

REDISEÑO DE LA PRÁCTICA DE SERVOS DE FUERZA EN CONTROL
AUTOMÁTICO (SERVOSISTEMAS DE POTENCIA FLUIDA)

LUIS ALEXANDER RODRÍGUEZ ZAPATA

LUIS CARLOS ROA CANTOR

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2015

REDISEÑO DE LA PRÁCTICA DE SERVOS DE FUERZA EN CONTROL
AUTOMÁTICO (SERVOSISTEMAS DE POTENCIA FLUIDA)

LUIS ALEXANDER RODRÍGUEZ ZAPATA

LUIS CARLOS ROA CANTOR

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 INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2015

A Dios por sus bendiciones.

A mis padres Gamadiel y Mabel. Por su amor, ejemplo, guía y apoyo incondicional, Siendo ellos las personas que más respeto y admiro.

A mi familia y en especial a mis abuelos, aunque hoy ya no están. Porque a pesar de la distancia siempre me apoyaron a su manera.

A Javier y Eliza. Por su amistad y ayuda incondicional en este proceso.

A Paola Ramírez y su familia. Por su apoyo, afecto y estar a mi lado en ese momento tan crucial de mi vida.

A todos y cada uno de mis amigos tanto sordos como oyentes. Porque siempre aparecieron en el momento que todo el mundo desapareció.

Luis Alexander Rodríguez Zapata

A Dios, por amarme a su manera.

A mis padres, Nubia y Uriel, por su amor, enseñanzas y apoyo incondicional. Soy gracias a ellos.

A mi hermano Manuel Santiago por su ejemplo de perseverancia y tenacidad.

A mi compañero de proyecto, por su paciencia y enseñanzas.

A mis amigos, aquellos que saben iluminar con su espíritu los momentos oscuros.

A los buenos maestros de la Escuela de Ingeniería Mecánica, que enseñan con humildad y cariño por su profesión.

Luis Carlos Roa Cantor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela de Ingeniería Mecánica por el apoyo en el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al profesor Ingeniero Abel Parada Corrales por la oportunidad de realizar este trabajo y en el transcurso del mismo por su paciencia, orientación, apoyo y consejos.

A Javier, Eliza, Manuel, Sergio, Leidy Meneses, Dora, Gloria y Freddy por el apoyo brindado en pro de la realización de esta tesis.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	30
1. SERVOMECANISMOS DE CONTROL DE FUERZA Y POSICIÓN.....	31
1.1. GENERALIDADES DE LOS SERVOS ELECTROHIDRÁULICOS	31
1.2 CONFIGURACIONES PRINCIPALES DE SERVOS HIDRÁULICOS	32
1.3 FUNCIONAMIENTO DE UN SERVO ELECTROHIDRÁULICO	34
1.4 PRESIÓN DE SUMINISTRO PARA EL SERVO	35
1.5 POTENCIA MÁXIMA A TRANSMITIR CON UNA SERVOVÁLVULA	36
1.6 OBSERVACIONES DENTRO DEL DISEÑO DE SERVOS	37
1.7 SERVOVÁLVULA ELECTROHIDRÁULICA	38
1.7.1 Tipos de servoválvulas electrohidráulicas.	39
1.7.2 Funcionamiento de una servoválvula de dos etapas con realimentación mecánica.	42
1.7.3 Partes principales de una servoválvula.	44
1.8 TRANSDUCTORES	49
1.9 CONTROL POR MEDIO DE SERVOS.	49
1.9.1 Control de posición.	49
1.9.2. Control de velocidad.	50

1.9.3 Control de fuerza.	51
2. BANCO DE CONTROL DE FUERZA.....	52
2.1 SUBSISTEMA HIDRÁULICO	55
2.1.1 Sistema de regulación de presión.	56
2.1.2 Sistema de filtrado.	57
2.1.3 Sistema de refrigeración.	58
2.1.4 Paquete de potencia.	59
2.1.4.1 Bomba de Paletas.	59
2.2 SUBSISTEMA ESTRUCTURAL.....	60
2.2.1 Refuerzo estructural.	60
2.2.2 Muelle.	62
2.3 SUBSISTEMA DE CONTROL	63
2.3.1 Módulo de Alimentación, Amplificación y Almacenamiento (Módulo AAA).	64
2.3.2 Software LabVIEW	73
2.3.2.1 Lazos y estructuras en LabVIEW	76
2.3.3 Tarjeta Arduino mega 2560	79
2.3.4 Servoválvula direccional Moog 62	80
2.3.5 Celda de carga.	83

3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL SISTEMA	87
3.1 SERVO DE CONTROL DE FUERZA CON ACCIÓN PI	88
3.1.1. Servoválvula	88
3.1.2 Cilindro Hidráulico	90
3.1.3 Elemento Final de Control + Actuador	91
3.1.4 Celda de Carga	91
3.2 EFECTO DEL CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA	93
3.3 SERVO DE CONTROL DE FUERZA CON ACCIÓN PI Y COMPENSACIÓN POR ADELANTO DE SEÑAL (FEEDFORWARD).	94
4. DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL	106
4.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA	108
4.2 CONTROL PID	108
4.3 LECTURA DE LA SEÑAL DE SETPOINT	109
4.4 LECTURA DE LA SEÑAL DE LA CELDA DE CARGA	110
4.5 BLOQUE PARA GUARDAR DATOS EN TIEMPO REAL	111
4.6 SEÑAL DE CONTROL HACIA LA SERVOVÁLVULA	111
4.7 REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y CÁLCULOS DE ERROR.	112
5. DISEÑO DE LA INTERFAZ VIRTUAL HMI	113
6. PRUEBAS, RESULTADOS Y ANÁLISIS	119

6.1 DEFINICIONES	120
6.1.1 Estado estacionario	120
6.1.2 Estado transitorio	122
6.2 PRUEBA PARA CARACTERIZAR LA CELDA DE CARGA.	124
6.3 PRUEBA DE CONTROL DE FUERZA POR REALIMENTACIÓN PI USANDO ARDUINO.	126
6.4 PRUEBA DE CONTROL DE FUERZA POR REALIMENTACIÓN PI USANDO LA TARJETA DAQ NI 6212.	132
6.5 PRUEBA DE CONTROL FUERZA PI CON ENTRADA RAMPA, USANDO LA TARJETA DAQ NI 6212.	137
6.5.1 Procedimiento para calcular el error en estado estacionario con los valores digitales de fuerza.	137
6.6 PRUEBA DE CONTROL DE FUERZA POR REALIMENTACIÓN PI CON COMPENSACIÓN POR ADELANTO DE SEÑAL (FEEDFORWARD) PARA UNA ENTRADA ESCALÓN.	141
6.7 PRUEBA DE CONTROL DE FUERZA POR REALIMENTACIÓN PI CON COMPENSACIÓN POR ADELANTO DE SEÑAL (FEEDFORWARD) PARA UNA ENTRADA RAMPA.	145
6.8 RESULTADOS GENERALES	149
7. CONCLUSIONES	157
8. RECOMENDACIONES	159
BIBLIOGRAFIA	160
ANEXOS.....	162

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Características típicas de desempeño para diferentes tipos de servoactuadores.	32
Figura 2. Actuadores electrohidráulicos con control en la bomba y la válvula respectivamente.....	34
Figura 3. Componentes de un servomecanismo electrohidráulico.....	34
Figura 4. Servoválvula de etapa sencilla.....	39
Figura 5. Principio del amplificador hidráulico.....	40
Figura 6. Servoválvula de dos etapas con realimentación mecánica de la posición.	41
Figura 7. Curvas de Presión – Caudal para servoválvulas de dos etapas usando: a) retroalimentación de la posición; b) retroalimentación de la presión de carga; c) retroalimentación del flujo debido a la carga.	42
Figura 8. Respuesta de la servoválvula al cambio de corriente eléctrica.....	43
Figura 9 Detalle del cierre de la boquilla.	43
Figura 10. Recuperación de la posición inicial de la armadura.	44
Figura 11. Motor de torsión de imán permanente.	45

Figura 12. Movimiento del carrete dentro de la camisa de la válvula.....	46
Figura 13. Detalle de los resaltos y los puertos del carrete.....	47
Figura 14. Tipos de centros de una servoválvula.....	47
Figura 15. Curva caudal vs corriente para los diferentes tipos de centro.....	48
Figura 16. Esquema general de un servo de posición.	50
Figura 17 Esquema de un servo de velocidad.	50
Figura 18. Esquema de un servo de fuerza.	51
Figura 19. Esquema básico del control aplicado al banco de control de fuerza.....	52
Figura 20. Esquema general del banco.	53
Figura 21. Descripción del banco por subsistemas.....	55
Figura 22. Válvula de alivio.....	56
Figura 23. Válvula de seguridad proporcional KCG-3-250D (vista en corte).....	57
Figura 24. Filtro de baja presión.	57
Figura 25. Filtro de alta presión.	58
Figura 26. Intercambiador de Calor EK-514-0	59

Figura 27. Bomba hidráulica	59
Figura 28. Vista isométrica del diseño del refuerzo estructural.....	60
Figura 29. Aplicación de la carga en el estudio de esfuerzos.	61
Figura 30. Resultado para el desplazamiento del estudio de esfuerzos aplicado. .	61
Figura 31. Refuerzo estructural.....	62
Figura 32. Diseño del muelle.	63
Figura 33. Vista posterior del módulo AAA.	64
Figura 34. Vista frontal del módulo AAA.	65
Figura 35. Selectores de las tarjetas de potencia.	65
Figura 36. Información del banco de servos de fuerza.	66
Figura 37. Vista lateral izquierda del módulo AAA.	66
Figura 38. Vista lateral derecha del módulo AAA.....	67
Figura 39. Vista del montaje para el control de fuerza por medio de servos.	68
Figura 40. Vista del montaje para el control de posición por medio de servoválvula.	69

Figura 41. Vista del montaje para el control de posición por medio de válvula proporcional.	69
Figura 42. Tarjeta potencia Vickers.	70
Figura 43. Vista de los tableros de conexiones de la tarjeta de potencia Vickers. .	70
Figura 44. Tarjeta de adquisición de datos NI DAQ USB 6212.....	72
Figura 45. Ejemplo de un panel frontal con su respectivo diagrama de bloques. ..	73
Figura 46. Paleta de controles.	74
Figura 47. Sub-paleta “Numeric”.....	75
Figura 48. Paleta de funciones.	75
Figura 49. Ejemplo del terminal de una perilla como icono y como dato.	76
Figura 50. Sub-paleta “Structures”.....	76
Figura 51. Lazo for vacío.	77
Figura 52. Lazo While vacío.....	77
Figura 53. Ejemplo de estructura Case.....	78
Figura 54. Ejemplo de estructura Sequence.....	78
Figura 55. Ejemplo de la estructura Event.	79

Figura 56. Tarjeta Arduino MEGA 2560	79
Figura 57. Componentes principales de la servoválvula Moog 62.	81
Figura 58. Curvas de flujo de la válvula (Con la válvula completamente abierta, señal de comando 100%).	82
Figura 59. Curvas típicas características	83
Figura 60. Celda de carga tipo S utilizada en el banco.	83
Figura 61. Configuración en puente de Wheatstone de las galgas extensiométricas	84
Figura 62. Nivel de protección brindado por un producto clasificado IP67.	86
Figura 63. Diagrama de bloques del sistema para el control PI – Fase inicial.	88
Figura 64. Aproximación de primer orden de la respuesta dinámica de la servoválvula MOOG 62.	89
Figura 65. Diagrama de bloques en lazo cerrado con ecuaciones simplificadas. ...	91
Figura 66. Diagrama de bloques simplificado.	92
Figura 67. Control PI aplicado al sistema representado en forma simplificada.	93
Figura 68. Respuesta del control PI aplicando un entrada escalón de 1300 lb.	95
Figura 69. Sistema en lazo cerrado.	95

Figura 70. Diagrama en lazo cerrado con adelanto de señal:.....	96
Figura 71. Diagrama del control por adelanto.	99
Figura 72. Gráfica en el lugar de las raíces.	100
Figura 73. Gráfica en el lugar de las raíces incluyendo la deficiencia del ángulo.	102
Figura 74. Diagrama general del sistema con la función del compensador.	105
Figura 75. Diagrama simplificado del sistema con la función del compensador (Paso 1).	105
Figura 76. Diagrama simplificado del sistema con la función del compensador (Paso 2).	104; Error! Marcador no definido.
Figura 77. Diagrama simplificado del sistema con la implementación del compensador.	105
Figura 78. Detalle de la toolkit PID and FUZZY logic control.	106
Figura 79. Detalle de la herramienta Control & Simulation Loop	107
Figura 80. Vista del algoritmo de control en la ventana Block Diagram.	107
Figura 81. Función de transferencia del sistema a través del MathScript Node. .	108
Figura 82. Control PID	109
Figura 83. Lectura de la señal de setpoint.	109

Figura 84. Lectura de la señal de la celda de carga.	110
Figura 85. Bloque para guardar datos en tiempo real.....	111
Figura 86. Señal de control hacia la servoválvula.....	112
Figura 87. Representación gráfica y cálculos de error.....	112
Figura 88. Interfaz virtual HMI.....	113
Figura 89. Comando principal.....	114
Figura 90. Detalle del comando de selección del tipo de señal de entrada.	115
Figura 91. Detalle de selección de entrada tipo rampa.....	115
Figura 92. Bloque de almacenamiento de datos.....	117
Figura 93. Ejemplo de datos guardados en el archivo de texto.	118
Figura 94. Elemento de prueba utilizado en los experimentos.....	119
Figura 95. Respuesta a entrada rampa para un sistema de primer orden.....	121
Figura 96. Repetibilidad e Histéresis	122
Figura 97. Especificaciones de la respuesta transitoria frente a una entrada escalón.....	123
Figura 98. Programa diseñado para la caracterización de la celda de carga.....	124

Figura 99. Tarjeta amplificadora de la válvula de seguridad proporcional.	124
Figura 100. Visualización del diferencial de presión a través de los manómetros.	125
Figura 101. Regresión lineal para hallar la ecuación característica.	126
Figura 102. Montaje utilizado en las pruebas con la tarjeta Arduino.	127
Figura 103. Respuesta para el control PI usando Arduino con una entrada escalón de 1300 [lb].	128
Figura 104. Digitalización de los datos.	128
Figura 105. Circuito amplificador.	132
Figura 106. Respuesta con control PI usando DAQ NI 6212, para una entrada escalón de 1100 [lb].	133
Figura 107. Digitalización de los datos	134
Figura 108. Respuesta del sistema aplicando control PI, para una entrada rampa con pendiente de 200 [lb/s] y setpoint de 1000 [lb].	137
Figura 109. Digitalización de los datos.	138
Figura 110. Respuesta del sistema aplicando el control con compensación por adelanto de señal (feedforward) para una entrada escalón.	141
Figura 111. Digitalización de los datos.	142

Figura 112. Comportamiento en estado estacionario del sistema.	144
Figura 113. Módulo AAA (Alimentación, Amplificación y Almacenamiento).....	145
Figura 114. Respuesta del control clásico PI con implementación de compensador por adelanto de señal frente a la entrada rampa.	146
Figura 115. Digitalización de los datos.	146
Figura 116. Respuesta transitoria de las diferentes configuraciones analizadas aplicando una entrada escalón.	150
Figura 117. Resultados para el error porcentual en las pruebas con entrada escalón.....	152
Figura 118. Resultados de la desviación estándar en las pruebas con entrada escalón.....	154
Figura 119. Respuesta del error porcentual para las pruebas con entrada rampa.	156

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Elementos del banco de control de fuerza	54
Tabla 2. Elementos del subsistema de control.....	63
Tabla 3. Especificaciones principales de la tarjeta DAQ 6212	72
Tabla 4. Condiciones de operación Arduino MEGA 2560.	80
Tabla 5. Variables de la ecuación de caudal de la servoválvula	81
Tabla 6. Características principales de la servoválvula Moog 62.....	82
Tabla 7. Características principales de la celda de carga.	85
Tabla 8. Variables involucradas en el modelo de segundo orden de la servoválvula	89
Tabla 9. Variables involucradas en el modelo de primer orden de la servoválvula	89
Tabla 10. Variables involucradas en la función de transferencia del cilindro	90
Tabla 11. Valores de los coeficientes de la ecuación final del proceso de control en lazo cerrado aplicando la técnica PI.	92
Tabla 12. Variables involucradas en el sistema en lazo cerrado.	96

Tabla 13. Detalle de los componentes del algoritmo de control.....	107
Tabla 14. Datos para caracterizar la celda de carga.....	125
Tabla 15. Características de la respuesta transitoria.	129
Tabla 16 Resultados de la prueba de control de fuerza por realimentación PI usando Arduino.....	130
Tabla 17. Resultados finales para la prueba de control de fuerza por realimentación PI usando Arduino.	131
Tabla 18. Características de la respuesta transitoria.	134
Tabla 19. Resultados prueba de control de fuerza por realimentación PI usando tarjeta DAQ NI-6212.	135
Tabla 20. Resultados finales para la prueba de control de fuerza por realimentación PI usando la tarjeta DAQ NI 6212.....	136
Tabla 21. Error porcentual para la prueba de control PI con entrada rampa.	138
Tabla 22. Prueba de repetibilidad con la señal análoga de la celda de carga usando control PI.....	139
Tabla 24. Especificaciones de la respuesta transitoria	142
Tabla 25. Resultados prueba de control de fuerza por realimentación PI con compensación por adelanto de señal (feedforward) usando tarjeta DAQ NI-6212.	143

Tabla 26. Error porcentual para la prueba de control PI con compensador por adelanto de señal para entrada rampa.	147
Tabla 23. Prueba de repetibilidad con la señal análoga de la celda de carga usando control PI + Feedforward.	147
Tabla 27. Resultados de las especificaciones en el dominio del tiempo.	149
Tabla 28. Resultados para el error porcentual.	151
Tabla 29. Resultados para la desviación estándar.	153
Tabla 30. Resultados para la repetibilidad.	154
Tabla 31. Resultados para la histéresis.	155
Tabla 32. Resultados introduciendo entrada rampa.	155

LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo A. Pruebas realizadas para caracterizar la celda de carga.....	163
Anexo B. Pruebas para calcular la histéresis del control de fuerza PI, con entrada escalón y utilizando la tarjeta Arduino.....	166
Anexo C. Pruebas para calcular la histéresis del control de fuerza PI, con entrada escalón y utilizando la tarjeta DAQ NI 6212.....	170
Anexo D. Pruebas para calcular el error en estado estable y la varianza del control de fuerza PI con compensación por adelanto de señal (feedforward) con entrada escalón usando la tarjeta DAQ NI 6212.....	173
Anexo E. Datos utilizados para el cálculo de la histéresis en la prueba de control de fuerza por control PI + Feedforward usando la tarjeta DAQ NI 6212.	180
Anexo F. Datos digitalizados en base a las gráficas de respuesta transitoria del control de fuerza PI utilizando la tarjeta Arduino con entrada escalón.....	184
Anexo G. Datos digitalizados en base a las gráficas de respuesta transitoria del control de fuerza PI utilizando la tarjeta DAQ NI 6212 con entrada escalón.....	185
Anexo H. Datos digitalizados en base a las gráficas de respuesta transitoria del control de fuerza por adelanto de señal (Feedforward) utilizando la tarjeta DAQ NI 6212 con entrada escalón.....	187
Anexo I. Datos digitalizados en base a las gráficas de respuesta transitoria del control de fuerza PI utilizando la tarjeta DAQ NI 6212 con entrada rampa.	190

Anexo J. Datos digitalizados en base a las gráficas de respuesta transitoria del control de fuerza PI con adelanto de señal (feedforward) utilizando la tarjeta DAQ NI 6212 con entrada rampa.	193
Anexo K Datasheet del amplificador INA125P	197
Anexo L. Datasheet LM7812.....	198
Anexo M. Datasheet LM358P	200
Anexo N. Datasheet TIP 41C.....	204
Anexo O. Datasheet TIP 42C.....	205
Anexo P. Diseño de las tarjetas de amplificación.	206
Anexo Q. Diseño de los circuitos de amplificación.....	208
Anexo R. Referencias de la resistencia R_{INA} para el circuito amplificador de la señal de la celda de carga.	209
Anexo S. Funciones de transferencia para servoválvulas MOOG.	210
Anexo T: Ficha técnica de la servoválvula Moog 62.	214
Anexo U. Ficha técnica de la celda de carga Lexus SC, modificado.	220

RESUMEN

TITULO: REDISEÑO DE LA PRÁCTICA DE SERVOS DE FUERZA EN CONTROL AUTOMÁTICO (SERVOSISTEMAS DE POTENCIA FLUIDA)*.

AUTORES: LUIS ALEXANDER RODRÍGUEZ ZAPATA.
LUIS CARLOS ROA CANTOR**.

PALABRAS CLAVE: SERVO, CONTROL, FUERZA, HIDRÁULICO, CONTROL PI, FEEDFORWARD, FEEDBACK.

DESCRIPCION

Se presentan los cambios que se efectuaron en el banco de servos de fuerza del Laboratorio de Control Automático, actualmente llamado Laboratorio de Servosistemas de Potencia Fluida, adscrito a la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Se implementó el proceso de control digital a un circuito hidráulico que utiliza una servoválvula direccional como elemento actuador, la cual se comunica hacia un cilindro que ejerce un rango de fuerza de 0 a 10 kN sobre una celda de carga. El banco se utiliza con fines académicos en la enseñanza de acciones de control aplicadas a servosistemas de potencia fluida. El sistema de control se desarrolló a través de un algoritmo de programación y una interfaz virtual usando el software LabVIEW y una tarjeta de adquisición de datos DAQ NI-6212. La interfaz permite al usuario visualizar el comportamiento del sistema por medio de un diagrama Fuerza – Tiempo, así mismo se pueden introducir los valores de las ganancias de control y visualizar el error porcentual.

Fueron usadas dos técnicas de control, la primera se basó en la teoría clásica aplicando una acción Proporcional – Integral. Posteriormente se implementó una compensación por adelanto de señal usando la técnica feedforward como complemento al método usado inicialmente.

La estructura del banco se reforzó para evitar deformaciones que afectarían el proceso de medida del sensor de fuerza.

* Trabajo de grado

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

ABSTRACT

TITLE: REDESIGN OF THE PRACTICE OF THE AUTOMATIC CONTROL LABORATORY FORCE.

AUTHORS: LUIS ALEXANDER RODRÍGUEZ ZAPATA.
LUIS CARLOS ROA CANTOR*.

KEYWORDS: SERVO, CONTROL, FORCE, HYDRAULIC, PI CONTROL, FEEDFORWARD, FEEDBACK**.

DESCRIPTION

The changes that were made in the bank of servos from strength of the laboratory of Automatic Control, now called Servosystems Laboratory of Fluid Power, attached to the school of Mechanical Engineering are presented.

A process of digital control is implemented to a hydraulic circuit that uses a directional servovalve as actuator element, which communicates to a cylinder that exerts a range of strength from 0 to 10 KN on a load cell.

The bank is used for academic purposes in the teaching of applied to fluid power servo control actions. The control system was developed through a programming algorithm and a virtual interface using LabVIEW software and NI DAQ-6212 data acquisition card. The interface allows the user to visualize the behavior of the system by means of a force – time diagram, likewise you can introduce earnings control values and display the percentage error.

Two control techniques were used, the first is based on the classical theory by applying a proportional - Integral Action. Compensation was subsequently implemented by advancement of signal using the technical feedforward as a complement to the method used initially. The structure of the Bank was reinforced to avoid deformations that will affect the process of measurement of the force sensor

* Thesis

** Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Director: Mechanical Engineer, Msc. Abel Antonio Parada Corrales.

INTRODUCCIÓN

El control de posición, velocidad y fuerza por medio de servos hacen parte central de las experiencias a realizar en el Laboratorio de Control Automático. En cada una de éstas prácticas se muestra el control análogo y digital de la respectiva variable y se comparan los resultados de cada proceso. Todas las experiencias que incluyen control digital cuentan con una interfaz virtual por medio de la cual el estudiante puede manipular el banco, cambiar la magnitud de las variables involucradas en el sistema y analizar los efectos físicos que esto causa en el proceso.

Sin embargo, la práctica de control de fuerza no cuenta con la interfaz mencionada anteriormente ya que únicamente se realiza de forma análoga. Utiliza un circuito electrónico para introducir la señal de consigna y modular la constante de control, que se limita a una acción proporcional. Éste método no permite realizar un análisis básico debido a que no se pueden visualizar las señales que participan en el proceso, además el sistema es muy sensible frente al cambio de la ganancia de control, presentando inestabilidad con pequeñas variaciones en el valor. Partiendo de ésta necesidad se decide implementar una interfaz con su respectivo algoritmo de control.

Para cumplir con los objetivos del proyecto este está organizado de la siguiente forma. En el primer capítulo se presenta una introducción teórica sobre los servomecanismos electrohidráulicos, en el capítulo 2 se realiza una descripción general y por componentes del banco de control de fuerza. El modelamiento matemático de los diferentes elementos del sistema se presenta en el capítulo 3. El diseño del algoritmo de control se expone en el cuarto capítulo y además se especifican las técnicas de control utilizadas. El capítulo 5 trata sobre el diseño de la interfaz virtual, se detallan todas las opciones y herramientas que tiene el usuario para interactuar con el banco. Finalmente las pruebas realizadas, el análisis de resultados, las conclusiones y recomendaciones se presentan en los capítulos 6, 7 y 8.

1. SERVOMECANISMOS DE CONTROL DE FUERZA Y POSICIÓN

Un servo o servomecanismo es un sistema de control que mide su propia señal de salida y la corrige de forma que siga de forma rápida y precisa una señal de comando. De esta manera el efecto de las anomalías presentes en el dispositivo de control y en el mecanismo actuador se pueden minimizar, así como la influencia de perturbaciones externas. Un servomecanismo puede ser diseñado para controlar casi cualquier magnitud física.

1.1. GENERALIDADES DE LOS SERVOS ELECTROHIDRÁULICOS

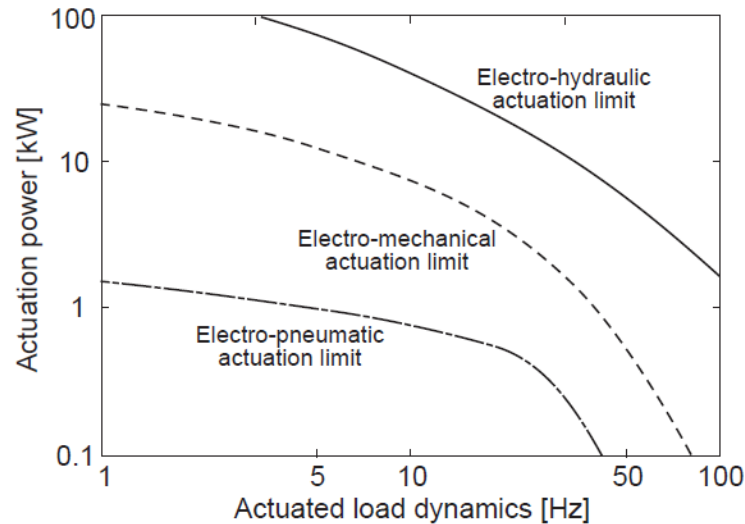
El manejo de grandes cargas de inercia con alta precisión y pronta velocidad de respuesta caracteriza a los servos electrohidráulicos. Estos están conformados por dos grupos principales, uno de potencia representado por la servoválvula, el actuador hidráulico y la unidad de potencia; y otro encargado de la retroalimentación y la generación del error dentro del lazo de control. Hacen parte de éste último los transductores y acondicionadores de señal. El grupo de potencia proporciona la capacidad de manejar grandes cargas y el grupo electrónico otorga flexibilidad dentro del proceso.

Una de las características que hacen flexible al sistema es la gran variedad de transductores que actualmente existen en el mercado y que confieren la posibilidad de controlar diversas magnitudes. Con los avances tecnológicos en el área informática y la instrumentación, es posible aplicar diversas técnicas de control que antes no trascendían de la teoría. Los software enfocados a la ingeniería de control, como LabVIEW, han hecho grandes contribuciones en éste aspecto.

El gran desempeño de los servomecanismos se caracteriza por un amplio rango de respuesta en la frecuencia, alta precisión y capacidad de trabajo en amplios niveles de operación y ambientes sucios típicos de las aplicaciones industriales. Requerimientos adicionales para estos sistemas pueden ser la operación en determinados ciclos de trabajo y minimización del peso y el tamaño. Esto hace que los servomecanismos sean muy utilizados en aplicaciones aeroespaciales.

En la figura 1 se puede apreciar que los servos electrohidráulicos pueden cubrir aplicaciones que exigen un mayor desempeño, en comparación con los servos electromecánicos y los electroneumáticos. Esto se debe a que los servosistemas electrohidráulicos se han diseñado para cubrir diferentes aplicaciones industriales.

Figura 1. Características típicas de desempeño para diferentes tipos de servoactuadores.



Fuente: RYDBERG, Karl. Hydraulic servo systems.

Los servos electrohidráulicos responden a necesidades de alta potencia y rápida respuesta dinámica. Esto se logra con unidades de potencia que puedan elevar la presión a los niveles requeridos y un buen filtrado del aceite hidráulico para que los elementos del sistema, especialmente las servoválvulas, puedan funcionar correctamente. Sin embargo, la satisfacción de estos requerimientos elevan los costos del sistema, de tal modo que se debe hacer una evaluación rigurosa antes de implementarlo.

1.2 CONFIGURACIONES PRINCIPALES DE SERVOS HIDRÁULICOS.

Existen diferentes maneras de configurar un servo electrohidráulico, una de ellas consiste en utilizar un variador de frecuencia en el motor eléctrico para regular su velocidad y de ésta forma modular indirectamente la potencia entregada al sistema. Este tipo de construcción permite obtener una mejor eficiencia cuando el sistema supera el 50% de la potencia máxima. Sin embargo garantizar un buen desempeño a bajas velocidades requiere del uso de bombas hidráulicas de engranajes internos con el fin de evitar vibraciones de baja frecuencia en el sistema debido a los pulsos de flujo de la bomba¹.

¹ RYDBERG, Karl-Erik. Hydraulic servo systems. Guía del programa. Suecia, Linköpings Universitet, 2008. p. 4. TMHP51.

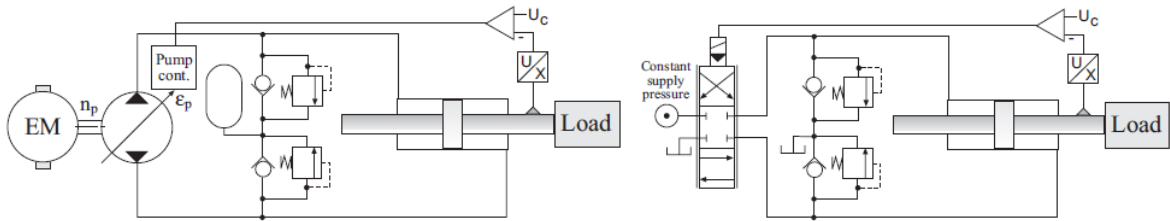
Otras formas de configuración están influenciadas principalmente por el actuador utilizado y el elemento final de control. Los actuadores son los motores y pistones hidráulicos; y los elementos finales de control son las bombas y válvulas hidráulicas. Sin embargo, los que se usan con mayor frecuencia, son aquellos controlados por bomba y por válvula. Se profundizará la descripción de éste último en el capítulo 3 donde se explicará el modelamiento matemático, ya que éste es el sistema aplicado en el banco.

Los sistemas controlados por bomba, cuentan con una bomba de desplazamiento variable que lleva el flujo hasta un dispositivo actuador. El flujo es controlado por la carrera de la bomba para de esta forma variar la velocidad de salida y garantizar que la presión generada venza la carga. La dificultad para generar estanqueidad entre la bomba y el actuador hace que se acumulen grandes volúmenes de fluido disminuyendo la velocidad de respuesta del sistema.

En los sistemas controlados por válvula el flujo puede ser modulado por una electroválvula distribuidora todo/nada, una válvula proporcional o una servoválvula, sirviendo de interfaz entre la unidad de potencia y el dispositivo actuador. La unidad de potencia puede entregar presión constante, utilizando una válvula de seguridad para regular la presión. También se puede utilizar otro tipo de configuración que otorga mayor precisión que el anterior y que utiliza una bomba de caudal variable con control incorporado en la placa para regular la presión.

Las configuraciones presentadas tienen características que las hacen acordes para ciertas aplicaciones, respectivamente. Los sistemas controlados por bomba tienen bajas velocidades de respuesta, pero su eficiencia es mejor, por lo cual se utiliza en sistemas que consumen grandes potencias debido al mejor aprovechamiento de la energía de suministro. Siempre y cuando el sistema no requiera una respuesta dinámica muy precisa, se puede aplicar este tipo de configuración. En cambio cuando el consumo de potencia no es un factor determinante, se pueden utilizar los sistemas controlados por válvula, puesto que su eficiencia es menor, pero su velocidad de respuesta es mucho mejor.

Figura 2. Actuadores electrohidráulicos con control en la bomba y la válvula respectivamente.

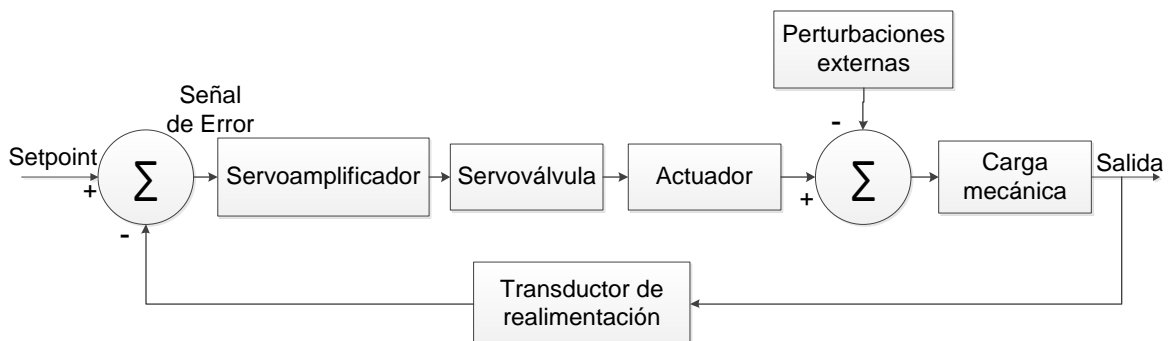


Fuente: RYDBERG, Karl. Hydraulic servo systems.

1.3 FUNCIONAMIENTO DE UN SERVO ELECTROHIDRÁULICO.

Los elementos básicos de un servo electrohidráulico se muestran en la figura 3. La salida del servo es medida por un dispositivo transductor que la convierte en señal eléctrica. Ésta señal de retroalimentación es comparada con la señal de consigna generando la señal de error, dicha señal es amplificada por el acondicionador de señal y luego es usada como señal de control. Más adelante es comunicada al elemento final de control, en este caso una servoválvula. La servoválvula controla el fluido que va hacia el actuador en proporción con la corriente recibida del acondicionador de señal. A medida que el flujo va pasando, el actuador iniciará su movimiento y la carga también. Como consecuencia el sensor empezará a medir un cambio en la variable a controlar, que se irá acercando al valor de consigna hasta igualarlo. Este proceso provocará que la señal de error sea cada vez menor, de manera que al llegar a ser cero la servoválvula regresará a su posición central.

Figura 3. Componentes de un servomecanismo electrohidráulico



Si la ganancia del amplificador es alta, la señal de salida variará rápidamente, siguiendo la señal de comando. No es recomendable usar valores muy altos para la ganancia de control, dado que cuando se presenten señales de perturbación provocará que sólo sea necesaria una pequeña señal de error para generar una acción de control. Por tal razón, la ganancia del amplificador deberá ser establecida de tal forma que la precisión del servo únicamente dependa de la exactitud del transductor. Sin embargo, como la ganancia del lazo de control es proporcional a la ganancia del amplificador, esta ganancia está limitada por consideraciones de estabilidad.

1.4 PRESIÓN DE SUMINISTRO PARA EL SERVO².

La presión de operación a manejar debe elegirse de acuerdo a las condiciones y requerimientos del proceso y a los niveles de presión soportados por los elementos del circuito.

El manejo de presiones altas tiene la ventaja de disminuir el caudal requerido y por ende la potencia. La reducción de caudal implica usar bombas y válvulas de menor tamaño, esto hace que el peso total del sistema se reduzca y como consecuencia de la alta presión, la magnitud del módulo de bulk incrementa ocasionando que las velocidades de respuesta del sistema mejoren. En el sector aeronáutico es muy común que se utilicen estos niveles de presión.

Para el sector industrial es recomendable usar bajas presiones, entre 500 y 2000 psi, ya que en este rango las fugas se reducen y el aceite no sufre sobrecalentamientos, además los rangos de tolerancias son más flexibles reduciendo el costo de los equipos. Otros factores importantes a tener en cuenta son el bajo ruido de operación y la prolongación de la vida útil de los componentes, de esta manera los requerimientos de mantenimiento se reducen. En el banco de control de fuerza la presión de operación es de 1400 psi.

² MERRITT, Herbert E. Supply pressure and power element selection. En: Hydraulic control systems New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967. p. 225–229.

1.5 POTENCIA MÁXIMA A TRANSMITIR CON UNA SERVOVÁLVULA³

Existen unas condiciones en las que es posible entregar la potencia máxima a la carga a través de la servoválvula. Para simplificar el modelo se supondrá que el centro de la servoválvula es crítico y que el flujo entregado por ella se puede representar por medio de la siguiente ecuación:

$$Q_L = C_d w x_v \sqrt{\frac{P_s - P_L}{\rho}} \quad (\text{Ec 1})$$

Dónde:

Q_L	Caudal de carga
C_d	Coefficiente de descarga
w	Gradiente del área del orificio
x_v	Desplazamiento del carretel
P_s	Presión de suministro
P_L	Presión de carga

De esta forma la potencia transmitida a la carga será:

$$(hp)_{carga} = P_L Q_L = C_d w x_v \left(\frac{P_s}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} P_s \left(\frac{P_L}{P_s}\right) \left(1 - \frac{P_L}{P_s}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec 2})$$

La potencia transmitida a la carga es cero cuando $P_L = P_s$ ya que la caída de presión entre los orificios de la válvula se hace nula ocasionando que no haya flujo que genere movimiento sobre la carga. Cuando $P_L = 0$ significa que no hay carga que exija al sistema potencia alguna. Matemáticamente se puede hallar la presión a la cual la potencia es máxima:

$$\text{Cuando } \frac{d(hp)_{load}}{dP_L} = 0 \quad \boxed{P_L = \frac{2}{3} P_s}$$

³ Ibid.

De esta manera la máxima potencia es transmitida a la carga cuando la presión debida a la carga es dos tercios la presión de suministro. Lo anterior se cumple especialmente cuando la presión exigida por la carga tiende a un valor constante, en aplicaciones donde este valor cambie, como en ensayos de resistencia de materiales, la presión debido a la carga va a pasar por este punto de máxima potencia pero lo hará de forma muy rápida sin que se perciba un incremento en la eficiencia. En conclusión la expresión para la potencia máxima será:

$$(hp)_{carga,max} = \frac{2C_d w x_{v,max}}{\sqrt{\rho}} \left(\frac{P_s}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Ec 3})$$

1.6 OBSERVACIONES DENTRO DEL DISEÑO DE SERVOS⁴

Se presentan algunas recomendaciones a tener en cuenta durante la fase de diseño del servo:

1) Para la selección de la presión de suministro se recomienda seguir recomendaciones similares a las presentadas en el punto 2 de este capítulo. Éste valor es un parámetro principal para calcular algunos valores como el desplazamiento volumétrico del motor hidráulico, la relación de transmisión (en caso de usarse), el coeficiente de amortiguamiento, la frecuencia natural de la carga hidráulica y la ganancia de flujo de la servoválvula.

2) El detector de error o punto de comparación debe manejar la precisión requerida del proceso. Parte del error registrado se puede adjudicar a otras fuentes de error, tales como, desviaciones de los amplificadores y la servoválvula, tolerancias de los componentes y no-linealidades de los elementos como histéresis, banda muerta y fricción.

3) Las ganancias de los amplificadores y acondicionadores de señal deben ser escogidas de tal forma que no afecten la estabilidad del sistema.

4) Es recomendable que las ganancias tengan un valor relativamente mayor si se encuentran cerca al detector de error, esto disminuirá el error debido a desviaciones en los amplificadores.

⁴ MERRITT, Herbert E. Servo design considerations. En: Hydraulic control systems New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967. p. 261–265.

5) Corroborar las especificaciones del sistema respecto a los valores previamente establecidos.

6) Cuando se hayan establecido todas las ganancias del sistema se deben identificar las no-linealidades del proceso que limiten la respuesta del sistema.

7) Se recomienda asegurarse de que los elementos no tengan saturación, para garantizar que la asunción de linealidad es correcta y que el comportamiento del sistema será como se espera.

8) Se debe hacer una revisión de la existencia de picos de presión en el estado transitorio que puedan llegar a afectar los elementos del circuito.

1.7 SERVOVÁLVULA ELECTROHIDRÁULICA

Los dispositivos eléctricos se caracterizan por la facilidad en la que se pueden manipular y amplificar las señales de entrada y salida. Por otro lado los dispositivos hidráulicos ofrecen altos niveles de potencia a través de unidades compactas, característica que los ha convertido en una fuente de potencia muy preferida en la industria. Para poder enlazar la precisión con el manejo de grandes potencias se creó la servoválvula electrohidráulica, en la cual las señales eléctricas de baja potencia se traducen en movimiento del carrete, que a su vez controla el flujo y/o presión del actuador hidráulico. De éste modo la servoválvula sirve de interfaz entre la unidad de potencia y el elemento de accionamiento.

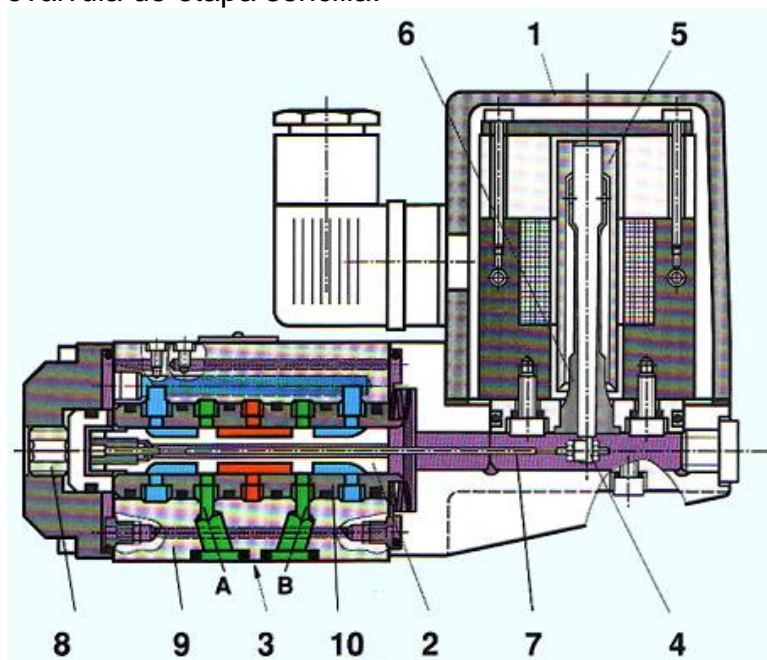
Las servoválvulas son una opción comúnmente utilizada dentro de los sistemas de control automático. Se pueden controlar diversas magnitudes, siendo las principales posición, ángulo de rotación, velocidad lineal, velocidad angular, caudal, presión y fuerza. Sus principales características son los rápidos tiempos de respuesta (generalmente menos de 10 ms para la respuesta al escalón), buena linealidad y una histéresis baja.

Con frecuencia la servoválvula es un punto de constante supervisión cuando se presentan errores en el sistema debido a que conecta las porciones electrónica e hidromecánica del sistema. Debido a esto los fabricantes han enfocado el diseño a favor de la mantenibilidad del equipo, permitiendo realizar recambio de partes, especialmente aquellas más propensas a fallar.

1.7.1 Tipos de servoválvulas electrohidráulicas. Se pueden clasificar de una forma general según su número de etapas.

1.7.1.1 Servoválvulas de etapa sencilla. En las de etapa sencilla un motor de torsión está directamente unido a una válvula de carrete y se encarga de posicionarla. Éste tipo de válvulas está limitado por la capacidad de potencia del motor de torsión que deriva en la reducción de la capacidad de flujo del elemento y en algunos casos, puede ocasionar problemas de inestabilidad.

Figura 4. Servoválvula de etapa sencilla.



Fuente: MANNESMANN REXROTH, Técnica de válvulas proporcionales y de servoválvulas.

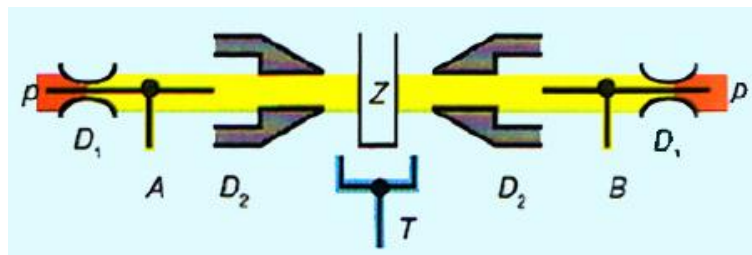
El motor de torsión (1) recibe la señal eléctrica y la transmite en forma de movimiento lineal al perno (4). La armadura (5), la lengüeta (6) y el perno (4) están unidos rígidamente. El perno (4) está comunicado a la corredera (2) a través del vástago (7). La rigidez de la lengüeta actúa contra la fuerza del motor de torsión cuando el perno se desvía. De este modo se logra centrar nuevamente el carrete (2).

La desviación de la corredera y el flujo a través de la servoválvula son proporcionales a la señal eléctrica transmitida al motor de torsión.

