

SERVO DE POSICIÓN Y VELOCIDAD IMPLEMENTADO CON CILINDRO
DIFERENCIAL Y CONTROLADO EN LABVIEW PARA EL BANCO REXROTH

HUGO ALFONSO SALCEDO ELLES
LADY JOHANNA CALDERÓN LAMUS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2016

SERVO DE POSICIÓN Y VELOCIDAD IMPLEMENTADO CON CILINDRO
DIFERENCIAL Y CONTROLADO EN LABVIEW PARA EL BANCO REXROTH

HUGO ALFONSO SALCEDO ELLES
LADY JOHANNA CALDERÓN LAMUS

Trabajo de grado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director
ABEL ANTONIO PARADA CORRALES
Ingeniero Mecánico. MS.c

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2016

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	26
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE GRADO	28
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	28
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	28
1.3 OBJETIVOS.....	29
1.3.1 Objetivo general.....	29
1.3.2 Objetivos específicos.....	29
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	30
2. MARCO TEÓRICO.....	31
2.1 ELABORACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	31
2.1.1 Metodología para la generación de modelos matemáticos.....	31
2.2. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DINÁMICOS	32
2.2.1 Estabilidad	32
2.2.2 Sensibilidad	33

2.3 FUNCIONAMIENTO DEL SERVOACTUADOR REXROTH	34
2.3.1 Banco de pruebas REXROTH	34
2.3.2 Fuente de potencia hidráulica.....	34
2.3.3 Fuente de potencia eléctrica.....	36
2.3.4 Actuador hidráulico lineal diferencial perturbable	37
2.3.5 Actuador hidráulico lineal diferencial	37
2.3.6 Electroválvula proporcional de alta prestación dinámica Rexroth 4WRPEH6	38
2.3.7 Válvula reductora de presión	40
2.3.8 Electroválvula direccional 4/2 conmutable.....	41
2.3.9 Electroválvula proporcional Rexroth 4WREE6.....	42
2.3.10 Transductor de posición LVDT.	43
2.3.11. Tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6212.....	44
2.3.12 Áreas de montaje de pruebas.....	45
2.3.13 Adecuación de señales.....	46
3. MONTAJE DE LOS SERVOSISTEMAS DE POSICIÓN Y VELOCIDAD.	48

3.1 SERVO DE POSICIÓN.....	48
3.2 SERVO DE VELOCIDAD.	52
4. MODELO DINÁMICO DEL SERVO DE POSICION	54
4.1 MODELO MATEMATICO DEL CILINDRO DIFERENCIAL.....	54
4.1.1 Segunda ley de Newton sobre el pistón del cilindro	54
4.1.2 Ecuación para el volumen en el cilindro	55
4.2 MODELO MATEMÁTICO DE LA ELECTROVÁLVULA PROPORCIONAL DE ALTA PRESTACIÓN DINÁMICA 4WRPEH6.....	57
4.2.1 Ganancia de caudal por cambios en la señal de comando	59
4.2.2 Ganancia de desplazamiento del spool por unidad de voltaje de comando a la electroválvula Kv.....	60
4.2.3 Ganancia de caudal por corrimiento del spool.....	62
4.2.4 Ganancia de presión por comando de la válvula.....	62
4.2.5 Sensibilidad de la Presión	63
4.2.6 Ganancia de caudal por cambios de presión en la válvula.....	64
4.3 MODELO DINÁMICO DE LA PLANTA DE POSICIÓN.....	65
4.4. ESTABILIDAD	68

4.5. INFLUENCIA DEL CONTROLADOR PD EN LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA.....	69
4.6. DISEÑO DEL COMPENSADOR POR ADELANTO FEED FORWARD.....	72
5. MODELO DINÁMICO DEL SERVO DE VELOCIDAD	75
5.1 MODELO MATEMÁTICO DEL CILINDRO	75
5.2 MODELO MATEMÁTICO DE LA ELECTROVÁLVULA PROPORCIONAL ..	76
5.2.1 Ganancia de caudal.....	76
5.2.2 Ganancia de presión por comando de la válvula.....	77
5.2.3 Sensibilidad de la presión.....	78
5.2.5 Determinación de la ganancia de la electroválvula KV	79
5.3 MODELO DINÁMICO DE LA PLANTA	81
6. IMPLEMENTACIÓN EN LABVIEW	84
6.1. IMPLEMENTACIÓN DEL SERVOSISTEMA DE POSICIÓN LINEAL.....	84
6.1.1. Panel Frontal	84
6.1.2. Diagrama de bloques.....	85
6.1.3. Señal de comando.....	87

6.1.4. Modelado de la planta	88
6.1.5. Bloque de control y simulación	88
6.1.6. Amplificación de la señal de control.....	90
6.1.7. Centrado de la electroválvula	90
6.1.8. Lectura, filtrado y equivalencia de la señal del sensor LVDT.	91
6.1.9. Calculo del Error	93
6.1.10. Bloque para guardar datos	94
6.2. IMPLEMENTACIÓN DEL SERVOSISTEMA DE VELOCIDAD.....	94
6.2.1. Panel frontal	95
6.2.2 Cambio de controlador	96
6.2.3. Señal de comando.....	96
6.2.4. Adecuación de la señal de salida	97
6.2.5. Rampas	97
6.2.6. Modelado de la planta	100
6.2.7. Bloque de control y simulación	100
6.2.8. Bloque para guardar datos	101

6.2.9. Gráfica de salida.....	102
7. VALIDACIÓN DEL MODELO DINÁMICO	103
7.1 DETERMINACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	103
7.2 COMPARACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL CON EL MODELO TEÓRICO	107
7.3 SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR.....	107
8. ANÁLISIS DE DATOS.....	110
8.1 RESPUESTA DEL SERVO DE POSICIÓN ANTE VARIOS ESCALONES	110
8.2 ANÁLISIS DEL SEGUIMIENTO DE LA ONDA SENO.....	111
8.3 ANÁLISIS DEL CONTROLADOR EN ESTADO TRANSITORIO.....	115
8.4 ANÁLISIS DEL CONTROLADOR DE POSICIÓN CON PERTURBACIÓN	116
8.4.1 Perturbación con el actuador en estado estable.....	116
8.4.2 Perturbación con el actuador en estado transitorio.....	117
9. GUÍA PARA LAS PRÁCTICAS EN EL LABORATORIO	120
9.1 PRÁCTICA DEL SERVO DE POSICIÓN.....	120
9.1.1. Componentes.	120

9.1.2. Procedimiento	120
9.2 PRÁCTICA DEL SERVO DE VELOCIDAD.	124
9.2.1. Componentes	125
9.2.1. Procedimiento	125
10. CONCLUSIONES	131
11. RECOMENDACIONES	133
BIBLIOGRAFIA	134
ANEXOS	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Respuesta sistema inestable	33
Figura 2. Respuesta sistema estable.....	33
Figura 3. Banco Rexroth	34
Figura 4. Módulo de potencia del banco	35
Figura 5. Puertos de suministro, descarga y load sensing.....	35
Figura 6. Módulo para montajes eléctricos del banco	36
Figura 7. Cilindro diferencial perturbable	37
Figura 8. Cilindro diferencial de 40 cm de carrera	38
Figura 9. Electroválvula proporcional de alta prestación dinámica	38
Figura 10. Vista detallada de la electroválvula.....	39
Figura 11. Electrónica integrada de la electroválvula proporcional	39
Figura 12. Válvula reductora de presión	40
Figura 13. Detalle de sección de la válvula reductora.....	41
Figura 14. Electroválvula direccional conmutable	41

Figura 15. Vista de detalle de la electroválvula conmutable.	42
Figura 16. Válvula proporcional.	43
Figura 17. Vista de sección de la electroválvula proporcional.	43
Figura 18. Bobina primaria y secundaria.	44
Figura 19. Sensor LVDT Tempsonic.....	44
Figura 20. Tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6212	45
Figura 21. Zona de montajes.	45
Figura 22. Módulo de adecuación de señales	46
Figura 23. Detalle Posición de los interruptores.....	47
Figura 24. Detalle interruptor 3, control de la perturbación	47
Figura 25. Plano hidráulico del servo de posición.....	48
Figura 26. Montaje hidráulico servo de posición.	49
Figura 27. Plano eléctrico del servo de posición.....	50
Figura 28. Montaje eléctrico del servo de posición.	50
Figura 29. Detalle de conexión del sensor LVDT.....	50

Figura 30. Detalle conexión señal del sensor	51
Figura 31. Detalle conexión, envío de la señal a la válvula	51
Figura 32. Plano hidráulico servo de velocidad	52
Figura 33. Montaje hidráulico del servo de velocidad.	52
Figura 34. Plano eléctrico servo de velocidad.....	53
Figura 35. Montaje eléctrico del servo de velocidad.	53
Figura 36. Cilindro diferencial	54
Figura 37. Cilindro diferencial con volumen de control	55
Figura 38. Curva de ganancia de caudal de la electroválvula proporcional de alta respuesta dinámica.....	59
Figura 39. Módulo de comando de la válvula	60
Figura 40. Módulo del potenciómetro.....	60
Figura 41. Montaje de la prueba para el cálculo de Kv.	61
Figura 42. Gráfica de Kv	61
Figura 43. Curva de ganancia de presión por señal de comando.....	62

Figura 44. Diagrama de bloque del controlador en lazo cerrado	65
Figura 45. Diagrama de bloques de la planta.	66
Figura 46. Diagrama de bloques con valores	67
Figura 47. Diagrama de polos.....	69
Figura 48. Diagrama de polos y ceros	70
Figura 49. Diagrama de bloque planta con controlador.	70
Figura 50. Sistema con compensador por adelanto.....	74
Figura 51. Diagrama de bloques del controlador de velocidad.	75
Figura 52. Ganancia de caudal por señal de comando.....	76
Figura 53. Ganancia de presión por señal de comando	77
Figura 54. Grafica de la ganancia Kv.....	80
Figura 55. Planta servo de velocidad.....	82
Figura 56. Planta del servo de velocidad con valores.....	83
Figura 57. Panel frontal del controlador de posición.	84
Figura 58. Diagrama de polos y ceros.	86

Figura 59. Tratamiento de la señal de comando.....	87
Figura 60. Modelado de la planta.....	88
Figura 61. Bloque de control y simulación	89
Figura 62. Amplificación de la señal	90
Figura 63. Centrado de la electroválvula proporcional de alta respuesta dinámica	91
Figura 64. Lectura LVDT.....	91
Figura 65. Configuración del DAQ Assistant2.....	92
Figura 66. Configuración del filtro	92
Figura 67. Conversión de voltios a cm en el LVDT	93
Figura 68. Cálculo y visualización del porcentaje de error	93
Figura 69. Almacenamiento de señal.....	94
Figura 70. Panel frontal del servo de velocidad	95
Figura 71. Diagrama para cambiar de controlador.....	96
Figura 72. Tratamiento de la señal de comando.....	96
Figura 73. Adecuación de la señal al usar el step.....	97

Figura 74. Rampas a disposición del usuario	98
Figura 75. Lógica para la prioridad de las rampas	98
Figura 76. Implementación de las rampas (Parte I)	99
Figura 77. Implementación de las rampas (Parte II)	100
Figura 78. Simulación de la planta.....	100
Figura 79. Bloque de control y simulación	101
Figura 80. Almacenamiento de la información	101
Figura 81. Gráfica señales de salida.....	102
Figura 82. Implementación onda senoidal	104
Figura 83. Importación de datos	105
Figura 84. Selección del rango adecuado para el análisis.....	105
Figura 85. Determinación de la función de transferencia de la planta	106
Figura 86. Respuesta al step del modelo de la planta de posición y la validación experimental	107
Figura 87. Sintonización del controlador PD	108
Figura 88. Valores de K_p y K_d	109

Figura 89. Resultados al step (Parte I)	110
Figura 90. Resultados al step (Parte II)	111
Figura 91. Onda seno de la salida del sistema	112
Figura 92. Ajuste de los datos de salida de la onda senoidal	113
Figura 93. Datos de comando onda senoidal	114
Figura 94. Respuesta al escalón del controlador PD y PD+FEEDFORWARD	115
Figura 95. Señal de voltaje con Feedforward y sin Feedforward.	116
Figura 96. Señal de voltaje con y sin Feedforward para el actuador en estado transitorio.	117
Figura 97. Respuesta del sistema con perturbación.	118
Figura 98. Configuración NI-MAX	121
Figura 99. Panel frontal servo de posición	122
Figura 100. Guía para la práctica del servo de posición (Parte I)	123
Figura 101. Guía para la práctica del servo de posición (Parte II)	124
Figura 102. Configuración de NI-MAX para las prácticas	126
Figura 103. Panel frontal posición para ir al de velocidad.....	126

Figura 104. Panel frontal del servo de velocidad para step.	127
Figura 105. Panel frontal del servo de velocidad con rampa.	127
Figura 106. Guía para la práctica del servo de velocidad (Parte I)	129
Figura 107. Guía para la práctica del servo de velocidad (Parte II)	130

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Constantes de la electroválvula	64
Tabla 2. Contantes para el diagrama de bloques de la planta.	66
Tabla 3. Raíces del denominador	69
Tabla 4. Constates de la electroválvula	80
Tabla 5. Constantes para hallar la ecuación de la planta.	82

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. DATA SHEET DEL SENSOR LVDT	136
ANEXO B. GANANCIA KV DE LA VALVULA DE POSICION.....	147
ANEXO C. GANANCIA KV DE LA VALVULA DE VELOCIDAD	148
ANEXO D. CARACTERIZACIÓN DE LA ELECTROVÁLVULA PROPORCIONAL DEL SERVO DE VELOCIDAD.....	149
ANEXO E. DATASHEET TARJETA NI USB 6212 DE NATIONAL INSTRUMENTS	150
ANEXO F. CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR LVDT	167
ANEXO G. TABLA DE VERDAD PARA PRIORIZAR LAS RAMPAS	168
ANEXO H. SEGUIMIENTO ONDA SENO	169
ANEXO I. RESPUESTA A DIVERSOS ESCALONES	173
ANEXO J. RESPUESTA DEL SISTEMA CON PERTURBACIÓN	176
ANEXO K. DATASHEET VALVULA TIPO 4WRPEH 6 C3 B04L -20/G24K0 /A1M	181
ANEXO L. DATASHEET VALVULA TIPO 4WREE 6 E08-24/G24K31/ A1V	193

RESUMEN

TITULO: SERVO DE POSICIÓN Y VELOCIDAD IMPLEMENTADO CON CILINDRO DIFERENCIAL Y CONTROLADO EN LABVIEW PARA EL BANCO REXROTH*.

AUTORES: HUGO ALFONSO SALCEDO ELLES
LADY JOHANNA CALDERÓN LAMUS**

PALABRAS CLAVES: SERVO, CONTROL, POSICIÓN, VELOCIDAD, HIDRÁULICO, CONTROL PD, LVDT, FEEDFORWARD.

DESCRIPCIÓN.

Se presentan las adecuaciones que se hicieron en el banco Rexroth del laboratorio de servosistemas de potencia fluida, adscrito a la escuela de Ingeniería Mecánica.

El banco es de uso académico pero todos los elementos que lo integran son de tipo industrial, en el área de servosistemas los elementos que se usan para hacer control son analógicos, por tal razón se implementa un control asistido por computadora usando una interfaz grafica en el software Labview que permite manipular las constantes: proporcional y derivativas. Se usa una tarjeta DAQ NI-USB 6212 de National Instruments para enviar y recibir datos a un sistema hidráulico. En este se desarrollaron dos sistemas de control: el primero es un servo de posición en lazo cerrado que usa como preactuador una válvula proporcional de alta respuesta dinámica, el actuador es un cilindro diferencial el cual se puede someter a perturbación usando otro cilindro diferencial mas pequeño ubicado axialmente, la realimentación del controlador la hace un sensor de posición LVDT que lee la posición real del vástago permitiendo posicionar el cilindro en un valor exacto. El segundo es un servo de velocidad en lazo abierto cuyo preactuador es una válvula proporcional que actúa sobre un cilindro hidráulico diferencial mas largo que el anterior lo que permite apreciar mejor los cambios de velocidad. La velocidad puede ser controlada al variar la apertura de la válvula, esto se hace enviándole un step o por medio de rampas automáticas en las que previamente se puede introducir el voltaje y el tiempo de ejecución de estas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica,
Director: Ingeniero Mecánico Msc. Abel Antonio Parada Corrales.

ABSTRACT

TITLE: SERVO POSITION AND SPEED WITH DIFFERENTIAL CYLINDER IMPLEMENTED AND CONTROLLED IN LABVIEW FOR BANK REXROTH*.

AUTHORS: HUGO ALFONSO SALCEDO ELLES
LADY JOHANNA CALDERÓN LAMUS**

KEYWORDS: SERVO, CONTROL, POSITION, SPEED, HYDRAULIC, PD CONTROL, LVDT, FEEDFORWARD.

DESCRIPTION

We presented the adjustments that were made in the bank Rexroth of laboratory servo fluid power, attached to the School of Mechanical Engineering. The bank use is academic, however all the elements in it are industrial type, in the area of system servo the elements used are type analog, for this reason, is implemented a control computer-aided using an interface plotted on the Labview software which allows handle variates: proportional and derivative. The card used is the DAQ NI USB -6212 National Instruments to send and receive data to a hydraulic system.

For hydraulic system two control schemes were developed: the first is a position servo closed loop using as pre-actuator a proportional valve high dynamic response, the actuator is a differential cylinder which can be subjected to disturbance using another smaller differential cylinder located axially. The feedback sign is produced by LVDT position sensor that reads the actual position of the cylinder and using the controller allow locate it in a exactly value. The second is a speed servo open loop whose pre-actuator is a proportional valve acting on a differential hydraulic cylinder longer than the previous allowing better appreciate the changes of speed. The rate can be controlled by varying the valve opening, this is done by sending a step or through automatic ramps that previously can be programmed the value of voltage and the execution time of these.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica,
Director: Ingeniero Mecánico Msc. Abel Antonio Parada Corrales.

INTRODUCCIÓN

En la industria actual se usan los sistemas hidráulicos para diversas aplicaciones, para aprovechar sus múltiples ventajas, entre las que se pueden mencionar: la fácil variación de velocidad, precisión de los actuadores y la capacidad de manejar grandes potencias con componentes relativamente pequeños. Por otra parte, gracias a la implementación de circuitos electrónicos se puede realizar un control de la potencia, que ha demostrado resultados confiables a través de la historia en aplicaciones aeroespaciales, industriales y móviles.

Los requerimientos de precisión, cortos tiempos de producción y reducción de gastos que exige la industria, inmersa en la economía de mercado, ha sido el principal potencial para desarrollar las tecnologías de control aplicadas a servosistemas hidráulicos. Los servos brindan una solución ante la necesidad de automatizar un proceso, sin embargo, el alto costo de los elementos utilizados conlleva a hacer un análisis costo beneficio antes de hacer la implementación.

Hacen parte del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, la asignatura profesional de potencia fluida y la asignatura electiva de servosistemas, que se encarga del estudio de la hidráulica proporcional en sistemas de lazo cerrado. La formación en estas disciplinas, es fundamental para el ingeniero mecánico actual ya que debe conocer e interactuar con sistemas de potencia y con servosistemas hidráulicos, que cada vez se aplican con mayor frecuencia en la industria a la hora de requerir un control de alta precisión.

En aras de garantizar una formación integral en las asignaturas mencionadas, la escuela de ingeniería mecánica pone a disposición de sus estudiantes el Laboratorio de Potencia Fluida y Servosistemas, allí se realizan las prácticas de control de posición, velocidad y fuerza por medio de servos. Cada práctica utiliza

un circuito electrohidráulico para simular una situación relacionada con el tema a estudiar. Usualmente, se cuenta con una interfaz virtual por medio de la cual el estudiante puede manipular el banco y desarrollar un aprendizaje por medio de la observación. También, el usuario puede cambiar la magnitud, el tipo de variable introducida en el sistema y analizar los efectos físicos que estos causan en el circuito.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE GRADO

La Universidad Industrial de Santander a través de la Escuela de Ingeniería Mecánica, fomenta el desarrollo de la región por medio del aprendizaje de sus estudiantes en las leyes de la hidráulica aplicadas a las máquinas que usan aceite como elemento para transmitir potencia.

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En el laboratorio de potencia fluida se cuenta con dos tipos de máquinas hidráulicas, las primeras son máquinas para evaluar cargas donde los montajes tienen un propósito específico y las segundas son bancos para entrenamiento, estas últimas resultaban insuficientes para que los estudiantes realizaran sus prácticas, para solventar esta necesidad la escuela invirtió en la compra de un banco de pruebas REXROTH, con elementos de tipo industrial para uso académico; el banco utiliza la tecnología más moderna del mercado aunque el control que usa es de tipo análogo, adquirir el software de la empresa constituiría una gran inversión. En vista de esto, los autores dieron versatilidad al banco en el área de control, desarrollando ellos mismos e implementando un control asistido por computador.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Por medio de este proyecto se quiere desarrollar un control asistido por ordenador para el banco REXROTH, esto permitiría un uso apropiado y óptimo por parte de los usuarios, que en su praxis, requieren el software para variar las constantes proporcionales, derivativas e integrales, y por consiguiente, observar las consecuencias en la precisión de la velocidad y la posición.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general.

Realizar la automatización del banco REXROTH por medio de una interfaz en formato HMI en LABVIEW así como las adecuaciones pertinentes, contribuyendo a la visión de la universidad de generar tecnología que solucione requerimientos reales.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Diseñar un control asistido por computador para el banco REXROTH para velocidad (lazo abierto) y posición (lazo cerrado) con una interfaz gráfica en LABVIEW donde el usuario puede controlar y monitorear las señales que se toman con una tarjeta de adquisición de datos DAQ NI-USB 6212.
- El controlador del banco (PID) debe tener la capacidad de estabilizar el sistema para las diferentes prácticas a realizar, de lo contrario tendría que determinar cuál técnica avanzada de control se debe implementar, dentro de las técnicas a experimentar estarán: control anticipativo o feedforward.
- Diseñar prácticas de laboratorio que le permitan al estudiante verificar lo aprendido en el aula de servosistemas de potencia fluida, se entregará al director del laboratorio guías que estén en condiciones apropiadas para el ambiente del lugar.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

El plan de estudios de ingeniería mecánica de la UIS ofrece formación en la rama de hidráulica y en el área de control. Para los estudiantes interesados en profundizar sus conocimientos se dicta la asignatura servosistemas de potencia fluida, que se encarga de la parte proporcional. El fortalecimiento en el aprendizaje de esta materia depende en gran medida de las prácticas que el estudiante puede realizar en el laboratorio, actualmente se cuenta con un servo de control de fuerza y uno de posición que se usa para controlar una bomba de pistones. Además, se compraron válvulas proporcionales REXROTH para tener flexibilidad a la hora de realizar las prácticas.

Este proyecto propone implementar un servo de posición y uno de velocidad que se controlan por medio del computador. Lo anterior, con el fin de facilitar el aprendizaje del estudiante y permitirle introducir cambios en las constantes (K_p , K_i y K_d) para entender su representación física.

Para ello, se tomara el software LabView de National Instruments, que tiene gran difusión y resulta el más idóneo para el sector industrial y del cual, la Escuela de ingeniería mecánica tiene licencia. Por lo anterior, se tuvo en cuenta esta herramienta, además, de su gran utilidad a la hora de adquirir datos de sensores, generar señales de comando para los actuadores e implementar controladores que sean apropiados para las necesidades del usuario.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ELABORACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Para el ejercicio del control de plantas y equipos es importante conocer el comportamiento a futuro de estos sistemas, esto se logra gracias al modelado matemático de los mismos. Modelar fielmente la realidad supone un trabajo arduo y quizá no se vea reflejado en la precisión de los resultados. Por tanto, para la ingeniería es primordial determinar la magnitud en que son relevantes los factores a considerar para obtener respuestas apropiadas.

Para disminuir la complejidad del modelo es necesario realizar simplificaciones lo cual puede inducir errores en este. Debido a esto, se hace necesario validar el modelo matemático al comparar su respuesta con el sistema físico real y así tener certeza de la veracidad del mismo. En el caso de esta investigación se usó la segunda ley de Newton¹ y los modelos matemáticos de los componentes encontrados en el catálogo de las válvulas REXROTH.

2.1.1 Metodología para la generación de modelos matemáticos. La metodología para lograr un modelo matemático de un sistema es la siguiente:

- Hacer un diagrama del sistema físico.
- Definir las variables de entrada y de salida.
- Describir por medio de leyes físicas los procesos entre los elementos del sistema.
- Relacionar por medio de ecuaciones las diversas variables involucradas.
- Determinar la estrategia de solución.
- Validar el modelo por medio de la experimentación.

¹ La segunda ley de Newton establece lo siguiente: La fuerza sobre una partícula es igual a la razón de cambio de su cantidad de movimiento lineal, producto de su masa y de su velocidad. Sacado de: Anthony Bedford, Dinámica: mecánica para ingeniería. Pearson Educación, 2000. p100.

Siguiendo el proceso, descrito anteriormente y ajustando las hipótesis de ser necesario es posible conseguir un modelo aproximado de la planta para poder aplicar las metodologías de control apropiadas.

2.2. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DINÁMICOS

Los sistemas dinámicos son representaciones matemáticas de procesos reales con algunas simplificaciones. Para analizar este tipo de sistemas se debe tener en cuenta: la estabilidad, el control y la sensibilidad ante cambios del proceso.

2.2.1 Estabilidad. Puede ser definida como la respuesta de un sistema ante una perturbación. En términos del físico británico James Maxwell: “Para sistemas lineales invariantes en el tiempo, la estabilidad estaba relacionada con los polos de la ecuación” 4. Por ejemplo:

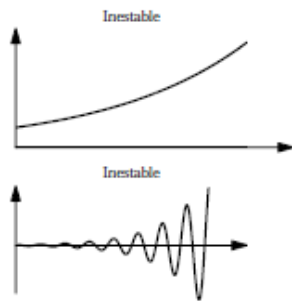
Sea la función de transferencia:

$$G(s) = \frac{b(s)}{a(s)}$$

Donde $a(s)$ y $b(s)$ son polinomios, se le llama a $a(s) = 0$ la ecuación característica.

Si las raíces de $a(s)$ están en el eje imaginario o son positivas se concluye que el sistema es inestable y la respuesta del sistema será como se representa en la siguiente figura:

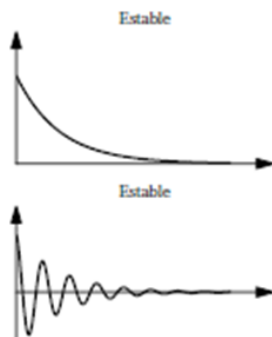
Figura 1. Respuesta sistema inestable



Fuente: KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de Control Moderna. 5 edición

Si las raíces son negativas o complejas el sistema es estable y su comportamiento en el tiempo será como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Respuesta sistema estable



Fuente: KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de Control Moderna. 5 edición

2.2.2 Sensibilidad. Es una relación del controlador y la planta usada para analizar la robustez frente a variaciones del proceso y se define como:

$$S = \frac{1}{1 + PC}$$

Donde P es la planta y C, el controlador en el dominio de S.

2.3 FUNCIONAMIENTO DEL SERVOACTUADOR REXROTH

2.3.1 Banco de pruebas REXROTH. La escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander compró un banco hidráulico de pruebas el cual es flexible para realizar montajes de circuitos, el banco tiene dimensiones de 1.6m*2m*0.7m y se alimenta con corriente a 220 voltios. (Ver figura 3)

A continuación, se detallan los componentes más importantes del banco para el uso de los controladores diseñados en esta investigación.

Figura 3. Banco Rexroth



Fuente: Los autores

2.3.2 Fuente de potencia hidráulica. La unidad hidráulica entrega potencia a las dos caras del banco en los distribuidores de presión y tanque. La potencia es suministrada por un par de bombas compensadas con el sistema Load Sensing, el cual debe conectarse en el distribuidor a una línea de presión de sistema para hacer que el consumo de potencia sea únicamente el necesario. Las bombas son

impulsadas por un motor eléctrico de 1/2 H.P a 3600 rpm y succionan aceite del tanque de suministro de 40L, el cual tiene incorporado un termómetro y permite ver observar cuánto ha cambiado la temperatura del aceite. (Ver Figura 4)

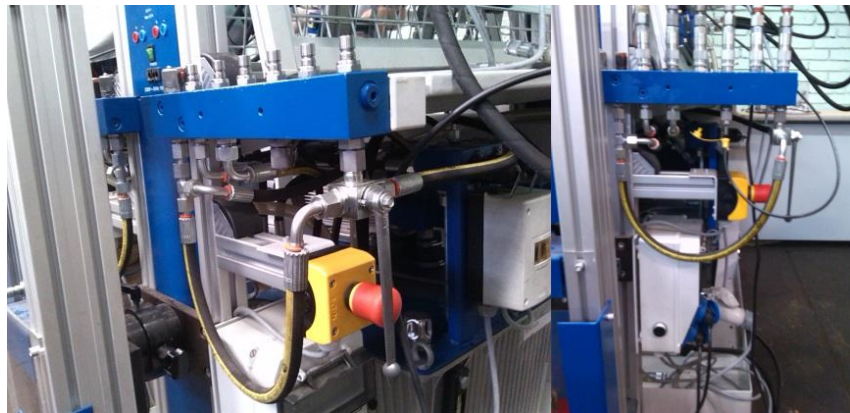
Figura 4. Módulo de potencia del banco



Fuente: Los autores

Es posible aliviar la presión del sistema gracias a la válvula de globo que le permite a cada distribuidor conectar todos sus puertos a tanque. Este sistema permite consumir una baja cantidad de energía durante los ciclos de inactividad, ya que encender de nuevo la bomba es más costoso en términos energéticos. (Ver Figura 5)

Figura 5. Puertos de suministro, descarga y load sensing



Fuente: Los autores

2.3.3 Fuente de potencia eléctrica. La alimentación del banco es de 220 voltios y este posee un sistema de parada de emergencia que consta de un botón rojo en cada cara que desconecta la electricidad en caso de ser necesario. Para lograr que retorne la energía al banco es necesario desenclavarlo y pulsar el botón negro que está ubicado tras el cilindro vertical.

En la hidráulica industrial está intrínseca la lógica eléctrica por medio de la cual se controlan las electroválvulas direccionales para los diferentes fines. Este banco está equipado con un módulo que trae: pulsadores, interruptores, relés, temporizadores a la conexión, multímetro digital y los paneles de control analógico; estos componentes tienen en común que internamente las tierras o referencia ya están cableadas. (Ver figura 6).

En el caso fortuito de un corto eléctrico el banco se auto desconecta y no permite el retorno de energía eléctrica mientras el corto permanezca; de esta manera el alumno sabe que hay algo mal, siendo motivado a encontrar su error y el banco está a salvo porque esto no implica daños.

Figura 6. Módulo para montajes eléctricos del banco



Fuente: Los autores

2.3.4 Actuador hidráulico lineal diferencial perturbable. Implementar un servo de posición implica conocer si el controlador propuesto es robusto y una manera de hacerlo es someterlo a perturbaciones; estas pueden ser: a) reales, como cargas que actúan aleatoriamente o, b) digitales, como señales inducidas a la salida del sensor por medio de un punto de suma. En esta investigación se optó por la primera opción, pues se cuenta con los requerimientos físicos para hacerlo: el cilindro diferencial perturbable es un juego de dos cilindros coaxiales, donde el primero posee una carrera de 20 cm y el segundo de 6 cm, de esta manera se tiene la longitud de 12.18 cm para cambiar la posición del cilindro principal. (Ver figura 7).

Figura 7. Cilindro diferencial perturbable



Fuente: Los autores

Vale la pena resaltar que los dos cilindros poseen el mismo diámetro de pistón y de vástago; por esta razón, el cilindro perturbado puede ser desplazado, si la presión que impulsa su movimiento es menor, entonces, se usa una válvula reductora de presión para cambiar la carga que aplica la perturbación.

2.3.5 Actuador hidráulico lineal diferencial. El servo de velocidad que se implementó en esta investigación es de lazo abierto; además, la longitud de la carrera del cilindro de servo de posición es muy corta para implementar cuatro cambios de velocidad perceptibles para los alumnos. Considerando lo anterior se

optó por un cilindro más largo que está en el inventario del banco; este también es diferencial y posee el mismo diámetro de pistón y de vástago. (Ver figura 8).

Figura 8. Cilindro diferencial de 40 cm de carrera



Fuente: Los autores

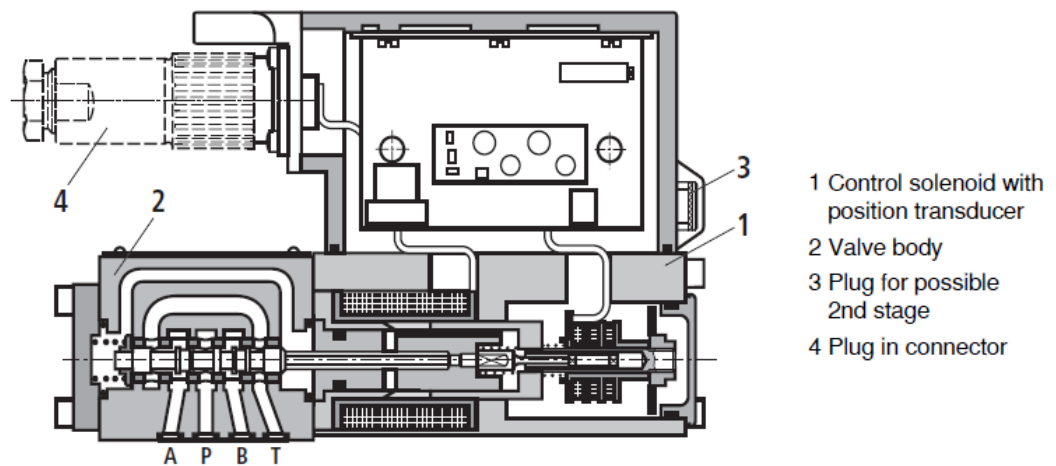
2.3.6 Electroválvula proporcional de alta prestación dinámica Rexroth 4WRPEH6. El fabricante desarrolló un sistema por medio de solenoides altamente magnetizables el cual es la característica principal de esta válvula proporcional. Para mejorar su precisión, también se implementó un sistema de lazo cerrado para la ubicación del spool; el control y las adecuaciones de la señal son posibles gracias a la tarjeta electrónica integrada que hace parte de la electroválvula. La máxima presión de la válvula, su corte y el funcionamiento de la tarjeta se muestran a continuación:

Figura 9. Electroválvula proporcional de alta prestación dinámica



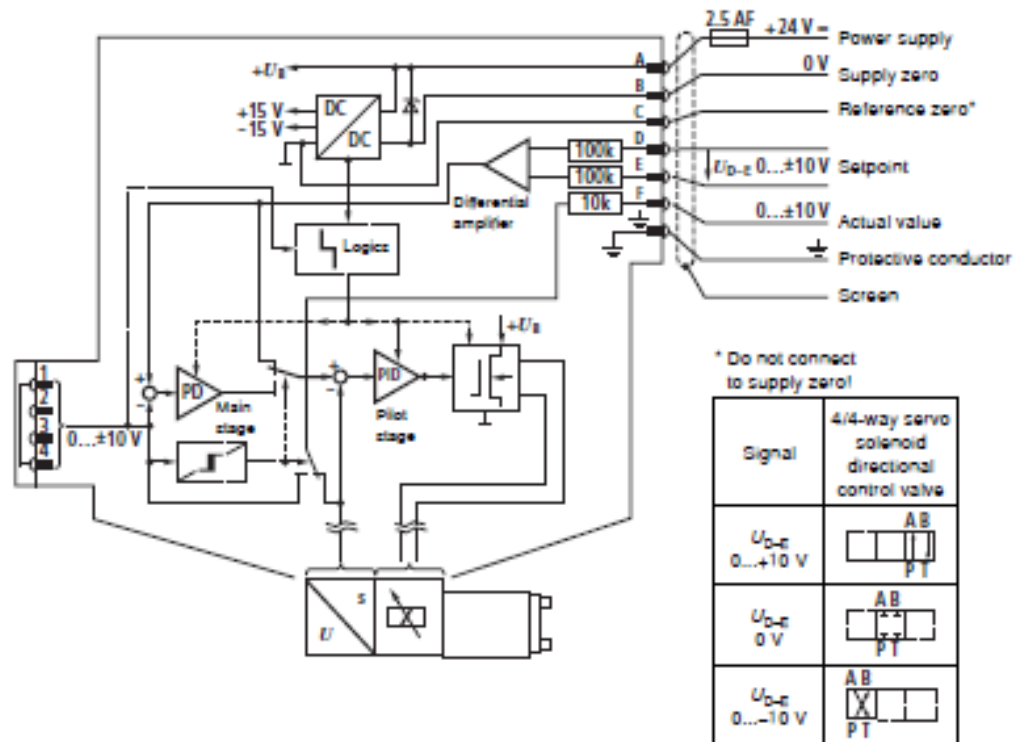
Fuente: Los autores

Figura 10. Vista detallada de la electroválvula



Fuente: Rexroth, Catálogo válvula tipo 4WRPE6, p3.

Figura 11. Electrónica integrada de la electroválvula proporcional

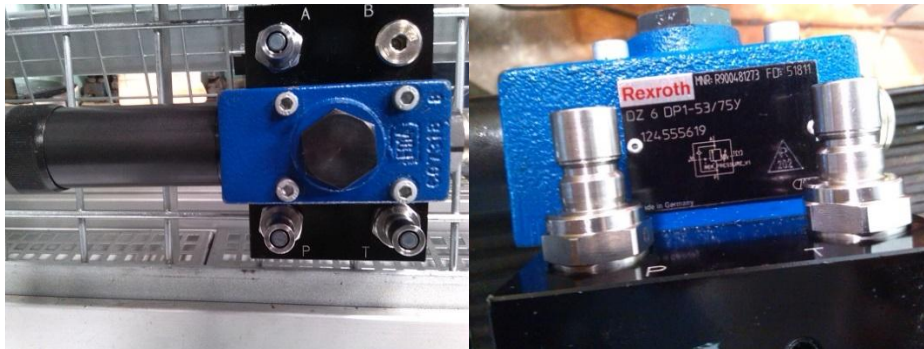


Fuente: Rexroth, Catálogo válvula tipo 4WRPE6, p10.

Adicionalmente, el fabricante incluyó en su diseño una posición segura que actúe en caso de no existir señal de comando y esta corresponde a una válvula de cuatro vías centrada en punto flotante.

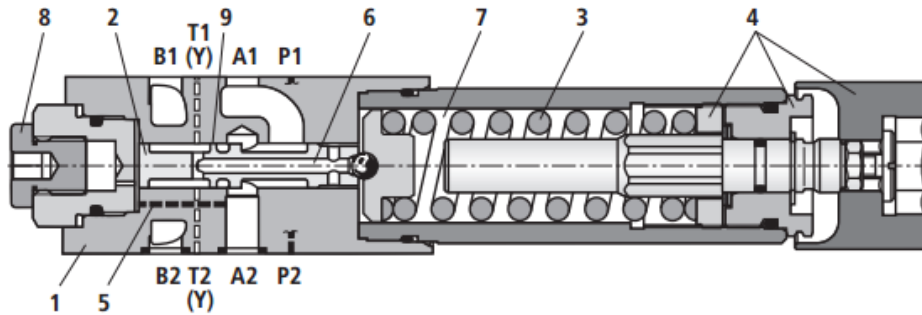
2.3.7 Válvula reductora de presión. Es imposible hablar de transmisión de potencia por medio de aceite sin tener en cuenta el control de presión, y respecto a este, existen gran variedad de soluciones ante necesidades particulares. En algunas ocasiones es necesario limitar solo una parte del circuito a una presión menor que la de suministro, la solución a este asunto se denomina válvula reductora de presión que funciona por medio de un resorte que se puede graduar (al comprimir el resorte se produce una fuerza que multiplicada por el área efectiva del pistón interno da un valor de presión, este valor es el delta de presión a través de la válvula; como el elemento que origina la fuerza no depende del sistema, así hayan cambios en la presión de suministro, el delta a través de la válvula se mantendrá constante). (Ver Figura 12)

Figura 12. Válvula reductora de presión



Fuente: Los autores

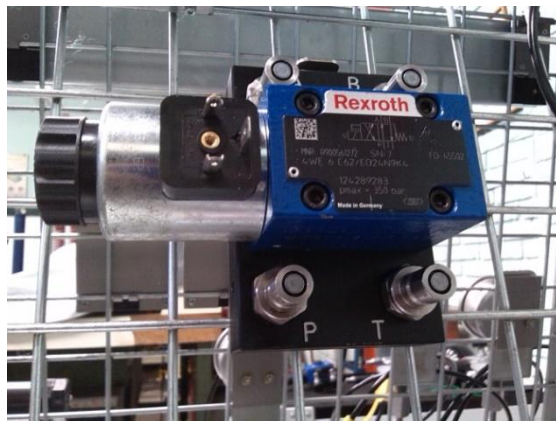
Figura 13. Detalle de sección de la válvula reductora.



Fuente: Catálogo del fabricante.

2.3.8 Electroválvula direccional 4/2 conmutable. El caudal hacia el cilindro que origina la perturbación debe enviarse únicamente cuando el usuario así lo desee; es por esta razón que la válvula direccional debe ser de dos posiciones, además es conveniente que la válvula posea enclavamiento mecánico. También vale la pena resaltar que el cilindro disponible es de doble efecto por lo que resulta necesario que la válvula posea cuatro vías. La válvula más apropiada dentro del inventario del banco que cumple con las necesidades antes mencionadas, es la válvula Rexroth 4/2 de accionamiento eléctrico con retorno por resorte. (Ver figura 14).

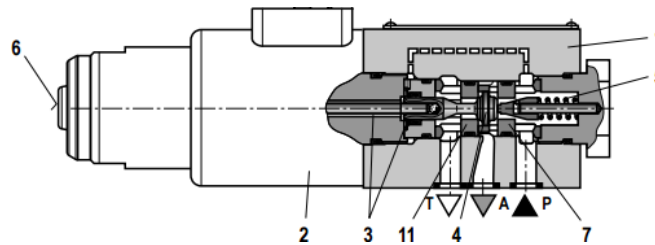
Figura 14. Electroválvula direccional conmutable



Fuente: Los autores

Esta válvula controla el caudal por medio del paso o no paso del aceite hacia las cámaras que conducen a los puertos A y B, gracias al desplazamiento interno del spool producido por el accionamiento del solenoide. (Ver figura 15).

Figura 15. Vista de detalle de la electroválvula conmutable.



Fuente: Rexroth, Catálogo válvula de asiento accionada por solenoide, p4.

2.3.9 Electroválvula proporcional Rexroth 4WREE6. El fabricante Rexroth diseñó un par de solenoides que mueven un spool proporcionalmente al voltaje de comando, esto es posible gracias al material altamente magnetizable usado en los solenoides de la válvula. Si el voltaje es positivo, el spool se mueve hacia la derecha de su centro, pero si es negativo el spool se desplaza en sentido contrario. Si no hay voltaje se ubica en su posición central gracias a los resortes que están ubicados a cada lado de la corredera. Esta válvula, así como la de alta respuesta dinámica también es controlada por medio de una tarjeta de electrónica integrada que viene de fábrica, donde se implementó un sistema de lazo cerrado para mejorar la precisión de esta.

Así se efectúe un control adecuado, el flujo de aceite a través de la válvula en términos de caudal, presenta un estrangulamiento con una caída de presión que depende del porcentaje de apertura del orificio; es decir, el usuario tendrá un sistema donde es posible regular con precisión el caudal pero la presión es variable. Para solventar esta situación, se ubica una válvula reductora de presión al puerto de suministro de la válvula principal y así compensar las caídas de

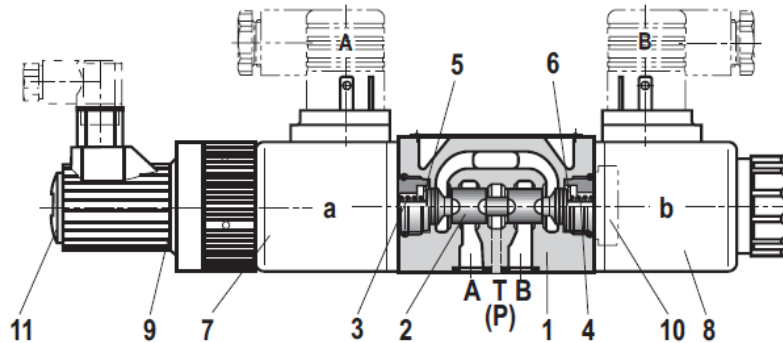
presión a través de la válvula, lo cual está implementado en la electroválvula por defecto. (Ver Figura 16).

Figura 16. Válvula proporcional.



Fuente: Los autores.

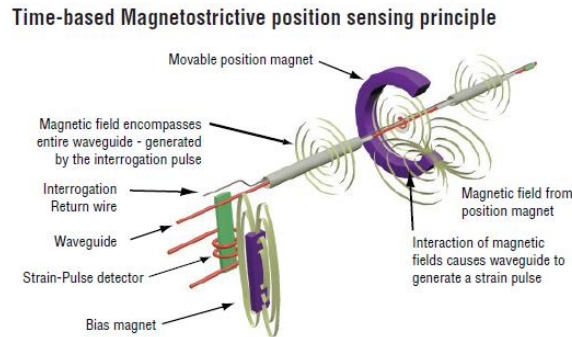
Figura 17. Vista de sección de la electroválvula proporcional.



Fuente: Rexroth. Catálogo válvula tipo 4WREE6, p4.

2.3.10 Transductor de posición LVDT. Desarrollar un sistema de lazo cerrado implica situar en la planta al menos un transductor que mida la variable controlada, de esta manera, obtener la retroalimentación para generar la señal de error. En esta investigación, se utiliza un transductor de posición LVDT Temposonics; que cuenta con una bobina primaria y dos secundarias que producen una señal analógica proporcional al desplazamiento de un núcleo ferromagnético móvil separado. (Ver figura 18).

Figura 18. Bobina primaria y secundaria.



Fuente: Temposonics. Datasheet del sensor LVDT, p1.

El rango de medición es de $[0,15]$ cm y la lectura de esta medida corresponde a una señal analógica que varía de $[0,10]$ Voltios. El sensor debe ser alimentado con una fuente de 24 Voltios. (Ver anexo A).

Figura 19. Sensor LVDT Temposonic.



Fuente: Temposonics, Datasheet del sensor LVDT, p1

2.3.11. Tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6212. El instrumento encargado de la comunicación entre el banco y el computador es la tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6212 de National Instruments. La cual posee 16 canales de entrada analógicas, 2 salidas analógicas y 24 canales digitales, además no necesita alimentación externa salvo la que le proporciona el cable USB. En esta investigación se usa una entrada (puerto AI2) y una salida (puerto AO1) analógicas, que permiten la lectura del sensor y enviar la señal de comando a la electroválvula respectivamente. (Ver figura 20).

Las señales de la tarjeta se configuraron para el rango de $[-10, 10]$ Voltios.
Los datos técnicos de la tarjeta se presentan en el Anexo E.

Figura 20. Tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6212



Fuente: Catálogo del fabricante

2.3.12 Áreas de montaje de pruebas. Consiste en un área enrejada de 0.7 m x 1.17 m, donde los aprendices pueden ubicar las válvulas, cilindros, manómetros y demás elementos hidráulicos para las pruebas a realizar. El banco posee dos espacios para que los alumnos puedan trabajar en paralelo; adicionalmente, los componentes tienen una base diseñada para que las piezas queden fijas pero sean removibles fácilmente. (Ver figura 21).

Figura 21. Zona de montajes.



Fuente: Los autores.

2.3.13 Adecuación de señales. Las señales que envía la tarjeta deben ser adecuadas para ser enviadas a la electroválvula proporcional, y la señal del sensor debe ser filtrada para eliminar el ruido eléctrico.

Se usó un módulo en acrílico en donde se encuentra: la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6212, la tarjeta de amplificación, la fuente de poder para la tarjeta de amplificación, el ventilador para extraer el calor producido dentro del módulo, un botón de parada de emergencia que desconecta la tarjeta de amplificación, la entrada del LVDT, un interruptor para el control de la perturbación y dos salidas que permiten enviar señales para una servoválvula y una válvula proporcional, se selecciona cual señal enviar por medio de dos interruptores que definen cuál de los dos canales actúa y por medio de cual válvula se aplica. (Ver figura 22).

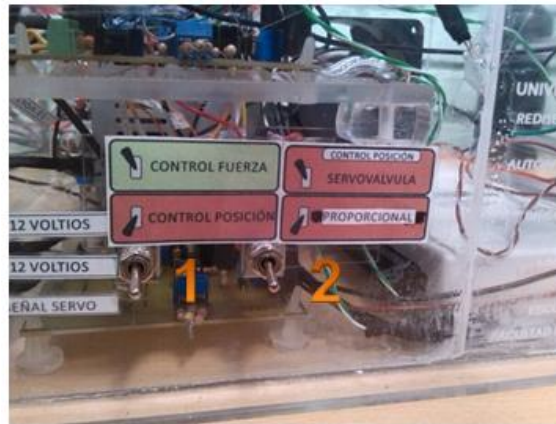
Figura 22. Módulo de adecuación de señales



Fuente: Los autores

En el caso de esta investigación, los interruptores 1 y 2 deben estar hacia abajo (control de posición y proporcional); además, el alumno puede enviar la perturbación desde la mesa de trabajo por medio del interruptor 3 (ver figura 24).

Figura 23. Detalle Posición de los interruptores



Fuente: Los autores

Figura 24. Detalle interruptor 3, control de la perturbación



Fuente: Los autores

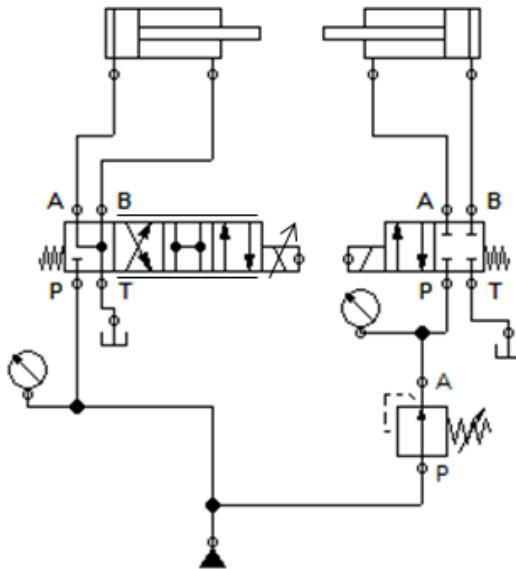
3. MONTAJE DE LOS SERVOSISTEMAS DE POSICIÓN Y VELOCIDAD.

En este capítulo los autores presentan el montaje de los componentes así como las guías de las prácticas:

3.1 SERVO DE POSICIÓN.

Para el montaje de la práctica del servo de posición el alumno requiere los siguientes componentes: (1) La electroválvula proporcional de alta respuesta dinámica, (2) el cilindro diferencial perturbable, (3) una electroválvula direccional 4/2, (4) una reductora de presión, (5) sensor de posición LVDT, (6) distribuidor, (7) tres manómetros y mangueras. (Ver figura 25 y 26).

