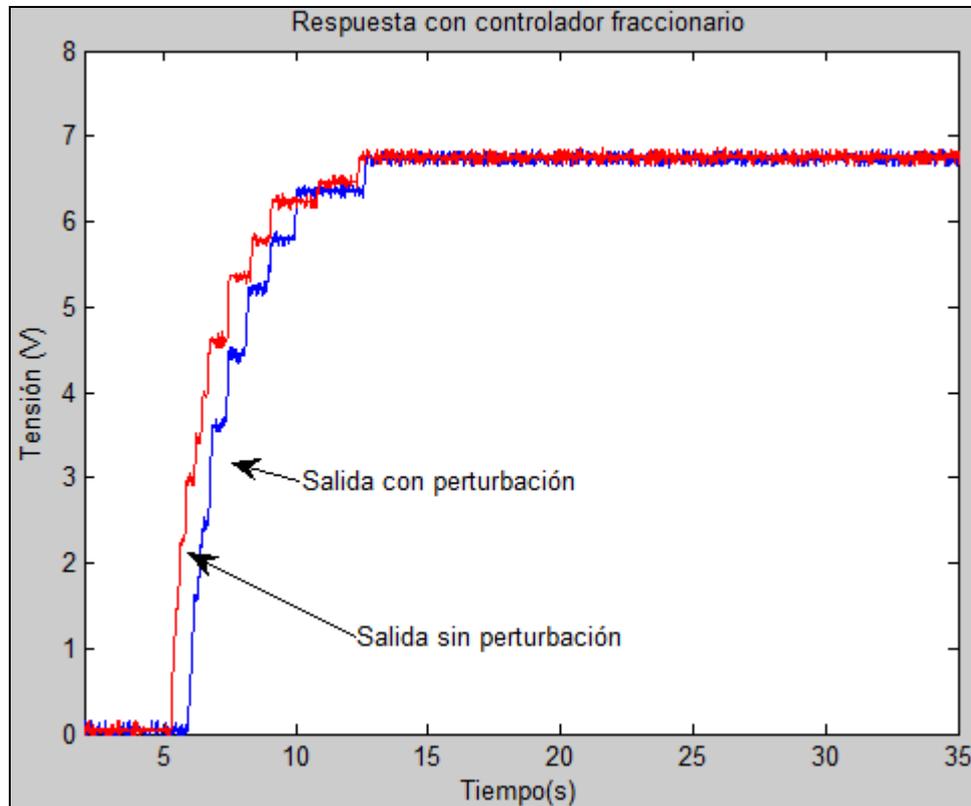
## 6.3 Resultados obtenidos

El esquema Simulink utilizado para realizar las pruebas es el mismo que el mostrado en la Figura 4.1, esta vez el bloque PID está configurado con los valores mostrados en (32).

Se realizaron dos pruebas con cada controlador, una de ellas en presencia de perturbación y la otra en su ausencia. De esta forma, estudiaremos cuán robusto es cada controlador a partir de las mismas especificaciones. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6.1 y la Figura 6.2.

En la Figura 6.1 se muestran los resultados obtenidos tras la experimentación con el controlador fraccionario, como se puede apreciar el sistema presenta una respuesta

muy pareja en ambas condiciones. Este hecho se debe a que el controlador absorbe el efecto de la perturbación.



**Figura 6.1 Resultados en comparativa con controlador fraccionario**

La Figura 6.2 muestra los resultados obtenidos tras las pruebas realizadas sobre el equivalente en PID. Si comparamos con la Figura 6.1, podemos ver que aproximadamente ambos sistemas tardan el mismo tiempo en alcanzar el régimen permanente, esto nos indica que el PID equivalente del fraccionario está bien obtenido.

La Figura 6.2 muestra que ante perturbaciones el sistema no responde de la misma forma. La amplitud de la sobreoscilación en presencia de perturbación aproximadamente se duplica, esto nos hace ver que el sistema no absorbe los posibles cambios en su configuración.

La principal conclusión que se saca de esta comparativa es que el controlador fraccionario es capaz de absorber los cambios en su configuración. En el caso

concreto de esta plataforma, es capaz de absorber todas las incertidumbres que tiene la plataforma y que se no se han tenido en cuenta en la obtención del modelo.