El punto de cero hidráulico se ajusta a través del tornillo de calibración (8), el cual varía el desplazamiento de la camisa de la corredera en forma relativa a esta última.

1.7.1.2 Servoválvulas de dos etapas. Éstas cuentan con un preamplificador hidráulico (figura 5) que multiplica considerablemente la capacidad de fuerza del motor de torsión, permitiéndole soportar las fuerzas de flujo, de fricción y aquellas producidas por la aceleración o las vibraciones. Este tipo de servoválvulas superan los problemas encontrados en las de etapa sencilla.

Figura 5. Principio del amplificador hidráulico



Fuente: REXROTH, Técnica de válvulas proporcionales y de servoválvulas.

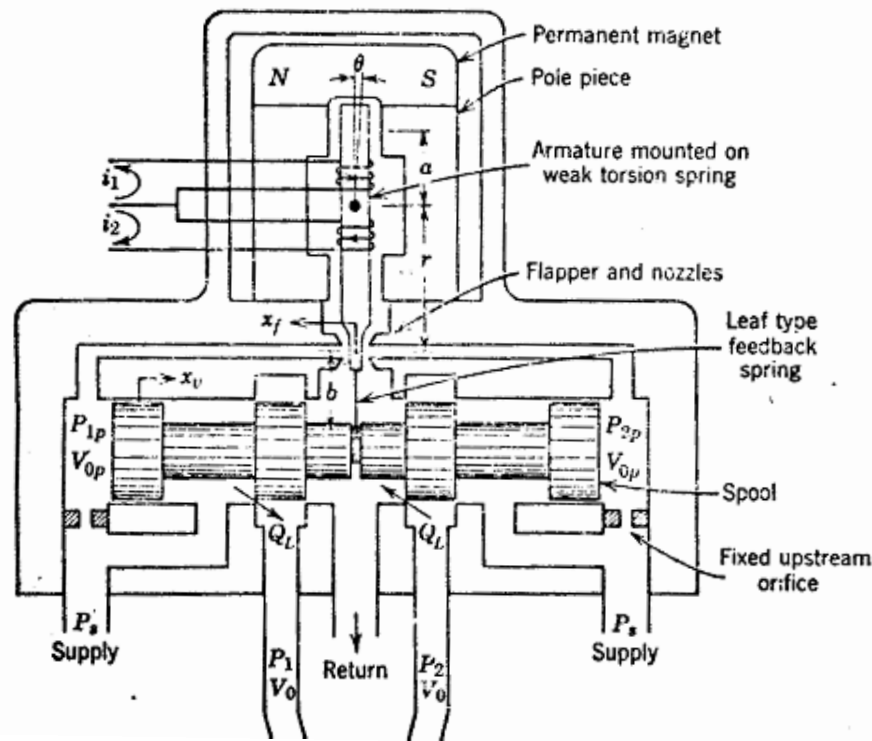
La etapa de pre amplificación se realiza por medio de válvulas que pueden ser de tipo boquilla, tubo inyector (jet pipe) o de carrete, mientras que la segunda etapa se ejecuta generalmente con válvulas de carrete.

Las servoválvulas también se pueden clasificar según el tipo de realimentación utilizado. Puede ser de forma mecánica, en la cual se utiliza la posición del carrete, la presión o el flujo aplicado a la carga como señal de referencia, o también es posible realizar una realimentación eléctrica a través de un transformador diferencial de variación lineal (LVDT) articulado a la servoválvula, el cual mide la posición de la corredera principal.

En la realimentación mecánica, la señal que se utiliza con mayor frecuencia para el proceso de retroalimentación es la posición del carrete.

1.7.1.3 Servoválvula con realimentación mecánica de la posición. Partiendo de la forma como se adquiere la señal mencionada, se presentan tres tipos: realimentación directa, realimentación de fuerza y carrete centrado por resortes. En la realimentación directa, el carrete principal sigue a la válvula de la primera etapa en una relación 1 a 1; éste tipo de construcción se conoce también como seguidor hidráulico. La realimentación de fuerza consiste en que la posición del carrete principal es transformada en fuerza a través de un resorte de retroalimentación que está conectado en uno de sus extremos con el carrete y en el otro con la armadura del motor de torsión, de esta forma los momentos producidos por cada una de estas partes se equilibran. El último tipo de retroalimentación usa dos resortes en los extremos del carrete para equilibrar el diferencial de presión producido en la etapa piloto, éste tipo de configuración es menos usada que las dos primeras.

Figura 6. Servoválvula de dos etapas con realimentación mecánica de la posición.

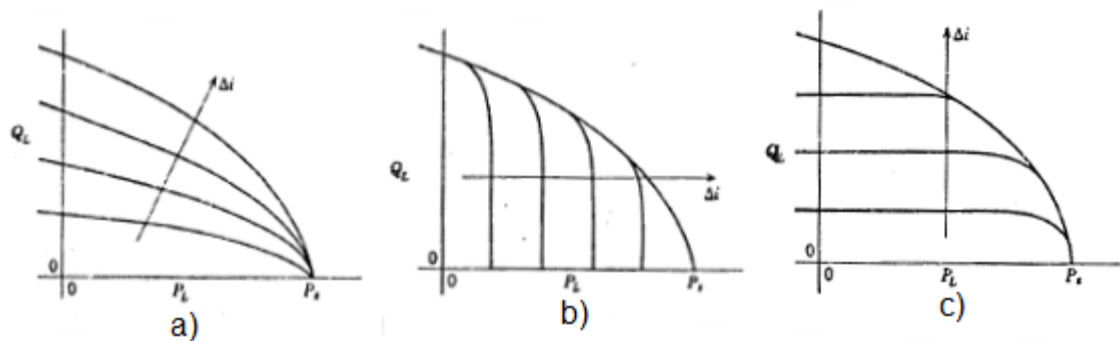


Fuente: Merritt, Hydraulic control systems.

1.7.1.4 Servoválvula con realimentación de la presión. Las servoválvulas que usan la presión de carga como señal de realimentación tratan de controlar la diferencia de presión producida por la carga. Pasajes internos dirigen la presión de carga hacia la primera etapa donde la fuerza resultante es balanceada contra la fuerza provocada por la corriente de entrada en el motor de torsión.

1.7.1.5 Servoválvula con realimentación del flujo. Aquellas servoválvulas que usan el flujo de carga como señal realimentada, llevan internamente un dispositivo que mide el flujo y lo convierte en fuerza, la cual es luego balanceada con la fuerza provocada por la corriente de entrada en el motor.

Figura 7. Curvas de Presión – Caudal para servoválvulas de dos etapas usando: a) retroalimentación de la posición; b) retroalimentación de la presión de carga; c) retroalimentación del flujo debido a la carga.

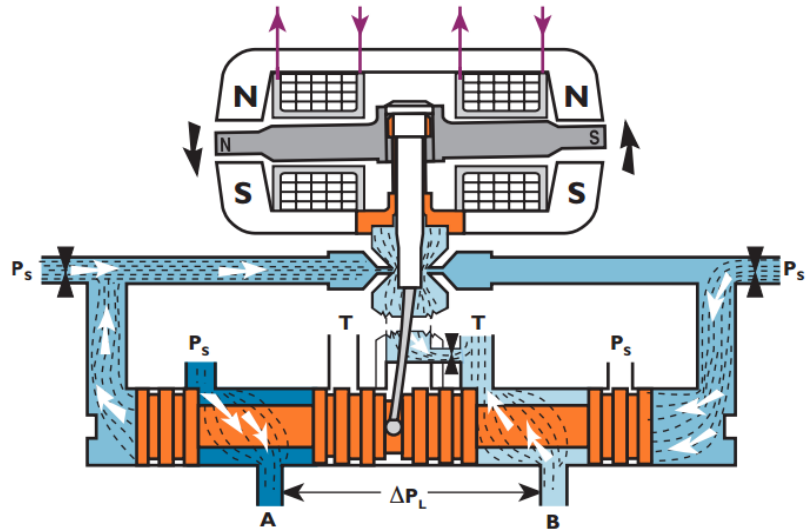


Fuente: Merritt, Hydraulic control systems.

1.7.2 Funcionamiento de una servoválvula de dos etapas con realimentación mecánica.

- a) La corriente eléctrica que pasa por el embobinado del motor de torsión crea fuerzas magnéticas en los extremos de la armadura (figura 8).
- b) El ensamble armadura-lengüeta gira alrededor del soporte.
- c) La lengüeta cierra una de las boquillas aumentando la restricción al flujo que pasa por esta. Como consecuencia se crea un desequilibrio en las cámaras ubicadas en los extremos de la corredera (figura 9).

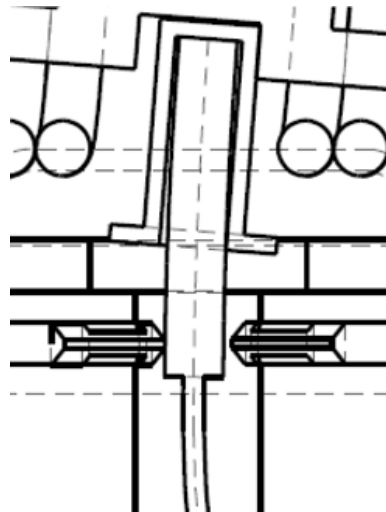
Figura 8. Respuesta de la servoválvula al cambio de corriente eléctrica.



Fuente: MOOG. Electrohydraulic servo valves a technical look.

- d) Debido al diferencial de presión en sus extremos, el carrete se mueve y permite la comunicación entre el suministro de presión P_s y uno de los puertos de control y también entre el puerto a tanque y el otro puerto de control.
- e) El carrete desplaza la esfera que está al final del resorte de realimentación creando un torque de reacción en el conjunto armadura-lengüeta, de forma que éste tratará de recuperar su posición original.

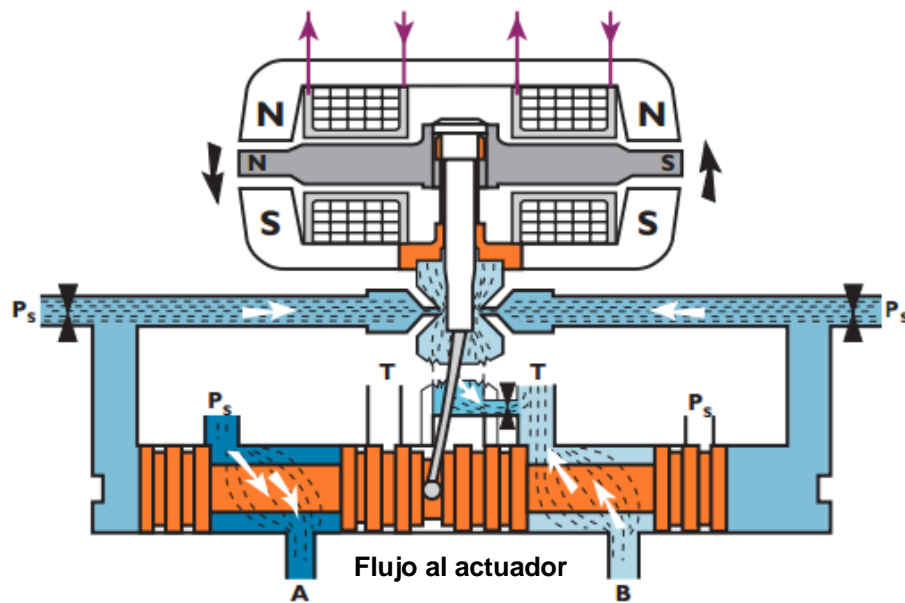
Figura 9 Detalle del cierre de la boquilla.



Fuente: University of Minnesota. Fluid power control lab – course guide.

- f) A medida que el torque de reacción se va equilibrando con el torque generado por las fuerzas magnéticas, el conjunto armadura-lengüeta regresa a su posición inicial.
- g) La corredera se detiene en la posición donde el torque creado por el resorte de realimentación se iguala con el torque generado por la corriente eléctrica. En este punto las presiones en los extremos de la corredera se igualan.
- h) De esta forma, la posición de la corredera es proporcional a la corriente eléctrica introducida.
- i) A presiones constantes, el flujo enviado a la carga también es proporcional a la posición de la corredera.

Figura 10. Recuperación de la posición inicial de la armadura.



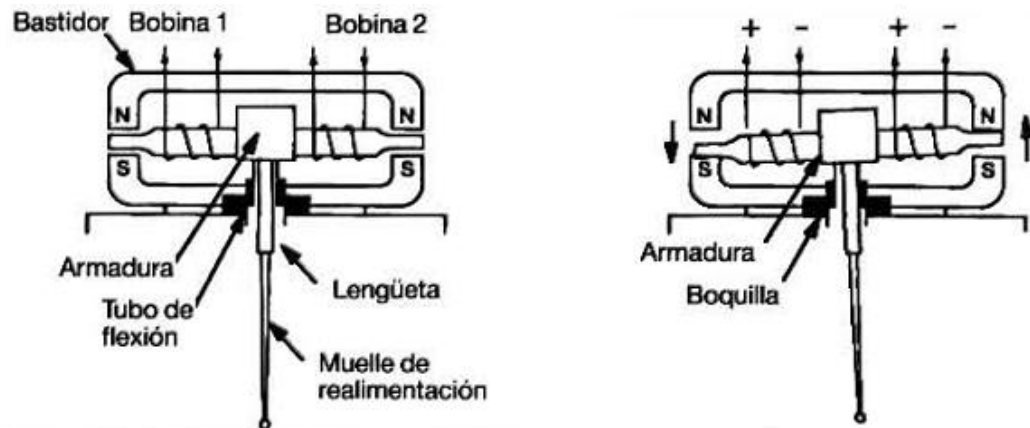
Fuente: MOOG. Electrohydraulic servo valves a technical look.

1.7.3 Partes principales de una servoválvula. En lo que se refiere a una servoválvula de dos etapas con realimentación mecánica se destacan tres partes principales: el motor de torsión, el amplificador hidráulico y la corredera.

1.7.3.1 Motor de torsión. El motor de torsión pasó en sus principios por una serie de propuestas, mejoras y adecuaciones, de las cuales el modelo que mostró mejor desempeño fue el motor de imán permanente. El motor de torsión produce un movimiento rotatorio y el torque generado es proporcional a la corriente eléctrica recibida. Los motores de torsión se clasifican según sus condiciones de funcionamiento, ya que pueden estar en contacto con el aceite hidráulico o no, los que no lo están se conocen como motores de mando seco y su contraparte como motor sumergido en aceite. Los motores de torsión secos deben estar contruidos de forma que se garantice la hermeticidad del componente. Los motores sumergidos en aceite tienen la ventaja de mantenerse refrigerados por el fluido hidráulico, sin embargo presentan la gran desventaja de atraer las partículas ferrosas contaminantes presentes en el aceite que se van acumulando en los entrehierros y con el tiempo impedirán el correcto funcionamiento de la servoválvula.

El motor de torsión consiste en una armadura que acopla dos imanes permanentes rodeados por un bastidor y a su vez el conjunto boquilla-lengüeta. Al aplicarse corriente eléctrica a través de las bobinas la armadura se magnetiza y cada uno de sus extremos se polariza haciendo girar la armadura.

Figura 11. Motor de torsión de imán permanente.



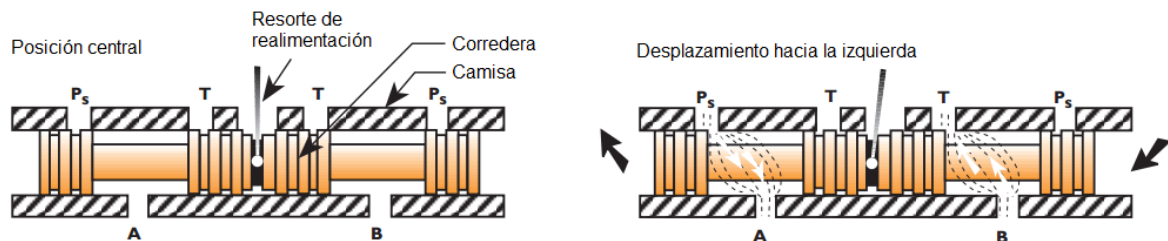
Fuente: VICKERS. Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada.

1.7.3.2 Amplificador hidráulico. El conjunto lengüeta-boquilla y el resorte de realimentación conforman las piezas fundamentales de éste componente. Dos boquillas comunican el fluido presurizado a lado y lado de la lengüeta. Dicho flujo proviene del suministro de presión de la válvula compuesto por un orificio fijo y un filtro. El caudal que llega a las boquillas es limitado por los orificios fijos, y los filtros previenen cualquier taponamiento causado por las suciedades que pudieran

haber quedado dispersos en el aceite, a pesar del proceso de depuración que se ha hecho previamente antes de llegar a la servoválvula. Un puerto adicional o quinto orificio es agregado en algunas válvulas para tener la opción de suministrar la presión piloto a las boquillas. En cada una de las cámaras ubicadas en los extremos de la corredera se ejerce una presión que depende de la restricción de caudal ejercida en las boquillas, la cual viene controlada a su vez por la posición de la lengüeta. Cuando no hay señal eléctrica alguna que excite el motor de torsión, la lengüeta queda ubicada en la mitad de las dos boquillas y las presiones en los extremos del carrete serán iguales.

1.7.3.3 Carrete. Ésta pieza se mueve dentro de otro componente llamado camisa, el cual permanece fijo. Sobre la camisa están mecanizados los puertos de suministro, descarga y los que se comunican al actuador (comúnmente llamados puertos A y B). Dependiendo del sentido de movimiento de la corredera dentro de la camisa, se crearán vías de flujo entre los puertos mencionados anteriormente. El control del flujo que pasa a través de la válvula se consigue variando la posición relativa entre la corredera y la camisa, descubriendo en mayor o menor grado los orificios.

Figura 12. Movimiento del carrete dentro de la camisa de la válvula.



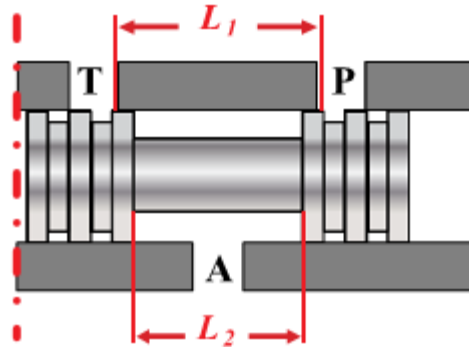
Fuente: MOOG. Electrohydraulic servo valves a technical look.

Una característica principal de las servoválvulas es la condición en la posición central, que se puede explicar como “la posición relativa del extremo del resalte de la corredera y del extremo del orificio en la posición nula”⁵. De ella dependerá la respuesta de la servoválvula en la zona central.

Teniendo en cuenta que L_1 es la longitud de los resaltes del carrete y L_2 la longitud entre los puertos se puede definir la condición en la posición central de la válvula.

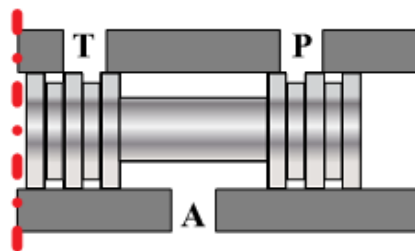
⁵ VICKERS. Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada. Barcelona, 1990. E-B-9052.

Figura 13. Detalle de los resaltos y los puertos del carrete.

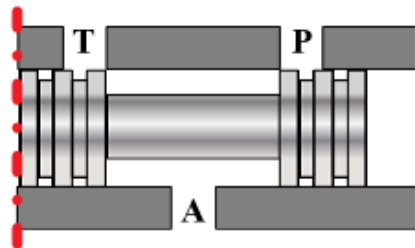


Fuente: LEDEZMA PÉREZ, Job Angel. Controle robusto de força em atuadores hidráulicos aplicando a teoria de realimentação quantitativa.

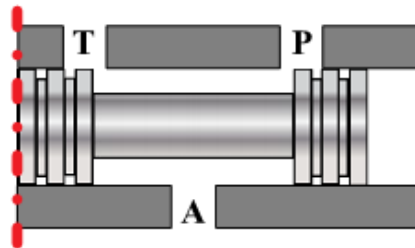
Figura 14. Tipos de centros de una servoválvula.



Centro Cerrado
Supercrítico
(Sobreposición positiva)



Centro Cerrado Crítico
(Sin sobreposición)
 $L_1 = L_2$



Centro Abierto Sub-crítico
(Sobreposición negativa)
 $L_1 < L_2$

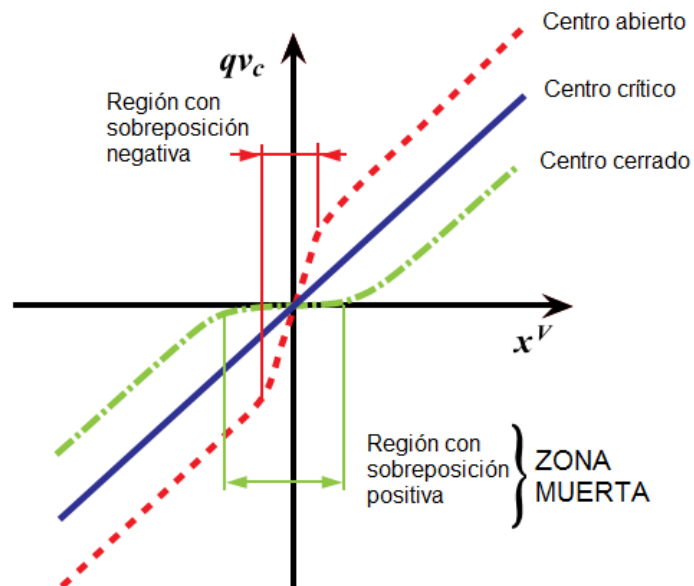
Fuente: LEDEZMA PÉREZ, Job Angel. Controle robusto de força em atuadores hidráulicos aplicando a teoria de realimentação quantitativa.

Las servoválvulas de centro cerrado tienen un comportamiento en la zona central caracterizado por ausencia de respuesta en el sistema provocando que una pequeña entrada o una señal de error no tenga ningún efecto hasta que el extremo del resalte de la corredera no descubra el orificio, a este rango se le conoce como banda muerta. En servoválvulas de centro cerrado, según VICKERS⁶, es necesaria una señal de menos del 4% de la corriente nominal para permitir el paso del caudal.

Las válvulas con centro crítico requieren mayor precisión en el proceso de mecanizado para que el extremo del resalte coincida exactamente con el extremo del orificio y de esta forma se elimine la zona muerta. Este tipo de centro aumenta considerablemente la sensibilidad en la posición neutra.

Si en una gráfica se representan los diferentes valores de flujo conseguidos con la respectiva señal de corriente se podrá obtener una característica muy importante, a saber, la ganancia de flujo de la servoválvula, que caracterizará la relación de proporcionalidad.

Figura 15. Curva caudal vs corriente para los diferentes tipos de centro.



Fuente: LEDEZMA PÉREZ, Job Angel. Controle robusto de força em atuadores hidráulicos aplicando a teoria de realimentação quantitativa, modificado por los autores.

⁶ VICKERS. Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada. Barcelona, 1990, 18 p. E-B-9052.

1.8 TRANSDUCTORES.

Dentro del grupo electrónico, los transductores juegan un papel importante. Su principio de funcionamiento varía dependiendo de la aplicación, siendo la posición, velocidad y fuerza las magnitudes que comúnmente se controlan. Su función es transformar una señal de entrada en otra de salida de diferente naturaleza. Comúnmente la señal de salida es una diferencia de potencial eléctrico, en tal caso existen varios métodos para emitir dicha señal. Puede cambiar directamente con la magnitud medida, variando la forma de onda forma según el instrumento. En otros casos el sensor modula la amplitud de una onda portadora y de esta manera transmite los datos medidos. Este tipo de salida requiere de un discriminador que recupere la información concerniente a la fase y amplitud de la señal. También existe la Modulación por Ancho de Pulso (PWM, por sus siglas en inglés), la cual, como su nombre lo indica, modula el ancho de cada periodo de un tren de pulsos. Así la cantidad medida es muestreada en intervalos discretos. Este tipo de salida es comunicada a dispositivos que reciben señales digitales.

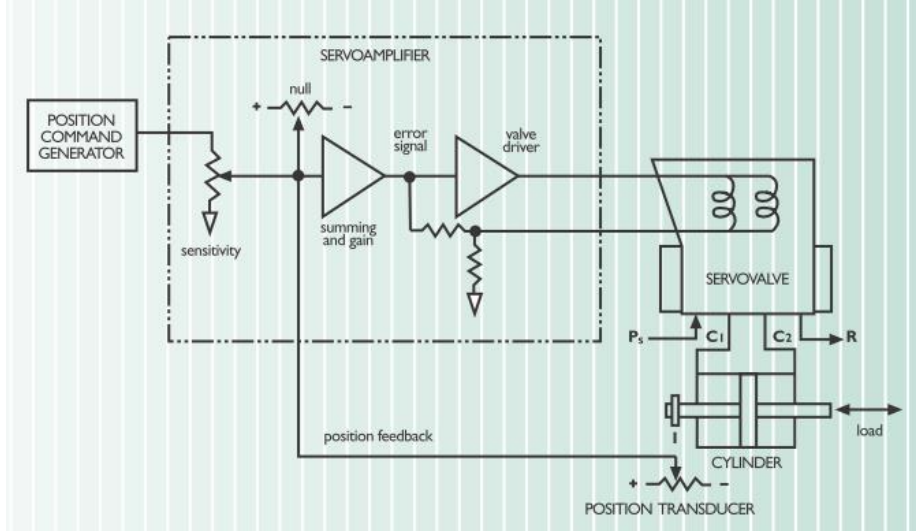
Dependiendo de la variable a medir existen ciertos transductores cuyo uso puede ser más conveniente que otras opciones, de esta manera para medir la posición, el transductor por excelencia es un LVDT, para medir velocidad angular se puede usar un dinamo taquimétrica, para medir velocidad lineal se puede utilizar un transductor de velocidad lineal o medir indirectamente la velocidad a través de la manipulación de la señal de posición y si se prefiere censar el caudal, lo más recomendable es usar detectores de caudal tipo bicono. Si la idea es controlar fuerza se pueden usar transductores de presión o celdas de carga.

1.9 CONTROL POR MEDIO DE SERVOS.

Los sistemas controlados por medio de servos presentan, generalmente, configuración en lazo cerrado. Las principales magnitudes físicas a las cuales esta aplicado el control son posición, velocidad y fuerza, debido a la influencia de dichas variables en los procesos industriales y a la alta potencia que demandan.

1.9.1 Control de posición. El objetivo principal es modular la posición o el ángulo de rotación de un actuador, sea un pistón o un motor hidráulico, para lo cual la servoválvula trabaja la mayoría del tiempo en la zona central, por lo tanto es recomendable utilizar un carrete de centro crítico de forma que se pueda controlar la variable con precisión. Esta configuración es muy utilizada en la industria y la servoválvula provee la capacidad de operar en frecuencias de trabajo altas (más de 100 c.p.s.) con un tiempo de respuesta aproximado de 60 ms y una histéresis menor al 5%.

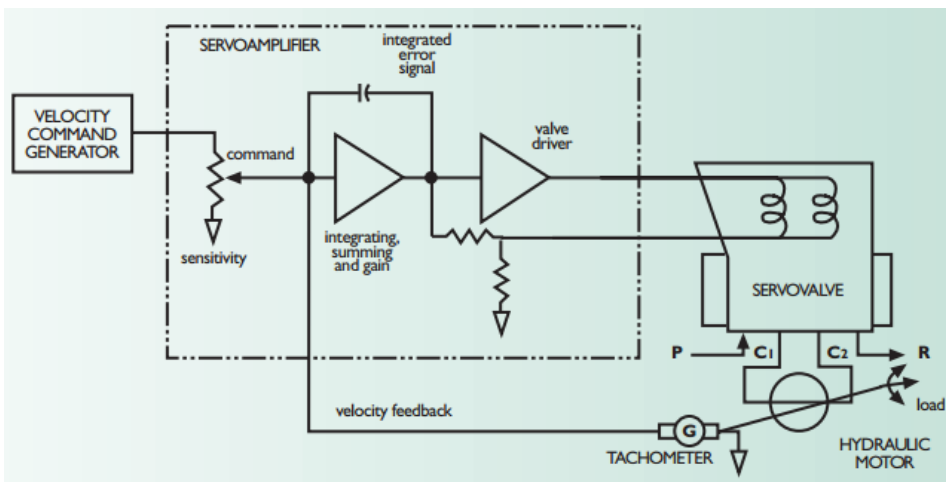
Figura 16. Esquema general de un servo de posición.



Fuente: MOOG. Electrohydraulic servovalves a technical look.

1.9.2. Control de velocidad. Por medio de esta configuración se puede controlar la velocidad lineal o angular del actuador. En este caso se modula el caudal que entra al actuador. Se pueden usar servoválvulas direccionales o servoválvulas controladoras de caudal, las cuales actúan como restricciones ajustables electrónicamente. Medir directamente la velocidad para realizar la realimentación aporta mayor precisión que usar el caudal ya que si se usa éste último se debe tener en cuenta que el sistema tiene fugas en sus conexiones y componentes.

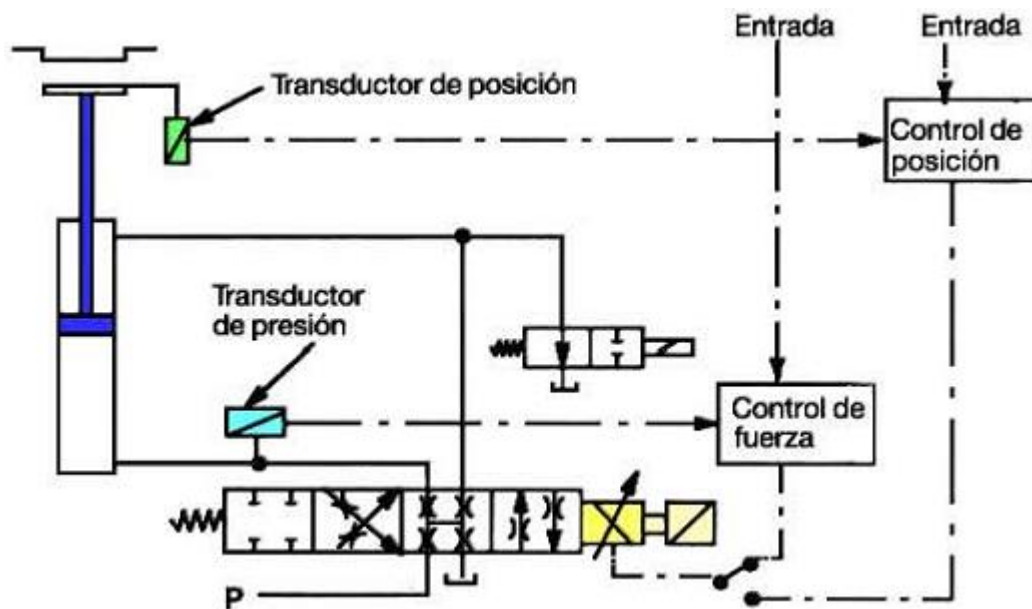
Figura 17 Esquema de un servo de velocidad.



Fuente: MOOG. Electrohydraulic servovalves a technical look.

1.9.3 Control de fuerza. Se puede controlar la fuerza, la presión o el par de salida del actuador. La capacidad de las válvulas para mantener presiones en condiciones variables permiten garantizar al proceso mayor precisión, sin embargo factores como la viscosidad del fluido, los cambios en el caudal o las cargas reactivas en el actuador pueden influir de manera importante en la respuesta del sistema. Es recomendable usar cilindros de doble vástago para evitar la compensación de presión debido al diferencial de área en el pistón. El tipo de control a utilizar preferiblemente es de tipo integrador (PI) debido a las fugas constantes en los elementos involucrados en el proceso. De esta forma, aún en ausencia de error se puede mantener el nivel de presión requerido. En este tipo de sistemas, generalmente se puede controlar la posición y la fuerza del actuador simultáneamente.

Figura 18. Esquema de un servo de fuerza.



Fuente: VICKERS. Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada.

2. BANCO DE CONTROL DE FUERZA

El banco de control de fuerza del Laboratorio de Control Automático cuenta con un circuito electrohidráulico que consiste en una servoválvula direccional que dirige el caudal hacia un cilindro de doble vástago y doble efecto. Éste cilindro realiza una fuerza de compresión sobre una celda de carga que está apoyada en una placa de amortiguación, tanto el cilindro como la celda de carga están apoyadas sobre una estructura con el fin de evitar, en lo posible, que se presenten deflexiones en la base que puedan generar errores en el proceso de medición.

El proceso de control se lleva a cabo a través del software LabVIEW donde se programa el algoritmo de control utilizando las herramientas que tiene incorporadas. Luego del proceso realizado por el algoritmo se obtiene la señal de modulación que será comunicada a la tarjeta de adquisición de datos, la cual sirve de interfaz entre el controlador, el sensor y el actuador (figura 19). Se utilizó inicialmente un hardware Arduino Mega 2560 para tal fin, posteriormente, gracias a la gestión realizada por el profesor Abel Parada y la Escuela de Ingeniería Mecánica se adquirió una tarjeta DAQ NI-USB 6212 de la empresa National Instruments, cuyo desempeño garantiza una mayor exactitud que la tarjeta Arduino. Una interfaz Hombre-Máquina (HMI, por sus siglas en inglés), desarrollada en el entorno LabVIEW, es el medio a través del cual el usuario interactúa con el banco, permitiéndole introducir y visualizar gráfica y numéricamente las magnitudes involucradas en el proceso de control.

Figura 19. Esquema básico del control aplicado al banco de control de fuerza.

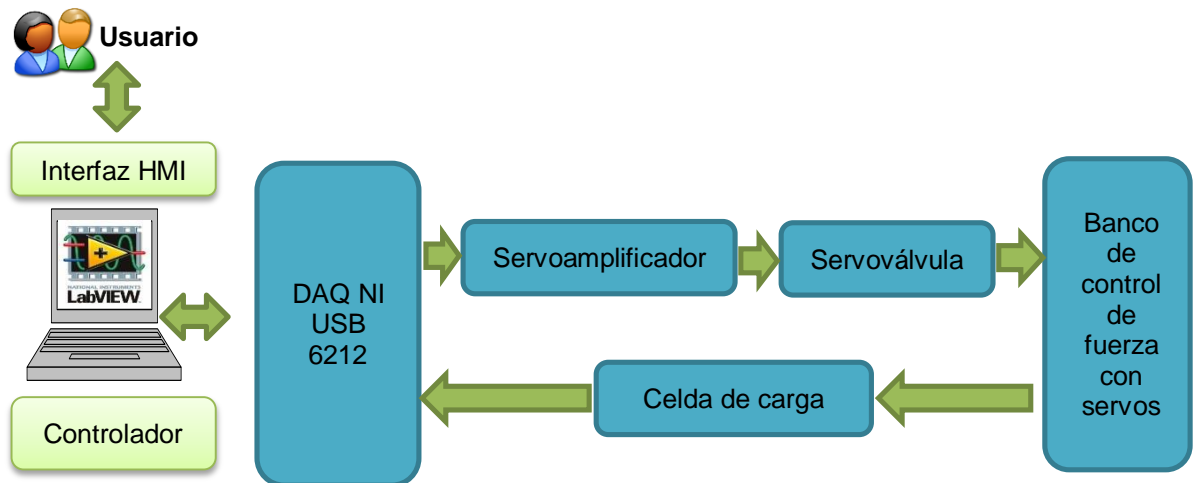


Figura 20. Esquema general del banco.

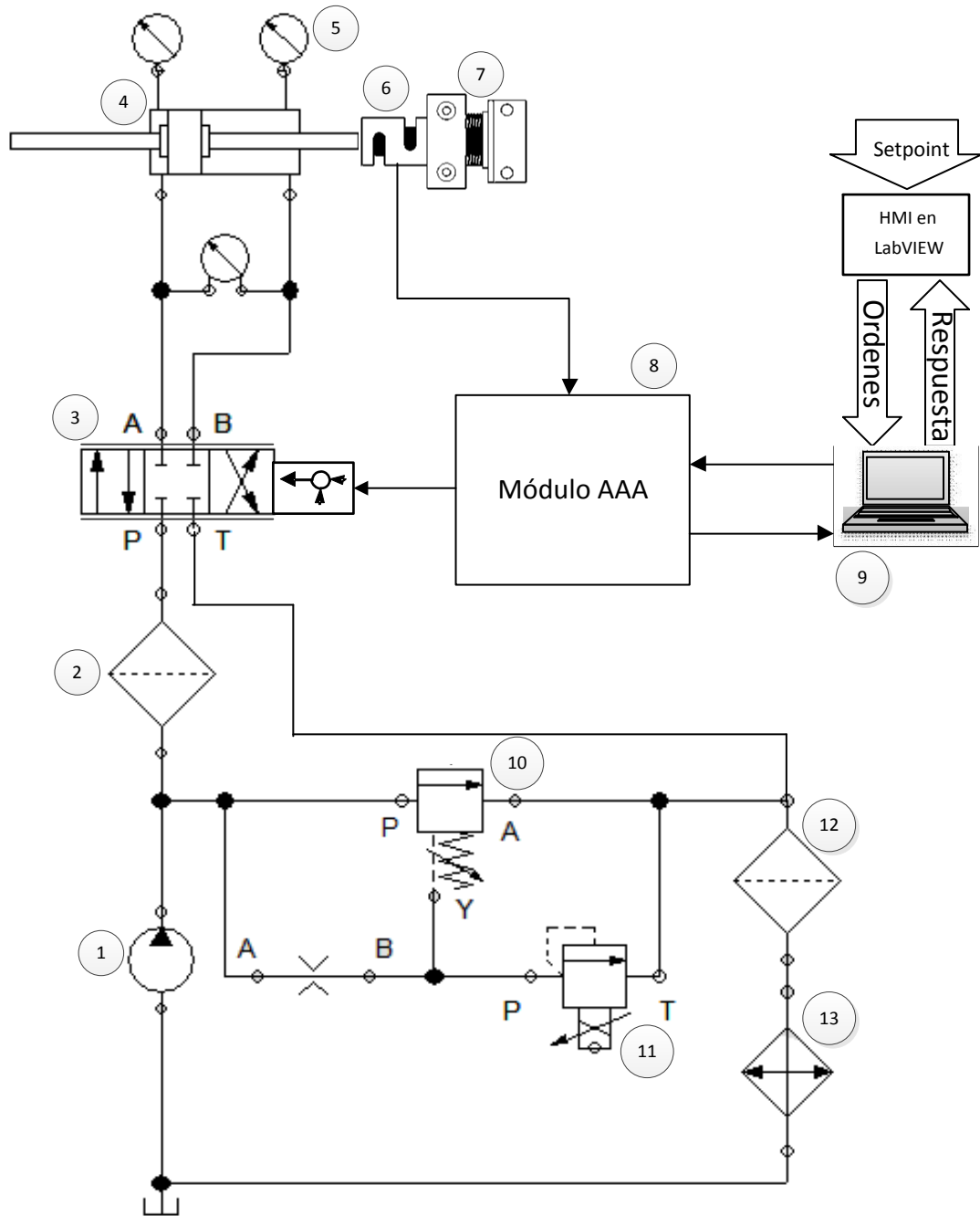


Tabla 1. Elementos del banco de control de fuerza

N°	Nombre	Especificaciones	
1	Bomba de paletas	Fabricante: Vickers Ref: V10-1P2P	$N_{max} = 4500$ r.p.m. $P_{max} = 2500$ psi $Q_{@ N_{max} y P_{max}} = 7.3$ gpm
2	Filtro de alta presión		
3	Servoválvula direccional	Fabricante: Moog Serie: 62	Rango de flujo= 2,5 – 20 gpm $\Delta P_{Nominal} = 1000$ psi Etapa piloto: Tipo lengüeta-boquilla
4	Cilindro hidráulico	Doble efecto y doble vástago $A_p = 1,948$ in ²	$A_v = 1,636$ in ² Carrera = 0,945 in
5	Manómetro	Rango de medida: 0 – 5000 psi (0 – 350 kg/cm ²)	Alcance: 5000 psi (350 kg/cm ²) Resolución: 200 psi – 10 kg/cm ²
6	Celda de carga tipo S	Fabricante: Lexus Electronics Cap. máxima = 3 t	Sensibilidad = $2 \pm 0.2\%$ mV/V Tipo de protección: IP67/IP68
7	Muelle	Número de muelles: 4	
8	Módulo de Alimentación, Amplificación y Almacenamiento (AAA)	Tarjeta amplificadora para la celda de carga	Máxima ganancia: 10.000 Rango de voltajes de salida: 5V, 10V y 12V.
		Tarjeta de adquisición de datos DAQ NI-USB 6212	Entradas análogas: 16 Salidas análogas: 2 Entradas/Salidas digitales: 32
		Tarjeta amplificadora de la servoválvula	Máxima ganancia: 1,3
		Fuente de voltaje	Voltajes de alimentación de: +12V, -12V, +5V y 3,3V.
9	Computador portátil	LabVIEW 2009 instalado con módulo de diseño de control y simulación.	
10	Válvula de seguridad de taraje ajustable		
11	Válvula de seguridad proporcional	Fabricante: Vickers Ref: KCG-3-250-DZM	Rango de control de presión: 5 – 250 bar - (73 – 3625 psi)
12	Filtro Baldwin BT261	Filtro sellado de aceite de flujo completo.	Cuenta con válvula anti-drenaje.
13	Intercambiador de calor	Fabricante: Thermal Transfer Products Ref: EK-514-O	Capacidad de transferencia de calor: 10 hp (7,36 kW)

La unidad de potencia hidráulica que alimenta el circuito utiliza una bomba de paletas de desplazamiento fijo, con caudal de 5 gpm y presión de operación de 2000 psi. Se hace uso de un filtro de alta presión con el fin de evitar obstrucciones en la servoválvula y una válvula reductora de presión proporcional para ajustar el valor de presión de operación. Un esquema general del circuito se relaciona en la figura 20 y en la tabla 1 se realiza una descripción básica de cada uno de sus componentes. Para realizar una descripción más específica, éstos se clasificarán en subsistemas de acuerdo a la función que cumplen:

Figura 21. Descripción del banco por subsistemas.



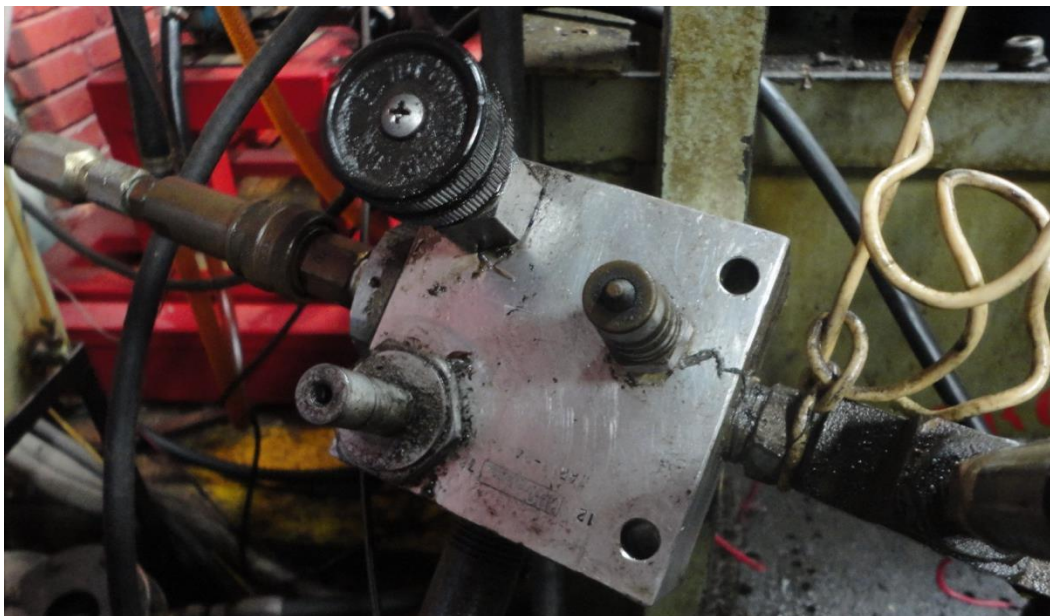
2.1 SUBSISTEMA HIDRÁULICO

Este subsistema se divide en 4 sistemas: Sistema de regulación de presión, Sistema de filtrado, Sistema de refrigeración y Paquete de potencia. Todos aquellos elementos que participen dentro del circuito hidráulico y no estén involucrados dentro del proceso de control hacen parte de esta división.

2.1.1 Sistema de regulación de presión. Lo integran los componentes que cumplen la función de limitar la presión de operación del banco de control de fuerza. Esta tarea se lleva a cabo mediante una válvula de seguridad análoga y una de las mismas características pero proporcional.

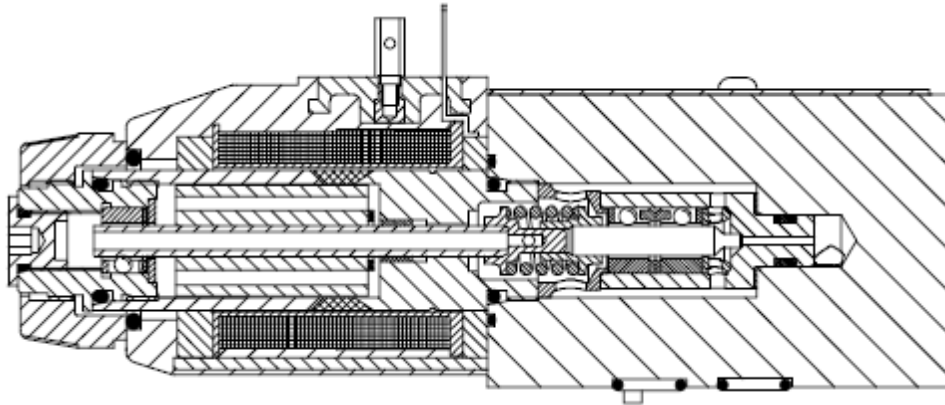
2.1.1.1 Válvula de seguridad. Ésta se encuentra insertada dentro de un manifold que contiene a su vez una válvula anti retorno. La presión de taraje se puede variar manualmente mediante una perilla.