Figura 25. Plano hidráulico del servo de posición.



Fuente: Los autores

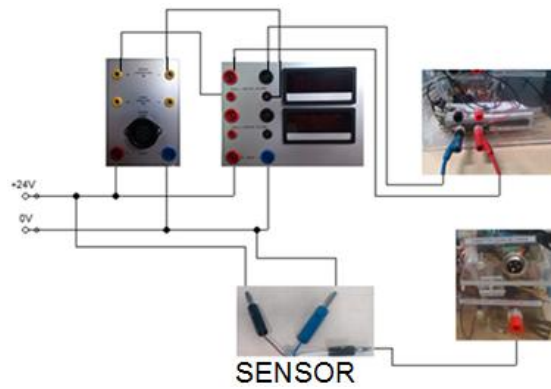
Figura 26. Montaje hidráulico servo de posición.



Fuente: Los autores.

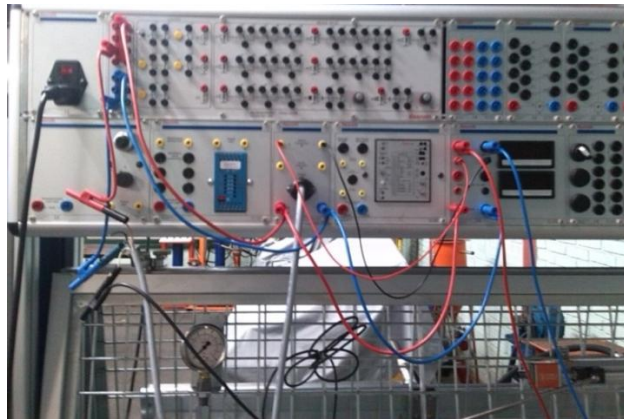
En cuanto a las conexiones eléctricas, para la práctica el alumno va a necesitar: 2 cables de 1m, 2 cables de 0.7 m, el cable de la válvula al módulo de comando de la tarjeta, 2 cables de 20 cm, el cable de alimentación del módulo de adecuación, el cable USB de la tarjeta NI USB 6212, las conexiones de alimentación del multímetro del banco para visualizar la señal de comando a la válvula, el sensor LVDT Temposonics de 15 cm y su cable, el módulo de adecuación de señales y el computador.

Figura 27. Plano eléctrico del servo de posición.



Fuente: Los autores

Figura 28. Montaje eléctrico del servo de posición.



Fuente: Los autores

Figura 29. Detalle de conexión del sensor LVDT.



Fuente: Los autores

El cable rojo corresponde a 24 voltios, el cable azul a tierra y el cable blanco corresponde a la salida la señal del sensor que entra a la tarjeta NI USB 6212, que en este caso se conecta a la entrada del módulo correspondiente. (Ver figura 30).

Figura 30. Detalle conexión señal del sensor



Fuente: Los autores

La señal que envía la tarjeta NI USB 6212 a la válvula sale por la parte del módulo que dice "señal valvula proporcional" (figura 31) y entran al display digital, de donde sale por los cables delgados al módulo de la válvula. (Ver figura 28).

Figura 31. Detalle conexión, envío de la señal a la válvula

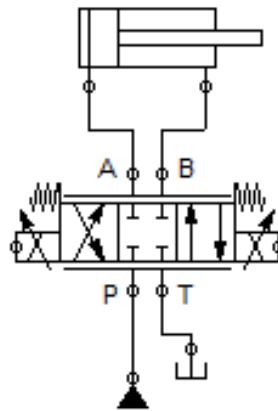


Fuente: Los autores

3.2 SERVO DE VELOCIDAD.

Para realizar esta prueba el alumno requiere los siguientes componentes hidráulicos: la electroválvula proporcional y el cilindro diferencial. (Ver figura 32 y 33).

Figura 32. Plano hidráulico servo de velocidad



Fuente: los autores

Figura 33. Montaje hidráulico del servo de velocidad.

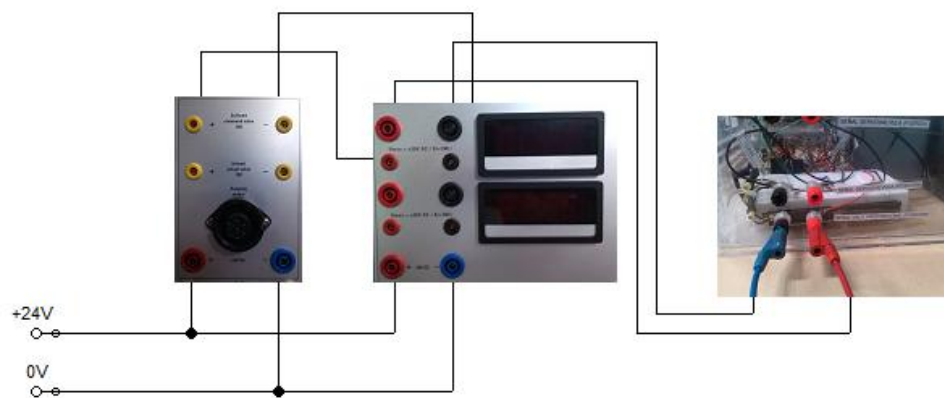


Fuente: Los autores

En cuanto a las conexiones eléctricas para la práctica el alumno va a necesitar: 2 cables de 1m, el cable de la válvula al módulo de comando de la tarjeta, 2 cables de 20 cm, el cable de alimentación del módulo de adecuación, el cable USB de la

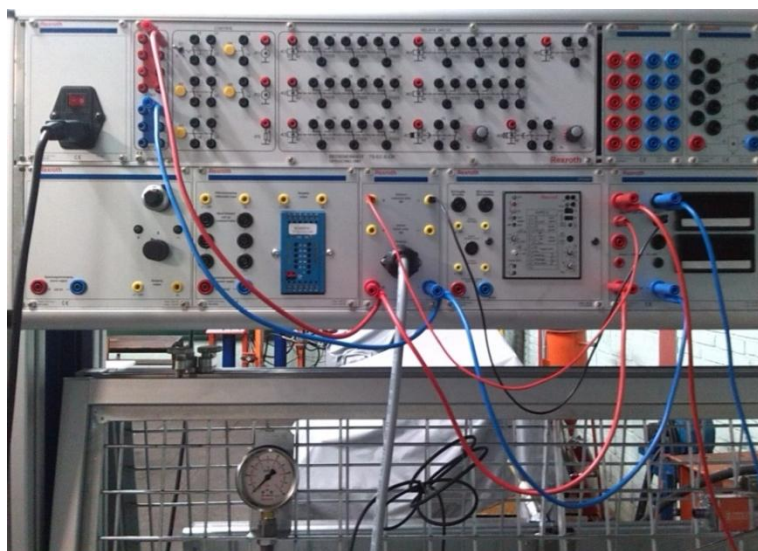
tarjeta NI USB 6212 y las conexiones de alimentación del multímetro para visualizar la señal de comando a la válvula. (Ver figura 34 y 35).

Figura 34. Plano eléctrico servo de velocidad.



Fuente: Los autores

Figura 35. Montaje eléctrico del servo de velocidad.



Fuente: Los autores

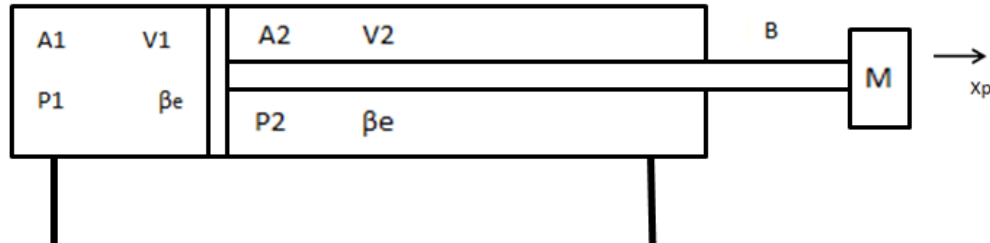
4. MODELO DINÁMICO DEL SERVO DE POSICION

El sistema del servo de posición es modelado por medio de la segunda ley de Newton aplicada al cilindro diferencial a través de las relaciones de los componentes del sistema. Para esto, se establece la relación matemática entre la posición del actuador y la entrada de voltaje a la electroválvula proporcional de alta prestación dinámica.

4.1 MODELO MATEMATICO DEL CILINDRO DIFERENCIAL²

El cilindro es el componente que porta la masa que se controla, en esta investigación se implementa por medio de un cilindro diferencial como se muestra en la figura 36.

Figura 36. Cilindro diferencial



Fuente: Los autores

4.1.1 Segunda ley de Newton sobre el pistón del cilindro. Si se aplica la segunda ley de Newton

$$P1 * A1 - P2 * A2 = M * a + B * v$$

$$P1 * A1 - P2 * A2 = M * \ddot{X} + B * \dot{X}$$

Aplicando la transformada de L'place:

$$P1 * A1 - P2 * A2 = M * s^2 * X + B * s * X$$

² Merritt Herbert E. Hydraulic Control Systems. New York: Jhon Wiley & Sons, Inc., 1967

En donde B representa el coeficiente de viscosidad. Dado que el sistema es auto lubricado, se considera que este término es muy pequeño en comparación con las fuerzas impulsoras del sistema. Es así que la expresión se puede simplificar a:

$$P1 * A1 - P2 * A2 = M * s^2 * X \quad \text{Ecuación 1}$$

4.1.2 Ecuación para el volumen en el cilindro. El fluido que hace posible la transmisión de potencia está sometido a cambios de presión variables en el tiempo que cambian el volumen del mismo este fenómeno se puede modelar por la siguiente expresión:

$$\beta = V \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

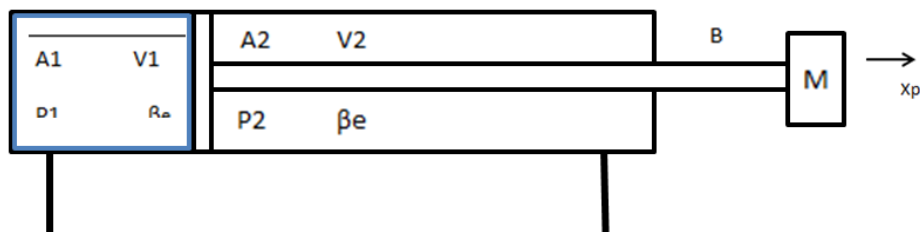
Se despeja el cambio del volumen con respecto al tiempo (Caudal) para efectos prácticos en la simplificación del modelo se tiene:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{V}{\beta} * \frac{\partial P}{\partial t} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde β es el módulo de Bulk que es constante para el aceite que se usa en esta investigación.

Si se considera un volumen de control alrededor de la cámara 1 como se muestra en la figura 37, se tiene:

Figura 37. Cilindro diferencial con volumen de control



Fuente: Los autores

Se define la suma del volumen desplazado por el pistón y el volumen de aceite confinado en la cámara 1 (V_{c1}) como V_1

$$V_1 = A_1 * X_p + V_{c1} \quad \text{Ecuación 4}$$

Si se deriva con respecto al tiempo se tiene:

$$\dot{V}_1 = A_1 * \dot{V} \quad \text{Ecuación 5}$$

En el punto de operación (posición central de la electroválvula porque es un servo de posición) el volumen desplazado por el pistón es pequeño comparado con el confinado en la cámara, por tanto:

$$V_1 \cong V_{c1}$$

Es así que el caudal del puerto 1 y 2 está definido en el dominio del tiempo como:

$$Q_1 = A_1 \dot{V} + \frac{V_1}{\beta_k} \dot{\Delta P} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$Q_2 = A_2 \dot{V} + \frac{V_2}{\beta_k} \dot{\Delta P} \quad \text{Ecuación 7}$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$\Delta Q_1 = A_1 s X_p + \frac{V_1}{\beta_k} s \Delta P_1 \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\Delta Q_2 = A_2 s X_p + \frac{V_2}{\beta_k} s \Delta P_2 \quad \text{Ecuación 9}$$

4.2 MODELO MATEMÁTICO DE LA ELECTROVÁLVULA PROPORCIONAL DE ALTA PRESTACIÓN DINÁMICA 4WRPEH6

La industria y su búsqueda de procesos confiables con menos inversión, llevaron a las compañías como REXROTH BOSCH GROUP a generar alternativas a la servoválvula que tengan una precisión aproximada con un costo representativamente menor. Es así como se desarrolló la electroválvula proporcional de alta prestación dinámica.

Para modelar la electroválvula proporcional de alta respuesta dinámica se aproxima al modelo de la servo válvula (sujeto a verificación).

$$Q1 = Cd * a1 * \sqrt{(Ps - P1) * \frac{2}{\rho}} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$Q2 = Cd * a2 * \sqrt{(P2 - P0) * \frac{2}{\rho}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde Cd es el coeficiente de descarga que modela las perdidas por el estrangulamiento del fluido al paso por el orificio. Se asume que la presión en la línea de tanque es pequeña y puede aproximarse a 0 y la presión de suministro es la suma de las líneas 1 y 2.

El cambio en el área del orificio de estrangulación es proporcional al corrimiento del spool, esto hace posible modelar el área como:

$$a = K * x_v \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde K es un constante y está en función de la geometría del carretel y el orificio.

$$Q1 = Cd * K * x_v * \sqrt{(P2 - P0) * \frac{2}{\rho}} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$Q2 = Cd * K * x_v * \sqrt{(Ps - P1) * \frac{2}{\rho}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Para poder aplicar L'place se deben linealizar estas relaciones para esto se usa el Teorema de Taylor que describe una función (infinitamente derivable en un rango) como un polinomio sin importar su forma original. El punto de operación del sistema será en la posición central del spool pues en un servo de posición así que la serie se evalúa en este punto.

$$Q = \left(\frac{\partial Q}{\partial x_v} \right)_{xv0, P10} * x_v + \left(\frac{\partial Q}{\partial P} \right)_{xv0, P10} *$$

P Ecuación 14

Si se define:

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial x_v} \right)_{xv0, P10} = Kq \quad y \quad \left(\frac{\partial Q}{\partial P} \right)_{xv0, P10} = Kc$$

Si se aplica lo anterior a las líneas de ingreso y retorno del actuador se tiene:

$$\Delta Q1 = Kq1 * \Delta Xv - Kc1 * \Delta P1 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\Delta Q2 = Kq2 * \Delta Xv + Kc2 * \Delta P2 \quad \text{Ecuación 16}$$

4.2.1 Ganancia de caudal por cambios en la señal de comando. Se define como la relación entre el caudal que entrega la válvula por unidad de voltaje o corriente de la electroválvula. La válvula utilizada en esta investigación es la de punto flotante y del catálogo del fabricante se obtiene su curva característica (ver figura 38). Se modeló la gráfica como una ecuación lineal donde la pendiente está definida por:

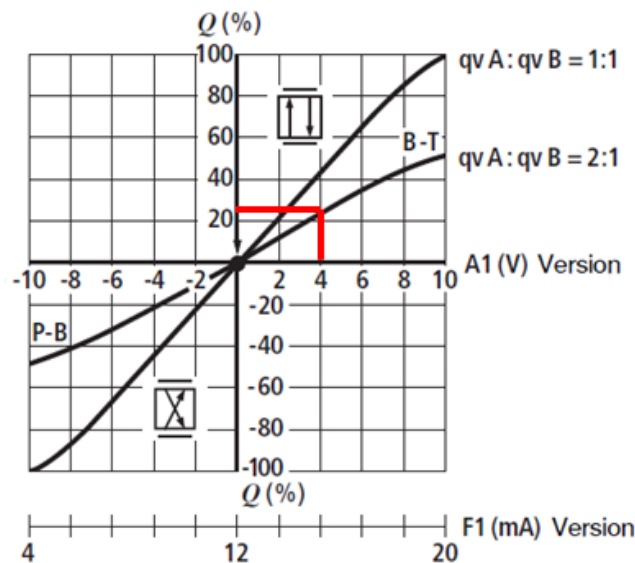
$$\frac{dQ}{dV} = \frac{24/100}{4} 0.06 \quad \text{Ecuación 17}$$

Y el intercepto con el eje Q es cero, es así que la expresión se reduce:

$$K_{ev} = 0.06 \quad \text{Ecuación 18}$$

Sin embargo, para la simulación el valor de K_q que interesa es el que genera la válvula y corresponde a los cambios de caudal por unidad de desplazamiento del spool.

Figura 38. Curva de ganancia de caudal de la electroválvula proporcional de alta respuesta dinámica.



Fuente: REXROTH. Catálogo de la válvula tipo 4WRPEH6, p9

4.2.2 Ganancia de desplazamiento del spool por unidad de voltaje de comando a la electroválvula Kv. Esta ganancia está definida como la relación matemática entre la señal de comando y el porcentaje de apertura del orificio por el que pasa el caudal en la electroválvula; para conocer este valor es necesario contar con retroalimentación de la posición del spool debido a que cuentan con electrónica integrada para mejorar la precisión.

En la tarjeta de comando de la válvula existen tres conexiones eléctricas (ver Figura 39): la primera es la alimentación de la tarjeta que debe ir a la fuente del banco de 24 Voltios; la segunda, denominada “Valor actual de la electroválvula” se usará como una medida indirecta de la posición del spool y la tercera, es la señal de comando que en esta prueba proviene del potenciómetro del banco. (Ver Figura 40). Con el montaje de la figura 41 se tomaron los datos del Anexo B, el resultado de esta prueba se resume en la figura 42.

Figura 39. Módulo de comando de la válvula



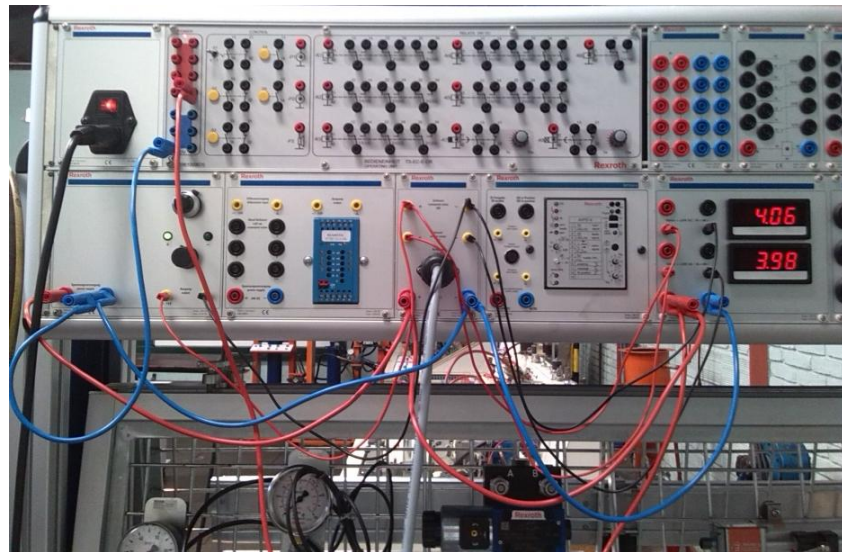
Fuente: Los autores

Figura 40. Módulo del potenciómetro



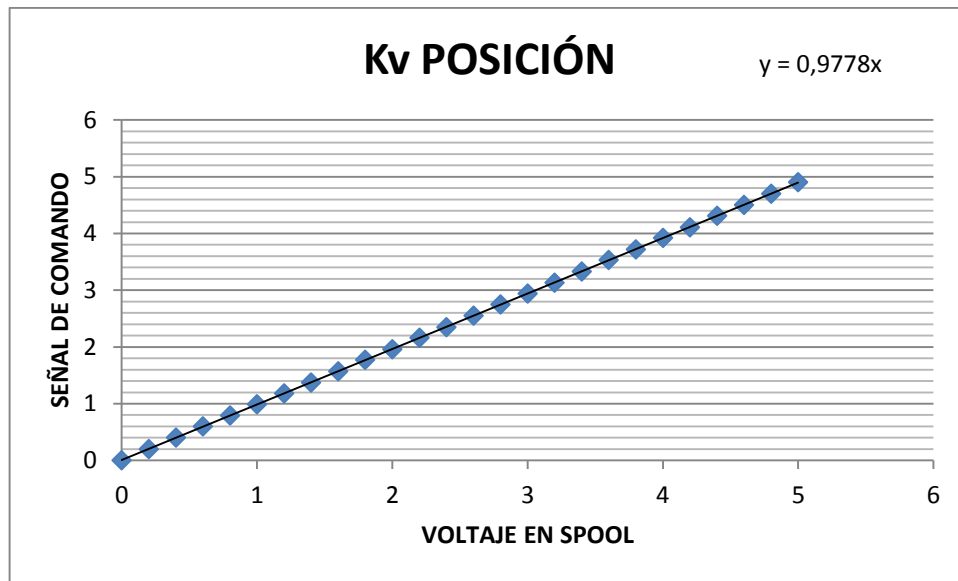
Fuente: Los autores

Figura 41. Montaje de la prueba para el cálculo de K_v .



Fuente: Los autores

Figura 42. Gráfica de K_v



Fuente: Los autores

La relación entre el voltaje en el spool y la señal de comando es lineal y posee intercepto con el eje y, la pendiente se calcula como $K_v = 0,9778$.

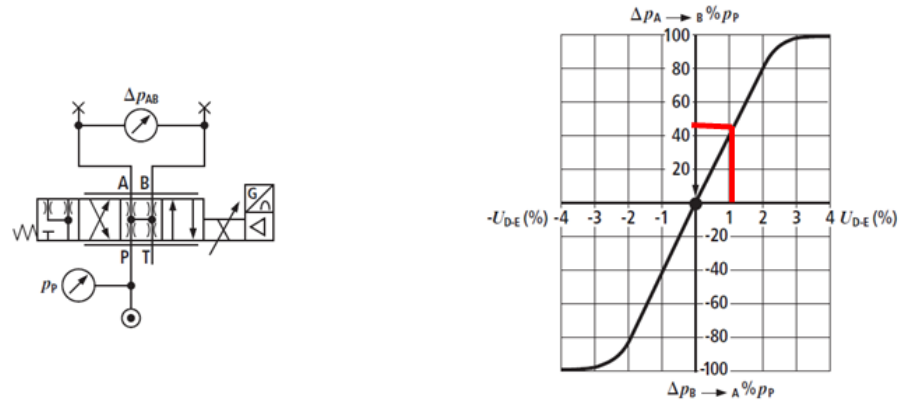
4.2.3 Ganancia de caudal por corrimiento del spool. Definido como la relación matemática entre los cambios de caudal entregado por la electroválvula y los cambios en el desplazamiento del spool.

$$\frac{dQ}{dX_v} = \frac{dQ}{dV} * \frac{dV}{dX_v} = K_q = 0,9778 * 0.06 = 0.059 \quad \text{Ecuación 19}$$

4.2.4 Ganancia de presión por comando de la válvula. Está definida como la relación que existe entre el cambio de presión en la válvula por unidad de voltaje o corriente de comando, siendo U la señal de comando y tomando como referencia el catalogo del fabricante se tiene: (Ver figura 43).

Figura 43. Curva de ganancia de presión por señal de comando

Pressure gain



Fuente: REXROTH. Catálogo de la válvula tipo 4WRPEH6, p10.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{40/100}{10/100} = 4 \quad \text{Ecuación 20}$$

4.2.5 Sensibilidad de la Presión. Está definida como el cambio de presión por unidad de desplazamiento del spool.

$$\frac{dP}{dX_v} = K_p \quad \text{Ecuación 21}$$

Considerando lo planteado en Hydraulic Servo Systems³ y aproximando las derivadas parciales a derivadas ordinarias se tiene:

$$\frac{dP}{dX_v} = \frac{dP}{dV} * \frac{dV}{dX_v} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$\frac{dP}{dX_v} = \frac{40/100}{10/100} * 0.059 = 66.67$$

³ Rydberg, Karl-Erik. Hydraulic Servo Systems. Guía del programa. Suecia. Linköpings universitet, 2008.

$$Kp = 66.67$$

4.2.6 Ganancia de caudal por cambios de presión en la válvula. Definida como la relación matemática entre los cambios de caudal producto de las variaciones de presión.

$$Kc = -\frac{dQ}{dP} \quad \text{Ecuación 23}$$

Si se considera:

$$Kq = -\frac{dQ}{dXv} \quad \text{y} \quad Kp = -\frac{dP}{dXv}$$

Se puede observar que:

$$Kc = \frac{Kq}{Kp} = \frac{6}{66.67} = 0.0899 \quad \text{Ecuación 24}$$

Tabla 1. Constantes de la electroválvula

ELECTROVÁLVULA	
Constante	Valor
Kc	0.0899
Kp	66.67
Kq	0.059
Kv	0.9778

Fuente: Los autores

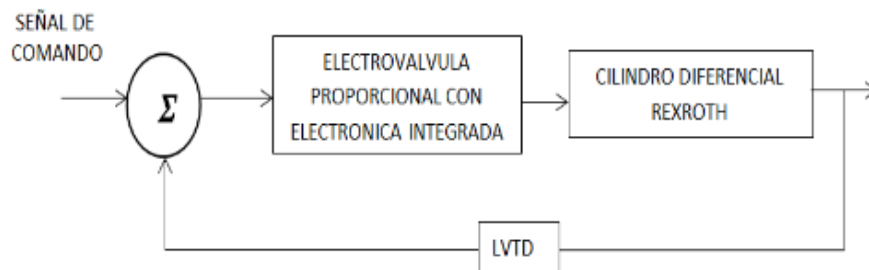
Es posible medir experimentalmente la señal de comando de la electroválvula y el caudal que esta entrega (estas mediciones se adjuntan en el Anexo B). Con base en los datos recolectados se puede concluir que la relación entre el voltaje de comando y el caudal es constante y corresponde a la variable llamada $K_{ev}=0.006$. El valor teórico de esta variable es el producto de K_v y K_q , que en este caso es

0.0072; se concluye que la desviación entre los dos es inferior al 5% y se consideran válidas las aproximaciones y simplificaciones usadas.

4.3 MODELO DINÁMICO DE LA PLANTA DE POSICIÓN.

El sistema se puede modelar como un sistema tipo S.I.S.O⁴, donde la entrada es el voltaje de comando a la electroválvula proporcional y la salida es la posición del pistón.

Figura 44. Diagrama de bloque del controlador en lazo cerrado



Fuente: Los autores

Combinando las ecuaciones 12 y 13 se obtiene la siguiente relación:

$$Kq1 * \Delta Xv = A1 * s * \Delta Xp + \left(Kc1 + \frac{V1}{\beta_k} s \right) \Delta P1 \quad \text{Ecuación 25}$$

⁴ Según el número de entradas y salidas del sistema, se denominan por su comportamiento: De una entrada y una salida o SISO (single input, single output).

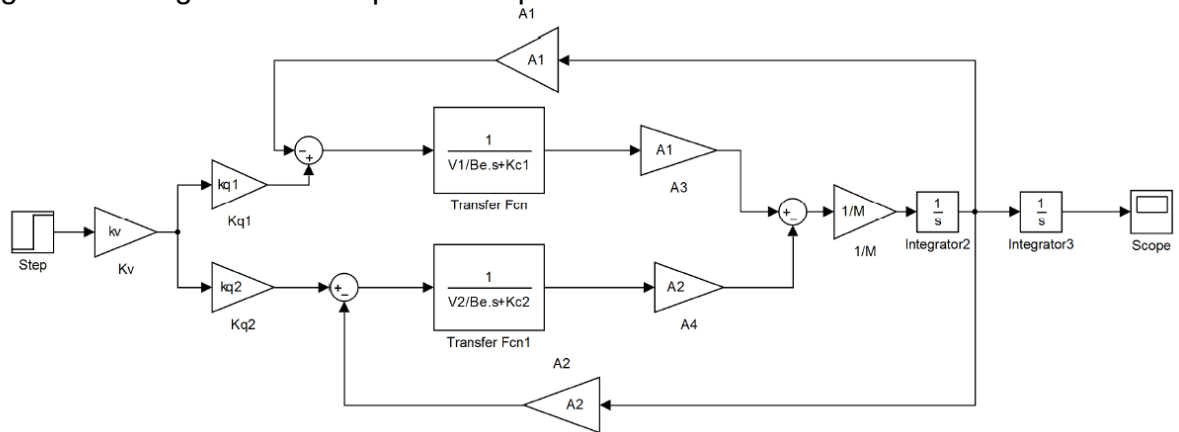
$$-Kq2 * \Delta Xv = -A2 * s * \Delta Xp + \left(Kc2 + \frac{V2}{\beta_k} s \right) \Delta P2 \quad \text{Ecuación 26}$$

La relación de caudal por unidad de voltaje de comando es proporcional al corrimiento del spool, para permitir el paso del fluido; de esta manera:

$$\frac{\Delta Xv}{\Delta V} = 0.059 = Kv \quad \text{Ecuación 27}$$

Si se combinan las ecuaciones 25 y 26 en un diagrama de bloques, el sistema se puede plantear como se ve en la figura 45.

Figura 45. Diagrama de bloques de la planta.



Fuente: Los autores

Tabla 2. Contantes para el diagrama de bloques de la planta.

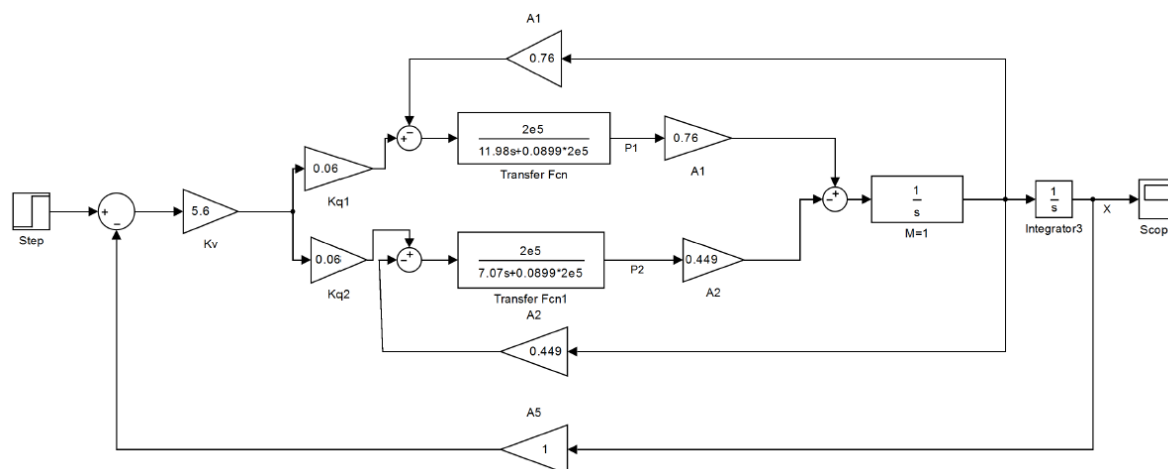
CONSTANTES PARA LA SIMULACIÓN CON SIMULINK®			
Variable	Símbolo	Unidades	Valor
Área del pistón	A1	m ²	0.76
Área Anular	A2	m ²	0.449
Volumen de la Cámara del pistón	V1	m ³	11.98

Volumen de la Cámara anular	V_2	m^3	7.07
Coeficiente de Descarga de la válvula puerto A	K_{q1}	Adimensional	0.059
Coeficiente de Caída de presión de la válvula puerto A	K_{c1}	Adimensional	0.001004
Coeficiente de Descarga de la válvula puerto B	K_{q2}	Adimensional	0.059
Coeficiente de Caída de presión de la válvula puerto B	K_{c2}	Adimensional	0.000957
Módulo de compresibilidad del aceite	β	Pascal	2.1E5

Fuente: Los autores

Con los valores numéricos antes mencionados se tiene. (Ver figura 46).

Figura 46. Diagrama de bloques con valores



Fuente: Los autores

En Matlab es posible obtener la función de transferencia de la planta partiendo del diagrama de bloques. Para esto, es necesario cambiar la señal de entrada (step) a input y el scope a output, se guarda el archivo con el nombre “LAZO ABIERTO” (retroalimentación igual a cero) y “LAZO CERRADO” (retroalimentación igual a uno) en el script de MATLAB; se digita el siguiente código:

```
close all
```

```

clc
[num,den]=linmod('LAZO ABIERTO')
g=tf(num,den)
pzmap(g)
[num1,den1]=linmod('LAZO CERRADO')
gp=tf(num1,den1)
Figure 1
pzmap(g)

```

Con lo anterior se obtiene las siguientes ecuaciones:

Lazo abierto:

$$G(s) = \frac{24.285s + 8.202 \cdot 10^5}{s^4 + 4044s^3 + 3.821 \cdot 10^6 s^2 + 1.596 \cdot 10^7 s}$$

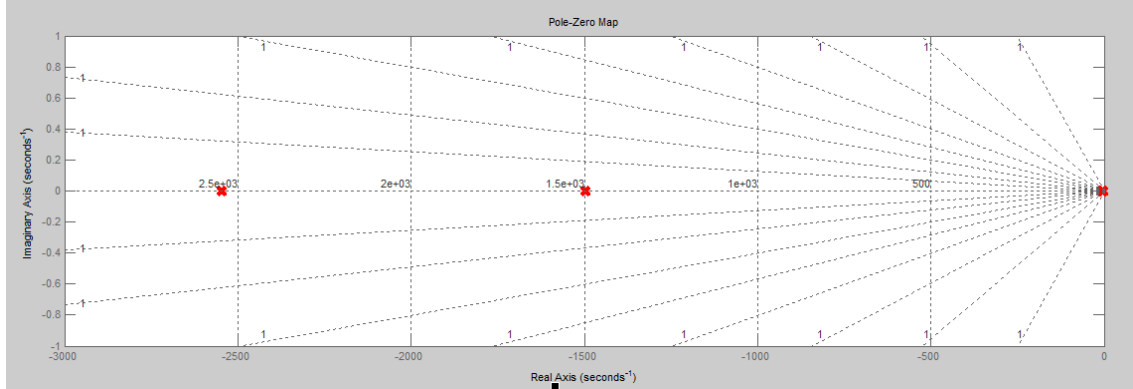
Lazo cerrado:

$$Gp(s) = \frac{24.285s + 8.202 \cdot 10^5}{s^4 + 4044s^3 + 3.821 \cdot 10^6 s^2 + 1.596 \cdot 10^7 s + 8.202 \cdot 10^5}$$

4.4. ESTABILIDAD

En lazo abierto el denominador no posee término independiente, las raíces están en el eje imaginario, indicando inestabilidad (ver figura 1). En cambio, en lazo cerrado, el denominador cuenta con raíces que están ubicadas en el semiplano izquierdo evidenciando la estabilidad del sistema; sin embargo, la proximidad de los polos dominantes al eje imaginario no es deseable.

Figura 47. Diagrama de polos



Fuente: Los autores

Como no es posible determinar con certeza la posición del polo más cercano, se digita en Matlab el siguiente código:

Roots(den1)

Y se obtuvieron los valores de la tabla 3.

Tabla 3. Raíces del denominador

Raíces del denominador
2545,4
1494
4,1
0,1

Fuente: Los autores

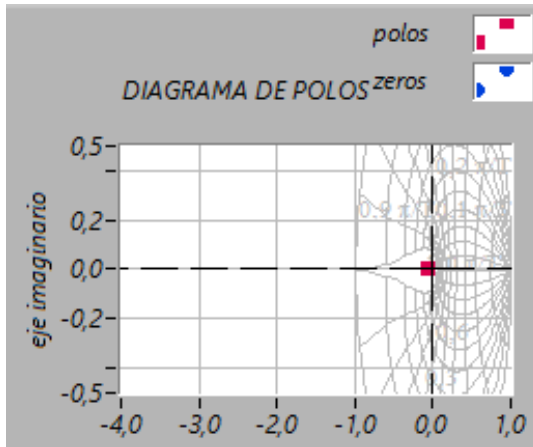
4.5. INFLUENCIA DEL CONTROLADOR PD EN LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA

Someter un sistema en lazo cerrado a la acción de un controlador tiene implicaciones en su estabilidad. En el siguiente diagrama de polos y ceros se

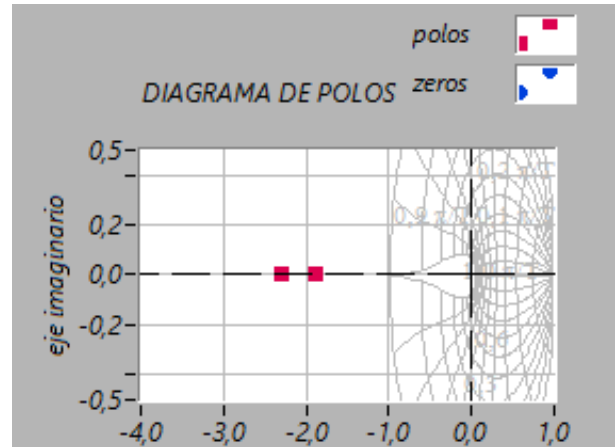
muestra la repercusión de esta acción en el servo de posición de esta investigación. (Ver figura 48).

Figura 48. Diagrama de polos y ceros

a. Sin PD en lazo cerrado



b. Con PD



Fuente: Los autores

A continuación, se presenta el análisis matemático para evaluar las consecuencias de implementar un controlador en el sistema.

Figura 49. Diagrama de bloque planta con controlador.



Fuente: Los autores

Donde la planta corresponde a la ecuación calculada para el servo de posición en lazo abierto:

$$G(s) = \frac{24.285s + 8.202 e5}{s^4 + 4044s^3 + 3.821e6s^2 + 1.596e7s}$$

Para verificar si el sistema se estabiliza en algún valor se aplica el teorema del valor final⁵. Se evalúa la relación entre el error y la entrada del sistema:

$$\frac{E(s)}{u(s)} = \frac{u(s) - x(s)}{u(s)} = 1 - \frac{1}{1 + C(s) * G(s)}$$

Donde C(s) corresponde a $Kp + Kds$

$$\frac{E(s)}{u(s)} = \frac{1}{1 + (Kp + Kds) * \left(\frac{24.285s + 8.202e5}{s^4 + 4044s^3 + 3.821e6s^2 + 1.596e7s} \right)}$$

$$\frac{E(s)}{u(s)} = \frac{s^4 + 4044s^3 + 3.821e6s^2 + 1.596e7s}{s^4 + 4044s^3 + 3.821e6s^2 + 1.596e7s + 24.285Kps + 8.202e5Kp + 24.285Kds^2 + 8.202e5Kds}$$

$$\frac{E(s)}{u(s)} = \frac{s^4 + 4044s^3 + 3.821e6s^2 + 1.596e7s}{s^4 + 4044s^3 + s^2(3.821e6 + 24.285Kd) + s(1.596e7 + 24.285Kp + 8.202e5Kd) + 8.202e5Kp}$$

El teorema del valor final se define como:

$$\lim_{s \rightarrow 0} s * E(s)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{s * (s^4 + 4044s^3 + 3.821e6s^2 + 1.596e7s)}{s^4 + s^3 4044 + s^2(3.821e6 + 24.285Kd) + s(1.596e7 + 24.285Kp + 8.202e5Kd) + 8.202e5Kp} \right)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} s * E(s) = \frac{0}{8.202e5Kp}$$

Para que el error en estado estable sea nulo, el factor Kp no puede tomar el valor de 0, esto indica que el sistema se estabiliza con el controlador PD.

⁵ Ogata. Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. 3 edición. Madrid. PEARSON. 2010. Pag. 29-30

El controlador PD resulta apropiado para los diferentes valores de Step que se le envíen al sistema. Sin embargo, el sistema por sí mismo no es capaz de corregir perturbaciones, pues la señal de comando para la electroválvula es proporcional al error que se presenta, y la apertura del orificio para el paso de caudal no genera suficiente fuerza para vencer el cilindro perturbador; es necesario implementar un compensador por adelanto FEED FORWARD para corregir la perturbación.

4.6. DISEÑO DEL COMPENSADOR POR ADELANTO FEED FORWARD.

El servo de posición de esta investigación estará sometido a perturbación hidráulica, por lo tanto, se requirió implementar la técnica de control FEEDFORWARD o compensador por adelanto, que se ubica en cascada con la planta para que se comporte como se espera a pesar de la perturbación. Se diseñó el compensador usando el segundo método del libro de Ogata⁶, el cual propone que el numerador del compensador debe tener las raíces más cercanas al eje imaginario y así eliminar los polos que desestabilizan la planta.

La ecuación de la planta en forma zpk es:

$$Gp(s) = \frac{24.28(s + 3.378e4)}{(s + 2545)(s + 1494)(s + 0.05203)(s + 4.1444)}$$

El polo más cercano al eje imaginario es $s = -0.05203$, como no tiene parte imaginaria $\omega = 0.05203$ y $\tau = 1$.

El compensador propuesto tiene $\omega = 0.5$ y $\tau = 0.95$ lo que generó el denominador de la forma:

$$s^2 + 2 * \tau * \omega * s + \omega^2 = s^2 + 0.95s + 0.25$$

⁶ Ogata. Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. 5 edición. Madrid. PEARSON. 2010. Pag. 308-321

El numerador, son los polos más indeseados de la planta:

$$(s + 0.05203)(s + 4.1444)$$

Entonces:

$$G_c = \frac{Ks * (s + 0.05203)(s + 4.1444)}{s^2 + 0.95s + 0.25}$$

Se simula la respuesta de la planta con el compensador y se nota un ligero offset que se corrige con una ganancia del 15%; por tanto, $K_s = 1.15$.

A continuación, se evalúa el teorema del valor final con el compensador de adelanto Feed –Forward.

Donde la función de transferencia de la planta en lazo abierto corresponde a:

$$G(s) = \frac{24.285s + 8.202 \cdot 10^5}{s^4 + 4044s^3 + 3.821 \cdot 10^6s^2 + 1.596 \cdot 10^7s}$$

La función de transferencia del compensador es:

$$G_c = \frac{1.15 * (s + 0.05203)(s + 4.1444)}{s^2 + 0.95s + 0.25}$$

Y la del controlador es: $C(s) = K_p + K_d s$

$$\frac{E(s)}{u(s)} = \frac{u(s) - x(s)}{u(s)} = 1 - \frac{x(s)}{u(s)} = \frac{1}{1 + C(s) * G(s) * G_c(s)}$$

Evaluable para la señal escalón:

$$E(s) = \frac{1}{1 + C(s) * G_c(s) * G(s)}$$

$$E(s) = \frac{1}{1 + (Kp + Kds) * \left(\frac{1.15 * (s + 0.05203)(s + 4.1444)}{s^2 + 0.95s + 0.25} \right) * \frac{24.285s + 8.202e5}{s^4 + 4044s^3 + 3.821e6s^2 + 1.596e7s}}$$

$$E(s) = \frac{1}{1 + (Kp + Kds) * \left(\frac{1.15 * (s + 0.05203)(s + 4.1444)}{s^2 + 0.95s + 0.25} \right) * \frac{24.285s + 8.202e5}{(s + 0.05203)(s + 4.1444) * (s + 1494.9) * (s + 2545.22)}}$$

$$E(s) = \frac{1}{1 + (Kp + Kds) * \left(\frac{1.15}{s^2 + 0.95s + 0.25} \right) * \frac{24.285s + 8.202e5}{s^2 + 4040.12s + 3.8e6}}$$

$$E(s) = \frac{(s^2 + 0.95s + 0.25) * (s^2 + 4040.12s + 3.8e6)}{(s^2 + 0.95s + 0.25) * (s^2 + 4040.12s + 3.8e6) + (Kp + Kds) * 1.15 * (24.285s + 8.202e5)}$$

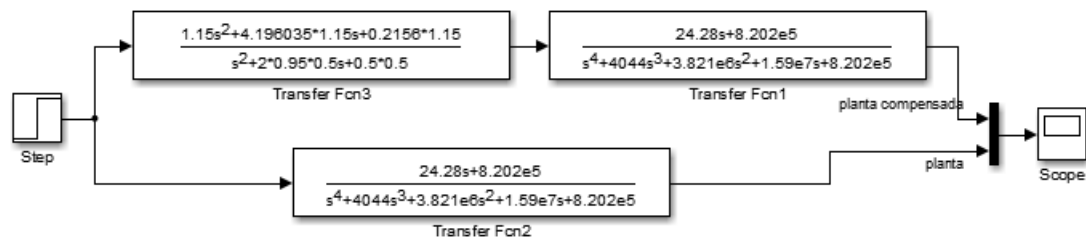
$$\lim_{s \rightarrow 0} \left(s * \frac{\lim_{s \rightarrow 0} (s * E(s))}{(s^2 + 0.95s + 0.25) * (s^2 + 4040.12s + 3.8e6) + (Kp + Kds) * 1.15 * (24.285s + 8.202e5)} \right)$$

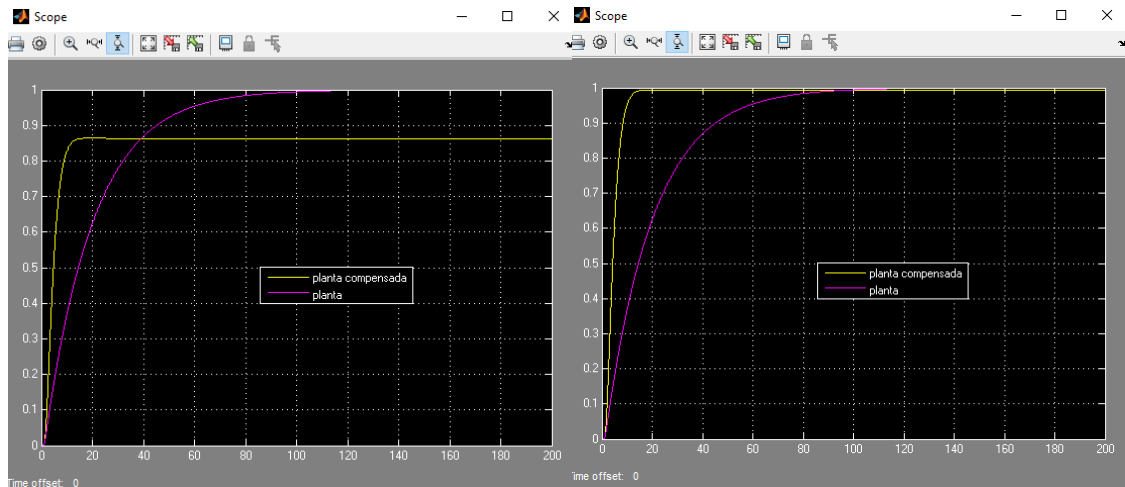
$$\lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{0}{(0.25) * (3.8e6) + (Kp) * 1.15 * (8.202e5)} \right)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{0}{951.12 + * Kp(9.13e5)} \right)$$

Matemáticamente la única manera para que el sistema no se estabilice es que $Kp = -1.01e-5$, (menor que cero, se puede garantizar que la ganancia no será negativa); es posible estabilizar el sistema con un valor de Kp positivo.

Figura 50. Sistema con compensador por adelanto





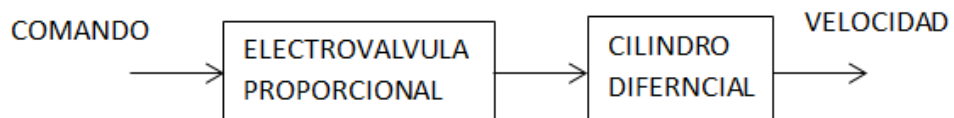
Fuente: Los autores

Se resalta la aceleración en el tiempo de asentamiento y la ausencia de sobre impulso para la planta (lazo cerrado) + el compensador.

5. MODELO DINÁMICO DEL SERVO DE VELOCIDAD

Un servo de velocidad es un mecanismo que puede controlar la rata de desplazamiento de una masa, y usualmente es un actuador lineal. En este se puede implementar un control de lazo cerrado si se mide con un encoder la velocidad, o en lazo abierto como es el caso de esta investigación.

Figura 51. Diagrama de bloques del controlador de velocidad.



Fuente: Los autores

5.1 MODELO MATEMÁTICO DEL CILINDRO

La dinámica del cilindro usado para el servo de velocidad es igual al de posición, por tanto las ecuaciones que modelan este componente son:

$$\Delta Q1 = A_1 s Xp + \frac{V1}{\beta_k} s \Delta P1 \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\Delta Q2 = A_2 s Xp + \frac{V2}{\beta_k} s \Delta P2 \quad \text{Ecuación 29}$$

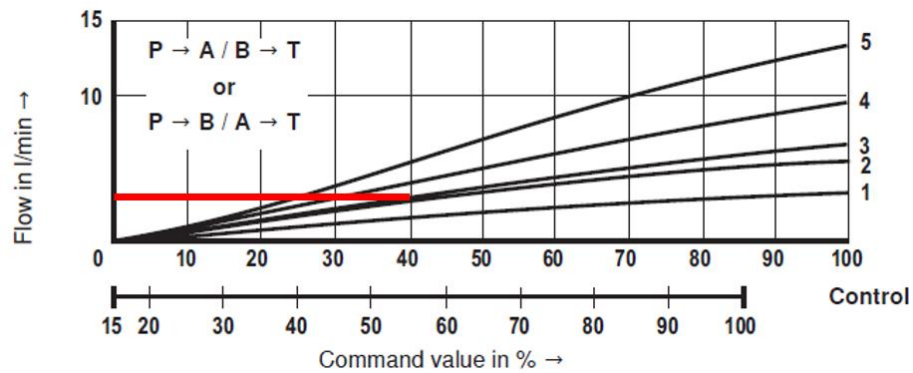
5.2 MODELO MATEMÁTICO DE LA ELECTROVÁLVULA PROPORCIONAL

La electroválvula proporcional usada en esta investigación posee electrónica integrada y usa retroalimentación interna para la posición del spool, como consecuencia presenta un comportamiento muy aproximado (<0.1).

Para modelar el comportamiento de este componente se debe definir: la entrada, que es la magnitud del voltaje de comando, y la salida, que es el caudal que ingresa al cilindro. Es necesario establecer las relaciones existentes entre pérdidas de caudal y de presión, presión, voltaje, caudal, y corrimiento del spool. Este modelo dinámico se aproxima al modelo de la servo válvula.

5.2.1 Ganancia de caudal. Se define como la relación entre caudal que entrega la válvula por unidad de voltaje o corriente de la electroválvula, del catálogo del fabricante obtiene la figura 52.

Figura 52. Ganancia de caudal por señal de comando



Fuente: REXROTH. Catálogo de la valvula 4WREE6, p12.