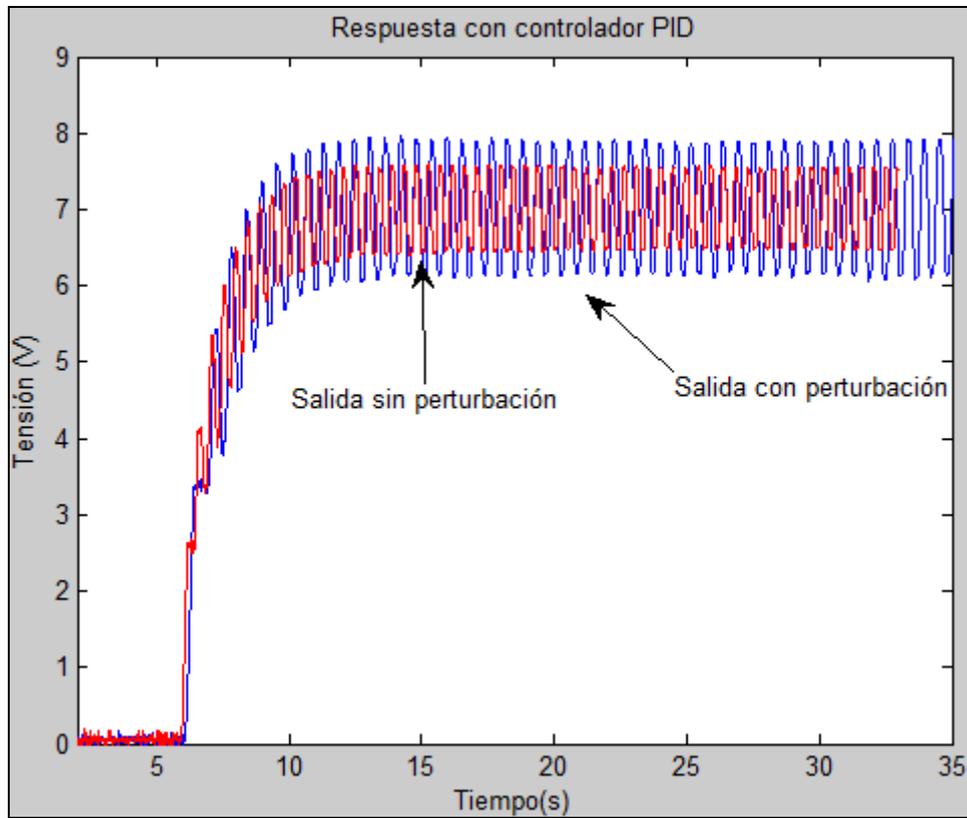


Figura 6.2 Resultados con PID

## 7 Conclusiones

El principal objetivo del trabajo consistía en obtener un modelo sencillo de una plataforma neumática. Una vez obtenido el modelo, se realizarían dos tipos de control sobre la plataforma y posteriormente se establecerían comparativas entre ambos en términos de robustez y régimen permanente.

Por otro lado, la plataforma y la tarjeta de adquisición (PCL 818) de datos utilizada poseen diferentes rangos de funcionamiento. Para poder realizar la identificación del sistema y establecer los controles a través de la PCL 818, previamente, se desarrollaría una etapa adaptadora de tensiones.

Las conclusiones a las que se han llegado tras el desarrollo de todo el trabajo, por orden cronológico, son:

- Se ha desarrollado una etapa adaptadora de tensiones por medio de electrónica básica que hace corresponder el rango de salida de la plataforma con el rango de entrada tarjeta de adquisición de datos PCL 818.
- Se ha realizado un estudio de las condiciones óptimas de funcionamiento de la plataforma y se ha apreciado que el efecto de las no linealidades modifican notablemente al funcionamiento de ésta. Algunas de las no linealidades observadas son:
  - Temperatura.
  - Presión máxima.
  - Fricción entre los cilindros y la masa.
  - Ruido en el cableado.
  - Tiempo de funcionamiento.
- Se ha realizado un estudio del funcionamiento de las partes que forman la plataforma y se ha obtenido un modelo aproximado de la válvula proporcional y de la plataforma completa a través pruebas experimentales sobre ella.



- Se ajustó experimentalmente a través de un controlador de tipo PID para unos requerimientos modestos. Al perturbar al sistema una vez controlado, se apreció que éste se salía del control. Se puede concluir que este tipo de controladores son poco robustos y no absorben cambios en la plataforma.
- Al ajustar al sistema por medio del controlador fraccionario y perturbarlo, éste presentaba una respuesta muy similar por lo que este tipo de controladores son robustos y ante cambios en la plataforma éstos harán que el sistema experimente un funcionamiento similar.
- En este tipo de sistemas en los que las no linealidades son una parte importante de la plataforma, los controladores fraccionarios permiten que su control sea más sencillo y eficaz debido a la robustez que se le otorga al sistema completo (plataforma y controlador).



## 8 Trabajos futuros

Como desarrollos futuros pueden incluirse las siguientes líneas de estudio:

- Desarrollar un modelo en el se incluyan las no linealidades más características de la plataforma: fricción, influencia de la temperatura,....
- Dividir el recorrido del cilindro en tramos e identificar cada tramo por separado, así se aproximará mejor el modelo.
- Modificar la disposición de la plataforma, de forma que el efecto de la gravedad entre en juego a la hora de identificar al sistema.
- Aplicar otras estrategias de control a la plataforma y establecer comparativas en términos de robustez con el controlador fraccionario.
- Encontrar el límite en el que el controlador fraccionario pierda robustez, es decir, perturbar al sistema hasta que el controlador no absorba tales efectos.
- Aplicar controladores fraccionarios a otros sistemas neumáticos o hidráulicos.