Figura 22. Válvula de alivio.



2.1.1.2 Válvula de seguridad proporcional. Esta válvula permite configurar el sistema en diferentes niveles de presión mediante una orden eléctrica. La válvula utilizada es marca Vickers modelo KCG-3-250D y maneja un rango de presión entre 5 y 250 bares. Este componente tiene implementado un circuito eléctrico de control manual compuesto por una resistencia cerámica disipadora de calor de $15 \Omega - \frac{1}{2} W$, un reductor de voltaje y un potenciómetro mediante el cual se puede variar el nivel de presión. La resistencia asegura un valor de corriente moderado para la operación de la válvula reguladora proporcional. Este valor se controla en $0,85 [A]$ para cumplir con el valor menor a $1 [A]$ recomendado por el fabricante.

Figura 23. Válvula de seguridad proporcional KCG-3-250D (vista en corte).



Fuente: Eaton.

2.1.2 Sistema de filtrado. Debido a la vulnerabilidad de las servoválvulas frente a la suciedad del aceite, el sistema cuenta con dos filtros, uno de alta presión ubicado antes de la servoválvula y otro de baja presión acoplado a la bomba en paralelo.

2.1.2.1 Filtro de baja presión. Se utiliza un filtro marca Baldwin de referencia BT261. Es un filtro sellado de aceite de flujo completo, con válvula anti drenaje.

Figura 24. Filtro de baja presión.



Fuente: Baldwin filters.

2.1.2.2 Filtro de alta presión. El uso de la servoválvula exige filtración especial dentro del circuito, siendo las partículas con tamaños similares a los del juego de ajuste las más críticas. El ensuciamiento genera aumento en las fugas, variación en los tiempos de conmutación, fallas y variación en las características de las válvulas. El filtro utilizado es de tipo malla.

Figura 25. Filtro de alta presión.



2.1.3 Sistema de refrigeración. Los sistemas de actuadores controlados por válvula tienen la ventaja de almacenar menos aceite en las líneas de conducción que los sistemas de actuadores controlados por bomba, sin embargo, tienen la desventaja de presentar temperaturas de operación elevadas, por lo que se hace necesario utilizar un sistema de refrigeración compuesto por un intercambiador de calor y una torre de enfriamiento.

2.1.3.1 Intercambiador de calor. El intercambiador de casco y tubos utilizado es de un solo paso y refrigera el aceite por medio de agua, tiene una capacidad de transferencia de calor de 400 hp (300 kW) y maneja caudales del orden de los 80 gpm. En la carcasa, el intercambiador soporta una presión máxima de 500 psi y en los tubos 150 psi. Para mejorar la mantenibilidad del equipo el cabezal frontal y posterior son removibles, de tal forma que la limpieza de los tubos se pueda realizar fácilmente.

Figura 26. Intercambiador de Calor EK-514-0



Fuente: Thermal Transfer Products

2.1.4 Paquete de potencia. Este conjunto provee la potencia del sistema. El nivel de presión máximo es de 1400 psi y el flujo es de 5 gpm. De esta forma la potencia que maneja el sistema es aproximadamente 4 HP.

2.1.4.1 Bomba de Paletas. Se utilizó una bomba de paletas Vickers de desplazamiento fijo de referencia V10 1P2P, a una presión de 1400 psi y un caudal de 5 gpm. La bomba está impulsada por un motor eléctrico de 1740 rpm y 6,6 hp.

Figura 27. Bomba hidráulica



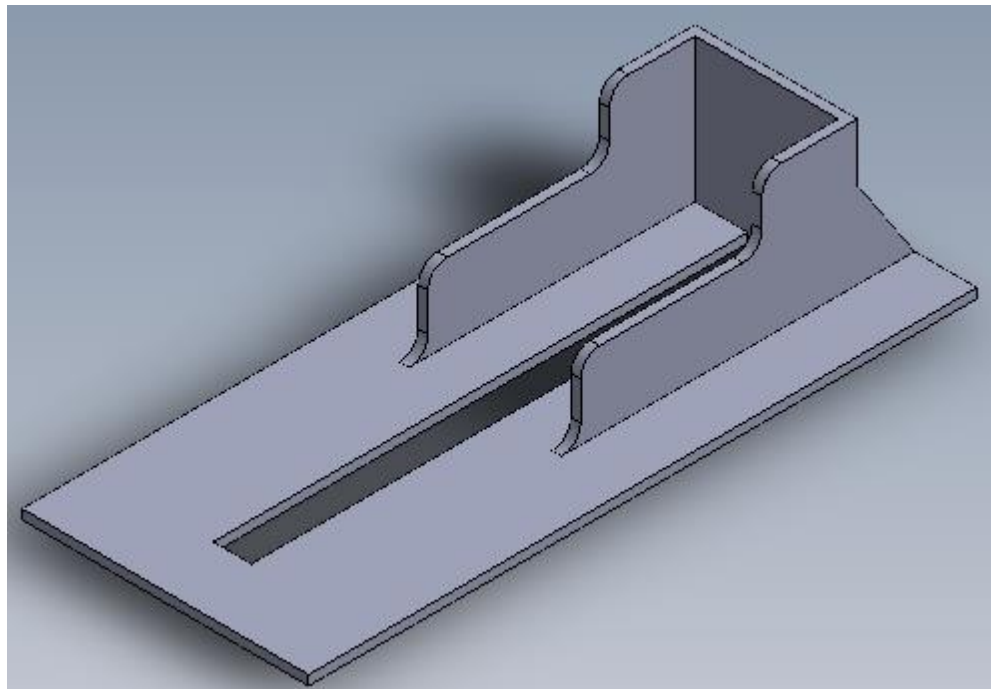
Fuente: Eaton.

2.2 SUBSISTEMA ESTRUCTURAL.

El subsistema estructural está comprendido por el refuerzo estructural y el muelle. El refuerzo reduce las imprecisiones existentes dentro del proceso de medida de la celda de carga y el muelle se usa como pieza de prueba.

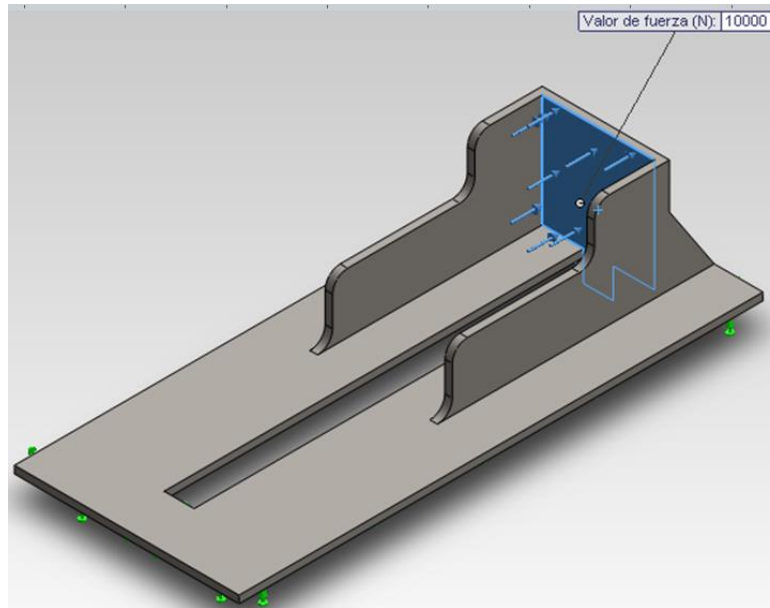
2.2.1 Refuerzo estructural. Cuando el banco está en funcionamiento se presentan deflexiones sobre la base del dispositivo, causadas por la carga aplicada; estas deformaciones afectan el proceso de medida de la celda de carga, ya que el principio de funcionamiento de éste sensor se basa precisamente en la deformación de una resistencia. Para mitigar éste problema se realizó el diseño, construcción e instalación de un refuerzo estructural en placa de acero A36 de 10 milímetros de espesor.

Figura 28. Vista isométrica del diseño del refuerzo estructural



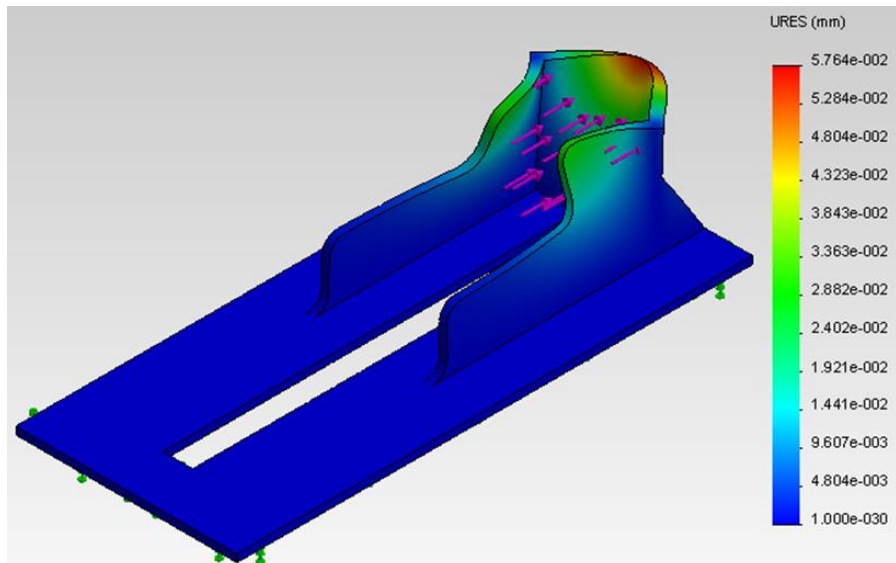
Al diseño hecho en Solidworks se le realizó un estudio de simulación de esfuerzos a través de la herramienta Solidworks Simulation. El modelo fue sometido a una carga axial sobre una de sus caras de 10 KN (figura 29).

Figura 29. Aplicación de la carga en el estudio de esfuerzos.



El estudio permite conocer los resultados del esfuerzo de Von-Mises, el desplazamiento y la deformación unitaria, entre otras características.

Figura 30. Resultado para el desplazamiento del estudio de esfuerzos aplicado.

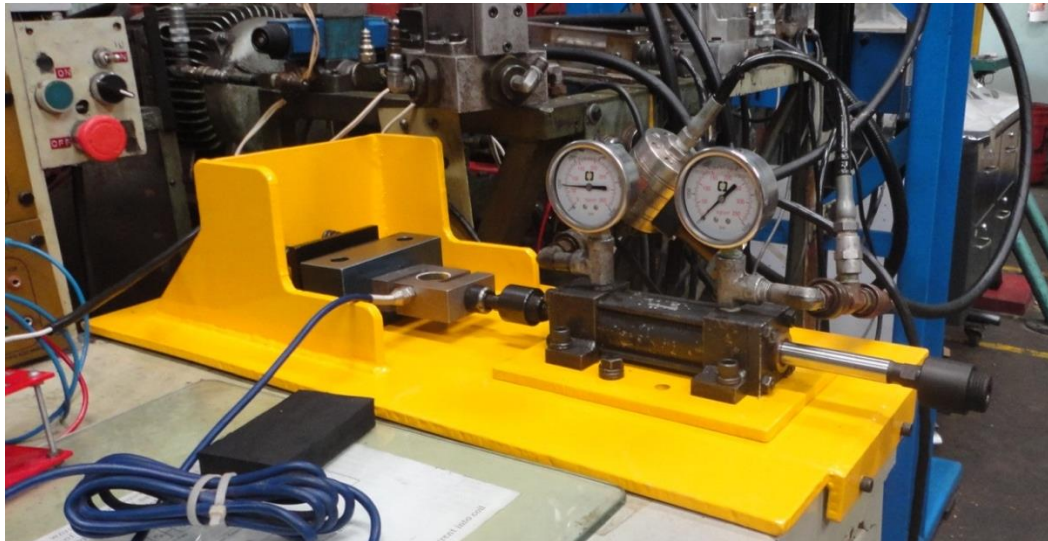


El desplazamiento es la especificación más importante y su resultado permitirá conocer un valor aproximado del desplazamiento real del refuerzo estructural cuando es sometido a condiciones críticas. Es importante aclarar que estos resultados son solo una guía, mas no representan valores sobre los cuales se tomen decisiones importantes.

El análisis de esfuerzos da como resultado un desplazamiento máximo de 0,05764 [mm] al aplicarse una fuerza de 10.000 [N].

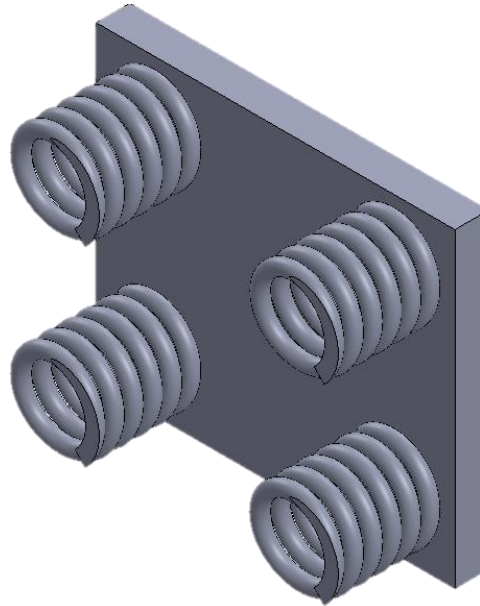
Para la instalación se usaron tornillos grado 8 de rosca fina. Se reemplazó el muelle existente por uno nuevo y se añadió un bloque de caucho para evitar el deterioro de la estructura.

Figura 31. Refuerzo estructural.



2.2.2 Muelle. Este sencillo elemento permite realizar el control de fuerza en un rango amplio y perceptible y además brinda protección al refuerzo estructural. El muelle consiste en 4 resortes soldados a una platina metálica, la cual a su vez esta acoplada a un bloque de caucho que le brinda protección a las superficies bajo carga.

Figura 32. Diseño del muelle.



2.3 SUBSISTEMA DE CONTROL.

Hacen parte de este conjunto todos los elementos involucrados en el proceso de control, éstos se relacionan en la tabla 2 junto con su función correspondiente dentro del proceso.

Tabla 2. Elementos del subsistema de control.

ELEMENTO	FUNCIÓN
MÓDULO DE ALIMENTACIÓN, AMPLIFICACIÓN Y ALMACENAMIENTO (AAA).	Integrar los elementos electrónicos que realizan dichas tareas
FUENTE DE VOLTAJE	Suministrar de voltaje a los circuitos.
TARJETA DAQ NI-USB 6212	Tarjeta de adquisición de datos.
TARJETAS AMPLIFICADORAS	Acondicionadores de señal
SOFTWARE LABVIEW	Controlador e interfaz HMI.
SERVOVÁLVULA DIRECCIONAL MOOG 62	Elemento final de control.
CILINDRO HIDRÁULICO DE DOBLE VASTAGO Y DOBLE EFECTO	Planta.
CELDA DE CARGA	Sensor de fuerza.

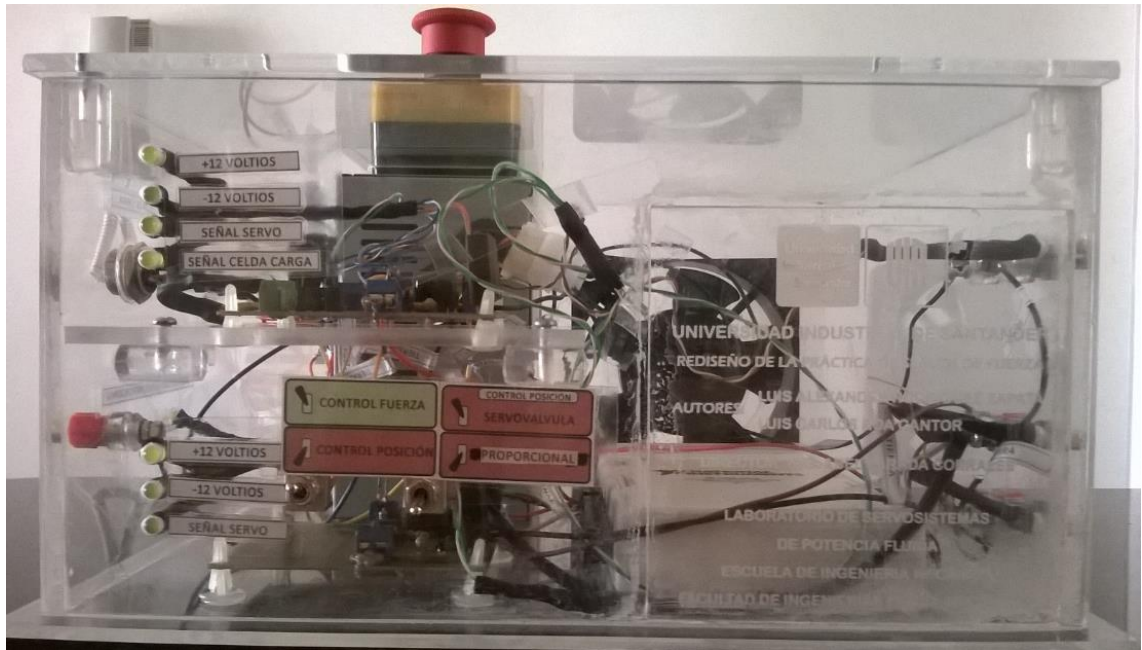
2.3.1 Módulo de Alimentación, Amplificación y Almacenamiento (Módulo AAA). Este módulo consiste en un cubo hecho de acrílico dentro del cual se encuentra la fuente de voltaje, la tarjeta amplificadora de la celda de carga, la tarjeta amplificadora de la servoválvula y la tarjeta DAQ NI 6212. El módulo brinda movilidad, mantenibilidad y orden a los elementos presentes dentro de ella. Además cuenta con indicadores que hacen más didáctica la manipulación del banco por parte del usuario.

Figura 33. Vista posterior del módulo AAA.



En la figura 33 se muestra el interruptor de encendido/apagado. También se pueden observar salidas auxiliares en color rojo de +12 V, -12V, +5 V, +3.3 V y de color negro la conexión GND. Todas las líneas a tierra están conectadas entre sí, de modo que están sintonizadas.

Figura 34. Vista frontal del módulo AAA.



En la parte izquierda se encuentran leds que indican el funcionamiento de cada una de las tarjetas de potencia para las servoválvulas y el amplificador de señal de la celda de carga, los cuales se activan dependiendo del control que se va a ejecutar. En la figura 35 se mostrarán las posibles configuraciones de los selectores de tarjetas de potencia para los servos.

Figura 35. Selectores de las tarjetas de potencia.



El selector uno permite al usuario activar el control de fuerza (posición hacia arriba) o el control de posición (posición abajo). El selector dos solo es activado cuando el selector uno está en control de posición, ya que permite activar la tarjeta de potencia para el control de posición con servoválvula (posición arriba), o activar el sistema para usar tarjeta de potencia VICKERS la cual controla la válvula proporcional (posición abajo).

Figura 36. Información del banco de servos de fuerza.

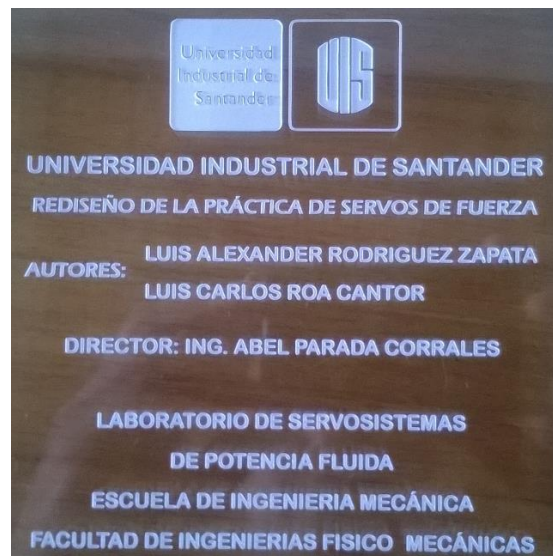
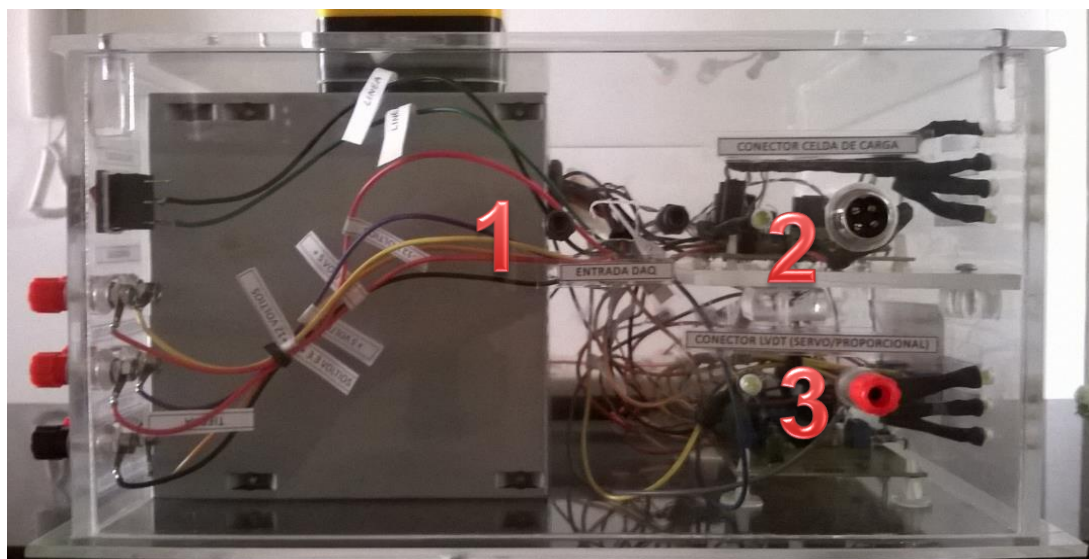
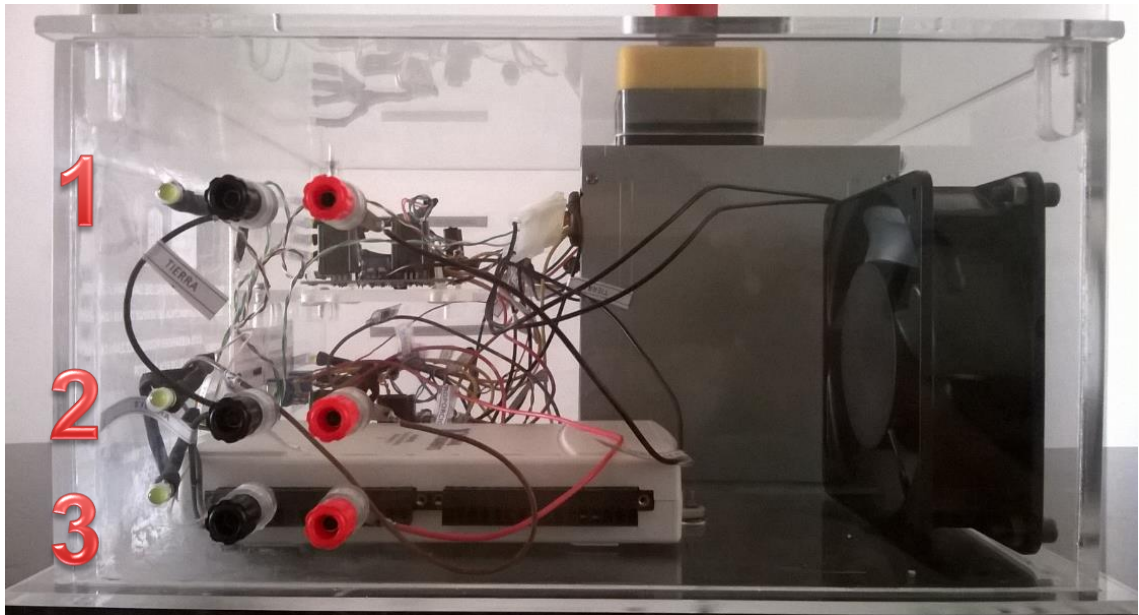


Figura 37. Vista lateral izquierda del módulo AAA.



- 1) Conector para la tarjeta DAQ NI 6212. A través de esta entrada se conecta el cable de la DAQ NI 6212 que va entre el computador y la tarjeta.
- 2) Conector de la celda de carga. Es una entrada para cable de 4 núcleos donde se conecta la celda de carga.
- 3) Conector de señal de retroalimentación de posición. Es una entrada tipo banana hembra donde se conecta un cable que une el dispositivo indicador del sensor de posición LVDT, ya sea de la servoválvula o la válvula proporcional, y la tarjeta amplificadora respectiva.

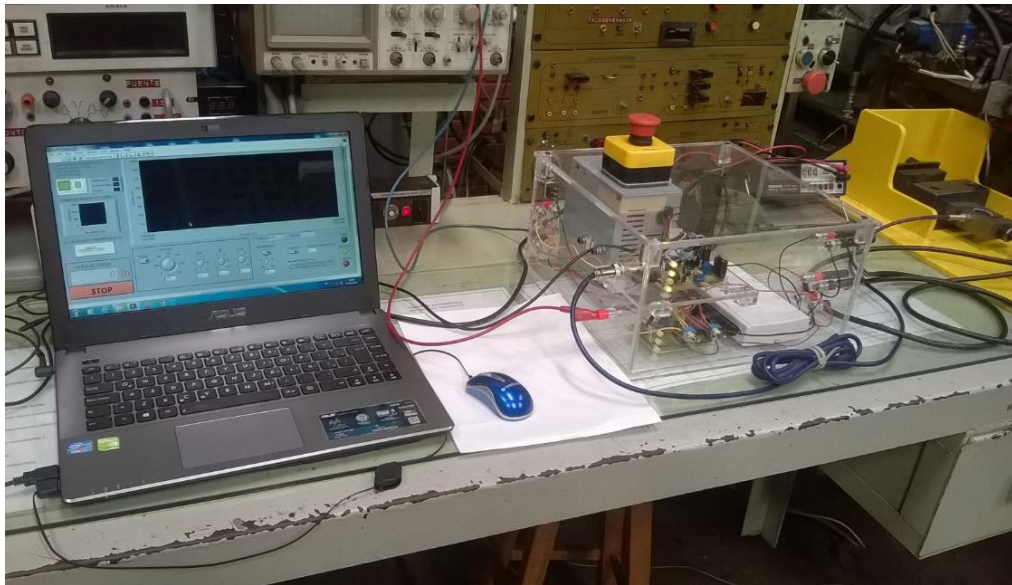
Figura 38. Vista lateral derecha del módulo AAA.



- 1) Señal de salida hacia la servo de fuerza. Terminal banana hembra que envía la señal de salida PWM proporcionada por la tarjeta DAQ NI 6212 hacia la servoválvula MOOG 62 del servo de fuerza.
- 2) Señal de salida hacia la servo de posición. Terminal banana hembra a través de la cual se comunica la señal de salida PWM proporcionada por la tarjeta DAQ NI 6212 hacia la servoválvula MOOG 62 del servo de posición.

- 3) Señal de salida hacia la tarjeta de potencia VICKERS. Terminal banana hembra desde la cual se envía la señal de salida PWM desde la DAQ NI 6212 hasta la tarjeta de potencia Vickers (figura 42).

Figura 39. Vista del montaje para el control de fuerza por medio de servos.



El módulo AAA permite un rápido montaje, de forma didáctica para el usuario y cuenta con parada de emergencia.

Figura 40. Vista del montaje para el control de posición por medio de servoválvula.

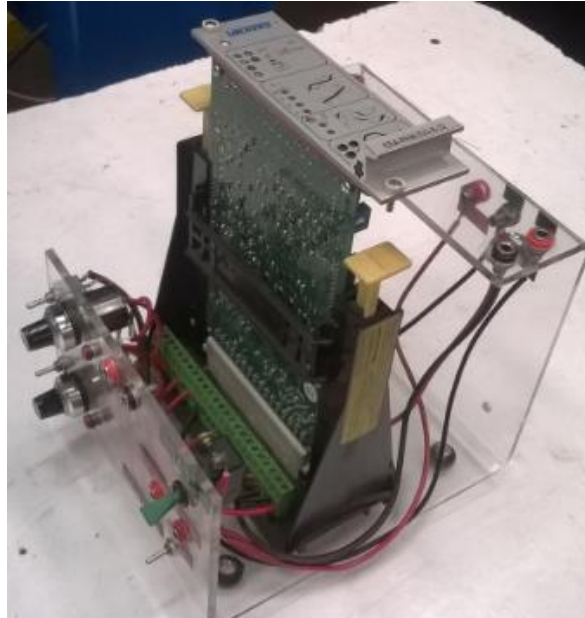


Figura 41. Vista del montaje para el control de posición por medio de válvula proporcional.



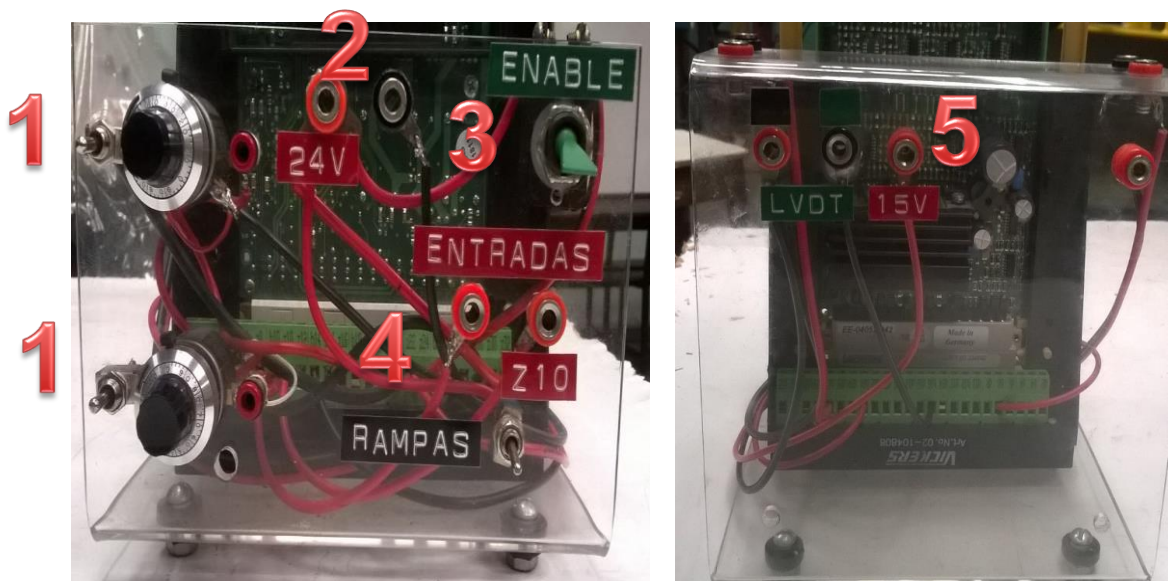
Para la realización de ésta práctica se hace uso de una tarjeta de potencia VICKERS.

Figura 42. Tarjeta potencia Vickers.



En la se muestran los comandos y respectivas conexiones que se deben realizar para poder usar correctamente la tarjeta y lograr hacer el control de posición por medio de una válvula proporcional.

Figura 43. Vista de los tableros de conexiones de la tarjeta de potencia Vickers.



- 1) Selectores y perillas para la modulación de la ganancia: Deben estar en la posición central. Esto para no introducir al sistema ninguna ganancia extra hacia la válvula proporcional.
- 2) Entrada de alimentación: Allí se conecta la fuente de 24 V. Se hace necesario sincronizar la entrada a tierra con el módulo AAA.
- 3) Switch de encendido: Desde allí se enciende o apaga la tarjeta.
- 4) Entrada de la señal de control: Esta es la entrada de señal que viene desde el módulo AAA (figura 38 – salida 3)
- 5) Conexión del sensor LVDT: Allí se debe conectar el sensor LVDT del spool de la válvula proporcional, junto con la alimentación de 15 V y la señal a tierra.

Se realizará una explicación individual de los elementos que conforman el módulo AAA.

Tarjeta de adquisición de datos NI DAQ USB 6212.

Este dispositivo sirve de puente entre las señales de entrada proporcionadas por los sensores, las señales de salida enviadas a los actuadores y el software de control instalado en el computador. La DAQ 6212 presenta ventajas importantes sobre la tarjeta Arduino, utilizada al principio del proyecto, ya que permite emitir señales de voltaje negativas, esto permitió simplificar el circuito electrónico usado con el Arduino que requería de un inversor de voltaje para realizar esta tarea.

Figura 44. Tarjeta de adquisición de datos NI DAQ USB 6212.



Fuente: NI LabVIEW

Tabla 3. Especificaciones principales de la tarjeta DAQ 6212

ENTRADA ANALÓGICA	
Canales	16
Resolución	16 bits
Velocidad de muestreo	400 KS/s
Máximo voltaje de entrada analógica	10 V
Rango de voltaje máximo	-10V, 10V
Precisión Máxima del Rango de Voltaje	2,69 mV
Sensibilidad Máxima del Rango de Voltaje	91,6 μ V
SALIDA ANALÓGICA	
Canales	2
Resolución	16 bits
Máximo voltaje de salida analógica	10 V
Rango de voltaje máximo	-10V, 10V
Precisión Máxima del Rango de Voltaje	3,512 mV
Capacidad de Corriente Simple	2 mA
Capacidad de Corriente Total	4 mA
E/S DIGITAL	
Canales Bidireccionales	32
Capacidad de Corriente Simple	16 mA
Capacidad de Corriente Total	50 mA
Máximo Rango de Entrada	0 V ; 5,25 V
Máximo Rango de Salida	0 V ; 3,8 V

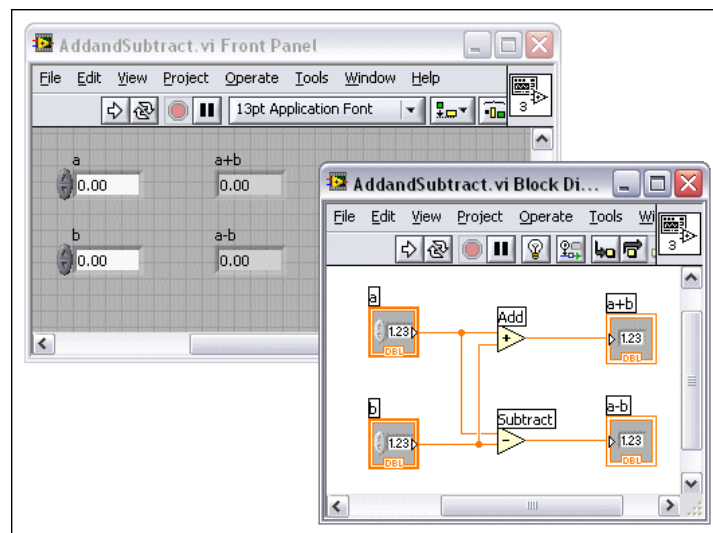
Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS, NI USB-621x User Manual.

2.3.2 Software LabVIEW7. Por sus siglas en inglés significa Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, que traduce: entorno de trabajo ingenieril de laboratorio de instrumentos virtuales. Es un lenguaje de programación gráfico basado en iconos, más no en líneas de texto como la mayoría de los lenguajes de programación, donde las instrucciones determinan la ejecución del programa. En el lenguaje usado en LabVIEW el flujo de datos determina la ejecución del programa.

LabVIEW tiene dos partes principales: el panel frontal, donde se crea la interfaz del usuario y el diagrama de bloques, que contiene funciones gráficas que controlan los objetos creados en el panel frontal. Los archivos creados en LabVIEW reciben el nombre de instrumentos virtuales (VI, por sus siglas en inglés).

El panel frontal está compuesto por controles e indicadores, los controles pueden ser botones, perillas, selectores, en general, permiten al usuario introducir una señal al programa. Los indicadores son emuladores de dispositivos que emiten una señal adquirida del diagrama de bloques, pueden ser LEDs, indicadores, gráficos, etc.

Figura 45. Ejemplo de un panel frontal con su respectivo diagrama de bloques.



Fuente: NI LabVIEW.

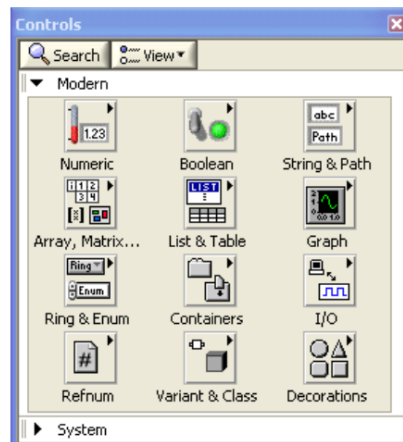
⁷ HALVORSEN, Hans-Petterhalvorsen. Introduction to LabVIEW. Porsgrunn, Noruega: Department of Electrical Engineering, Information Technology and Cybernetics. Telemark University College, 2014. 122 p.

En el diagrama de bloques se encuentra el código fuente de la interfaz. Los objetos del panel frontal están representados por terminales en el diagrama de bloques.

Al hacer click derecho sobre el entorno LabVIEW se despliegan unos menús llamados paletas donde se pueden seleccionar los diferentes elementos que se pueden agregar. Existe la paleta de controles que solo se puede visualizar en el panel frontal, la paleta de funciones utilizada en el diagrama de bloques y la paleta de herramientas común a ambas ventanas.

Se pueden introducir los controles e indicadores a través de la paleta de controles.

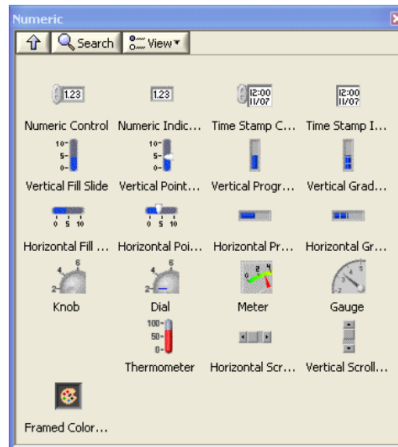
Figura 46. Paleta de controles.



Fuente: NI LabVIEW.

Dentro de esta paleta se pueden seleccionar sub-paletas que integran grupos de controles e indicadores con características comunes, por ejemplo, la sub-paleta "Numeric" contiene los indicadores y controles que manejan valores numéricos, la sub-paleta "Boolean" contiene aquellos que trabajan con valores verdaderos o falsos. El software ofrece diversos controles como voltímetros, termómetros, diales, etc.

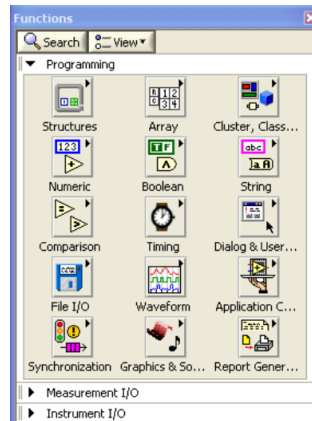
Figura 47. Sub-paleta “Numeric”.



Fuente: NI LabVIEW.

Por medio de la paleta de funciones se pueden introducir elementos de programación gráfica que controlarán los objetos del panel frontal.

Figura 48. Paleta de funciones.



Fuente: NI LabVIEW.

Existen unos elementos cuya función es intercambiar información entre el diagrama de bloques y el panel frontal a través de puertos de entrada y salida. Dichos elementos se llaman terminales. Un valor que se introduzca en el panel frontal, se podrá usar en el diagrama de bloques a través del puerto de salida de un terminal. Así mismo, una operación cuya salida se comunique al puerto de entrada de un terminal aparecerá en el panel frontal usando un indicador.

Los terminales se pueden configurar de forma que aparezcan como íconos o como datos, por ejemplo un terminal de una perilla se puede presentar como icono dentro del diagrama de bloques y su salida puede conectarse a algún proceso. En la parte inferior del ícono aparece una leyenda que representa el tipo de datos que maneja, en el caso de la figura 49, la leyenda DBL indica que el tipo de datos manejados por el ícono del terminal es double – precision, numérico de coma flotante. También se puede usar el terminal como dato, en tal caso, no se puede saber a qué objeto está relacionado el terminal, pero sí que tipo de datos maneja, éste tipo de configuración se usa para ahorrar espacio en el diagrama de bloques.

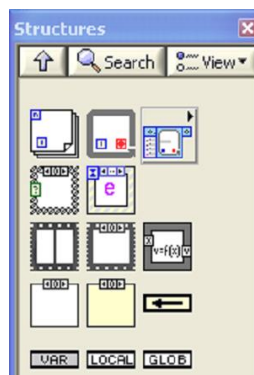
Figura 49. Ejemplo del terminal de una perilla como icono y como dato.



Fuente: NI LabVIEW

2.3.2.1 Lazos y estructuras en LabVIEW. Son operaciones de programación que se encuentran dentro del lenguaje gráfico de LabVIEW. Los lazos disponibles son: For y While y las estructuras son: Case, Sequence y Event. Los lazos y estructuras se pueden introducir a través de la sub-paleta “Structures” ubicada en la paleta “Functions”.

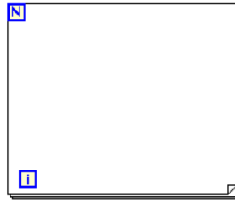
Figura 50. Sub-paleta “Structures”



Fuente: NI LabVIEW

LAZO FOR: Ejecuta un sub-diagrama un determinado número de veces.

Figura 51. Lazo for vacío.



Fuente: NI LabVIEW

Un lazo for ejecuta su sub-diagrama n veces, donde el valor de n es ligado a la entrada N. A través de la terminal i se muestra la cantidad de ciclos ejecutados por el lazo.

LAZO WHILE: Repite la instrucción dada hasta que la terminal condicional (de entrada) recibe un determinado valor Booleano. El valor Booleano depende de la condición de continuidad dada por el usuario.

Figura 52. Lazo While vacío.

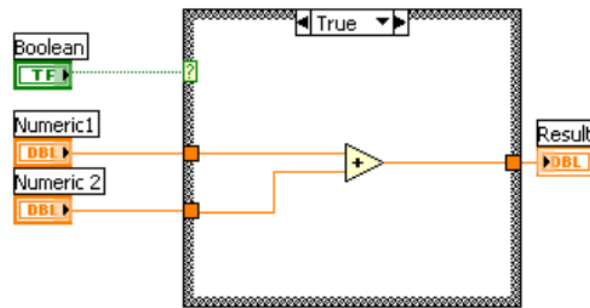


Fuente: NI LabVIEW.

La condición terminal (ícono rojo) puede tomar dos sentencias: Parar si verdadero o Continuar si verdadero, según los requerimientos del programa. La terminal i indica el número de ciclos ejecutados dentro del lazo While.

ESTRUCTURA CASE: Esta estructura tiene uno o más sub-diagramas, o casos, y solo uno de ellos se ejecuta dependiendo del caso seleccionado en el terminal selector. En el borde del ícono se agregan los casos deseados, y las salidas. En la parte central superior se da la opción de elegir los casos.

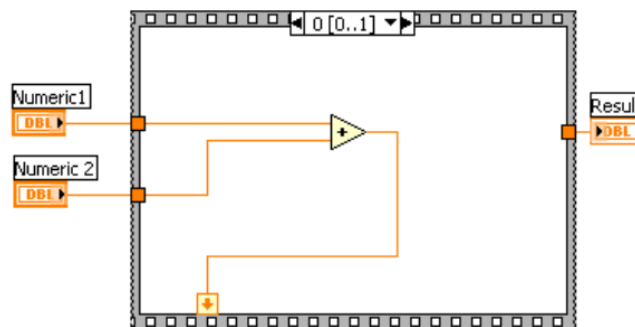
Figura 53. Ejemplo de estructura Case.



Fuente: NI LabVIEW..

ESTRUCTURA SEQUENCE: Consiste en uno o más sub-diagramas que se ejecutan secuencialmente. Los casos a ejecutar en secuencia se agregan en el borde del icono.

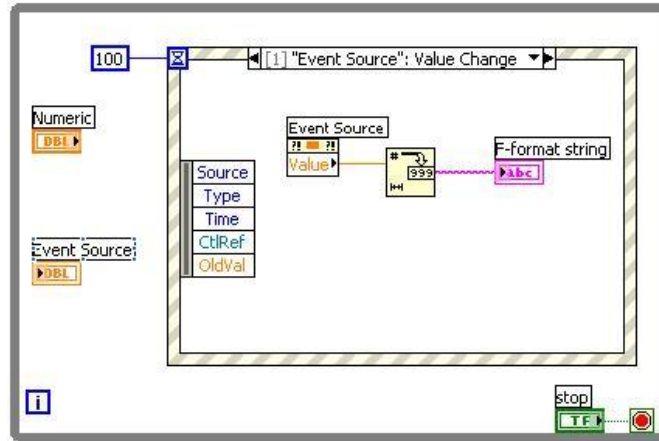
Figura 54. Ejemplo de estructura Sequence.



Fuente: NI LabVIEW.

ESTRUCTURA EVENT: Está integrada por varios sub-diagramas o eventos que se ejecutan uno a uno cuando el programa empieza a ejecutarse. Esta estructura está condicionada por el suceso de un evento, luego del cual ejecuta el caso más apropiado para responder al evento. En el borde superior izquierdo se introduce el tiempo en milisegundos que debe esperar el programa para que ocurra un evento.

Figura 55. Ejemplo de la estructura Event.