Sí se aproxima la curva numero 2 a una linea cuyo intercepto con el eje Q es cero, se tiene que la pendiente se puede calcular como la relacion Q/X_v :

$$\frac{dQ}{dX_v} = \frac{3,9}{0,52 * 10} = 0.75 \quad \text{Ecuación 30}$$

Como el intercepto con el eje Q es cero, la expresión queda:

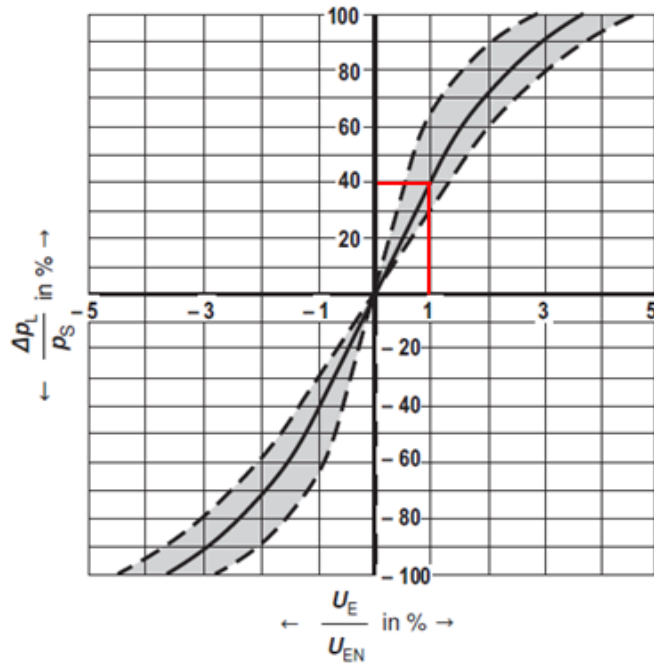
$$Kq = \frac{Q}{X_v} = 0.75 \quad \text{Ecuación 31}$$

5.2.2 Ganancia de presión por comando de la válvula. Definida como la relación que existe entre el cambio de presión por la válvula por unidad de voltaje o corriente de comando, donde U es la señal de comando y tomando como referencia el catálogo del fabricante de la figura 53 se obtiene:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{40/100}{20} = 0.02 \quad \text{Ecuación 32}$$

Figura 53. Ganancia de presión por señal de comando

Size 6



Fuente: REXROTH. Catálogo de la válvula tipo 4WREE6, p11.

5.2.3 Sensibilidad de la presión. Definida como el cambio de presión por unidad de desplazamiento de spool.

$$\frac{dP}{dX_v} = Kp \quad \text{Ecuación 33}$$

Si se considera:

$$\frac{dP}{dX_v} = \frac{dP}{dV} * \frac{dV}{dX_v} = \frac{dP}{dV} * \frac{dV}{dQ} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$\frac{dP}{dX_v} = \frac{40/100}{20} * 0.75 = Kp = 0.15$$

5.2.4 Ganancia de caudal por cambios de presión en la válvula. Definida como la relación matemática entre los cambios de caudal producto de las variaciones de presión.

$$K_c = -\frac{dQ}{dP} \quad \text{Ecuación 35}$$

Si se considera:

$$K_q = -\frac{dQ}{dX_v} \quad y \quad K_p = -\frac{dP}{dX_v}$$

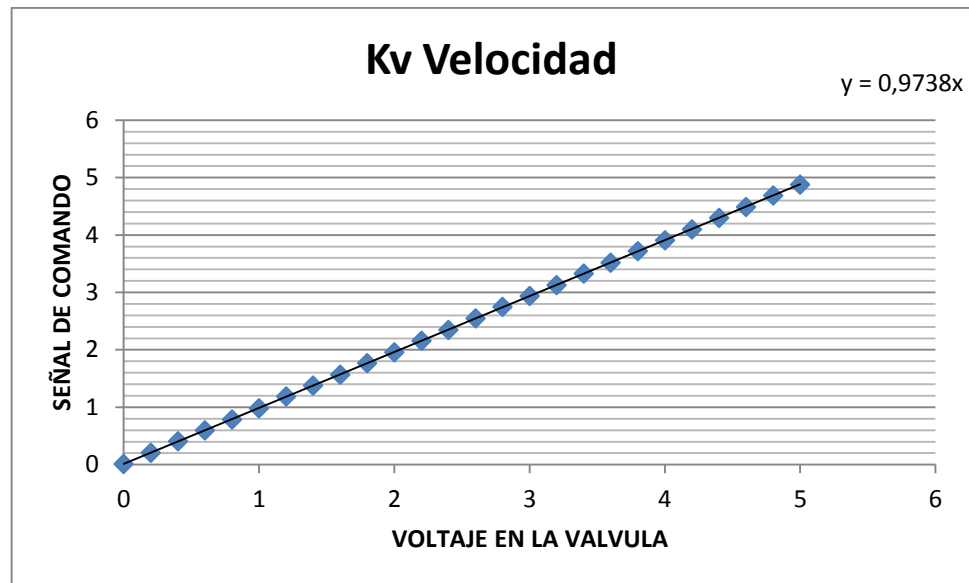
Se puede notar que

$$K_c = \frac{K_q}{K_p} = \frac{0.75}{0.15} = 5$$

5.2.5 Determinación de la ganancia de la electroválvula KV. Está definida como la relación matemática entre la señal de comando y el porcentaje de apertura del orificio por el que pasa el caudal en la electroválvula. Para conocer este valor es necesario contar con retroalimentación de la posición del spool; estas válvulas cuentan con electrónica integrada para mejorar la precisión.

En la tarjeta de comando de la válvula existen tres conexiones eléctricas (ver Figura 39): la primera, es la alimentación de la tarjeta que debe estar conectada a la fuente del banco de 24 Voltios; la segunda, conexión denominada “Valor actual de la electroválvula” se usará como una medida indirecta de la posición del spool y la tercera conexión, es la señal de comando que en esta prueba proviene del potenciómetro del banco. Con el montaje de la figura 41 se tomaron los datos del Anexo C, el resultado de esta prueba se resume en la figura 53.

Figura 54. Grafica de la ganancia Kv



Fuente: Los autores

De la pendiente de la recta el valor de Kv es 0,9738

Tabla 4. Constates de la electroválvula

ELECTROVÁLVULA	
Constante	Valor
K_c	5
K_p	0.15
K_q	0.75
K_v	0.9738

Fuente: Los autores

Es posible medir el voltaje de comando a la electroválvula proporcional y el caudal que esta entrega. (Estos datos se presentan en el Anexo D) Según esta información se observa que el valor de Kev es 0.78, el cual corresponde al producto de Kq y Kv. Según los datos del fabricante, y teniendo en cuenta las

aproximaciones consideradas en esta investigación el valor teórico de K_{qv} es igual a 0.76, se concluye que las aproximaciones son válidas pues la desviación del valor es de menor al 5%.

Los cambios de caudal que pasan por la válvula se pueden relacionar con el desplazamiento del spool y la presión del fluido como sigue:

$$\Delta Q_1 = K_{q1} * \Delta X_v - K_{c1} * \Delta P_1 \quad \text{Ecuación 38}$$

$$\Delta Q_2 = K_{q2} * \Delta X_v + K_{c2} * \Delta P_2 \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde X_v es la posición del spool.

5.3 MODELO DINÁMICO DE LA PLANTA

El sistema se puede modelar como un sistema tipo S.I.S.O; donde la entrada es el voltaje de comando a la electroválvula proporcional y la salida es la velocidad del pistón:

Si se combinan las ecuaciones 38 y 39 se obtiene la siguiente relación:

$$K_{q1} * \Delta X_v = A_1 * s * \Delta X_p + \left(K_{c1} + \frac{V_1}{\beta_k} s \right) \Delta P_1 \quad \text{Ecuación 40}$$

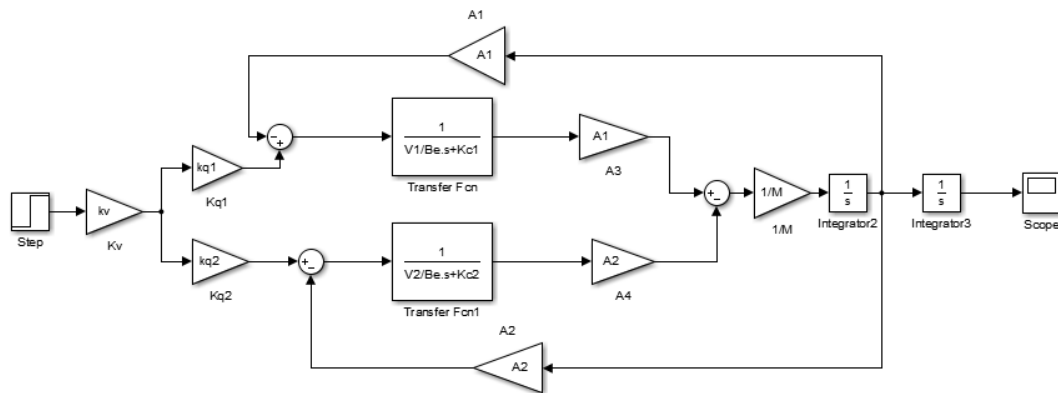
$$-K_{q2} * \Delta X_v = -A_2 * s * \Delta X_p + \left(K_{c2} + \frac{V_2}{\beta_k} s \right) \Delta P_2 \quad \text{Ecuación 41}$$

La relación de caudal por unidad de voltaje de comando es proporcional al corrimiento del spool para permitir el paso del fluido, de esta manera:

$$\frac{\Delta X_v}{\Delta V} = 0.9738$$

Si se combinan las ecuaciones 24 y 25 en un diagrama de bloques de lazo abierto el sistema se puede plantear como se muestra en la figura 55.

Figura 55. Planta servo de velocidad



Fuente: Los autores

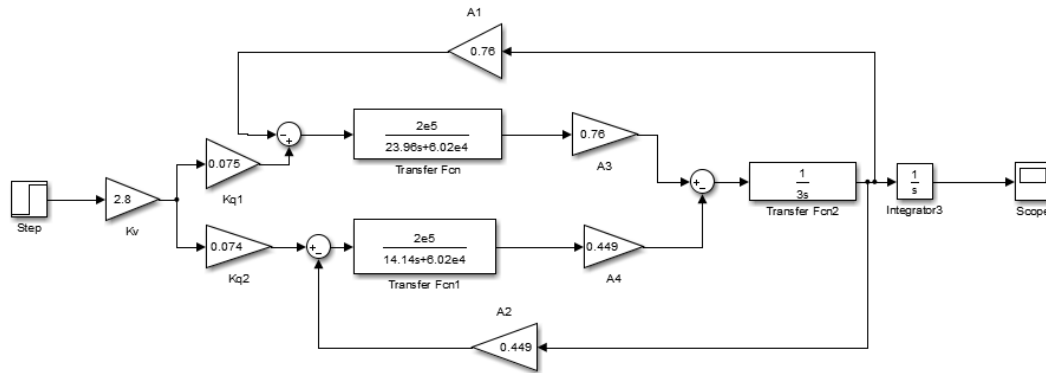
Tabla 5. Constantes para hallar la ecuación de la planta.

CONSTANTES PARA LA SIMULACIÓN EN SIMULINK®			
Variable	Símbolo	Unidades	Valor
Área del pistón	A1	m^2	0.76
Área Anular	A2	m^2	0.449
Volumen de la Cámara del pistón	V1	m^3	23,96
Volumen de la Cámara anular	V2	m^3	14,14
Coeficiente de Descarga de la válvula puerto A	Kq1	Adimensional	0.75
Coeficiente de Caída de presión de la válvula puerto A	Kc1	Adimensional	2.871
Coeficiente de Descarga de la válvula puerto B	Kq2	Adimensional	0.75
Coeficiente de Caída de presión de la válvula puerto B	Kc2	Adimensional	2,871
Módulo de compresibilidad del aceite	B	Pascal	2.1E5

Fuente: Los autores

Con los valores numéricos antes mencionados se tiene:

Figura 56. Planta del servo de velocidad con valores.



Fuente: Los autores

En Matlab es posible obtener la función de transferencia de la planta partiendo del diagrama de bloques, es necesario cambiar la señal de entrada (step) a input y el scope para visualizar la salida se reemplaza con output; se guarda el archivo con el nombre “LAZO ABIERTO”, en el script de MATLAB y se digita el siguiente código:

```
close all
clc
[num,den]=linmod('LAZO ABIERTO')
gv=tf(num,den)
pzmap(g)
```

Con lo anterior se obtiene:

$$Gv(s) = \frac{118.7s + 7.996e7}{s^4 + 6.457e4s^3 + 9.732e8s^2 + 1.275e8s}$$

6. IMPLEMENTACIÓN EN LABVIEW

En este capítulo se muestra la manera en que se implementó el controlador para el servo de posición y el servo de velocidad en LabView.

6.1. IMPLEMENTACIÓN DEL SERVOSISTEMA DE POSICIÓN LINEAL

En este apartado se explica lo pertinente al servo de posición.

6.1.1. Panel Frontal. Es la interfaz gráfica con la cual interactúa el usuario y por medio de la cual puede variar la señal de posicionamiento del actuador o Set point (1), usar el controlador ya sea con feedforward o sin él, activando la opción en el botón Feedforward (2), modificar las constantes Kp y Kd (3), guardar los datos si es necesario con el respectivo módulo (4), cambiar al controlador de velocidad (5), visualizar la posición actual del actuador (6), el error y el porcentaje de error (7), la ecuación de la planta (8), el diagrama de bode (9), el diagrama de polos (10), el voltaje que se envía a la válvula (11) y detener el programa con el botón de emergencia (12). (Ver figura 57).

Figura 57. Panel frontal del controlador de posición.



Fuente: Los autores

6.1.2. Diagrama de bloques. A continuación se exponen los subsistemas que permitieron controlar el cilindro diferencial como un servo de posición con la electroválvula de alta respuesta dinámica.

Se realizó un análisis comparativo del comportamiento del sistema sin controlador ($K_p=1$ y $K_d=0$) y con controlador ($K_p \neq 1$ y $K_d \neq 0$). Se simuló en lazo cerrado, sin controlador y se contrastó el tiempo de asentamiento. Como la estabilidad del sistema es la variable más relevante, se implementó en el algoritmo de control un diagrama de polos y ceros sensible a los cambios de ganancias del controlador para tener una mejor comprensión del sistema.

La función de transferencia de la planta se calculó en el capítulo 4 y se obtuvo:

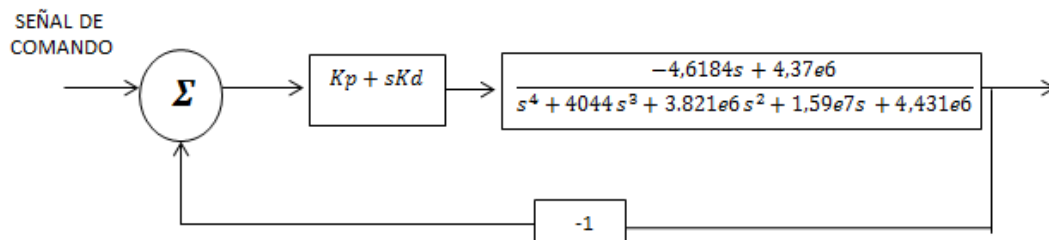
$$G_p(s) = \frac{24.285s + 8.202 \cdot 10^5}{s^4 + 4044s^3 + 3.821 \cdot 10^6 s^2 + 1.596 \cdot 10^7 s + 8.202 \cdot 10^5}$$

Y se visualiza en el panel frontal. (Ver figura 57).

La ecuación del controlador corresponde a:

$$\frac{e(s)}{v(s)} = K_p + s K_d$$

Donde $e(s)$ es la diferencia entre la señal de comando y la posición actual del cilindro, K_p y K_d son las constantes proporcional y derivativa y $v(s)$ es la señal de comando para la planta.

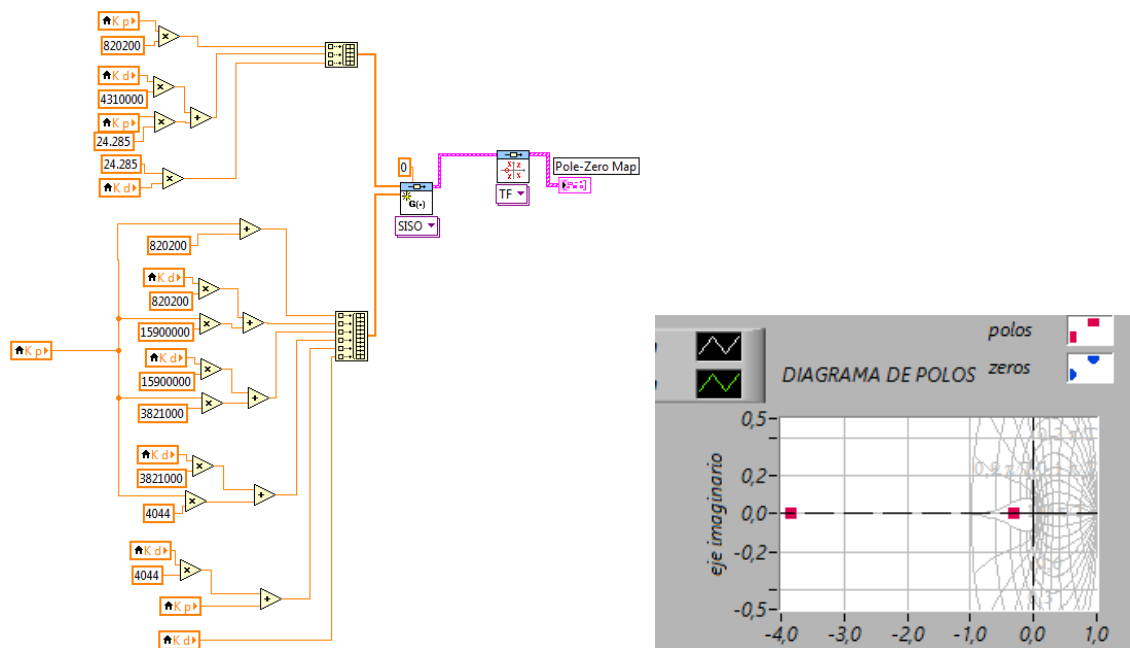


La simplificación de este diagrama de bloques dio:

$$\frac{-4,6184s^2Kd + s(4,37e6Kd - 4,618Kp)}{s^5Kd + s^4(Kp + 4044Kd) + s^3(4044Kp + 3,82e6Kd) + s^2(3,821e6Kp + 1,59e7Kd) + s(1,59e7Kp + 4,431e6Kd) + 4,437e6}$$

Para poder ver el diagrama de polos y ceros se debe tener una expresión de la forma: numerador/denominador, pero cuando se calcula se nota que todos los términos están en función de los valores Kp y Kd, que son una entrada variable por el usuario, así que se implementa como se muestra en la figura 58 con su respectiva visualización en el panel frontal.

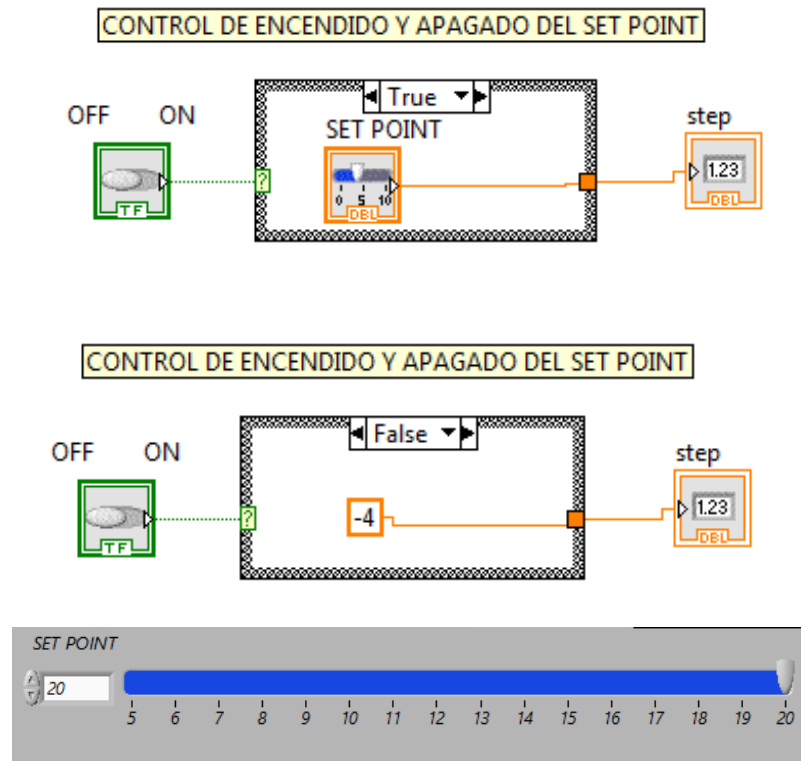
Figura 58. Diagrama de polos y ceros.



Fuente: Los autores

6.1.3. Señal de comando. Se hace necesario que el usuario pueda controlar el momento en que se desea enviar la señal de comando. Por seguridad, si no existe setpoint el cilindro debe estar retraído, esto se implementa por medio de un swith case (ver Figura 59) que se controla por medio de un botón boleano simulado como un interruptor con enclavamiento mecánico, y cuya función es enviar la señal de comando cuando este botón esté encendido; en caso contrario, envía una señal negativa hacia la electroválvula sin pasar por el controlador para así enviar el cilindro a la posición de inicio.

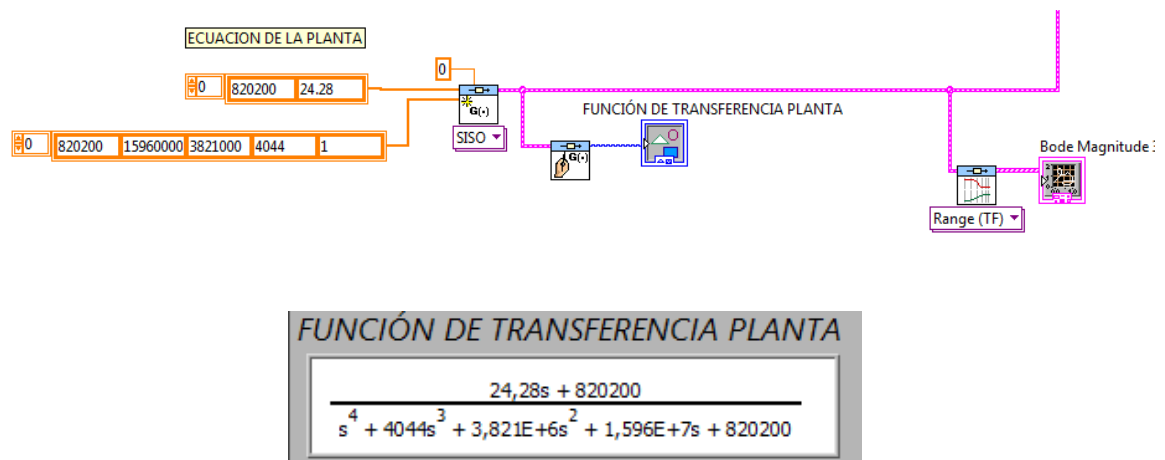
Figura 59. Tratamiento de la señal de comando



Fuente: Los autores

6.1.4. Modelado de la planta. La ecuación de transferencia de la planta fue calculada en el capítulo 4, se simula como se muestra en la figura 60, para fines académicos se muestra la ecuación en el panel de control así como el diagrama de Bode y el diagrama de polos y ceros.

Figura 60. Modelado de la planta

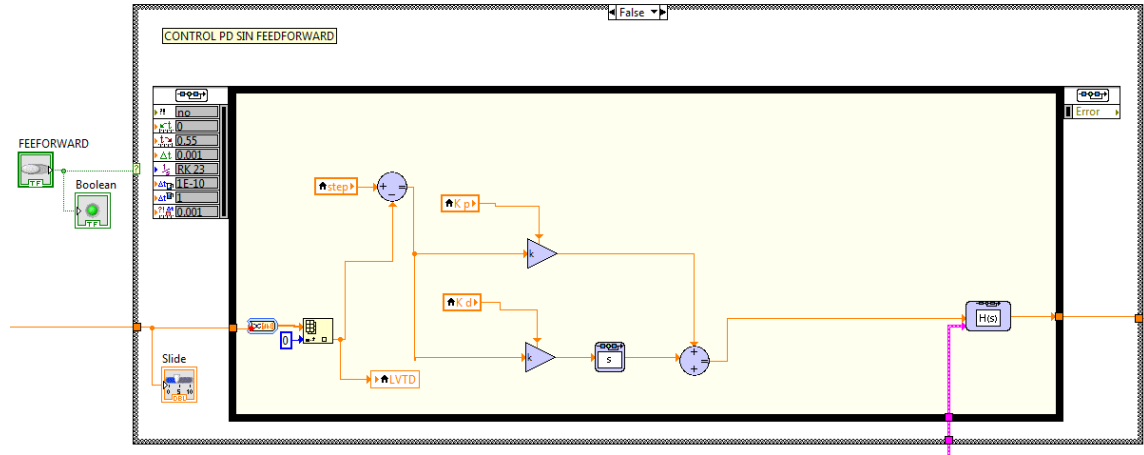


Fuente: Los autores

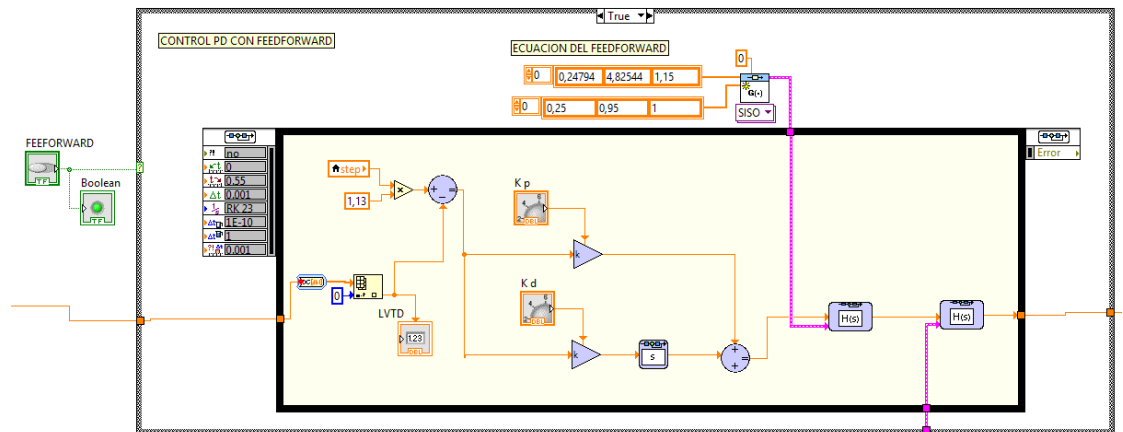
6.1.5. Bloque de control y simulación. Para poder implementar el controlador PD y el compensador por adelanto se usa el bloque “control and simulation” donde se escriben los parámetros con los que se desarrolla la simulación como: el solucionador, los deltas de tiempo entre otros; además, para fines académicos es posible hacer la simulación con feedforward o sin este, para ello se usa un switch case que se activa con una señal booleana, que permite cambiar de controlador: PD, cuando la señal está inactiva (caso falso) o PD+ FEEDFORWARD cuando la señal esta activa (caso verdadero).

Figura 61. Bloque de control y simulación

a. Controlador PD sin feedforward



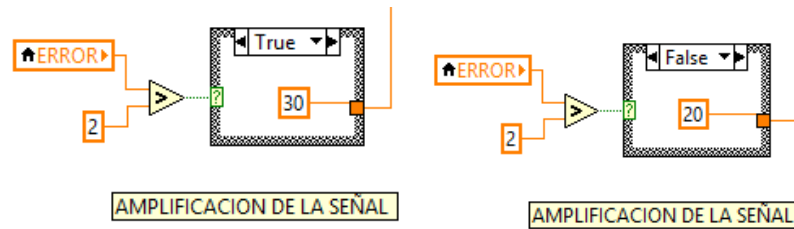
b. Controlador PD con Feedforward



Fuente: Los autores

6.1.6. Amplificación de la señal de control. En la búsqueda de mejorar el comportamiento inercial del sistema, se implementó lo siguiente: cuando la diferencia entre la posición actual y la señal de comando es superior a 2, un sub-controlador permite enviar más ganancia proporcional a la electroválvula; en el caso contrario (≤ 2) se envía una ganancia más pequeña, esto produce que la aproximación sea rápida pero evita que se presenten sobre impulsos. Lo anterior, se implementa por medio de un Switch case que se controla por medio de una señal booleana producto de comparar el valor del error con 2; si es superior, la ganancia que se envía es de 30; pero si es inferior, la ganancia es de 20. (Ver figura 62).

Figura 62. Amplificación de la señal



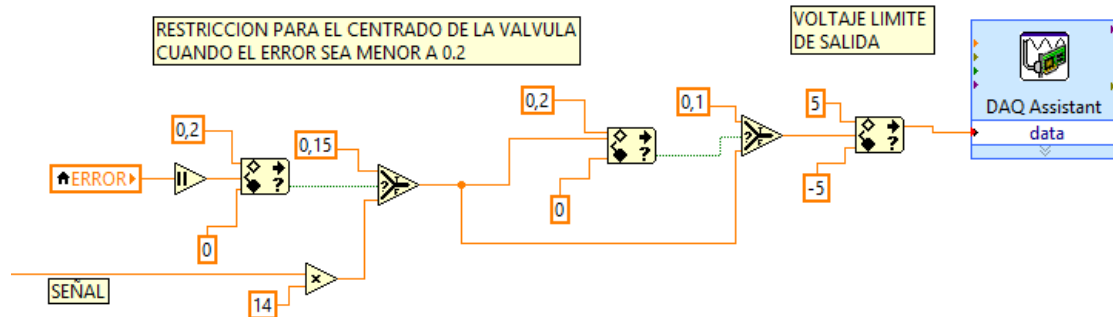
Fuente: Los autores

6.1.7. Centrado de la electroválvula. La electroválvula que se usó en esta investigación presenta un traslape positivo, que se corrige con un valor entre 0.09 y 0.12 Voltios. Es de notar que el valor de voltaje de centrado de la válvula va variando a medida que el aceite se calienta, llegando hasta un valor mínimo de 0.09 voltios: es decir, que la posición en la que no se mueve el spool demanda este voltaje.

Para enviar el voltaje de centrado a la electroválvula proporcional se usa el error como señal de referencia: si el error es menor de 0,2 la válvula debe centrarse y,

adicionalmente se implementa un filtro que permite enviar señales a la electroválvula cuyo rango es de $[-5,5]$ Voltios, pues entre estos valores está comprendido el máximo caudal con el que el banco trabaja (3.9 gpm).

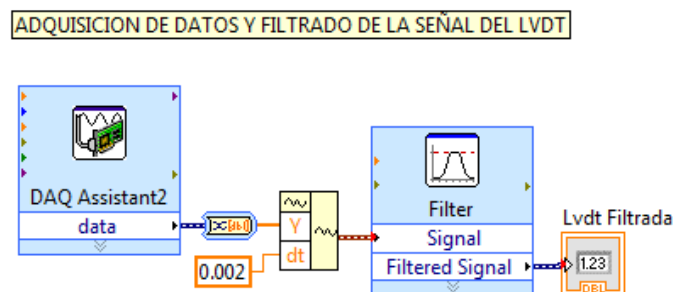
Figura 63. Centrado de la electroválvula proporcional de alta respuesta dinámica



Fuente: Los autores

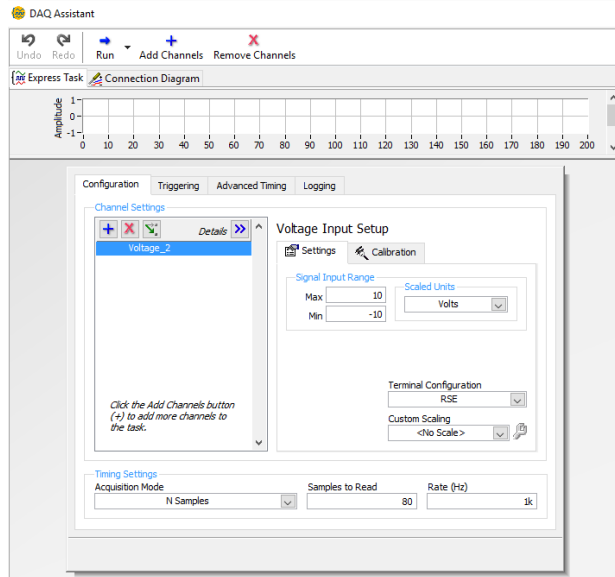
6.1.8. Lectura, filtrado y equivalencia de la señal del sensor LVDT. Para adquirir la señal de voltaje analógico se usa el DAQ ASSISTANT de LabView y se escoge el puerto AI1 donde se conecta el LVDT, se limita la tensión de salida al rango de $[-10,10]$ Voltios, admisible para la tarjeta DAQ, se elige un canal con 80 muestras por segundo. Este proceso se muestra en la figura 64-65.

Figura 64. Lectura LVDT



Fuente: Los autores

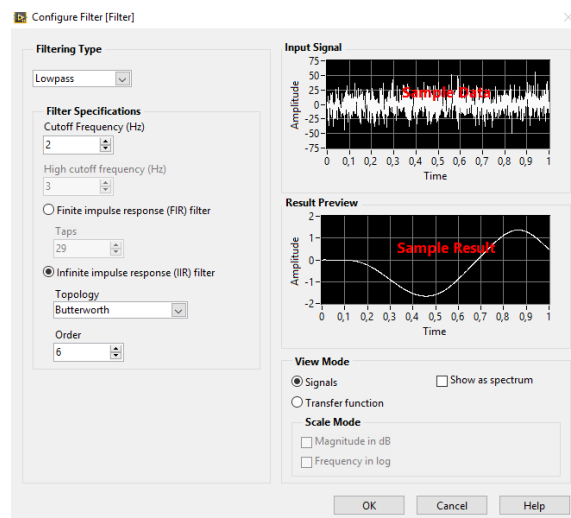
Figura 65. Configuración del DAQ Assistant2



Fuente: Los autores

La señal del sensor presenta gran ruido, por esto se pasa por un filtro pasa bajas BUTTERWORTH cuya frecuencia de corte está en 222 Hz, de orden 6, la señal es aceptable, como se muestra en la (Figura 66).

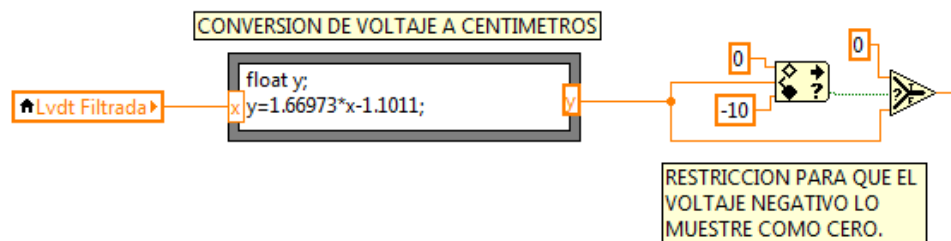
Figura 66. Configuración del filtro



Fuente: Los autores

El sensor tiene un rango de voltaje de [0,10] Voltios en su canal de salida, pero su rango de medición es de 10 cm; la relación de desplazamiento-voltaje en el sensor es lineal y se calculó con los datos que se presentan en el Anexo F, se implementa como se muestra en la figura 66, si por alguna razón (alimentación inversa del sensor) se presenta un voltaje negativo, se cuenta con un selector que envía un 0 para esos valores.

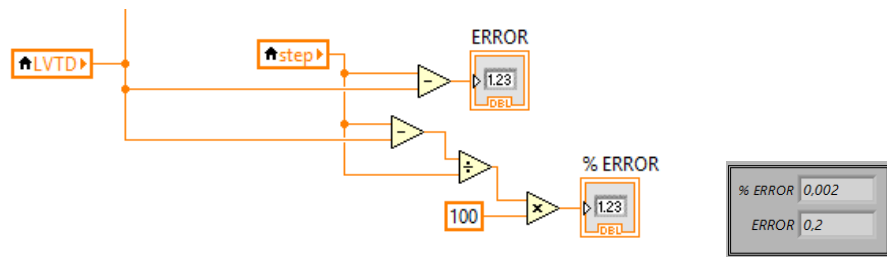
Figura 67. Conversión de voltios a cm en el LVDT



Fuente: Los autores

6.1.9. Calculo del Error. Para mayor comprensión del usuario, se visualiza en el panel frontal el error y el porcentaje de error entre el valor de set-point y el valor actual que marca el LVDT. (Ver figura 68).

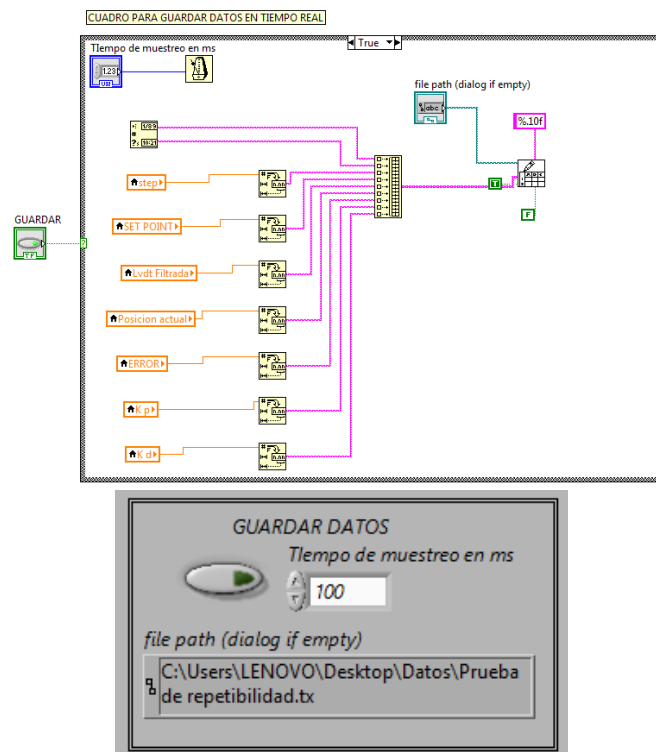
Figura 68. Cálculo y visualización del porcentaje de error



Fuente: Los autores

6.1.10. Bloque para guardar datos. Para hacer los análisis de desviación estándar, repetividad y respuesta del sistema en lazo abierto es necesario tener gran cantidad de datos, esto se logra con el bloque de switch case (ver Figura 69) que se activa cuando el usuario presiona el botón de guardar datos del panel de control.

Figura 69. Almacenamiento de señal



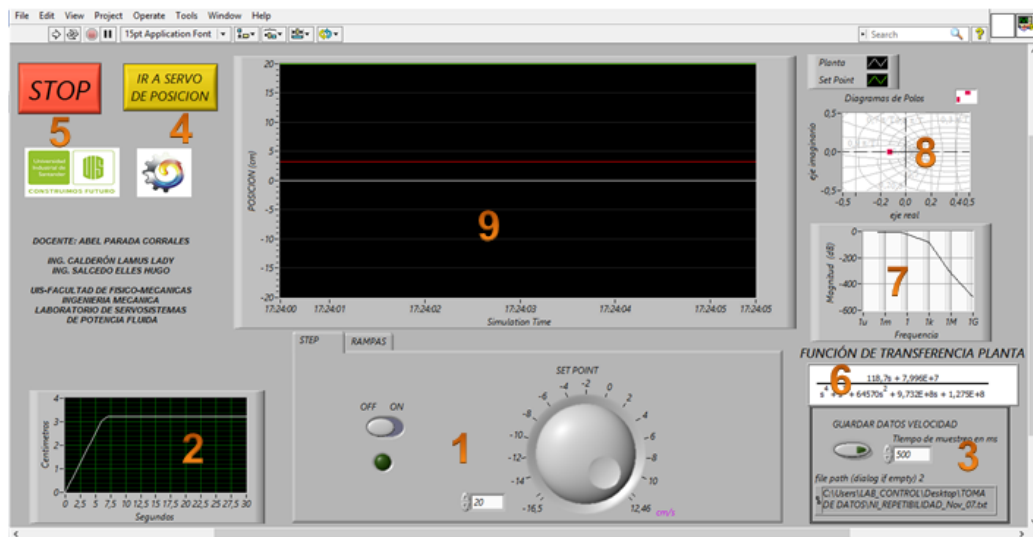
Fuente: Los autores

6.2. IMPLEMENTACIÓN DEL SERVOSISTEMA DE VELOCIDAD

En este apartado se explica lo pertinente al servo de velocidad

6.2.1. Panel frontal. Es el panel con el que interactúa el usuario, donde este puede controlar la velocidad del actuador directamente mediante dos formas: a) una señal de Set point o b) por medio de rampas (1), vale la pena mencionar, que sólo un tipo de estas señales puede ser enviada a la vez. El usuario puede visualizar las rampas antes de enviarlas en la gráfica (2), también puede guardar los datos (3), cambiar al servo de posición (4), parar el programa con el botón de emergencia (5), visualizar la ecuación de la planta (6), el diagrama de Bode (7), el diagrama de polos (8) y las señales que se están enviando a la válvula en tiempo real (9). (Ver figura 69).

Figura 70. Panel frontal del servo de velocidad

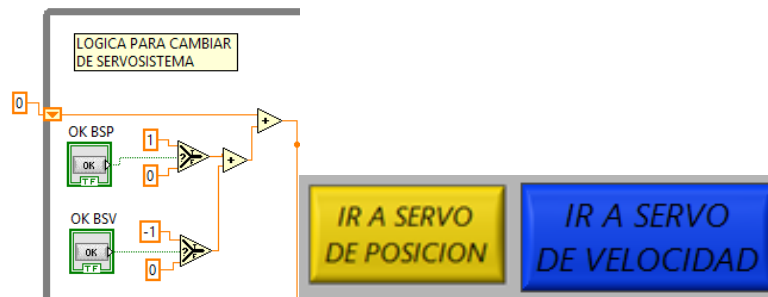


Fuente: Los autores

A continuación se detallan cada uno de los módulos del diagrama de bloques y su correspondiente en el panel frontal.

6.2.2 Cambio de controlador. Para cambiar de servo de posición a servo de velocidad se implementó un botón que permite cambiar entre el uno y el otro. (Ver figura 71).

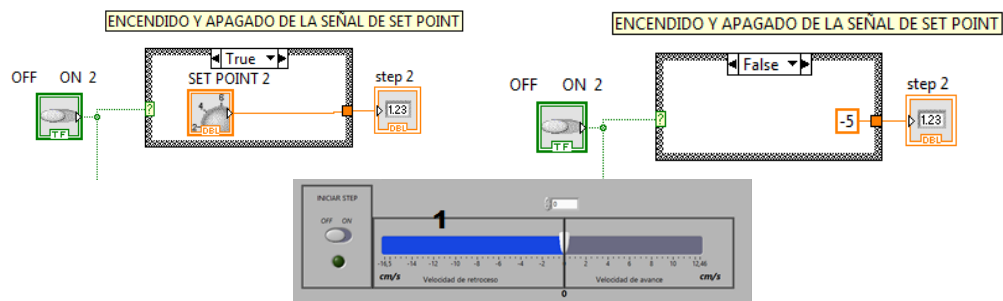
Figura 71. Diagrama para cambiar de controlador.



Fuente: Los autores

6.2.3. Señal de comando. Se hace necesario que el usuario pueda controlar el momento en que se desea enviar la señal de comando. Por seguridad, si no existe setpoint el cilindro debe estar retraído, esto se implementa por medio de un swich case (ver Figura 71) que se controla por medio de un botón Knob, que es simulado como un potenciómetro cuya función es enviar la señal de comando cuando este botón es habilitado al encender un botón booleano. En caso contrario, este envía una señal negativa hacia la electroválvula, sin pasar por el controlador, para así devolver el cilindro a la posición inicial.

Figura 72. Tratamiento de la señal de comando

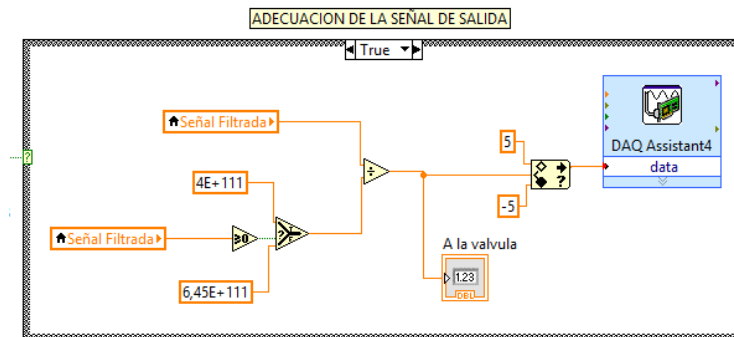


Fuente: Los autores

Para calcular la máxima velocidad, se calculó el tiempo que al cilindro le toma hacer el recorrido completo usando el máximo voltaje que se envía para controlar la válvula. Se obtuvo que la máxima velocidad de salida es: 12,46 cm/s y de retroceso de 16,5 cm/s.

6.2.4. Adecuación de la señal de salida. Al implementar el controlador en lazo abierto e introducir la planta del sistema, los valores que arroja son demasiado altos por lo cual hay que adecuar la señal al rango pertinente para el sistema. (Ver figura 73).

Figura 73. Adecuación de la señal al usar el step.



Fuente: Los autores

6.2.5. Rampas. Para obtener del sistema diferentes velocidades es necesario entregar diferentes Steps. Lo anterior no es práctico, así que se implementan señales que sean triangulares donde el usuario pueda definir el tiempo de aplicación y la amplitud de la señal de comando, comportándose la señal de comando como se muestra en la figura 74. En esta investigación se implementaron cuatro rampas, que le permiten al usuario modificarlas a cabalidad.

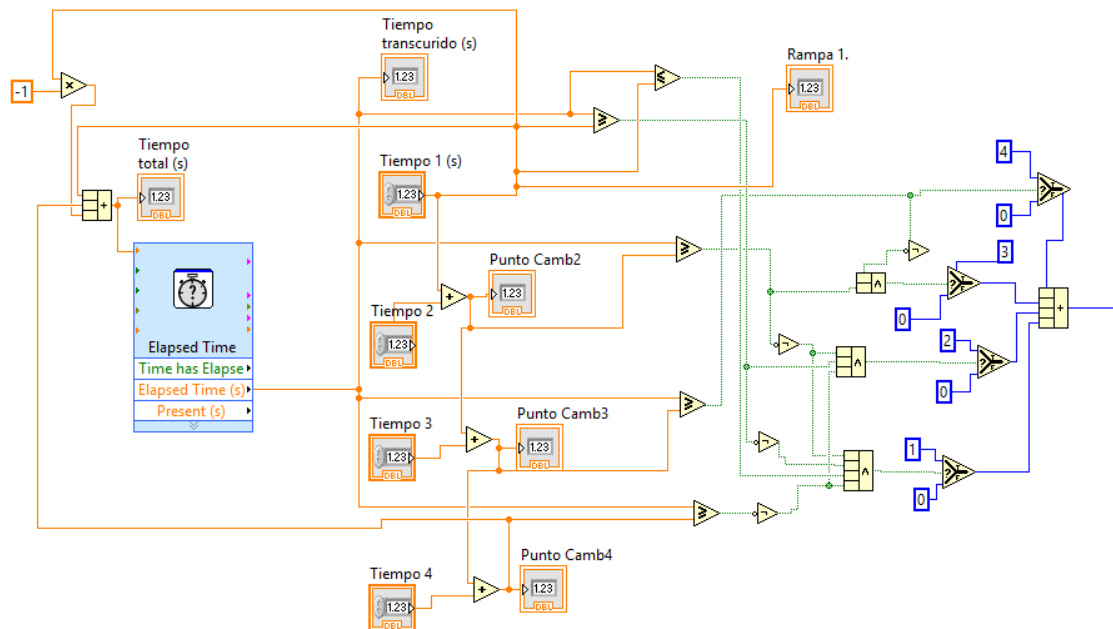
Figura 74. Rampas a disposición del usuario

STEP		RAMPAS AUTOMATICAS								
INICIAR RAMPAS ON/OFF ON	Valor de la rampa (Volt) Rango: -5 a 5 Volt		rampa 1		rampa 2		rampa 3		rampa 4	
			5		3		1		4	
	Tiempo total (s)	Tiempo transcurrido (s)	Punto de cambio Rampa 1 (s)		Punto de cambio Rampa 2 (s)		Punto de cambio Rampa 3 (s)		Punto de cambio Rampa 4 (s)	
	1	0	4		7		9		13	
Tiempo de ejecución de cada rampa (s)		Rampa 1.		Rampa 2.		Rampa 3.		Rampa 4.		
		1		0		0		0		>3
		(Positiva)		(Positiva)		(Positiva)		(Negativa)		

Fuente: Los autores

La ejecución de las rampas de se deben ejecutar secuencialmente y lo hacen de forma automática, de la 1 a la 4, esta implementación se puede ver en la Figura 74 y la estructura lógica puede ser consultada en el Anexo G y se ve como en la figura 75.

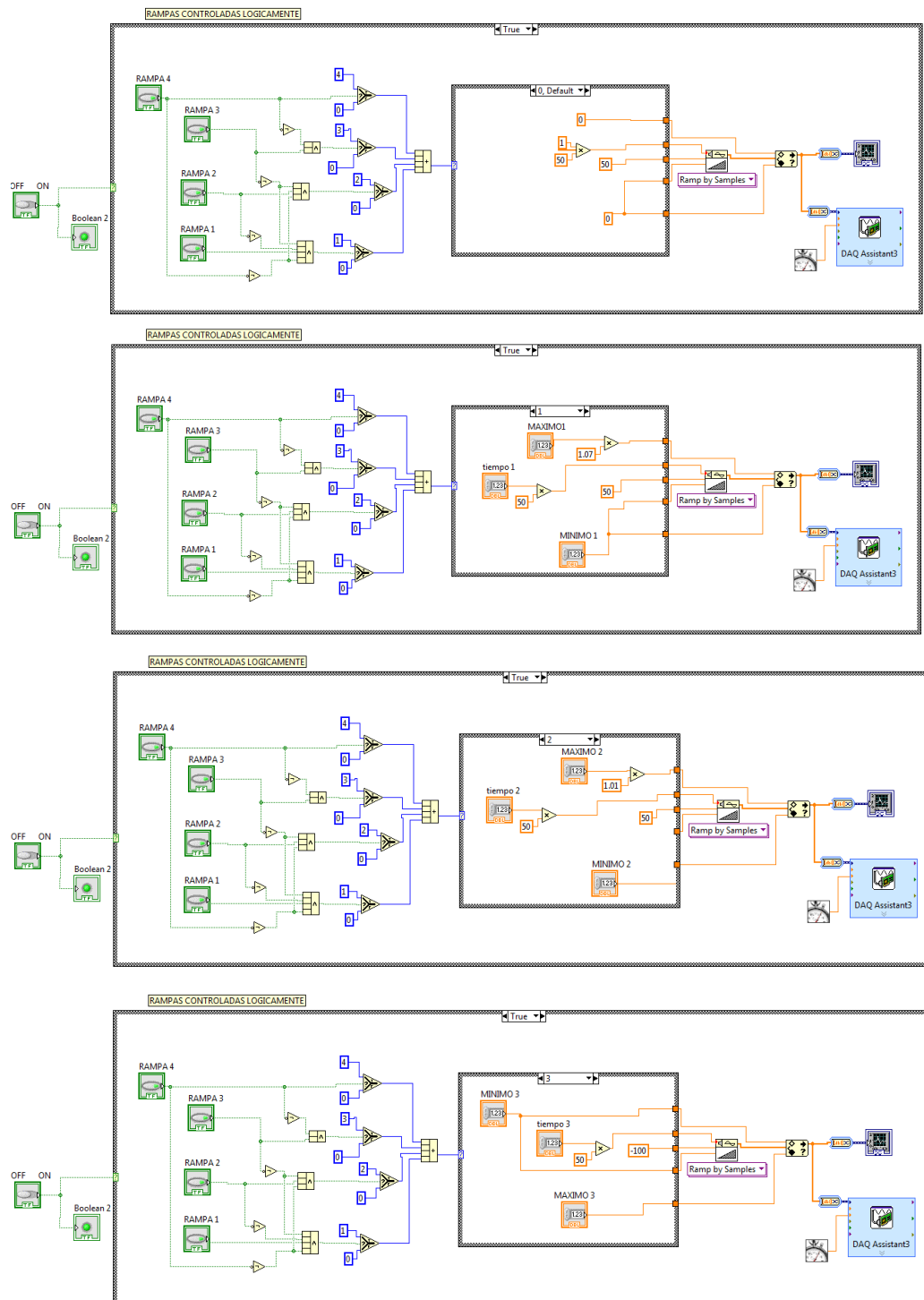
Figura 75. Lógica para la prioridad de las rampas



Fuente: Los autores

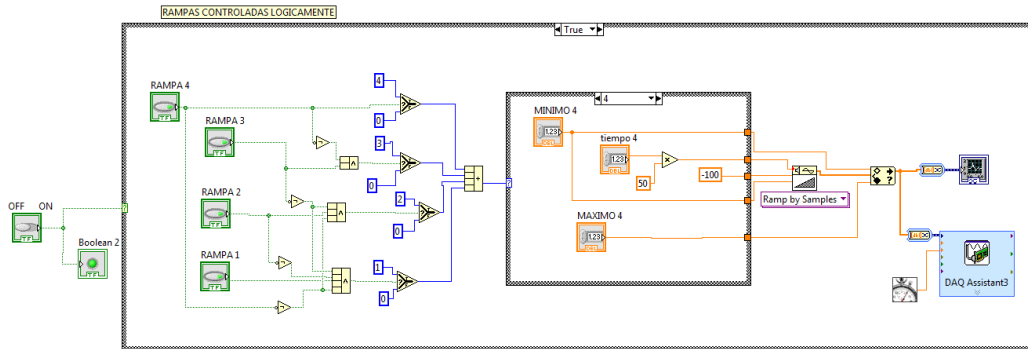
Los puntos de cambio son los valores del reloj donde comienza a ejecutarse la siguiente rampa, siendo el tiempo de ejecución de la resta entre el punto de cambio superior y el inmediatamente anterior.