# Bibliografía

## MANUALES

- [1] "Neumática en bucle cerrado". FESTO, S.A. 1995
- [2] "Manual de funcionamiento PCL 818". Advantech 1998
- [3] "MATLAB User's guide". The MathWorks, 1999
- [4] "Simulink User's guide". The MathWorks 1999

## LIBROS

- [5] "Problemas de ingeniería de control moderna utilizando MATLAB", Ogata, K Prentice Hall 1997
- [6] "Ingeniería de control", Moreno, Luis. Balaguer, Carlos. García, Santiago. Ariel Ciencia 2003

## TESIS DOCTORALES

- [7] "Design Methods of Fractional Order Controller for Industrial Applications", Tesis Doctoral de Dña. Concepción Alicia Monje Micharet. 2006

## PROYECTOS FIN DE CARRERA

- [8] "Control de un sistema neumático de presión con una tarjeta de adquisición de datos", Agustín Treceño Orgaz. Septiembre 2000.
- [9] "Posicionador Electroneumático", Sergio Fernández Pacheco. Julio 1999.

## DIRECCIONES DE INTERNET

- [10] <http://www.advantech.com>
- [11] <http://www.mathworks.com>
- [12] <http://www.festo.com>
- [13] <http://www.wikipedia.com>
- [14] <http://www.google.com>
- [15] <http://www.wordreference.com>

# Anexos



**Diseño**

Regla graduada impresa en mm. con dos tornillos moleteados

**Función**

La regla se usa para medir la posición de la corredera del actuador lineal LA200 (150762)

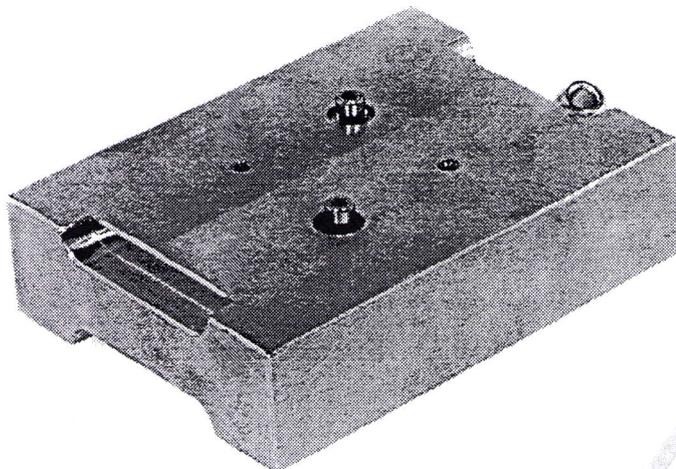
**Montaje**

La regla se fija como sigue:

- Empujar la corredera a su posición final
- Situar la regla en el lado del actuador lineal con la escala hacia arriba
- Fijar la regla ligeramente utilizando los dos tornillos moleteados suministrados ajustándola sobre los agujeros roscados en los extremos del actuador lineal (yugos).
- Ajustar la escala hasta que la marca del cero esté alineada con el borde exterior de la corredera.
- Apretar completamente los tornillos moleteados

Longitud total	4 800 mm
Longitud de la escala	350 mm
Unidades de la escala	mm
Resolución	1 mm
Método de montaje	Dos tornillos moleteados
Distancia entre agujeros de montaje	4 400 mm – 4 600 mm

Datos técnicos



m

**Diseño**

Peso metálico con dos tornillos de cabeza redonda y cuatro rebajes para facilitar su manipulación

**Función**

El peso se utiliza como carga en los ejercicios con actuadores lineales

**Montaje**

El peso puede asegurarse por alguno de los siguientes métodos:

1. El peso puede montarse en la corredera de los actuadores lineales LA200 (150762) o LA300 (150761). Los dos tornillos de cabeza redonda suministrados deben ser insertados en los agujeros avellanados del peso y atornillados a la corredera
2. El peso puede montarse en la corredera de los actuadores lineales (80850) o (80824) utilizando una placa intermedia (19500). Los dos tornillos de cabeza redonda suministrados deben ser insertados en los agujeros avellanados del peso y atornillados a la corredera

Pueden montarse varios pesos juntos apilándolos unos encima de otros y asegurándolos con los tornillos de cabeza redonda.

**Nota de seguridad**

Recomendamos utilizar calzado de protección cuando se maneja el peso, ya que si cae sobre los pies puede causar daños.



Masa	5 kg
Longitud	150 mm
Ancho	110 mm
Alto	40 mm
Método de montaje	Tornillos de cabeza redonda; 2 x M5

Datos técnicos



**Diseño**

Este actuador lineal consta de los siguientes componentes:

- Una corredera (1)
- Un cilindro de doble efecto sin vástago (2)
- Dos guías (3)
- Topes finales (5)
- Dos placas extremas (yugos) (4)

**Función**

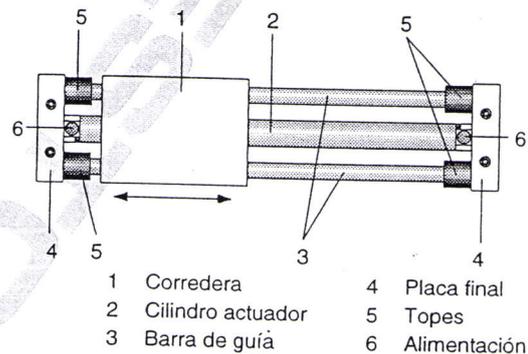
Las cámaras del cilindro se alimentan con aire comprimido por medio de sus dos conexiones. Unos potentes imanes permanentes unen el émbolo interno con la corredera. La velocidad de desplazamiento se halla limitada para que no pueda sobrepasarse la fuerza del acoplamiento magnético.