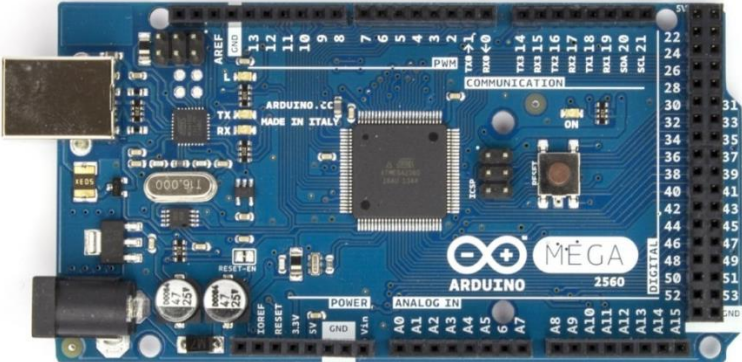


Fuente: NI LabVIEW.

2.3.3 Tarjeta Arduino mega 2560. El núcleo de la tarjeta es un microcontrolador ATmega2560 (figura 56), tiene 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 15 pueden ser usadas como emisoras de señal PWM), 16 entradas análogas (señal continua), 4 UART's (puerto serial para hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un jack de alimentación y un botón de reset. En la

tabla 4 se relacionan algunas condiciones de operación a tener en cuenta:

Figura 56. Tarjeta Arduino MEGA 2560



Fuente: Arduino.

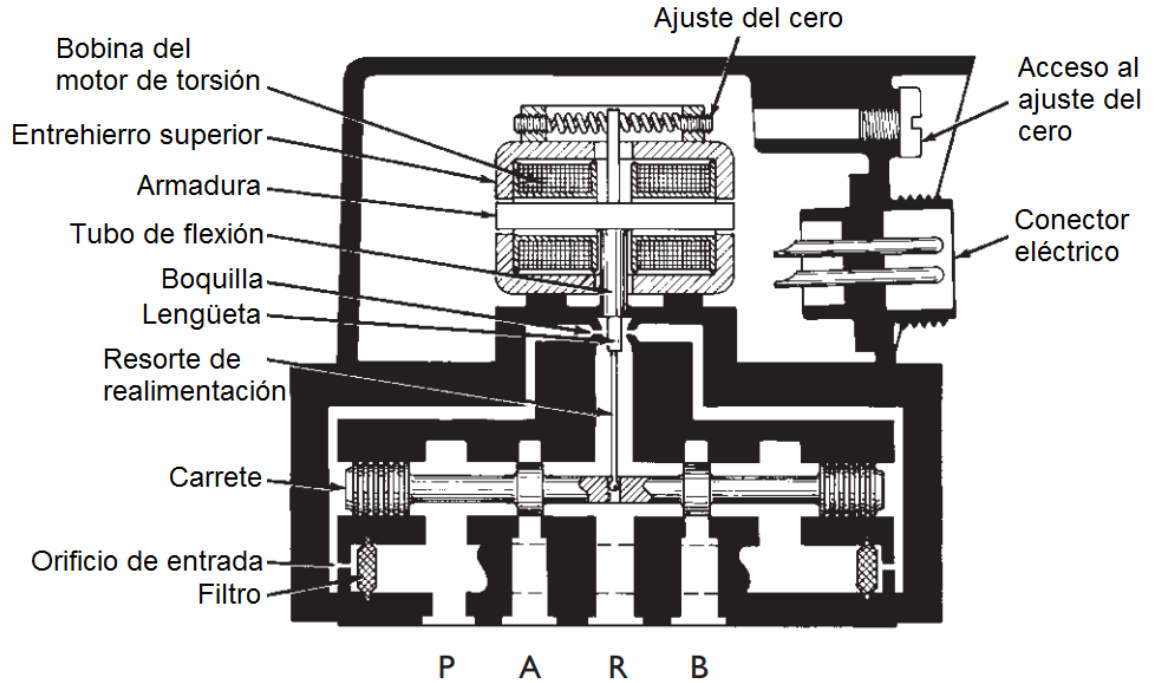
Tabla 4. Condiciones de operación Arduino MEGA 2560.

Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (Rango recomendado)	7 – 12V
Voltaje de entrada (límites)	6 – 20V
Corriente en DC manejada en las entradas digitales	40 mA
Corriente en DC manejada en la entrada de 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 Kb (8Kb usados en el gestor de arranque)
EEPROM (Memoria ROM programable y borrable eléctricamente)	4 Kb
Velocidad del reloj	16 MHz

Si la tarjeta se alimenta con menos de 7V el pin de suministro de voltaje de 5V puede proporcionar menos de cinco voltios y la tarjeta presenta inestabilidades. Si se usan más de 12V el regulador de voltaje se puede sobrecalentar y pueden presentarse daños en la tarjeta. De esta forma el rango recomendado de alimentación es de 7 a 12V. Adicionalmente la tarjeta cuenta con 16 entradas análogas que tienen una resolución de 10 bits, es decir la señal de salida podrá expresarse en una escala de 1 a 1024. Por defecto el rango es de 0 a 5V, sin embargo el valor superior del rango puede ser cambiado introduciendo la señal de referencia deseada a través del pin AREF.

2.3.4 Servoválvula direccional Moog 62. Es una servoválvula electrohidráulica de realimentación mecánica, cuya etapa piloto es de tipo lengüeta-boquilla y la etapa principal se realiza por medio de una corredera de centro cerrado y 4 vías. Cuenta con un motor de torsión que opera en seco. Un tubo resorte permite ejecutar la realimentación mecánica de la corredera. Éste tipo de válvulas están diseñadas para resistir ambientes de trabajo industrial y frecuencias de trabajo altas.

Figura 57. Componentes principales de la servoválvula Moog 62.



Fuente: MOOG. Moog 62 series installation operating instructions, modificado por los autores.

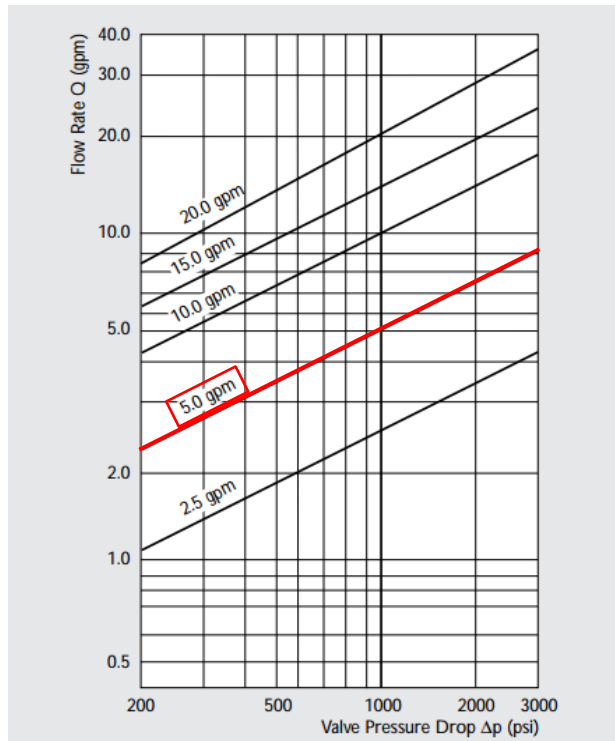
El flujo depende de la señal de corriente eléctrica comandada al motor de torsión y de la caída de presión en la válvula. El flujo para una caída de presión dada se puede calcular a través de la siguiente función:

$$Q = Q_N \sqrt{\frac{\Delta P}{\Delta P_N}} \quad (\text{Ec } 4)$$

Tabla 5. Variables de la ecuación de caudal de la servoválvula

Q [gpm]	Caudal calculado
Q _N [gpm]	Caudal nominal
ΔP [psi]	Diferencial de presión calculado
ΔP _N [psi]	Diferencial de presión nominal

Figura 58. Curvas de flujo de la válvula (Con la válvula completamente abierta, señal de comando 100%).



Fuente: MOOG. 62 Series servovalves, modificado por los autores.

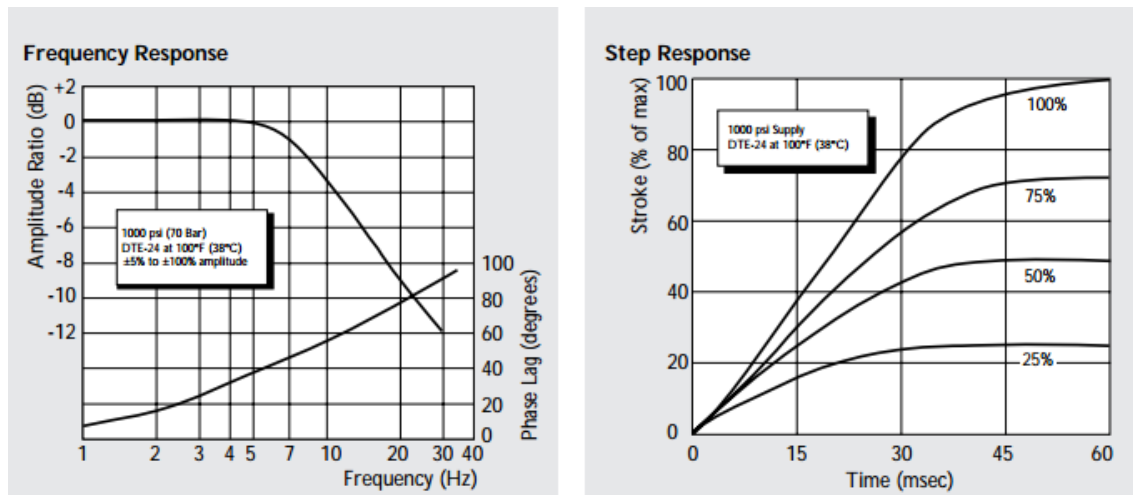
Tabla 6. Características principales de la servoválvula Moog 62.

PRESIÓN DE OPERACIÓN	
Puertos P, A y B	Hasta 3000 psi
Puerto T	Hasta 2000 psi
Viscosidad recomendada del fluido	60 – 450 SUS @100°F
Peso	2,7 lb (1,2 Kg)
Número de vías	4
Flujo nominal ($\pm 10\%$) a $\Delta P_N=1000$ psi	5 gpm
Tiempo de respuesta (a $\Delta P=1000$ psi)	60 ms
Histéresis (a $\Delta P_N=1000$ psi)	< 5%
Respuesta al umbral (a $\Delta P_N=1000$ psi)	< 1%
Histéresis (a $\Delta P_N=1000$ psi)	< 5%
Perdida de flujo en la posición central (a $\Delta P_N=1000$ psi)	0,35 a 0,55 gpm
Tipo de conexión eléctrica	Paralelo

Fuente: MOOG. 62 Series servovalves, modificado por los autores.

El comportamiento dinámico de la servoválvula se puede apreciar por medio del diagrama de bode y la respuesta a la entrada escalón. Dichas pruebas son realizadas por el fabricante variando la señal de entrada desde $\pm 5\%$ hasta $\pm 100\%$ a una presión de operación de 1000 psi.

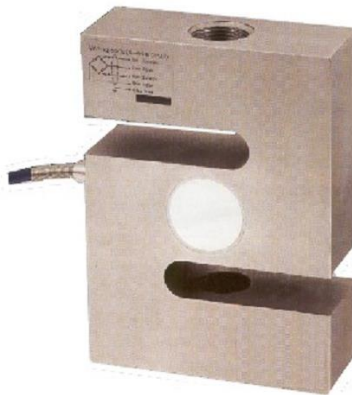
Figura 59. Curvas típicas características



Fuente: MOOG. 62 Series servovalves.

2.3.5 Celda de carga. La celda de carga es el sensor de fuerza utilizado en el sistema, es de tipo S y está diseñada para medir cargas de tensión, sin embargo, también es apta para medir cargas de compresión, tarea para la cual fue utilizada.

Figura 60. Celda de carga tipo S utilizada en el banco.

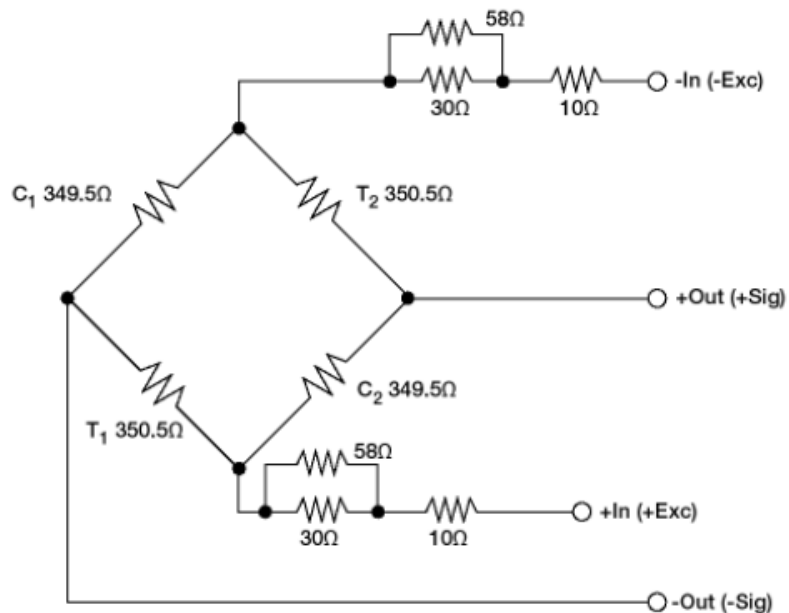


Fuente: LEXUS ELECTRONIC SCALES, Data Sheet Load Cell "S".

2.3.5.1 Principio de funcionamiento. Este elemento contiene en su interior un grupo de resistencias variables llamadas galgas extensiométricas, que están hechas de un material conductor, el cual, al ser sometido a una carga, se deforma cambiando así su geometría durante el periodo de aplicación, luego del cual, vuelve a tomar su tamaño original. Esta propiedad elástica se garantiza para una cantidad determinada de fuerza que representa la capacidad del transductor.

Internamente, las galgas están configuradas eléctricamente en puente de Wheatstone (figura 61) para poder registrar pequeños cambios en la diferencia de voltaje, debido a la variación de la resistencia en las ramas.

Figura 61. Configuración en puente de Wheatstone de las galgas extensiométricas



Fuente: Guía de celdas de carga y módulos de pesaje, Rice Lake®.

La resistencia de un material depende de varios factores como la longitud (l), área transversal (A) y coeficiente de resistividad del mismo (ρ). La ecuación que los relaciona es la siguiente:

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{Ec 5}$$

De esta forma si el elemento se deforma habrá un cambio en la resistencia, lo cual generará como consecuencia un cambio en el voltaje, ya que estas dos magnitudes guardan una relación proporcional. En consecuencia el transductor genera una señal de diferencia de potencial a la salida que se relaciona con la fuerza ejercida sobre él.

Los fabricantes de celdas de carga han adicionado mejoras que permiten reducir las imprecisiones que generalmente tiene este tipo de arreglo, tales como, sensibilidad insuficiente en el detector del cero y sensibilidad a los cambios de temperatura.

2.3.5.2 Características de la celda de carga Lexus SC. Las características de la celda de carga varían según su capacidad, para el caso la celda tiene una capacidad de 3 toneladas.

Tabla 7. Características principales de la celda de carga.

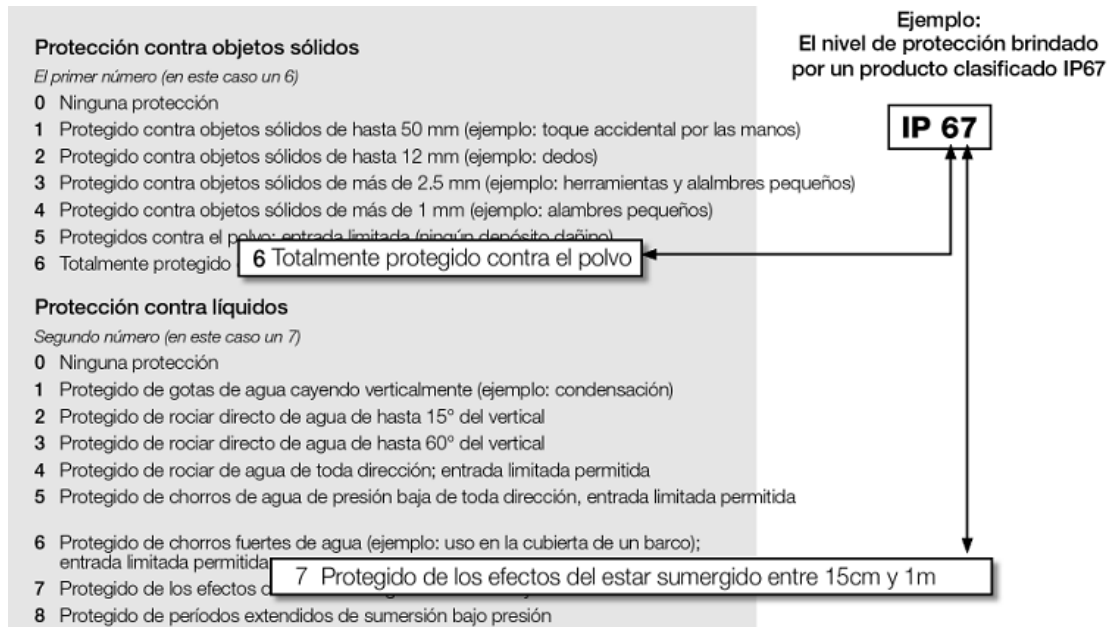
PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Carga máxima	3	Toneladas
Sensibilidad	$2 \pm 0,2\%$	mV/V
Error total	0,02	\pm % de salida nominal
Efecto de la temperatura en la sensibilidad	0,0012	\pm % de salida nominal/°C
Balance en cero	1	\pm % de salida nominal
Sobrecarga segura	150	% de la capacidad nominal
Sobrecarga máxima	300	% de la capacidad nominal
Rango de temperatura de operación	-30 ~ +70	°C
Excitación recomendada	5 ~ 12	V (AC o DC)

Fuente: LEXUS ELECTRONIC SCALES, Data Sheet Load Cell "S".

La celda de carga utilizada cumple con los estándares aplicados para instrumentos de medida establecidos por la Comisión Electrónica Internacional (IEC) y la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML). Dentro del estándar IEC 60529⁸, que define y establece los grados de protección (códigos IP) de los equipos electrónicos, la celda de carga utilizada cumple con la clase de protección IP67/IP68: Equipo totalmente protegido contra el polvo y/o sumersión constante.

⁸ COMISIÓN ELECTRÓNICA INTERNACIONAL (IEC). ANSI/IEC 60529: Degrees of protection provided by enclosures (IP Code). Edición 2.1. USA: National Electrical Manufacturers Association, 2004. 16 p.

Figura 62. Nivel de protección brindado por un producto clasificado IP67.



Fuente: Guía de celdas de carga y módulos de pesaje, Rice Lake®

Y también cumple con los requerimientos establecidos en la norma OIML R 60: Regulación metrológica para celdas de carga⁹, documento donde se relacionan los errores máximos permisibles según la clase de celda de carga. Para ver más detalles sobre la celda de carga remítase al Anexo U.

⁹ ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE METROLOGÍA LEGAL (OIML). ERRATUM: OIML R 60: Regulación metrológica para celdas de carga. Edición 2000 (E). Francia: Grande Imprimerie De Troye, 2000. 86 p.

3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

Un modelo matemático intenta representar la dinámica del sistema de la mejor manera posible, basándose en las leyes físicas implicadas en el proceso. Representar matemáticamente cada uno de los fenómenos presentes en el objeto de análisis implicaría resolver un sistema demasiado complejo, es por esto que se realizan algunas aproximaciones y suposiciones en el modelo que permiten simplificarlo. Este procedimiento es válido siempre y cuando la precisión del sistema no se vea afectada significativamente. Para desarrollar un buen modelamiento matemático es preciso lograr un equilibrio entre las simplificaciones realizadas en las propiedades físicas del sistema y el nivel de precisión requerido, cada vez que se realice una aproximación o se omita algún fenómeno se deben realizar pruebas para establecer el efecto sobre la respuesta del proceso causado por la suposición realizada.

El proceso de control de fuerza corresponde a un sistema lineal invariante en el tiempo y se puede representar a través de una función de transferencia. Dicha función relaciona las señales de salida y entrada del proceso y puede ser determinada principalmente de dos formas: mediante análisis experimental (causa – efecto), usando entradas conocidas y estudiando la respuesta del sistema para determinar la relación entre estas dos señales. O utilizando el álgebra de bloques, representando en un diagrama los modelos matemáticos de cada uno de los componentes involucrados y resolviéndolo a través de las reglas de simplificación establecidas. Se optó por resolver el diagrama de bloques correspondiente para poder exponer con mayor claridad las diferentes etapas involucradas en el proceso de control de fuerza.

Se implementaron dos técnicas de control, por esta razón el modelo matemático es diferente para cada uno de los casos, los cuales se presentan por separado: Control clásico Proporcional-Integral (PI) y control combinado PI con adelanto de señal (feedforward).

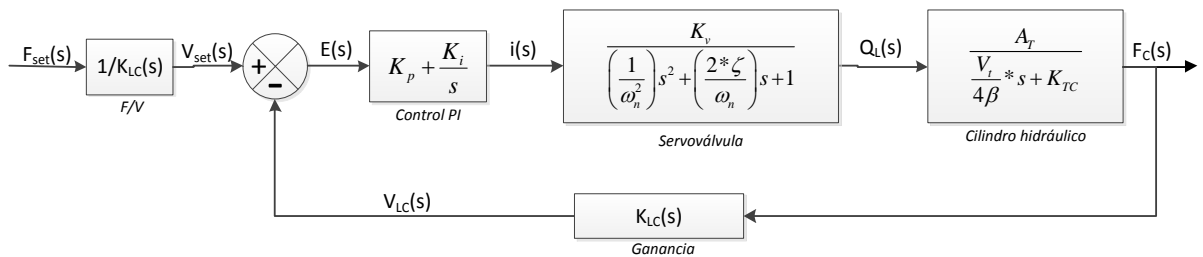
La frecuencia en la que opera el sistema es un factor importante a la hora de ignorar las no-linealidades de algunos componentes, para el caso del banco de control de fuerza la frecuencia de operación es baja, calculándose un máximo de 2 ciclos por segundo (cps).

3.1 SERVO DE CONTROL DE FUERZA CON ACCIÓN PI.

Se implementa una acción de control tipo PI ya que la inercia del sistema es muy pequeña, es decir, la fuerza necesaria para sacar al pistón de su estado de equilibrio no amerita la adición de la acción derivativa.

A lo largo de la descripción del modelo matemático se incluye el proceso de simplificación de las ecuaciones, yendo de mayor a menor el grado de detalle de los fenómenos presentes. El proceso se llevó a cabo corroborando que dichas suposiciones no afectarían en mayor grado la precisión del servo de control. En la figura 63 se presenta el diagrama de bloques del sistema con los modelos matemáticos de cada uno de los componentes:

Figura 63. Diagrama de bloques del sistema para el control PI – Fase inicial.



3.1.1. Servoválvula. Por ser una servoválvula con retroalimentación mecánica, será comandada a través de señales de corriente. Se tuvieron en cuenta los valores recomendados por el fabricante¹⁰ para las servoválvulas de control de flujo. Se presenta un modelo de segundo orden que relaciona el caudal de carga con el flujo de corriente eléctrica aplicado al motor de torsión.

$$\frac{Q_L(s)}{i(s)} = \frac{K_v}{\left(\frac{1}{\omega_n^2}\right)s^2 + \left(\frac{2 * \zeta}{\omega_n}\right)s + 1} \quad (\text{Ec } 6)$$

¹⁰ THAYER, W. J. Transfer functions for Moog servovalves. Technical bulletin 103. East Aurora, NY. 1965. 4 p.

Tabla 8. Variables involucradas en el modelo de segundo orden de la servoválvula

ω_n	Frecuencia natural de la servoválvula	1160 [rad/s]
ζ	Coefficiente de amortiguamiento	0,7 No dimensional
K_V	Ganancia de flujo de la servoválvula	0,62 [gpm/mA]

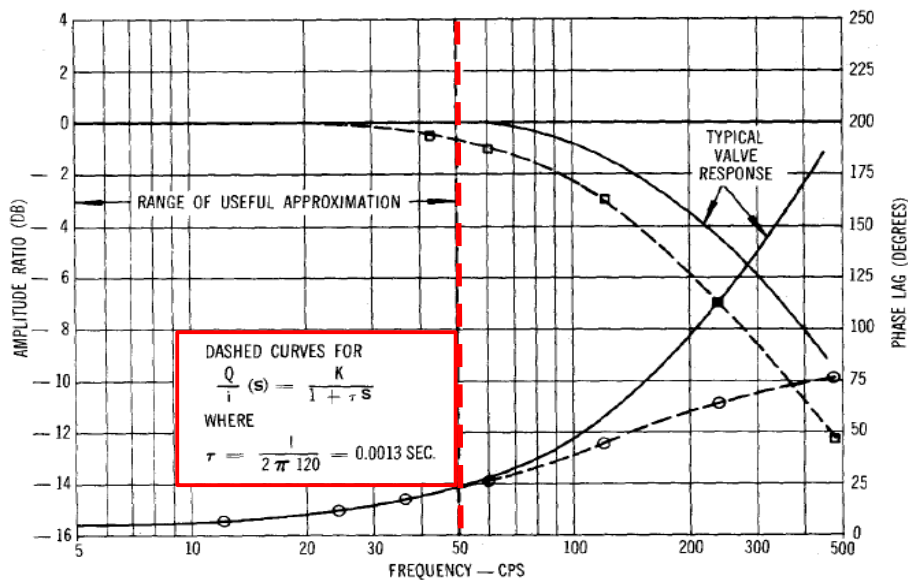
SIMPLIFICACIÓN. Debido a que el banco de control de fuerza trabaja a bajas frecuencias (máx. 2 cps) el modelo de la servoválvula se simplificará a uno de primer orden:

$$\frac{Q_L(s)}{i(s)} = \frac{K_V}{1 + \tau * s} \quad (\text{Ec 7})$$

Tabla 9. Variables involucradas en el modelo de primer orden de la servoválvula

τ	Constante de tiempo de la servoválvula	0,0013 [s]
K_V	Ganancia de flujo de la servoválvula	0,62 [gpm/mA]

Figura 64. Aproximación de primer orden de la respuesta dinámica de la servoválvula MOOG 62.



Fuente: THAYER, W. J. Transfer functions for Moog servovalves.

Haciendo esta aproximación, la función de transferencia de la servoválvula queda reducida a una constante:

$$\frac{Q_L(s)}{i(s)} = K_V \quad (\text{Ec } 8)$$

3.1.2 Cilindro Hidráulico. Generalmente se consideran tres efectos que contribuyen al flujo requerido hacia el cilindro, los cuales son el cambio de volumen Q_V , la compresión del fluido en la cámara Q_C y las fugas alrededor del pistón Q_L . Debido a que no disponemos de un transductor que mida la posición del vástago del cilindro, los cambios de volumen dentro del cilindro no se considerarán.

Así el flujo total queda: $Q_L = \overset{0}{\widehat{Q}_V} + Q_C + Q_F = A_P * \frac{dx_P}{dt} + \frac{V_t}{4\beta} * \frac{dP_L}{dt} + K_{TC} * P_L$

En el dominio de Laplace queda: $Q_L(s) = \overset{0}{A_P * \frac{dX_P}{dt}} + \frac{V_t}{4\beta} * s * P_L(s) + K_{TC} * P_L(s)$

Así la función de transferencia queda:

$$\boxed{\frac{F_C(s)}{Q_L(s)} = \frac{A_T}{\frac{V_t}{4\beta} * s + K_{TC}}} \quad (\text{Ec } 9)$$

Tabla 10. Variables involucradas en la función de transferencia del cilindro

A_T	Área de trabajo	1,455 [in ²]
β	Módulo de Bulk del aceite	2x10 ⁵ [psi]
K_{TC}	Coefficiente total de perdidas alrededor del pistón	0,007 [no dimensional]
V_T	Volumen total de la cámara del cilindro	2,705 [in ³]

Sus respectivos valores numéricos fueron medidos de forma experimental directamente del banco o tomados teóricamente de MOOG¹¹ o EATON¹².

¹¹ MOOG, Industrial Control Division. Electrohydraulic servovalves a technical look. East Aurora, NY. 1965. 5p.

¹² EATON. RE/RF Series Medium Duty NFPA Tie Rod Cylinders Catalog. Edición Diciembre 2013. V-CYTR-MC002-E3. USA. 6 p.

3.1.3 Elemento Final de Control + Actuador. Se desea presentar en un solo bloque la función de transferencia resultante de acoplar el elemento final de control y el actuador.

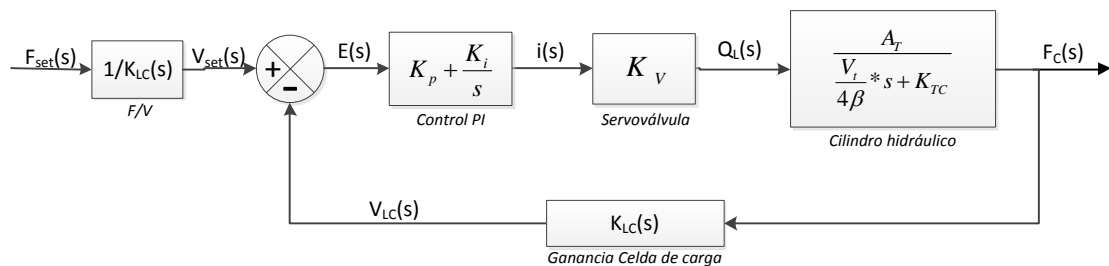
$$\frac{F_C(s)}{Q_L(s)} = \frac{K_V * A_T}{\frac{V_t}{4\beta} * s + K_{TC}} \quad (\text{Ec 10})$$

3.1.4 Celda de Carga. Se utilizó la ecuación característica obtenida a través de regresión lineal, cuyo proceso se explica en el capítulo 6.

$$F[lb] = 269 * V_c[V] - 131,9 \quad (\text{Ec 11})$$

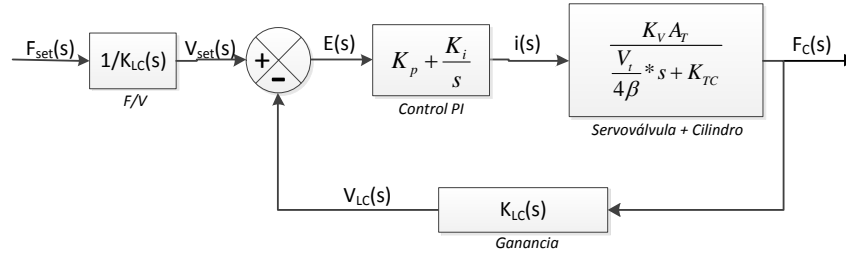
Luego de obtener los modelos matemáticos es posible simplificar el lazo cerrado de control para obtener la ecuación a introducir en el programa en LabVIEW.

Figura 65. Diagrama de bloques en lazo cerrado con ecuaciones simplificadas.



Multiplicando los bloques de la servoválvula y el cilindro hidráulico se simplifica el diagrama de bloques:

Figura 66. Diagrama de bloques simplificado.



Reemplazando los valores de cada una de las constantes, los coeficientes tienen los siguientes valores:

$$\frac{F_C(s)}{i(s)} = \frac{C_n}{C_1 * s + C_2} \quad (\text{Ec 12})$$

Tabla 11. Valores de los coeficientes de la ecuación final del proceso de control en lazo cerrado aplicando la técnica PI.

C_n	$C_n = K_V * A_T$	0,907
C₁	$C_1 = V_T/4\beta$	$2,43875 \times 10^{-6}$
C₂	$C_2 = K_{TC}$	0,007

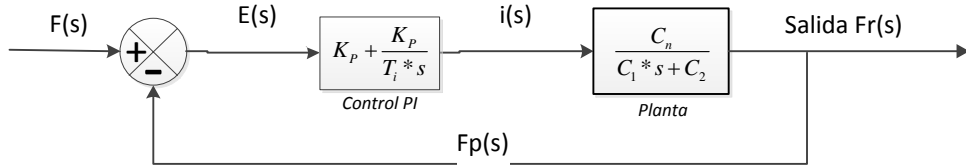
Finalmente la (Ec 13) se introducirá en el algoritmo de control en LabVIEW:

$$\frac{F_C(s)}{i(s)} = \frac{0,907}{2,43875E - 6 * s + 0,007} \quad (\text{Ec 13})$$

3.2 EFECTO DEL CONTROL PROPORCIONAL-INTTEGRAL SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA

Se comprobará que aplicando el control proporcional integral al proceso, el error en estado estacionario se hace cero.

Figura 67. Control PI aplicado al sistema representado en forma simplificada.



Se define $M(s)$ que es la combinación de la ecuación del controlador y la planta:

$$M(s) = \frac{K_p C_n \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)}{C_1 s + C_2} \quad (\text{Ec 14})$$

Ahora, según el diagrama mostrado en la figura 67:

$$\frac{E(s)}{F(s)} = \frac{F(s) - F_R(s)}{F(s)} = 1 - \frac{F_R(s)}{F(s)} = \frac{1}{1 + M(s)} = \frac{1}{1 + \frac{K_p C_n \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)}{C_1 s + C_2}}$$

Siendo la señal de entrada escalón unitario:

$$E(s) = \frac{1}{1 + \frac{K_p C_n \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)}{C_1 s + C_2}} * \frac{1}{s} = \frac{1}{\frac{C_1 s + C_2 + K_p C_n \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)}{C_1 s + C_2}}$$

$$E(s) = \frac{C_1 s + C_2}{C_1 s + C_2 + K_p C_n \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)} * \frac{1}{s} \quad (\text{Ec 15})$$

El error en estado estacionario se calcula como:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} (s * E(s)) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{C_1 s + C_2}{C_1 s + C_2 + K_P C_n \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)} \quad (\text{Ec 16})$$

$$e_{ss} = \frac{\overset{0}{\widehat{C_1 s}} + C_2}{\underset{0}{\widehat{C_1 s}} + C_2 + K_P C_n \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)} = \frac{C_2}{C_2 + K_P C_n + \frac{K_P C_n}{T_i s}}$$

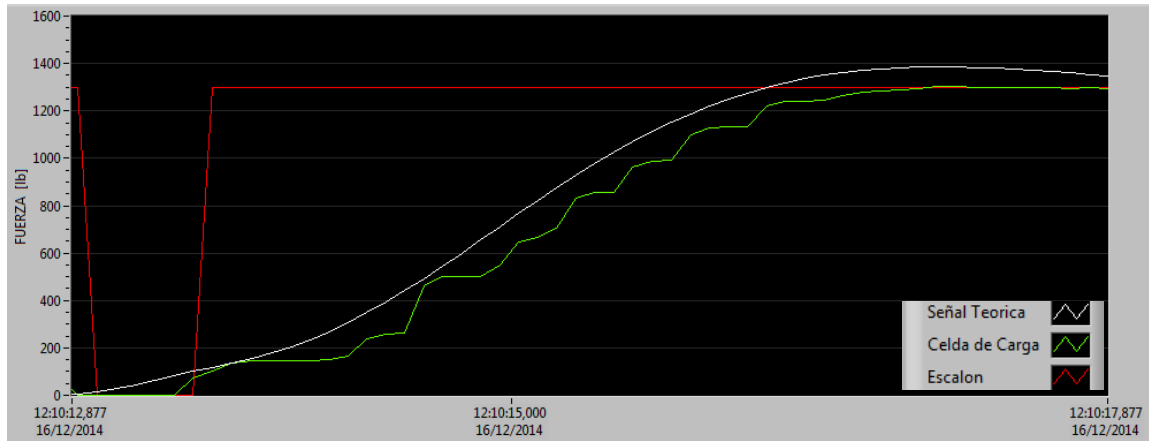
$$e_{ss} = \frac{C_2}{\frac{C_2 T_i s + K_P C_n T_i s + K_P C_n}{T_i s}} = \frac{\overset{0}{\widehat{C_2 * T_i s}}}{\underset{0}{\widehat{C_2 T_i s}} + \underset{0}{\widehat{K_P C_n T_i s}} K_P + K_P C_n} = \frac{0}{K_P C_n} = 0$$

De esta forma queda demostrado que la acción de control PI elimina el error estacionario para el proceso de control fuerza.

3.3 SERVO DE CONTROL DE FUERZA CON ACCIÓN PI Y COMPENSACIÓN POR ADELANTO DE SEÑAL (FEEDFORWARD).

En las pruebas realizadas usando la teoría clásica de control por lazo cerrado se presenta inestabilidad en el estado transitorio, reflejado en forma de ondas como se puede ver en la figura 68. A pesar de los diversos cambios realizados a las constantes de control PID este problema no se pudo solucionar, lo que quiere decir que la causa de la inestabilidad se encuentra en la dinámica del sistema. De este modo se proponen dos soluciones, la primera consiste en modificar la dinámica de la planta, lo cual no es viable debido a que se tendrían que cambiar componentes como el aceite utilizado o el pistón hidráulico. La segunda opción consiste en implementar un compensador por adelanto de señal (feedforward), el cual brinda mayor estabilidad en el estado transitorio del sistema.

Figura 68. Respuesta del control PI aplicando un entrada escalón de 1300 lb.



El control por feedback requiere de la existencia de un error antes de llegar a la función del controlador, para poder generar la señal de control hacia el sistema y de esta forma compensar las perturbaciones. En algunos casos es posible conocer con antelación las perturbaciones que recibirá el sistema, esta ventaja puede ser aprovechada para intentar eliminar los efectos de las perturbaciones antes de llevarse a cabo el proceso de cálculo de la señal de error.

El punto de partida es el sistema en lazo cerrado con realimentación de la señal de fuerza, a través de la celda de carga.

Figura 69. Sistema en lazo cerrado.

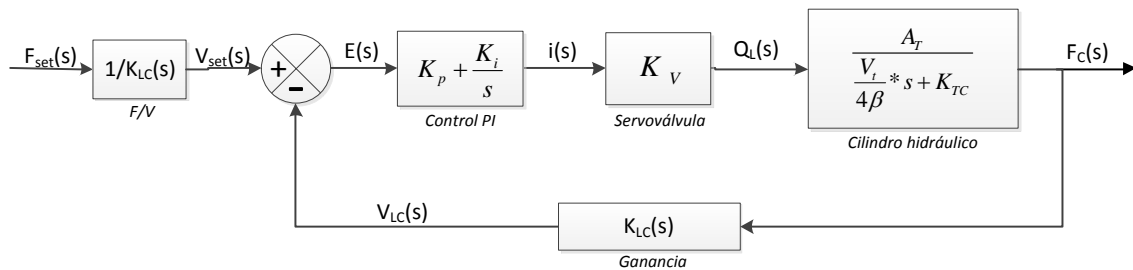


Tabla 12. Variables involucradas en el sistema en lazo cerrado.

A_T	Área de trabajo	1,455 [in ²]
β	Módulo de Bulk	2×10^5 [psi]
V_T	Volumen total de la cámara del cilindro	2,705 [in ³]
K_{TC}	Coefficiente total de pérdidas alrededor del pistón	0,00048
K_V	Ganancia de flujo de la servoválvula	0,6234 [gpm/mA]

Siendo la ecuación de la celda de carga (Ec 11):

$$F[lb] = 269 * V_c[V] - 131,9$$

El control por adelanto se introduce en cascada con la función de transferencia en lazo abierto del sistema.

$$G(s) = \frac{F_c(s)}{i(s)} = \frac{0,9070}{2,4387E - 6 * s + 0,007} \quad (\text{Ec 17})$$

En la figura 70 se expone el diagrama de bloques con la técnica de control feedforward. Se desarrollará la función correspondiente a $G(s)$ y se calculará la ganancia del compensador K_{ff} , conociendo estas expresiones se podrá determinar la función de transferencia del control feedforward, como se muestra en la figura 73. Finalmente se obtendrá la función de transferencia del sistema de control de fuerza con control combinado PI + Feedforward.

Figura 70. Diagrama en lazo cerrado con adelanto de señal:

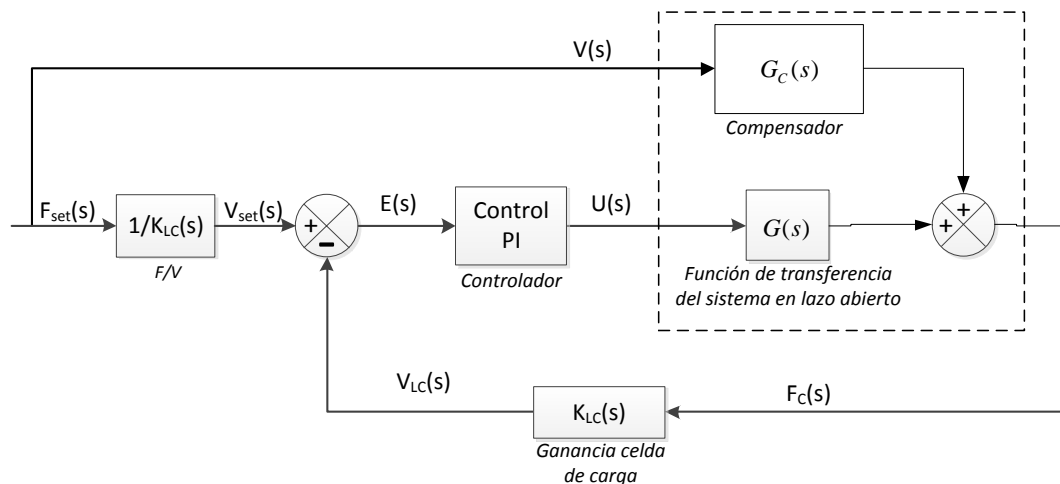
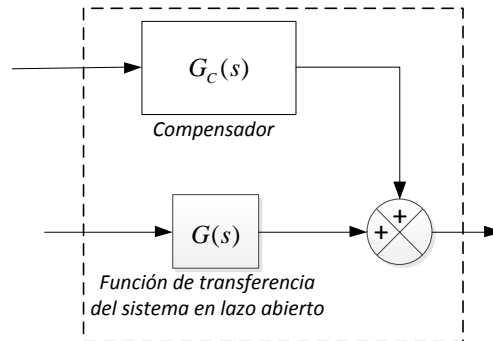


Figura 71. Detalle del Control feedforward.



Partiendo de la ley de control feedforward¹³

$$U(s) = -\frac{G_C(s)}{G(s)}V(s) \quad (\text{Ec 18})$$

La función de transferencia del control feedforward queda definida a través de la (Ec 23).

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_C(s)}{G(s)} \quad (\text{Ec 19})$$

Un compensador feedforward es, en general, un sistema dinámico. Si la función de transferencia $G_{ff}(s)$ es estable, entonces la función $G_C(s)$ también lo es. El proceso es modelado como un sistema estático y esto implica que el compensador feedforward también es un sistema estático.

Si las funciones de transferencia que caracterizan el proceso son:

$$G(s) = \frac{K}{1 + sT} \quad G_C(s) = \frac{K_C}{1 + sT_c} \quad (\text{Ec 20})$$

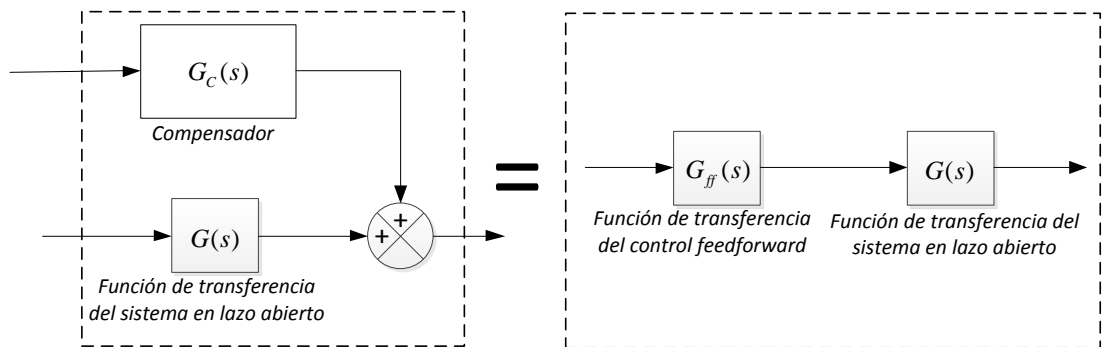
¹³ ASTRÖM, Karl and HÄGGLUND, Tore. Control Paradigms. En: PID Controllers: Theory, Design and Tuning. 2da Edición. Instrument Society of America, USA. 1995. p. 273 – 321.

Reemplazando los valores de la (Ec 20) en la (Ec 19) tenemos:

$$G_{ff}(s) = -\frac{K_C}{K} * \frac{1 + sT}{1 + sT_c} \quad (\text{Ec 21})$$

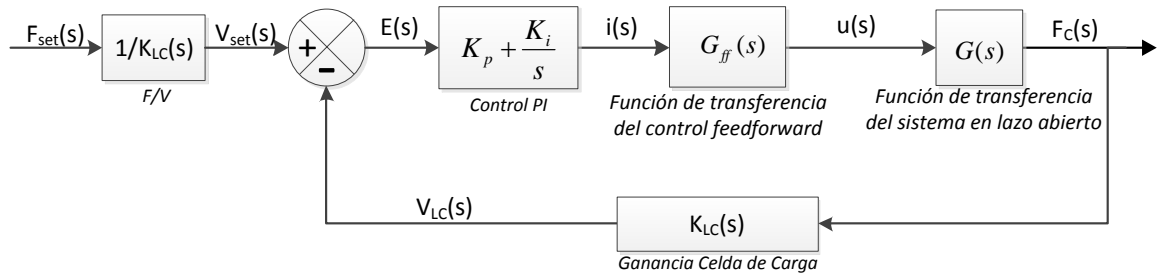
Al determinar la ganancia y la ecuación del compensador, el diagrama quedará simplificado.

Figura 72. Simplificación del diagrama de bloques.



De esta forma la función de transferencia del control feedforward se integra al diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado.