Figura 76. Implementación de las rampas (Parte I)



Fuente: Los autores

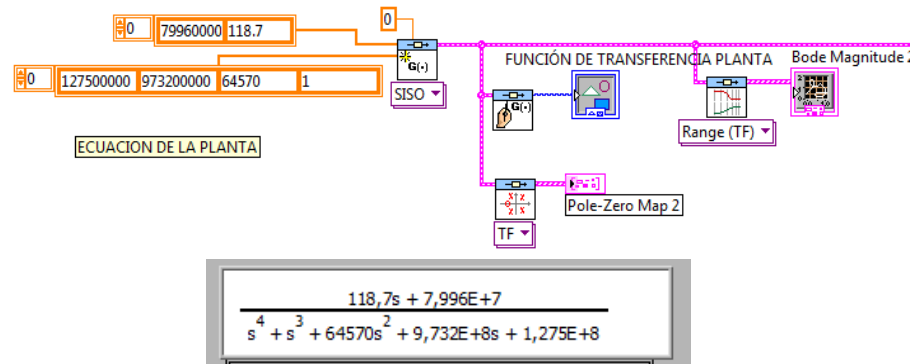
Figura 77. Implementación de las rampas (Parte II)



Fuente: Los autores

6.2.6. Modelado de la planta. La ecuación de transferencia de la planta fue calculada en el capítulo 5, y esta se simula como se muestra en la figura 78. Para fines académicos se muestra la ecuación en el panel de control así como el diagrama de Bode y el diagrama de polos y ceros.

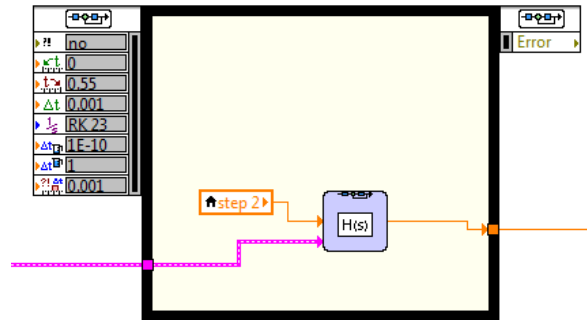
Figura 78. Simulación de la planta



Fuente: Los autores

6.2.7. Bloque de control y simulación. Para poder implementar el controlador se usa el bloque “control and simulation” donde se escriben los parámetros con los que se desarrolla la simulación como el solucionador, los deltas del tiempo entre otros.

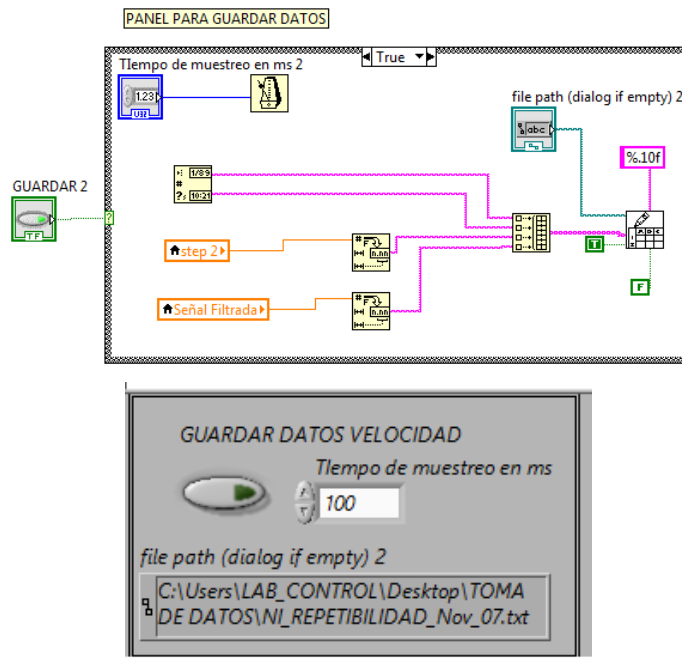
Figura 79. Bloque de control y simulación



Fuente: Los autores

6.2.8. Bloque para guardar datos. Para hacer los análisis de desviación estándar, repetividad y respuesta del sistema en lazo abierto es necesario tener gran cantidad de datos, esto se logra con el bloque de switch case (ver Figura 80) que se activa cuando el usuario presiona el botón de guardar datos del panel de control.

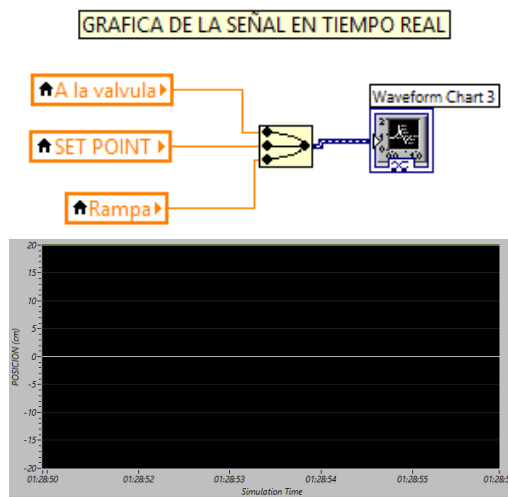
Figura 80. Almacenamiento de la información



Fuente: Los autores

6.2.9. Gráfica de salida. Este módulo permite visualizar el comportamiento de los datos enviados a la válvula. (Ver figura 81).

Figura 81. Gráfica señales de salida



Fuente: Los autores

7. VALIDACIÓN DEL MODELO DINÁMICO

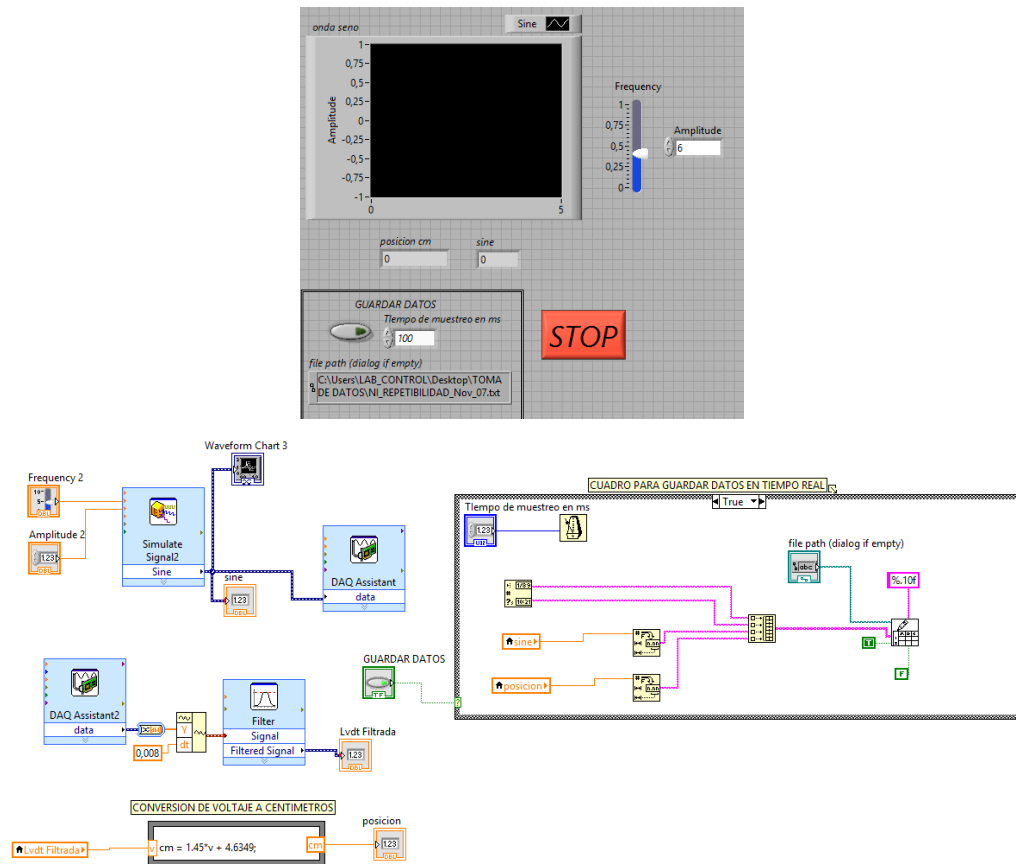
7.1 DETERMINACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

Con los modelos matemáticos que buscan describir los fenómenos físicos, se hacen aproximaciones y simplificaciones que inducen errores, por tanto es necesario conocer la dimensión del error para cuantificar la confiabilidad del modelo dinámico del sistema.

Se plantea someter la planta a una señal de comando sinusoidal y verificar por medio del LVDT la respuesta del sistema en lazo abierto. Se envió la señal y se adquirió la respuesta del sistema por medio de Labview el cual exportó los datos simultáneos de comando y posición a un archivo de texto para su posterior análisis.

El código implementado para desarrollar este capítulo se muestra en la figura 82. Se tomaron los datos con una frecuencia de muestreo de 80 Hz y las conexiones eléctricas utilizadas fueron las mismas que se implementaron para el servo de posición con la única diferencia que existe un puente entre los puertos analógicos Ao1 y Ai2, para que además de enviar la señal de salida también la guarde; entonces, el sistema queda con 2 entradas analógicas: Ai1 al puerto del sensor y Ai2 a la electroválvula.

Figura 82. Implementación onda senoidal



Fuente: Los autores

Las pruebas se desarrollaron para una amplitud de 6 unidades, un desfase de 0° y una frecuencia angular de 0.408163. Con estos valores la carrera del cilindro puede completarse a cabalidad. Los datos se exportaron a Excel (Ver Anexo H) para luego poder importarlos desde *Matlab* y hacer la identificación del sistema gracias a la biblioteca *identification system* del mismo.

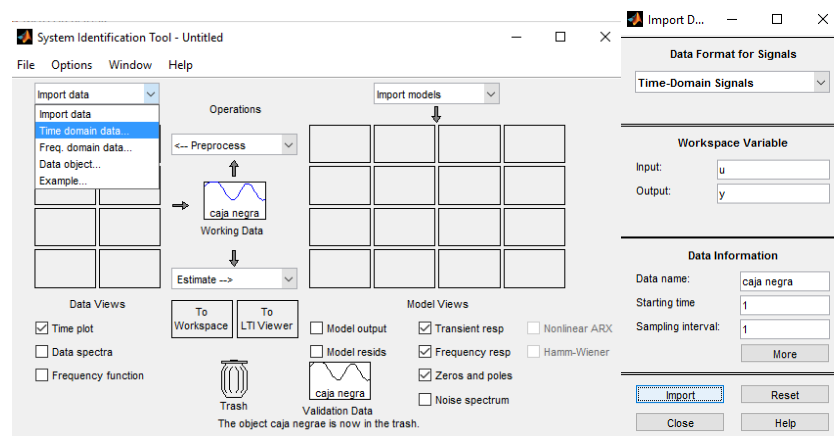
Primero se almacenaron los datos en vectores del mismo tamaño, utilizando las siguientes líneas de programación:

```
u=xlsread('Prueba u.xlsx');
```

```
y=xlsread('Prueba y.xlsx');
```

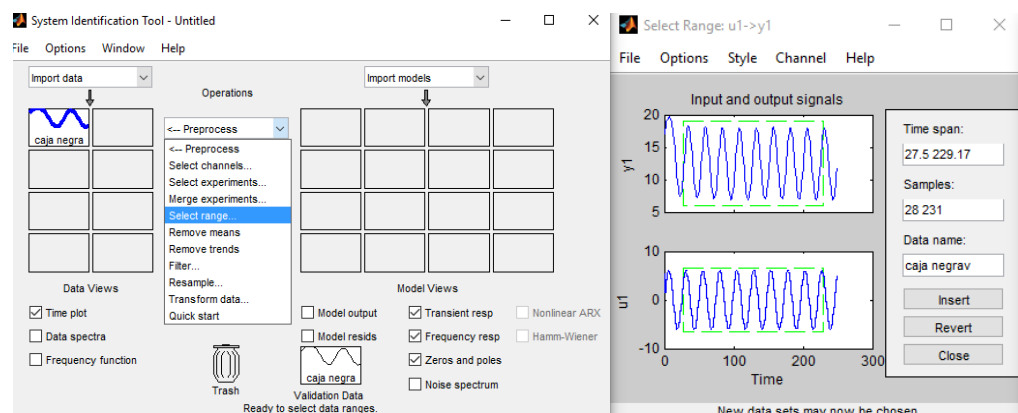

Se procedió a abrir el complemento *Identification System* y se seleccionaron los vectores correspondientes a la entrada y salida del sistema respectivamente. Se pudo apreciar que en los primeros 20 datos el sistema no sigue la onda senoidal, por tanto, se acotaron los datos como se muestra en la figura 83 y se seleccionó este rango para que el programa determinara la función de transferencia del sistema.

Figura 83. Importación de datos



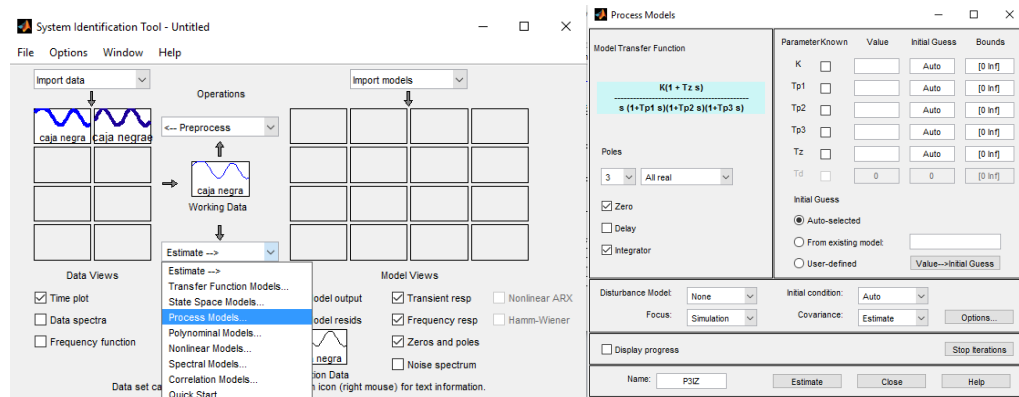
Fuente: Los autores

Figura 84. Selección del rango adecuado para el análisis



Fuente: Los autores

Figura 85. Determinación de la función de transferencia de la planta



Fuente: Los autores

Esto da como resultado:

```

Process model with transfer function:

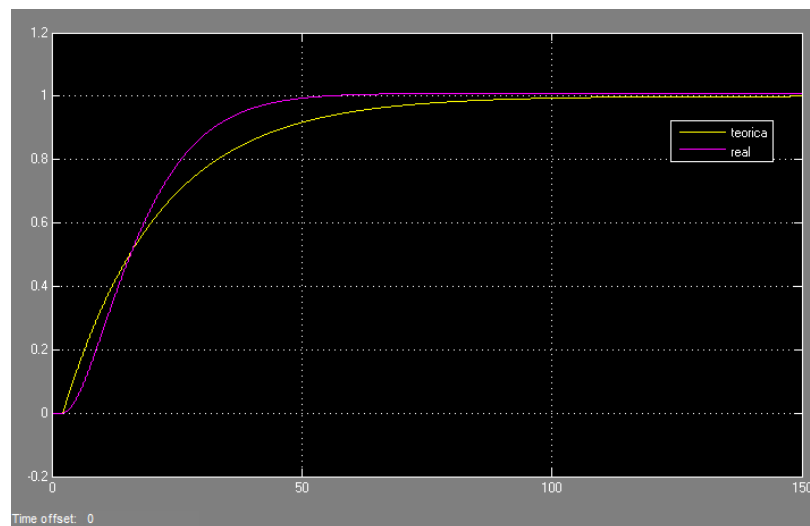
          1+Tz*s
G(s) = Kp * -----
          s (1+Tp1*s) (1+Tp2*s) (1+Tp3*s)

      Kp = 23
      Tp1 = 2757
      Tp2 = 1456
      Tp3 = 4.22
      Tz = 33000
    
```

7.2 COMPARACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL CON EL MODELO TEÓRICO

La ecuación encontrada es significativamente diferente en sus valores a la ecuación teórica, sin embargo la comparación debe tener en cuenta la forma como responden ambas señales ante el mismo estímulo. En este caso el estímulo usado es un step y se implementa usando el complemento simulink® de Matlab.

Figura 86. Respuesta al step del modelo de la planta de posición y la validación experimental



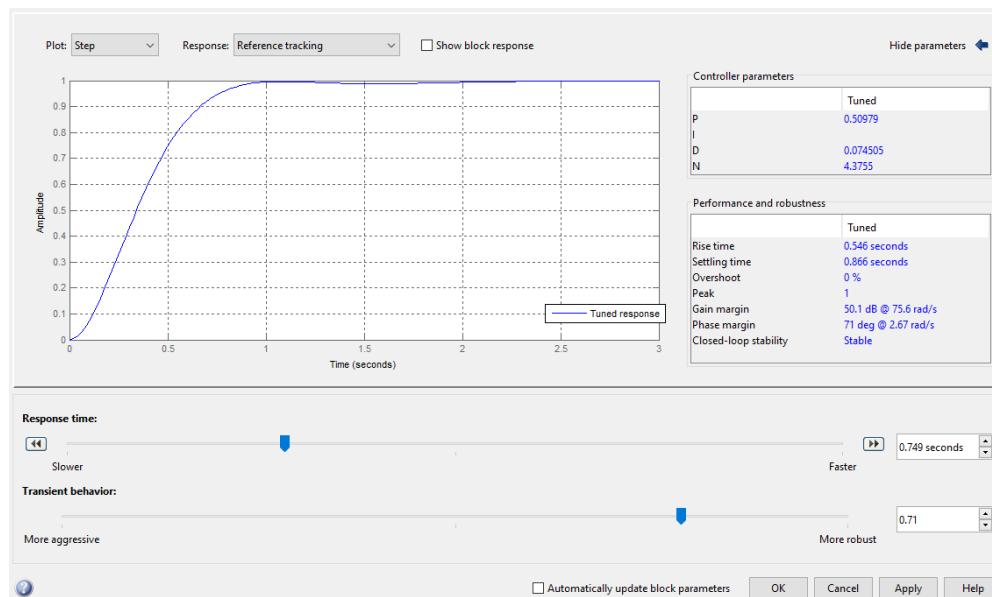
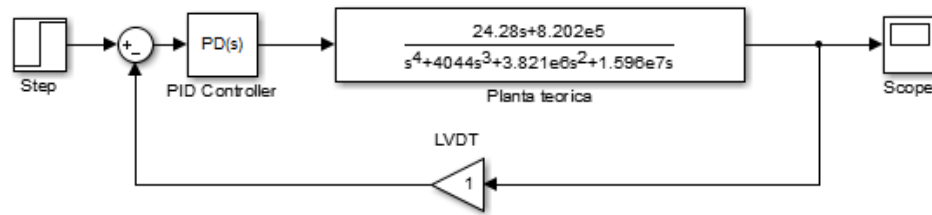
Fuente: Los autores

El modelo dinámico corresponde a las aproximaciones de Taylor para las servo válvulas adaptado a la electroválvula proporcional de alta respuesta dinámica, entonces es coherente que este modelo estabilice más rápido que el modelo real como se ve en la figura 86.

7.3 SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR

Se simuló el control PD en Matlab como se muestra en la figura 87 y se buscaron las constantes con el auxiliar de Matlab para la sintonización del controlador.

Figura 87. Sintonización del controlador PD

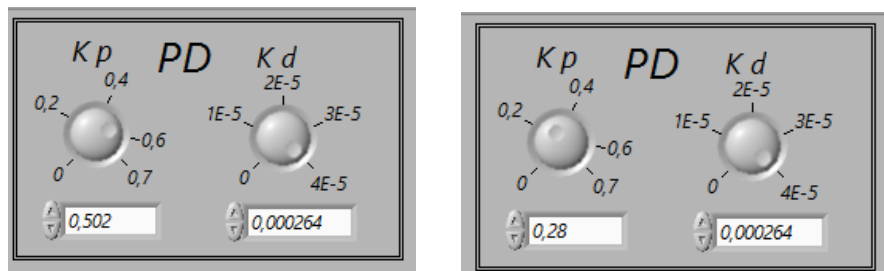


Fuente: Los autores

Se encontró que para un tiempo de respuesta de 2 segundos (sin sobre-impulso) las constantes son aproximadamente $K_p=0,50979$ y $K_d=0,074$.

Se implementó el controlador en Labview y se descubrió que si K_d es de 0,000264 el controlador hace su trabajo sin importar el valor del step. Para valores inferiores a 13 cm el K_p varía tomando el valor de 0,28 y para valores superiores a 13 cm adquiere el valor de 0,502. (Ver figura 88)

Figura 88. Valores de K_p y K_d



Fuentes: Los autores.

8. ANÁLISIS DE DATOS

8.1 RESPUESTA DEL SERVO DE POSICIÓN ANTE VARIOS ESCALONES

Los datos usados para calcular la desviación entre los diferentes step enviados al sistema se presentan en el Anexo I. Se encontró que la desviación promedio es de 0.21212821, al ser una desviación promedio tan pequeña se asume que el controlador es válido. El resultado para varios step se puede evidenciar a continuación. (Ver figura 89 y 90).

Figura 89. Resultados al step (Parte I)

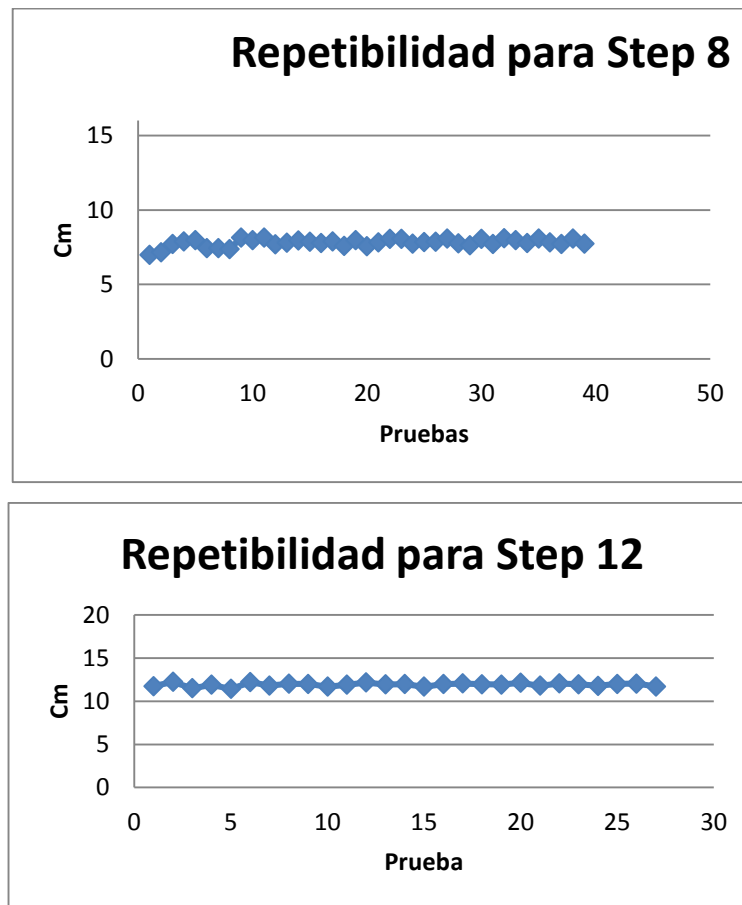


Figura 90. Resultados al step (Parte II)



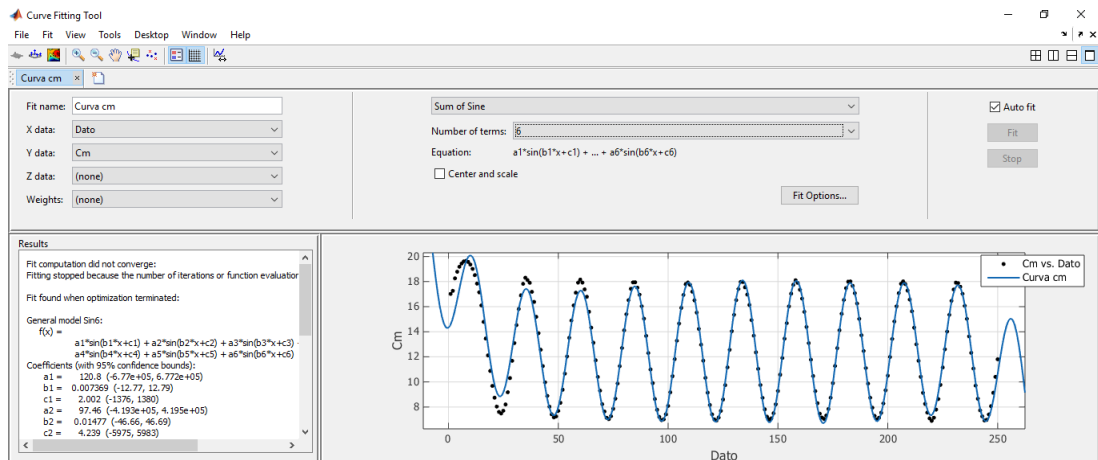
Fuente: Los autores

8.2 ANÁLISIS DEL SEGUIMIENTO DE LA ONDA SENO

Para medir la velocidad de respuesta del controlador ante un estímulo continuo en el tiempo y recolectar la reacción de la planta. En esta investigación la señal de excitación es sinusoidal; se envía por medio *del DAQ Assistant* y se almacenan los datos del LVDT para su posterior análisis. Con ayuda del complemento de *Matlab: "Curve Fitting Tool"* es posible hacer la regresión punto a punto de las entradas y salidas del sistema.

Se inició almacenando los datos en vectores de igual tamaño luego se importaron al espacio de trabajo de *Curve Fitting Tool* y se almacenaron en los vectores "Xdata y Ydata". Se eligió la opción "suma de senos" y por medio de pruebas se verificó que la curva que mejor se ajusta es la suma de 6 ondas seno como se muestra en la figura 91.

Figura 91. Onda seno de la salida del sistema



Fuente: Los autores

A continuación se amplía la parte izquierda de la figura 91.

General model Sin6:

$$f(x) =$$

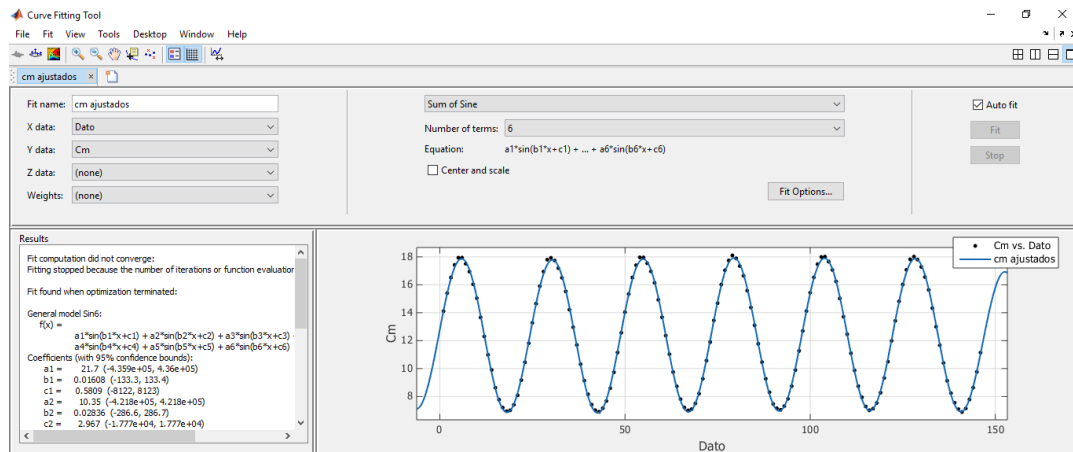
$$a1*\sin(b1*x+c1) + a2*\sin(b2*x+c2) + a3*\sin(b3*x+c3) + a4*\sin(b4*x+c4) + a5*\sin(b5*x+c5) + a6*\sin(b6*x+c6)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

a1 =	120.8
b1 =	0.007369
c1 =	2.002
a2 =	97.46
b2 =	0.01477
c2 =	4.239
a3 =	5.016
b3 =	0.2545
c3 =	-1.047
a4 =	26.15
b4 =	0.02546
c4 =	6.009
a5 =	0.6847
b5 =	0.2713
c5 =	2.718
a6 =	2.789
b6 =	0.03957

Se decidió que el sistema sigue mejor la curva seno después de los primeros 25 datos, así que se ajustó el rango de datos a analizar como se muestra en la figura 92 y se siguió la metodología planteada anteriormente donde se obtuvo:

Figura 92. Ajuste de los datos de salida de la onda senoidal



Fuente: Los autores

A continuación se amplía la parte izquierda de la figura 92.

General model Sin6:

$$f(x) =$$

$$a_1 \sin(b_1 x + c_1) + a_2 \sin(b_2 x + c_2) + a_3 \sin(b_3 x + c_3) + a_4 \sin(b_4 x + c_4) + a_5 \sin(b_5 x + c_5) + a_6 \sin(b_6 x + c_6)$$

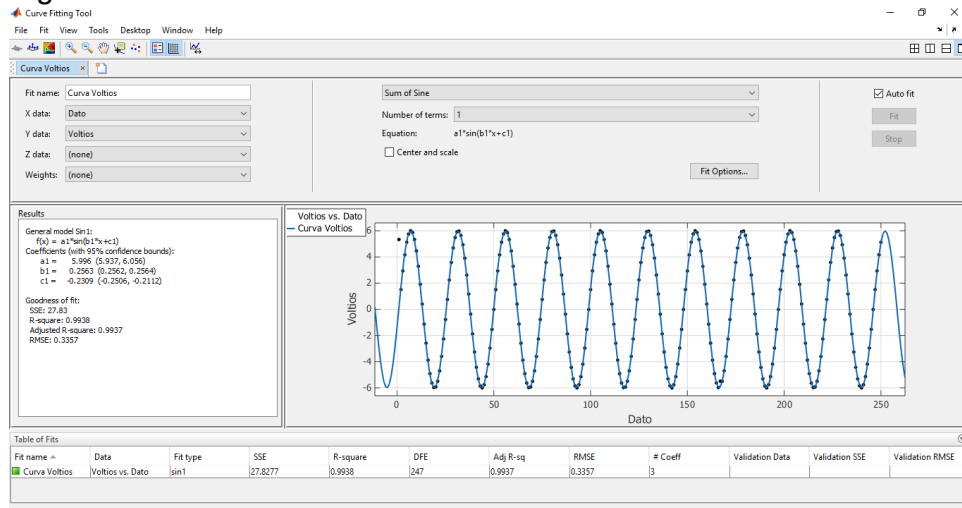
Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a_1 &= 21.7 \\ b_1 &= 0.01608 \\ c_1 &= 0.5809 \\ a_2 &= 10.35 \\ b_2 &= 0.02836 \\ c_2 &= 2.967 \\ a_3 &= 5.363 \\ b_3 &= 0.2568 \\ c_3 &= 0.03407 \\ a_4 &= 2.594 \\ b_4 &= 0.06235 \\ c_4 &= 3.969 \\ a_5 &= 1.574 \\ b_5 &= 0.06859 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c5 &= 6.736 \\ a6 &= 0.1425 \\ b6 &= 0.2402 \\ c6 &= 1.076 \end{aligned}$$

Para la onda de comando se ajustó como se muestra en la figura 93, se siguió la misma metodología y se caracterizó así:

Figura 93. Datos de comando onda senoidal



Fuente: Los autores

$$f(x) = a1 * \sin(b1 * x + c1)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a1 &= 5.996 \\ b1 &= 0.2563 \\ c1 &= -0.2309 \end{aligned}$$

Con lo anterior se determinó que las amplitudes son representativamente diferentes; pero, es consecuencia de la magnitud de las señales: una es de [- 6,6] voltios y la otra es de magnitud [5,15] cm.

La onda que matemáticamente se ajusta al comando presenta un adelanto de fase de 0.23 y la onda de respuesta (que es la suma de 6 términos) tiene un atraso ponderado de 0.35. Así es posible concluir que el sistema presenta un atraso global de 0.58.

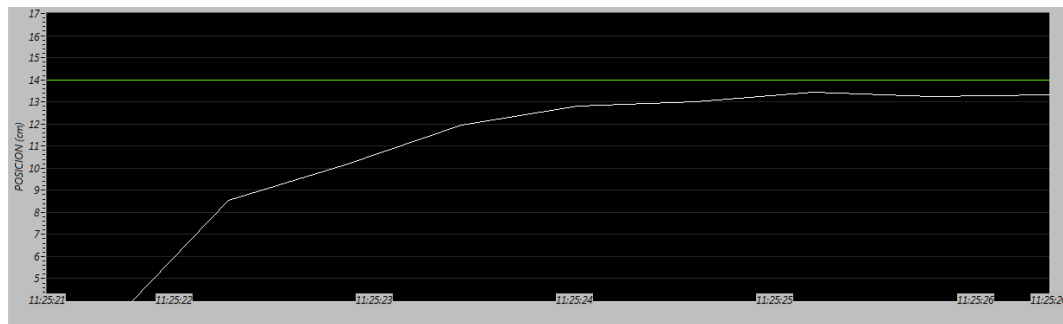
8.3 ANÁLISIS DEL CONTROLADOR EN ESTADO TRANSITORIO

La respuesta transitoria de un sistema es importante porque evidencia el comportamiento del mismo, en este caso es importante notar que el indicador alcanza el 95% de la señal de comando, lo que hace que el controlador PD sea aceptable, con un rango de $\pm 7\text{mm}$ del valor set point(14 cm, punto de prueba).

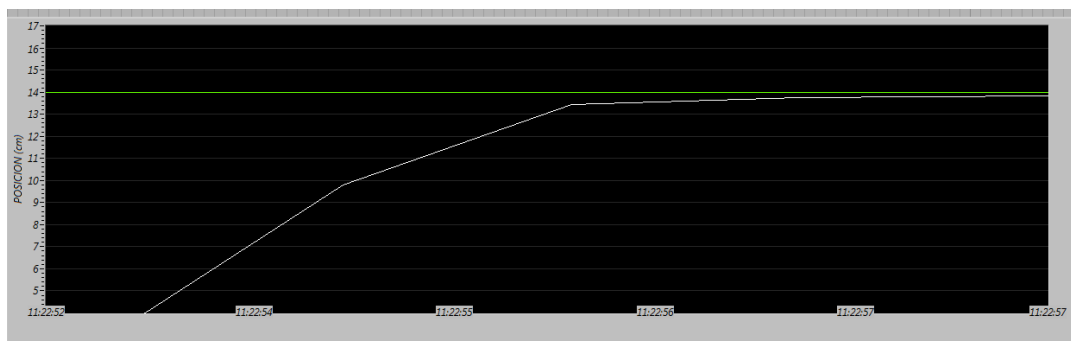
Para esta investigación se implementaron 2 tipos de control, a continuación se presenta la respuesta transitoria de cada uno:

Figura 94. Respuesta al escalón del controlador PD y PD+FEEDFORWARD

a. Respuesta al escalón solo PD



b. Respuesta al escalón PD+ FEEDFORWARD



Fuente: Los autores

El modelo dinámico es de 4^{to} orden sin embargo la respuesta es similar al modelo dinámico de primer orden. Con la acción del PD la respuesta es similar a la de un sistema sobre amortiguado, generando un mayor tiempo de asentamiento (en comparación del sistema sin controlador PD), y con la acción del

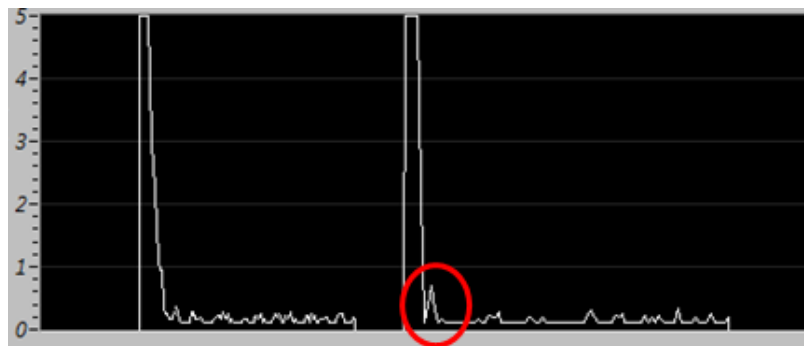
PD+FeedForward la respuesta es semejante a la de un sistema críticamente amortiguado, esto hace que el tiempo requerido para estabilizar sea menor (50%). La simulación en Matlab acertó con respecto a la disminución de este tiempo pero no tuvo éxito con la determinación de esta magnitud (90%), esto obedece a las idealizaciones de los modelos matemáticos.

8.4 ANÁLISIS DEL CONTROLADOR DE POSICIÓN CON PERTURBACIÓN

El análisis de la respuesta del sistema ante perturbaciones permite establecer la efectividad del controlador. En esta investigación se analizó desde 2 perspectivas: primero, el actuador está en estado estable en el valor de comando y la perturbación actúa sobre este buscando moverlo de su posición; la segunda posibilidad, es que el cilindro este en estado transitorio y la perturbación este esperando para evitar que el cilindro se posicione en el valor de comando.

8.4.1 Perturbación con el actuador en estado estable. Se realizó la prueba para una señal escalón unitario. En el sistema de lazo cerrado con el controlador PD y con el controlador PD+Feed-Forward la respuesta en el sensor LVDT no es apreciable; por esta razón, se graficó la reacción en la válvula (Voltaje) y se obtuvo el siguiente resultado. (Ver figura 95).

Figura 95. Señal de voltaje con Feedforward y sin Feedforward.



Fuente: Los autores

En la parte izquierda de la gráfica se aprecia la respuesta del sistema con el PD. El pico de 5 voltios corresponde a la aceleración del sistema cuando el cilindro comienza su carrera, a medida que se va acercando a su valor de comando el voltaje va disminuyendo hasta que la válvula se centra (0.11 volt). Posteriormente, se sometió a perturbación y se observó que el controlador trata de buscar la posición de comando y centra la válvula, pero la corrección es deficiente haciendo que el sistema sea impreciso y el actuador se corra hacia adelante y hacia atrás producto de la acción del control y la perturbación respectivamente.

En la parte derecha de la figura se encuentra la misma acción con la única variante de la acción del Feed-Forward, este estado transitorio presenta un comportamiento similar a la acción del PD; sin embargo, la corrección se presenta sólo una vez dando como resultado más exactitud. (Ver Figura 95).

8.4.2 Perturbación con el actuador en estado transitorio. Se realizó la prueba estableciendo el cilindro perturbador en 12 cm (medidos desde el 0 cm del cilindro principal) y se envió la señal de comando a 14 cm, de manera que en su carrera encuentra un obstáculo y se obtuvo el siguiente resultado. (Ver figura 96).

Figura 96. Señal de voltaje con y sin Feedforward para el actuador en estado transitorio.



Fuente: Los autores

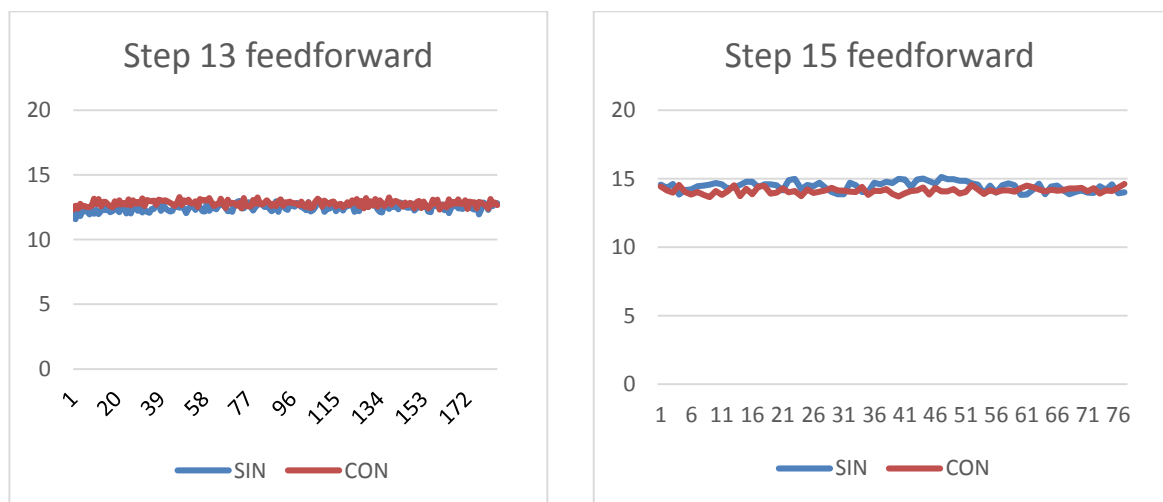
En la parte izquierda de la figura esta la acción del controlador PD. Se resalta la inexactitud, también se percibe que el cilindro va llegando y el voltaje en la válvula debería decrecer; sin embargo, se presentaron 3 picos (oscilan entre 0.11 y 0.2 Voltios) en el transcurso del recorrido; cuando el cilindro llega a los 14 cm la válvula se centra (centro abierto) pero, como el cilindro perturbador está actuando de manera permanente logra sacarlo de la posición de comando, el controlador detecta el cambio de posición del cilindro, se genera una señal correctiva para esto y se repite en el tiempo.

En la parte derecha de la figura se presenta la acción PD más el Feed Forward, se observa una corrección de mayor amplitud, además, en comparación con la acción del PD, las correcciones posteriores presentan menor periodicidad.

Se concluye que el controlador FEED FORWARD +PD se comporta mejor si la perturbación actúa después de alcanzar el estado estable.

Otra variable que indica la efectividad del controlador es la repetividad que presente (Los datos de estas pruebas se encuentran en el anexo J). Su grafica se muestra en la figura 97.

Figura 97. Respuesta del sistema con perturbación.



Fuente: Los autores

Se concluye de los resultados que el sistema es más preciso con el compensador Feedforward pues la respuesta del sistema es más estable.

9. GUÍA PARA LAS PRÁCTICAS EN EL LABORATORIO

9.1 PRÁCTICA DEL SERVO DE POSICIÓN

Un servo de posición es un sistema de control en lazo cerrado que permite controlar la posición de un actuador, sea de tipo lineal o rotatorio. En el primer caso los actuadores lineales más usados son los cilindros hidráulicos, por ejemplo, en una prensa hidráulica debemos posicionar el vástago del cilindro a 1 milímetro de distancia de la pieza para luego proceder aplicar la fuerza. En el segundo caso un actuador rotatorio puede ser un motor, en el cual se controla la posición de este en base al ángulo de giro, por ejemplo, para posicionar una antena de radar hay que mover ángulos específicos.

En esta práctica el actuador a usar es un cilindro diferencial que se encuentra axial a otro cilindro de las mismas características que se usará para inducir una perturbación en el sistema.

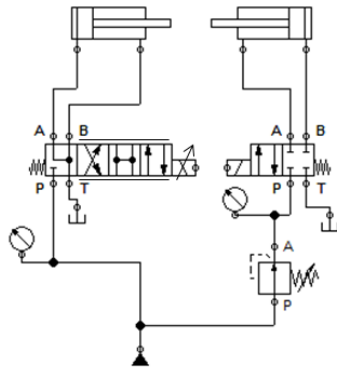
9.1.1. Componentes.

- 1 Electroválvula proporcional de alta prestación dinámica Rexroth 4WRPEH6
- 1 Cilindro diferencial perturbable
- 1 Válvula reductora de presión
- 1 Sensor de posición LVDT
- 3 Manómetros
- 8 Mangueras
- 10 Cables

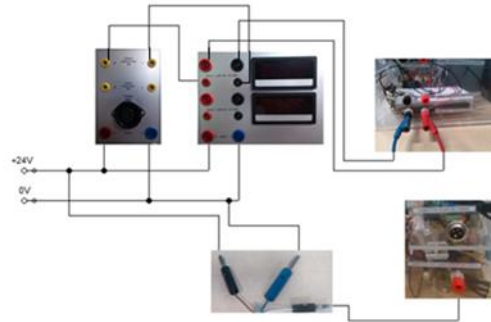
9.1.2. Procedimiento

1. Realizar el montaje hidráulico y eléctrico que se muestra a continuación.

MONTAJE HIDRAULICO

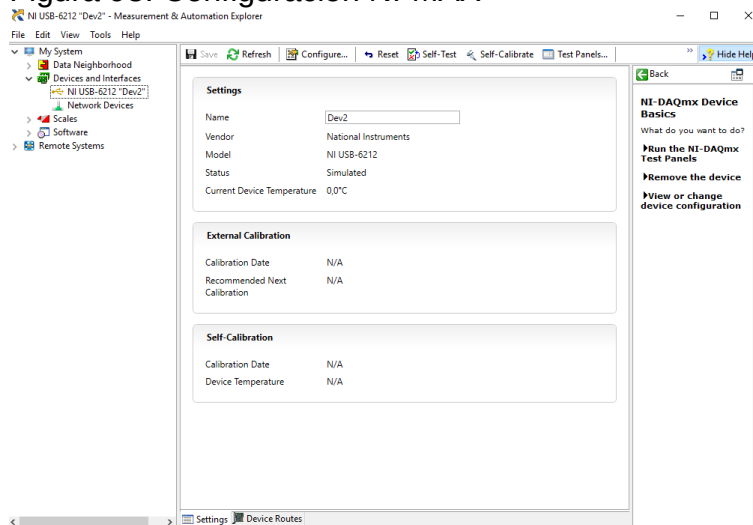


MONTAJE ELECTRICO



2. Conectar el puerto USB de la tarjeta DAQ NI-6212 al computador y ejecutar el programa “NI MAX”, asegúrese que la tarjeta está siendo leída por el computador, esto lo puede constatar dando click en la opción self-test como vemos en la figura 98.

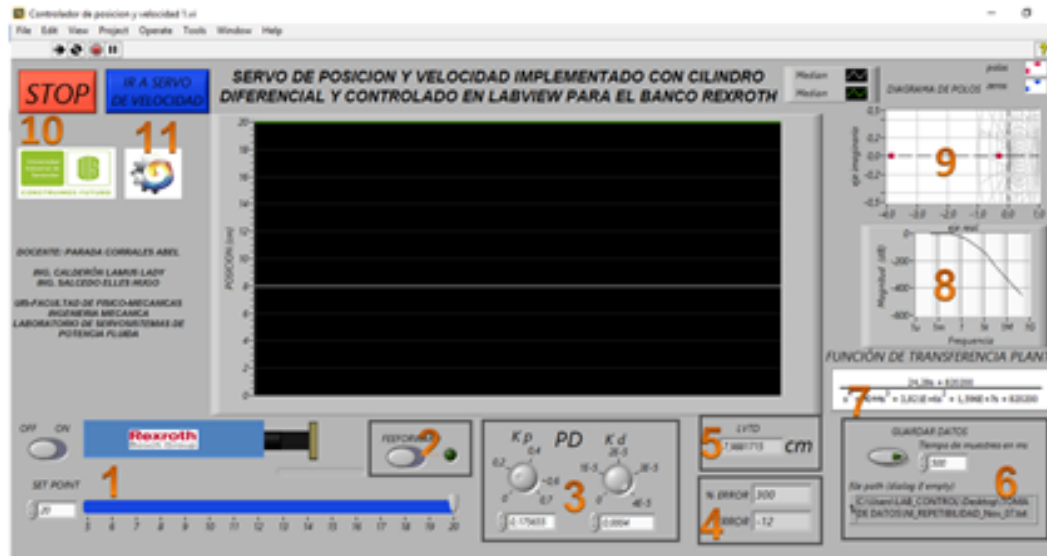
Figura 98. Configuración NI-MAX



Fuente: Los autores

3. En el escritorio, entrar a la carpeta *REXROTH CONTROL DE POSICIÓN Y VELOCIDAD (Calderón-Salcedo)* y abra el archivo *REXROTH CONTROL DE POSICIÓN Y VELOCIDAD* o *REXROTH Control de posición*. A continuación encontrara el siguiente panel frontal.

Figura 99. Panel frontal servo de posición



Fuente: Los autores

1. Set Point
2. Activar Feed Forward
3. Constantes K_p y K_d
4. Display de error
5. Lectura de la posición real del actuador
6. Panel para guardar datos
7. Visualización de la ecuación de la planta
8. Diagrama de Bode
9. Diagrama de Polos y Ceros
10. Parada de emergencia
11. Acceso al módulo de velocidad

4. Realizar una prueba donde $K_p=1$ y $K_d=0$ y observar el comportamiento de los polos de la planta en el diagrama 9 así como el funcionamiento del sistema físico.

5. Sintonizar el controlador y verificar la estabilidad del sistema en la gráfica 9 de la interfaz.

6. Ubicar el cilindro en un valor superior a 13 cm y someterlo a la perturbación.
 7. Activar el control de feed-forward con el botón número 2 y someter el cilindro de nuevo a la perturbación.
 8. Analizar el comportamiento del sistema y realizar conclusiones de la práctica.
- Se resumió lo expuesto anteriormente en la siguiente guía (Entregada al director del Laboratorio en Físico).