La corredera se desliza sobre rodamientos lineales de bolas. Se han dispuesto dos guías para aumentar la rigidez. Pueden montarse dispositivos adicionales directamente sobre la corredera.

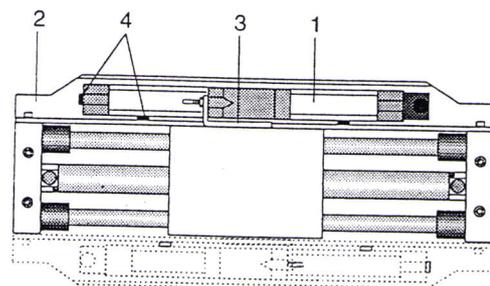
Las placas extremas tienen agujeros roscados para permitir el montaje de un sistema de medición de la posición. Esto permite montar la escuadra de soporte sobre la corredera como se desee. El sistema de medida es atornillado a la escuadra de soporte. La posición del sistema de medida, viene determinada por los topes.

En los extremos de las guías se han dispuesto unos topes elásticos para actuar como dispositivos de seguridad. Estos topes amortiguan el impacto de la corredera sobre las placas extremas si el sistema de control pudiera fallar.

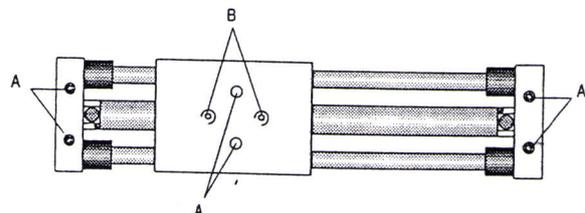
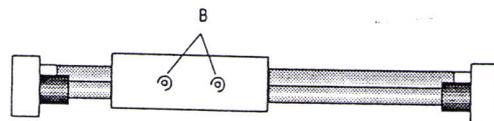
Pueden combinarse varios actuadores lineales en forma de ejes cruzados o en forma de pórtico. Para ello se han previsto agujeros pasantes y roscados para tornillos de M5 en una retícula de 50 mm, tanto en la corredera como en las placas extremas.



- |                     |                |
|---------------------|----------------|
| 1 Corredera         | 4 Placa final  |
| 2 Cilindro actuador | 5 Topes        |
| 3 Barra de guía     | 6 Alimentación |



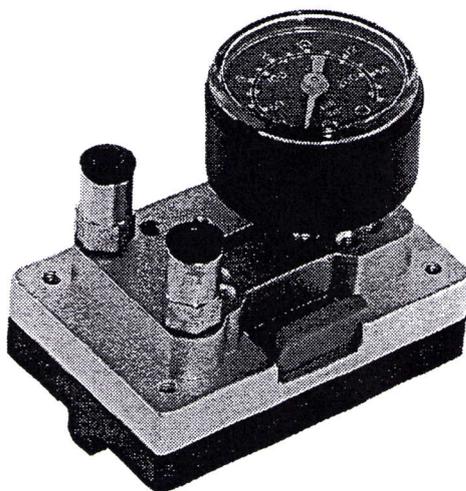
- |                               |               |
|-------------------------------|---------------|
| 1 Sistema medidor de posición | 3 Arrastrador |
|                               | 4 Tope        |



- |                           |
|---------------------------|
| A Agujeros pasantes Ø 6,4 |
| B Agujeros roscados M6    |

	Característica	LA-200
	Ejecución	Cilindro de doble efecto sin vástago, con acoplamiento magnético
Dimensiones	Carrera	200 mm
	Largo	480 mm
	Ancho	110 mm
	Alto	64 mm
	Diámetro del émbolo	25 mm
Taladros de montaje	A: Taladros	Ø 6,4 mm
	B: Rosca	M6
Peso	Completo	5,2 kg
	Corredera	2,7 kg
Datos de funcionamiento	Medio	Aire comprimido filtrado, (con o sin lubricación)
	Presión máxima de funcionamiento	8 bar
	Fuerza efectiva a 6 bar	200 N
	Fuerza de desacoplamiento magnético	400 N
<i>Datos técnicos</i>		<i>Sujeto a cambios</i>

FESTO Didactic



**Diseño**

El manómetro se halla roscado sobre una placa provista de dos tomas rápidas unidas. La unidad se monta sobre la placa perfilada por medio de un sistema de sujeción rápido con leva azul, (alternativa de montaje "A").