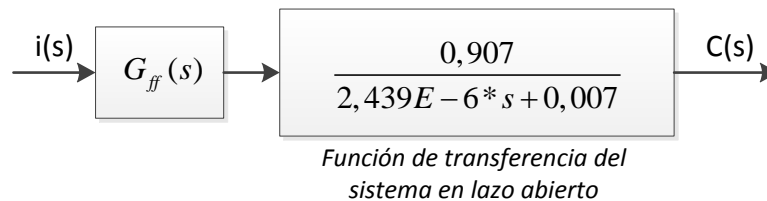
Figura 73. Diagrama en lazo cerrado con control PI + feedforward:



Para el desarrollo de la función de transferencia del control feedforward se sigue el método propuesto en los libros de Ogata¹⁴ y Aström. La función $G_{ff}(s)$ se desarrolla como se muestra en la (Ec 22).

$$G_{ff}(s) = K_v \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\alpha T}} \quad (\text{Ec 22})$$

Figura 74. Diagrama del control feedforward.



Se hallan los polos y ceros del sistema actuador:

$$2,439E - 6 * s + 0,007 = 0$$

$$s = -2870$$

- No hay ceros en la ecuación.
- Existe un polo en -2870.

¹⁴ KATSUHIKO, Ogata. Análisis y diseño de sistemas de control por el método del lugar de las raíces. En: Ingeniería de Control Moderna. 5ta edición. Pearson Educación. Madrid, 2010. p. 269 – 397.

Debido a que el ajuste de la ganancia, por sí solo, no puede proporcionar los polos en lazo cerrado adecuados se procede a calcular el ángulo de deficiencia ϕ que contribuirá al compensador por adelanto. El paso a seguir es diseñar el compensador por adelanto $G_C(s)$, cuyos polos en lazo cerrado dominantes tendrán una frecuencia natural $\omega_n = 4[\text{rad/s}]$ y un factor de amortiguamiento $\zeta = 0,7$. Siguiendo el método propuesto por Ogata¹⁵:

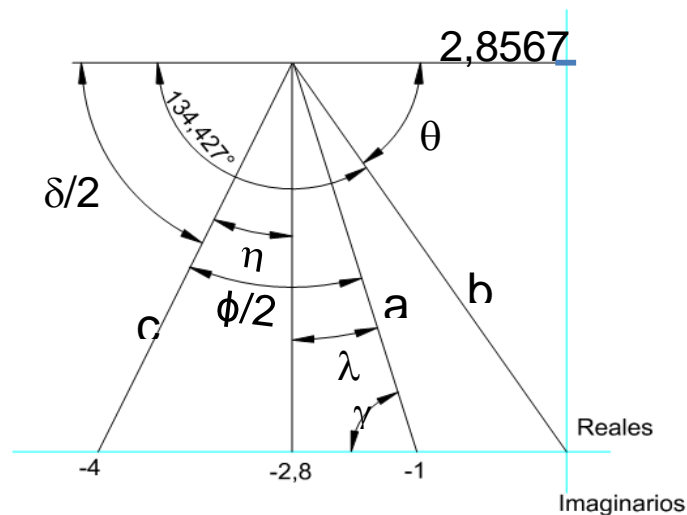
$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (\text{Ec 23})$$

$$s^2 + 2(0,7)(4)s + 16$$

$$s^2 + 5,6s + 16 = 0$$

$$s = -2,8 \pm 2,856j \quad (\text{Ec 24})$$

Figura 75. Gráfica en el lugar de las raíces.



$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{2,856}{2,8}\right) \cong 45,57^\circ$$

$$a = \sqrt{1,8^2 + 2,856^2} \cong 3,376$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{2,856}{1,8}\right) \cong 57,783^\circ$$

¹⁵ KATSUHIKO, Ogata. Análisis y diseño de sistemas de control por el método del lugar de las raíces. En: Ingeniería de Control Moderna. 5ta edición. Pearson Educación. Madrid. 2010.

$$\delta = 180 - \theta \cong 134,4^\circ$$

$$\frac{\phi}{2} \cong 67,21^\circ$$

$$b = \sqrt{2,856^2 + 2,8^2} \cong 4$$

$$\lambda = 180 - 90 - \gamma = 180 - 90 - 57,78 \cong 32,21^\circ$$

$$\eta = 90 - \frac{\delta}{2} = 90 - 67,21 \cong 22,79^\circ$$

$$c = \frac{2,857}{\cos(\eta)} \rightarrow c \cong 3,098$$

$$\frac{\phi}{2} = \eta + \lambda = 22,79 + 32,21 \cong 55$$

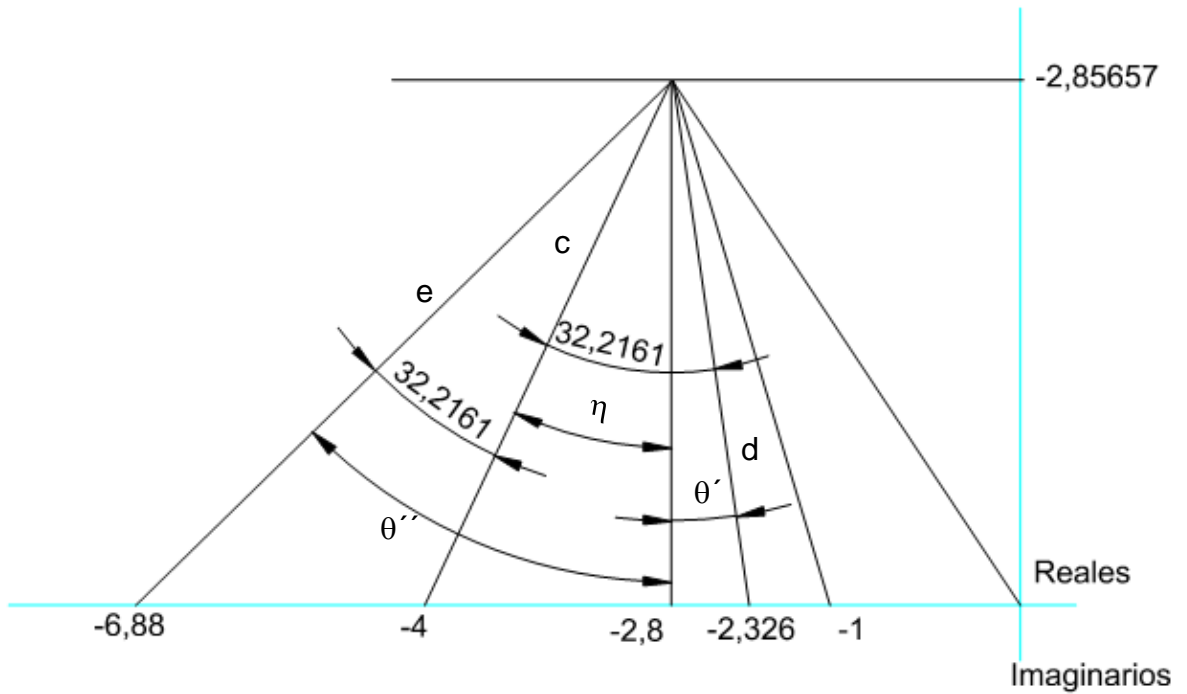
$$\boxed{\phi \cong 110^\circ}$$

Deficiencia del ángulo.

$$180 - 134,4 - 110 = -64,43^\circ \quad (\text{Ec 25})$$

De esta manera $-64,43^\circ$ es el ángulo desde el polo deseado en el lazo cerrado.

Figura 76. Gráfica en el lugar de las raíces incluyendo la deficiencia del ángulo.



$$\theta' = \eta - 32,21 = 22,78 - 32,21 \cong -9,43^\circ$$

$$d = \frac{2,856}{\cos(9,429)} \cong 2,896$$

$$\theta'' = \eta + 32,21 = 22,79 + 32,21 \cong 55^\circ$$

$$e = \frac{2,857}{\cos(55^\circ)} \cong 4,98$$

De la figura 76 se obtienen los ceros y polos del compensador:

$$\boxed{\text{Cero} \cong -2,326}$$

$$\boxed{\text{Polo} \cong -6,88}$$

Ahora supongamos que el compensador por adelante tiene la siguiente función de transferencia:

$$G_C(s) = K_C \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\alpha T}} = K_C \frac{s + 2,326}{s + 6,88} \quad (\text{Ec 26})$$

Para el compensador el valor de α es:

$$\alpha = \frac{\text{cero}}{\text{polo}} = \frac{-2,326}{-6,88} \cong 0,338 \quad (\text{Ec 27})$$

El valor de K_C se determina a partir de la condición de magnitud:

$$\left| K_C \frac{s + 2,326}{s + 6,88} * \frac{0,907}{2,438E - 6 * s + 0,007} \right|_{s=-2,8 \pm 2,856j} = 1$$

$$K_C = \left| \frac{2E - 6 * s^2 + 0,007 * s + 0,048}{1,455 * s + 3,384} \right|_{s=-2,8 \pm 2,857j}$$

$$K_C = \frac{0,0285 + 0,020j}{-0,689 + 4,156j}$$

$$K_C = 0,0035 - 0,007j \quad (\text{Ec 28})$$

Para hallar K_C :

$$\left| K_C \frac{s + 2,326}{s + 6,88} * \right|_{s=-2,8 \pm 2,857j} = 1$$

Se obtiene: $K_{C1} = 2,911$ y $K_{C2} = -0,367$.

$$\boxed{K_c = 2,911} \quad (\text{Ec 29})$$

De esta forma la ecuación para el compensador por adelanto queda de la siguiente forma:

$$G_c(s) = 2,91138 * \frac{s + 2,326}{s + 6,88} \quad (\text{Ec 30})$$

Y la ecuación del sistema con el compensador por adelanto quedará finalmente así:

$$G_c(s) * G(s) = \left(2,911 * \frac{s + 2,326}{s + 6,88} \right) * \left(\frac{0,907}{2,439E - 6 * s + 0,007} \right) \quad (\text{Ec 31})$$

Luego de realizar las operaciones, la ecuación del sistema en lazo cerrado con adelanto queda:

$$\boxed{\frac{F_p(s)}{i(s)} = \frac{4,236 * (s + 2,326)}{2E - 6 * (s + 6,88) * (s + 2870)}} \quad (\text{Ec 32})$$

ALGEBRA DE BLOQUES:

Figura 77. Diagrama general del sistema con la función del compensador.

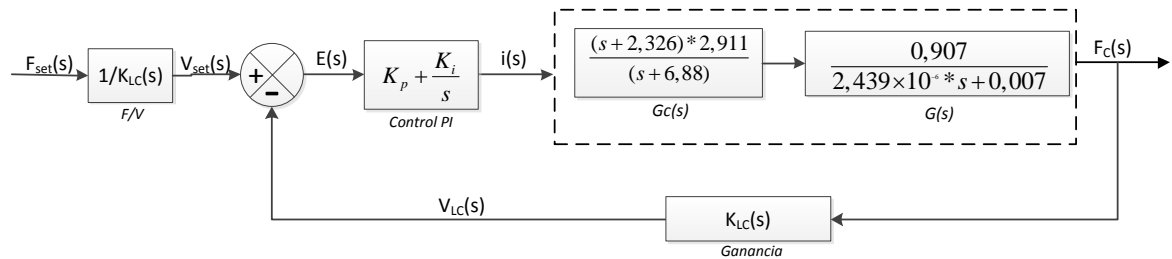


Figura 78. Diagrama simplificado del sistema con la función del compensador.

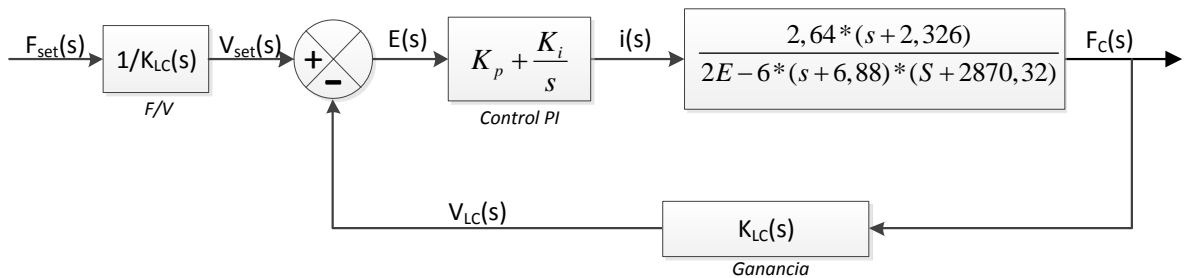
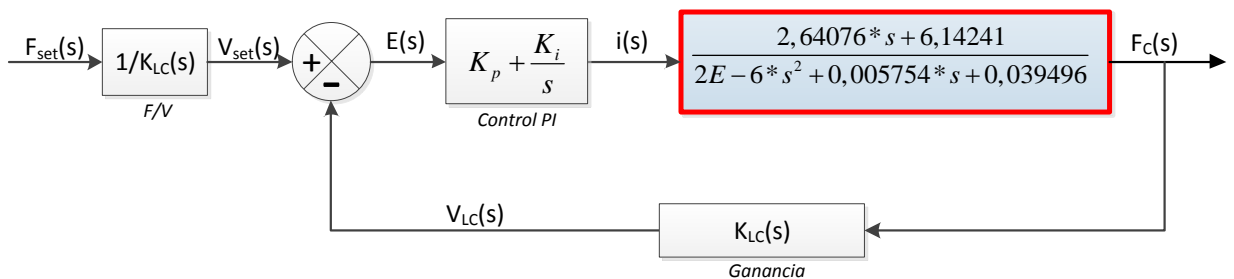


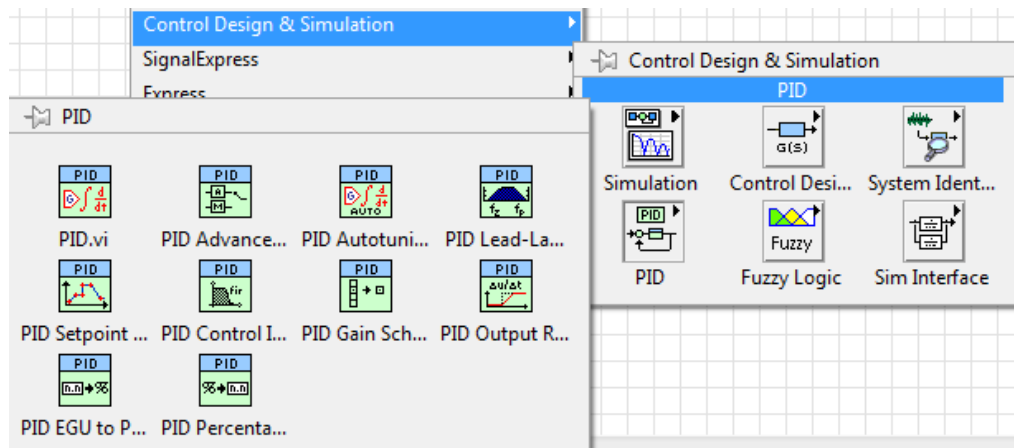
Figura 79. Diagrama simplificado del sistema con la implementación del compensador.



4. DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL

Una vez aprendidos los conocimientos básicos para programar en el lenguaje LabVIEW y habiendo realizado el modelamiento matemático del sistema, se inició el desarrollo un programa que fuera capaz de controlar fuerza mediante el uso de una tarjeta de adquisición de datos, un computador, una servoválvula, una celda de carga (la cual fue usada en lugar del transductor de presión) y un actuador. En primer lugar se debía generar un programa PID y observar el comportamiento de dicho control sobre el sistema que se iba a controlar, para nuestro caso solo se variarían las constantes proporcional e integral.

Figura 80. Detalle de la toolkit PID and FUZZY logic control.

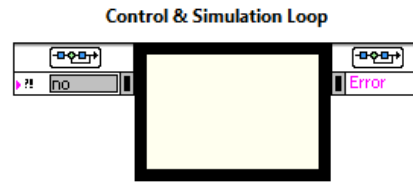


Fuente: NI LabVIEW.

En la figura 80 se muestra el paquete de control PID que ofrece LabVIEW 2009, herramienta que no se usó por algunas consideraciones que se tuvieron antes de empezar a programar. Siendo la más relevante, el hecho de que programar en base a los modelos ya preestablecidos en las herramientas ofrecidas por LabVIEW 2009, no garantiza que el control PID que se ejecuta dentro de esta herramienta sea característico al sistema que se va a controlar.

En vez de eso, se utilizó otra herramienta llamada Control & Simulation Loop en la cual se puede introducir la función de transferencia y así garantizar matemáticamente que el sistema es aproximadamente el real. Por consiguiente el control a ejecutarse dentro del PID también es semejante al real.

Figura 81. Detalle de la herramienta Control & Simulation Loop



Fuente: NI LabVIEW

Se presenta una imagen del programa general hecho en la ventana de Block Diagram de LabVIEW 2009.

Figura 82. Vista del algoritmo de control en la ventana Block Diagram.

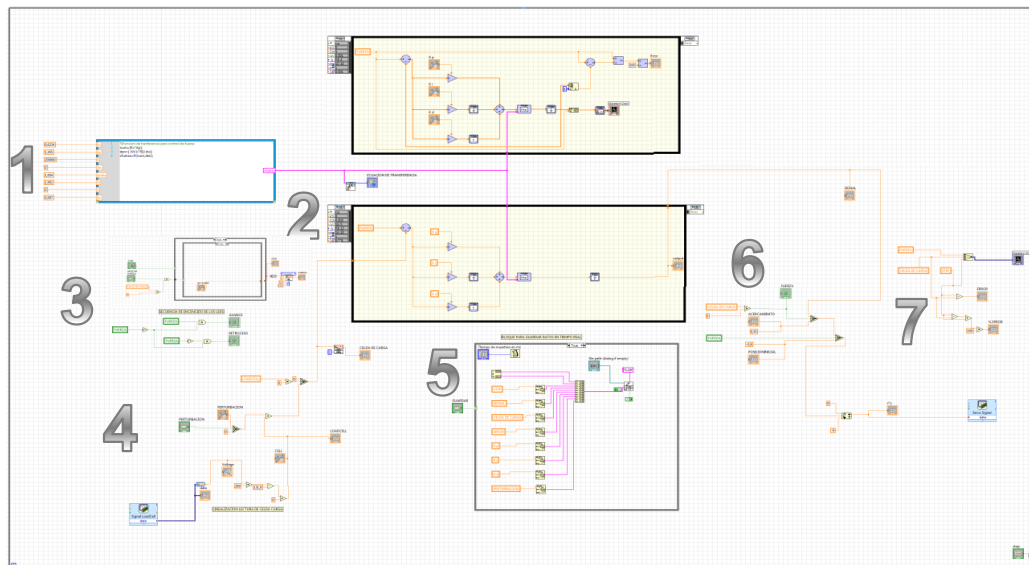


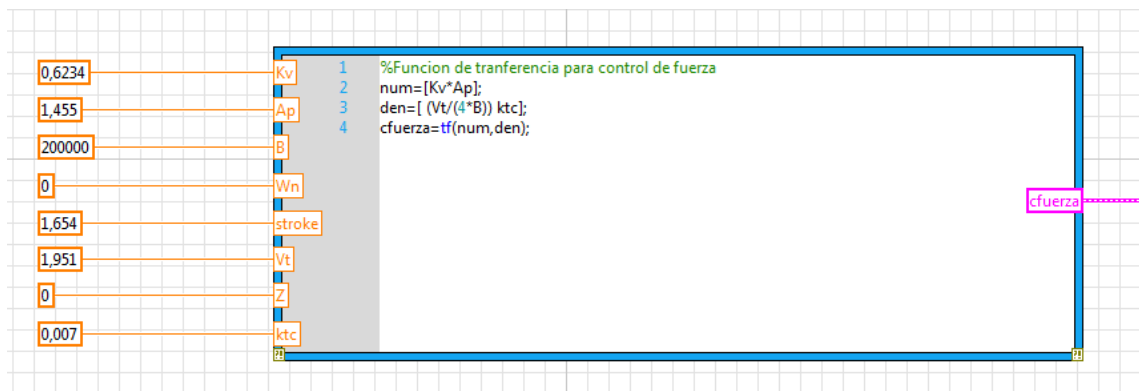
Tabla 13. Detalle de los componentes del algoritmo de control.

Número	Componente
1	Ecuación de transferencia del sistema.
2	Control PID
3	Lectura de la señal de setpoint
4	Lectura de la señal de la celda de carga
5	Bloque para guardar datos en tiempo real
6	Señal de control hacia la servoválvula
7	Representación gráfica y cálculos de error.

4.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA.

Usando la herramienta MathScript Node se puede introducir la función de transferencia característica del sistema a controlar (Ec 10). En la parte izquierda y en color anaranjado se introducen cada una de las constantes previamente calculadas para nuestra función de transferencia. En la parte central y dentro del cuadro azul se colocan las constantes determinando cuales de ellas van en el denominador o numerador. Por ultimo en la parte derecha y en fucsia sale la señal que resulta del cálculo de la ecuación de transferencia al Control & Simulation Loop.

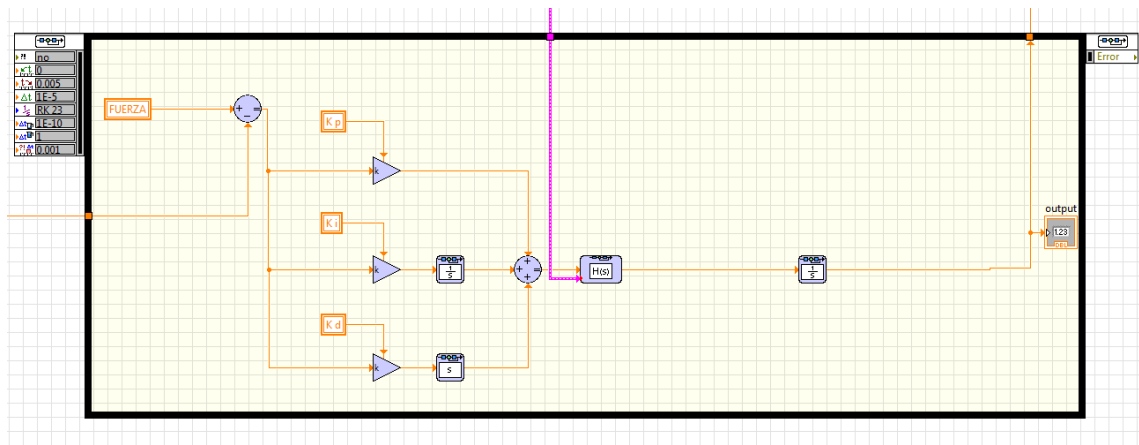
Figura 83. Función de transferencia del sistema a través del MathScript Node.



4.2 CONTROL PID.

En la figura 84 se muestra el control PID desarrollado en la herramienta Control & Simulation Loop, se puede observar en la parte izquierda las constantes que se pueden introducir, éstas son la proporcional, integral y derivativa. En la parte central se observa la línea fucsia que representa la señal proveniente de la ecuación de transferencia. Se puede afirmar que la respuesta del control es aproximada al comportamiento real del sistema, debido a que la señal a controlar es una ecuación de transferencia característica del sistema, que ha sido previamente calculada. Es importante aclarar que existen dos ventanas de Control & Simulation Loop. La superior permite mostrar y calcular teóricamente la respuesta del sistema, y la mostrada en la figura 84 es la que nos permite hacer el control real y continuo para nuestro sistema.

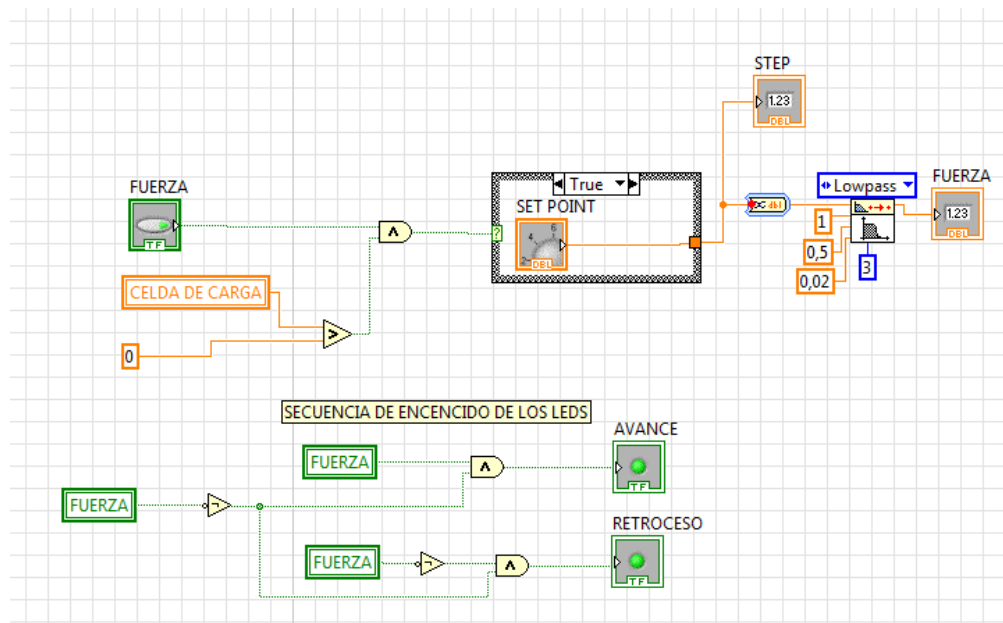
Figura 84. Control PID.



4.3 LECTURA DE LA SEÑAL DE SETPOINT.

En esta parte del programa se muestran básicamente la lectura de la señal de setpoint y la forma en la que se programaron las luces indicadoras para la guía en la interfaz.

Figura 85. Lectura de la señal de setpoint.

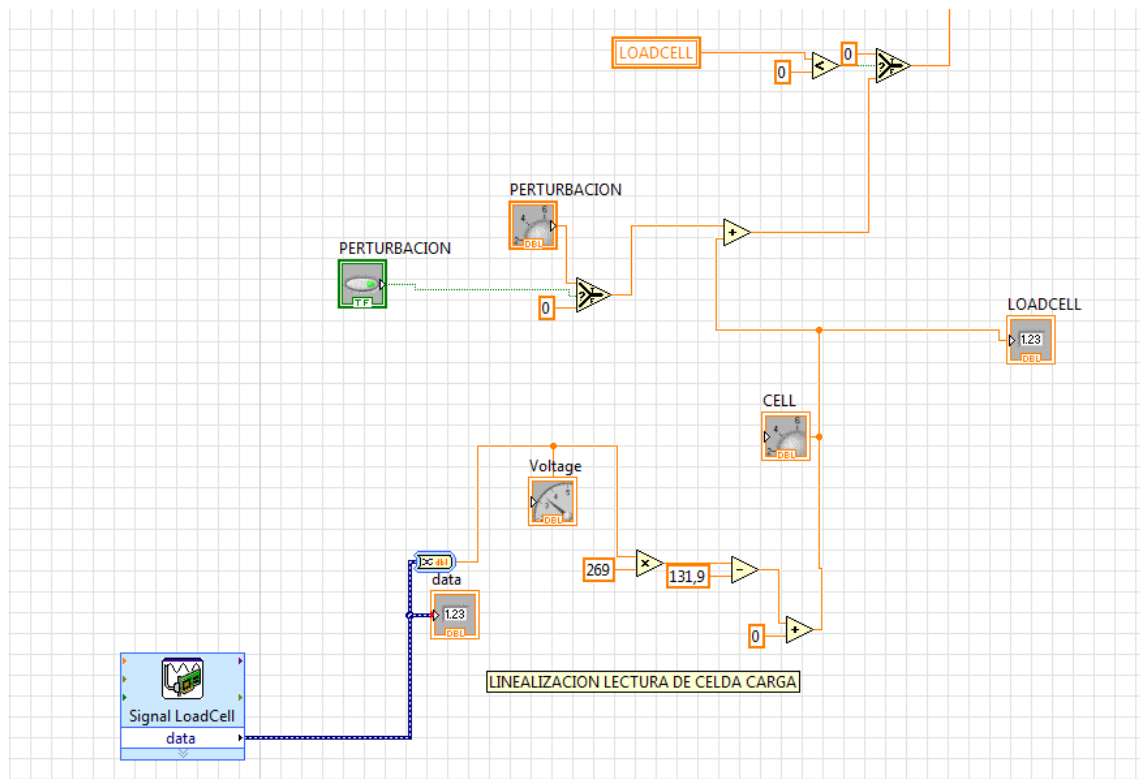


4.4 LECTURA DE LA SEÑAL DE LA CELDA DE CARGA.

Antes de programar este código se hicieron las pruebas de caracterización de la celda de carga, usando un amplificador instrumental INA128P, éste proceso se presenta en el capítulo 7. La lectura muestra directamente la fuerza en libras realizada por el actuador, a través de la (Ec 11).

Debido a que en el banco de control de fuerza, físicamente no se podían agregar perturbaciones externas, éstas se adicionaron al programa de manera digital para visualizar la reacción del sistema a dichas perturbaciones. Se diseñaron para valores de alrededor del diez por ciento del valor máximo que puede aplicar el banco.

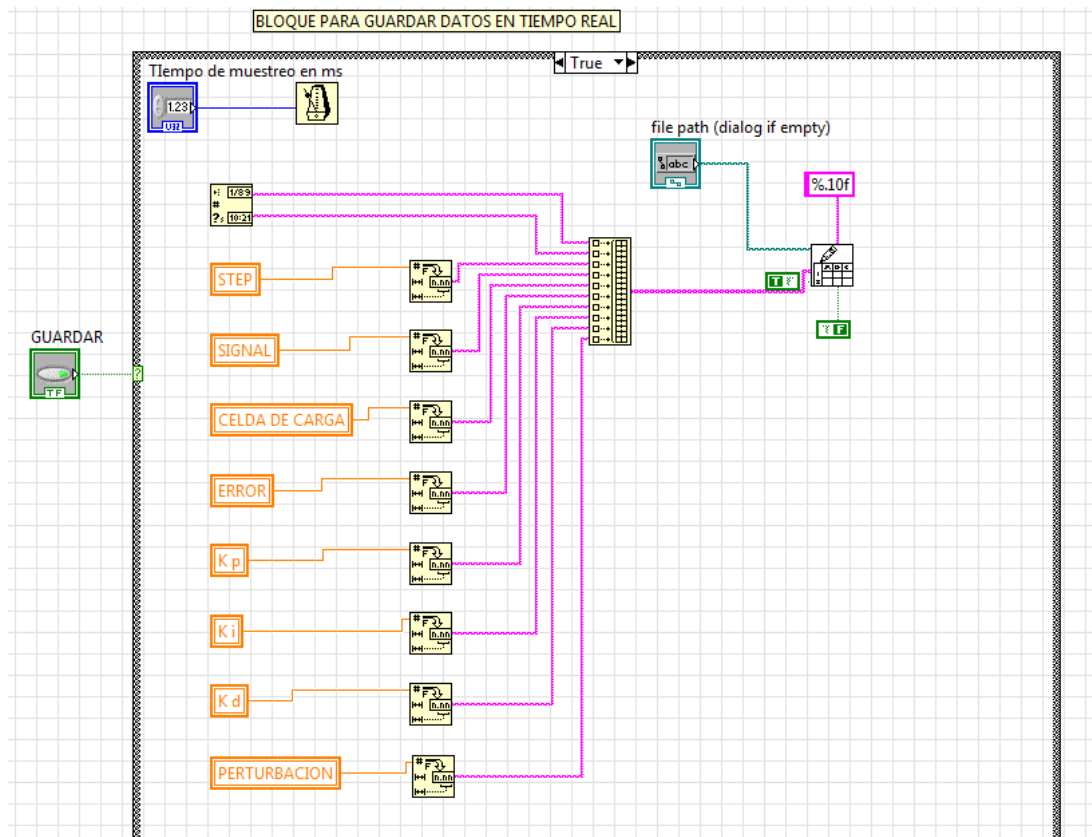
Figura 86. Lectura de la señal de la celda de carga.



4.5 BLOQUE PARA GUARDAR DATOS EN TIEMPO REAL.

El presente bloque se programó para guardar archivos. Las variables a guardar aparecen en color anaranjado. El archivo se guarda en formato .txt en forma de columnas. En la parte superior se muestra un metrónomo el cual indica cada cuántos milisegundos se graba un dato en el muestreo. Finalmente en la parte izquierda se muestra el comando para guardar o no dependiendo sea el caso.

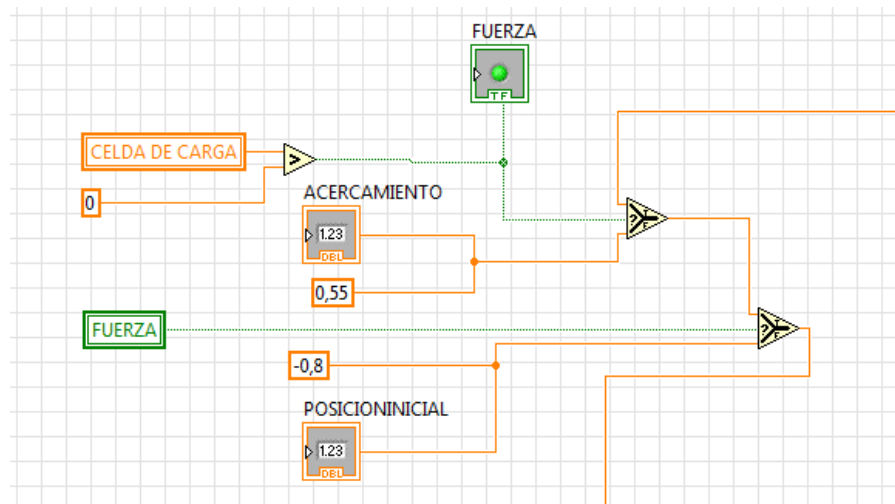
Figura 87. Bloque para guardar datos en tiempo real.



4.6 SEÑAL DE CONTROL HACIA LA SERVÓLVULA.

En el presente bloque se muestra la señal que se envía a la servoválvula en el momento que se va acercando al muelle sin empezar el control. Una vez la celda empieza a enviar señal se desactiva el comando de acercamiento y se permite el paso de la señal de control.

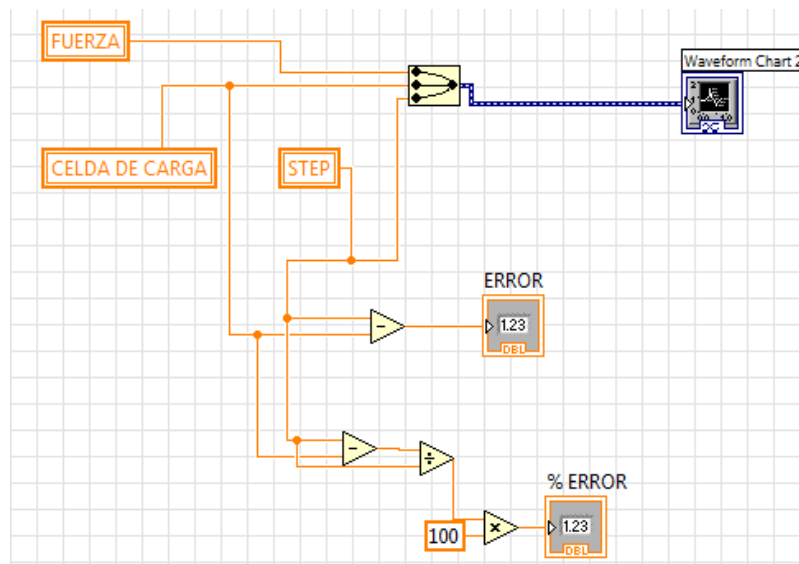
Figura 88. Señal de control hacia la servoválvula.



4.7 REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y CÁLCULOS DE ERROR.

En esta parte del programa se realiza la representación gráfica de las variables y a su vez se realizan los cálculos correspondientes a los errores absoluto y porcentual.

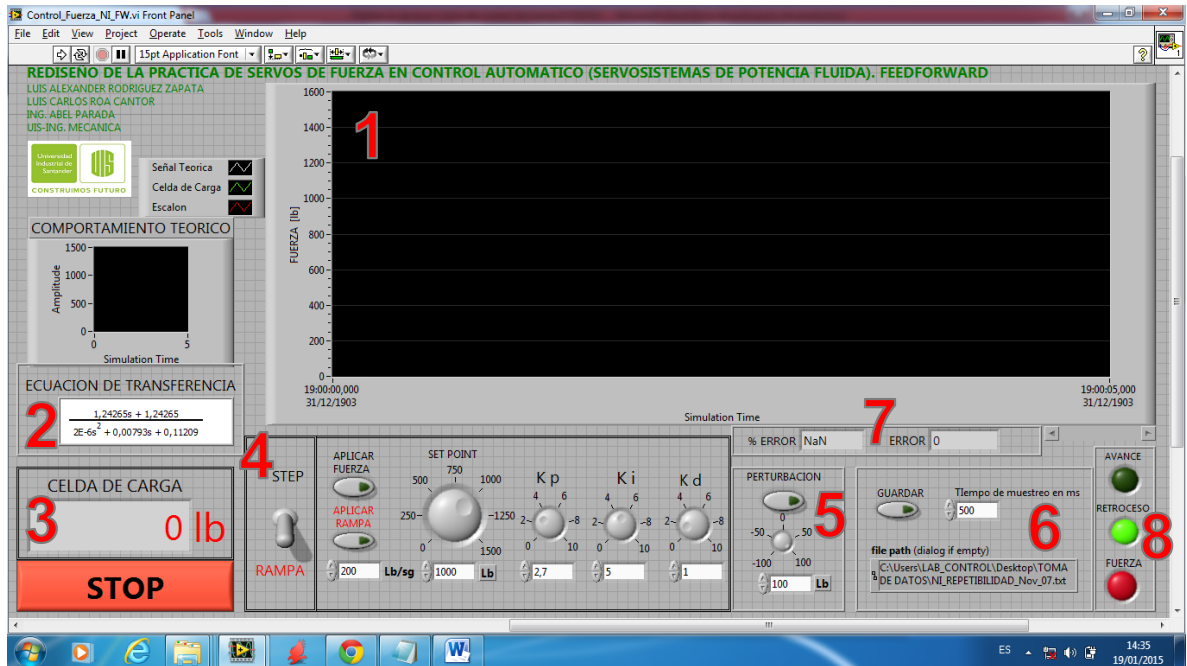
Figura 89. Representación gráfica y cálculos de error.



5. DISEÑO DE LA INTERFAZ VIRTUAL HMI.

En la figura 90 se presenta la interfaz diseñada y a continuación se explica en detalle la función realizada por cada una de las partes numeradas.

Figura 90. Interfaz virtual HMI.

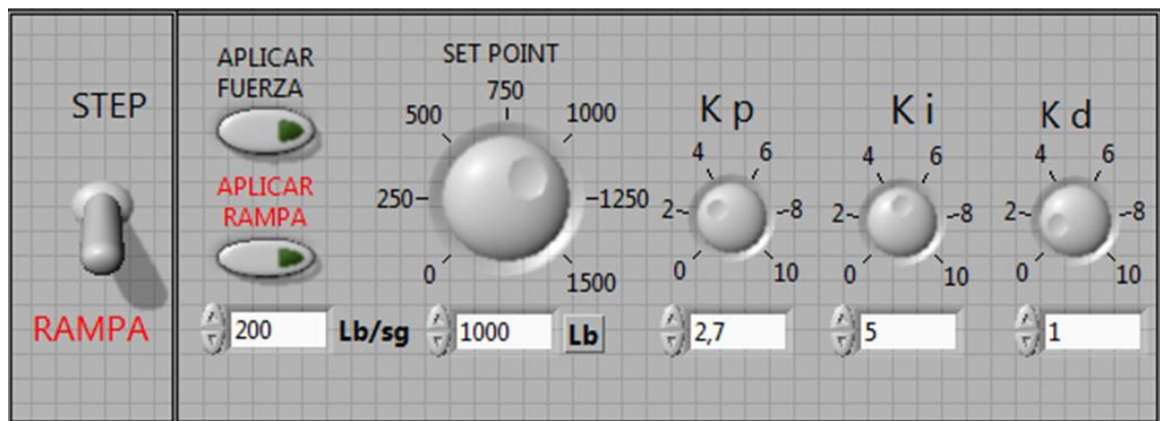


- 1) Gráfica de resultados en tiempo real. Se grafican las señales de step, señal teórica y la señal real.
- 2) Ecuación de transferencia característica del sistema.
- 3) Valor de fuerza en libras que se está aplicando a la celda de carga. Debajo de esta lectura se encuentra el botón para parar el programa en caso de emergencia.

- 4) Botón de aplicación de la fuerza y casillas para introducir el setpoint y las constantes del control PID. En el presente caso es suficiente introducir constantes proporcional e integral. La constante derivativa no tiene relevancia para un control de fuerza con inercia despreciable.
- 5) Botón para activar la perturbación entre -100 lb y 100lb. Como ya se mencionó, esta perturbación es digital y se aplica en tiempo real.
- 6) Botón de inicio de registro de datos. Para realizar este proceso se deben tener algunas consideraciones que más adelante se explicaran.
- 7) Casillas indicadoras de los valores de error absoluto y error porcentual.
- 8) Luces indicadoras de la acción que se está realizando sobre la servoválvula. La luz de avance encendida indica que el cilindro está saliendo para ejercer fuerza, la luz de retroceso encendida representa el retroceso del cilindro hasta su posición inicial y por último la luz roja, cuyo título es fuerza, da a entender que se está ejerciendo el control de fuerza.

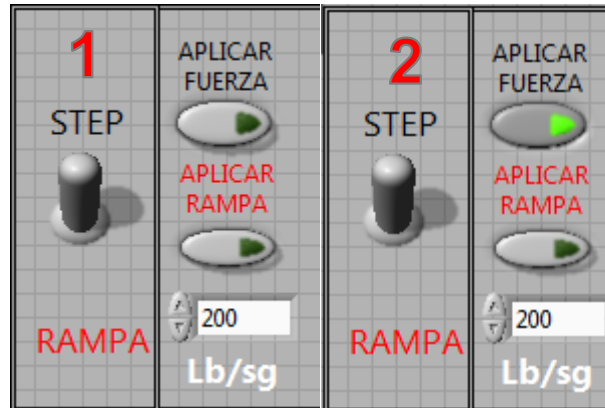
A continuación se explicara la forma de uso del comando principal marcado con el número 4.

Figura 91. Comando principal.



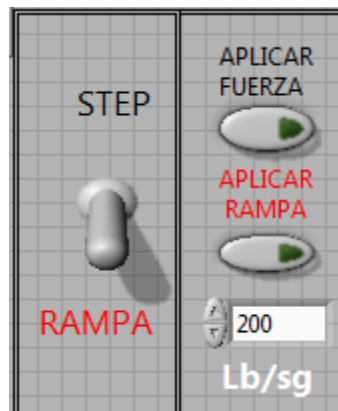
El selector en la parte izquierda (figura 92) indica que tipo de señal de entrada se utilizará en el proceso de control.

Figura 92. Detalle del comando de selección del tipo de señal de entrada.



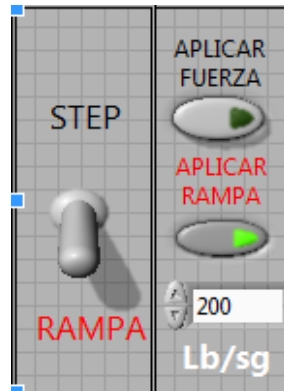
Se encuentra seleccionada la opción “STEP” para señal de entrada. Se puede aplicar la fuerza oprimiendo el botón de aplicar fuerza, nótese que el led del botón se activa (2). Y para quitar la fuerza se oprime otra vez el botón aplicar fuerza y el led se desactivará (1). Para esta selección el botón aplicar rampa queda inactivo.

Figura 93. Detalle de selección de entrada tipo rampa.



Una vez seleccionada la opción “RAMPA” para señal de entrada, como se muestra en la figura 93, el usuario deberá seguir los siguientes pasos cada vez que se desee aplicar la señal rampa como entrada:

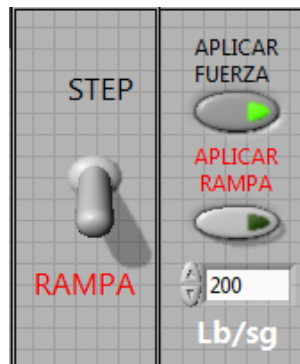
1) Definir la cantidad de libras que se deseen aplicar por cada segundo



Una vez definido el paso 1 se debe oprimir el botón aplicar rampa.



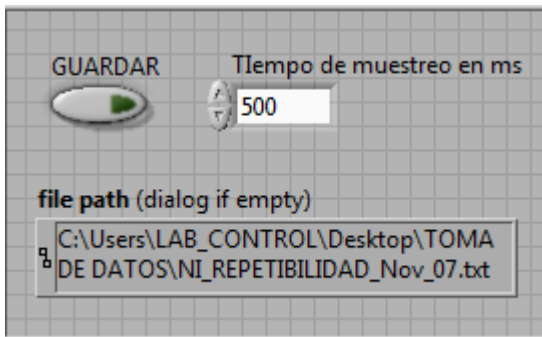
2) Para aplicar la fuerza se debe oprimir el botón "APLICAR FUERZA". Una vez hecho estos tres pasos el control empezara a ejercerse a partir que la celda de carga toque el muelle o en otras palabras que se empieza a aplicar la fuerza.



- 3) Una vez se esté ejecutando el control nótese que el botón aplicar rampa se desactiva, lo cual es indicador que la rampa se aplicó con éxito.
- 4) Cada vez que se quiera aplicar la rampa se deberán efectuar los pasos del 1 al 4 según se desee.

A continuación se explica la forma de almacenamiento de datos. Los valores se guardan en formato “.txt”.

Figura 94. Bloque de almacenamiento de datos.



En la parte superior está el botón GUARDAR, el cual activa dentro del programa el proceso de grabación de datos. Los datos se guardan directamente en el computador.

En la parte superior derecha se presenta un recuadro llamado “Tiempo de muestreo en ms”, en el recuadro se puede modificar el tiempo en el cual se desean grabar datos. Se debe tener en cuenta que este tiempo está en milisegundos, como configuración predeterminada el tiempo de muestreo es de 500 ms.