Figura 100. Guía para la práctica del servo de posición (Parte I)



GUÍA PARA LA PRÁCTICA DEL SERVO DE POSICIÓN REXROTH

LABORATORIO DE SERVOSISTEMAS DE POTENCIA FLUIDA

OBJETIVO: Mostrar el funcionamiento de un servosistema de posición sometido a perturbación controlado por medio de Labview.

IMPLEMENTOS:

Servo de posición	
Electroválvula proporcional de alta prestación dinamica Rexroth 4WRPEH6.	1
Cilindro diferencial perturbable	1
Válvula reductora de presión	1
sensor de posición LVDT	1
Manómetros	3
Mangueras	8
Cables	10

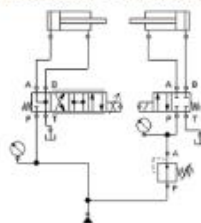
Válvula tipo 4WRPEH6



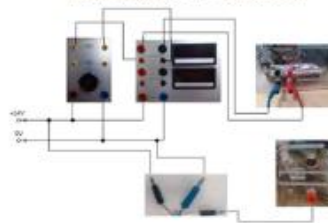
PROCEDIMIENTO:

1. Realizar el montaje hidráulico y eléctrico de la siguiente figura.

MONTAJE HIDRAULICO

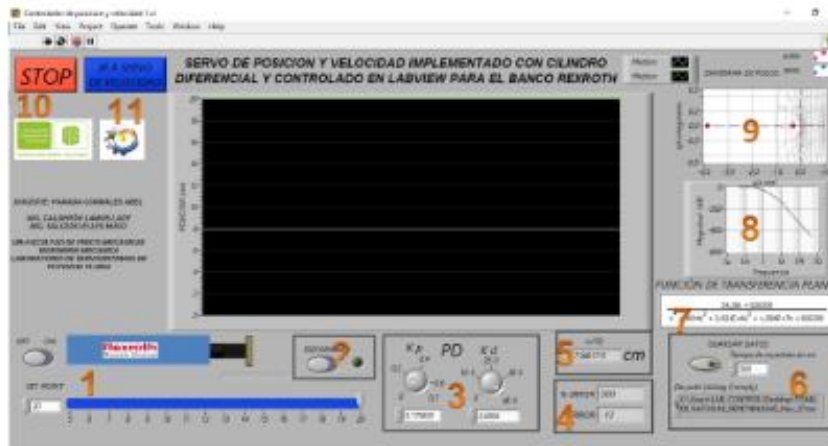


MONTAJE ELECTRICO



2. Conectar el puerto USB de la tarjeta DAQ NI-6212 al computador y ejecutar el programa "Servo de posición y velocidad Rexroth".

Figura 101. Guía para la práctica del servo de posición (Parte II)



3. En la interfaz gráfica que ve el usuario y por medio de la cual puede variar la señal de posicionamiento del actuador o Set point (1), usar el controlador ya sea sin feedforward o con este solo con presionar el botón Feedforward (2), modificar las constantes K_p y K_d (3), guardar los datos si es necesario con el respectivo modulo (6), cambiar al controlador de velocidad (11), visualizar la posición actual del actuador (5), el error y el porcentaje de error (4), la ecuación de la planta (7), el diagrama de bode (8), el diagrama de polos (9) y detener el programa con el botón de emergencia (10).
4. Realizar una prueba donde $K_p=1$ y $K_d=0$ y observar el comportamiento de los polos de la planta en el diagrama 9.
5. Sintonizar el controlador y verificar la estabilidad del sistema en la gráfica 9 de la interfaz.
6. Ubicar el cilindro en un valor superior a 13 cm y someterlo a la perturbación.
7. Activar el control de feed-forward con el botón número 2 y someter el cilindro de nuevo a la perturbación.
8. Analizar el comportamiento del sistema y realizar conclusiones de la práctica.

Fuente: Los autores

9.2 PRÁCTICA DEL SERVO DE VELOCIDAD.

En ocasiones es más importante controlar la velocidad del actuador que la posición (generalmente en motores hidráulicos), se logra controlando el caudal que pasa a través de la electroválvula (en hidráulica proporcional). En el caso de esta investigación el caudal enviado es proporcional al voltaje de comando. A

través de Labview el usuario controla la magnitud del comando y los cambios de este en el tiempo ejerciendo control en la velocidad del cilindro.

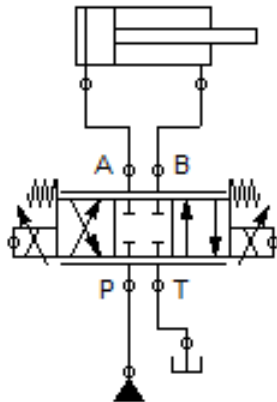
9.2.1. Componentes

- 1 Electroválvula proporcional Rexroth 4WREE6
- 1 Cilindro diferencial de 40 cm de carrera
- 8 Mangueras
- 10 Cables
- 3 Manómetros

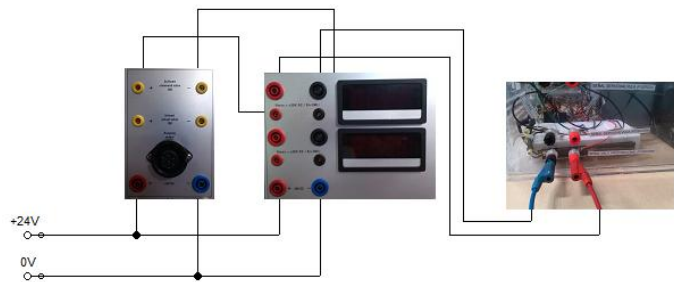
9.2.2. Procedimiento

1. Realizar el montaje hidráulico y eléctrico de la siguiente figura.

MONTAJE HIDRAULICO

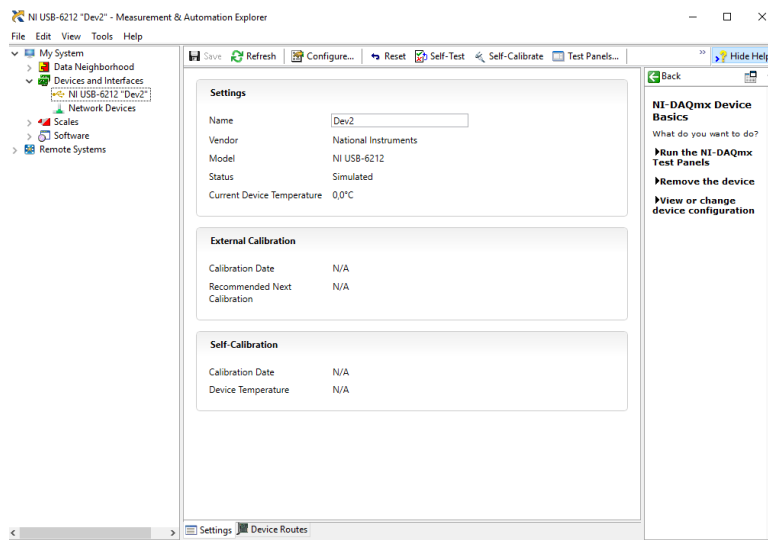


MONTAJE ELECTRICO



2. Conectar el puerto USB de la tarjeta DAQ NI-6212 al computador y ejecutar el programa “NI MAX”, asegúrese que la tarjeta está siendo leída por el computador, esto lo puede constatar dando click en la opción self-test como se ve en la siguiente figura.

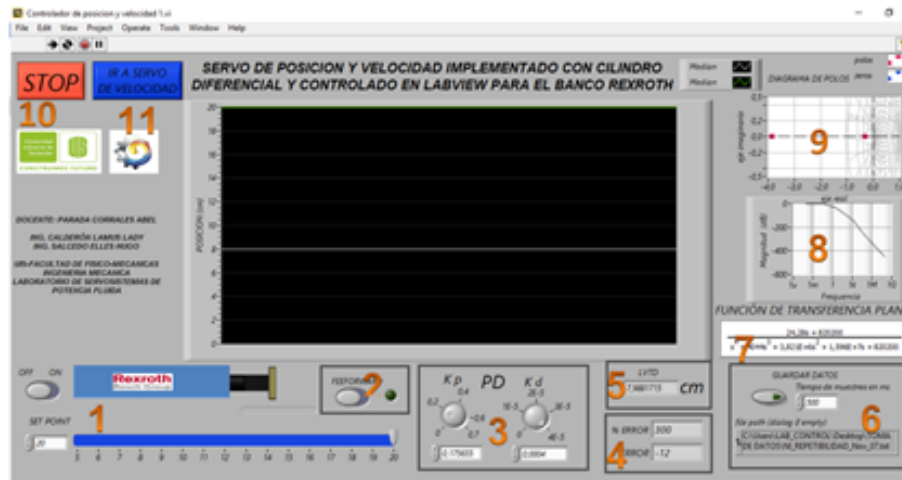
Figura 102. Configuración de NI-MAX para las prácticas



Fuente: Los autores

3. Diríjase al escritorio, entre a la carpeta *REXROTH CONTROL DE POSICIÓN Y VELOCIDAD (Calderón-Salcedo)* y abra el archivo *REXROTH CONTROL DE POSICIÓN Y VELOCIDAD* o *REXROTH Control de velocidad*. A continuación encontrara el siguiente panel frontal.

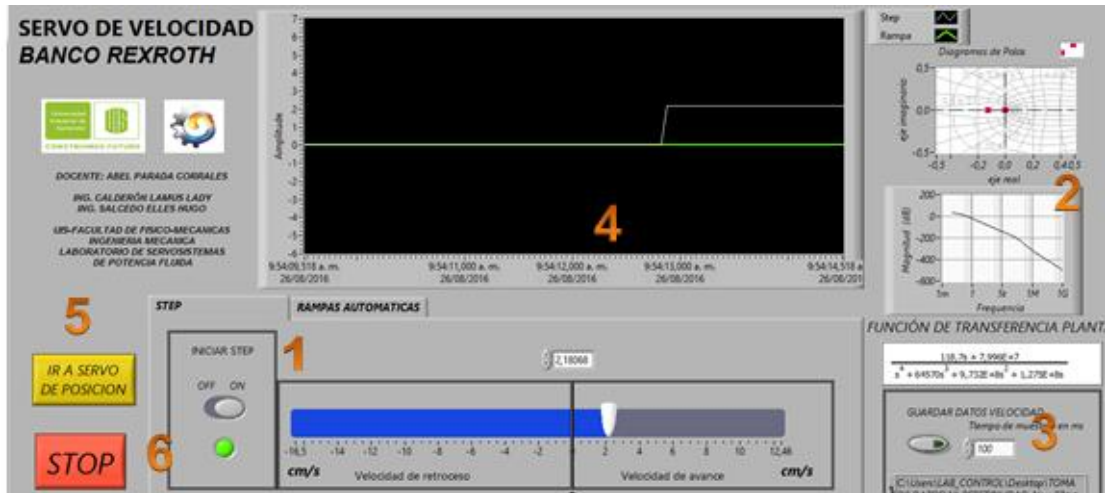
Figura 103. Panel frontal posición para ir al de velocidad



Fuente: Los autores

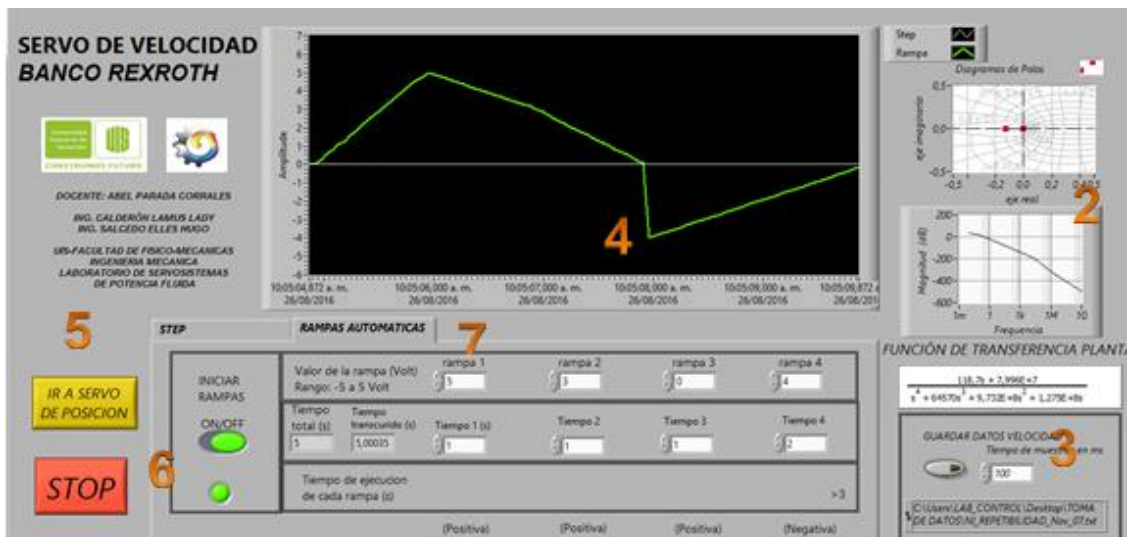
Con el botón 11 puede cambiar a la interfaz de velocidad.

Figura 104. Panel frontal del servo de velocidad para step.



Fuente: Los autores

Figura 105. Panel frontal del servo de velocidad con rampa.



Fuente: Los autores

1. Set Point para enviar un escalón
2. Diagramas de Bode, Función de transferencia y Polos y ceros.

3. Módulo para guardar datos.
4. Gráfica de voltaje contra tiempo
5. Acceso al servo de posición
6. Parada de emergencia
7. Rampas

4. Enviar por medio de Set point diferentes magnitudes de step y observar los cambios de velocidad del actuador.

5. Programar las rampas para mostrar su influencia en el cambio de la velocidad del actuador. Las tres primeras rampas son positivas y la última negativa. En la sección valor de la rampa indique el valor al que la rampa debe llegar y en Tiempo indique la duración de cada rampa.

6. Analizar el comportamiento del sistema y realizar conclusiones de la práctica.

Lo expuesto anteriormente se resume en la siguiente guía:

Figura 106. Guía para la práctica del servo de velocidad (Parte I)



LABORATORIO DE SERVOSISTEMAS DE POTENCIA FLUIDA
PRÁCTICA PARA EL SERVO DE VELOCIDAD REXROTH.

OBJETIVO: Mostrar el funcionamiento de un servosistema de velocidad en lazo abierto comandado desde LabView

Servo de velocidad	
Electroválvula proporcional Rexroth 4WREE6.	1
Cilindro diferencial de 40 cm de longitud.	1
Mangueras	8
Cables	10
Manómetros	3

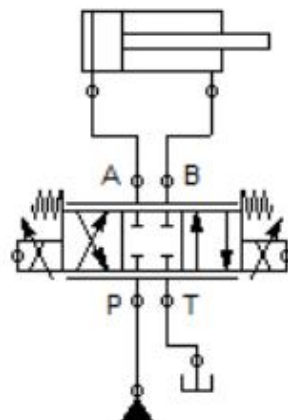
Valvula tipo 4WREE6



PROCEDIMIENTO:

1. Realizar el montaje hidráulico y eléctrico de la siguiente figura.

MONTAJE HIDRAULICO



MONTAJE ELECTRICO

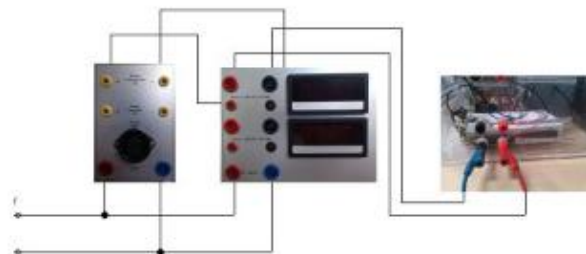
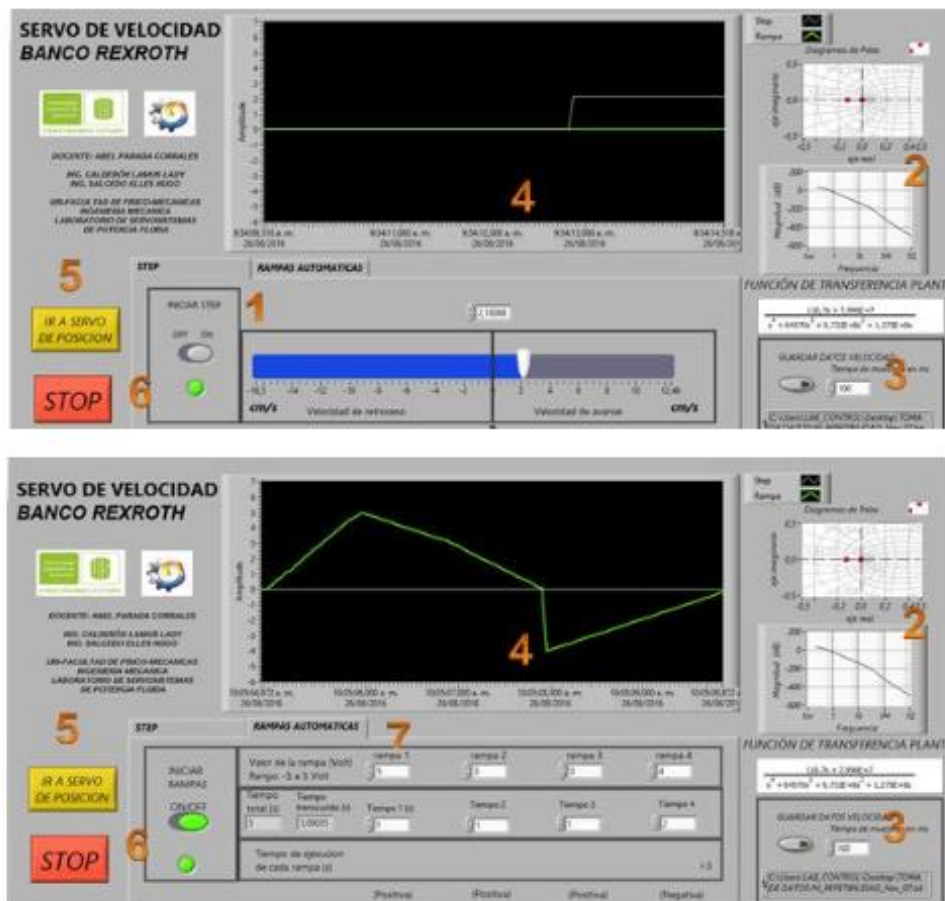


Figura 107. Guía para la práctica del servo de velocidad (Parte II)

- Conectar el puerto USB de la tarjeta DAQ NI-6212 al computador y ejecutar el programa "REXROTH Control de posición y velocidad".

Acceder al módulo de control de velocidad.



En el panel superior se encuentra: (1) Set Point para enviar un escalón, (2) Diagramas de Bode, Función de transferencia y Polos y ceros, (3) Modulo para guardar datos, (4) Gráfica de voltaje contra tiempo, (5) Acceso al servo de posición, (6) Parada de emergencia, (7) Rampas.

- Programar las rampas para mostrar su influencia en el cambio de la velocidad del actuador, tener presente que la rampa 1, 2 y 3 por defecto son positivas y la 4 negativa.
- Analizar el comportamiento del sistema y realizar conclusiones de la práctica.

Fuente: Los autores

10. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó una interfaz en formato *HMI* en *LabView* donde los alumnos de la asignatura servosistemas de potencia fluida pueden desarrollar pruebas de control de posición sometido a perturbación

Implementado con *FeedForward* o sin este. También pueden ejecutar un servo de velocidad que permite programar *step* y 4 rampas que no entran en conflicto así el usuario las solicite simultáneamente.

Se diseñó el controlador para el servo de posición con la metodología PD que responde apropiadamente en ausencia de perturbación y se adicionó *FEED-FORWARD* para corregir las perturbaciones, el código permite elegir si usar o no la acción de adelanto de fase.

Se diseñó y entregó al director del laboratorio las en físico y digital para un fácil desarrollo de las prácticas con el servo de posición y el servo de velocidad.

Se observó que comparando la respuesta del controlador PD, el tiempo de y la acción del *feed forward* mejora el tiempo de respuesta se reduce al 50%.

Se caracterizó la electroválvula proporcional de alta respuesta dinámica *Rexroth* 4WRPEH6 como una aproximación similar a la de las servoválvula en base al catálogo de fabricante y se obtuvo un modelo confiable de este componente.

Se diseñó un código en *LabView* para controlar el servoactuador en lazo abierto y hacer posible la toma de datos con *Labview Signal Express®* y su posterior análisis.

Se realizó la validación del modelo dinámico de 4 orden con el *Toolking Identification system* de Matlab para un rango de datos, los resultados son semejantes en magnitud al modelo dinámico deducido.

El controlador PD +Feed Forward resulta acertado si la perturbación actúa cuando el cilindro principal ya está posicionado en la señal de comando.

Las herramientas informáticas como Matlab y LabView ofrecen sensibilidad y potencia para hacer la caracterización de los modelos dinámicos.

11.RECOMENDACIONES

Para mejorar el control es necesario obtener un modelo más aproximado del comportamiento de la planta y esto se logra haciendo menos simplificaciones de las variables del modelo y más pruebas en lazo abierto.

Mejorar el controlador Feed Forward para la respuesta transitoria.

Para que el sistema funcione como se diseño es necesario que el cero del sensor coincida con el cero digital del sistema, esto se logra moviendo el sensor manualmente hasta que la lectura en la interfaz corresponda al valor físico.

El modelo de validación es aplicable a otros sistemas de control hidráulicos y es fácilmente adaptable.

BIBLIOGRAFIA

- 1 ASTRÖM, Karl and HÄGGLUND, Tore. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. 2da Edición. Instrument Society of America, USA. 1995. 343 p.
- 2 BEDFORD ANTHONY, Dinámica: mecánica para ingeniería. Pearson Educación, 2000. 548 p.
- 3 CREUS, Antonio. Instrumentacion Industrial. Octava Edición. México, Alfaomega Grupo Editor, 2010. 776 p. ISBN: 978-607-707-042-9.
- 4 HALVORSEN, Hans-Petterhalvorsen. Introduction to LabView. Porsgrunn, Noruega: Departament of Electrical Engineering, Information Technology and Cybernetics. Telemark University College, 2014. 122 p.
- 5 KATSUHIKO, Ogata. Ingenieria de Control Moderna. 5 edición. Pearson Educación. Madrid, 2010. 895 p.
- 6 MANNESMANN REXROTH, Técnica de válvulas proporcionales y de servoválvulas. Training hidráulico, compendio 2. Lohr am Main, 1996. 286 p. RS 00291/12.89.
- 7 MANNESMANN REXROTH, 4/4-way servo solenoid directional control valves, directly operated, with electrical position feedback and on-board electronics (OBE). Valve Type 4WRPEH6. Lohr am Main. 12 p. RE 29035/10.10.
- 8 MANNESMANN REXROTH, 4/2 and 4/3 proportional directional valves, direct operated, with electrical position feedback, without/with integrated electronics (OBE). Valve Type 4WREE6. Lohr am Main. 24 p. RE 29061/11.12.
- 9 MERRITT, Herbert E. Supply pressure and power element selection. En: Hydraulic control systems New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967. 366 p.

10 NATIONAL INSTRUMENTS. DAQ M Series. NI USB-621xUser Manual. USA, 2009. 204 p. 371931F-01.

11 RYDBERG, Karl-Erik. Hydraulic servo systems. Guía del programa. Suecia, Linköpings Universitet, 2008. 46 p. TMHP51.

12 SMITH Y CORRIPIO, Armando. Control automático de procesos. Primera edición. México, Editorial Limusa, 1991. 718 p. ISBN: 968-18-3791-6.

13 UNIVERSITY OF MINNESOTA, Class #7 Servo-Hydraulic Systems. ME 4232: Fluid power controls lab. Minnesota, USA, 2007. 26 p.

14 VICKERS. Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada. Barcelona, 1990. 66 p. E-B-9052.

ANEXOS

ANEXO A. DATA SHEET DEL SENSOR LVDT

Temposonics®

Magnetostrictive, Absolute, Non-contact
Linear-Position Sensors

E-Series Models EP and EL
Analog and Start/Stop Outputs



Document Part Number:
551248 Revision A

Data Sheet



Model EP position sensor - Full Size Profile Housing
Stroke Length: 50 mm to 3000 mm (2 in. to 120 in.)

Model EL position sensor - Low Height Profile Housing
Stroke Length: 50 mm to 2500 mm (2 in. to 100 in.)

FEATURES

- Linear, Absolute Measurement
- Non-Contact Sensing Technology
- Linearity Deviation Less Than 0.02% F.S.
- Repeatability Within 0.005% F.S.
- Two Outputs Available:
 - Analog (Voltage/Current) Forward or Reverse Acting
 - Start/Stop Output
- Simple Sensor Parameter Upload (for Start/Stop)
- Stroke Length Ranges:
 - 50 mm to 2500 mm (2 in. to 100 in.)
 - 50 mm to 3000 mm (2 in. to 120 in.)
- For Model EP Start/Stop
- EMI Shielded and CE Certified

BENEFITS

- Rugged, Cost Effective, Precise and Durable Non-wear Alternative to Potentiometers
- Simultaneous Multi-position Measurements
- Over Voltage Protection to 36 Vdc and Polarity Protection up to -30 Vdc

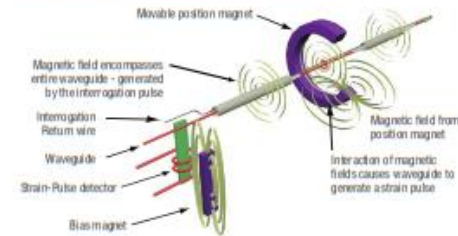
APPLICATIONS

- Continuous Operation in Harsh Industrial Conditions

TYPICAL INDUSTRIES

- Factory Automation
- Woodworking and Metal Forming
- Material Handling and Packaging

Time-based Magnetostrictive position sensing principle



Benefits of Magnetostriction

Temposonics linear-position sensors use the time-based magnetostrictive position sensing principle developed by MTS. Within the sensing element, a sonic-strain pulse is induced in a specially designed magnetostrictive waveguide by the momentary interaction of two magnetic fields. One field comes from a movable permanent magnet that passes along the outside of the sensor. The other field comes from an "interrogation" current pulse applied along the waveguide. The resulting strain pulse travels at sonic speed along the waveguide and is detected at the head of the sensing element.

The position of the magnet is determined with high precision and speed by accurately measuring the elapsed time between the application of the interrogation pulse and the arrival of the resulting strain pulse with a high-speed counter. The elapsed time measurement is directly proportional to the position of the permanent magnet and is an absolute value. Therefore, the sensor's output signal corresponds to absolute position, instead of incremental, and never requires recalibration or re-homing after a power loss. Absolute, non-contact sensing eliminates wear, and guarantees the best durability and output repeatability.

All specifications are subject to change. Contact MTS for specifications and engineering drawings that are critical to your application. Drawings contained in this document are for reference only. Go to <http://www.mtssensors.com> for the latest product documentation and related media.

E-Series Models EP and EL Sensors Product Overview/Specifications

Product overview

MTS Sensors continues to establish new performance standards for low-cost, fully-industrial, durable position sensors using the widely preferred magnetostrictive technology. This principle for accurate and non-contact measurement of linear-position sensing was developed 30 years ago by MTS and is used with outstanding success in a large variety of industrial applications.

The Tempsonics models EP and EL sensors consists of robust aluminum profile-style housings that offer flexible mounting configurations and easy installation. Sensor models EP and EL are ideal for demanding industrial applications where simple, reliable non-contact feedback is essential.

Product specifications

Parameters	Specifications	Parameters	Specifications
OUTPUT		ELECTRONICS	
Measured output variables:	Position	Operating voltage:	+24 Vdc nominal: -15% or +20%* Polarity protection: up to -30 Vdc Over voltage protection: up to 36 Vdc Current drain: Analog: 50 - 140 mA Start/Stop: 50 - 100 mA (Stroke length dependent) Dielectric withstand voltage: 500 Vdc (DC ground to machine ground)
Resolution:	Analog: Infinite (restricted by output ripple) Start/Stop: 0.1, 0.01 and 0.005 mm (controller dependent)	ENVIRONMENTAL	
Linearity deviation:	< ± 0.02% full stroke (minimum ± 60 µm)	Operating conditions:	Operating temperature: -40 °C (-40 °F) to 75 °C (167 °F) Relative humidity: 90% no condensation Ingress protection: IP 67** (when mating connector is correctly fitted)
Repeatability:	< ± 0.005% full stroke (minimum ± 20 µm)	EMC test:	Electromagnetic emission: EN 61000-6-4 Electromagnetic susceptibility: EN 61000-6-2, This sensor meets the EC directive requirements and is marked with CE.
Outputs:	Analog (voltage or current) Voltage: 0 to 10 Vdc or 10 to 0 Vdc or Two outputs: 0 to 10 Vdc and/or 10 to 0 Vdc (controller input resistance RL ≥ 5k Ohm) Current: 4 to 20 mA or 20 to 4 mA (Controller input resistance RL ≤ 500 Ohm) Digital-pulse (Start/Stop): RS-422 differential signal Serial parameter upload available for: Measuring range, offset, gradient, status and manufacturer number	Shock rating:	100 g (single hit)/ IEC standard EN 60068-2-27
Stroke length:	Range: 50 mm to 2500 mm (2 in. to 100 in.) or 50 mm to 3000 mm (2 in. to 120 in.) <i>For Model EP Start/Stop output</i>	Vibration rating:	15 g/10 to 2000 Hz, IEC standard EN 60068-2-6 (resonance frequencies excluded)
		WIRING	
		Connection types:	Analog output: 5-pin (M12) male integral connector Start/Stop output: 8-pin (M12) male integral connector
		PROFILE-STYLE SENSOR	
		Electronic head:	Aluminum housing
		Sensor extrusion:	Aluminum (Tempsonics profile style)
		Mounting:	Adjustable mounting clamps
		Magnet types:	Captive-sliding magnets, open-ring magnet or block magnet

* UL Recognition requires an approved power supply with energy limitation UL 61010-1), or Class 2 rating according to the National Electrical Code (USA) / Canadian Electrical Code.

** The IP rating is not part of the UL Recognition.

Outputs

ANALOG (VOLTAGE/CURRENT) OUTPUTS

Analog outputs include voltage (0 to 10 Vdc forward or reverse acting), and current (4 to 20 mA forward or reverse acting). Since the outputs are direct, no signal conditioning electronics are needed when interfacing with controllers or meters (see 'Figure 1').

Analog output voltages ranges:

- 0 to 10 Vdc
- 10 to 0 Vdc
- 0 to 10 Vdc and 10 to 0 Vdc
- 4 to 20 mA
- 20 to 4 mA

DIGITAL START/STOP OUTPUT

Tempsonics E-Series Models EP and EL Start/Stop output sensors require a start signal from a controller or interface module to initiate the measurement cycle. The sensor generates a stop signal at the end of the measurement cycle that is used to stop the controller's counter clock.

The elapsed time between the Start and Stop signals is directly proportional to the magnet's position along the active stroke length. The controller can calculate the absolute position of the magnet from the time value and the sensor's unique gradient value (inverse of the speed for the sonic pulse traveling in the sensor's waveguide). (see 'Figure 2').

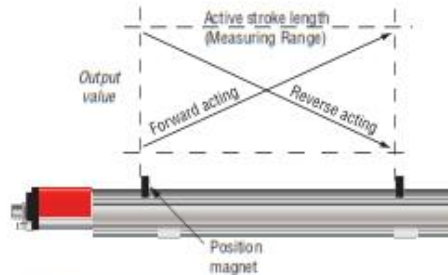


Figure 1. Analog Output signals

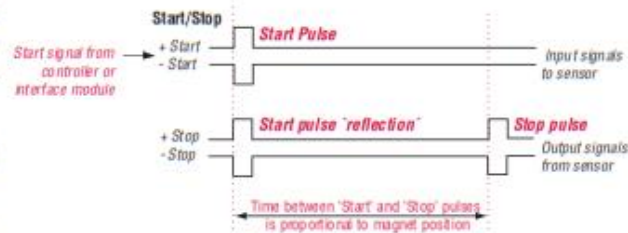


Figure 2. Start/Stop output signals (RS-422 differential pairs)

Dual magnet outputs

MEASUREMENT OPTIONS

E-Series sensors provide options for simultaneous multi-position measurements by using more than one magnet per sensor. When using Start/Stop sensor output the ability to process multiple magnets depends on the capability of the controller or interface module that is used. When using analog type outputs (voltage or current) the sensor is limited to a maximum of two magnets.

For analog output types the options for single-magnet or dual-magnets is specified in the sensor model number when ordered. For single-magnet sensors the sensor's full active stroke length is utilized by the one magnet. For example when using forward-acting outputs, the output is 0% of its value when the magnet is at the null position (start of stroke) and 100% of its value when at the edge of the dead zone (end of stroke), (see 'Figure 3').

However, for dual-magnet sensors the sensor's active stroke length must be shared by the two magnets, and a separation ≥ 75 mm (3 in.) must be maintained between the two magnets (front side of the first magnet to front side of the second magnet). This minimum distance between magnets is needed to maintain proper sensor output. Therefore, for the second magnet the start of stroke (0% output) is set at 75 mm away from the sensor's null position. Likewise, for the first magnet the end of stroke (100% output) is now set 75 mm away from the edge of the dead zone (see 'Figure 3').

The result of using the dual-magnet E-Series options is that the stroke length available for each magnet is 75 mm less (or 3 inches less when specifying stroke length in inches) than the sensor's full active stroke length as indicated in the model number.

When ordering the single-magnet E-Series sensor the minimum stroke length available is 50 mm or 2 inches. However when ordering dual magnet E-Series sensors the minimum stroke length available is 125 mm (i.e. 50 mm minimum, plus 75 mm for the minimum distance between magnets). Likewise, when specifying stroke length in inches the minimum stroke length available is 5 inches (i.e. 2 inch minimum, plus 3 inches for the minimum distance between magnets).

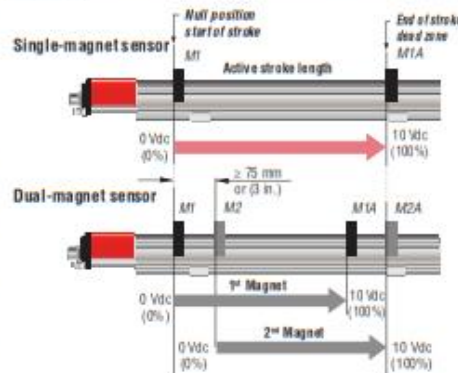


Figure 3. Single and dual magnet measurements

E-Series Models EP and EL Sensors Sensor Communications and Dimension References

Communication

SENSOR PARAMETER UPLOAD FEATURE

For applications using smart sensor interfaces, the Models EP and EL sensors with Start/Stop output (Option **R3**) comes with the ability to perform sensor parameter uploads. This feature replaces the task of entering sensor data manually, saving time and preventing possible entry errors during start-up or for system maintenance.

Note: Start/Stop output (option R3)

When the sensor parameter upload feature is not activated the Start/Stop output (Option **R3**) remains fully compatible with the Start/Stop output (Option **R0**) used in the previous generation E-Series sensors.

The upload feature supports the following sensor parameters:

- Measuring range
- Offset
- Gradient - (Shown as speed of the sonic-strain pulse (m/s) or inverse speed (µs/in.))
- Status
- Manufacturer number

The sensor's specific parameters can be retrieved by the controller/interface module at any time, via the sensor's Start/Stop signal lines.

The sensor parameter upload feature requires a customer supplied RS-422 interface. The data format is serial, 4800 Baud, 8-bit data length. Please contact the factory for additional parameter upload protocol details.

Sensor dimension references

Drawings are for reference only, contact applications engineering for tolerance specific information.

A robust aluminum extrusion forms the sensor housing containing the sensing element and electronics. The position magnet moves along the top of the profile extrusion housing.

MODEL EP

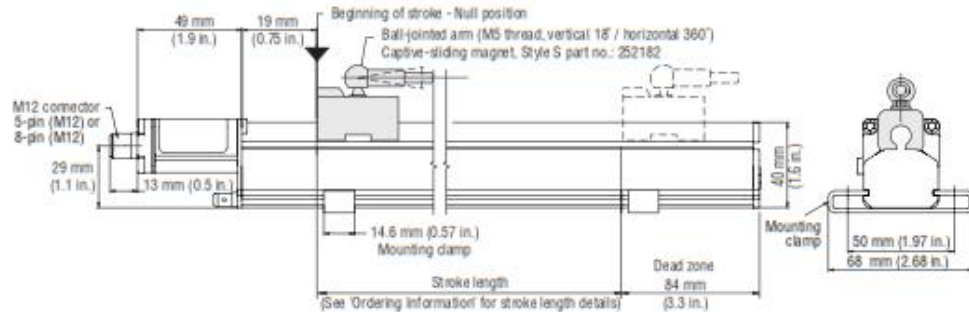


Figure 4. E-Series model EP sensor dimension reference (Shown with Style S captive-sliding magnet)

MODEL EL

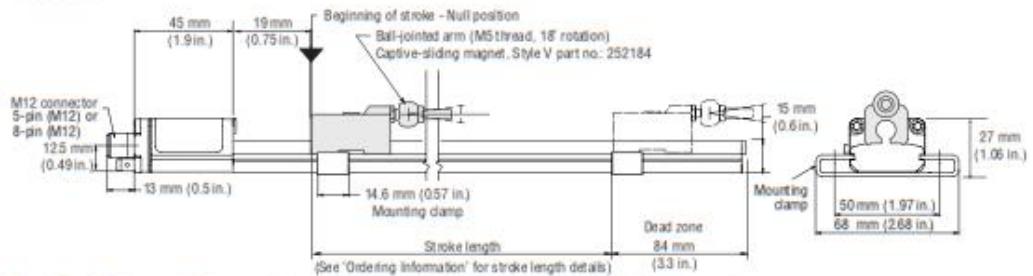


Figure 5. E-Series model EL sensor dimension reference (Shown with Style V captive-sliding magnet)

Sensor dimension references

Drawings are for reference only, contact applications engineering for tolerance specific information.

MODEL EP

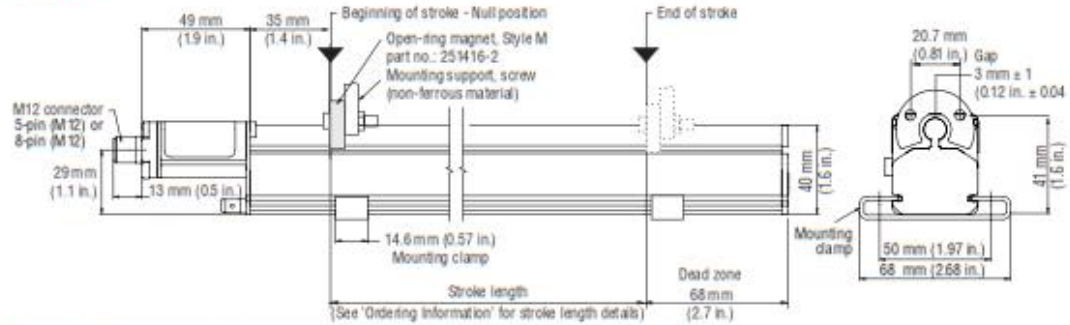


Figure 6. E-Series model EP sensor dimension reference (Shown with Style M open-ring magnet)

MODEL EP

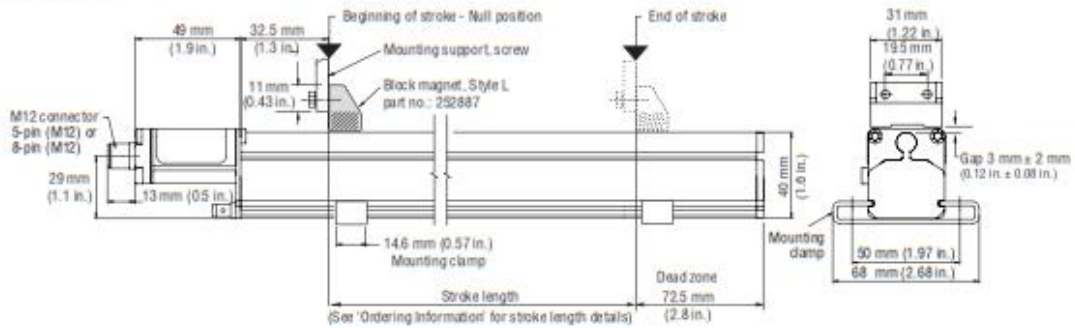


Figure 7. E-Series model EP sensor dimension reference (Shown with Style L block magnet)

E-Series Models EP and EL Sensors
Standard Magnet and Accessory Selections

Standard magnet selections (Models EP and EL)

Selection of position magnets

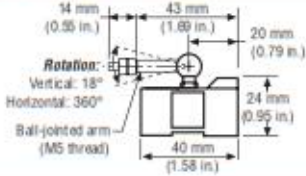
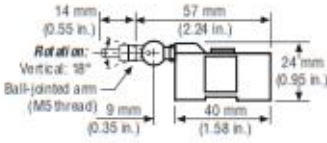
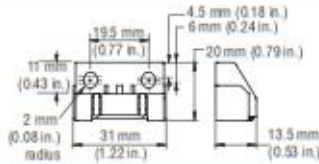
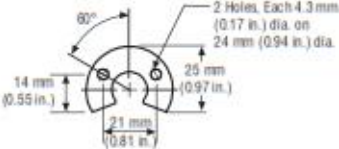
A choice of four standard magnet mounting configurations are available for E-Series models EP and EL sensors; A 'captive-sliding' magnet (Styles S or V), or an 'open-ring' magnet (Style M), or the 'block' magnet (Style L). Captive-sliding magnets utilize slide bearings of special material that reduce friction, and if required, help mitigate dirt build up. The slide bearings are designed to operate dry, requiring no external lubrication or maintenance.

The Style M 'open-ring' magnet mounts on the moving machine part and travels just above the sensor's profile extrusion. The open-ring magnet requires a minimum distance away from ferrous metals to allow proper sensor output. It must be mounted using non-ferrous screws and a non-ferrous support bracket, or utilize a non-ferrous spacer of at least 5 mm (0.2 in.) thickness.

The Style L 'block' magnet (part no.: 252887), mounts on the moving machine part and travels just above the sensor's extrusion. The magnet can be mounted using ferrous metal screws on a customer supplied mounting plate or flat surface of the machine's moving part. The mounting plate or machine's moving part can not extend beyond 11 mm (0.43 in.) from the top of the magnet, unless it is made of non-ferrous material. The magnet should be installed in a perpendicular orientation relative to the top surface of the sensor extrusion. Optimal performance is achieved when this orientation remains consistent throughout the full measurement stroke range.

POSITION MAGNET SELECTIONS (All magnets must be ordered separately)

(Drawing dimensions are for reference only)

Magnet / accessory dimensions	Description	Part number
 	Captive-sliding magnet, Style S For sensor models EP and EL profile-style sensors Material: GFK, magnet hard ferrite Weight: Approx. 30 g Operating temperature: -40 °C to +75 °C	252182
 	Captive-sliding magnet, Style V For sensor models EP and EL profile-style sensors Material: GFK, magnet hard ferrite Weight: Approx. 30 g Operating temperature: -40 °C to +75 °C	252184
 	Block magnet, Style L For sensor models EP and EL profile-style sensors This magnet may influence the sensor performance specifications for some applications.	252887
 	Open-ring magnet, Style M I.D.: 13.5 mm (0.53 in.) O.D.: 33 mm (1.3 in.) Thickness: 8 mm (0.31 in.) Operating temperature: -40 °C to 100 °C This magnet may influence the sensor performance specifications for some applications.	251416-2

Sensor mounting (Models EP and EL)

SENSOR MOUNTING CLAMPS

E-Series models EP and EL sensors are mounted onto the machine with moveable mounting clamps. Mounting clamps slide into side grooves and should be evenly distributed along the sensor extrusion to best secure the sensor for each particular application.

Notes:

1. Models EP and EL sensors include two mounting clamps, (part number 403508), for stroke lengths up to 1250 mm (50 in.). One additional mounting clamp is included for longer stroke lengths.
2. MTS recommends using 10-32 cap screws (customer supplied) at a maximum torque of 44 in. lbs. when fastening mounting clamps.

Models EP and EL sensor mounting and installation reference		Mounting method	Part number
		Mounting clamp Sensor mounting for sensor models EP and EL	403508
Model EP mounting	Model EL mounting	Mounting configuration using mounting clamp and screws	Mounting clamp, part number 403508

Connections and wiring (Model EP and EL)

SENSOR INTEGRAL CONNECTOR (D34 AND D84) PINOUT/WIRE COLOR CODES

The E-Series models EP and EL sensors connect directly to a controller or interface module with the standard male, 5-pin or 8-pin integral connector and an extension cable as described in 'Table 1' and 'Table 2'.

Attention:

The sensors aluminum housing has an anodic coating which prevents the sensor's mounting clamps from providing the appropriate grounding. A grounding lug (see 'Figure 7') is provided near the connector end of the sensor for a convenient connection to earth ground. The appropriate grounding of the cable shield is also required at the controller end.



Figure 7. Grounding lug location.



Integral D34 connector (male) as viewed from the end of the sensor

Pin no.	Extension cable wire color	Signal/function analog outputs
1	Brown	+24 Vdc
2	White	Output signal
3	Blue	DC ground (for power return)
4	Black	2nd Output signal (optional)
5	Gray	Ground for signal return

Table 1. Integral D34 sensor connector (mates with cable connectors 370618 and 370619)



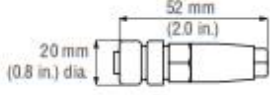
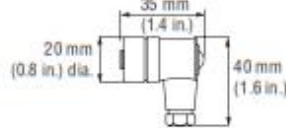
Integral D84 connector (male) as viewed from the end of the sensor

Pin no.	Extension cable wire color	Signal/function Start/Stop outputs
1	White	(+) Start
2	Brown	(-) Start
3	Green	(+) Stop
4	Yellow	(-) Stop
5	Gray	No connection
6	Pink	No connection
7	Blue	+24 Vdc
8	Red	DC ground (for power return)

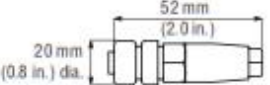
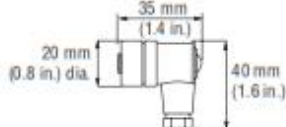
Table 2. Integral D84 sensor connector (mates with cable connectors 370671 and 370672)

E-Series Model EP and EL Sensors
Cable Connector Options (D34 and D84)

MATING CABLE CONNECTOR OPTIONS FOR (D34) CONNECTOR TYPES (Photo and drawing dimensions are for reference only)

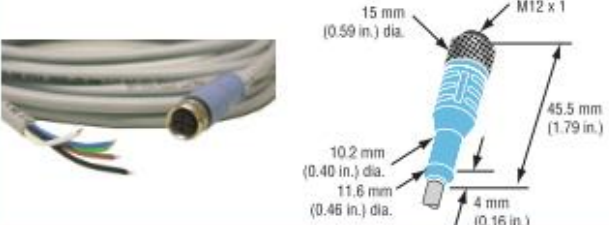
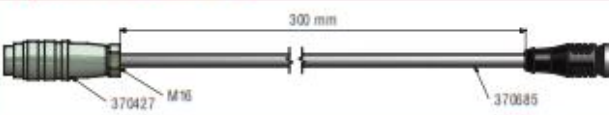
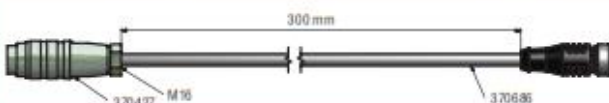
Connector and dimensions	Description	Part number
 	Female cable connector, straight exit (Field installable) 5-Pin (D34) Mates with standard male (M12) integral connector Termination: Screw terminals Cable gland: PG9 for 6-8 mm dia. cable Ingress protection: IP67	370618
 	Female cable connector, 90° exit (Field installable) 5-Pin (D34) Mates with standard male (M12) integral connector Termination: Screw terminals Cable gland: PG9 for 6-8 mm dia. cable Ingress protection: IP67	370619

MATING CABLE CONNECTOR OPTIONS FOR (D84) CONNECTOR TYPES (Photo and drawing dimensions are for reference only)

Connector and dimensions	Description	Part number
 	Female cable connector, straight exit (Field installable) 8-Pin (D84) Mates with standard male (M12) integral connector Termination: Screw terminals Cable gland: PG9 for 6-8 mm dia. cable Ingress protection: IP67	370671
 	Female cable connector, 90° exit (Field installable) 8-Pin (D84) Mates with standard male (M12) integral connector Termination: Screw terminals Cable gland: PG9 for 6-8 mm dia. cable Ingress protection: IP67	370672

**E-Series Model EP and EL Sensors
(M12) Cord Sets and (M16) Adapter Cable Options**

M12 CORD SETS AND (M16) ADAPTER CABLE OPTIONS (Photo and drawing dimensions are for reference only)

Cord set and dimensions	Description	Part number
	M12 Cord set, female connector, straight exit 5-Pin (M12) mates with standard male (D34) integral connector Ingress protection: IP67 Cable: 5 m, shielded, pigtail end	370673
(Image not available) 	M12 Cord set, female connector 90° exit 5-Pin (M12) mates with standard male (D34) integral connector Ingress protection: IP67 Cable: 5 m, shielded, pigtail end	370675
	M12 Cord set, female connector, straight exit 8-Pin (M12) mates with standard male (D84) integral connector Ingress protection: IP67 Cable: 5 m, shielded, pigtail end	370674
(Image not available) 	M12 Cord set, Female, Connector 90° Exit 8-Pin (M12) mates with standard male (D84) integral connector Ingress protection: IP67 Cable: 5 m, shielded, pigtail end	370676
Adapter cable and dimensions	Description	Part number
	Adapter cable 5-Pin female (M12) connector, straight exit to 6-pin male D60 (M16) connector, straight exit Ingress protection: IP67	254257
	Adapter cable 8-Pin female (M12) connector, straight exit to 6-pin male D60 (M16) connector, straight exit Ingress protection: IP67	254258

E-Series Models EP and EL Sensors, Analog and Start/Stop Outputs

Ordering Information

Use the order matrix below to configure your Model EP or EL sensor order number.

E		0						D			1			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

SENSOR MODEL _____ = **E** **1 - 2**

EP = E-Series model EP profile-style sensor (Magnet(s) must be ordered separately)

EL = E-Series model EL low-height profile-style sensor (Magnet(s) must be ordered separately)

HOUSING STYLE _____ = **0** **3**

0 = (Zero) EP and EL sensors do not have housing options or magnet types included in the standard model number. Magnets must be purchased separately by part number. Refer to 'Standard magnet selections (Models EP and EL)' in this document for part numbers.

STROKE LENGTH _____ = _____ **4 - 8**

_____ **M** = Millimeters (Encode in 25, 50, or 100 mm increments as indicated in 'Stroke length notes' below).

_____ **U** = Inches (Encode in 1, 2, or 4 in. increments as indicated in 'Stroke length notes' below).

(Digit for tenths of inches is always '0').