**Función**

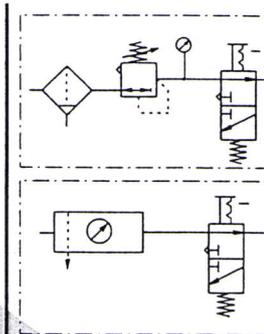
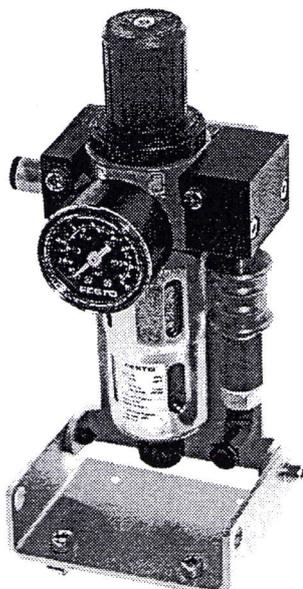
El manómetro indica la presión de un sistema neumático.

**Nota**

En funcionamiento continuo, el manómetro solo debe cargarse al 75% de su valor final de escala y en el caso de una carga alternativa, al 65% de su valor final de escala.

Medio	Aire comprimido, filtrado
Ejecución	Manómetro de tubo de Bourdon
Margen de indicación	0 a 1000 kPa (0 a 10 bar)
Conexión	G 1/8 Racor CU-PK-3 para tubo de plástico PUN 4 x 0.75
Grado de calidad	1,6
<i>Sujeto a cambios</i>	

Datos técnicos



**Diseño**

El filtro y regulador con manómetro, racores enchufables y válvula de cierre, se halla montado en un soporte basculante. El vaso del filtro se halla protegido por una funda metálica. La unidad se monta sobre la placa perfilada por medio de tornillos de cabeza cilíndrica y tuercas en T (alternativa de montaje "C")

**Función**

El filtro con separador de agua, limpia el aire comprimido de suciedad, óxido y condensados.

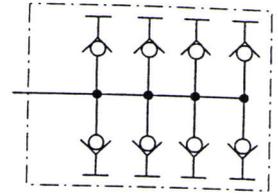
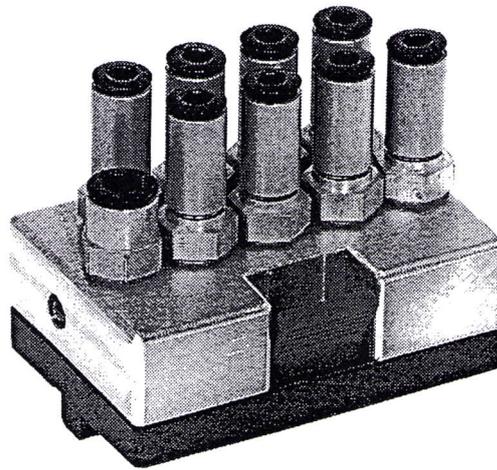
El regulador de presión ajusta al aire comprimido a la presión de funcionamiento y compensa las fluctuaciones de la presión. Una flecha en el cuerpo indica el sentido del caudal. El vaso del filtro dispone de un tornillo de purga. El manómetro muestra la presión regulada de salida. La válvula de cierre descarga la presión del sistema. La válvula de 3/2 se acciona por medio de la corredera deslizante azul.

**Nota**

Al montar el circuito, asegurarse de que la unidad de filtro y regulador se monta en posición vertical. El regulador de presión está provisto de un cabezal que puede girarse para ajustar la presión deseada. Apertando el tornillo ranurado en la cabeza del regulador, el ajuste puede bloquearse.

Medio	Aire comprimido	
Ejecución	Filtro sinterizado con separador de agua, regulador de tipo émbolo	
Caudal nominal estándar*	750 l/min	
Presión máxima de entrada	1600 kPa (16 bar)	
Presión máx. de func.	1200 kPa (12 bar)	
Grado de filtración	40 µm	
Volumen de condensado	14 cm <sup>3</sup>	
Conexión	G 1/8 Racor CU-PK-4 para tubo de plástico PUN-6 x 1	
* Presión de entrada	1000 kPa	(10 bar)
Presión de salida	600 kPa	(6 bar)
Diferencial de presión	100 kPa	(1 bar)
<i>Sujeto a cambios</i>		

Datos técnicos



**Diseño**

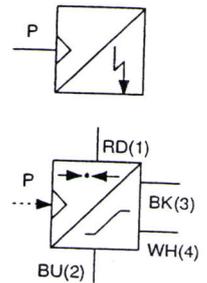
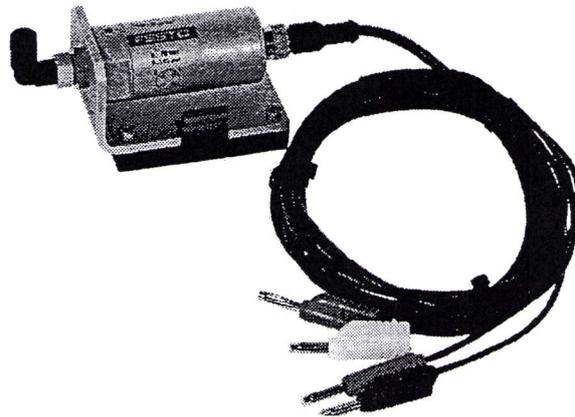
El distribuidor consiste en ocho enchufes rápidos autobloqueados, roscados sobre una placa universal. La unidad de monta sobre la placa perfilada por medio de un sistema de sujeción rápido con leva azul (alternativa de montaje "A").