El indicador File path, que se encuentra en la parte inferior y centrado, indica la dirección en donde se desean grabar los datos y el título con el cual se guardarán.

A continuación se presenta un ejemplo del uso de esta herramienta:

- C:\Users\LAB_CONTROL\Desktop\TOMADEDATOS\NI_REPETIBILIDAD_Nov_07.txt.
- NI_REPETIBILIDAD_Nov_07.txt. Este es el nombre del archivo, el cual se puede modificar, teniendo precaución de no borrar la palabra “.txt” debido a que este código le indica al programa que el archivo se desea guardar en formato de texto. Se hace la aclaración que se pueden guardar en diferentes formatos pero consideramos que el más pertinente para nuestro programa es el formato de texto.

Figura 95. Ejemplo de datos guardados en el archivo de texto.

23/10/2014	18:19	1300,00000	5,463717	1217,18540	82,814600	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,328068	1219,24095	80,759050	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,328068	1219,24095	80,759050	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,328068	1219,24095	80,759050	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,192369	1221,29650	78,703500	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,192369	1221,29650	78,703500	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,328068	1219,24095	80,759050	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,328068	1219,24095	80,759050	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,328068	1219,24095	80,759050	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,328068	1219,24095	80,759050	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,328068	1219,24095	80,759050	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,463717	1217,18540	82,814600	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,463717	1217,18540	82,814600	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,192369	1221,29650	78,703500	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,192369	1221,29650	78,703500	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000
23/10/2014	18:19	1300,00000	5,328068	1219,24095	80,759050	0,095000	0,369000	0,000000	0,004800	-100,00000

El orden de columnas es el siguiente:

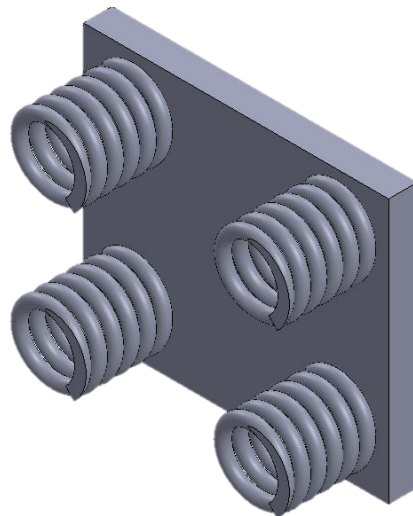
Fecha, hora, step, señal teórica, lectura de la celda de carga en libras, error porcentual, Kp, Ki, Kd y perturbación.

- Se recomienda cambiar los nombres de los archivos para cada prueba debido que si se inicia una nueva prueba, el programa seguirá guardando los datos en el archivo con el nombre que tenga escrito en el file path sin perder datos, es decir, continua la grabación en el archivo existente.

6. PRUEBAS, RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se realizaron pruebas experimentales para analizar la respuesta del sistema, tanto en estado transitorio como en estado estacionario, variando las técnicas de control implementadas, el tipo de señal de entrada y la tarjeta de adquisición de datos utilizada. Las pruebas se realizaron sin modificar la configuración de los elementos del banco ni sus condiciones de operación. Esto hace referencia a que el aceite hidráulico usado fue el mismo durante todo el proceso y las únicas alteraciones realizadas a los elementos fueron labores de mantenimiento aplicadas a las conexiones eléctricas. La pieza de prueba utilizada durante todo el proceso fue una lámina de acero con 4 resortes soldados a su superficie y una lámina de caucho pegada en la parte posterior para brindar mayor amortiguación y evitar el desgaste en la superficie del refuerzo estructural.

Figura 96. Elemento de prueba utilizado en los experimentos.



Posteriormente, la fase de análisis se dividió en dos etapas. La primera se centró en un estudio descriptivo cuyo objetivo principal fue calcular las características de la respuesta en estado transitorio y estacionario. Con los resultados obtenidos se realizó, en la segunda etapa, un análisis correlacional, donde inicialmente se plantearon unas hipótesis sobre las posibles relaciones entre las variables involucradas y mediante técnicas de comparación se determinó su verdadero grado de asociación.

6.1 DEFINICIONES.

Para poder realizar un análisis a los proceso de control se requiere definir previamente algunas características de su respuesta en estado transitorio y en estado estacionario. A través de estas especificaciones se podrán realizar comparaciones entre varios sistemas y desarrollar conclusiones.

Para el estado transitorio el análisis se centra en la dinámica de la respuesta del sistema, para lo cual se calculan características en el dominio del tiempo. El estudio del estado estacionario involucra especificaciones concernientes a la exactitud y precisión del proceso, las cuales se relacionan con la señal de consigna o setpoint que el sistema debe seguir.

6.1.1 Estado estacionario. Un sistema alcanza su estado estacionario o estable cuando la respuesta del sistema oscila en un rango comprendido generalmente entre el 3 o 5% de la señal de consigna. Después de este punto se considera que el sistema es estable. Para realizar el análisis del sistema cuando su respuesta ha llegado a esta zona se definen las siguientes características.

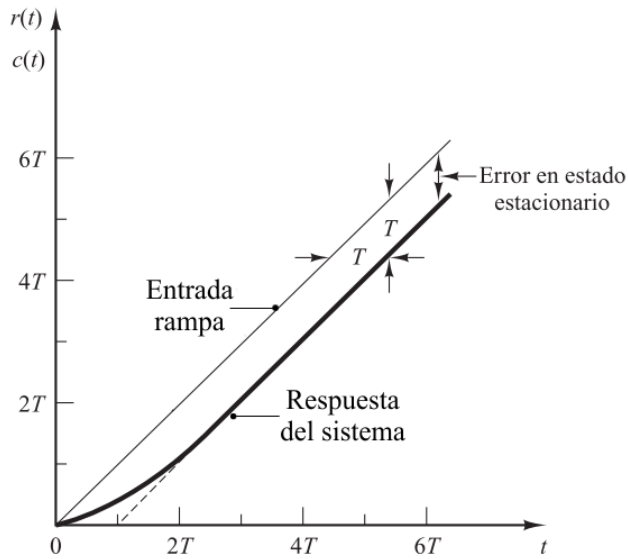
Error Porcentual: El error porcentual indica la desviación de la medida experimental con respecto a la medida teórica y representa la exactitud del proceso de medida.

$$\%Error = \frac{F(s) - F_r(s)}{F(s)} * 100 \quad (Ec\ 33)$$

Para el caso del banco de control de fuerza se aplica la (Ec 33), donde el valor $F_r(s)$ es la magnitud medida por la celda de carga, el cual se calculó hallando el promedio de los valores registrados en cada toma para el respectivo setpoint.

Cuando al sistema se aplica una entrada rampa, el error en estado estacionario se calcula de la misma manera y conceptualmente representa lo mismo. En la figura 97 se puede apreciar que la respuesta debe seguir la pendiente de la señal de entrada.

Figura 97. Respuesta a entrada rampa para un sistema de primer orden.



Fuente: Ingeniería de Control Moderna, Katsuhiko Ogata.

Desviación estándar: En una distribución de datos de tipo Gaussiana la desviación estándar representa el grado de dispersión de los valores de la variable que se miden repetitivamente. Esta variable está relacionada con la precisión del proceso, que es la cualidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras. Se calcula según la (Ec 34).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (\text{Ec 34})$$

Repetibilidad: La repetibilidad es la capacidad de reproducción de la señal de salida del instrumento, al medir valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo. La repetibilidad es sinónimo de precisión. La repetibilidad viene dada por la (Ec 35) y se representa en tanto por ciento del alcance.

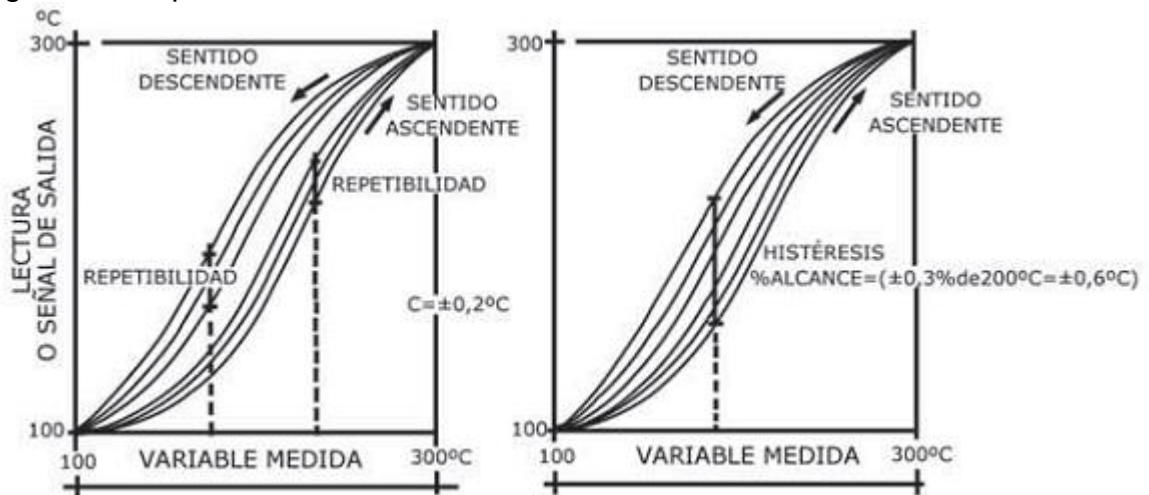
$$\text{Repetibilidad} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (\text{Ec 35})$$

Donde N es el número de intervalos tomados dentro del campo de medida recorrido.

Histéresis: Es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por la señal de salida de un instrumento para el mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre la escala en los dos sentidos, ascendente y descendente. En la figura 98 se aprecia la diferencia entre repetibilidad e histéresis. Se expresa en tanto por ciento del alcance de la medida.

$$\text{Histéresis} = \frac{x_{subida} - x_{bajada}}{\text{rango}} * 100 \quad (\text{Ec 36})$$

Figura 98. Repetibilidad e Histéresis



Fuente: Instrumentación Industrial, Creus.

6.1.2 Estado transitorio. La respuesta transitoria corresponde a la respuesta del proceso desde el momento en que se introduce la señal de consigna hasta antes de llegar al régimen estable. El estudio se realiza a través de especificaciones en el dominio del tiempo.

Tiempo de retardo (t_d): Es el tiempo que demora el sistema en llegar por primera vez al 50% de su valor final.

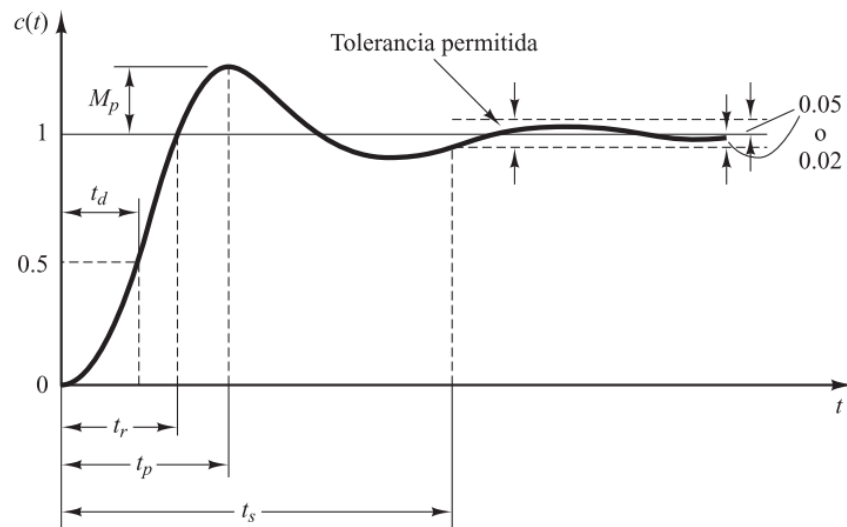
Tiempo de subida (t_r): También llamado tiempo de levantamiento, es el tiempo requerido para que el sistema vaya del 0% al 100% del valor final.

Tiempo pico (t_p): Se llama así al tiempo que demora la repuesta del sistema en alcanzar el primer pico de sobreelongación.

Sobreelongación máxima (M_p): También conocida como máximo pico, es el máximo valor alcanzado por la curva de respuesta y se representa de forma porcentual.

Tiempo de asentamiento (t_s): Es el tiempo que se requiere para que la respuesta del sistema oscile dentro de un rango porcentual alrededor del valor final. Dicho rango se especifica según los requerimientos del proceso.

Figura 99. Especificaciones de la respuesta transitoria frente a una entrada escalón.

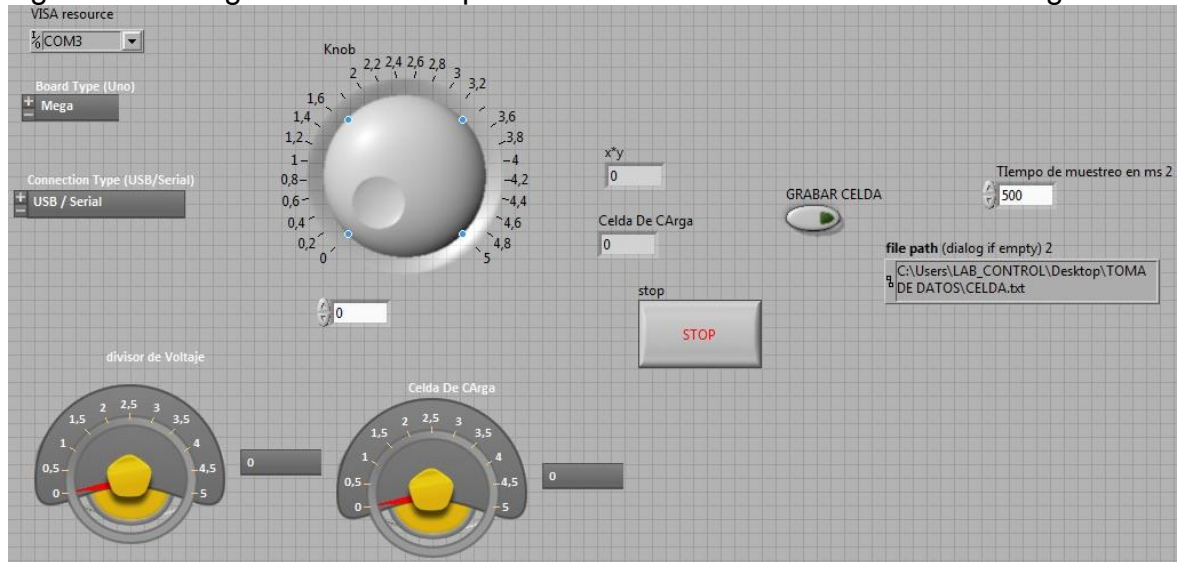


Fuente: Ingeniería de control moderna, Ogata.

6.2 PRUEBA PARA CARACTERIZAR LA CELDA DE CARGA.

Para la determinación de la ecuación de la celda de carga se hicieron pruebas sobre el sistema en lazo abierto y se registraron los valores de voltaje medidos por la celda de carga con la ayuda de un programa desarrollado en el entorno LabVIEW.

Figura 100. Programa diseñado para la caracterización de la celda de carga.



La válvula de seguridad proporcional cuenta con una tarjeta amplificadora (figura 101), a través de la cual se puede variar la presión de taraje del sistema y también ventear la válvula. De esta forma, con la ayuda de los manómetros, se fijó la presión en un valor y se registraron los voltajes respectivos.

Figura 101. Tarjeta amplificadora de la válvula de seguridad proporcional.



Figura 102. Visualización del diferencial de presión a través de los manómetros.



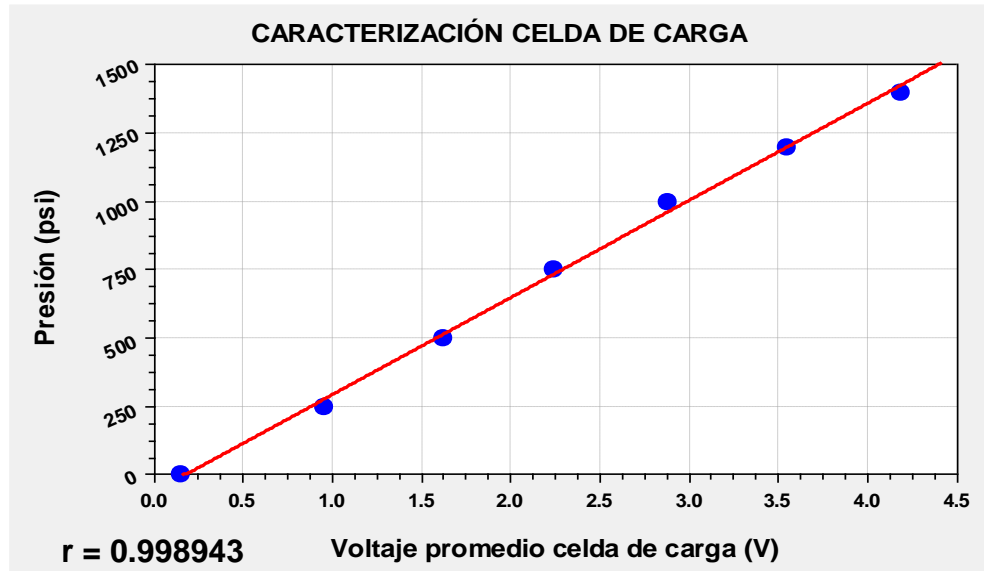
Este procedimiento se realizó desde una presión de 0 psi hasta 1200 psi en intervalos definidos, los resultados de estas pruebas se relacionan en el Anexo A. Posteriormente se organizaron los resultados y se calcularon los respectivos promedios. Finalmente se pudo obtener la información relacionada en la tabla 14.

Tabla 14. Datos para caracterizar la celda de carga.

Presión [psi]	Voltaje promedio de la celda de carga [V]
0	0,16
250	0,83
500	1,44
750	2,04
1000	2,63
1200	3,28
1400	3,82

Con la ayuda de un software se realizó una regresión matemática considerando que el sistema fuera lineal y se obtuvo la ecuación característica de la celda de carga (Ec 37).

Figura 103. Regresión lineal para hallar la ecuación característica.



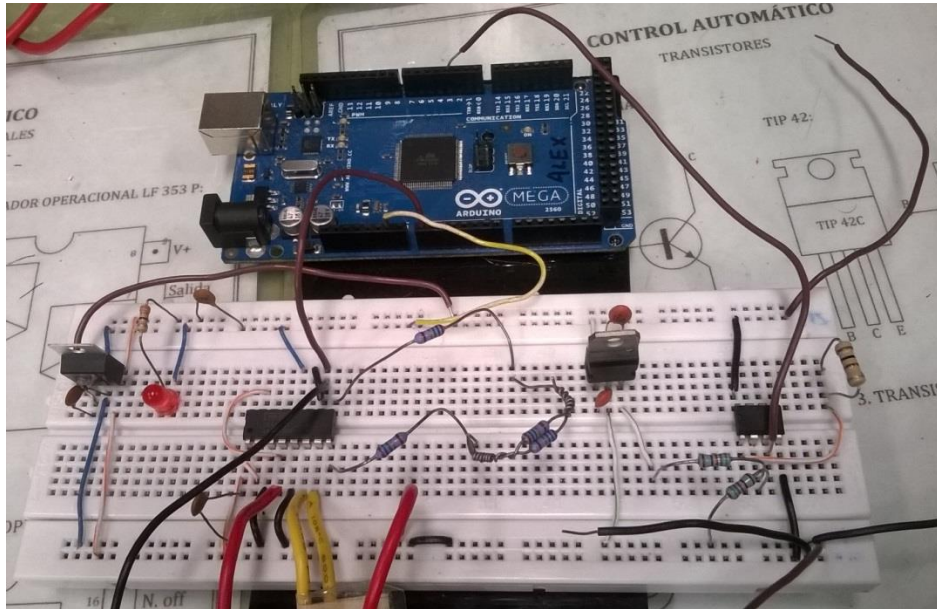
$$F[lb] = 269 * V_c[V] - 131,9$$

(Ec 37)

6.3 PRUEBA DE CONTROL DE FUERZA POR REALIMENTACIÓN PI USANDO ARDUINO.

Se utilizó el hardware Arduino como tarjeta de adquisición de datos, pero este presenta limitaciones para la aplicación, pues, las señales de control que deben ser enviadas a la servoválvula abarcan un rango de ± 100 mA (conexión en paralelo) para mover el carretel en ambas direcciones. La tarjeta Arduino puede generar señales de salida de tipo PWM, pero está condicionado a valores positivos, por esta razón fue necesario construir un circuito divisor de corriente que permitiera el comando completo de la servoválvula. Además de esto, se utilizó un circuito amplificador para acondicionar la señal enviada por la celda de carga que es del orden de los milivoltios. En la figura 104 se aprecia la tarjeta Arduino y el circuito elaborado para la división del voltaje y la amplificación de la señal enviada por la celda de carga.

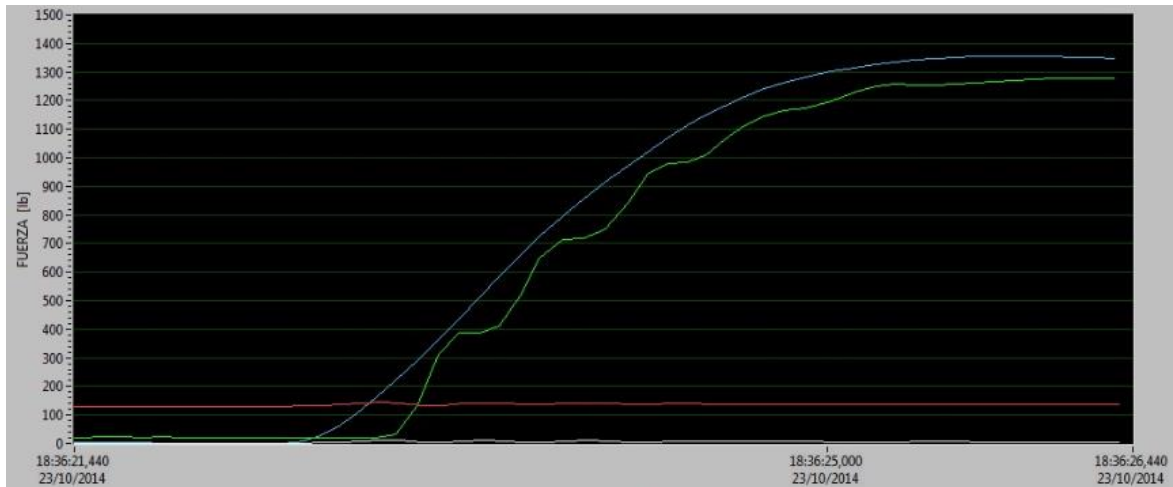
Figura 104. Montaje utilizado en las pruebas con la tarjeta Arduino.



Procedimiento. Se introdujeron señales de tipo escalón unitario, empezando desde 500 [lb] hasta llegar a 1300 [lb]. La entrada escalón se modificó por medio de un filtro introducido dentro del programa con el fin de suavizar la velocidad de respuesta del sistema y brindar seguridad dentro del proceso, ya que el cambio de fuerza era muy repentino.

Para el análisis en estado transitorio, se almacenaron las imágenes mostradas en la interfaz virtual. El procedimiento para el estudio del estado estacionario consistió en realizar 3 tomas para cada uno de los valores de setpoint. El registro de los datos se llevó a cabo por medio de la herramienta implementada en el programa para tal fin. La frecuencia de muestreo fue de 2 registros por segundo y para cada valor de setpoint se grabó durante 10 segundos, obteniéndose alrededor de 20 datos por toma.

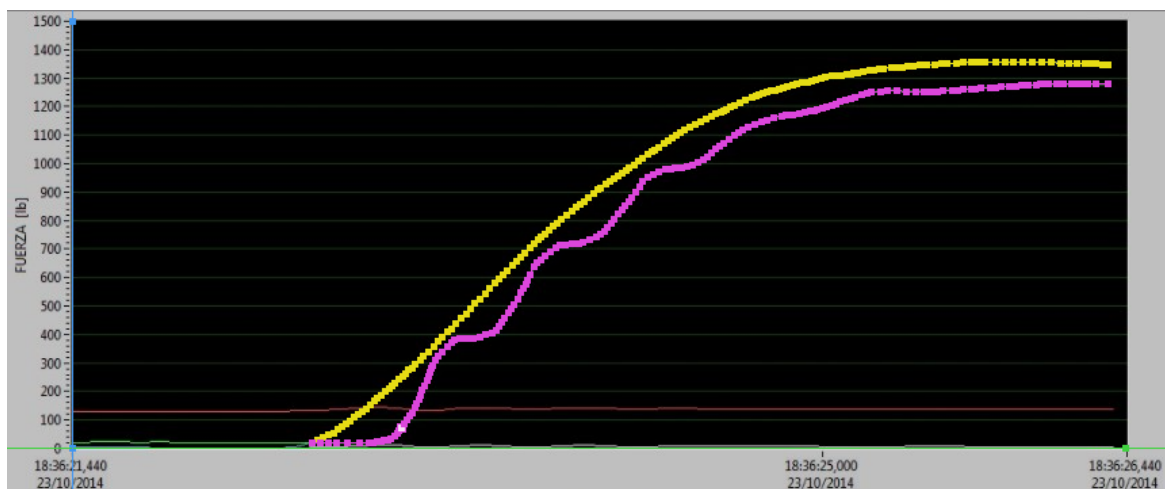
Figura 105. Respuesta para el control PI usando Arduino con una entrada escalón de 1300 [lb].



En la figura 105 se muestra en color azul la señal de entrada tipo escalón modificada y en verde la señal enviada por la celda de carga.

Análisis de la respuesta en estado transitorio. Debido a que la velocidad de respuesta del sistema se ve afectada por el proceso de almacenamiento, el análisis del comportamiento transitorio se llevó a cabo con base en los gráficos capturados desde la interfaz, los cuales se digitalizaron para extraer la información numérica (figura 106).

Figura 106. Digitalización de los datos.



Este procedimiento consiste en establecer unos ejes coordenados para luego tomar una serie de puntos sobre la curva a analizar. Se tomaron 161 puntos sobre la gráfica de la señal de la celda de carga, en color rosado, y 162 sobre la señal de entrada, en color amarillo.

Los puntos registrados se exportaron a una hoja de cálculo en Excel, donde se obtuvieron los resultados relacionados en la tabla 15 correspondientes a las características dinámicas de la respuesta en estado transitorio. Estos datos se relacionan en el Anexo F. Debido a que el sistema es de primer orden, no se presentan sobrepicos en la respuesta.

Tabla 15. Características de la respuesta transitoria.

ARDUINO – CONTROL PI	
Característica	Valor
Td: Tiempo de retardo [s]	1,07
Ts: Tiempo de asentamiento [s]	3,46

La respuesta transitoria presentó inestabilidad en forma de oscilaciones que se evidenciaron analógicamente en los manómetros del cilindro hidráulico. Estos saltos generan picos de fuerza que se transmiten a la pieza de prueba pudiendo generar daños en ésta. Dichos inconvenientes pueden ser el efecto del uso del circuito divisor de corriente y de la misma estructura electrónica de la tarjeta Arduino, cuya arquitectura está pensada con fines netamente académicos.

Análisis de la respuesta en estado estacionario. Como se mencionó anteriormente, el procedimiento para el estudio del estado estacionario se repitió 3 veces con el fin de dar aleatoriedad al proceso. Los datos fueron guardados en tiempo real en un archivo de texto a través de la interfaz virtual. Estos datos fueron exportados a una hoja de cálculo en Excel donde se realizaron los respectivos cálculos.

Tabla 16 Resultados de la prueba de control de fuerza por realimentación PI usando Arduino.

TOMA 1				TOMA 2				TOMA 3			
Step	F_celda	%Error	F_var	Step	F_celda	% Error	F_var	Step	F_celda	% Error	F_var
[lb]	[lb]		[lb]	[lb]	[lb]		[lb]	[lb]	[lb]		[lb]
300	253,03	-15,66	2,11	300	253,24	15,44	3,98	300	252	15,94	2,50
400	358,20	-10,45	2,90	400	360,21	11,32	3,30	400	360	10,09	3,94
500	456,15	-8,77	1,06	500	455,81	9,00	5,61	500	458	8,48	2,67
600	558,34	-6,94	1,26	600	560,38	7,34	2,32	600	559	6,89	1,50
700	655,72	-6,33	0,99	700	653,50	6,53	1,35	700	659	5,80	1,01
800	758,09	-5,24	1,67	800	755,57	5,42	4,42	800	762	4,74	1,81
900	866,61	-3,71	4,91	900	865,28	3,32	1,63	900	864	3,95	6,99
1000	957,22	-4,28	3,19	1000	956,94	4,41	2,87	1000	959	4,12	2,41
1100	1060,49	-3,59	7,07	1100	1057,24	3,64	5,19	1100	1064	3,24	4,90
1200	1153,02	-3,92	8,10	1200	1150,72	4,36	11,07	1200	1161	3,27	8,78
1300	1236,90	-4,85	8,88	1300	1238,34	4,90	11,30	1300	1236	4,92	13,76
Repetibilidad = 3,44 %				Repetibilidad = 3,48 %				Repetibilidad = 3,31 %			
Histéresis = 2,93 %											

Se promediaron los valores registrados por la celda de carga y el error porcentual, luego fueron calculadas la desviación estándar, la repetibilidad y la histéresis. De las 3 tomas se escogieron los valores mayores, resaltados en amarillo en la

tabla 16, con el fin de eliminar toda influencia de los investigadores en el análisis de resultados. Los datos obtenidos se resumen en la tabla 17. Estos resultados se compararon posteriormente con los adquiridos en las demás pruebas y con ellos se realizó el análisis correlacional.

Los valores utilizados para calcular la histéresis del proceso se relacionan en el Anexo B. El registro de las tres pruebas realizadas para hallar los valores del porcentaje de error, la varianza y la repetibilidad no se anexan debido a su extensión.

Tabla 17. Resultados finales para la prueba de control de fuerza por realimentación PI usando Arduino.

Control PI - Arduino		
F [lb]	%Error	F_var [lb]
500	9,00	5,61
600	7,34	2,32
700	6,53	1,35
800	5,42	4,42
900	3,95	6,99
1000	4,41	3,19
1100	3,64	7,07
1200	4,36	11,07
1300	4,92	13,76
Repetibilidad = 3,48 %		
Histéresis = 2,93 %		

Análisis. Dentro de la respuesta en estado estacionario se pudo apreciar que el error porcentual supera el 5%, valor máximo aceptado para considerar al régimen como “estable”. La respuesta en estado estacionario presenta algunas oscilaciones que indican inestabilidad.

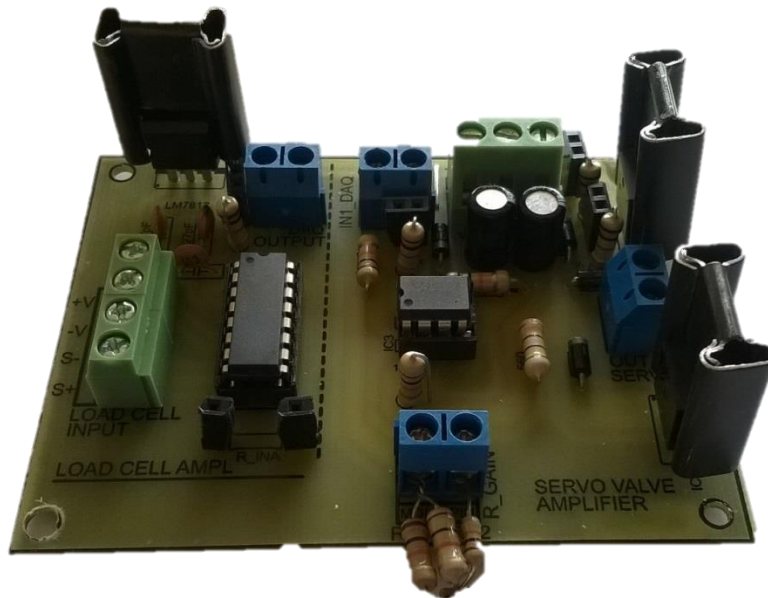
Sugerencias. El comportamiento presentado en el estado transitorio hace necesario un cambio en la tarjeta de adquisición de datos usada o en la técnica de control implementada.

6.4 PRUEBA DE CONTROL DE FUERZA POR REALIMENTACIÓN PI USANDO LA TARJETA DAQ NI 6212.

Se obtuvo una tarjeta DAQ NI 6212 para reemplazar al Arduino en su función. Esta tarjeta de adquisición de datos posee características, tanto en el hardware como en el software, que brindan grandes ventajas dentro del proceso de control realizado. La posibilidad de emitir señales positivas y negativas permitió obviar el circuito inversor de corriente, haciendo el proceso más directo. Además el software LabVIEW y la tarjeta DAQ NI 6212 son hechos por el mismo fabricante, de modo que la compatibilidad abrió las posibilidades de utilizar al máximo el abanico de opciones brindadas por el programa.

El circuito electrónico quedó reducido al amplificador de la celda de carga y el amplificador de la señal enviada a la servoválvula, el cual se volvió a construir en una baquelita para mejorar el desempeño y la presentación del banco (figura 107).

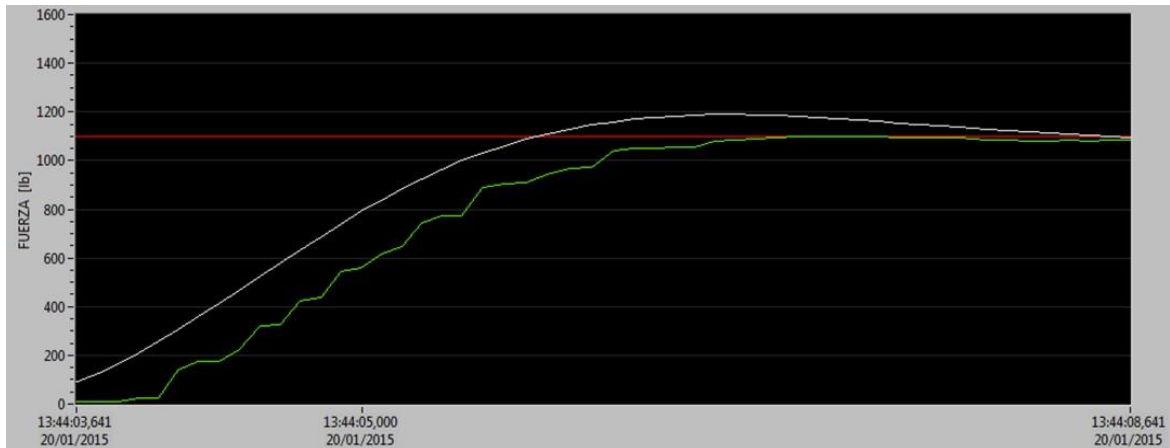
Figura 107. Circuito amplificador.



Procedimiento. El procedimiento fue el mismo que se aplicó en las pruebas con Arduino, se introdujeron señales de tipo escalón unitario, empezando desde 500 [lb] hasta llegar a 1300 [lb]. La entrada escalón se modificó nuevamente por medio del filtro introducido dentro del programa.

Para el análisis en estado transitorio también se llevó a cabo el mismo proceso. Se almacenaron las imágenes mostradas en la interfaz virtual, se realizaron 3 tomas para cada uno de los valores de setpoint y la frecuencia y tiempo de registro de los datos se conservó.

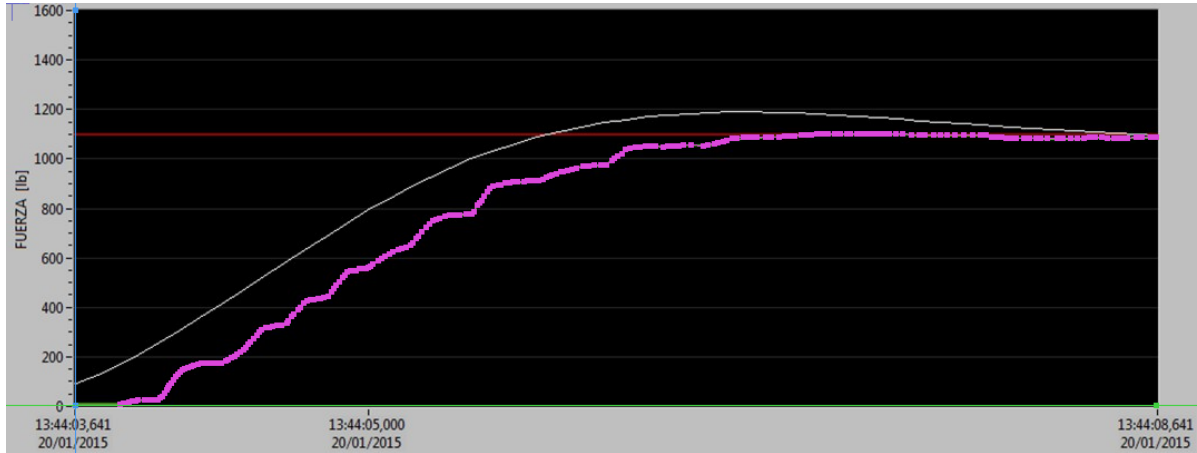
Figura 108. Respuesta con control PI usando DAQ NI 6212, para una entrada escalón de 1100 [lb].



En la figura 108 se muestra en color blanco la señal de entrada tipo escalón modificado, en verde la señal enviada por la celda de carga y en rojo la señal teórica de entrada escalón.

Análisis de la respuesta en estado transitorio. El proceso de análisis se realizó con base en los gráficos capturados desde la interfaz, los cuales se digitalizaron para extraer la información numérica (figura 109). Se recomendó implementar una opción que permita distribuir el uso de la memoria interna del computador y no la de la tarjeta DAQ.

Figura 109. Digitalización de los datos



Se tomaron 232 puntos sobre la gráfica de la señal de la celda de carga, mostrada en rosado, los cuales se relacionan en el Anexo G. Luego de exportar los datos a Excel y realizar los cálculos respectivos, se obtuvieron los resultados de la tabla 18, que corresponden a un sistema de primer orden debido a la ausencia de sobreimpulso.

Tabla 18. Características de la respuesta transitoria.

DAQ-PI-ESCALÓN	
Característica	Valor
Td: Tiempo de retardo [s]	1,11
Ts: Tiempo de asentamiento [s]	3,22

Las oscilaciones se siguen presentando, sin embargo su amplitud es menor, comparada con la respuesta usando Arduino. Los resultados de las especificaciones en el tiempo son similares a las obtenidas mediante el uso del Arduino. Sin embargo, se puede apreciar una disminución de 0,24 [s] en el tiempo de asentamiento, lo cual indica que el sistema logra estabilizarse más rápidamente.

Análisis de la respuesta en estado estacionario. Los datos fueron almacenados por medio de la interfaz en un archivo de texto y se exportaron al software Microsoft Excel, por medio del cual, se calculó el promedio de la lectura de la celda de carga, junto con el error porcentual correspondiente al valor de consigna (setpoint) respectivo, empezando desde 500 [lb] hasta llegar a 1300 [lb]. También

se calcularon los valores de repetibilidad correspondientes. Este proceso se repitió en cada una de las 3 tomas realizadas.

Tabla 19. Resultados prueba de control de fuerza por realimentación PI usando tarjeta DAQ NI-6212.

TOMA 1				TOMA 2				TOMA 3			
Step	F_celda	%Error	F_var	Step	F_celda	% Error	F_var	Step	F_celda	% Error	F_var
[lb]	[lb]		[lb]	[lb]	[lb]		[lb]	[lb]	[lb]		[lb]
500	418	16,39	1,89	500	420	16,05	0,58	500	420	16,05	0,58
600	516	13,97	1,90	600	526	12,39	1,37	600	525	12,51	1,21
700	622	11,13	2,48	700	617	11,88	4,18	700	622	11,21	2,26
800	729	8,91	3,99	800	742	7,25	2,44	800	731	8,68	4,02
900	834	7,38	4,98	900	832	7,54	3,66	900	839	6,76	2,87
1000	938	6,17	3,56	1000	928	7,16	4,78	1000	927	7,32	5,55
1100	1043	5,21	5,26	1100	1047	4,81	6,43	1100	1043	5,22	5,43
1200	1145	4,58	8,49	1200	1154	3,86	8,19	1200	1155	3,76	7,39
1300	1226	5,72	11,94	1300	1232	5,27	13,41	1300	1262	2,92	6,40
Repetibilidad = 5,44				Repetibilidad = 5,23				Repetibilidad = 5,06			
Histéresis = 2,62											

Para calcular el valor de histéresis se realizó una prueba diferente, que consistió en registrar los datos comenzando desde 500 [lb] e incrementando el setpoint de a 100 [lb] hasta llegar a 1300 [lb]. Luego se repitió el procedimiento, pero iniciando desde el valor máximo hasta el valor mínimo. De este modo, para cada punto de consigna, resultaron dos tomas diferentes, una correspondiente al proceso de subida y otra al de bajada. Los datos obtenidos durante esta prueba se relacionan en el Anexo C, y con ellos se calculó la histéresis mediante la (Ec 36).

Los datos resaltados en amarillo corresponden a los valores mayores de cada característica, de modo que el análisis de resultados se lleve a cabo de la forma más objetiva posible. En la tabla 20 se resumen la información obtenida en la prueba de control PI usando la tarjeta DAQ NI 6212.

Tabla 20. Resultados finales para la prueba de control de fuerza por realimentación PI usando la tarjeta DAQ NI 6212.

Control PI – DAQ NI 6212		
F [lb]	%Error	F_var [lb]
500	16,39	1,89
600	13,97	1,90
700	11,88	4,18
800	8,91	4,02
900	7,54	4,98
1000	7,32	5,55
1100	5,22	6,43
1200	4,58	8,49
1300	5,72	13,41
Repetibilidad = 5,44 %		
Histéresis = 2,62 %		

Análisis. El comportamiento en régimen transitorio es similar en cuanto a estabilidad y características dinámicas en el dominio del tiempo. La practicidad y confiabilidad con la que se pudo realizar la prueba usando la tarjeta DAQ NI 6212 reduce incertidumbres dentro del proceso. Ya no es necesario usar el circuito inversor de corriente y la velocidad de transmisión de datos es mucho mejor.

Se evidenció un decremento en la exactitud de la respuesta en estado estacionario, ya que los valores del error porcentual superaron a los obtenidos en la prueba anterior. Sin embargo, los resultados presentaron mejoría en la precisión, reflejada en la desviación estándar del valor de fuerza. Esta característica se refleja a su vez en el valor de repetibilidad.

Sugerencias. Realizar un cambio en una técnica de control diferente a la aplicada puede mejorar el comportamiento del sistema.

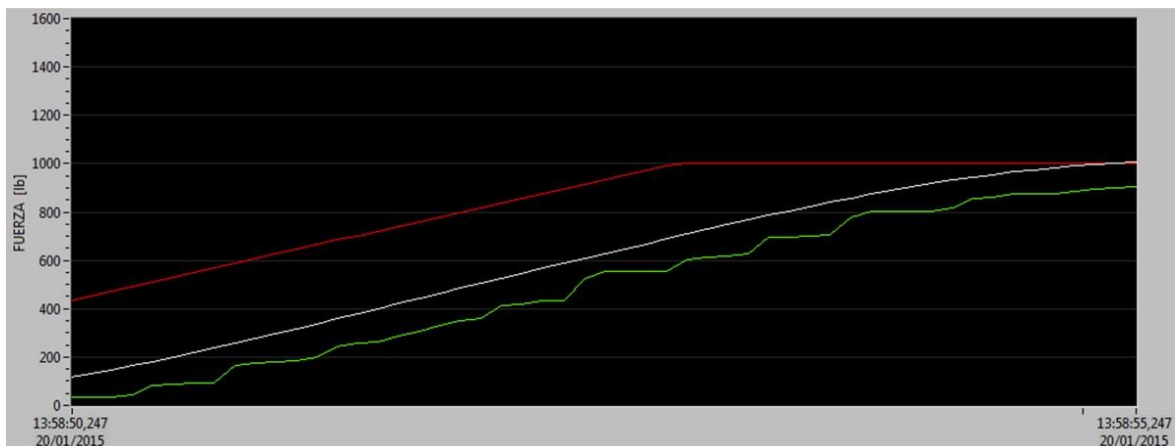
6.5 PRUEBA DE CONTROL FUERZA PI CON ENTRADA RAMPA, USANDO LA TARJETA DAQ NI 6212.

Se aplicó, a la función de transferencia, una señal rampa con el fin de comprender la naturaleza del sistema y analizar su respuesta frente a diferentes comandos de entrada. En la operación normal del sistema, es más común encontrar una función rampa como señal de entrada que una función escalón, ya que los ensayos de resistencia de materiales se ejecutan aplicando la fuerza a una velocidad variable. De esta manera, si el sistema se somete a las condiciones normales de operación, su respuesta se aproximará al modelo real del proceso y el análisis podrá ser más profundo.

6.5.1 Procedimiento para calcular el error en estado estacionario con los valores digitales de fuerza. Se adaptó el algoritmo de control y la interfaz desarrollada en LabVIEW para que el usuario pudiera elegir el tipo de entrada a utilizar. Para la señal rampa, es posible ajustar la pendiente de la curva, cuyas unidades son [lb/s], y cambiar el alcance del comando a través del valor de setpoint.