Stroke Length Notes:

Stroke length ranges:

M = 50 mm to 2500 mm (up to 3000 mm for model EP Start/Stop only)

U = 2 in. to 100 in. (up to 120 in. for model EP Start/Stop only)

The increment size between standard stroke lengths vary as shown below:

Stroke length (mm)	Ordering increment
≤ 500 mm	25 mm
> 500 mm and ≤ 2500 mm	50 mm
> 2500 mm and ≤ 3000 mm (For Model EP Start/Stop only)	100 mm
Stroke length (in)	Ordering increment
≤ 20 in.	1 in.
> 20 in. and ≤ 100 in.	2 in.
> 100 in. and ≤ 120 in. (For Model EP Start/Stop only)	4 in.

SENSOR CONNECTION TYPES _____ = **D** **9 - 11**

D34 = 5-Pin (M12), male, (Analog output)

D84 = 8-Pin (M12), male, (Start/Stop output)

INPUT VOLTAGE _____ = **1** **12**

1 = +24 Vdc (+20%, -15%), standard

OUTPUT _____ = _____ **13 - 15**

(2 or 3 digit code defined by output option selected).

VOLTAGE

V01 = 0 to 10 Vdc (1 output channel with 1 magnet)

V11 = 10 to 0 Vdc (1 output channel with 1 magnet)

V02 = 0 to 10 Vdc (2 output channels with 2 magnets) Refer to 'Dual magnet outputs' for more information.

V12 = 10 to 0 Vdc (2 output channels with 2 magnets) Refer to 'Dual magnet outputs' for more information.

V03 = 0 to 10 Vdc and 10 to 0 Vdc (2 output channels with 1 magnet)

CURRENT

A01 = 4 to 20 mA (1 output channel with 1 magnet)

A11 = 20 to 4 mA (1 output channel with 1 magnet)

A02 = 4 to 20 mA (2 output channels with 2 magnets) Refer to 'Dual magnet outputs' for more information.

A12 = 20 to 4 mA (2 output channels with 2 magnets) Refer to 'Dual magnet outputs' for more information.

START/STOP

R3 = Start/Stop with sensor parameters upload function

Start/Stop output (Option **R3**) is fully compatible with the Start/Stop output (Option **R0**) used in the previous generation E-Series sensors.



Document Part number:
591248 Revision A (EN) 05/2014



LOCATIONS

USA
MTS Systems Corporation
Sensors Division
3001 Sheldon Drive
Cary, N.C. 27513, USA
Tel. +1 919 677-0100
Fax +1 919 677-0200
info.us@mtssensors.com
www.mtsensors.com

GERMANY
MTS Sensor Technologie
GmbH & Co. KG
Auf dem Schüttel 9
58513 Lüdenscheid, Germany
Tel. +49 2351 9587-0
Fax +49 2351 9649-1
info.de@mtssensors.com
www.mtsens.de

JAPAN
MTS Sensors Technology Corp.
737 Aihara-machi,
Machida-shi,
Tokyo 194-0211, Japan
Tel. +81 42 775-3838
Fax +81 42 775-5512
info.jp@mtssensors.com
www.mtsensors.co.jp

FRANCE
MTS Systems SAS
Zone EUROPAIC Bâtiment EXA 16
16/18, rue Eugène Dupuis
94046 Créteil, France
Tel. +33 1 58 43 90 28
Fax +33 1 58 43 90 03
info.fr@mtssensors.com
www.mtsensor.com

ITALY
MTS Systems Srl Sensor Division
Via Orac 4
25050 Provaglio d'Iseo (BS), Italy
Tel. +39 030 9883819
Fax +39 030 9823359
info.it@mtssensors.com
www.mtsensor.com

CHINA
MTS Sensors
Room 504, Huajing Commercial Center,
No. 188, North Qinchou Road
200233 Shanghai, China
Tel. +86 21 6485 9800
Fax +86 21 6495 6329
info.cn@mtssensors.com
www.mtsensors.cn

LEGAL NOTICES

MTS, Tempsonics and Level Plus are registered trademarks of MTS Systems Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners. Printed in USA. Copyright © 2014 MTS Systems Corporation. All Rights Reserved in all media.

All specifications are subject to change. Contact MTS for specifications and engineering drawings that are critical to your application. Drawings contained in this document are for reference only. Go to <http://www.mtsensors.com> for the latest product information.

ANEXO B. GANANCIA KV DE LA VALVULA DE POSICION

kv de POSICION	
VOLTIOS COMANDO	VOLTIOS SPOOL
0	0
0,2	0,2
0,4	0,4
0,6	0,6
0,8	0,79
1	0,99
1,2	1,18
1,4	1,37
1,6	1,57
1,8	1,77
2	1,96
2,2	2,16
2,4	2,35
2,6	2,55
2,8	2,75
3	2,94
3,2	3,13
3,4	3,33
3,6	3,53
3,8	3,72
4	3,92
4,2	4,11
4,4	4,31
4,6	4,5
4,8	4,7
5	4,9

ANEXO C. GANANCIA KV DE LA VALVULA DE VELOCIDAD

KV. VELOCIDAD	
VOLTIOS COMANDO	VOLTIOS SPOOL
0	0,01
0,2	0,21
0,4	0,41
0,6	0,6
0,8	0,79
1	0,98
1,2	1,19
1,4	1,38
1,6	1,57
1,8	1,77
2	1,96
2,2	2,16
2,4	2,35
2,6	2,55
2,8	2,75
3	2,94
3,2	3,13
3,4	3,33
3,6	3,52
3,8	3,72
4	3,91
4,2	4,1
4,4	4,3
4,6	4,49
4,8	4,69
5	4,88

ANEXO D. CARACTERIZACIÓN DE LA ELECTROVÁLVULA PROPORCIONAL DEL SERVO DE VELOCIDAD

Kev ELECTROVALVULA PROPORCIONAL DEL SERVO DE VELOCIDAD			
T	Q	V	Kev
COMANDO 2,5 VOLTIOS			
27,7	2,166064982	2,5	0,866425993
28,02	2,141327623	2,5	0,856531049
28,37	2,114910116	2,5	0,845964047
28,08	2,136752137	2,5	0,854700855
28,07	2,137513359	2,5	0,855005344
COMANDO 4,5 VOLTIOS			
15,28	3,926701571	4,5	0,872600349
15,38	3,901170351	4,5	0,866926745
15,4	3,896103896	4,5	0,865800866
15,32	3,916449086	4,5	0,870322019
15,35	3,908794788	4,5	0,868621064
COMANDO 5 VOLTIOS			
15,4	3,896103896	5	0,779220779
15,5	3,870967742	5	0,774193548
15,7	3,821656051	5	0,76433121
15,9	3,773584906	5	0,754716981

ANEXO E. DATASHEET TARJETA NI USB 6212 DE NATIONAL INSTRUMENTS



Technical Sales

(866) 531-6286
orders@ni.com

[Requirements and Compatibility](#) | [Ordering Information](#) | [Detailed Specifications](#) | [Pinouts/Front Panel Connections](#)
For user manuals and functional drawings, visit the product page resources at [ni.com](#)

Last Revised: 2016-11-08 07:14:41.0

Bus-Powered M Series Multifunction DAQ for USB - 16-Bit, up to 400 kS/s, up to 32 Analog Inputs, Isolation



- Up to 32 analog inputs at 16 bits, up to 400 kS/s (250 kS/s scanning)
- Up to 2 analog outputs at 16 bits
- Up to 32 TTL/CMOS digital I/O lines
- Two 32-bit, 80 MHz counter/timers
- NI-PGIA 2 and NI-MCal calibration technology for improved measurement accuracy
- NI signal streaming for 4 high-speed data streams on USB
- Bus-powered design
- Available with CAT I isolation

Overview

With recent bandwidth improvements and new innovations from National Instruments, USB has evolved into a core bus of choice for measurement and automation applications. NI M Series devices for USB deliver high-performance data acquisition in an easy-to-use and portable form factor through USB ports on laptop computers and other portable computing platforms. National Instruments designed the new and innovative patent-pending NI signal streaming technology that enables sustained bidirectional high-speed data streams on USB. The new technology, combined with advanced external synchronization and isolation, helps engineers and scientists achieve high-performance applications on USB.

NI M Series bus-powered multifunction data acquisition (DAQ) devices for USB are optimized for superior accuracy in a small form factor. They provide an onboard NI-PGIA 2 amplifier designed for fast settling times at high sampling rates, ensuring 16-bit accuracy even when measuring all available channels at maximum speed.

All bus-powered devices have a minimum of 16 analog inputs, digital triggering, and two counter/timers. USB M Series devices are ideal for test, control, and design applications including portable data logging, field monitoring, embedded OEM, in-vehicle data acquisition and academic.

[Back to Top](#)

Requirements and Compatibility

OS Information

- Linux®
- Mac OS X
- Windows 2000/XP
- Windows 7
- Windows Vista x64/x86

Driver Information

- NI-DAQmx
- NI-DAQmx Base

Software Compatibility

- ANSI C/C++
- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio
- SignalExpress
- Visual Basic .NET
- Visual C#

[Back to Top](#)

Comparison Tables

Family	Connector	Analog Inputs	Resolution (bits)	Max Rate (kS/s)	Analog Outputs	Resolution (bits)	Max Rate (kS/s)	Digital I/O	Isolation
USB-6210	Screw	16	16	250	-	-	-	4 D+/4 D-	-

1/1X

[www.ni.com](#)

Family	Connector	Analog Inputs	Resolution (bits)	Max Rate (kS/s)	Analog Outputs	Resolution (bits)	Max Rate (kS/s)	Digital I/O	Isolation
USB-6211	Screw	16	16	250	2	16	250	4 DVI4 DO	-
USB-6212	Screw/68-pin SCSI	16	16	400	2	16	250	24 or 32 DIO	-
USB-6215	Screw	16	16	250	2	16	250	4 DVI4 DO	60 V, CAT I
USB-6216	Screw/68-pin SCSI	16	16	400	2	16	250	24 or 32 DIO	60 V, CAT I
USB-6218	Screw	32	16	250	2	16	250	8 DVI8 DO	60 V, CAT I

[Back to Top](#)

Application and Technology

Ni Signal Streaming

To optimize the use of the Universal Serial Bus (USB) and deliver high-performance data acquisition, National Instruments created several key technologies to push the limits of USB throughput and latency. Ni signal streaming combines three innovative hardware- and software-level design elements to enable sustained high-speed and bidirectional data streams over USB. For more information, visit ni.com/usb.

USB M Series for Test

You can use USB M Series multifunction DAQ devices for low-cost test or to complement existing test systems that need additional measurement channels. For higher-channel-count signal conditioning on USB, consider the Ni CompactDAQ or SCX2 platforms.

USB M Series for Design

For design applications, you can use a wide range of I/O – from 16 differential analog inputs to 32 digital lines – to measure and verify prototype designs. USB M Series devices and Ni LabVIEW SignalExpress interactive measurement software deliver benchmark measurements to the PC. With LabVIEW SignalExpress, you can quickly create design verification tests. You can convert your tested and verified LabVIEW SignalExpress projects to LabVIEW applications for immediate M Series DAQ use, and bridge the gap between test, control, and design applications.

USB M Series for OEM

Shorten your time to market by integrating world-class National Instruments OEM measurement products in your design. Board-only versions of USB M Series DAQ devices for OEM applications feature competitive quantity pricing and software customization. The Ni OEM Bite Program offers free 30-day trial kits for qualified customers. Visit ni.com/oem for more information.

Recommended Driver Software

National Instruments measurement services software, built around NI-DAQmx driver software, includes intuitive application programming interfaces, configuration tools, I/O assistants, and other tools designed to reduce system setup, configuration, and development time. National Instruments recommends using the latest version of NI-DAQmx driver software for application development in Ni LabVIEW, LabVIEW SignalExpress, LabWindows/CVI, and Measurement Studio software. To obtain the latest version of NI-DAQmx, visit ni.com/support/daq/versions. Ni measurement services software speeds up your development with features including the following:

- A guide to create fast and accurate measurements with no programming using the DAQ Assistant
- Automatic code generation to create your application in LabVIEW, LabWindows/CVI, LabVIEW SignalExpress, and C#, Visual Studio .NET, ANSI C/C++, or Visual Basic using Measurement Studio
- Multithreaded streaming technology for 1,000 times performance improvements
- Automatic timing, triggering, and synchronization routing to make advanced applications easy
- More than 3,000 free software downloads available at ni.com/zone to jump-start your project
- Software configuration of all digital I/O features without hardware switches/jumpers
- Single programming interface for analog input, analog output, digital I/O, and counters on hundreds of multifunction DAQ hardware devices

M Series devices are compatible with the following versions (or later) of Ni application software – LabVIEW, LabWindows/CVI, or Measurement Studio versions 7.x; and LabVIEW SignalExpress 2.x.

Recommended Accessories (Mass-Terminal Versions)

Signal conditioning is required for sensor measurements or voltage inputs greater than 10 V. Ni SCC products, which are designed to increase the performance and reliability of your data acquisition system, are up to 10 times more accurate than using terminal blocks alone. For more information, visit ni.com/sigcon.

[Back to Top](#)

Ordering Information

For a complete list of accessories, visit the product page on ni.com.

Products	Part Number	Recommended Accessories	Part Number
		No accessories required.	
		No accessories required.	
		No accessories required.	
		No accessories required.	
		No accessories required.	
		No accessories required.	

[Back to Top](#)

Software Recommendations

LabVIEW Professional Development System for Windows



- Advanced software tools for large project development
- Automatic code generation using DAQ Assistant and Instrument I/O Assistant
- Tight integration with a wide range of hardware
- Advanced measurement analysis and digital signal processing
- Open connectivity with DLLs, ActiveX, and .NET objects
- Capability to build DLLs, executables, and MSI installers

SignalExpress for Windows



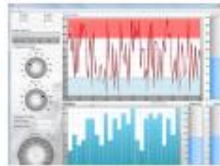
- Quickly configure projects without programming
- Control over 400 PC-based and stand-alone instruments
- Log data from more than 250 data acquisition devices
- Perform basic signal processing, analysis, and file I/O
- Scale your application with automatic LabVIEW code generation
- Create custom reports or easily export data to LabVIEW, Diadem or Microsoft Excel

NI LabWindows™/CVI for Windows



- Real-time advanced 2D graphs and charts
- Complete hardware compatibility with IVI, VISA, DAQ, GPIB, and serial
- Analysis tools for array manipulation, signal processing statistics, and curve fitting
- Simplified cross-platform communication with network variables
- Measurement Studio .NET tools (included in LabWindows/CVI Full only)
- The mark LabWindows is used under a license from Microsoft Corporation.

NI Measurement Studio Professional Edition



- Customizable graphs and charts for WPF, Windows Forms, and ASP.NET Web Forms UI design
- Analysis libraries for array operations, signal generation, windowing, filters, signal processing
- Hardware integration support with native .NET data acquisition and instrument control libraries
- Automatic code generation for all NI-DAQmx data acquisition hardware
- Intelligent and efficient data-logging libraries for streaming measurement data to disk
- Support for Microsoft Visual Studio .NET 2012/2010/2008

[Back to Top](#)

Support and Services

Calibration

NI measurement hardware is calibrated to ensure measurement accuracy and verify that the device meets its published specifications. To ensure the ongoing accuracy of your measurement hardware, NI offers basic or detailed recalibration service that provides ongoing ISO 9001 audit compliance and confidence in your measurements. To learn more about NI calibration services or to locate a qualified service center near you, contact your local sales office or visit ni.com/calibration.

Technical Support

Get answers to your technical questions using the following National Instruments resources.

- **Support** - Visit ni.com/support to access the NI KnowledgeBase, example programs, and tutorials or to contact our applications engineers who are located in NI sales offices around the world and speak the local language.
- **Discussion Forums** - Visit forums.ni.com for a diverse set of discussion boards on topics you care about.
- **Online Community** - Visit community.ni.com to find, contribute, or collaborate on customer-contributed technical content with users like you.

Repair

While you may never need your hardware repaired, NI understands that unexpected events may lead to necessary repairs. NI offers repair services performed by highly trained technicians who quickly return your device with the guarantee that it will perform to factory specifications. For more information, visit ni.com/repair.

Training and Certifications

The NI training and certification program delivers the fastest, most certain route to increased proficiency and productivity using NI software and hardware. Training builds the skills to more efficiently develop robust, maintainable applications, while certification validates your knowledge and ability.

- **Classroom training in cities worldwide** - the most comprehensive hands-on training taught by engineers.
- **On-site training at your facility** - an excellent option to train multiple employees at the same time.
- **Online instructor-led training** - lower-cost, remote training if classroom or on-site courses are not possible.
- **Course kits** - lowest-cost, self-paced training that you can use as reference guides.
- **Training memberships** and training credits - to buy now and schedule training later.

Visit ni.com/training for more information.

Extended Warranty

NI offers options for extending the standard product warranty to meet the life-cycle requirements of your project. In addition, because NI understands that your requirements may change, the extended warranty is flexible in length and easily renewed. For more information, visit ni.com/warranty.

OEM

NI offers design-in consulting and product integration assistance if you need NI products for OEM applications. For information about special pricing and services for OEM customers, visit ni.com/oem.

Alliance

Our Professional Services Team is comprised of NI applications engineers, NI Consulting Services, and a worldwide National Instruments Alliance Partner program of more than 700 independent consultants and integrators. Services range from start-up assistance to turnkey system integration. Visit ni.com/alliance.

[Back to Top](#)

Detailed Specifications

Specifications listed below are typical at 25 °C unless otherwise noted. Refer to the *NI USB-621x User Manual* for more information about USB-621x devices.



Caution The input/output ports of this device are not protected for electromagnetic interference due to functional reasons. As a result, this device may experience reduced measurement accuracy or other temporary performance degradation when connected cables are routed in an environment with radiated or conducted radio frequency electromagnetic interference.

To ensure that this device functions within specifications in its operational electromagnetic environment and to limit radiated emissions, care should be taken in the selection, design, and installation of measurement probes and cables.

Analog Input

Number of channels

USB-6210/6211/6212/6215/6216	8 differential or 16 single ended
USB-6218	16 differential or 32 single ended

ADC resolution

16 bits

DNL

No missing codes guaranteed

INL

Refer to the AI Absolute Accuracy Tables

Sampling rate

Maximum

USB-6210/6211/6215/6216	250 kS/s single channel, 250 kS/s multichannel (aggregate)
USB-6212/6216	400 kS/s single channel, 400 kS/s multichannel (aggregate)

Minimum

0 S/s

Timing accuracy

50 ppm of sample rate

Timing resolution

50 ns

Input coupling

DC

Input range

±10 V, ±5 V, ±1 V, ±0.2 V

Maximum working voltage for analog inputs (signal + common mode)

±10.4 V of AI GND

CMRR (DC to 60 Hz)

100 dB

Input impedance

Device on

AI ⁺ to AI GND	>10 GΩ in parallel with 100 pF
AI ⁻ to AI GND	>10 GΩ in parallel with 100 pF

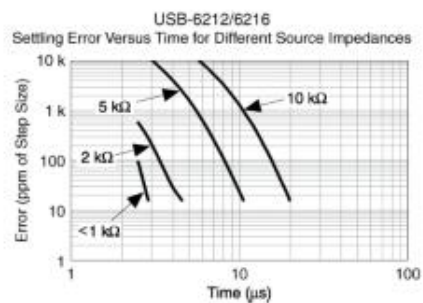
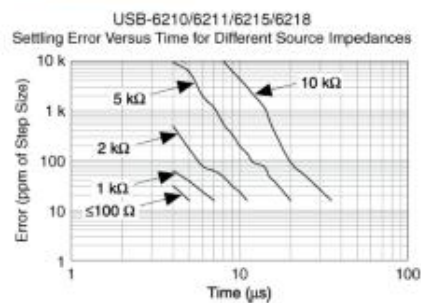
Device off	
AI ⁺ to AI GND	1200 Ω
AI ⁻ to AI GND	1200 Ω
Input bias current	± 100 pA
Crosstalk (at 100 kHz)	
Adjacent channels	-75 dB
Non-adjacent channels	-90 dB
Small signal bandwidth (-3 dB)	
USB-6210/6211/6215/6218	450 kHz
USB-6212/6216	1.5 MHz
Input FIFO size	4,095 samples
Scan list memory	4,095 entries
Data transfers	USB Signal Stream, programmed I/O
Overvoltage protection (AI <0.31V, AI SENSE)	
Device on	± 30 V for up to two AI pins
Device off	± 20 V for up to two AI pins
Input current during overvoltage condition	± 20 mA max/AI pin

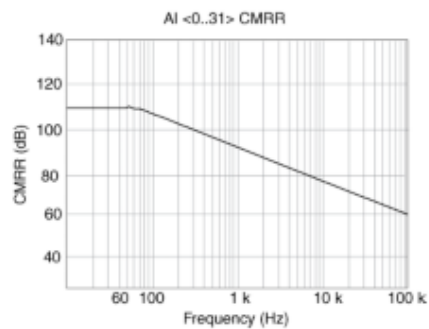
Settling Time for Multichannel Measurements

Accuracy, full scale step, all ranges

USB-6210/6211/6215/6218	
± 90 ppm of step (± 6 LSB)	4 μ s convert interval
± 30 ppm of step (± 2 LSB)	5 μ s convert interval
± 15 ppm of step (± 1 LSB)	7 μ s convert interval
USB-6212/6216	
± 90 ppm of step (± 6 LSB)	2.5 μ s convert interval
± 30 ppm of step (± 2 LSB)	3.5 μ s convert interval
± 15 ppm of step (± 1 LSB)	5.5 μ s convert interval

Typical Performance Graphs





Analog Output

Number of channels	
USB-6210	0
USB-6211/6212/6215/6216/6218	2
DAC resolution	16 bits
DNL	±1 LSB
Monotonicity	16 bit guaranteed
Maximum update rate	
1 channel	250 kS/s
2 channels	250 kS/s per channel
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	50 ns
Output range	±10 V
Output coupling	DC
Output impedance	0.2 Ω
Output current drive	±2 mA
Overdrive protection	±30 V
Overdrive current	24 mA
Power-on state	±20 mV
Power-on glitch	±1 V for 200 ms
Output FIFO size	8,191 samples shared among channels used
Data transfers	USB Signal Stream, programmed I/O
AO waveform modes:	
- Non-periodic waveform - Periodic waveform regeneration mode from onboard FIFO - Periodic waveform regeneration from host buffer including dynamic update	
Settling time, full scale step 15 ppm (1 LSB)	32 μs
Slew rate	5 V/μs
Glitch energy	
Magnitude	100 mV
Duration	2.6 μs
Calibration (AI and AO)	
Recommended warm-up time	15 minutes
Calibration interval	1 year

AI Absolute Accuracy Table (USB-6210/6211/6215/6218)										
Nominal Range		Residual Gain Error (ppm of Reading)	Gain Tempco (ppm/°C)	Reference Tempco	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	INL Error (ppm of Range)	Random Noise, σ (μ Vrms)	Absolute Accuracy at Full Scale ¹ (μ V)	Sensitivity ² (μ V)
Positive Full Scale	Negative Full Scale									
10	-10	75	7.3	5	20	34	76	229	2,690	91.6
5	-5	85	7.3	5	20	36	76	118	1,410	47.2
1	-1	95	7.3	5	25	49	76	26	310	10.4
0.2	-0.2	135	7.3	5	40	116	76	12	88	4.8

$AbsoluteAccuracy = Reading \cdot (GainError) + Range \cdot (OffsetError) + NoiseUncertainty$
 $GainError = ResidualGainError + GainTempco \cdot (TempChangeFromLastInternalCal) + ReferenceTempco \cdot (TempChangeFromLastExternalCal)$
 $OffsetError = ResidualOffsetError + OffsetTempco \cdot (TempChangeFromLastInternalCal) + INL_Error$
 $NoiseUncertainty = \frac{RandomNoise \cdot 3}{\sqrt{100}}$ For a coverage factor of 3 σ and averaging 100 points.
¹ Absolute accuracy at full scale on the analog input channels is determined using the following assumptions:
 $TempChangeFromLastExternalCal = 10^\circ C$
 $TempChangeFromLastInternalCal = 1^\circ C$
 $number_of_readings = 100$
 $CoverageFactor = 3\sigma$
 For example, on the 10 V range, the absolute accuracy at full scale is as follows:
 $GainError = 75 ppm + 7.3 ppm \cdot 1 + 5 ppm \cdot 10$ GainError = 132 ppm
 $OffsetError = 20 ppm + 34 ppm \cdot 1 + 76 ppm$ OffsetError = 130 ppm
 $NoiseUncertainty = \frac{229 \mu V \cdot 3}{\sqrt{100}}$ NoiseUncertainty = 68.7 μV
 $AbsoluteAccuracy = 10 V \cdot (GainError) + 10 V \cdot (OffsetError) + NoiseUncertainty$ AbsoluteAccuracy = 2,690 μV
² Sensitivity is the smallest voltage change that can be detected. It is a function of noise.
 Accuracies listed are valid for up to one year from the device external calibration.

AI Absolute Accuracy Table (USB-6212/6216)										
Nominal Range		Residual Gain Error (ppm of Reading)	Gain Tempco (ppm/°C)	Reference Tempco	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	INL Error (ppm of Range)	Random Noise, σ (μ Vrms)	Absolute Accuracy at Full Scale ¹ (μ V)	Sensitivity ² (μ V)
Positive Full Scale	Negative Full Scale									
10	-10	75	7.3	5	20	34	76	295	2,710	118.0
5	-5	85	7.3	5	20	36	76	149	1,420	59.6
1	-1	95	7.3	5	25	49	76	32	310	12.8
0.2	-0.2	135	7.3	5	40	116	76	13	89	5.2

$AbsoluteAccuracy = Reading \cdot (GainError) + Range \cdot (OffsetError) + NoiseUncertainty$
 $GainError = ResidualGainError + GainTempco \cdot (TempChangeFromLastInternalCal) + ReferenceTempco \cdot (TempChangeFromLastExternalCal)$
 $OffsetError = ResidualOffsetError + OffsetTempco \cdot (TempChangeFromLastInternalCal) + INL_Error$
 $NoiseUncertainty = \frac{RandomNoise \cdot 3}{\sqrt{100}}$ For a coverage factor of 3 σ and averaging 100 points.
¹ Absolute accuracy at full scale on the analog input channels is determined using the following assumptions:
 $TempChangeFromLastExternalCal = 10^\circ C$
 $TempChangeFromLastInternalCal = 1^\circ C$
 $number_of_readings = 100$
 $CoverageFactor = 3\sigma$
 For example, on the 10 V range, the absolute accuracy at full scale is as follows:
 $GainError = 75 ppm + 7.3 ppm \cdot 1 + 5 ppm \cdot 10$ GainError = 132 ppm
 $OffsetError = 20 ppm + 34 ppm \cdot 1 + 76 ppm$ OffsetError = 130 ppm
 $NoiseUncertainty = \frac{295 \mu V \cdot 3}{\sqrt{100}}$ NoiseUncertainty = 88.5 μV
 $AbsoluteAccuracy = 10 V \cdot (GainError) + 10 V \cdot (OffsetError) + NoiseUncertainty$ AbsoluteAccuracy = 2,690 μV

² Sensitivity is the smallest voltage change that can be detected. It is a function of noise.

Accuracies listed are valid for up to one year from the device external calibration.

AO Absolute Accuracy Table

Nominal Range		Residual Gain Error (ppm of Reading)	Gain Tempco (ppm/°C)	Reference Tempco	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	INL Error (ppm of Range)	Absolute Accuracy at Full Scale ¹ (µV)
Positive Full Scale	Negative Full Scale							
10	-10	90	11	5	60	12	3.512	118.0

¹ Absolute Accuracy at full scale numbers is valid immediately following internal calibration and assumes the device is operating within 10 °C of the last external calibration. Accuracies listed are valid for up to one year from the device external calibration.

$AbsoluteAccuracy = OutputValue \cdot (GainError) + Range \cdot (OffsetError)$

$GainError = ResidualGainError + GainTempco \cdot (TempChangeFromLastInternalCal) + ReferenceTempco \cdot (TempChangeFromLastExternalCal)$

$OffsetError = ResidualOffsetError + AOffsetTempco \cdot (TempChangeFromLastInternalCal) + INL_Error$

Digital I/O/PFI

Static Characteristics

Number of channels

Digital input

USB-6210/6211/6215

4 (PFI <0...3>P0...<0...3>)

USB-6218

8 (PFI <0...3>P0...<0...3>, PFI <8...11>P0...<4...7>)

Digital output

USB-6210/6211/6215

4 (PFI <4...7>P1...<0...3>)

USB-6218

8 (PFI <4...7>P1...<0...3>, PFI <12...15>P1...<4...7>)

Digital input or output

USB-6212/6216 Screw Terminal

32 total, 16 (P0...<0...15>), 16 (PFI <0...7>P1...<0...7>, PFI <8...15>P2...<0...7>)

USB-6212/6216 Mass Termination/BNC

24 total, 8 (P0...<0...7>), 16 (PFI <0...7>P1...<0...7>, PFI <8...15>P2...<0...7>)

Ground reference

D GND

Pull-down resistor

USB-6210/6211/6215/6218

47 kΩ ±1%

USB-6212/6216

50 kΩ typical, 20 kΩ minimum

Input voltage protection¹

±20 V on up to 8 pins

PFI Functionality

USB-6210/6211/6215/6218

PFI <0...3>, PFI <8...11>Port 0

Functionality

Static digital input, timing input

Debounce filter settings

125 ns, 6.425 µs, 2.56 ms, disable; high and low transitions; selectable per input

PFI <4...7>, PFI <12...15>Port 1

Functionality

Static digital output, timing output

Timing output sources

Many AI, AO, counter timing signals

USB-6212/6216 PFI <0...15>

Functionality

Static digital input, static digital output, timing input, timing output

Timing output sources

Many AI, AO, counter timing signals

Debounce filter settings

125 ns, 6.425 µs, 2.56 ms, disable; high and low transitions; selectable per input

Maximum Operation Conditions

Level	Min	Max
-------	-----	-----

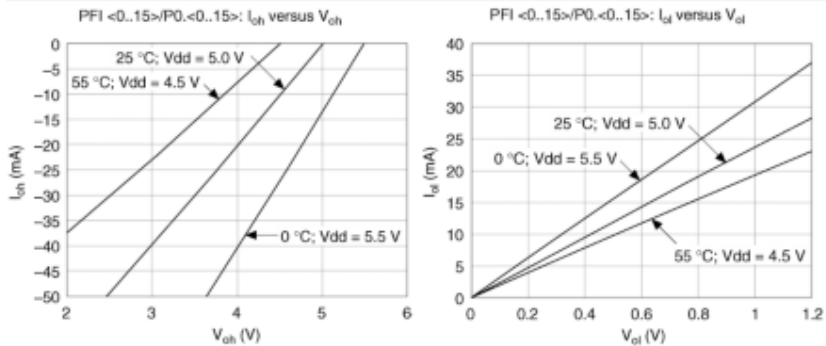
I_{OL} output low current	—	16 mA
I_{OH} output high current	—	-16 mA

Digital Input Characteristics (USB-6210/6211/6215/6218)		
Level	Min	Max
V_{IL} input low voltage	0 V	0.8 V
V_{IH} input high voltage	2 V	5.25 V
I_{IL} input low current ($V_{in} = 0$ V)	—	-10 μ A
I_{IH} input high current ($V_{in} = 5$ V)	—	120 μ A

Digital Input Characteristics (USB-6212/6216)		
Level	Min	Max
V_{IL} input low voltage	0 V	0.8 V
V_{IH} input high voltage	2.2 V	5.25 V
I_{IL} input low current ($V_{in} = 0$ V)	—	-10 μ A
I_{IH} input high current ($V_{in} = 5$ V)	—	250 μ A
Positive-going threshold (VT+)	—	2.2 V
Negative-going threshold (VT-)	0.8 V	—
Delta VT hysteresis (VT+ - VT-)	0.2 V	—

Digital Output Characteristics (USB-6210/6211/6215/6218)		
Parameter	Voltage Level	Current Level
V_{OL}	0.6 V	6 mA
V_{OH}	2.7 V	-16 mA
	3.8 V	-6 mA

Digital Output Characteristics (USB-6212/6216)



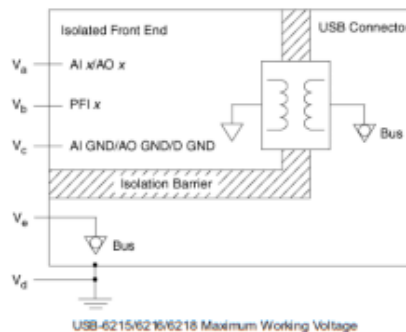
General-Purpose Counter/Timers

Number of counter/timers	2
Resolution	32 bits
Counter measurements	Edge counting, pulse, semi-period, period, two-edge separation
Position measurements	X1, X2, X4 quadrature encoding with Channel Z reloading; two-pulse encoding

Output applications	Pulse, pulse train with dynamic updates, frequency division, equivalent time sampling
Internal base clocks	80 MHz, 20 MHz, 0.1 MHz
External base clock frequency	0 MHz to 20 MHz
Base clock accuracy	50 ppm
Inputs	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down
Routing options for inputs	
USB-6210/6211/6215/6218	PFI <0..3>, PFI <8..11>, many internal signals
USB-6212/6216	PFI <0..15>, many internal signals
FIFO	1,023 samples
Data transfers	USB Signal Stream, programmed I/O
Frequency Generator	
Number of channels	1
Base clocks	10 MHz, 100 kHz
Divisors	1 to 16
Base clock accuracy	50 ppm
Output can be available on any output PFI terminal.	
External Digital Triggers	
Source	
USB-6210/6211/6215/6218	PFI <0..3>, PFI <8..11>
USB-6212/6216	PFI <0..15>
Polarity	Software-selectable for most signals
Analog input function	Start Trigger, Reference Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Convert Clock, Sample Clock Timebase
Analog output function	Start Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Sample Clock Timebase
Counter/timer functions	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down
Bus Interface	
USB	USB 2.0 Hi-Speed or Full-Speed ²
USB Signal Stream (USB)	4, can be used for analog input, analog output, counter/timer 0, counter/timer 1
Power Limits	
+5 V terminal as output ³	
Voltage	4.6 to 5.2 V
Current (internally limited)	50 mA max, shared with digital outputs
+5 V terminal as input ³	
Voltage	4.75 to 5.35 V
Current	350 mA max, self-resetting fuse
 Caution Do not exceed 16 mA per DIO pin.	
Protection	±10 V
Power Requirements	
Input voltage on USB-621x USB port	4.5 to 5.25 V in configured state
Maximum inrush current	500 mA
No load typical current	320 mA at 4.5 V
Maximum load	
Typical current	400 mA at 4.5 V

Suspend current	250 μ A, typical
Physical Characteristics	
Enclosure dimensions (includes connectors)	
USB-621x Screw Terminal	15.9 × 9.4 × 3.1 cm (6.65 × 3.70 × 1.20 in.)
USB-621x Mass Termination	19.3 × 9.4 × 3.1 cm (7.61 × 3.68 × 1.20 in.)
USB-621x BNC	23.5 × 11.2 × 6.4 cm (9.25 × 4.40 × 2.50 in.)
Weight	
USB-621x Screw Terminal	206 g (7.2 oz)
USB-6212 Mass Termination	227 g (8.0 oz)
USB-6216 Mass Termination	231 g (8.1 oz)
USB-6212/6216/6218 BNC	950 g (33.5 oz)
USB-6210 OEM	73 g (2.5 oz)
USB-6212/6216/6218 OEM	76 g (2.6 oz)
I/O connectors	
USB-6210/6211/6215	Two 16-position combicon
USB-6212/6216/6218 Screw Terminal	Four 16-position combicon
USB-6212/6216 Mass Termination	One 68-pin SCSI
USB-6212/6216/6218 BNC	19 BNCs and 26 screw terminals
USB connector	Series B receptacle
Screw terminal wiring	16 to 28 AWG
Torque for screw terminals	0.22-0.25 N · m (2.0-2.2 lb · in.)
Environmental	
Operating temperature	0 to 45 °C
Storage temperature	-20 to 70 °C
Humidity	10 to 90% RH, noncondensing
Maximum altitude	2,000 m
Pollution Degree (indoor use only)	2
Maximum Working Voltage⁴	
USB-6210/6211/6212 Rated Voltage	
Channel-to-earth ground	11 V, Measurement Category I
 Caution	Do not use for measurements within Categories II, III, or IV.
USB-6215/6216/6218 Rated Voltage	
Channel-to-earth ground ⁵	
Continuous	±60 VDC, Measurement Category I ⁶
Withstand	±1000 Vrms, verified by a 5 s dielectric withstand test
Analog channel to AI GND/AO GND (in the USB-6215/6216/6218 Maximum Working Voltage figure, $[V_A - V_G]$)	±11 V, Measurement Category I ⁶
Digital channel to D GND (in the USB-6215/6216/6218 Maximum Working Voltage figure, $V_D - V_G$)	±5.25 V, Measurement Category I ⁶
 Caution	This device is rated for Measurement Category I and the voltage across the isolation barrier is limited to no greater than 30 Vrms/60 VDC/42.4 V _{pk} continuous. Do not use for measurements within Categories II, III, or IV.

The USB-6215/6216/6218 Maximum Working Voltage figure illustrates the maximum working voltage specifications.



Safety

This product is designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1



Note For UL and other safety certifications, refer to the product label or visit ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Electromagnetic Compatibility

This product is designed to meet the requirements of the following standards of EMC for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326 (IEC 61326): Class A emissions; Basic immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions



Note For the standards applied to assess the EMC of this product, refer to the [Online Product Certification](#) section.



Note For EMC compliance, operate this product according to the documentation.



Note For EMC compliance, operate this device with shielded cables.

CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as amended for CE marking, as follows:

- 2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)
- 2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)

Online Product Certification

Refer to the product Declaration of Conformity (DoC) for additional regulatory compliance information. To obtain product certifications and the DoC for this product, visit ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Environmental Management

National Instruments is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial not only to the environment but also to NI customers.

For additional environmental information, refer to the NI and the Environment Web page at ni.com/environment. This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)



EU Customers At the end of their life cycle, all products must be sent to a WEEE recycling center. For more information about WEEE recycling centers and National Instruments WEEE initiatives, visit ni.com/environment/wEEE.htm.

电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



中国客户 National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息，请登录 ni.com/environment/rohs_china。(For information about China RoHS compliance, go to ni.com/environment/rohs_china.)

¹ Stresses beyond those listed under *Input voltage protection* may cause permanent damage to the device.

² If you are using a USB M Series device in Full-Speed mode, device performance will be lower and you will not be able to achieve maximum sampling/update rates.

³ USB-621x Screw Terminal/BNC devices have a self-resetting fuse that opens when current exceeds this specification. USB-621x Mass Termination devices have a user-replaceable socketed fuse that opens when current exceeds this specification. Refer to the *NI USB-621x User Manual* for information about fuse replacement.

⁴ Maximum working voltage refers to the signal voltage plus the common-mode voltage.

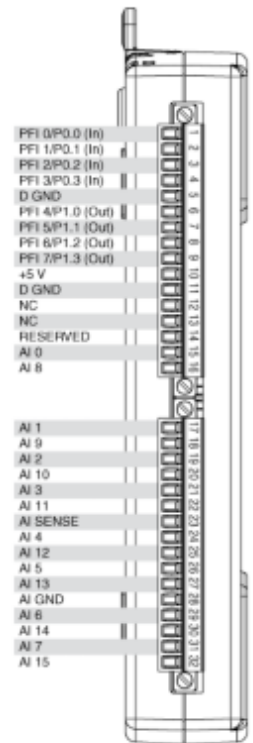
⁵ In the USB-6215/6216/6218 *Maximum Working Voltage* figure, $|V_a - V_d|$, $|V_b - V_d|$, and $|V_c - V_d|$.

⁶ Measurement Category II is for measurements performed on circuits not directly connected to the electrical distribution system referred to as *MAINS* voltage. *MAINS* is a hazardous live electrical supply system that powers equipment. This category is for measurements of voltages from specially protected secondary circuits. Such voltage measurements include signal levels, special equipment, limited-energy parts of equipment, circuits powered by regulated low-voltage sources, and electronics.

⁷ In the USB-6215/6216/6218 *Maximum Working Voltage* figure, $|V_a - V_d|$, $|V_b - V_d|$, and $|V_c - V_d|$.

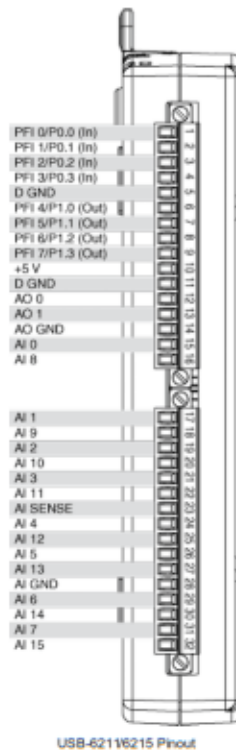
[Back to Top](#)

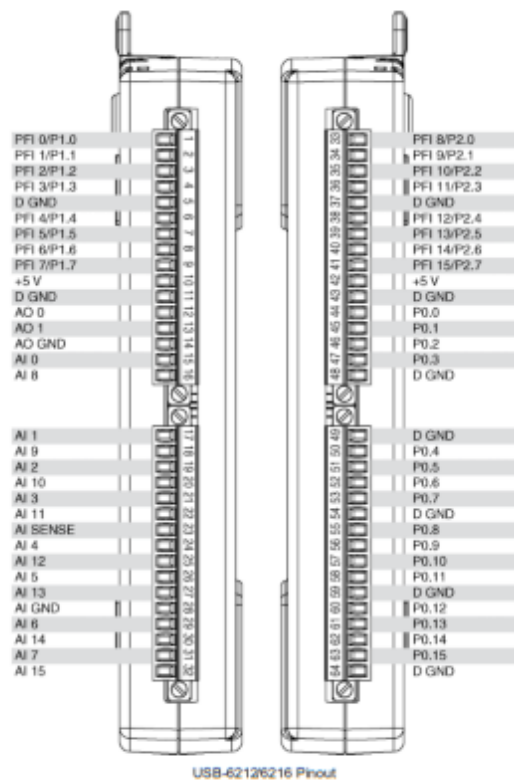
Pinouts/Front Panel Connections

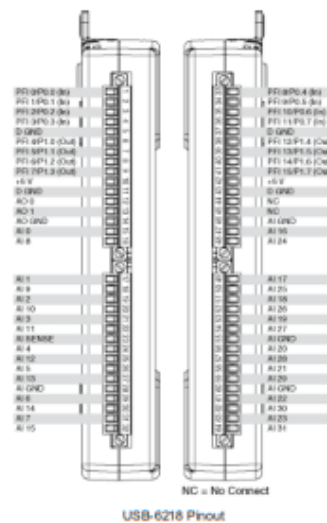


NC = No Connect

USB-6210 Pinout







[Back to Top](#)

©2009 National Instruments. All rights reserved. CVI, DAQmx, LabVIEW, Measurement Studio, National Instruments, National Instruments Alliance Partner, NI, ni.com, NI CompactDAQ, SCXI, and SignalExpress are trademarks of National Instruments. The mark LabWindows is used under a license from Microsoft Corporation. Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation in the United States and other countries. Unix® is the registered trademark of Linux Torvalds in the U.S. and other countries. Other product and company names listed are trademarks or trade names of their respective companies. A National Instruments Alliance Partner is a business entity independent from NI and has no agency, partnership, or joint-venture relationship with NI.

[My Profile](#) | [RSS](#) | [Privacy](#) | [Legal](#) | [Contact NI](#) © 2014 National Instruments Corporation. All rights reserved.