**Función**

La placa distribuidora con alimentación común P, permite alimentar de aire comprimido a un sistema desde ocho conexiones individuales.

Conexión	G 1/8 1x CU-1/8-6 para tubo de plástico PUN-6 x 1 8x KCU-1/8-4 para tubo de plástico PUN-4 x 0,75
Sujeto a modificaciones	

Datos técnicos



**Diseño**

Este sensor analógico de presión se halla montado en un soporte en escuadra, provisto de un sistema de sujeción rápida (alternativa de montaje "A"), adecuado para montaje sobre placa perfilada.

**Función**

Este sensor de presión analógico es un sensor de presión relativa piezorresistivo con un amplificador y un compensador de temperatura integrados en un cuerpo de aluminio. La presión a medir actúa a través de una capa de silicona sobre un elemento piezorresistivo. El cambio de señal producido en el elemento se emite como tensión o como corriente a través de un amplificador hacia el conector exterior. La señal de salida es calibrada, asegurando así que los sensores sea intercambiables.

**Asignación de pines**

- 1 Power supply + 24 V
- 2 Ground
- 3 Voltage output
- 4 Current output

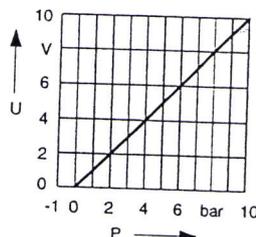
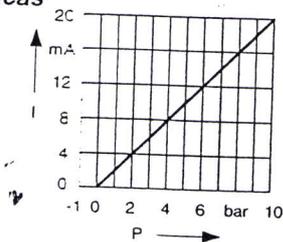


**Codificación por colores**

Las clavijas del cable D.AS-SDE-K-4-GD están codificadas por colores como sigue:

+ 24 V	Rojo	(RD)
0 V	Azul	(BU)
Tensión de salida	Negro	(BK)
Corriente de salida	Blanco	(WH)

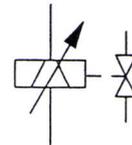
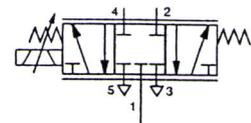
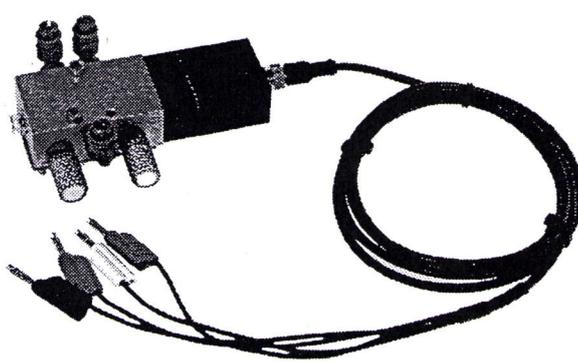
**Curvas características**



Rango de presiones*	de 0 bar a + 10 bar
Presión máxima permisible	14 bar
Alimentación	de 12 a 30 V DC
Rizado residual de UB	10% según DIN 41 755
Consumo	Con salida por corriente, aprox. 35 mA
	Con salida por tensión, aprox. 15 mA
Resistencia de carga	Salida por corriente 300 ohms máx. $RB \leq (UB - 3 V) / 30 \text{ mA}$ Salida por tensión 4 kOhms max.
Error total	$\pm 1\%$ del valor final de escala
Deriva térmica del punto cero	$< 0.3\%$ del valor final de escala/10K
Deriva térmica del valor final de escala	$< 0.3\%$ del valor final de escala/10K
Frecuencia máxima	100 Hz
Medio	Aire comprimido filtrado, (con o sin lubricación)
Temperatura ambiente de funcionamiento	0 a + 85 °C
Rango compensado	+ 10 a + 70 °C
Temperatura de almacenamiento	- 25 to 125 °C
Protección eléctrica	A prueba de cortocircuito y polaridad inversa
Grado de protección	IP 65
Materiales	Al, anodizado; Silicona
Peso	265 g
Cable	4-hilos, 2 m
Conexión eléctrica	Zócalo de 4-pines, Clavijas de 4 mm
Conexión neumática	Rosca hembra G 1/4 con racor CS de montaje rápido
<i>Sujeto a cambios</i>	

Datos técnicos

\* El sensor también suministrará una señal con presiones de  $< 0$  bar. En este caso no se garantizan la linealidad y la proporcionalidad.