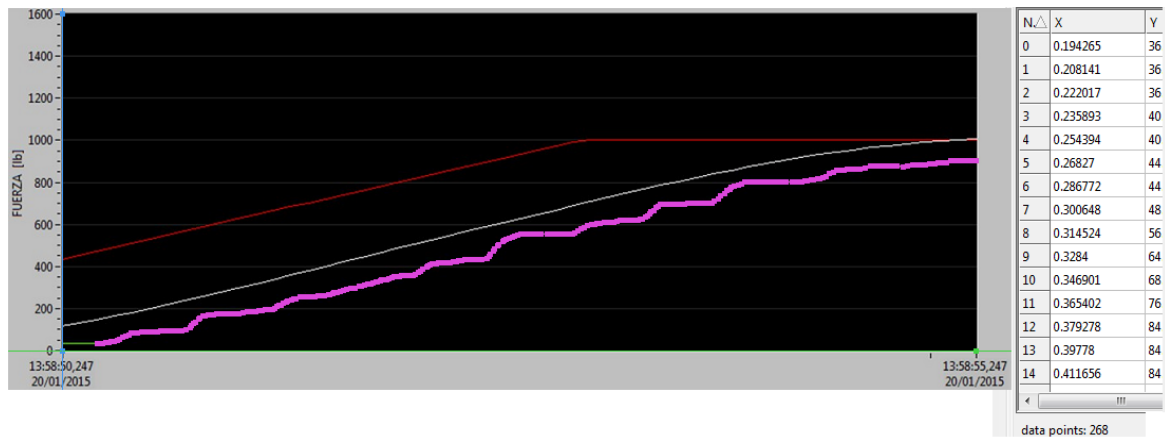
Las pruebas se realizaron aplicando la fuerza a una velocidad de 200 [lb/s] con un setpoint de 1000 [lb] y empezando desde el valor mínimo de 0 [lb]. El hecho de que la señal comience desde un punto de 0 [lb] exige mayor precisión al proceso, ya que la acción de control, en los valores mínimos de fuerza, tiende a presentar inestabilidades. Se compararon los valores de fuerza registrados por la celda de carga, con los datos de la señal de entrada rampa. Éste análisis se realizó punto a punto para el mismo instante de tiempo.

Figura 110. Respuesta del sistema aplicando control PI, para una entrada rampa con pendiente de 200 [lb/s] y setpoint de 1000 [lb].



Análisis de la respuesta del sistema. Se procedió a hacer el análisis con base en las gráficas aportadas por la interfaz. Los datos se digitalizaron (figura 111) y posteriormente se extrajo la información numérica de los mismos.

Figura 111. Digitalización de los datos.



De la señal de respuesta del sistema, representada en rosado, se tomaron 206 puntos. Los datos se exportaron a una hoja de cálculo en Microsoft Excel donde se pudo hacer el análisis del error en estado estacionario, cuyos resultados se muestran en la tabla 21.

Tabla 21. Error porcentual para la prueba de control PI con entrada rampa.

DAQ – PI - RAMPA			
Error max positivo	Error prom positivo	Error max negativo	Error prom negativo
27,89 %	5,91 %	-15,65 %	-4,03 %

Dentro del análisis se tuvo en cuenta el valor promedio y máximo del error, tanto para valores positivos como negativos. El valor máximo representa el punto en que la respuesta más se alejó de la señal de comando, este valor debe estar dentro de un rango no mayor al 10%. El valor promedio muestra el comportamiento en estado estable del sistema y abarca un rango de $\pm 5\%$.

6.5.2 Procedimiento para evaluar la repetibilidad a través de la señal análoga amplificada de la celda de carga. En esta prueba se tuvieron en cuenta los resultados análogos, ya que los digitales son más susceptibles a presentar imprecisiones.

A través del programa en LabVIEW se envió un comando de entrada rampa y por medio de un voltímetro se registraron los datos luego de que la señal se estabilizará en el valor de setpoint. Se realizaron 10 tomas. En la tabla 22 se relacionan los parámetros usados en la prueba, los resultados y las características calculadas a través de estos.

Tabla 22. Prueba de repetibilidad con la señal análoga de la celda de carga usando control PI.

Rampa = 200 [lb/s]	K_p = 12	F = 1000 [lb]	K_i = 1,5
Alcance de la celda de carga = 5,05 [V]			
Toma	V_c [V]	F_{celda} [lb]	% Error
1	4,14	981,76	1,82
2	4,07	962,93	3,71
3	4,06	960,24	3,98
4	4,04	954,86	4,51
5	4,04	954,86	4,51
6	4,06	960,24	3,98
7	4,11	973,69	2,63
8	4,06	960,24	3,98
9	4,07	962,93	3,71
10	4,11	973,69	2,63
Desviación estándar = 0,03 [V]		% Error promedio = 3,55%	
Desviación en % del alcance = 0,65 %		V_c promedio = 4,08 [V]	

Por medio de la desviación estándar se calculó el porcentaje sobre el alcance de la señal medida al que corresponde este resultado. Por medio de los datos tabulados se concluyó que el voltaje medido por la celda de carga para una fuerza de 1000 [lb] es $4,08 \pm 0,03$ [V]. Estos datos de voltaje equivalen a un valor de fuerza de 964 ± 9 [lb].

Análisis. La respuesta del sistema presentó variaciones máximas fuera del rango admitido. En cuanto al régimen estacionario los resultados estuvieron dentro de los valores permitidos reflejando la exactitud del proceso. Hay que tener en cuenta que la señal de entrada inició desde el valor mínimo de 0 [lb] que es el caso más crítico para este tipo de configuración.

Sugerencias. Para este caso, se hace necesario mejorar la respuesta anticipativa del sistema de control, conservando la estabilidad del proceso.

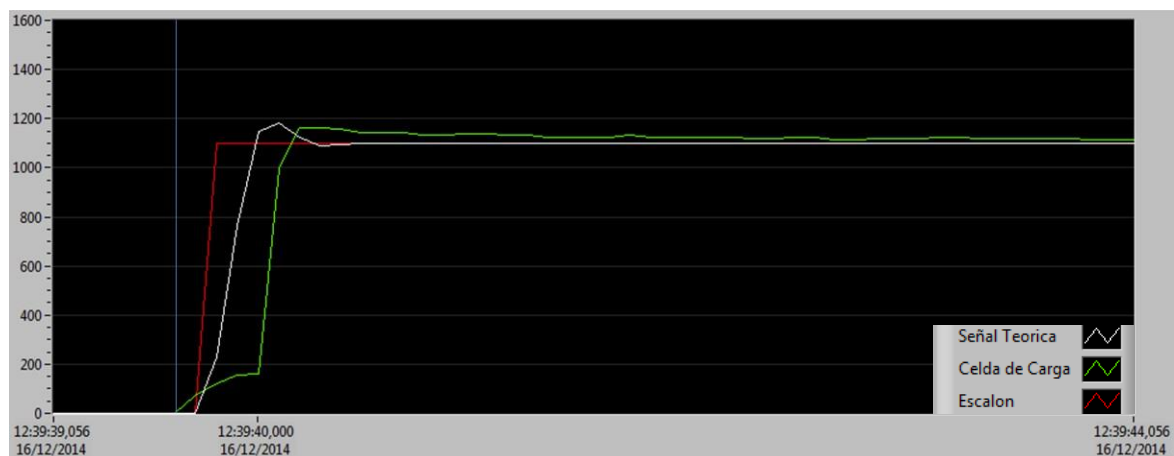
6.6 PRUEBA DE CONTROL DE FUERZA POR REALIMENTACIÓN PI CON COMPENSACIÓN POR ADELANTO DE SEÑAL (FEEDFORWARD) PARA UNA ENTRADA ESCALÓN.

Mediante el análisis del sistema por el método de las raíces se diseñó un compensador por adelanto de señal esperando que la respuesta en el estado transitorio mejore, eliminando los rizados que representan cambios bruscos en la aplicación de la fuerza, los cuales, en la práctica, podrían dañar la pieza de trabajo. El desarrollo de la nueva función de transferencia del sistema (Ec 38) se realizó en la sección 3.3 del presente documento. Como se puede apreciar, el sistema pasó a ser de segundo orden y por lo tanto su respuesta cambió respecto a las observadas anteriormente.

$$\frac{F_p(s)}{i(s)} = \frac{2,64076 * s + 6,14241}{2E - 6 * s^2 + 0,005754 * s + 0,039496} \quad (\text{Ec 38})$$

Procedimiento. A diferencia de las pruebas con control PI, para el control con la implementación del compensador por adelanto se introdujo una entrada escalón sin filtro dentro del programa. Esto debido a que la variación de fuerza no es tan repentina como en el caso del control PI. Todo esto influye en el tiempo de respuesta y asentamiento del proceso. La prueba se hizo para un valor de 1100 [lb].

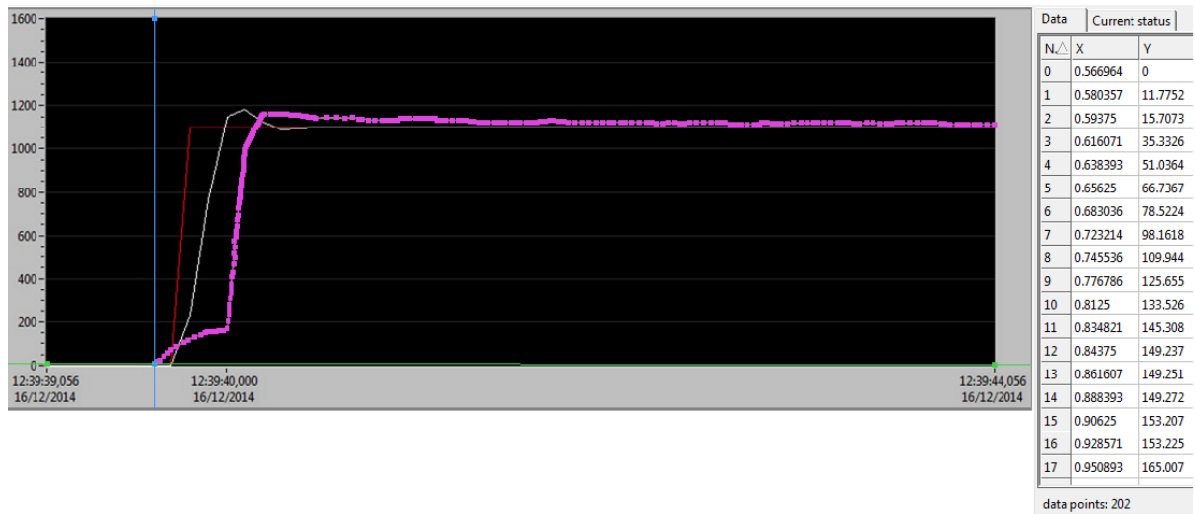
Figura 112. Respuesta del sistema aplicando el control con compensación por adelanto de señal (feedforward) para una entrada escalón.



En la figura 112, se muestra en rojo la señal de entrada tipo escalón y en verde la respuesta del sistema.

Análisis de la respuesta en estado transitorio. Para el análisis en régimen transitorio se hace uso de la imagen aportada por la interfaz virtual. Los datos se digitalizaron para extraer la información numérica.

Figura 113. Digitalización de los datos.



Se muestran en rosado los 202 puntos que corresponden a la respuesta del sistema y que se relacionan en el Anexo H. La información adquirida se exportó a una hoja de cálculo en Microsoft Excel, donde se calcularon las características en el dominio del tiempo del régimen transitorio (tabla 23).

Tabla 23. Especificaciones de la respuesta transitoria

DAQ – FEEDFORWARD - ESCALÓN	
Característica	Valor
Td: Tiempo de retardo [s]	0,43
Tr: Tiempo de subida [s]	0,54
Tp: Tiempo pico [s]	0,7
Mp: Sobreelongación	5,22%
Ts: Tiempo de asentamiento [s]	0,85

La respuesta del sistema en estado estacionario presentó una mejoría notable en la estabilidad gracias a la implementación de la nueva técnica de control, los tiempos de respuesta también se redujeron de forma considerable, en comparación con los obtenidos mediante el control clásico PI. Debido a que el sistema es ahora de orden dos, la respuesta en estado transitorio presenta características dinámicas adicionales como el sobre impulso.

Análisis de la respuesta en estado estacionario. Los datos registrados se exportaron desde el archivo de texto hasta una hoja de cálculo en Microsoft Excel, donde se dedujeron las respectivas características del régimen estacionario.

Tabla 24. Resultados prueba de control de fuerza por realimentación PI con compensación por adelanto de señal (feedforward) usando tarjeta DAQ NI-6212.

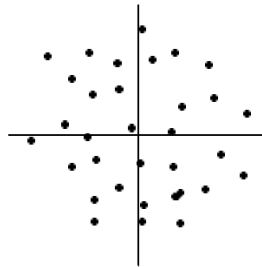
DAQ – FEEDFORWARD - ESCALÓN			
Step	F_celda	%Error	F_var
[lb]	[lb]		[lb]
500	391	1,82	2,22
600	598	0,33	7,73
700	746	2,28	6,42
800	803	0,44	8,10
900	916	1,81	12,81
1000	985	1,03	15,80
1100	1105	0,49	21,50
1200	1202	0,14	23,12
1300	1301	0,04	20,27
Repetibilidad = 3,09 %			
Histéresis = 3,67 %			

Estos datos se compararon con las pruebas anteriores con el fin de evaluar el efecto de la implementación de la compensación por adelanto de señal al control PI.

Análisis. La respuesta del sistema en estado transitorio mejoró cuantitativa y cualitativamente. Las oscilaciones ya no se presentan reflejando una mejoría notoria en la estabilidad de la respuesta. El tiempo de retardo t_d se redujo aproximadamente en un 50%, mientras que el tiempo de asentamiento t_s lo hizo en un 25%.

El comportamiento en régimen estacionario presenta una mayor exactitud, ya que los valores del error porcentual están por debajo del 2,5%. Esto quiere decir que el sistema tiende al valor de consigna dentro de un rango confiable. En cuanto a la precisión del sistema, la variación de la respuesta tuvo una tendencia a presentar valores más altos a medida que se incrementa el valor de fuerza demandado por el setpoint. El mayor valor corresponde a 20,27 [lb], esto quiere decir que para un setpoint de 1300 [lb] la respuesta será 1300 ± 27 [lb]. La figura 114 resume gráficamente el comportamiento del sistema, es decir los resultados están muy cerca del valor de consigna y presentan dispersión entre sí.

Figura 114. Comportamiento en estado estacionario del sistema.



Fuente: Instrumentación Industrial, Creus.

Sugerencias. En el modelo matemático no se consideró el cambio de volumen dentro del cilindro, este factor afecta la precisión del sistema y se podría corregir implementando, sobre el vástago del cilindro hidráulico, un sensor de posición.

6.7 PRUEBA DE CONTROL DE FUERZA POR REALIMENTACIÓN PI CON COMPENSACIÓN POR ADELANTO DE SEÑAL (FEEDFORWARD) PARA UNA ENTRADA RAMPA.

Al probar el sistema con varias señales de entrada se valida el modelo matemático utilizado, además de recrear las condiciones normales de operación de un sistema de control de fuerza.

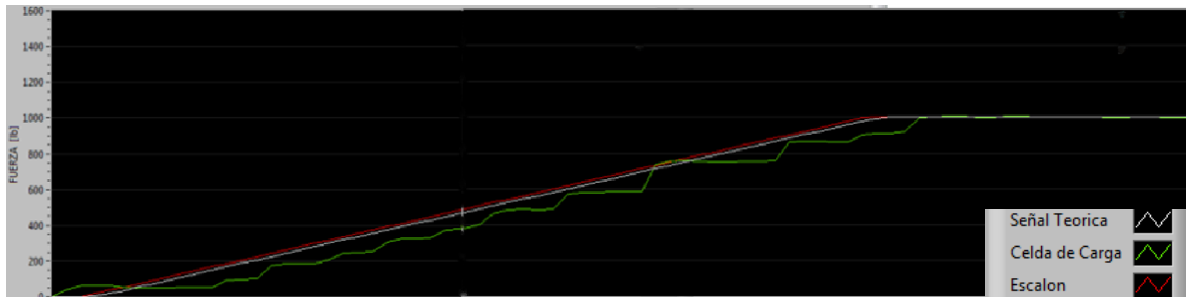
Figura 115. Módulo AAA (Alimentación, Amplificación y Almacenamiento).



En este punto de la fase de pruebas se construyó el módulo AAA, que integra los circuitos de amplificación, la tarjeta de adquisición de datos y la fuente de voltaje, de modo que las incertidumbres debidas a malas conexiones eléctricas se reducen.

6.7.1 Procedimiento para calcular el error en estado estacionario con los valores digitales de fuerza. Se realizaron pruebas al servo de fuerza introduciendo señal rampa con una pendiente de 200 [lb/s] y un setpoint de 1000 [lb]. La entrada rampa empieza desde un valor de 0[lb] hasta llegar al máximo punto.

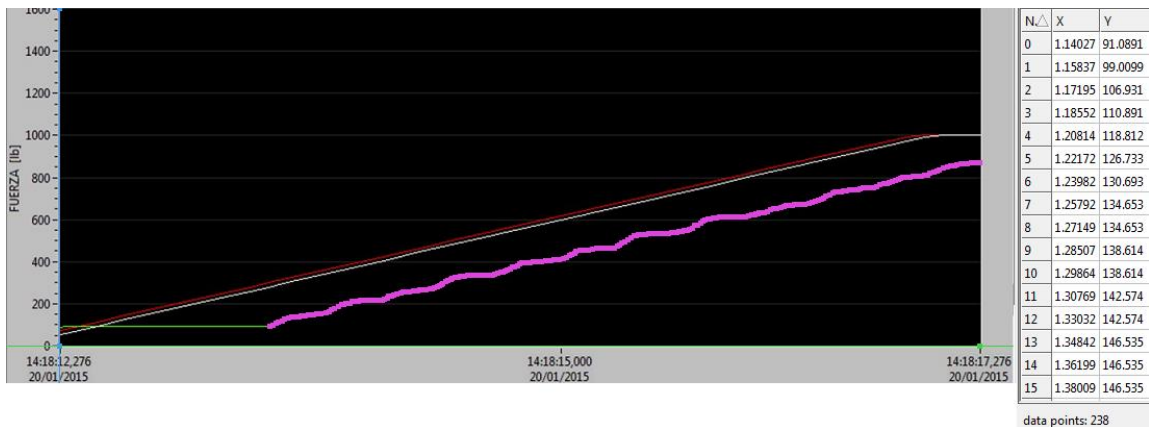
Figura 116. Respuesta del control clásico PI con implementación de compensador por adelanto de señal frente a la entrada rampa.



La señal de entrada tipo rampa se muestra en color rojo, la respuesta del sistema en color verde sigue al comando de entrada

Análisis de la respuesta del sistema. Se realizó el análisis con base en las gráficas aportadas por la interfaz virtual. Los datos se digitalizaron (figura 117) y posteriormente se extrajo la información numérica de los mismos.

Figura 117. Digitalización de los datos.



Se tomaron 292 datos, que se muestran en color rosado. Dichos datos se exportaron a una hoja de cálculo en Microsoft Excel y se realizaron los cálculos correspondientes a las características del régimen transitorio (Tabla 25).

Tabla 25. Error porcentual para la prueba de control PI con compensador por adelanto de señal para entrada rampa.

DAQ – FEEDFORWARD - RAMPA			
Error max positivo	Error prom positivo	Error max negativo	Error prom negativo
0,49 %	0,49 %	-18,12 %	-4,34 %

Dentro del análisis se tuvo en cuenta el valor promedio y máximo del error, tanto para valores positivos como negativos. El valor máximo representa el punto en que la respuesta se alejó más de la señal de comando, este valor debe estar dentro de un rango no mayor al 10%. El valor promedio muestra el comportamiento en estado estable del sistema y abarca un rango de $\pm 5\%$.

6.7.2 Procedimiento para evaluar la repetibilidad a través de la señal análoga amplificada de la celda de carga. Posteriormente, aplicando la técnica de control PI con Feedforward, se llevó a prueba de repetibilidad analizando los resultados análogos enviados por la celda de carga. Los parámetros usados en esta, junto con los resultados y las especificaciones calculadas se relacionan en la tabla 26. Los resultados análogos son más confiables que los digitales y por esta razón se tuvieron en cuenta para el análisis.

Tabla 26. Prueba de repetibilidad con la señal análoga de la celda de carga usando control PI + Feedforward.

Rampa = 200 [lb/s]	F = 1000 [lb]	K_p = 13	K_i = 9
Alcance de la celda de carga = 5,05 [V]			
Toma	V_c [V]	F_{celda} [lb]	% Error
1	4,2	997,9	0,21
2	4,17	989,83	1,02
3	4,19	995,21	0,48
4	4,16	987,14	1,29
5	4,16	987,14	1,29
6	4,15	984,45	1,56
7	4,16	987,14	1,29
8	4,17	989,83	1,02
9	4,2	997,9	0,21
10	4,14	981,76	1,82
Desviación estándar = 0,02 [V]		% Error promedio = 1,02%	
Desviación en % del alcance = 0,41 %		V_c promedio = 4,17 [V]	

Por medio de la desviación estándar se calculó el porcentaje sobre el alcance de la señal medida al que corresponde este resultado. Por medio de los datos tabulados se concluyó que el voltaje medido por la celda de carga para una fuerza de 1000 [lb] es $4,17 \pm 0,02$ [V]. Estos datos de voltaje equivalen a un valor de fuerza de 990 ± 5 [lb].

Análisis. Comparado con la respuesta obtenida utilizando la técnica de control clásico PI, las inestabilidades se reducen notoriamente. La exactitud también mejora, presentando un error porcentual promedio de -4,34%, manteniéndose dentro del rango admisible de error.

Sugerencias. Como se dijo anteriormente, la inestabilidad se debe a que no se considera el cambio de volumen de aceite dentro de la cámara del cilindro, dicha inexactitud se puede solucionar implementando un sensor de posición en el vástago del cilindro hidráulico.

6.8 RESULTADOS GENERALES.

Se presenta un resumen de los resultados obtenidos para así poder llevar a cabo el estudio correlacional entre ellas y desarrollar las conclusiones.

Respuesta en estado transitorio para la entrada escalón. La tabla 27 muestra los resultados obtenidos para el estado transitorio. Cuando se aplica la técnica de control clásico PI la función de transferencia del sistema es de primer orden, por esta razón, su respuesta no presenta sobrepicos, y por ende, no es posible calcular el tiempo de subida, tiempo pico y la misma sobreelongación. En cambio, cuando se aplica la compensación por adelanto de señal, el sistema pasa a ser de segundo orden, presentándose todas las características propias en el dominio del tiempo.

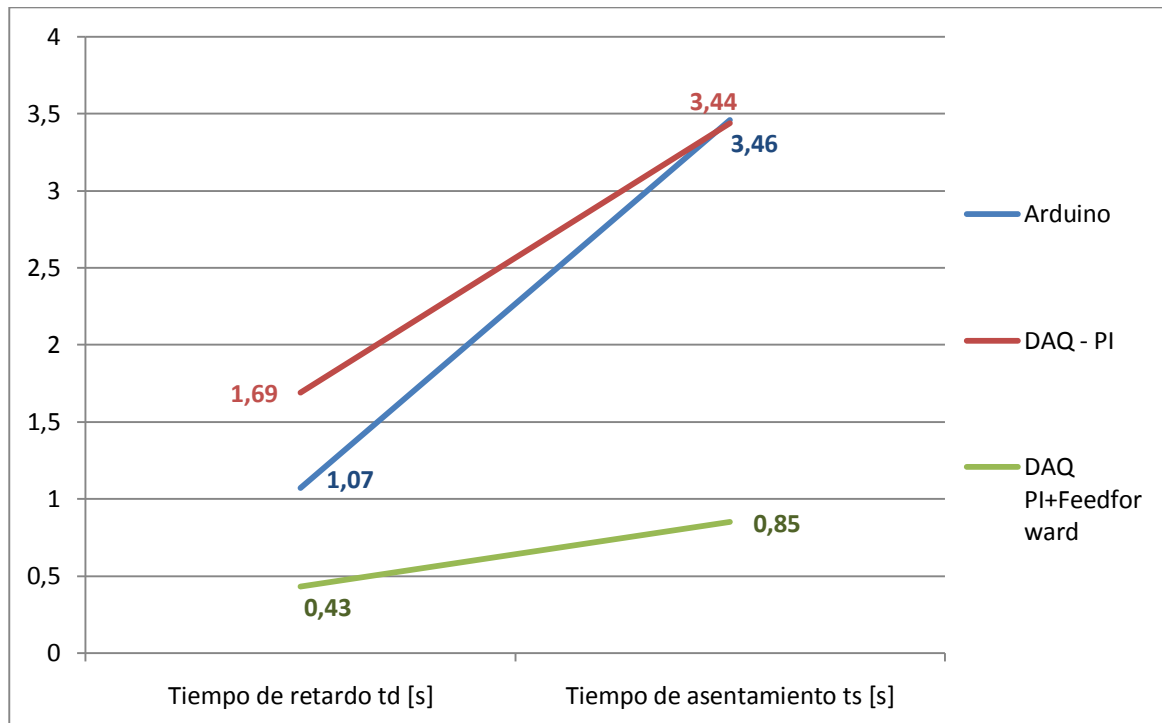
Tabla 27. Resultados de las especificaciones en el dominio del tiempo.

Especificaciones	Arduino	DAQ - PI	DAQ PI+Feedforward
Tiempo de retardo t_d [s]	1,07	1,69	0,43
Tiempo de subida t_r [s]	NA	NA	0,54
Tiempo pico t_p [s]	NA	NA	0,70
Sobreelongación M_p	NA	NA	5,22%
Tiempo de asentamiento t_s [s]	3,46	3,44	0,85

*NA=No Aplica

Por medio de la figura 118 se puede analizar con mayor claridad los resultados obtenidos en las pruebas. Únicamente se comparó el tiempo de retardo t_d y el tiempo de asentamiento t_s por ser las especificaciones comunes en las diferentes pruebas.

Figura 118. Respuesta transitoria de las diferentes configuraciones analizadas aplicando una entrada escalón.



Si se observan las líneas azul y roja se puede notar una similitud en los comportamientos de los procesos involucrados. En ambas pruebas el factor que se mantuvo invariante fue la técnica de control aplicada.

Al aplicar una técnica de control diferente, en este caso, una compensación por adelantado de señal sobre el control PI, se puede observar que la respuesta en el tiempo mejora significativamente en comparación con las pruebas anteriores. Este comportamiento se representa en la línea de color verde, en la cual el valor que mayor cambio tuvo fue el tiempo de asentamiento. En esta prueba se utilizó la tarjeta DAQ NI 6212.

Respuesta en estado estacionario para la entrada escalón. El trabajo estadístico aplicado en los resultados de las pruebas en estado estacionario fue más dispendioso, debido a la cantidad de datos que permite almacenar en cada toma la herramienta de registro implementada en la interfaz virtual. De esta manera, a través del análisis cuantitativo por medio de tablas y gráficos, se pudieron corroborar o descartar las hipótesis planteadas durante la fase de pruebas.

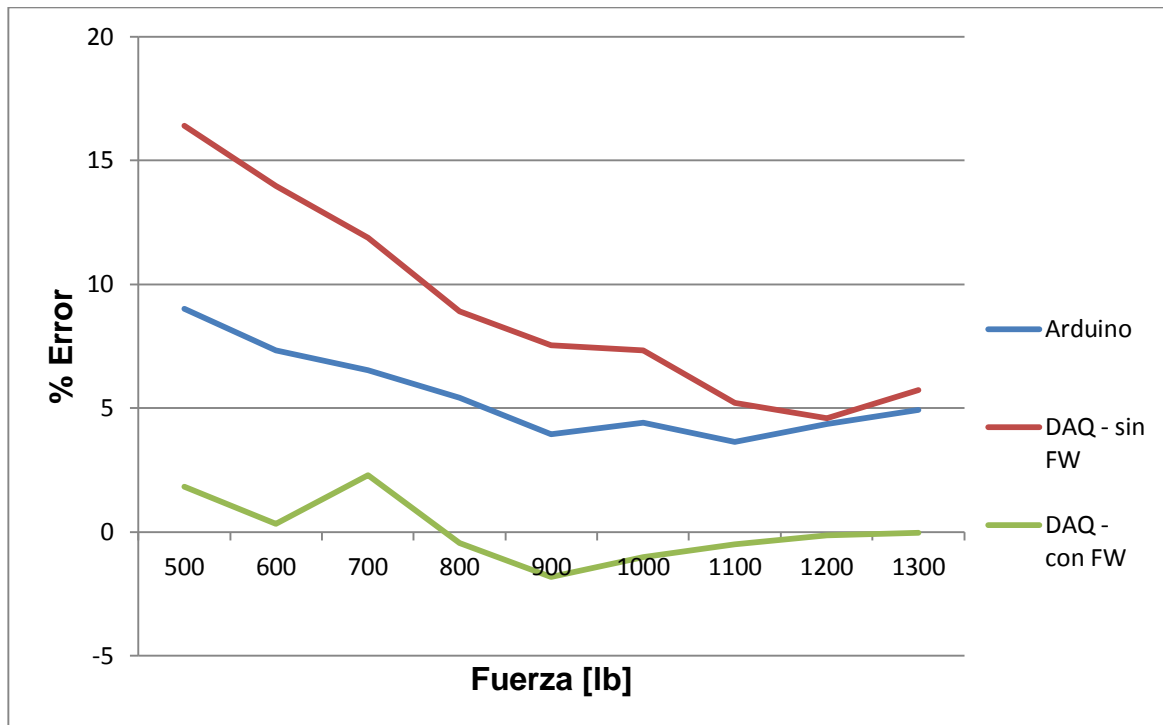
Error porcentual. Se presentan los resultados obtenidos para el error porcentual con las diferentes configuraciones a las que se realizaron las pruebas. La columna de la derecha indicada por F[lb] representa la señal de setpoint en libras, aplicada en forma de entrada escalón al sistema. Luego se indica a que configuración corresponde cada columna de resultados, control PI con Arduino, control PI con DAQ NI 6212 o control PI aplicando compensación por feedforward usando la tarjeta DAQ NI 6212.

Tabla 28. Resultados para el error porcentual.

F [lb]	% Error		
	Arduino - PI	DAQ - PI	DAQ - PI + FW
500	9,00	16,39	1,82
600	7,34	13,97	0,33
700	6,53	11,88	2,28
800	5,42	8,91	-0,44
900	3,95	7,54	-1,81
1000	4,41	7,32	-1,03
1100	3,64	5,22	-0,49
1200	4,36	4,58	-0,14
1300	4,92	5,72	-0,04

Estos datos se graficaron, de forma que el proceso de análisis resultara más sencillo y las tendencias, que a simple vista no se ven, pudieran observarse con mayor claridad.

Figura 119. Resultados para el error porcentual en las pruebas con entrada escalón.



Se puede observar una tendencia en las tres pruebas: Cuando el valor de fuerza es mínimo, la exactitud de la respuesta del sistema se ve afectada. Sin embargo, en valores de entrada por encima de 1000 [lb] la respuesta presenta los valores con mayor exactitud, es decir, con resultados más bajos para el error porcentual de todo el rango. Este comportamiento se asocia con la presión dentro del cilindro, teniendo en cuenta las pérdidas que se dan por fugas en los diferentes elementos del circuito hidráulico. De este modo cuando el proceso demanda presiones altas, el sistema hidráulico compensa de una manera más eficiente dichas pérdidas.

La similitud en la respuesta de los procesos en los que se usó la tarjeta Arduino y la tarjeta DAQ NI 6212 se debe al tipo de aplicación que se está dando a la tarjeta de la National Instruments. Es decir, el control clásico Proporcional – Integral es un proceso demasiado simple, para el cual la tarjeta está sobrediseñada. Si se aplica una técnica de control más avanzada, como lo es la compensación por feedforward, éste dispositivo presenta un mejor desempeño.

Como se puede apreciar en la línea de color verde, la implementación de la compensación por adelanto de señal usando la tarjeta DAQ NI 6212, mejora la exactitud de la respuesta, permitiendo obtener valores de error porcentual dentro de un rango confiable menor al 2,5%.

Desviación estándar. La desviación estándar se calculó según la (Ec 34) y está relacionada con la precisión del proceso de control. En la tabla 29 se resaltan en color amarillo los resultados que reflejan mayor precisión.

Tabla 29. Resultados para la desviación estándar.

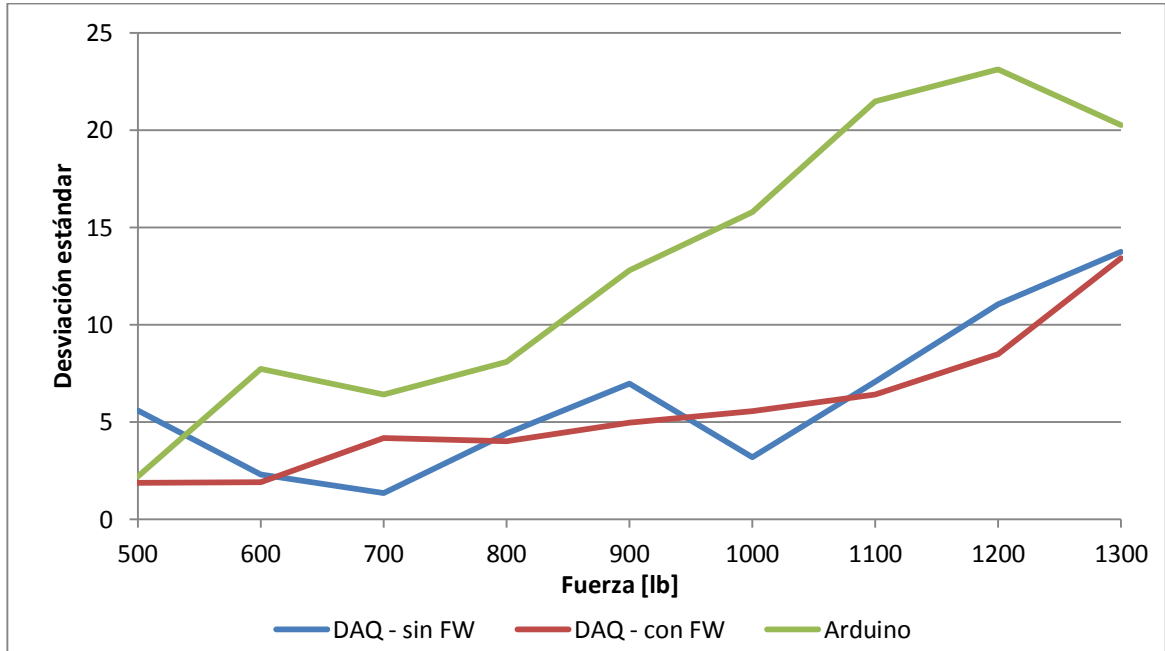
Step [lb]	Desviación estándar		
	Arduino	DAQ - sin FW	DAQ - con FW
500	5,61	2,22	1,89
600	2,32	7,73	1,90
700	1,35	6,42	4,18
800	4,42	8,10	4,02
900	6,99	12,81	4,98
1000	3,19	15,80	5,55
1100	7,07	21,50	6,43
1200	11,07	23,12	8,49
1300	13,76	20,27	13,41

En base a los resultados se concluyó que, aplicando la técnica de control PI con Feedforward se obtiene una mejor precisión en la respuesta del sistema. Con la ayuda de la figura 120 se puede profundizar el análisis.

La precisión en la respuesta observada en las pruebas aplicando control PI y control PI con Feedforward, usando la tarjeta DAQ NI 6212, son parecidas. La única diferencia observable es que las pruebas implementando la técnica feedforward presentan menos variaciones en el valor de la desviación estándar.

A diferencia de la tendencia presentada en el análisis del error porcentual, la desviación de los resultados es menor en los valores mínimos de fuerza, y va incrementando a medida que la señal de entrada también lo hace, alcanzando los puntos de desviación máxima entre las 1200 lb y 1300 lb.

Figura 120. Resultados de la desviación estándar en las pruebas con entrada escalón.



Repetibilidad. La gran cantidad de datos registrados a través de la herramienta de almacenamiento con la que cuenta la interfaz virtual permitió hacer un cálculo confiable de esta característica. La repetibilidad refleja la capacidad de reproducción de la señal de salida del sistema.

Tabla 30. Resultados para la repetibilidad.

Repetibilidad		
Arduino	DAQ - sin FW	DAQ - con FW
3,48 %	5,44 %	3,09 %

El mejor resultado para la repetibilidad se obtuvo aplicando la compensación por feedforward usando la tarjeta DAQ NI 6212 permitiendo mejorar en un 0,4% el resultado obtenido en las pruebas de control clásico usando Arduino. Lo anterior refuerza la tesis de que se obtienen mejores resultados por medio de la nueva tarjeta de adquisición de datos cuando se utilizan técnicas de control que exigen mayor capacidad de transmisión de datos.

Para las pruebas en las que se midieron las señales análogas, la repetibilidad calculada presenta un valor bajo, reflejando una buena precisión en el sistema. A su vez si se aplica el control PI con Feedforward, esta característica mejora, es decir, el sistema tiende a mostrar resultados más cercanos entre si al aplicar varias veces la misma señal de entrada. Lo anterior permite resaltar la diferencia entre analizar resultados digitales y resultados análogos. Estos últimos representan de una mejor forma el comportamiento del sistema.

Histéresis. Esta característica se calculó a través de la (Ec 36) y, según la tabla 31, el comportamiento es mejor cuando se aplica el control PI usando la tarjeta DAQ NI 6212 que usando el hardware Arduino.

Tabla 31. Resultados para la histéresis.

Histéresis		
Arduino	DAQ - PI	DAQ - PI + Feedforward
2,93 %	2,62 %	3,67 %

Respuesta para la entrada rampa. En las pruebas iniciales se observó que resultaba más práctico y fácil usar la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI 6212, por lo tanto para la entrada rampa no se consideró hacer pruebas con la tarjeta de desarrollo Arduino. Además la aplicación de una señal tipo rampa exige una capacidad de trasmisión de datos mayor.

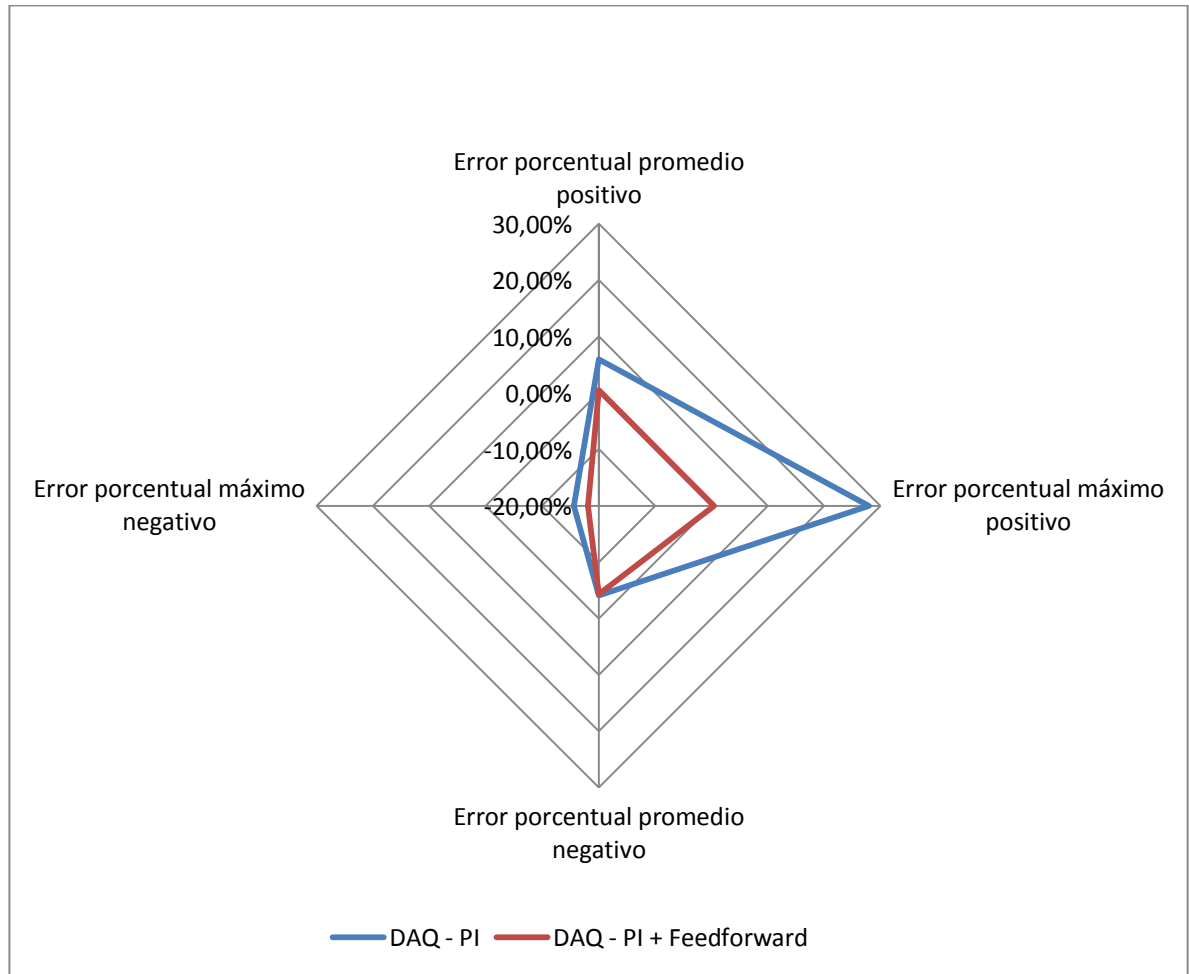
El análisis llevado a cabo se centra en el cálculo del error en estado estable y en el error máximo presentado durante la aplicación de la señal de entrada.

Tabla 32. Resultados introduciendo entrada rampa.

Especificación	DAQ - PI	DAQ - PI + Feedforward
Error porcentual promedio positivo	5,91 %	0,49 %
Error porcentual máximo positivo	27,89 %	0,49 %
Error porcentual promedio negativo	-4,03 %	-4,34 %
Error porcentual máximo negativo	-15,65 %	-18,12 %

En base a la tabla de resultados se realizó un gráfico de tipo radial para poder visualizar el comportamiento obtenido en las pruebas con entrada tipo rampa.

Figura 121. Respuesta del error porcentual para las pruebas con entrada rampa.



El gráfico permite observar que la implementación de la compensación por adelanto de señal en el control PI mejora la exactitud del proceso, haciendo énfasis en los resultados del error porcentual máximo positivo y el error porcentual promedio positivo. Esto refleja que la respuesta a la entrada rampa tiene pocas variaciones en la región positiva de la pendiente. En la región negativa de la pendiente, el comportamiento fue muy similar entre ambas pruebas.

7. CONCLUSIONES.

- Se diseñaron y programaron dos algoritmos en lenguaje LabVIEW que realizan las funciones propias de un controlador dentro del proceso de control de fuerza por medio de servos. Cada uno de los programas aplica una técnica de control diferente, el primero, utiliza la técnica de control clásico PI y el segundo es un complemento del primero, de modo que aplica la técnica de control PI con una compensación por adelanto de señal (feedforward) en cascada.
- Se elaboró una interfaz HMI en lenguaje LabVIEW que permite que el usuario cambie la magnitud y el tipo de señal de comando (escalón unitario o rampa), visualice gráficamente el comportamiento del sistema e informe de manera continua el valor del error porcentual. De esta forma, el usuario, a través del ajuste de las constantes de control PID, puede sintonizar el controlador. Adicionalmente si el usuario desea crear un archivo donde se registren los datos obtenidos, puede activar esta opción a través del botón “guardar”.
- En la respuesta transitoria del sistema a la entrada escalón se observa que la implementación de la compensación por adelanto de señal mejora notoriamente la respuesta dinámica del proceso, reduciendo el tiempo de retardo en un 50 % y el tiempo de estabilización en un 25%, es decir el sistema responde 4 veces más rápido aplicando esta técnica de control.
- Las pruebas realizadas utilizando una señal de entrada tipo escalón reflejan que, en el régimen estacionario, la aplicación de la técnica feedforward mejora la exactitud del proceso. La variación de la respuesta es similar a las obtenidas con las demás pruebas sin presentar mayor mejoría en la precisión. Así mismo se observa una tendencia en todas las pruebas para los valores mínimos de fuerza, en los cuales el error porcentual incrementa y la variación del proceso disminuye, caso contrario al presentado en los valores elevados de entrada, donde se mejora la exactitud y la respuesta disminuye su precisión. Las causas del comportamiento poco preciso reflejado en la implementación de la técnica feedforward se deben a la presencia de fugas en el circuito hidráulico y la no determinación del cambio de volumen en el cilindro dentro del modelo matemático del sistema.
- La repetibilidad presenta un mejor resultado al aplicar la compensación por feedforward mejorando en un 0,4 %, comparado con el valor calculado en las pruebas de control clásico usando Arduino.

- Para las pruebas realizadas al sistema introduciendo una señal tipo rampa se observó que la implementación de la técnica feedforward incrementa la exactitud del proceso, mejorando los resultados del error porcentual máximo positivo y el error porcentual promedio positivo. Esto quiere decir que la respuesta del sistema es, en general, estable durante la aplicación del comando de entrada.
- La tarjeta de adquisición de datos presenta un mejor desempeño cuando se utiliza en procesos que exigen una transmisión de datos acorde a sus características. Las imprecisiones presentadas en las pruebas aplicando el control clásico PI se deben a la simplicidad de la técnica implementada, para la cual, este dispositivo está sobrediseñado.
- Los ajustes mecánicos que se realizan al vástago del cilindro hidráulico influyen de manera importante en los resultados de todas las pruebas debido a que se ve afectada la velocidad de acercamiento a la pieza de prueba. Este problema exige volver a sintonizar el controlador y modificar la velocidad de aproximación.
- El refuerzo estructural construido soporta las cargas ejercidas por el actuador, presentando deformaciones visualmente menores que las que sufría el sistema inicialmente, incluso en condiciones críticas de inestabilidad. Esto minimiza el error inducido por desajustes haciendo más fiable el proceso de medida. Además, la rigidez de la estructura y la pintura utilizada garantizan el uso continuo del banco.
- La implementación de la técnica de control PI con Feedforward mejora la respuesta del sistema en estado transitorio y estacionario, reflejado en la exactitud y precisión de los resultados. La estabilidad del proceso también se incrementa cualitativamente. Dichos comportamientos se aprecian tanto para la señal de entrada tipo escalón, como para la tipo rampa.