ANEXO F. CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR LVDT

cm	voltios
4,8	0,1
5	0,2
5,5	0,57
6	0,89
6,5	1,22
7	1,54
7,5	1,88
8	2,18
8,5	2,52
9	2,84
9,5	3,16
10	3,49
10,5	3,8
11	4,15
11,5	4,49
12	4,79
12,5	5,1
13	5,42
13,5	5,75
14	6,08
14,5	6,4
15	6,72
15,5	7,06
16	7,38
16,5	7,72

ANEXO G. TABLA DE VERDAD PARA PRIOIZAR LAS RAMPAS

PRIORIDAD DE LAS RAMPAS				
R1	R2	R3	R4	PRIORIDAD
1	1	1	1	R1
1	1	1	0	R1
1	1	0	1	R1
1	1	0	0	R1
1	0	1	1	R1
1	0	1	0	R1
1	0	0	1	R1
1	0	0	0	R1
0	1	1	1	R2
0	1	1	0	R2
0	1	0	1	R2
0	1	0	0	R2
0	0	1	1	R3
0	0	1	0	R3
0	0	0	1	R4
0	0	0	0	0

ANEXO H. SEGUIMIENTO ONDA SENO

Comando	Salida
5,326696	17,016437
1,507038	17,262139
2,930888	18,259332
4,163028	18,787475
5,122863	19,188552
5,74761	19,436299
5,996404	19,613281
5,852972	19,656014
5,326696	19,568519
4,451998	19,353276
3,286095	19,011055
1,905247	18,511238
0,399776	17,836053
-1,131844	17,145322
-2,58943	16,099256
-3,877641	14,791275
-4,912214	13,463555
-5,625478	12,11342
-5,970777	10,879663
-5,925527	9,683687
-5,492686	8,741147
-4,700567	8,033074
-3,600983	7,602443
-2,265857	7,488083
-0,782521	7,705507
0,751999	8,202131
2,237332	9,175367
3,57632	10,305998
4,68138	11,686226
5,480229	13,094975
5,920615	14,531199
5,973733	15,819543
5,636106	16,901974
4,929821	17,82394
3,901074	18,302061

2,617157	18,124315
1,162052	17,905115
-0,369064	17,185881
-1,87604	16,378309
-3,260303	15,188542
-4,431308	13,884291
-5,312461	12,568889
-5,846124	11,259134
-5,997391	9,965277
-5,756366	8,887785
-5,138816	8,024434
-4,185135	7,414668
-2,957703	7,17274
-1,536807	7,247619
-0,015387	7,684916
1,507038	8,337237
2,930888	9,380346
4,163028	10,658515
5,122863	12,027961
5,74761	13,514853
5,996404	14,897723
5,852972	16,096729
5,326696	17,115212
4,451998	17,916368
3,286095	18,1595
1,905247	17,9175
0,399776	17,376632
-1,131844	16,783843
-2,58943	15,59603
-3,877641	14,32494
-4,912214	13,118343
-5,625478	11,716916
-5,970777	10,401192
-5,925527	9,301473
-5,492686	8,229909
-4,700567	7,639946

-3,600983	7,140173
-2,265857	7,032325
-0,782521	7,269713
0,751999	7,856678
2,237332	8,659512
3,57632	9,878002
4,68138	11,261069
5,480229	12,704537
5,920615	14,117271
5,973733	15,399595
5,636106	16,517936
4,929821	17,425979
3,901074	17,939456
2,617157	17,944397
1,162052	17,508644
-0,369064	16,947296
-1,87604	16,036171
-3,260303	15,043785
-4,431308	13,665822
-5,312461	12,304251
-5,846124	10,991273
-5,997391	9,89801
-5,756366	8,633598
-5,138816	7,774994
-4,185135	7,205423
-2,957703	6,953326
-1,536807	7,012386
-0,015387	7,414735
1,507038	8,09006
2,930888	9,173606
4,163028	10,45669
5,122863	11,815963
5,74761	13,279281
5,996404	14,652323
5,852972	15,902796
5,326696	16,939675
4,451998	17,797232
3,286095	17,931158

1,905247	17,738311
0,399776	17,196595
-1,131844	16,503778
-2,58943	15,530296
-3,877641	14,221195
-4,912214	12,965987
-5,625478	11,693525
-5,970777	10,322623
-5,925527	9,143007
-5,492686	8,161437
-4,700567	7,416301
-3,600983	7,016837
-2,265857	6,911975
-0,782521	7,160321
0,751999	7,68738
2,237332	8,600506
3,57632	9,739
4,68138	11,155705
5,480229	12,563528
5,920615	14,04432
5,973733	15,346969
5,636106	16,521296
4,929821	17,403287
3,901074	17,966224
2,617157	17,964108
1,162052	17,543663
-0,369064	16,966887
-1,87604	16,143815
-3,260303	14,931113
-4,431308	13,682109
-5,312461	12,362382
-5,846124	11,037639
-5,997391	9,754288
-5,756366	8,72935
-5,138816	7,811178
-4,185135	7,226942
-2,957703	7,01087
-1,536807	7,095289

-0,015387	7,50622
1,507038	8,213203
2,930888	9,278361
4,163028	10,573181
5,122863	11,907221
5,74761	13,449322
5,996404	14,687592
5,852972	16,024334
5,326696	17,037671
4,451998	17,739742
3,286095	18,108491
1,905247	17,89527
0,399776	17,345946
-1,131844	16,643823
-2,58943	15,589811
-3,877641	14,377009
-4,912214	13,092907
-5,625478	11,774192
-5,970777	10,46607
-5,492686	9,270876
-5,492686	8,304471
-4,700567	7,46549
-3,600983	7,159181
-2,265857	7,046891
-0,782521	7,31688
0,751999	7,838423
2,237332	8,744178
3,57632	9,895973
4,68138	11,268838
5,480229	12,691352
5,920615	14,123745
5,973733	15,433347
5,636106	16,531436
4,929821	17,473051
3,901074	17,990433
2,617157	18,013343
1,162052	17,659501
-0,369064	17,06928

-1,87604	16,251529
-3,260303	15,026667
-4,431308	13,718332
-5,312461	12,459007
-5,846124	11,098731
-5,997391	9,865867
-5,756366	8,737206
-5,138816	7,945135
-4,185135	7,28823
-2,957703	7,015816
-1,536807	7,139508
-0,015387	7,541244
1,507038	8,279709
2,930888	9,329479
4,163028	10,498546
5,122863	11,991408
5,74761	13,426767
5,996404	14,818671
5,852972	16,028754
5,326696	17,074943
4,451998	17,823762
3,286095	18,018571
1,905247	17,798807
0,399776	17,285443
-1,131844	16,564541
-2,58943	15,636373
-3,877641	14,329123
-4,912214	13,000539
-5,625478	11,684058
-5,970777	10,408269
-5,925527	9,130044
-5,492686	8,24548
-4,700567	7,555215
-3,600983	7,097819
-2,265857	6,896268
-0,782521	7,150255
0,751999	7,790967
2,237332	8,634248

3,57632	9,764715
4,68138	11,150654
5,480229	12,595385
5,920615	14,020743
5,973733	15,350154
5,636106	16,468873
4,929821	17,365362
3,901074	17,915787
2,617157	17,872923
1,162052	17,58536
-0,369064	17,030608
-1,87604	16,074558
-3,260303	15,023854
-4,431308	13,622794
-5,312461	12,321263
-5,846124	11,059945
-5,997391	9,701276
-5,756366	8,659526
-5,138816	7,73422
-4,185135	7,248053
-2,957703	6,924351
-1,536807	6,971823
-0,015387	7,401093
1,507038	8,06287
2,930888	9,133763
4,163028	10,402634
5,122863	11,81036

ANEXO I. RESPUESTA A DIVERSOS ESCALONES

STEP MAGNITUD 8

DATO	POSICIÓN
1	2,042277
2	2,002189
3	7,514911
4	8,215493
5	8,441177
6	6,859103
7	6,971804
8	7,158047
9	7,700215
10	7,87787
11	7,974568
12	7,425
13	7,421661
14	7,37532
15	8,145894
16	7,969695
17	8,137453
18	7,695285
19	7,790237
20	7,936916
21	7,852281
22	7,771113
23	7,872964
24	7,583561
25	7,968954
26	7,564194
27	7,81065
28	8,046485
29	8,0555
30	7,722887
31	7,832014
32	7,85236
33	8,073383

34	7,753984
35	7,62887
36	8,049655
37	7,701484
38	8,092921
39	7,964043
40	7,765759
41	8,082011
42	7,818055
43	7,703471
44	8,078432
45	7,734865

STEP MAGNITUD 12

DATO	POSICIÓN
1	2,234972
2	2,025646
3	7,50513
4	7,837436
5	8,546341
6	9,648963
7	10,04335
8	10,78556
9	11,58219
10	11,65379
11	11,24457
12	11,27316
13	11,10379
14	11,68837
15	11,74961
16	12,25545
17	11,51228
18	11,92115
19	11,42582
20	12,21512
21	11,8161
22	12,02849
23	12,01492
24	11,69686
25	11,90856
26	12,17321
27	11,94921
28	11,98501
29	11,69017
30	11,98763
31	12,05849
32	11,97622
33	11,93653
34	12,13141
35	11,80245

36	12,06866
37	11,97621
38	11,78178
39	12,00589
40	12,05253
41	11,71183

STEP MAGNITUD 15

DATO	POSICIÓN
1	2,356726
2	2,049379
3	7,215869
4	8,026206
5	8,500334
6	9,605503
7	10,45839
8	10,73104
9	11,79811
10	12,63287
11	13,05371
12	13,93263
13	14,55192
14	14,52041
15	14,51624
16	13,91829
17	14,3922
18	14,37115
19	15,07088
20	14,88221
21	14,8344
22	14,8059
23	14,51824
24	14,61572
25	14,62323
26	15,12803
27	14,86599
28	15,25578
29	14,71351
30	15,09565
31	14,92724
32	14,67975
33	15,03421
34	14,93606

35	14,97196
36	15,0716
37	14,81602
38	15,10441
39	15,10903
40	14,70985
41	15,15012
42	14,83987
43	15,17351
44	14,78396
45	15,15256
46	14,75336
47	15,0435
48	14,79217
49	15,06596
50	14,93016
51	14,85564
52	15,04956
53	14,79132
54	15,08028
55	14,82057
56	14,93966
57	15,0815
58	14,8138
59	15,15082
60	14,92087
61	14,84714
62	15,16731
63	14,8205
64	14,95163

ANEXO J. RESPUESTA DEL SISTEMA CON PERTURBACIÓN

STEP MAGNITUD 15

FEED-FORWARD	
SIN	CON
14,570039	14,431955
14,337985	14,140476
14,610164	13,972578
13,843654	14,537764
14,168719	14,02743
14,220224	13,847492
14,457594	14,032451
14,501007	13,822076
14,572672	13,663016
14,691346	14,088415
14,580033	13,822587
14,24959	14,104347
14,358463	14,526731
14,544278	13,723108
14,782053	14,257869
14,768063	13,871979
14,387045	14,428172
14,582344	14,468075
14,583753	13,912075
14,513969	13,985437
14,137602	14,286414
14,88994	13,99612
14,995787	14,107562
14,247939	13,725816

14,541401	14,204658
14,452895	13,968036
14,69439	14,048302
14,338825	14,149301
14,026122	14,319566
13,865979	14,151043
13,874341	14,128811
14,709445	14,044948
14,507365	14,036933
14,0259	14,39221
14,031516	13,815781
14,714882	14,113429
14,591986	14,100472
14,769682	14,238848
14,677706	13,89378
14,985225	13,693892
14,945925	13,940725
14,378991	14,101764
14,949652	14,142749
14,997549	14,346549
14,829623	13,835671
14,624608	14,326137
15,136532	14,081193
14,971557	14,063986
14,968878	14,230842
14,847131	13,908512
14,834177	14,023686
14,660236	14,543809

14,554207	14,207792
13,905671	13,891312
14,485678	14,17911
13,98733	14,0043
14,518069	14,146744
14,64838	14,153291
14,511434	14,052945
13,815765	14,309434
13,851575	14,502013
14,181666	14,375518
14,635165	14,214168
13,865141	14,082835
14,428808	14,181495
14,503331	14,124198
14,144646	14,163179
13,874036	14,295814
14,021851	14,286882
14,14984	14,33691
13,980311	14,084667
13,956842	14,304176
14,449119	13,912883
14,187336	14,138394
14,578685	14,106824
13,928688	14,348572
13,996099	14,618341

STEP MAGNITUD 13

FEEDFORWARD	
SIN	CON
12,255333	12,310589

11,588068	12,621797
12,134884	12,405156
11,814034	12,764827
12,171936	12,561937
12,451111	12,579927
12,178327	12,518133
11,93788	12,518133
12,368225	12,615003
12,002377	13,164194
12,30341	12,74245
11,978558	13,135596
12,223646	12,578424
12,39597	12,922648
12,265292	12,907061
12,444643	12,733789
12,129551	12,594611
12,186495	12,498464
12,487963	12,960988
12,317927	12,698358
12,128379	13,045341
12,62839	12,704235
12,476961	12,844612
12,020148	12,694122
12,566906	13,099435
12,023343	12,648827
12,49051	13,035897
12,49051	12,762304
12,229841	12,921914
12,625892	12,764561
12,103108	13,186123

12,327298	12,57975
12,13732	13,063978
12,080319	12,978278
12,369692	12,957971
12,380067	13,002257
12,721908	12,694097
12,753186	13,085911
12,217412	13,043162
12,752249	12,986782
12,385034	13,034313
12,257701	12,929109
12,168253	12,837673
12,229186	12,744666
12,692968	12,589525
12,531956	12,820434
12,460661	13,287834
12,537826	12,653761
12,424933	13,03089
12,045213	12,897068
12,361308	13,097783
12,64951	12,804356
12,583154	12,794136
12,283246	12,95092
12,808521	12,520156
12,517401	13,145527
12,205054	13,001545
12,177922	13,062521
12,858509	13,005923
12,209943	13,20624
12,437188	12,891321

12,441351	12,595275
12,354149	12,728525
12,581011	12,739159
12,73597	13,161965
12,671767	12,834656
12,472621	12,454157
12,183882	13,076084
12,239352	12,769189
12,147378	12,826492
12,716577	12,821229
12,90536	12,626118
12,99601	12,853716
12,42423	12,41454
12,405599	13,209377
12,682606	12,605991
12,892143	12,577503
12,5256	12,574743
12,238378	13,052857
12,501171	12,772737
12,68061	13,269263
12,801209	12,74586
12,681236	12,70935
12,5078	12,867728
12,696982	13,040898
12,409225	12,840305
12,192859	12,595328
12,319225	12,788341
12,960747	12,597026
12,134383	12,970724
13,050674	13,101239

12,593143	12,618808
12,388477	12,899041
12,304833	12,832922
12,713741	12,935594
12,628622	12,822749
12,545205	12,809069
12,830874	12,772195
12,700247	12,628332
12,525752	12,930918
12,433162	12,609985
12,264566	12,528198
12,879794	12,875509
12,182726	12,432806
12,270258	12,527131
12,496911	12,90368
12,831257	13,148283
12,810878	13,004242
12,705482	12,552645
12,148439	13,005975
12,354818	12,85608
12,394185	12,713964
12,527428	12,908577
12,697044	12,931887
12,200386	12,561597
12,383647	12,720249
12,663334	12,760915
12,250869	12,523236
12,565217	12,650771
12,565712	12,883276
12,766508	12,672281

12,70415	13,02427
12,138765	12,810976
12,752002	13,135646
12,207255	12,582578
12,759532	12,985845
12,751014	12,43003
12,963793	13,205463
12,516422	12,513736
12,838279	12,951649
12,630901	12,652
12,666972	13,123814
12,355441	12,529312
12,155865	13,02611
12,090055	12,828386
12,707633	12,584021
12,529911	12,80494
12,36406	13,246883
12,778669	12,688471
12,520379	12,946067
12,601074	12,992046
12,344496	12,885592
12,851639	12,736389
12,720874	12,541971
12,543971	12,866903
12,458871	12,673241
12,470963	12,831831
12,795481	12,735423
12,256807	12,417002
12,44024	12,880413
12,511263	12,987327

12,493913	12,453989
12,545829	12,93882
12,678425	12,635491
12,170848	12,423719
12,109432	12,59104
12,897624	13,075041
12,625628	12,761231
12,567078	13,087458
12,433074	12,318225
12,706215	12,682287
12,261131	12,690947
12,759386	12,484361
12,053151	13,120037
12,451929	12,696599
12,650093	12,900407
12,737382	12,770281
12,42456	13,105799
12,418486	12,77344
12,364431	12,758974
12,795765	13,028531
12,593059	12,368546
12,622514	12,93236
12,40259	12,871953
12,306924	12,878631
12,705274	12,406952
11,955856	12,91808
12,308581	12,866817
12,859768	12,746388
12,760629	12,634784
12,289515	12,389861

12,732678	13,145609
12,582011	12,725803
12,819918	12,851913
12,801269	12,655482

ANEXO K. DATASHEET VALVULA TIPO 4WRPEH 6 C3 B04L -20/G24K0 /A1M

Electric Drives
and Controls

Hydraulics

Linear Motion and
Assembly Technologies

Pneumatics

Service

Rexroth
Bosch Group

4/4-way servo solenoid directional control valves, directly operated, with electrical position feedback and on-board electronics (OBE)

RE 29035/10.10
Replaces: 05.10

1/12

Type 4WRPEH6

Size 6
Unit series 2X
Maximum working pressure P, A, B 315 bar, T 250 bar
Nominal flow 2...40 l/min (Δp 70 bar)



Type 4WRPEH6

List of contents

Contents	Page
Features	1
Ordering data	2
Function, sectional diagram	3
Symbols	3
Testing and service equipment	3
Technical Data	4 and 5
Electric connection	6
Technical notes on the cable	6
On-board electronics	7 and 8
Characteristic curves	9 and 10
Unit dimensions	11

Features

- Directly operated servo solenoid directional control valve, with control piston and sleeve in servo quality
- Actuated on one side, 4/4 fail-safe position when switched off
- Electrical position feedback and on-board electronics (OBE), calibrated at the factory
- Electrical connection 6P+PE
- Signal input differential amplifier with interface A1 ± 10 V or interface F1 4...20 mA ($R_{sh} = 200 \Omega$)
- Used in electrohydraulic controllers in production and testing systems

For information regarding the available spare parts see:
www.boschrexroth.com/spc

	4WRP	E	H	6	B	-2X/G24/K0/M*
With on-board electronics = E						
Control piston/sleeve = H						
Size = 6						
Control spool symbols						
4/4-way version						
= C3, C5 = C4, C1 = C						
With C5 and C1: ¹⁾						
P → A; Q _v						
B → T; Q _v /2						
P → B; Q _v /2						
A → T; Q _v						
Assembly side of inductive position transducer						
(Standard) = B						
						Further information in plain text
						Seal material NBR seals, suitable to mineral oils (HL, HLP) to DIN 51524
						M =
						Interface for trigger electronics A1 = Setpoint input ±10 V F1 = Setpoint input 4...20 mA
						K0 = without plug-in connector, with plug to DIN 43563-AM6 Order plug-in connector separately
						Voltage supply of trigger electronics G24 = +24 V DC
						2X = Unit series 20 to 29 (installation and connection dimensions unchanged)
						L = Linear P = Non-linear curve²⁾
						Nominal flow rate at 70 bar valve pressure difference (35 bar per metering notch) 02 = 2 l/min^{d)} 04 = 4 l/min 12 = 12 l/min^{b)} 15 = 15 l/min^{c)} 24 = 24 l/min^{e)} 25 = 25 l/min^{f)} 40 = 40 l/min^{g)}

Function, sectional diagram

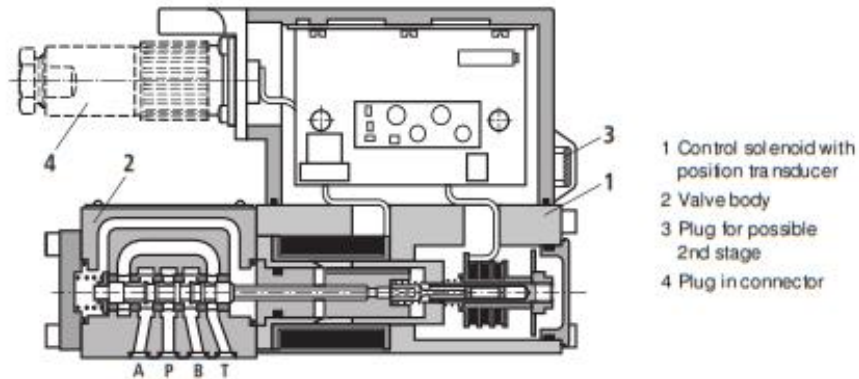
General

In the field of integrated electronics, the specified command value is compared with the actual position value. In case of deviations from the standard, the lifting solenoid is activated. Due to the changed magnetic force, the lifting solenoid adjusts the control valve against the spring. Lifting/control cross-section are adjusted proportionally to the command value. In case of a command value provision of 0 V, the electronics adjusts the control valve against the spring to center position. In deactivated condition, the spring is unloaded to a maximum and the valve is in fail-safe position.

Switch-off behavior

If the electronics is switched off, the valve immediately moves to the secured basic position (fail safe).

In this process, the P-B/A-T position is passed which might cause movements at the controlled component. This must be taken into account when designing the plant.



Symbols

	L: Linear	P: kink
	C3, C5	
	C4, C1	
	C	

Testing and service equipment

- Service case type VT-VETSY-1 with test device, see data sheet 29685
- Measuring adapter 6P+PE type VT-PA-2, see data sheet 30068

Technical data

General

Construction	Spool-type valve, directly operated, with steel sleeve	
Actuation	Control solenoid with position control, OBE	
Type of mounting	Subplate, mounting hole configuration (ISO 4401-03-02-0-05)	
Installation position	Optional	
Ambient temperature range	°C	-20...+50
Weight	kg	2.7
Vibration resistance, test condition	Max. 25 g, shaken in 3 dimensions (24 h)	

Hydraulic (measured with HLP 46, $\vartheta_{oil} = 40^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$)

Pressure fluid			Hydraulic oil to DIN 51524...535, other fluids after prior consultation					
Viscosity range	recommended	mm ² /s	20...100					
	max. permitted	mm ² /s	10...800					
Pressure fluid temperature range		°C	-20...+70					
Maximum permissible degree of contamination of pressure fluid			Class 18/16/13 ¹⁾					
Purity class to ISO 4406 (c)								
Direction of flow			See symbol					
Nominal flow at Δp = 35 bar per notch ²⁾		l/min	2	4	12	15	24	40
Max. working pressure	Ports P, A, B	bar	315					
	Port T	bar	250					
Operating limits at Δp								
Pressure drop at valve	C, C3, C5	bar	315	315	315	315	315	160
Q _{max} > Q _N valves	C4, C1	bar	315	315	315	280	250	100
Max. recommended nominal flow at 100 bar	Linear characteristic curve L	cm ³ /min	<150	<180	<300	–	<500	<900
	Inflected characteristic curve P	cm ³ /min	–	–	–	<180	<300	<450

Fail-safe position

C							
Flow at $\Delta p = 35$ bar per notch	l/min	2	4	10	13	18	20
C3, C5	cm ³ /min	50 P–A					
Zero flow at 100 bar	cm ³ /min	70 P–B					
C3, C5	l/min	10...20 A–T					
Flow at $\Delta p = 35$ bar per notch	l/min	7...20 B–T					
C4, C1	cm ³ /min	50 P–A					
Zero flow at 100 bar	cm ³ /min	70 P–B					
	cm ³ /min	70 A–T					
	cm ³ /min	50 B–T					
Fail-safe position reached	0 bar	7 ms					
	100 bar	10 ms					

Static/Dynamic

Hysteresis	%	±0.2
Manufacturing tolerance for Q_{max}	%	<10
Response time for signal change 0...100 %	ms	±10
Thermal drift	Zero point displacement <1 % at $\Delta T = 40^\circ\text{C}$	
Zero adjustment	Factory-set ±1 %	

¹⁾ The purity classes stated for the components must be complied with in hydraulic systems. Effective filtration prevents problems and also extends the service life of components. For a selection of filters, see www.boschrexroth.com/filter.

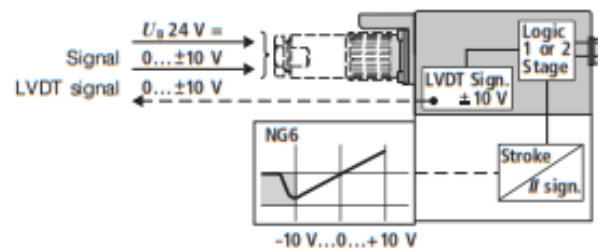
²⁾ Flow rate at a different Δp $Q_x = Q_{\text{nom}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_x}{35}}$

Technical data

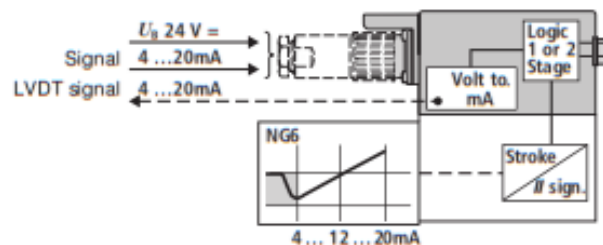
Electrical, trigger electronics integrated in the valve

Cyclic duration factor	%	100
Degree of protection		IP 65 to EN 60529 and IEC 14434/5
Connection		Plug-in connector 6P+ PE, DIN 43563
Power supply		24 V DC _{nom}
Terminal A:		Min. 21 V DC/max. 40 V DC
Terminal B: 0 V		Ripple max. 2 V DC
Max. power consumption		40 VA
External fuse		2.5 A _F
Input, version A1		Differential amplifier, $R_i = 100 \text{ k}\Omega$
Terminal D: U_E		0...±10 V
Terminal E:		0 V
Input, version F1		Burden, $R_{sh} = 200 \Omega$
Terminal D: I_{D-E}		4...(12)...20 mA
Terminal E: I_{D-E}		Current loop I_{D-E} feedback
Max. differential input voltage at 0 V		$\left. \begin{array}{l} D \rightarrow B \\ E \rightarrow B \end{array} \right\} \text{max. } 18 \text{ V=}$
Test signal, version A1		LVDT
Terminal F: U_{Test}		0...±10 V
Terminal C:		Reference 0 V
Test signal, version F1		LVDT signal 4...20 mA at external load 200...500 Ω max.
Terminal F: I_{F-C}		4...20 mA output
Terminal C: I_{F-C}		Current loop I_{F-C} feedback
Protective conductor and screen		See pin assignment (CE-compliant installation)
Calibration		Calibrated at the factory, see characteristic curve of the valve
Electromagnetic compatibility tested according to		EN 61000-6-2: 2005-08 EN 61000-6-3: 2007-01

Version A1: Standard

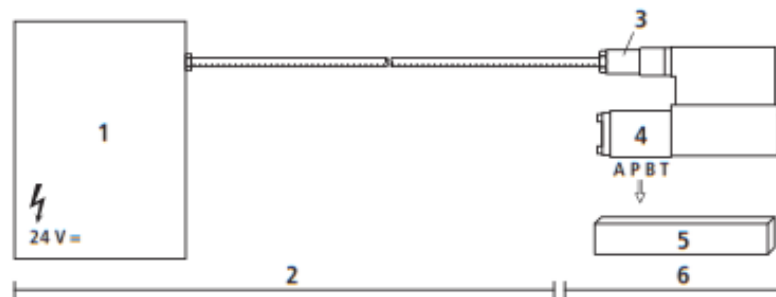


Version F1: mA signal



Electric connection

For electrical data, see page 5



- 1 Control
- 2 Provided by customer
- 3 Plug-in connector
- 4 Valve
- 5 Connecting surface
- 6 Provided by Rexroth

Technical notes on the cable

- Version:**
- Multi-wire cable
 - Extra-finely stranded wire to VDE 0295, Class 6
 - Protective conductor, green/yellow
 - Cu braided screen
- Types:**
- e.g. Ölflex-FD 855 CP (from Lappkabel company)
- No. of wires:**
- Determined by type of valve, plug types and signal assignment
- Cable Ø:**
- 0.75 mm² to 20 m length
 - 1.0 mm² to 40 m length
- Outside Ø:**
- 9.4...11.8 mm – Pg11
 - 12.7...13.5 mm – Pg16

Note

Voltage supply 24 V DC_{nom}, if voltage drops below 18 V DC, rapid shutdown resembling "Enable OFF" takes place internally.

In addition, with F1 version:

$I_{D-E} \geq 3 \text{ mA}$ – valve is active

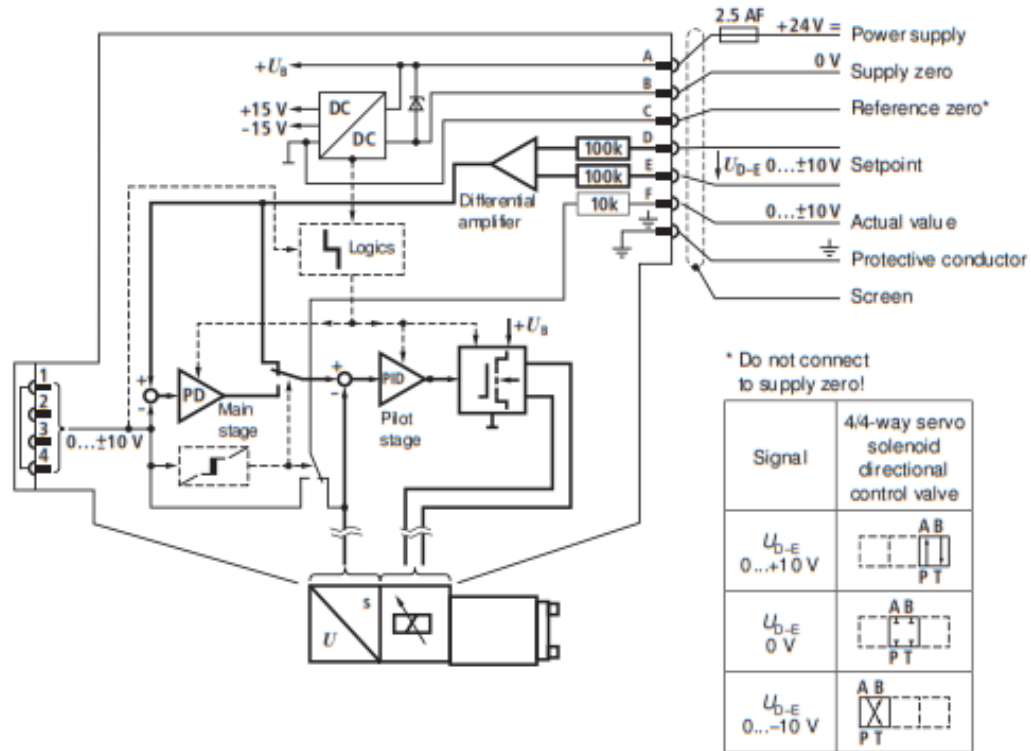
$I_{D-E} \leq 2 \text{ mA}$ – valve is deactivated.

Electrical signals emitted via the trigger electronics (e.g. actual values) must not be used to shut down safety-relevant machine functions! (See European Standard, "Technical Safety Requirements for Fluid-Powered Systems and Components – Hydraulics", EN 982.)

On-board electronics

Block diagram/pin assignment

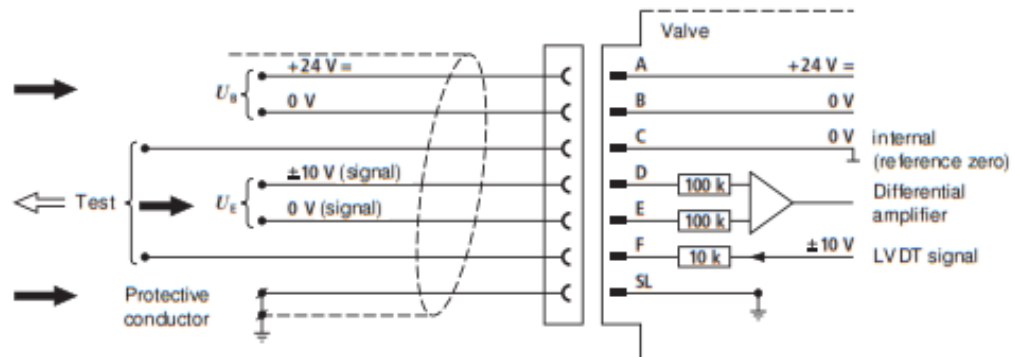
Version A1: $U_{D-E} \pm 10 \text{ V}$



Pin assignment 6P+PE

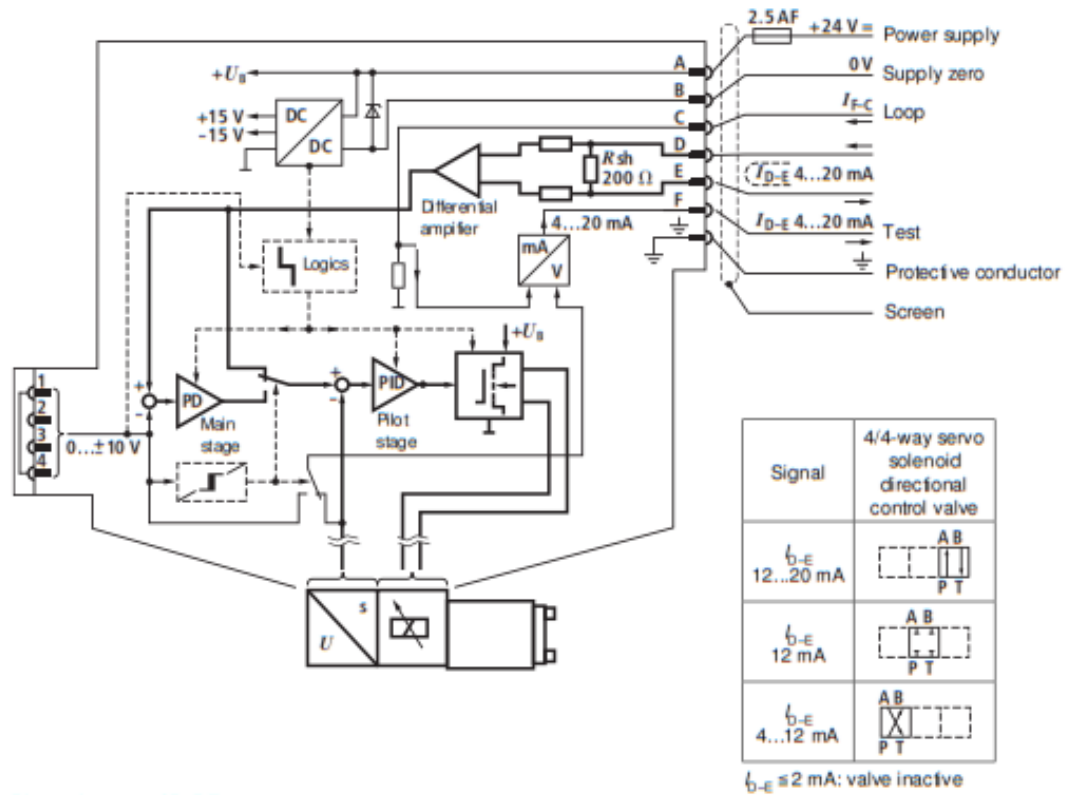
Version A1: $U_{D-E} \pm 10 \text{ V}$

($R_i = 100 \text{ k}\Omega$)

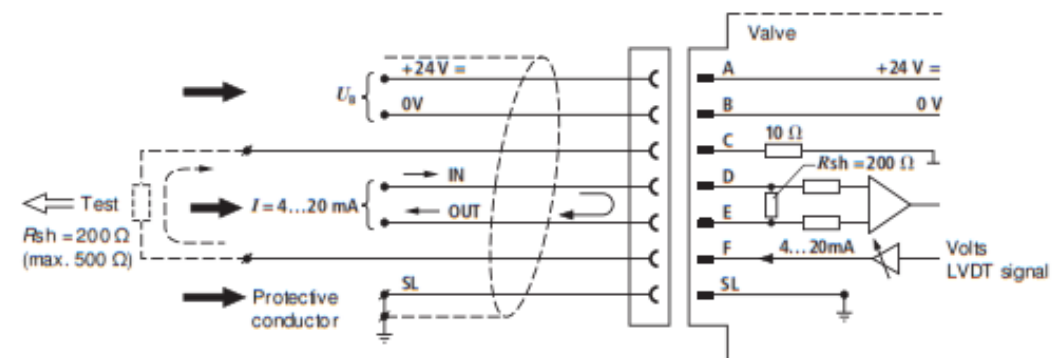


On-board electronics

Block diagram/pin assignment

Version F1: I_{D-E} 4...12...20 mA

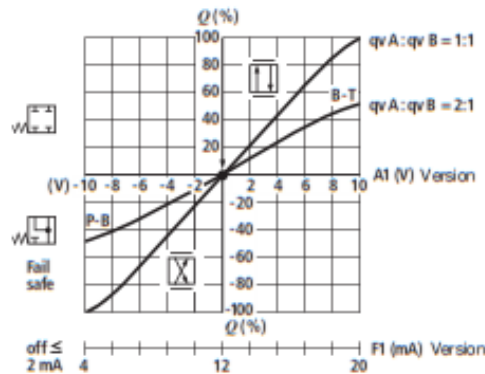
Pin assignment 6P+PE

Version F1: I_{D-E} 4...12...20 mA
($R_{sh} = 200 \Omega$)

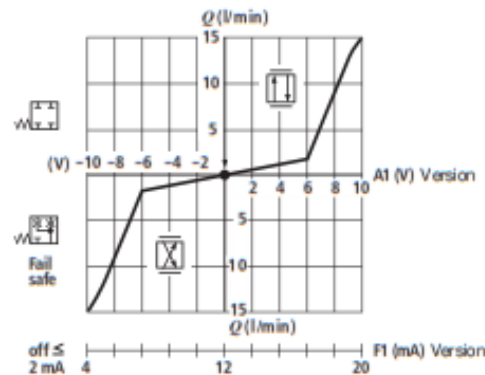
Characteristic curves (measured with HLP 46, $\vartheta_{oil} = 40\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$)

Flow rate – signal function $Q = f(U_{D-E})$
 $Q = f(I_{D-E})$

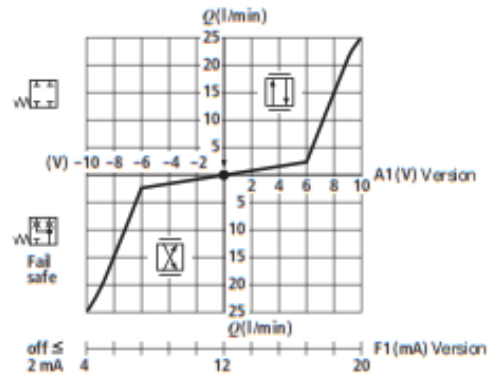
Flow characteristic
 L: Linear



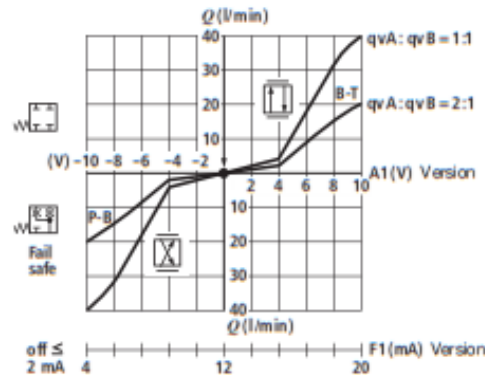
Flow characteristic
 P: (kink 60%) 15 l/min



Flow characteristic
 P: (kink 60%) 25 l/min

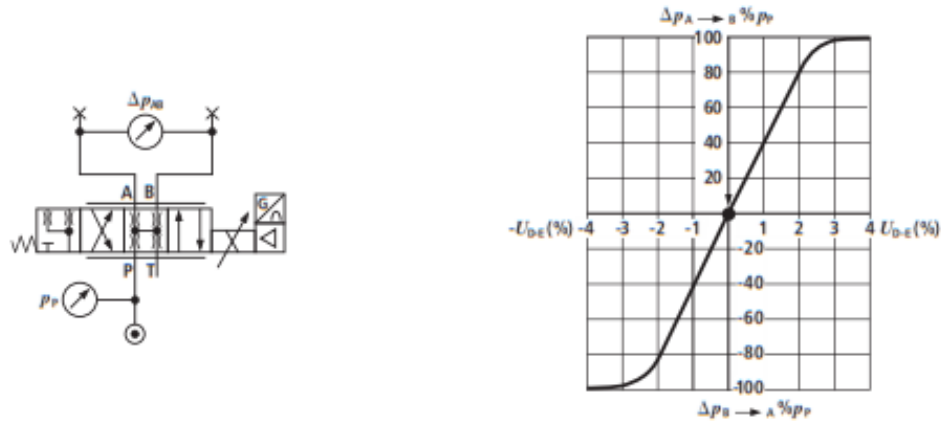


Flow characteristic
 P: (kink 40%) 40 l/min

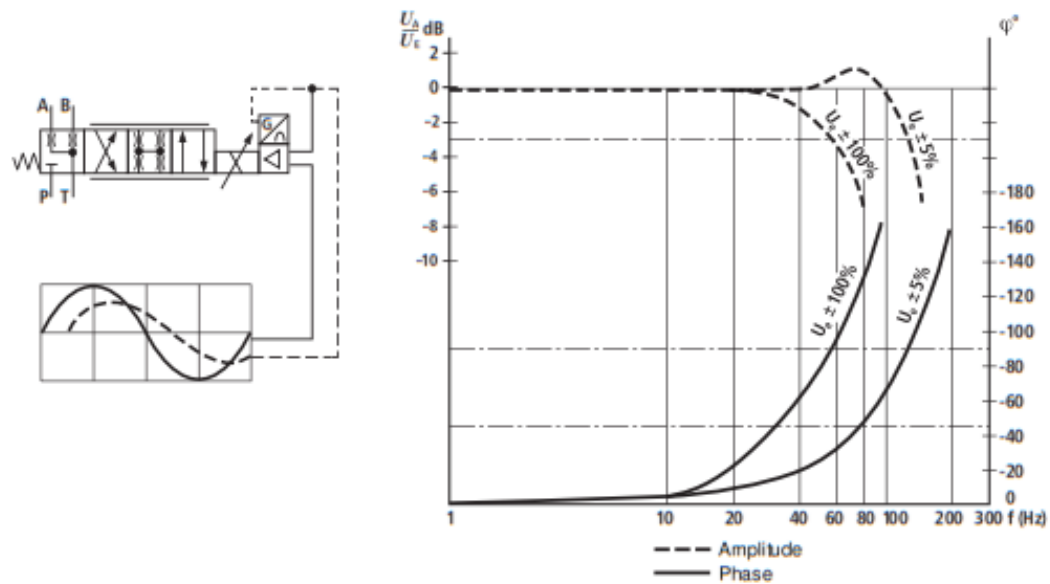


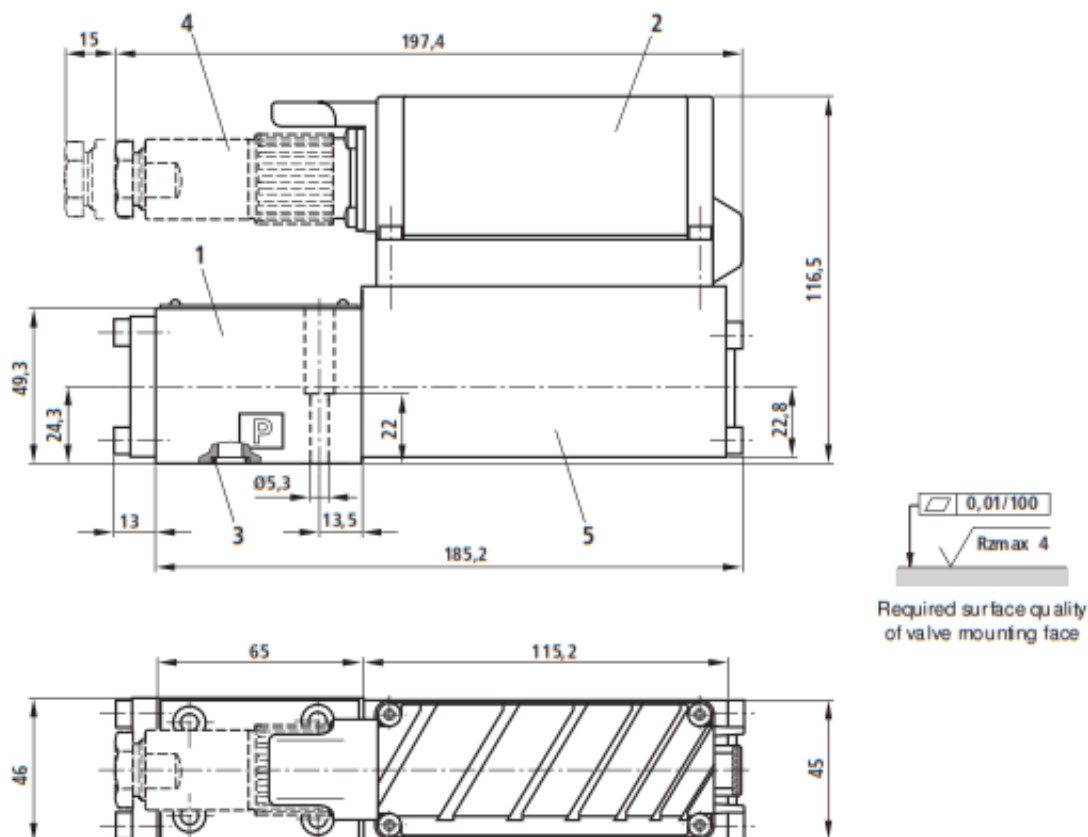
Characteristic curves (measured with HLP 46, $\vartheta_{oil} = 40^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$)

Pressure gain

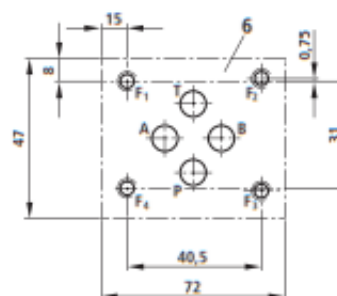


Bode diagram



Unit dimensions (dimensions in mm)

- 1 Valve housing
 - 2 On-board electronics
 - 3 O-rings $\varnothing 9.25 \times 1.78$ (ports P, A, B, T)
 - 4 Plug-in connector not included in scope of delivery, see data sheet 08008 (order separately)
 - 5 Control solenoid with position transducer
 - 6 Machined valve contact surface, mounting hole configuration to ISO 4401-03-02-0-05
- Deviates from standard:
 Ports P, A, B, T $\varnothing 8$ mm
 Minimum thread depth: Ferrous metal $1.5 \times \varnothing$
 Non-ferrous $2 \times \varnothing$
- Subplates**, see data sheet 45053 (order separately)

**Valve fastening bolts** (order separately)

The following valve fastening bolts are recommended:

4 cheese-head bolts ISO 4762-M5x30-10.9-N67F82170
 (galvanized in accordance with Bosch standard N67F82170)
 Tightening torque $M_A = 6 \pm 2$ Nm
 Material no. **2910151166**

or

4 cheese-head bolts ISO 4762-M5x30-10.9
 (coefficient of friction $\mu_{total} = 0.12-0.17$)
 Tightening torque $M_A = 8.9$ Nm $\pm 10\%$

Notes

Bosch Rexroth AG
Hydraulics
Zum Eisengießer 1
97816 Lohr am Main, Germany
Telefon +49 (0) 93 52 / 18-0
Telefax +49 (0) 93 52 / 18-23 58
documentation@boschrexroth.de
www.boschrexroth.de

© This document, as well as the data, specifications and other information set forth in it, are the exclusive property of Bosch Rexroth AG. It may not be reproduced or given to third parties without its consent.
The data specified above only serve to describe the product. No statements concerning a certain condition or suitability for a certain application can be derived from our information. The information given does not release the user from the obligation of own judgment and verification. It must be remembered that our products are subject to a natural process of wear and aging.

ANEXO L. DATASHEET VALVULA TIPO 4WREE 6 E08-24/G24K31/ A1V

Electric Drives
and Controls

Hydraulics

Linear Motion and
Assembly Technologies

Pneumatics

Service

Rexroth
Bosch Group

4/2 and 4/3 proportional directional
valves, direct operated,
with electrical position feedback,
without/with integrated electronics (OBE)

RE 29061/11.12
Replaces: 05.12

1/22

Type 4WRE and 4WREE

Size 6 and 10
Component series 2X
Maximum operating pressure 315 bar
Maximum flow: 80 l/min (size 6)
180 l/min (size 10)

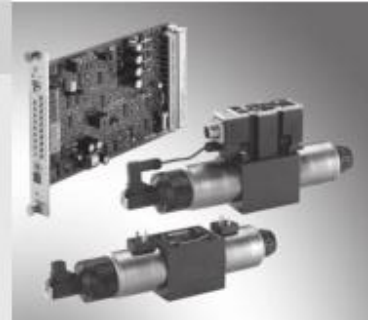


Table of contents

Contents	Page
Features	1
Ordering code	2
Symbols	3
Function, section	4, 5
Technical data	6, 7
Electrical connection, mating connectors	8, 9
Block diagram of the integrated electronics (OBE) for type 4WREE	10
Characteristic curves	11 to 17
Unit dimensions	18 to 22

Features

- Direct operated proportional directional valve with electrical position feedback and integrated electronics (OBE) with type 4WREE
- Control of flow direction and size
- Operation by means of proportional solenoids with central thread and detachable coil
- For subplate mounting: Porting pattern according to ISO 4401
- Spring-centered control spool
- Control electronics
 - Type 4WREE: integrated electronics (OBE) with voltage or current input (A1 and/or F1)
 - Type 4WRE (4/3 version), separate order:
 - digital and analog amplifier in Euro-card format
 - analog amplifier in modular design
 - Type 4WRE...A (4/2 version), separate order:
 - analog amplifier in modular design

Information on available spare parts:
www.boschrexroth.com/spc

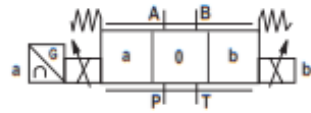
Ordering code

4WRE				2X / G24	/	V	*
Without integrated electronics (OBE)	= no code						Further details in the plain text
With integrated electronics (OBE)	= E					Seal material FKM seals ¹⁾	
Size 6	= 6					Electronic interface	
Size 10	= 10					A1 = Command value ±10 V	
Control spool symbols						F1 = Command value 4 to 20 mA	
						no code = Type 4WRE	
						Electrical connection	
						Type 4WRE:	
						K4 = Without mating connector, with connector according to DIN EN 175301-803	
						Mating connector (solenoid, position transducer), separate order, see page 8	
						Type 4WREE:	
						K31 = Without mating connector, with connector according to DIN EN 175201-804	
						Mating connector – separate order, see page 9	
						Supply voltage	
						G24 = Direct voltage 24 V	
						2X = 20 to 29	
						(20 to 29: unchanged installation and connection dimensions)	
						Rated flow at valve pressure differential $\Delta p = 10$ bar	
						Size 6	
						04 = 4 l/min	
						08 = 8 l/min	
						16 = 16 l/min	
						32 = 32 l/min	
						Size 10	
						25 = 25 l/min	
						50 = 50 l/min	
						75 = 75 l/min	
With symbol E1-, V1- and W1-:							
P → A: q_{Vmax} B → T: $q_{\sqrt{2}}$							
P → B: $q_{\sqrt{2}}$ A → T: q_{Vmax}							
Notice:							
In the zero position, spools W and WA have a connection from A to T and B to T with approx. 3 % of the relevant nominal cross-section.							

Symbols

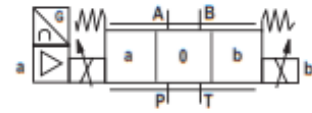
Proportional directional valve without integrated electronics

Type 4WRE...

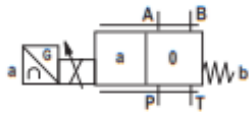


Proportional directional valve with integrated electronics

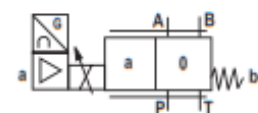
Type 4WREE...



Type 4WRE...A...



Type 4WREE...A...



Function, section

Type 4WRE ...-2X/...

The 4/2 and 4/3 proportional directional valves are designed as direct operated devices in plate design. Operation is effected by proportional solenoids with central thread and detachable coil. The solenoids are controlled by external electronics.

Set-up:

The valve basically consists of:

- Housing (1) with connection surface
- Control spool (2) with compression springs (3 and 4) and spring plate (5 and 6)
- Solenoids (7 and 8) with central thread
- Position transducer (9)

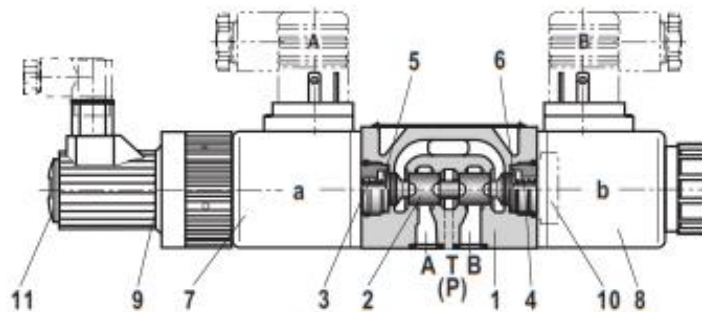
Function:

- With de-energized solenoids (7 and 8), central position of the control spool (2) by compression springs (3 and 4) between spring plates (5 and 6)
- Direct operation of the control spool (2) by controlling a proportional solenoid, e.g. solenoid "b" (8)
 - Displacement of the control spool (2) to the left proportional to the electric input signal
 - Connection from P to A and B to T via orifice-type cross-sections with progressive flow characteristic
- Switching off of the solenoid (8)
 - The compression spring (3) brings the control spool (2) back into the central position

In the de-energized condition, the control spool (2) is held in a mechanical central position by the return springs. With control spool symbol "V", this position does not correspond to the hydraulic central position! When the electric valve control loop is closed, the control spool is positioned in the hydraulic central position.

Important note!

The PG fitting (11) must not be opened. Mechanical adjustment of the adjustment nut located below is prohibited and damages the valve!



Valve with 2 spool positions: (Type 4WRE...A...)

The function of this valve design basically corresponds to the valve with three spool positions. The 2 spool position valves are, however, only equipped with solenoid "a" (7). Instead of the 2nd proportional solenoid, there is a plug screw (10).

Notice!

Due to the design principle, internal leakage is inherent to the valves, which may increase over the life cycle.

Notice!

The tank line must not be allowed to run empty. With corresponding installation conditions, a pre-charge valve (pre-charging pressure approx. 2 bar) is to be installed.

Function, section

Type 4WREE ...-2X/...

The 4/2 and 4/3 proportional directional valves are designed as direct operated devices in plate design. Operation is effected by proportional solenoids with central thread and detachable coil. The solenoids are controlled by the internal electronics.

Set-up:

The valve basically consists of:

- Housing (1) with connection surface
- Control spool (2) with compression springs (3 and 4) and spring plate (5 and 6)
- Solenoids (7 and 8) with central thread
- Position transducer (9)
- Integrated electronics (13)
- Electric zero point adjustment (12) accessible via Pg7

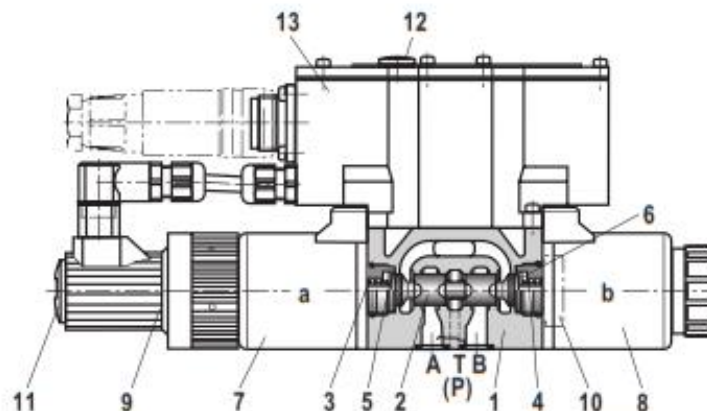
Important note!

The PG fitting (11) must not be opened. Mechanical adjustment of the adjustment nut located below is prohibited and damages the valve!

Function:

- With de-energized solenoids (7 and 8), central position of the control spool (2) by compression springs (3 and 4) between spring plates (5 and 6)
- Direct operation of the control spool (2) by controlling a proportional solenoid, e.g. solenoid "b" (8)
 - Displacement of the control spool (2) to the left proportional to the electric input signal
 - Connection from P to A and B to T via orifice-type cross-sections with progressive flow characteristic
- Switching off of the solenoid (8)
 - The compression spring (3) brings the control spool (2) back into the central position

In the de-energized condition, the control spool (2) is held in a mechanical central position by the return springs. With control spool symbol "V", this position does not correspond to the hydraulic central position! When the electric valve control loop is closed, the control spool is positioned in the hydraulic central position.



Valve with 2 spool positions: (Type 4WREE...A...)

The function of this valve design basically corresponds to the valve with three spool positions. The 2 spool position valves are, however, only equipped with solenoid "a" (7). Instead of the 2nd proportional solenoid, there is a plug screw (10).

Notice!

Due to the design principle, internal leakage is inherent to the valves, which may increase over the life cycle.

Notice!

The tank line must not be allowed to run empty. With corresponding installation conditions, a pre-charge valve (pre-charging pressure approx. 2 bar) is to be installed.

Technical data (For applications outside these parameters please consult us!)

general			
Sizes	Size	6	10
Weight	– Type 4WRE	kg	2.2
	– Type 4WREE	kg	2.4
Installation position		Any, preferably horizontal	
Ambient temperature range	– Type 4WRE	°C	–20 to +70
	– Type 4WREE	°C	–20 to +50
Storage temperature range		°C	–20 to +80
MTTF _a values according to EN ISO 13849	Years	150 ¹⁾ (for more information see data sheet 08012)	

hydraulic (measured with HLP46, $\vartheta_{oil} = 40\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ and $p = 100\text{ bar}$)

Maximum operating pressure	– Port A, B, P	bar	315
	– Port T	bar	210
Rated flow $q_{V, rated}$ with $\Delta p = 10\text{ bar}$		l/min	4, 8, 16, 32
Recommended maximum flow		l/min	80
Hydraulic fluid		See table below	
Hydraulic fluid temperature range		°C	–20 to +80 (preferably +40 to +50)
Viscosity range		mm ² /s	20 to 380 (preferably 30 to 46)
Maximum admissible degree of contamination of the hydraulic fluid, cleanliness class according to ISO 4406 (c)		Class 20/18/15 ²⁾	
Hysteresis		%	≤ 0.1
Range of inversion		%	≤ 0.05
Response sensitivity		%	≤ 0.05
Zero shift upon change of hydraulic fluid temperature and operating pressure	%/10 K	≤ 0.15	
	%/100 bar	≤ 0.1	

¹⁾ With control spool types E, E1, EA, W, W1, WA; in longitudinal control spool direction, there is sufficient positive overlap without shock/vibration load; observe the installation orientation with regard to the main direction of acceleration.