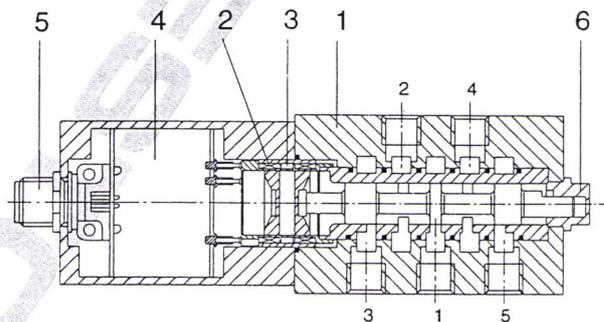


**Diseño**

La válvula proporcional MPYE-5-1/8 está montada en una placa que incorpora un sistema de sujeción rápido (alternativa de montaje "A"), adecuado para placa perfilada. La válvula está provista de racores enchufables LCU y de dos silenciadores.

Los principales componentes internos de la válvula proporcional son:

- Una válvula neumática de 5/3 vías de corredera deslizante, con posición central cerrada (1)
- Una armadura de accionamiento (2) para posicionar la corredera de la válvula
- Un sensor (3) para medir la posición de la corredera de la válvula
- Una electrónica integrada (4) para controlar la posición de la corredera de la válvula.



- 1 Válvula de 5/3 vías
- 2 Armadura tubular
- 3 Sensor
- 4 Electrónica interna
- 5 Conexión eléctrica
- 6 Tapa de cubierta

**Función**

La válvula distribuidora proporcional convierte una señal de entrada analógica en las aperturas de sección de paso adecuadas. A la mitad de su tensión nominal, es decir, a 5 V, la válvula asume su posición media neumática en la cual todos los bordes de control se hallan cerrados, de forma que, aparte de las fugas, el aire no atraviesa la válvula. A 0 y a 10 V respectivamente, la válvula asume una de sus posiciones extremas, con la máxima sección de paso.

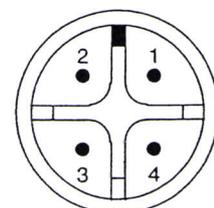
Una armadura tubular acciona directamente en la corredera de la válvula, actuando como un transductor electromecánico. Un regulador electrónico integrado para el recorrido de la corredera (bucle de regulación de posición subordinado) permite obtener unas buenas características estáticas y dinámicas, que se manifiestan en una baja histéresis (por debajo del 0,3%) corto tiempo de accionamiento (típicamente 5 ms) y una frecuencia muy elevada (hasta aprox. 100 Hz). Con ello la válvula es particularmente adecuada para ser utilizada como elemento final de control en combinación con un regulador de posición de alto nivel, para el posicionado de un cilindro neumático.

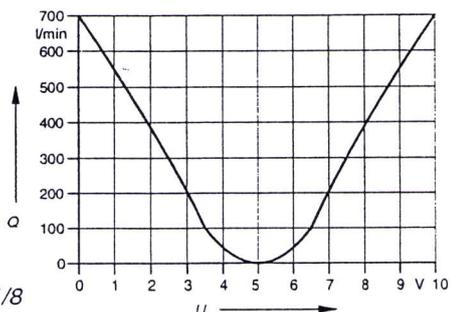
Si la corredera de la válvula se atasca, por ejemplo debido a la suciedad, puede retirarse el cabezal (6) que cubre la válvula y la corredera puede moverse manualmente.

**Conexión eléctrica**

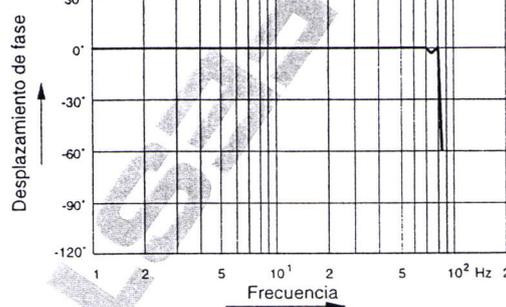
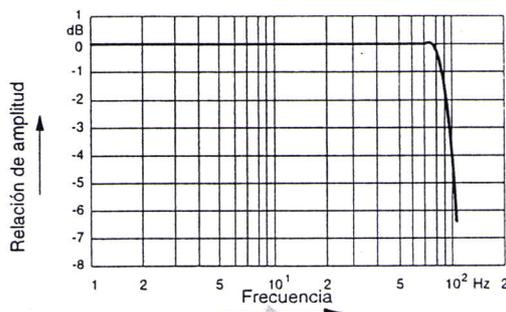
La asignación de pines del zócalo de la tapa y el código de colores para las clavijas del cable D.AS-SDE-4-GD se muestran en la tabla siguiente.

Pin	Conexiones	Clavija
1	Alimentación + 24 V	Rojo
2	Alimentación 0 V	Azul
3	Señal de tensión	Negro
4	Tierra de la señal	Blanco





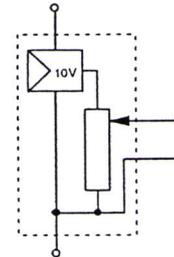
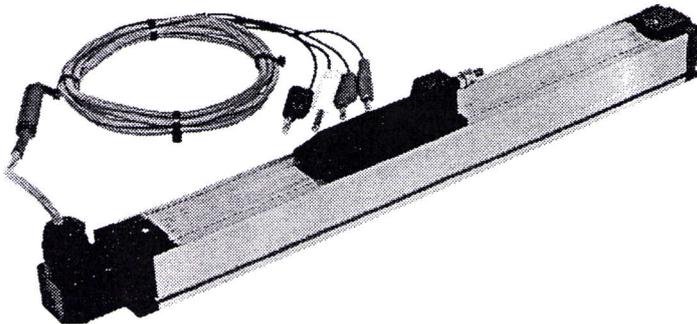
Característica del caudal MPYE-5-1/8