²⁾ The cleanliness classes specified for the components must be adhered to in hydraulic systems. Effective filtration prevents faults and at the same time increases the service life of the components.
For the selection of the filters see www.boschrexroth.com/filter

Hydraulic fluid	Classification	Suitable sealing materials	Standards
Mineral oils and related hydrocarbons	HL, HLP	NBR, FKM	DIN 51524
Flame-resistant – Containing water	HFC (Fuchs HYDROTHERM 46M, Petrofer Ultra Safe 620)	NBR	ISO 12922
 Important information on hydraulic fluids! - For more information and data on the use of other hydraulic fluids refer to data sheet 90220 or contact us! - There may be limitations regarding the technical valve data (temperature, pressure range, service life, maintenance intervals, etc.)! - The flash point of the process and operating medium used must be 40 K higher than the maximum solenoid surface temperature. Flame-resistant – water-containing: Maximum pressure differential per control edge 175 bar. Pressure pre-loading at the tank port > 20 % of the pressure differential; otherwise, increased cavitation. - Life cycle as compared to operation with mineral oil HL, HLP 50 % to 100 %.			

Technical data (For applications outside these parameters please consult us!)

electric				
Size		Size	6	10
Voltage type			Direct voltage	
Solenoid coil resistance	– Cold value at 20 °C	Ω	2.65	4.55
	– Maximum hot value	Ω	4.05	6.82
Duty cycle		%	100	
Maximum coil temperature ¹⁾		°C	up to 150	
Electrical connection see page 8 and 9	– Type 4WRE	With connector according to DIN EN 175301-803 and ISO 4400		
		Mating connector according to DIN EN 175301-803 and ISO 4400 ²⁾		
	– Type 4WREE	With connector DIN EN 175201-804		
		Mating connector DIN EN 175201-804 ²⁾		
Protection class of the valve according to EN 60529			IP65 with mating connector mounted and locked	

Control electronics

Type 4WRE	4/3 version		Digital	VT-VRPD-2-2X/V0/0 according to RE 30126	
	Amplifier in euro-card format ²⁾	Analog		VT-VRPA2-1-1X/V0 according to data sheet 30119	VT-VRPA2-2-1X/V0 according to data sheet 30119
			Module amplifier ²⁾	Analog	VT-MRPA2-1 according to data sheet 30219
Type 4WRE...A...	4/2 version				
	Module amplifier ²⁾	Analog		VT-MRPA1-1 according to data sheet 30219	VT-MRPA1-2 according to data sheet 30219
Type 4WREE				Integrated in the valve, see page 9	
	analog command value module			VT- SWMA-1-1X/... according to data sheet 29902	
	analog command value module			VT-SWMAK-1-1X/... according to data sheet 29903	
	analog command value card			VT-SWKA- 1-1X/... according to data sheet 30255	
	digital command value card			VT-HACD -1-1X/... according to data sheet 30143	
Supply voltage	Nominal voltage	VDC	24		
	lower limit value	V	19.4		
	upper limit value	V	35		
Current consumption of the amplifier	I_{max}	A	< 2		
	Pulse current	A	3		

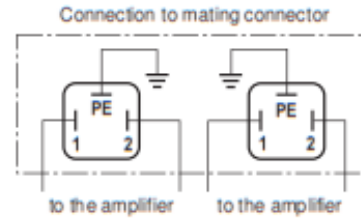
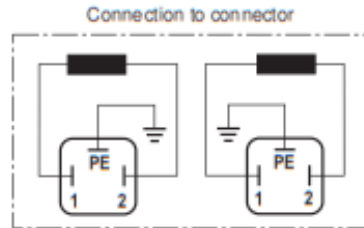
¹⁾ Due to the temperatures occurring at the surfaces of the solenoid coils, the European standards ISO 13732-1 and EN ISO 4413 need to be adhered to!

²⁾ Separate order

 **Notice:** For information on the **environmental simulation testing** for the areas EMC (electromagnetic compatibility), climate and mechanical load see data sheet 29061-U (declaration on environmental compatibility).

Electrical connection, mating connectors (dimensions in mm)

Type 4WRE (without integrated electronics)

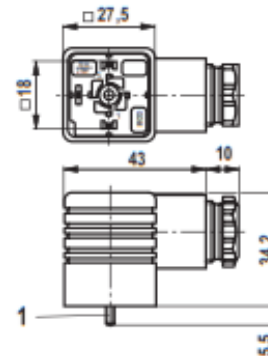


Mating connector CECC 75 301-803-A002FA-H3D08-G according to DIN EN 175301-803 and ISO 4400

Solenoid **a**, color gray
separate order under the Material no. **R901017010**

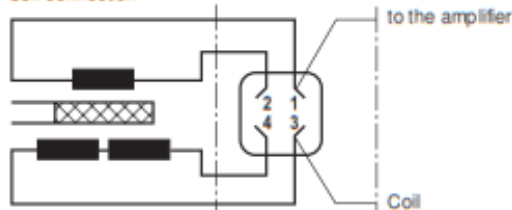
Solenoid **b**, color black
separate order under the Material no. **R901017011**

1 Mounting screw M3
Tightening torque $M_A = 0.5 \text{ Nm} + 0.1 \text{ Nm}$

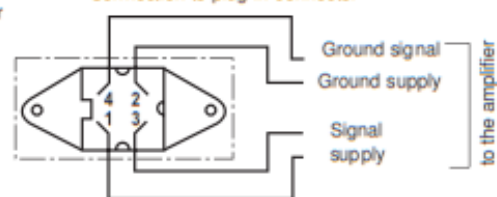


Inductive position transducer

Coil connection



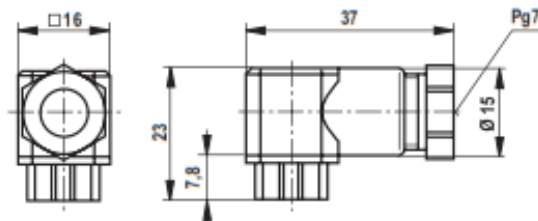
Connection to plug-in connector



Mating connector 4-pole Pg7-G4W1F
separate order under the Material no. **R900023126**

Connection cable:

Recommendation:
up to 50 m cable length type LiYCY 4 x 0.25 mm²
Connect shield to PE only on the supply side.



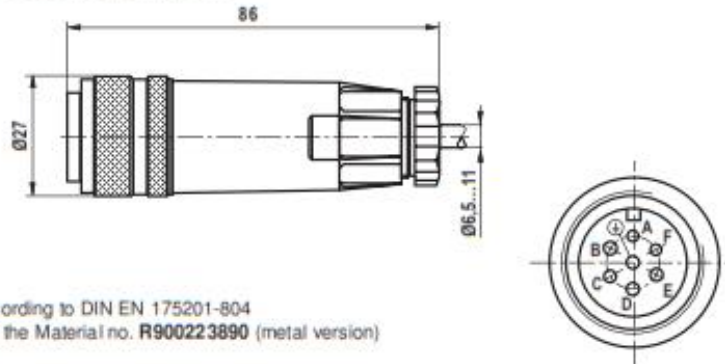
Electrical connection, mating connectors (dimensions in mm)

Type 4WREE (with integrated electronics (OBE))

Mating connector according to DIN EN 175201-804
separate order under the Material no. **R900021267** (plastic version)

Angular design – separate order under the Material no. **R900217845**

Pin assignment see also block diagram page 10



Mating connector according to DIN EN 175201-804
separate order under the Material no. **R900223890** (metal version)



Device connector allocation	Contact	Signal with A1 interface	Signal with F1 interface
Supply voltage	A	24 VDC ($U(I) = 19.4$ to 35 V); $I_{max} = 2$ A	
	B	0 V	
Reference potential actual value	C	Reference contact F; $R_g > 50$ k Ω	Reference contact F; $R_g < 10$ Ω
Differential amplifier input	D	± 10 V command value; $R_g > 50$ k Ω	4 to 20 mA command value; $R_g > 100$ Ω
	E	Reference potential command value	
Measuring output (actual value)	F	± 10 V actual value (limit load 5 mA)	4 to 20 mA actual value, load resistance max. 300 Ω
	PE	Connected to cooling element and valve housing	

Command value: Positive command value 0 to +10 V (or 12 to 20 mA) at D and reference potential at E result in flow from P → A and B → T.

Negative command value 0 to -10 V (or 12 to 4 mA) at D and reference potential at E result in flow from P → B and A → T.

For valves with 1 solenoid on side a (e. g. variant **EA** and **WA**), a positive command value 0 to +10 V (or 4 to 20 mA) at D and reference potential at E result in flow from P → B and A → T.

Actual value: Actual value 0 to +10 V (or 12 to 20 mA) at F and reference potential at C result in flow from P → A and B → T, actual value 0 to -10 V (or 4 to 12 mA) result in flow from P → B and A → T.

With valves with 1 solenoid, a positive actual value 0 to +10 V (or 4 to 20 mA) at F and reference potential at C result in flow from P → B and A → T.

Connection cable: Recommendation: – up to 25 m cable length type LIYCY 7 x 0.75 mm²

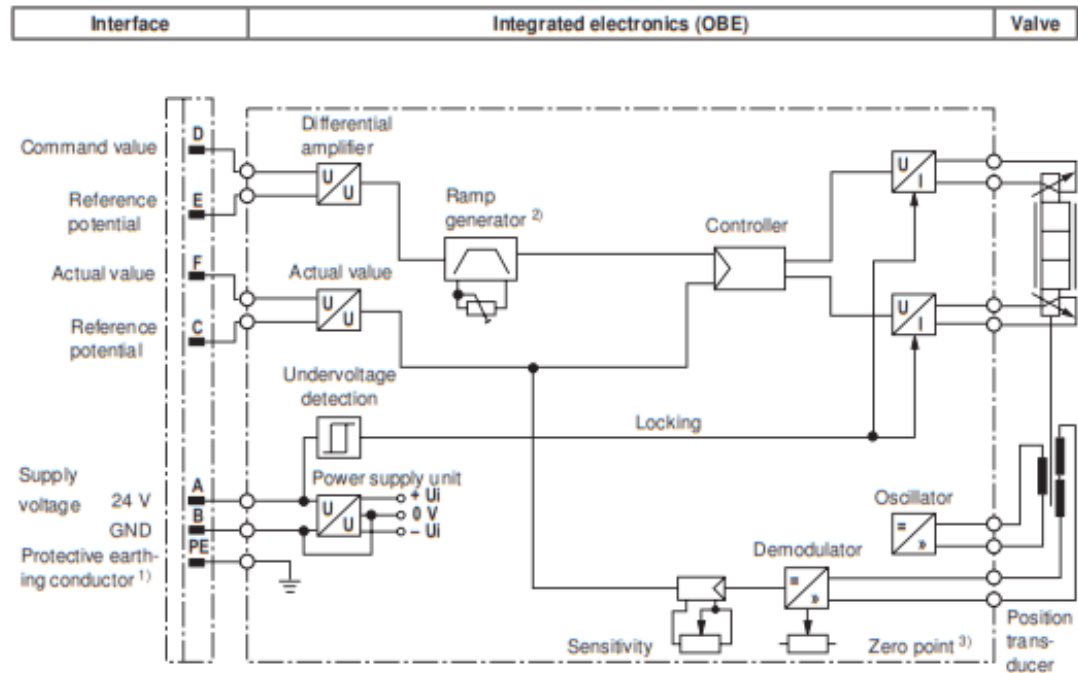
– up to 50 m cable length type LIYCY 7 x 1.0 mm²

External diameter see sketch of mating connector

Connect shield to PE only on the supply side.

Integrated electronics (OBE) type 4WREE

Block diagram / pin assignment

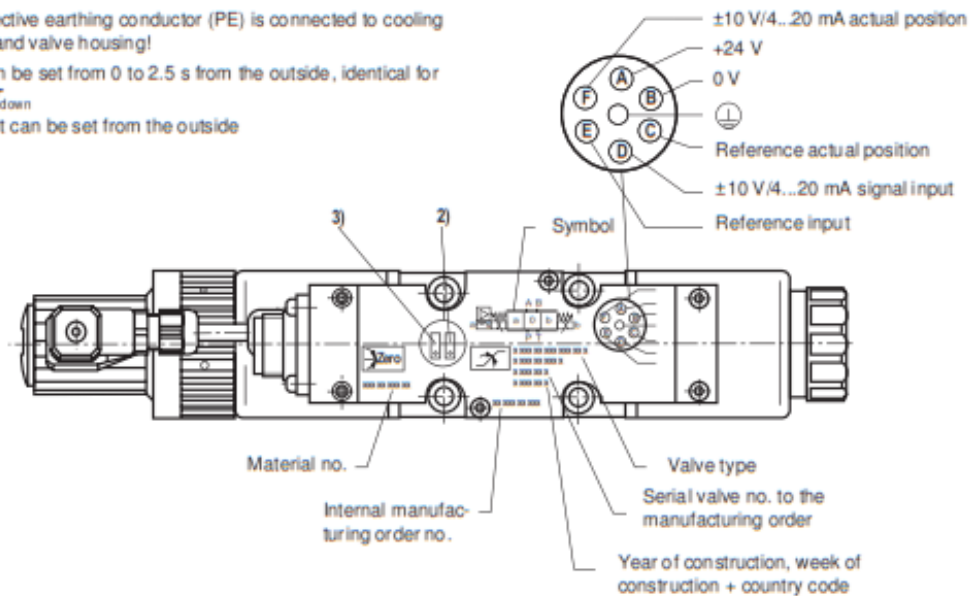


Notice: Electric signals taken out via control electronics (e.g. actual value) must not be used for switching off safety-relevant machine functions!

¹⁾ The protective earthing conductor (PE) is connected to cooling element and valve housing!

²⁾ Ramp can be set from 0 to 2.5 s from the outside, identical for T_{up} and T_{down}

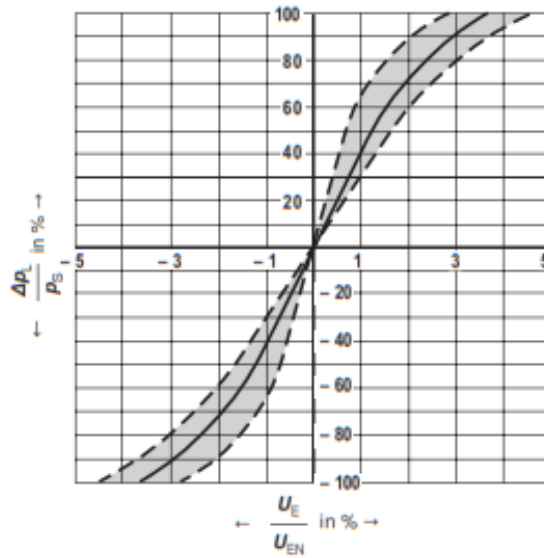
³⁾ Zero point can be set from the outside



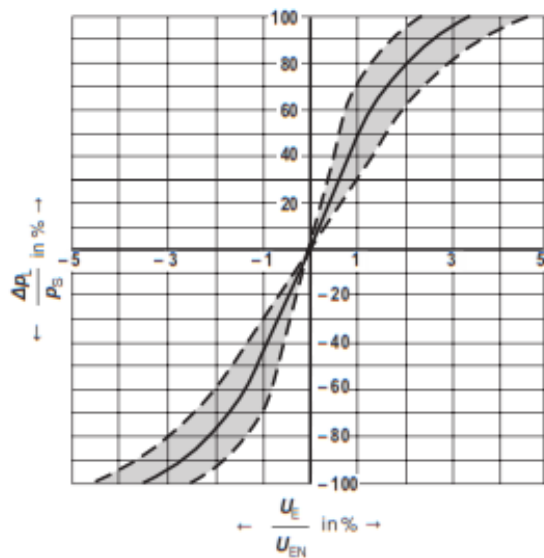
Characteristic curves: Type 4WREE (measured with HLP46, $\vartheta_{\text{Oil}} = 40\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$) Size 6 and 10

Pressure signal characteristic curve (control spool V),
 $p_s = 100\text{ bar}$

Size 6

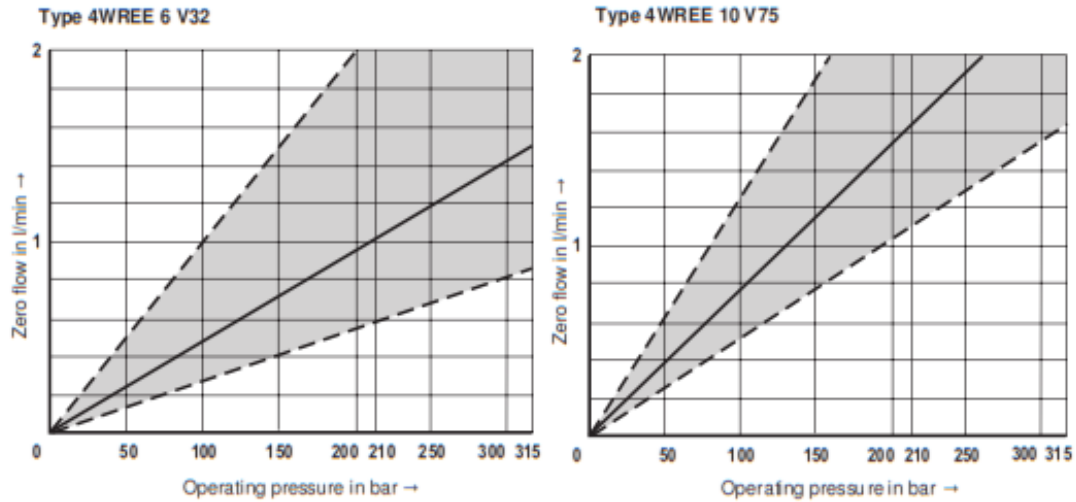


Size 10



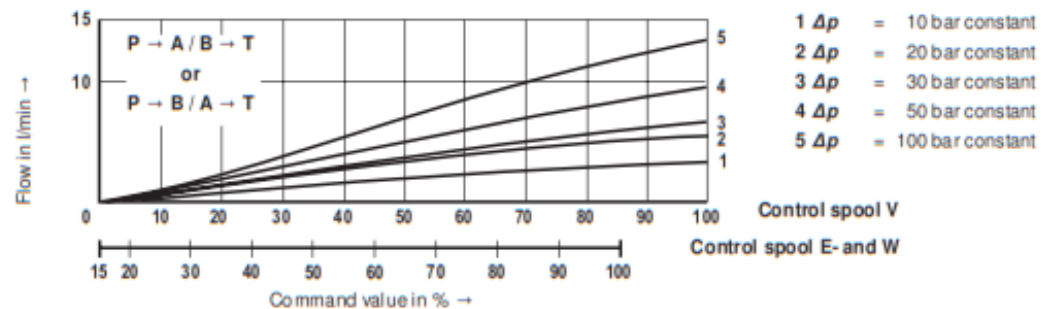
Characteristic curves: Type 4WREE (measured with HLP46, $\vartheta_{oil} = 40\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$) Size 6 and 10

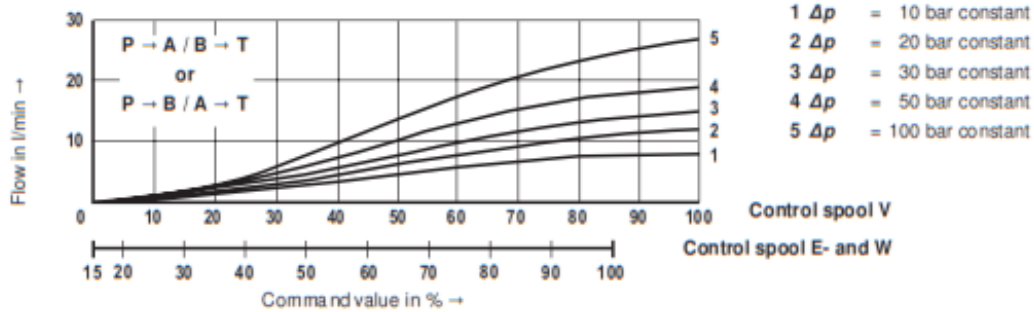
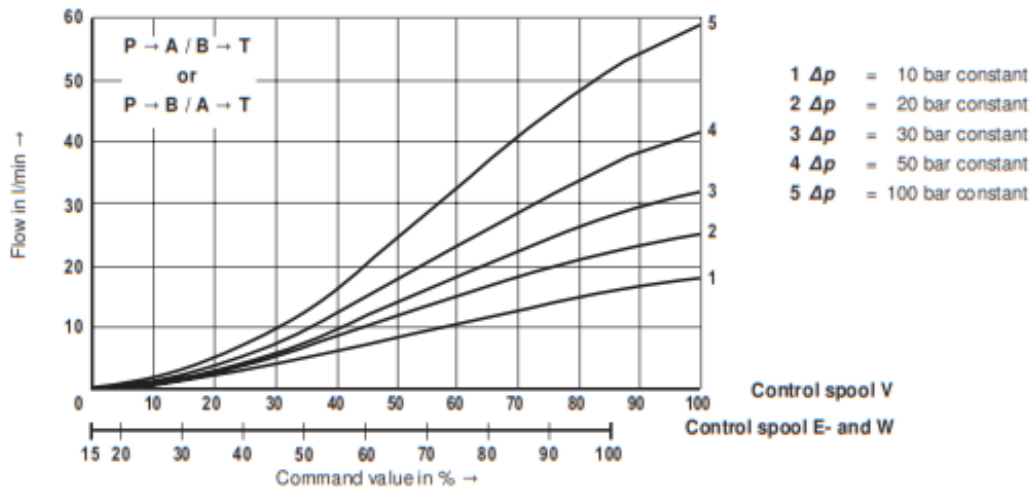
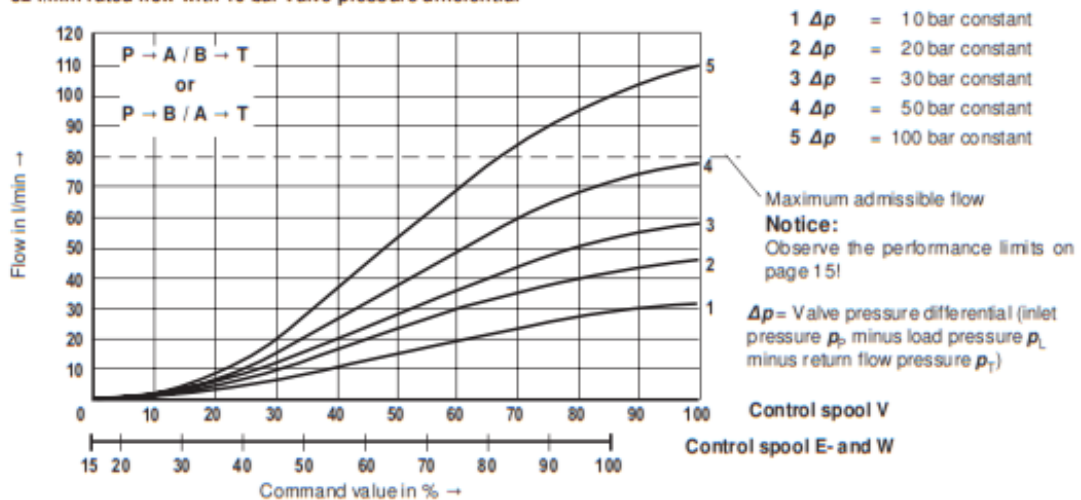
Zero flow with central control spool position

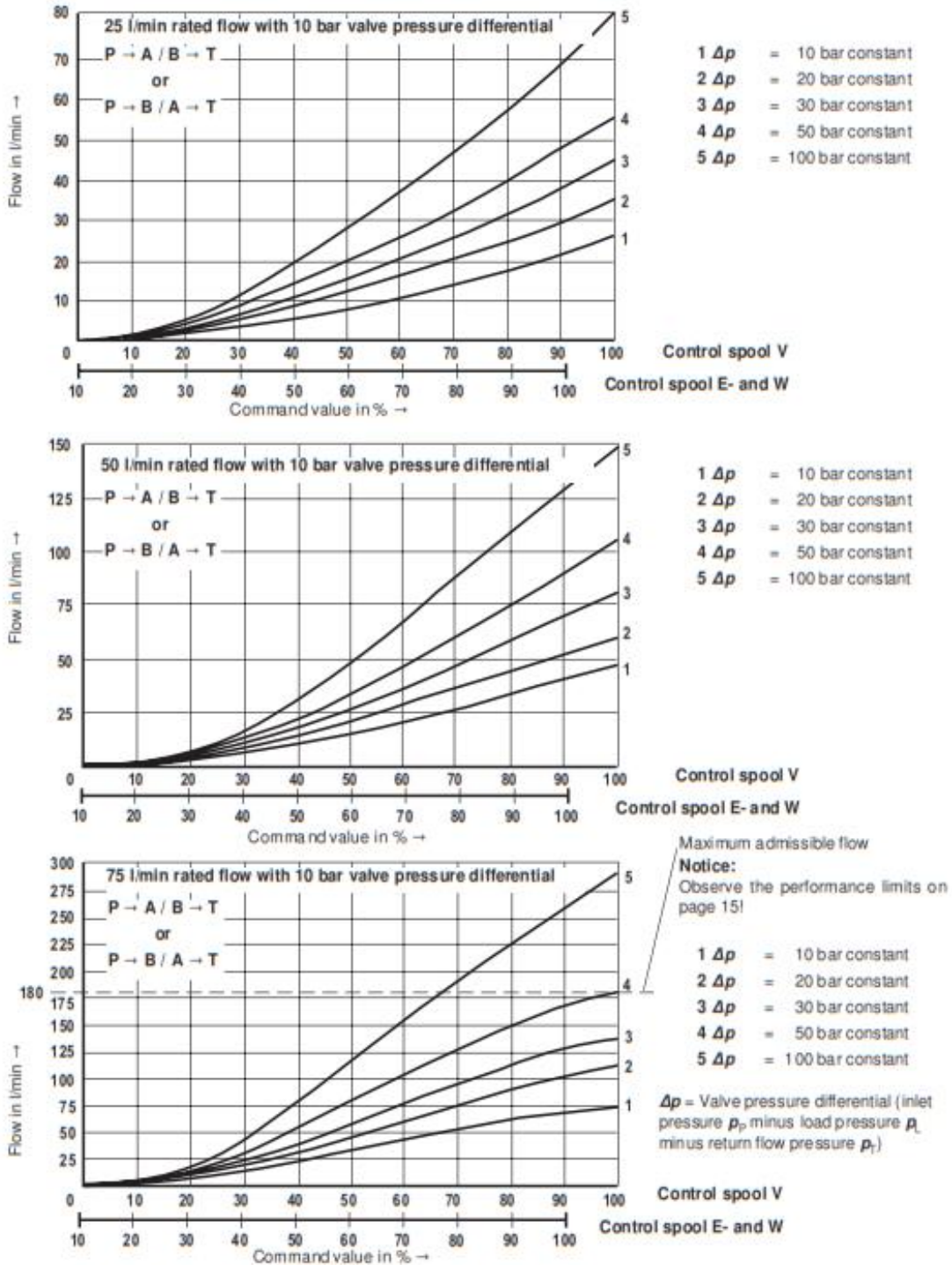


Characteristic curves: Type 4WREE (measured with HLP46, $\vartheta_{oil} = 40\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ and $p = 100\text{ bar}$) Size 6

4 l/min rated flow with 10 bar valve pressure differential



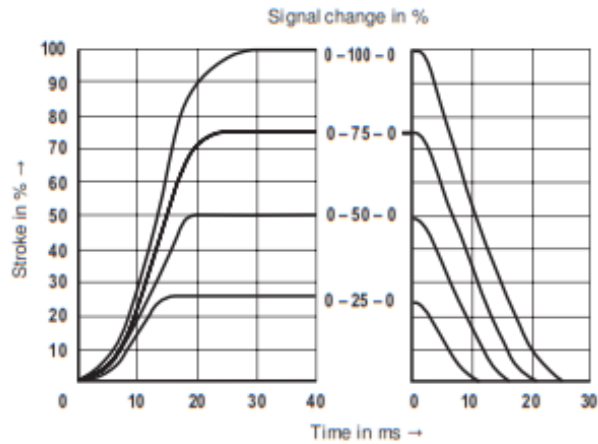
Characteristic curves: Type 4WREE (measured with HLP46, $\vartheta_{oil} = 40^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ and $p = 100\text{ bar}$) Size 6
8 l/min rated flow with 10 bar valve pressure differential

16 l/min rated flow with 10 bar valve pressure differential

32 l/min rated flow with 10 bar valve pressure differential


Characteristic curves: Type 4WREE (measured with HLP46, $\vartheta_{oil} = 40^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ and $p = 100\text{ bar}$) Size 10


Transition function with stepped electric input signals: Type 4WREE**Size 6**(measured with HLP46, $\vartheta_{\text{Oil}} = 40\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ and $p_s = 10\text{ bar}$)

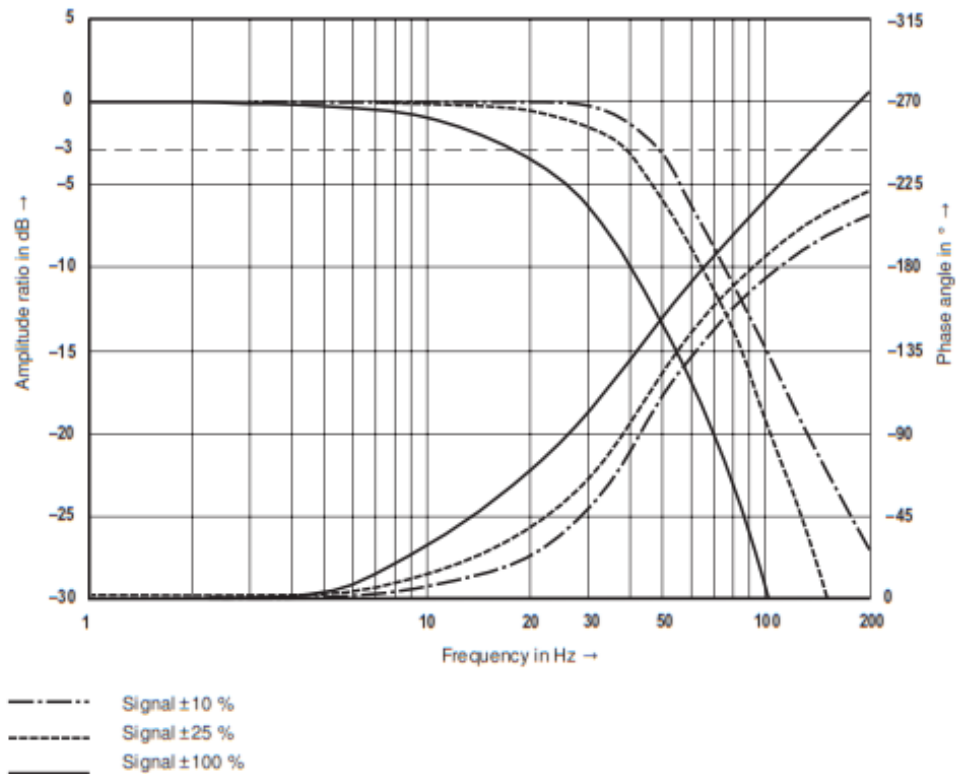
4/3 valve version

Control spool E

**Frequency response characteristic curves: Type 4WREE****Size 6**(measured with HLP46, $\vartheta_{\text{Oil}} = 40\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, $p_s = 10\text{ bar}$)

4/3 valve version

Control spool V

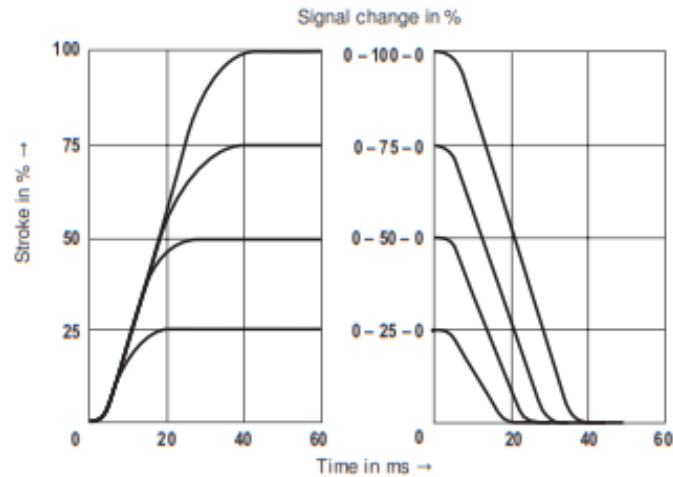


Transition function with stepped electric input signals: Type 4WREE

(measured with HLP46, $\vartheta_{Oil} = 40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $p_s = 10\text{ bar}$)

Size 10

4/3 valve version
Control spool E

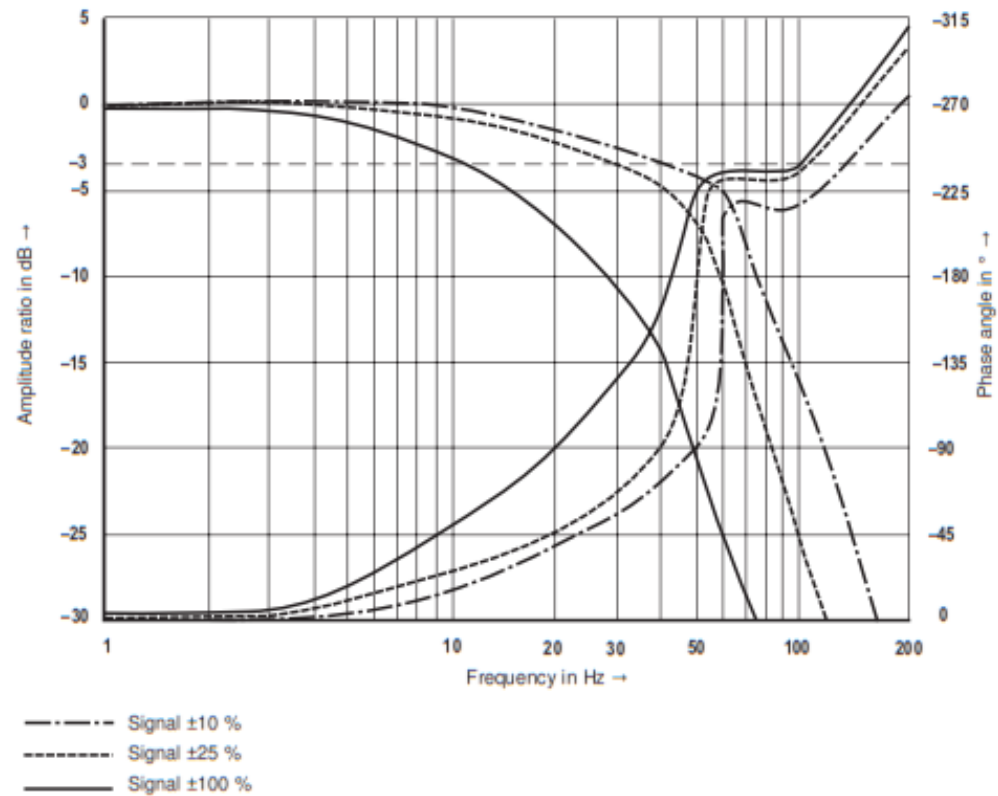


Frequency response characteristic curves: Type 4WREE

(measured with HLP46, $\vartheta_{Oil} = 40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_s = 10\text{ bar}$)

Size 10

4/3 valve version
Control spool V

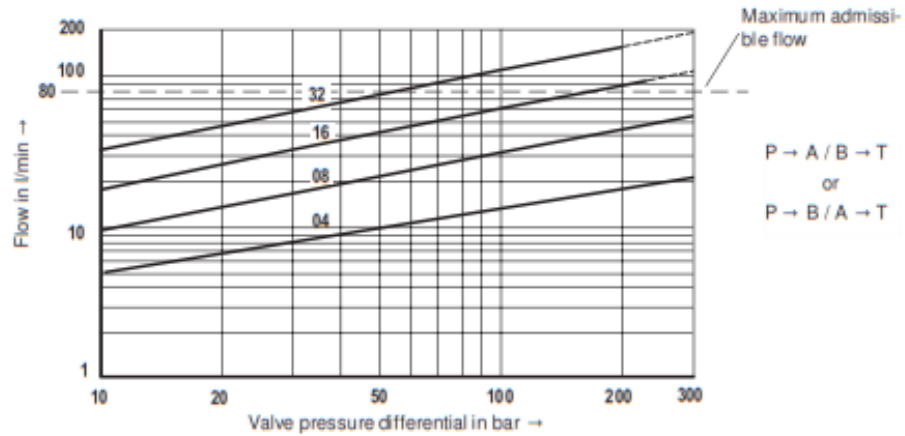


Flow: Type 4WREE (measured with HLP46, $\vartheta_{Oil} = 40\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$)**Size 6**

Load function with maximum valve opening

Rated flow 4, 8, 16 and 32 l/min

Control spool V



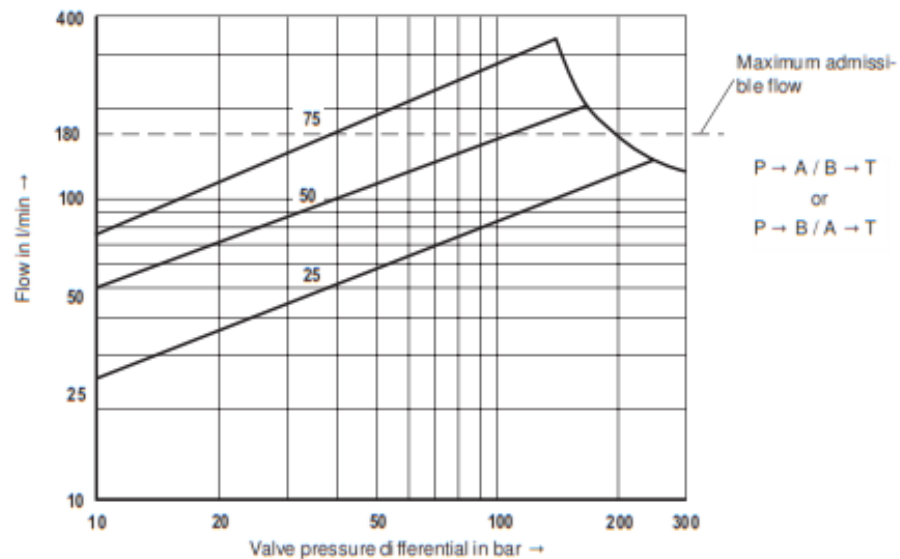
Observe the maximum admissible flow of 80 l/min!

Flow: Type 4WREE (measured with HLP46, $\vartheta_{Oil} = 40\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$)**Size 10**

Load function with maximum valve opening

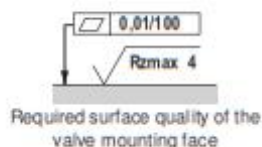
Rated flow 25, 50 and 75 l/min

Control spool V

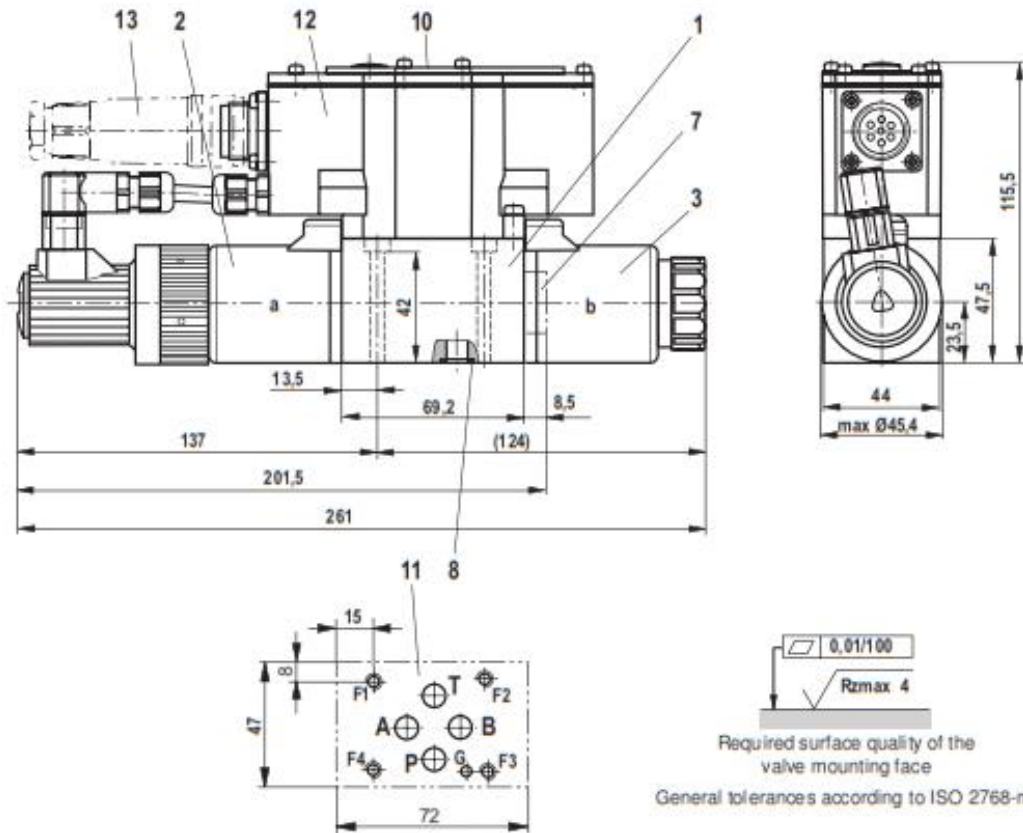


Observe the maximum admissible flow of 180 l/min!

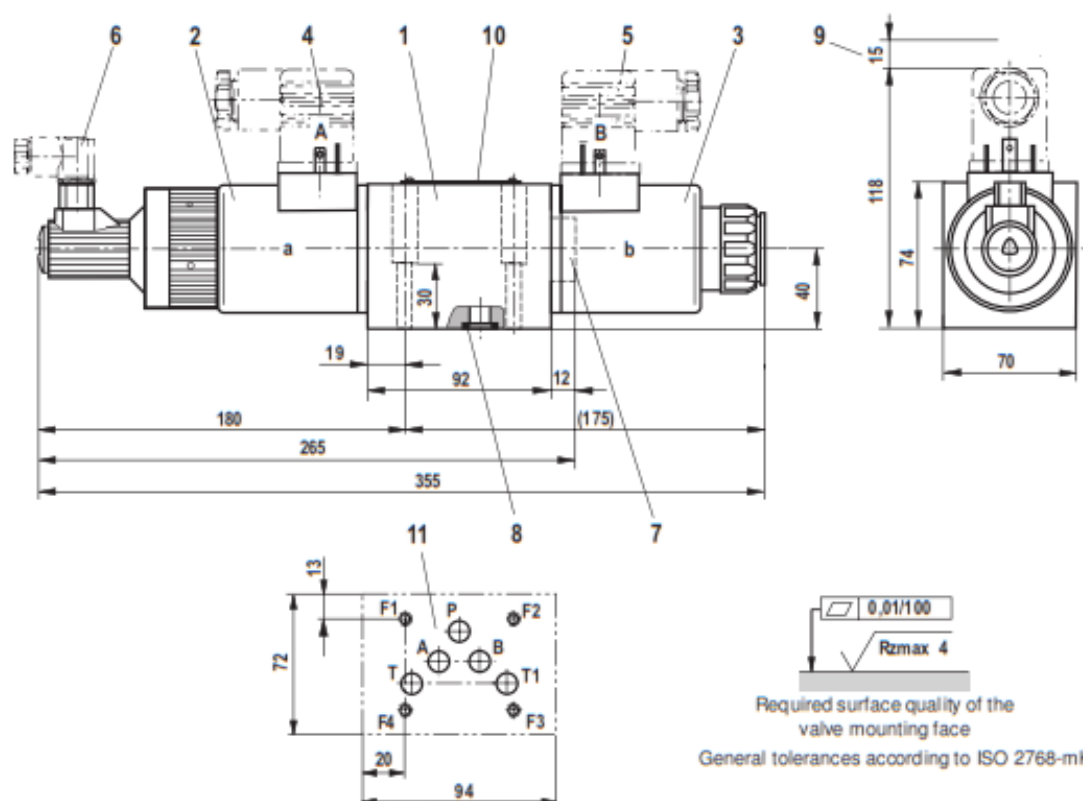
Size 6



- Subplates and valve mounting screws see page 22

Unit dimensions: Type 4WREE (dimensions in mm)**Size 6**

Subplates and valve mounting screws see page 22

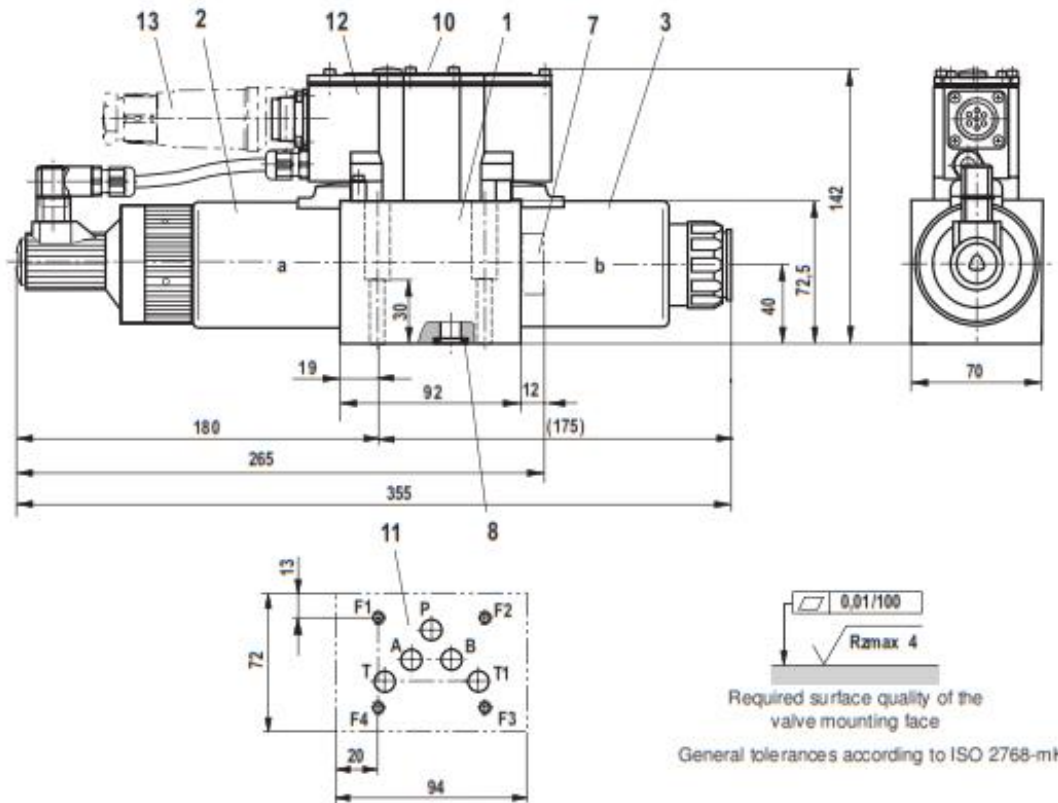
Unit dimensions: Type 4WRE (dimensions in mm)**Size 10**

- 1 Valve housing
- 2 Proportional solenoid "a" with inductive position transducer
- 3 Proportional solenoid "b"
- 4 Mating connector "A", color gray, separate order – see page 8
- 5 Mating connector "B", color black, separate order – see page 8
- 6 Mating connector for inductive position transducer, separate order – see page 8
- 7 Plug screw for valve with one solenoid (2 spool positions, version **EA** or **WA**)
- 8 Identical seal rings for ports A, B, P, T and T1
- 9 Space required to remove the mating connector
- 10 Name plate
- 11 Machined valve contact surface, porting pattern according to ISO 4401-05-04-0-05 differing from the standard: Connection T1 $\varnothing$ 11.2 mm

Subplates and valve mounting screws see page 22

Unit dimensions: Type 4WREE (dimensions in mm)

size 10



- 1 Valve housing
- 2 Proportional solenoid "a" with inductive position transducer
- 3 Proportional solenoid "b"
- 7 Plug screw for valve with one solenoid (2 spool positions, version **EA** or **WA**)
- 8 Identical seal rings for ports A, B, P, T and T1
- 10 Name plate
- 11 Machined valve contact surface, porting pattern according to ISO 4401-05-04-0-05 differing from the standard: Connection T1 $\varnothing$ 11.2 mm
- 12 Integrated electronics (OBE)
- 13 Mating connector, separate order – see page 9

Subplates and valve mounting screws see page 22

Unit dimensions

Hexagon socket head cap screws		Material number
Size 6	4x ISO 4762 - M5 x 50 - 10.9-11Zn-240h-L Tightening torque $M_A = 7 \text{ Nm} \pm 10 \%$ or 4x ISO 4762 - M5 x 50 - 10.9 Tightening torque $M_A = 8.9 \text{ Nm} \pm 10 \%$	R913000064
Size 10	4x ISO 4762 - M6 x 40 - 10.9-11Zn-240h-L Tightening torque $M_A = 12.5 \text{ Nm} \pm 10 \%$ or 4x ISO 4762 - M6 x 40 - 10.9 Tightening torque $M_A = 15.5 \text{ Nm} \pm 10 \%$	R913000058

Notice: This tightening torque of the hexagon socket head cap screws refers to the maximum operating pressure!

Subplates	Data sheet
Size 6	45052
Size 10	45054

Bosch Rexroth AG
Hydraulics
Zum Eisengießer 1
97816 Lohr am Main, Germany
Phone +49 (0) 93 52 / 18-0
documentation@boschrexroth.de
www.boschrexroth.de

© This document, as well as the data, specifications and other information set forth in it, are the exclusive property of Bosch Rexroth AG. It may not be reproduced or given to third parties without its consent. The data specified above only serve to describe the product. No statements concerning a certain condition or suitability for a certain application can be derived from our information. The information given does not release the user from the obligation of own judgment and verification. It must be remembered that our products are subject to a natural process of wear and aging.

Bosch Rexroth AG
Hydraulics
Zum Eisengießer 1
97816 Lohr am Main, Germany
Phone +49 (0) 93 52 / 18-0
documentation@boschrexroth.de
www.boschrexroth.de

© This document, as well as the data, specifications and other information set forth in it, are the exclusive property of Bosch Rexroth AG. It may not be reproduced or given to third parties without its consent. The data specified above only serve to describe the product. No statements concerning a certain condition or suitability for a certain application can be derived from our information. The information given does not release the user from the obligation of own judgment and verification. It must be remembered that our products are subject to a natural process of wear and aging.