Característica de la frecuencia MPYE-5-1/8

	Medio	Aire comprimido filtrado, (con o sin lubricar)
	Rango de temperatura del medio	+ 5 a + 40 °C, sin condensar
	Conexiones, neumática	G 1/8
	Conexiones, eléctrica, seguro de polaridad	Zócalo SIE-GD N° 18494
	Paso nominal	6 mm
	Presión de funcionamiento, valor nominal	6 bar
	Presión de funcionamiento, valor máximo	10 bar
	Caudal a la presión nominal, máximo	700 l/m
	Tensión de funcionamiento, valor nominal	24 V DC
	Consumo, corredera en posición media	2 W
	Consumo, valor máximo	20 W
	Tensión de consigna analógica	0 a 10 V DC
	Valor nominal en posición media neumática	5 V DC
	Resistencia de entrada	70 kOhms
	Duración del ciclo según VDE 0580	100%
	Grado de protección según DIN 40.050 junto con el conector SIM-GD 18.494	IP 65
	Frecuencia límite (- 3 dB) a P <sub>max</sub> y con un recorrido de corredera 20% a 80%	100 Hz
	Tiempo de accionamiento P <sub>max</sub> y con un recorrido de corredera del 20% a 80%	5 ms
	Histéresis relativa a la posición de la válvula	0.3%
	Linealidad relativa a la posición de la válvula	1.0%
Dimensiones	Longitud	129 mm
	Ancho	45 mm
	Alto	26 mm
Tallados de montaje	Diámetro	5,5 mm
	Peso, completo	0,32 kg
	Cable	cable de 4-hilos, 2 m
	Conexiones neumáticas	3 x G 1/8; LCS para tubo de plástico PU-4
Sujeto a cambios		

Datos técnicos



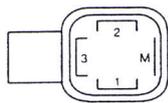
**Diseño**

Este potenciómetro lineal es un potenciómetro de corredera sin vástago y con conexiones en ambos extremos. Se halla montado en un perfil de aluminio y se fija al actuador lineal LA-200 (Nº art. 150762) con la ayuda del kit de montaje (Nº art. 150765). La conexión eléctrica es por medio de un cable (Nº art. 117078). El cable tiene terminales rectangulares en un extremo, para el potenciómetro lineal, y cuatro clavijas en el otro extremo. El cable incorpora una alimentación de referencia y un convertidor de impedancia.

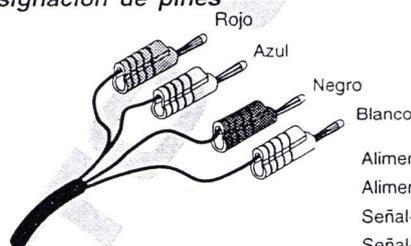
**Función**

El potenciómetro lineal suministra una tensión que es proporcional a la tensión de alimentación y a la posición del patín. Su material resistivo consiste en una capa de plástico conductor, que tiene la ventaja sobre los potenciómetros bobinados, de ofrecer una mayor resolución y una duración también mayor.

**Asignación de pines**



- 3 Alimentación + 10 V
- 1 Tierra 0 V
- 2 Señal de tensión 0 V...+ 10 V
- M Malla



- Alimentación + 13 V...+ 30 V Rojo
- Alimentación 0 V Azul
- Señal+ 0 V...+ 10 V Negro
- Señal- Blanco

Tensión de funcionamiento admisible <sup>1)</sup>	13...30 V DC
Resistencia del potenciómetro	5 kOhms
Tolerancia de la resistencia	± 20%
Corriente recomendada en el patín	≤ 1 µA
Recorrido de trabajo eléctrico efectivo	304 mm
Tensión de salida <sup>1)</sup>	0...10 V DC
Temperatura ambiente de funcionamiento <sup>1)</sup>	-30...+ 70 °C
Error máx. de linealidad	± 0,07% FS*
Resolución y repetibilidad	≤ 0,01 mm
Protegido contra polaridad inversa	Si
Resistencia de aislamiento (potenciómetro)	< 100 MOhms a 500 V, 0,1 bar
Rigidez dieléctrica (potenciómetro)	500 V <sub>rms</sub> a 50 Hz, 1 min, 1 bar
Velocidad de ajuste	≤ 10 m/s
Aceleración durante el ajuste	≤ 200 m/s <sup>2</sup>
Fuerza de accionamiento (horizontal)	< 1 N
Nº máx. de accionamientos	10 <sup>8</sup>
Material (caja)	Aluminio
Peso	720 g
Conexiones	Cable con clavijas

**Datos técnicos**

\* FS = Del valor final de escala

<sup>1)</sup> Válido para el potenciómetro, incluyendo el convertidor de impedancia