8. RECOMENDACIONES.

- El modelamiento matemático del sistema se puede mejorar teniendo en cuenta el cambio de volumen de aceite dentro del cilindro. Para esto es necesario instalar un sensor de posición en el vástago del cilindro hidráulico.
- Realizar el análisis comparativo entre las técnicas de control PI y PI+Feedforward, aplicándolo en el servo de posición con servoválvula y válvula proporcional.
- Implementar las técnicas de control utilizadas en la máquina de ensayos Instron, aplicando el debido modelamiento matemático.

BIBLIOGRAFIA.

ARDUINO. Arduino Mega 2560. [En línea]. [Italia]: Arduino, Marzo 2010 [Consultado 23 de Enero 2015] disponible en: (<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>).

ASTRÖM, Karl and HÄGGLUND, Tore. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. 2da Edición. Instrument Society of America, USA. 1995. 343 p.

BALDWIN FILTERS. Product Guide BT261. [Online]. [Kearney, Nebraska]: Baldwin filters {Cited 23 January 2015} Available from: (<http://catalog.baldwinfilter.com/PartSpecificationPrinterFriendly.asp?URL=PartEntry.asp&partnumber=BT261>).

COMISIÓN ELECTRÓNICA INTERNACIONAL (IEC). ANSI/IEC 60529: Degrees of protection provided by enclosures (IP Code). Edición 2.1. USA: National Electrical Manufacturers Association, 2004. 91 p.

CREUS, Antonio. Instrumentación Industrial. Octava Edición. México, Alfaomega Grupo Editor, 2010. 776 p. ISBN: 978-607-707-042-9.

EATON. RE/RF Series Medium Duty NFPA Tie Rod Cylinders Catalog. Edición Diciembre 2013. V-CYTR-MC002-E3. USA. 69 p.

EATON. Vickers Vane pumps. Single and Double Vane Pumps. Model Series V10, V20, V2010, and V2020 for Industrial Equipment. Versión Noviembre 2011. USA, 2011. 27 p. Document No. 698.

HALVORSEN, Hans-Petterhalvorsen. Introduction to LabVIEW. Porsgrunn, Noruega: Department of Electrical Engineering, Information Technology and Cybernetics. Telemark University College, 2014. 122 p.

KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de Control Moderna. 5 edición. Pearson Educación. Madrid, 2010. 895 p.

LEDESMA PEREZ, Job Angel. Controle robusto de força em atuadores hidráulicos aplicando a teoria de realimentação quantitativa. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. Florianópolis, 2012. 205 p. Trabajo de grado (Maestría en Ingeniería de Automatización y Sistemas).

LEXUS ELECTRONIC SCALES. Datasheet. SC Load cells "S". USA, 2005. 2 p.

MANNESMANN REXROTH, Técnica de válvulas proporcionales y de servoválvulas. Training hidráulico, compendio 2. Lohr am Main, 1996. 286 p. RS 00 291/12.89.

MERRITT, Herbert E. Supply pressure and power element selection. En: Hydraulic control systems New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967. 366 p.

MOOG, Industrial Control Division. Electrohydraulic servovalves a technical look. East Aurora, NY, 1965. 23 p.

MOOG. 62 Series Installation and Operation Instruction. Electrohydraulic Servovalve. RevC. East Aurora NY, 2004. 4 p. CDS6386.

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

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE METROLOGÍA LEGAL (OIML). ERRATUM: OIML R 60: Regulación metrológica para celdas de carga. Edición 2000 (E). Francia: Grande Imprimerie De Troye, 2000. 86 p.

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

ŠITUM, Željko. Force and position control of a hydraulic press, 2011. 7 p. Artículo de investigación. University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture.

THAYER, W. J. Transfer functions for Moog servovalves. Technical bulletin 103. East Aurora, NY, 1965. 11 p.

THERMAL TRANSFER PRODUCTS. Product Catalog. Racine, Wisconsin, 2011. 198 p.

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

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

VICKERS. Proportional Pressure Relief Valves. KCG-3, 1* Series; KACG-3, 1* series. Version 10/97. Barcelona, 1997. 11 p. GB-2162E.

	2,03	
	2,03	
	2,04	
	2,04	
	2,04	
	2,04	
	2,04	
	2,04	
	2,04	
	2,04	
	2,04	
	2,04	
	2,04	
	2,05	
	2,05	
	2,05	
	2,05	
	2,05	
	2,05	
	2,05	
1000	2,61	2,63
	2,61	
	2,61	
	2,61	
	2,62	
	2,62	
	2,62	
	2,62	
	2,62	
	2,62	
	2,63	
	2,63	
	2,63	
	2,63	
2,63		
2,64		
2,64		

	2,64	
	2,64	
	2,64	
	2,64	
	2,64	
	2,64	
	2,65	
1200	3,26	3,28
	3,26	
	3,27	
	3,26	
	3,26	
	3,27	
	3,27	
	3,27	
	3,27	
	3,27	
	3,27	
	3,28	
	3,27	
3,28		
3,28		
1400	3,82	3,82
	3,82	
	3,82	
	3,82	
	3,81	
	3,82	
	3,82	
	3,82	
	3,82	
	3,82	

	3,82	
	3,82	
	3,82	
	3,82	
	3,83	
	3,83	
	3,82	
	3,83	
	3,83	

	3,83	
	3,83	
	3,83	
	3,83	
	3,83	
	3,83	
	3,83	
	3,84	
	3,83	

Anexo B. Pruebas para calcular la histéresis del control de fuerza PI, con entrada escalón y utilizando la tarjeta Arduino.

F [lb]	F_celda BAJADA [lb]	F_celda SUBIDA [lb]	Histéresis	Promedio
1300	1275	1219	-4,27	-1,57
	1275	1219	-4,27	
	1273	1219	-4,11	
	1269	1219	-3,79	
	1264	1219	-3,48	
	1262	1217	-3,48	
	1258	1232	-2,06	
	1256	1238	-1,42	
	1256	1238	-1,42	
	1252	1236	-1,26	
	1250	1234	-1,26	
	1246	1234	-0,95	
	1246	1234	-0,95	
	1244	1234	-0,79	
	1242	1230	-0,95	
	1240	1227	-0,95	
	1238	1230	-0,63	
	1238	1227	-0,79	
	1236	1227	-0,63	
	1234	1225	-0,63	
1232	1227	-0,32		
1230	1227	-0,16		
1230	1227	-0,16		
1230	1225	-0,32		
1230	1225	-0,32		
1200	1168	1123	-3,48	-2,38
	1166	1123	-3,32	
	1168	1123	-3,48	
	1166	1123	-3,32	
	1164	1123	-3,16	
	1162	1123	-3,00	
	1160	1123	-2,85	
	1160	1123	-2,85	
	1158	1121	-2,85	

1150	1156	1123	-2,53	
	1156	1123	-2,53	
	1153	1123	-2,37	
	1153	1123	-2,37	
	1151	1123	-2,21	
	1149	1121	-2,21	
	1149	1123	-2,06	
	1147	1123	-1,90	
	1145	1121	-1,90	
	1147	1123	-1,90	
	1143	1123	-1,58	
	1143	1121	-1,74	
	1143	1121	-1,74	
	1141	1123	-1,42	
	1141	1121	-1,58	
1139	1123	-1,26		
1100	1069	1034	-2,69	-2,09
	1069	1034	-2,69	
	1069	1032	-2,85	
	1067	1032	-2,69	
	1067	1032	-2,69	
	1065	1032	-2,53	
	1063	1034	-2,21	
	1065	1032	-2,53	
	1063	1034	-2,21	
	1061	1034	-2,06	
	1059	1034	-1,90	
	1061	1034	-2,06	
	1057	1032	-1,90	
	1057	1032	-1,90	
	1057	1034	-1,74	
1055	1032	-1,74		
1057	1034	-1,74		
1055	1034	-1,58		
1053	1032	-1,58		

	1055	1032	-1,74	
	1053	1032	-1,58	
	1051	1032	-1,42	
1000	958	931	-2,06	-1,70
	960	934	-2,06	
	960	931	-2,21	
	958	934	-1,90	
	958	934	-1,90	
	958	934	-1,90	
	958	934	-1,90	
	956	931	-1,90	
	956	934	-1,74	
	956	934	-1,74	
	956	934	-1,74	
	956	934	-1,74	
	954	934	-1,58	
	954	934	-1,58	
	954	936	-1,42	
	954	934	-1,58	
	954	934	-1,58	
	952	931	-1,58	
	954	936	-1,42	
	952	934	-1,42	
952	934	-1,42		
952	934	-1,42		
900	874	837	-2,85	-2,93
	872	835	-2,85	
	872	835	-2,85	
	872	835	-2,85	
	872	835	-2,85	
	872	835	-2,85	
	874	835	-3,00	
	876	837	-3,00	
	874	835	-3,00	
	876	835	-3,16	
876	835	-3,16		
874	835	-3,00		
876	835	-3,16		

	876	835	-3,16	
	870	835	-2,69	
	874	835	-3,00	
	876	835	-3,16	
	876	837	-3,00	
	874	835	-3,00	
	874	833	-3,16	
	874	837	-2,85	
	876	839	-2,85	
	860	837	-1,74	
800	761	740	-1,58	-1,33
	761	742	-1,42	
	761	740	-1,58	
	761	740	-1,58	
	761	740	-1,58	
	761	742	-1,42	
	759	740	-1,42	
	763	742	-1,58	
	761	742	-1,42	
	761	742	-1,42	
	761	742	-1,42	
	761	742	-1,42	
	761	742	-1,42	
	761	742	-1,42	
	761	742	-1,42	
	759	742	-1,26	
	761	742	-1,42	
	761	744	-1,26	
	759	744	-1,11	
	761	744	-1,26	
761	744	-1,26		
761	744	-1,26		
761	746	-1,11		
761	744	-1,26		
761	744	-1,26		
751	746	-0,32		
700	654	644	-0,79	-0,46
	654	644	-0,79	
	654	644	-0,79	
	654	646	-0,63	
	654	644	-0,79	
	654	646	-0,63	

	654	646	-0,63		
	652	646	-0,47		
	654	646	-0,63		
	654	648	-0,47		
	654	646	-0,63		
	652	648	-0,32		
	652	648	-0,32		
	652	650	-0,16		
	650	650	0,00		
	652	650	-0,16		
	652	650	-0,16		
	654	650	-0,32		
	654	648	-0,47		
	654	650	-0,32		
	654	650	-0,32		
	654	648	-0,47		
	654	650	-0,32		
	600	559	545	-1,11	-0,71
		557	545	-0,95	
557		545	-0,95		
557		547	-0,79		
557		547	-0,79		
557		549	-0,63		
557		547	-0,79		
557		549	-0,63		
557		549	-0,63		
557		549	-0,63		
557		549	-0,63		
559		549	-0,79		
557		549	-0,63		
557		551	-0,47		
557		549	-0,63		
557		549	-0,63		
559		549	-0,79		
559		551	-0,63		
559		551	-0,63		
559		551	-0,63		
559	551	-0,63			
559	551	-0,63			
561	551	-0,79			

500	459	448	-0,79	-0,38
	459	448	-0,79	
	459	448	-0,79	
	459	448	-0,79	
	459	448	-0,79	
	459	450	-0,63	
	459	450	-0,63	
	459	450	-0,63	
	461	448	-0,95	
	461	450	-0,79	
	463	450	-0,95	
	461	450	-0,79	
	461	450	-0,79	
	446	450	0,32	
	446	450	0,32	
	448	453	0,32	
	448	453	0,32	
	448	453	0,32	
	453	453	0,00	
450	453	0,16		
400	356	344	-0,95	-0,89
	358	344	-1,11	
	356	344	-0,95	
	356	344	-0,95	
	358	346	-0,95	
	356	346	-0,79	
	360	346	-1,11	
	358	348	-0,79	
	360	348	-0,95	
	360	348	-0,95	
	360	350	-0,79	
	360	350	-0,79	
	360	348	-0,95	
	360	352	-0,63	
	362	352	-0,79	
	364	352	-0,95	
	364	350	-1,11	
	364	352	-0,95	
	362	352	-0,79	

	364	354	-0,79	
	362	354	-0,63	
	364	352	-0,95	
300	247	249	0,16	-0,21
	247	249	0,16	
	249	247	-0,16	
	249	249	0,00	
	249	249	0,00	
	249	249	0,00	
	251	251	0,00	
	251	249	-0,16	
	253	251	-0,16	
	253	249	-0,32	

	253	251	-0,16	
	255	249	-0,47	
	255	251	-0,32	
	257	251	-0,47	
	255	251	-0,32	
	255	251	-0,32	
	255	253	-0,16	
	257	253	-0,32	
	257	253	-0,32	
	259	253	-0,47	
	257	253	-0,32	
	259	253	-0,47	

NOTA: El valor resaltado en amarillo corresponde a la histéresis promedio máxima.

Anexo C. Pruebas para calcular la histéresis del control de fuerza PI, con entrada escalón y utilizando la tarjeta DAQ NI 6212.

F [lb]	F_celda SUBIDA [lb]	F_celda BAJADA [lb]	Histéresis	Promedio
500	452	469	-1,31	-1,07
	451	469	-1,44	
	451	469	-1,40	
	454	466	-0,95	
	456	465	-0,65	
	454	466	-0,95	
	456	472	-1,22	
	453	472	-1,50	
	459	468	-0,71	
	454	468	-1,05	
	454	468	-1,03	
	454	458	-0,29	
	452	458	-0,45	
	451	460	-0,68	
	451	466	-1,20	
	453	466	-0,99	
	453	466	-0,99	
	452	468	-1,25	
	451	468	-1,29	
	450	470	-1,53	
450	466	-1,25		
452	469	-1,29		
455	469	-1,05		
452	469	-1,29		
600	555	568	-0,99	-1,07
	555	568	-0,99	
	555	567	-0,88	
	552	572	-1,59	
	557	569	-0,88	
	553	572	-1,50	
	555	569	-1,05	
	555	567	-0,91	
	555	565	-0,79	
	552	564	-0,93	

500	552	564	-0,93	
	552	568	-1,26	
	551	568	-1,31	
	551	567	-1,21	
	551	565	-1,04	
	555	566	-0,78	
	555	565	-0,72	
	552	565	-0,99	
	551	562	-0,80	
	551	562	-0,80	
	551	571	-1,48	
	550	571	-1,61	
	550	567	-1,37	
	549	565	-1,22	
	550	563	-1,01	
	551	563	-0,93	
	551	560	-0,74	
	551	568	-1,35	
700	655	686	-2,36	-1,97
	655	678	-1,70	
	653	680	-2,03	
	653	680	-2,08	
	653	680	-2,07	
	653	678	-1,96	
	653	676	-1,75	
	651	674	-1,78	
	649	676	-2,05	
	649	678	-2,23	
	648	680	-2,45	
	650	680	-2,31	
	652	677	-1,95	
	652	672	-1,58	
652	668	-1,30		
652	668	-1,30		
647	679	-2,48		
648	679	-2,38		
647	672	-1,88		

	648	672	-1,78	
	649	672	-1,74	
	649	672	-1,74	
	649	677	-2,16	
	649	671	-1,67	
	645	674	-2,28	
	648	672	-1,86	
	645	672	-2,09	
	645	672	-2,09	
	645	669	-1,85	
	645	675	-2,33	
800	760	770	-0,75	-0,31
	760	770	-0,79	
	757	770	-1,06	
	757	757	-0,03	
	756	757	-0,08	
	753	753	0,05	
	751	754	-0,24	
	753	754	-0,05	
	758	754	0,29	
	758	753	0,37	
	755	753	0,15	
	755	764	-0,68	
	755	764	-0,68	
	754	757	-0,25	
	753	757	-0,31	
	752	761	-0,68	
	750	761	-0,78	
	749	761	-0,88	
	750	751	-0,04	
	749	751	-0,21	
749	751	-0,14		
749	749	-0,02		
747	749	-0,17		
747	752	-0,40		
900	889	924	-2,63	-2,62
	889	922	-2,52	
	885	922	-2,84	
	885	922	-2,86	
	885	922	-2,84	

	885	918	-2,50	
	881	915	-2,68	
	881	918	-2,84	
	881	915	-2,68	
	881	914	-2,53	
	879	909	-2,29	
	877	909	-2,48	
	876	909	-2,59	
	875	909	-2,61	
	875	909	-2,61	
	877	909	-2,42	
	877	910	-2,53	
	874	909	-2,64	
	874	910	-2,75	
	874	910	-2,76	
	873	910	-2,89	
	871	902	-2,38	
	869	900	-2,38	
	871	900	-2,22	
	870	904	-2,62	
871	904	-2,56		
871	905	-2,56		
871	905	-2,56		
869	905	-2,76		
868	905	-2,92		
867	903	-2,80		
1000	982	978	0,31	0,19
	982	975	0,52	
	982	975	0,52	
	979	975	0,30	
	979	977	0,12	
	979	977	0,16	
	979	976	0,22	
	978	972	0,50	
	978	972	0,44	
	978	968	0,71	
976	971	0,40		
974	970	0,27		
974	971	0,21		
972	970	0,11		

	970	968	0,14	
	970	968	0,14	
	969	970	-0,04	
	966	970	-0,31	
	966	969	-0,29	
	962	964	-0,15	
	964	964	0,07	
	963	964	-0,05	
	963	963	-0,01	
1100	1091	1082	0,69	0,76
	1089	1078	0,81	
	1087	1078	0,63	
	1085	1078	0,50	
	1084	1075	0,71	
	1084	1074	0,78	
	1086	1073	0,97	
	1086	1070	1,24	
	1080	1069	0,91	
	1080	1069	0,88	
	1078	1069	0,63	
	1078	1069	0,63	
	1077	1067	0,80	
	1076	1067	0,68	
	1073	1067	0,47	
	1073	1062	0,84	
	1073	1067	0,43	
	1072	1062	0,75	
	1072	1058	1,05	
	1072	1058	1,10	
	1072	1057	1,16	
	1066	1062	0,31	
	1066	1059	0,53	
1067	1059	0,64		
1067	1055	0,93		
1065	1055	0,78		
1200	1169	1182	-1,00	-0,62
	1169	1182	-1,02	
	1171	1183	-0,99	
	1171	1182	-0,90	
	1170	1180	-0,71	

	1168	1178	-0,82	
	1164	1177	-1,02	
	1164	1177	-1,02	
	1167	1177	-0,80	
	1167	1176	-0,69	
	1163	1170	-0,51	
	1161	1170	-0,71	
	1158	1170	-0,93	
	1158	1167	-0,69	
	1158	1167	-0,69	
	1155	1161	-0,42	
	1154	1161	-0,54	
	1154	1159	-0,39	
	1154	1158	-0,37	
	1154	1157	-0,22	
	1154	1157	-0,22	
	1154	1160	-0,44	
	1149	1160	-0,83	
	1148	1155	-0,50	
	1148	1155	-0,53	
1300	1147	1153	-0,47	
	1146	1149	-0,25	
	1147	1149	-0,14	
	1146	1149	-0,20	
	1288	1249	3,00	0,26
	1288	1248	3,04	
	1285	1279	0,44	
	1282	1279	0,23	
	1280	1283	-0,16	
	1276	1277	-0,09	
	1275	1277	-0,16	
	1276	1273	0,21	
1273	1272	0,03		
1271	1271	-0,04		
1271	1272	-0,10		
1271	1268	0,24		
1265	1266	-0,12		

NOTA: El valor resaltado en amarillo corresponde a la histéresis promedio máxima.

Anexo D. Pruebas para calcular el error en estado estable y la varianza del control de fuerza PI con compensación por adelanto de señal (feedforward) con entrada escalón usando la tarjeta DAQ NI 6212.

F [lb]	F_cel [lb]	F_cel prom [lb]	F_cel var [lb]	%Error	% Error prom
500	497	491	2,22	0,67	1,82
	496			0,81	
	495			0,99	
	494			1,26	
	494			1,20	
	494			1,20	
	494			1,29	
	493			1,49	
	493			1,49	
	493			1,40	
	492			1,64	
	491			1,73	
	491			1,75	
	492			1,70	
	491			1,75	
	491			1,87	
	491			1,75	
	491			1,72	
	490			2,02	
	491			1,87	
	491			1,82	
	490			2,05	
	490			2,07	
	489			2,19	
	490			2,02	
	489			2,28	
	489			2,10	
	490			2,03	
	489			2,19	
	489			2,23	
	489			2,21	
	489			2,19	
490			2,07		
489			2,10		

	489			2,26	
	488			2,39	
	489			2,25	
	488			2,42	
	488			2,33	
600	489			2,12	
	615	598	7,73	-2,45	0,33
	615			-2,48	
	613			-2,24	
	612			-2,01	
	612			-1,92	
	608			-1,40	
	609			-1,48	
	609			-1,45	
	607			-1,21	
	607			-1,11	
	606			-0,93	
	605			-0,80	
	604			-0,62	
	603			-0,52	
	602			-0,42	
	602			-0,39	
	602			-0,25	
	601			-0,15	
	601			-0,15	
	600			-0,08	
	601			-0,09	
	600			0,01	
	599			0,23	
	599			0,22	
	598			0,38	
	598			0,35	
	598			0,34	
	596			0,73	
	596			0,70	
	595			0,78	

	595			0,85	
	594			1,04	
	595			0,91	
	594			0,98	
	594			1,04	
	593			1,12	
	594			1,06	
	592			1,28	
	593			1,25	
	593			1,22	
	591			1,44	
	592			1,31	
	592			1,40	
	591			1,52	
	591			1,44	
	590			1,66	
	590			1,69	
	589			1,82	
	590			1,74	
	588			1,93	
	589			1,85	
	588			1,94	
	588			1,97	
	588			2,00	
	587			2,11	
700	727	716	6,42	3,90	2,28
	727			3,90	
	727			3,93	
	726			3,71	
	725			3,62	
	725			3,53	
	724			3,40	
	724			3,42	
	724			3,42	
	722			3,21	
	723			3,29	
	722			3,16	
	722			3,16	
	720			2,93	
721			3,02		

	720			2,80	
	719			2,71	
	719			2,74	
	719			2,66	
	717			2,44	
	718			2,57	
	717			2,46	
	717			2,37	
	716			2,33	
	714			2,06	
	715			2,09	
	715			2,20	
	715			2,09	
	714			1,96	
	714			2,04	
	713			1,87	
	713			1,92	
	713			1,84	
	711			1,64	
	712			1,69	
	711			1,61	
	711			1,53	
	710			1,47	
	710			1,49	
	710			1,44	
	710			1,40	
	710			1,45	
	709			1,30	
	709			1,23	
	708			1,12	
	708			1,10	
	707			1,02	
	707			1,03	
	707			0,97	
	707			0,94	
	706			0,86	
800	818	803	8,10	-2,26	-0,44
	818			-2,26	
	818			-2,27	
	816			-2,05	

816			-1,98	
816			-1,94	
814			-1,80	
814			-1,73	
813			-1,59	
812			-1,51	
812			-1,44	
810			-1,20	
809			-1,18	
809			-1,13	
809			-1,07	
808			-1,06	
807			-0,93	
806			-0,72	
806			-0,72	
805			-0,62	
805			-0,58	
804			-0,54	
804			-0,49	
803			-0,38	
803			-0,40	
802			-0,30	
801			-0,18	
800			-0,04	
800			-0,04	
800			-0,04	
800			0,05	
799			0,07	
798			0,26	
798			0,25	
797			0,33	
796			0,47	
797			0,38	
796			0,55	
796			0,49	
795			0,60	
794			0,70	
796			0,55	
794			0,73	
793			0,82	

792			0,95	
792			0,97	
793			0,91	
792			0,96	
792			1,02	
941	916	12,81	-4,51	-1,81
941			-4,53	
940			-4,48	
939			-4,34	
938			-4,18	
936			-4,03	
935			-3,93	
935			-3,85	
934			-3,73	
934			-3,76	
931			-3,47	
930			-3,35	
930			-3,31	
930			-3,28	
930			-3,28	
928			-3,17	
927			-2,95	
926			-2,87	
925			-2,74	
925			-2,79	
924			-2,71	
924			-2,69	
923			-2,60	
922			-2,47	
921			-2,35	
921			-2,29	
919			-2,14	
919			-2,15	
919			-2,08	
917			-1,89	
917			-1,93	
916			-1,81	
916			-1,81	
915			-1,70	
915			-1,62	

	914			-1,56	
	914			-1,53	
	912			-1,39	
	913			-1,44	
	912			-1,30	
	911			-1,24	
	910			-1,16	
	911			-1,22	
	910			-1,07	
	909			-1,04	
	909			-0,96	
	907			-0,82	
	908			-0,90	
	907			-0,74	
	906			-0,70	
	905			-0,58	
	906			-0,63	
	905			-0,55	
	904			-0,45	
	904			-0,40	
	904			-0,48	
	903			-0,34	
	901			-0,16	
	902			-0,22	
	902			-0,18	
	900			-0,05	
	900			-0,04	
	900			-0,01	
	900			0,01	
	899			0,13	
	898			0,26	
	898			0,17	
	898			0,22	
	897			0,31	
1000	1043	1010	15,80	-4,28	-1,03
	1042			-4,18	
	1040			-3,98	
	1037			-3,70	
	1035			-3,46	
	1034			-3,36	

	1031			-3,09	
	1029			-2,90	
	1027			-2,72	
	1026			-2,63	
	1024			-2,41	
	1023			-2,35	
	1021			-2,13	
	1020			-1,97	
	1019			-1,91	
	1018			-1,79	
	1018			-1,76	
	1015			-1,50	
	1015			-1,46	
	1013			-1,33	
	1011			-1,15	
	1011			-1,09	
	1009			-0,89	
	1009			-0,87	
	1008			-0,78	
	1007			-0,70	
	1006			-0,62	
	1005			-0,52	
	1004			-0,41	
	1003			-0,32	
	1002			-0,19	
	1002			-0,16	
	1001			-0,09	
	999			0,11	
	999			0,11	
	997			0,25	
	997			0,33	
	996			0,39	
	996			0,45	
	994			0,60	
	994			0,65	
	994			0,60	
	993			0,70	
	991			0,87	
	990			1,04	
	990			0,98	

	989			1,06	
	989			1,08	
	988			1,17	
1100	1147	1105	21,50	-4,30	-0,49
	1148			-4,32	
	1145			-4,14	
	1143			-3,89	
	1140			-3,64	
	1137			-3,40	
	1135			-3,19	
	1133			-3,00	
	1130			-2,74	
	1129			-2,61	
	1126			-2,39	
	1124			-2,21	
	1123			-2,13	
	1120			-1,84	
	1119			-1,71	
	1118			-1,63	
	1116			-1,49	
	1115			-1,33	
	1113			-1,18	
	1111			-0,97	
	1110			-0,88	
	1108			-0,69	
	1106			-0,57	
	1105			-0,43	
	1104			-0,36	
	1102			-0,15	
	1102			-0,15	
	1101			-0,06	
	1099			0,13	
	1098			0,17	
	1097			0,29	
	1095			0,42	
	1094			0,51	
1092			0,70		
1092			0,77		
1091			0,82		
1090			0,91		

	1089			1,03	
	1089			1,04	
	1086			1,27	
	1086			1,29	
	1084			1,44	
	1084			1,47	
	1082			1,65	
	1082			1,61	
	1082			1,66	
	1080			1,85	
	1079			1,94	
	1077			2,10	
	1076			2,16	
	1076			2,21	
	1075			2,31	
1200	1247	1202	23,12	-3,88	-0,14
	1246			-3,83	
	1245			-3,77	
	1242			-3,53	
	1241			-3,44	
	1240			-3,31	
	1238			-3,14	
	1236			-3,01	
	1235			-2,90	
	1232			-2,66	
	1231			-2,58	
	1231			-2,57	
	1228			-2,36	
	1228			-2,30	
	1226			-2,17	
	1224			-1,99	
	1223			-1,89	
	1222			-1,80	
	1220			-1,68	
	1219			-1,57	
1217			-1,45		
1216			-1,36		
1215			-1,27		
1214			-1,15		
1213			-1,08		

	1212			-1,02	
	1210			-0,84	
	1209			-0,79	
	1208			-0,71	
	1207			-0,60	
	1207			-0,55	
	1206			-0,46	
	1205			-0,40	
	1203			-0,23	
	1201			-0,12	
	1200			0,01	
	1199			0,05	
	1199			0,10	
	1197			0,22	
	1196			0,31	
	1196			0,33	
	1195			0,42	
	1193			0,55	
	1193			0,58	
	1192			0,66	
	1191			0,75	
	1190			0,80	
	1189			0,93	
	1189			0,92	
	1187			1,06	
	1187			1,11	
	1185			1,21	
	1185			1,27	
	1185			1,24	
	1182			1,48	
	1182			1,50	
	1181			1,56	
	1180			1,63	
	1180			1,66	
	1179			1,74	
	1179			1,77	
	1178			1,85	
	1177			1,95	
	1176			2,00	
	1175			2,06	

	1175			2,06	
	1173			2,21	
	1172			2,31	
	1171			2,44	
	1171			2,41	
	1170			2,49	
	1170			2,53	
	1169			2,60	
	1168			2,64	
	1167			2,78	
	1338	1301	20,27	-2,91	-0,04
	1338			-2,91	
	1336			-2,79	
	1334			-2,64	
	1333			-2,53	
	1331			-2,41	
	1329			-2,21	
	1328			-2,14	
	1326			-2,04	
	1325			-1,92	
	1324			-1,81	
	1322			-1,69	
	1320			-1,53	
	1318			-1,40	
	1317			-1,28	
1300	1315			-1,19	
	1315			-1,12	
	1312			-0,92	
	1311			-0,85	
	1309			-0,71	
	1308			-0,65	
	1308			-0,61	
	1305			-0,40	
	1304			-0,34	
	1303			-0,23	
	1302			-0,17	
	1301			-0,08	
	1300			0,02	
	1299			0,09	
	1297			0,20	

1297			0,25	
1295			0,36	
1295			0,41	
1294			0,47	
1293			0,51	
1291			0,69	
1291			0,66	
1289			0,82	
1290			0,81	
1288			0,96	
1286			1,07	
1285			1,14	
1284			1,20	
1284			1,25	

1282			1,38	
1281			1,46	
1279			1,58	
1279			1,62	
1278			1,69	
1277			1,74	
1276			1,81	
1275			1,90	
1275			1,93	
1273			2,08	
1272			2,15	
1272			2,14	
1269			2,35	
1270			2,28	

Anexo E. Datos utilizados para el cálculo de la histéresis en la prueba de control de fuerza por control PI + Feedforward usando la tarjeta DAQ NI 6212.

F [lb]	F_celda bajada [lb]	F_celda subida [lb]	Histéresis	Promedio
1300	1349	1338	-0,86	-0,79
	1349	1338	-0,83	
	1347	1336	-0,80	
	1344	1334	-0,76	
	1343	1333	-0,73	
	1340	1331	-0,70	
	1339	1329	-0,76	
	1338	1328	-0,76	
	1336	1326	-0,71	
	1333	1325	-0,65	
	1333	1324	-0,71	
	1331	1322	-0,67	
	1330	1320	-0,78	
	1329	1318	-0,82	
	1327	1317	-0,81	
	1325	1315	-0,73	
	1324	1315	-0,69	
	1323	1312	-0,82	
	1322	1311	-0,82	
	1320	1309	-0,84	
	1319	1308	-0,80	
	1317	1308	-0,73	
	1316	1305	-0,86	
	1316	1304	-0,87	
	1314	1303	-0,84	
	1313	1302	-0,86	
	1313	1301	-0,88	
	1311	1300	-0,85	
	1310	1299	-0,84	
	1309	1297	-0,91	
	1308	1297	-0,84	
	1306	1295	-0,84	
1305	1295	-0,78		
1304	1294	-0,80		

1200	1304	1293	-0,81	
	1226	1247	1,61	1,83
	1225	1246	1,61	
	1222	1245	1,77	
	1220	1242	1,71	
	1217	1241	1,86	
	1214	1240	1,95	
	1213	1238	1,91	
	1211	1236	1,92	
	1209	1235	1,96	
	1208	1232	1,88	
	1206	1231	1,92	
	1205	1231	1,99	
	1202	1228	2,01	
	1202	1228	1,99	
	1201	1226	1,95	
	1199	1224	1,93	
	1198	1223	1,91	
	1197	1222	1,90	
	1196	1220	1,88	
	1194	1219	1,95	
	1193	1217	1,86	
	1191	1216	1,95	
	1191	1215	1,86	
	1189	1214	1,89	
	1189	1213	1,82	
	1187	1212	1,95	
	1186	1210	1,83	
	1185	1209	1,88	
	1184	1208	1,85	
	1183	1207	1,82	
	1184	1207	1,76	
1182	1206	1,82		
1181	1205	1,81		
1180	1203	1,75		
1180	1201	1,67		
1178	1200	1,65		

	1178	1199	1,67	
	1177	1199	1,68	
	1176	1197	1,67	
	1175	1196	1,61	
	1175	1196	1,63	
1100	1122	1147	1,97	1,63
	1120	1148	2,10	
	1119	1145	2,06	
	1116	1143	2,06	
	1114	1140	1,99	
	1111	1137	2,01	
	1110	1135	1,95	
	1108	1133	1,90	
	1106	1130	1,83	
	1105	1129	1,82	
	1103	1126	1,76	
	1102	1124	1,69	
	1101	1123	1,73	
	1099	1120	1,59	
	1097	1119	1,65	
	1097	1118	1,58	
	1096	1116	1,60	
	1094	1115	1,58	
	1093	1113	1,54	
	1093	1111	1,40	
	1091	1110	1,41	
	1090	1108	1,35	
	1089	1106	1,32	
	1088	1105	1,25	
	1087	1104	1,31	
	1087	1102	1,14	
	1086	1102	1,24	
1085	1101	1,18		
1084	1099	1,12		
1000	1054	1106	3,93	3,28
	1054	1100	3,55	
	1053	1093	3,12	
	1052	1100	3,66	
	1048	1099	3,90	
	1047	1099	3,99	

	1048	1096	3,76		
	1047	1096	3,84		
	1046	1096	3,89		
	1045	1088	3,28		
	1045	1088	3,32		
	1045	1094	3,79		
	1043	1094	3,91		
	1043	1093	3,87		
	1043	1086	3,36		
	1042	1082	3,06		
	1041	1085	3,31		
	1042	1079	2,86		
	1040	1079	2,99		
	1040	1079	3,02		
	1040	1081	3,15		
	1039	1081	3,23		
	1039	1074	2,70		
	1038	1074	2,78		
	1038	1076	2,91		
	1037	1076	2,98		
	1036	1072	2,76		
	1036	1067	2,39		
	1036	1067	2,46		
	1036	1070	2,65		
	900	983	941	-3,28	-3,67
		983	941	-3,28	
		984	940	-3,33	
982		939	-3,33		
982		938	-3,42		
982		936	-3,48		
981		935	-3,52		
981		935	-3,53		
980		934	-3,57		
979		934	-3,50		
979		931	-3,64		
979	930	-3,76			
977	930	-3,66			
978	930	-3,74			
977	930	-3,65			
977	928	-3,74			

800	977	927	-3,84	
	976	926	-3,87	
	976	925	-3,98	
	975	925	-3,86	
	975	924	-3,87	
	974	924	-3,82	
	974	923	-3,88	
	973	922	-3,91	
	972	921	-3,94	
	973	921	-4,01	
800	852	818	-2,63	-2,95
	852	818	-2,65	
	853	818	-2,65	
	851	816	-2,69	
	851	816	-2,70	
	850	816	-2,67	
	850	814	-2,71	
	850	814	-2,75	
	849	813	-2,78	
	849	812	-2,81	
	848	812	-2,82	
	847	810	-2,85	
	848	809	-2,97	
	848	809	-2,96	
	847	809	-2,97	
	846	808	-2,89	
	846	807	-2,99	
	845	806	-3,05	
	845	806	-2,99	
	845	805	-3,10	
	844	805	-3,05	
	844	804	-3,06	
	843	804	-3,04	
	843	803	-3,10	
	843	803	-3,07	
	843	802	-3,15	
	843	801	-3,16	
	842	800	-3,18	
	843	800	-3,27	
	842	800	-3,21	

700	841	800	-3,21	
	841	799	-3,17	
700	718	757	3,02	3,00
	718	757	3,01	
	718	757	3,06	
	717	756	3,01	
	716	755	3,06	
	715	755	3,06	
	714	754	3,06	
	713	754	3,16	
	712	754	3,19	
	712	752	3,12	
	712	753	3,17	
	712	752	3,11	
	710	752	3,23	
	712	750	2,99	
	710	751	3,18	
	709	750	3,12	
	708	749	3,12	
	708	749	3,16	
	708	749	3,14	
	707	747	3,06	
	707	748	3,16	
	706	747	3,14	
	707	747	3,05	
	707	746	3,04	
	706	744	2,92	
	706	745	2,97	
	705	745	3,10	
	705	745	3,06	
	706	744	2,93	
	705	744	3,03	
704	743	2,99		
704	743	3,06		
704	743	3,00		
703	741	2,94		
704	742	2,95		
703	741	2,92		
703	741	2,88		
703	740	2,84		

	703	740	2,90	
	703	740	2,87	
	702	740	2,89	
	702	740	2,91	
	702	739	2,83	
	701	739	2,89	
	701	738	2,81	
	701	738	2,82	
	701	737	2,78	
	701	737	2,80	
	701	737	2,77	
	701	737	2,76	
	600	528	526	0,16
527		528	-0,07	
527		533	-0,50	
526		533	-0,59	
526		538	-0,95	
525		534	-0,67	

	525	534	-0,69	
	524	534	-0,73	
	524	525	-0,01	
	524	536	-0,95	
	524	524	0,03	
	524	532	-0,64	
	524	532	-0,66	
	523	532	-0,70	
	523	531	-0,58	
	524	521	0,19	
	523	521	0,16	
	522	521	0,14	
	523	531	-0,61	
	523	531	-0,59	
	522	533	-0,83	
	523	522	0,04	
	522	533	-0,86	

NOTA: El valor resaltado en amarillo corresponde a la histéresis promedio máxima.

Anexo F. Datos digitalizados en base a las gráficas de respuesta transitoria del control de fuerza PI utilizando la tarjeta Arduino con entrada escalón.

t [s]	F_celda [lb]
1,14	19
1,16	29
1,21	48
1,24	52
1,30	86
1,36	119
1,41	152
1,43	167
1,45	176
1,47	186
1,48	200
1,50	210
1,52	219
1,53	229
1,55	243
1,57	252
1,58	262
1,59	276
1,61	281
1,63	295
1,65	310
1,66	324
1,69	338
1,72	357
1,74	376
1,75	390
1,78	410
1,80	419
1,82	438
1,84	457
1,87	471
1,89	490
1,93	524
1,96	543
1,98	562

2,01	581
2,02	595
2,04	610
2,06	624
2,09	643
2,11	657
2,13	671
2,15	686
2,17	705
2,19	719
2,21	733
2,22	743
2,24	752
2,26	767
2,28	781
2,30	790
2,32	805
2,37	833
2,39	848
2,41	857
2,45	881
2,49	910
2,51	914
2,53	929
2,55	938
2,57	948
2,59	957
2,61	967
2,63	976
2,64	986
2,67	995
2,69	1010
2,71	1019
2,73	1033
2,75	1043
2,76	1048

2,78	1057
2,81	1071
2,83	1081
2,85	1090
2,87	1100
2,89	1110
2,90	1119
2,93	1129
2,96	1138
2,98	1148
3,01	1157
3,03	1167
3,05	1176
3,08	1181
3,09	1186
3,10	1190
3,12	1200
3,14	1205
3,17	1214
3,19	1224
3,23	1233
3,25	1238
3,30	1252
3,32	1257
3,37	1267
3,39	1271
3,42	1276
3,44	1281
3,46	1286
3,49	1286
3,51	1290
3,53	1295
3,55	1300
3,57	1305
3,61	1310
3,63	1310

3,65	1310
3,68	1314
3,70	1314
3,71	1319
3,73	1319
3,75	1324
3,79	1329
3,83	1333
3,89	1338
3,91	1338
3,94	1338
3,99	1343
4,02	1348
4,06	1348
4,09	1348
4,13	1352
4,15	1352
4,20	1352
4,23	1357
4,27	1357
4,30	1357
4,33	1357
4,38	1357
4,43	1357
4,47	1357
4,51	1357
4,56	1357
4,60	1357
4,65	1357
4,69	1352
4,73	1352
4,77	1352
4,81	1352
4,84	1352
4,86	1352
4,89	1348

Anexo G. Datos digitalizados en base a las gráficas de respuesta transitoria del control de fuerza PI utilizando la tarjeta DAQ NI 6212 con entrada escalón.

t [s]	F [lb]
0,78	3,93
0,79	7,88
0,81	15,75
0,83	27,57
0,86	31,52
0,87	39,39
0,90	51,21
0,92	59,08
0,95	70,90
0,97	82,71
1,01	98,47
1,03	106,35
1,04	110,29
1,06	110,30
1,08	110,32
1,11	110,34
1,14	110,36
1,17	110,39
1,23	110,43
1,32	110,51
1,37	110,54
1,42	110,59
1,48	110,63
1,50	110,65
1,52	110,66
1,54	114,61
1,56	114,62
1,57	122,50
1,58	122,50
1,59	122,51
1,60	126,45
1,61	138,25
1,62	150,05
1,63	161,86
1,64	173,66

1,66	189,40
1,67	193,33
1,68	205,14
1,68	209,07
1,70	209,08
1,72	216,96
1,73	220,90
1,75	220,92
1,77	224,86
1,79	224,88
1,83	224,91
1,87	224,94
1,88	232,82
1,91	252,49
1,93	264,30
1,95	276,11
1,96	280,05
1,97	283,99
1,99	284,00
2,00	287,94
2,03	295,83
2,05	303,71
2,07	311,58
2,08	319,45
2,09	331,26
2,12	347,01
2,13	354,88
2,14	362,75
2,16	366,69
2,17	370,64
2,19	374,58
2,20	382,45
2,21	386,39
2,23	390,34
2,25	398,21
2,26	402,15

2,27	406,09
2,29	410,04
2,30	417,91
2,32	425,79
2,33	433,66
2,34	445,46
2,35	453,33
2,36	465,13
2,37	476,93
2,38	488,73
2,38	500,53
2,39	512,33
2,40	524,13
2,41	532,00
2,42	543,80
2,44	547,75
2,45	547,76
2,47	551,70
2,48	555,64
2,50	555,65
2,50	563,52
2,56	563,57
2,60	563,60
2,61	567,54
2,63	579,34
2,64	595,08
2,65	602,95
2,66	614,75
2,67	630,49
2,69	642,29
2,70	654,09
2,71	661,96
2,72	665,90
2,72	665,91
2,74	669,85
2,75	669,86

2,77	673,80
2,78	681,68
2,81	681,70
2,83	681,71
2,84	685,65
2,88	685,68
2,88	689,62
2,89	697,49
2,90	709,29
2,90	717,15
2,91	728,95
2,92	740,75
2,92	752,55
2,93	760,42
2,94	776,15
2,96	795,82
2,97	815,49
2,98	827,29
3,00	831,23
3,00	839,10
3,03	846,98
3,04	850,92
3,06	862,73
3,13	862,79
3,16	862,81
3,20	862,84
3,21	866,78
3,25	866,81
3,27	870,76
3,29	874,71
3,31	882,58
3,32	886,52
3,33	890,47
3,36	902,28
3,38	914,09
3,40	925,90

3,42	941,64
3,44	949,52
3,46	949,53
3,49	953,49
3,53	961,38
3,56	961,41
3,60	965,37
3,62	965,38
3,64	973,26
3,66	989,00

3,70	1012,62
3,72	1028,36
3,74	1032,31
3,76	1040,19
3,80	1044,15
3,83	1048,10
3,89	1048,15
3,93	1048,19
4,00	1048,23
4,06	1048,29

4,09	1052,24
4,12	1067,99
4,14	1079,80
4,15	1087,67
4,19	1099,49
4,22	1099,52
4,24	1103,46
4,28	1103,49
4,40	1103,59
4,49	1099,73

4,52	1099,75
4,58	1099,80
4,63	1103,77
4,67	1103,80
4,72	1103,84
4,77	1099,95
4,81	1092,12
4,87	1092,17
4,94	1100,08
5,00	1100,13

NOTA: Los valores resaltados en amarillo corresponden, de arriba a abajo, al tiempo de retardo y tiempo de asentamiento.

Anexo H. Datos digitalizados en base a las gráficas de respuesta transitoria del control de fuerza por adelanto de señal (Feedforward) utilizando la tarjeta DAQ NI 6212 con entrada escalón.

t [s]	F [lb]	F_teo [lb]	% Error	% respuesta
0,57	0	1100	100,00	0,00
0,58	12	1100	98,93	1,07
0,59	16	1100	98,57	1,43
0,62	35	1100	96,79	3,21
0,64	51	1100	95,36	4,64
0,66	67	1100	93,93	6,07
0,68	79	1100	92,86	7,14
0,72	98	1100	91,08	8,92
0,75	110	1100	90,01	9,99
0,78	126	1100	88,58	11,42
0,81	134	1100	87,86	12,14
0,83	145	1100	86,79	13,21
0,84	149	1100	86,43	13,57
0,86	149	1100	86,43	13,57
0,89	149	1100	86,43	13,57
0,91	153	1100	86,07	13,93
0,93	153	1100	86,07	13,93
0,95	165	1100	85,00	15,00
0,96	196	1100	82,15	17,85
0,96	228	1100	79,29	20,71
0,96	251	1100	77,16	22,84
0,96	275	1100	75,02	24,98
0,97	306	1100	72,16	27,84
0,97	330	1100	70,02	29,98
0,97	349	1100	68,24	31,76
0,97	369	1100	66,46	33,54
0,98	404	1100	63,25	36,75
0,98	424	1100	61,47	38,53
0,99	463	1100	57,90	42,10
1,00	491	1100	55,41	44,59
0,99	510	1100	53,62	46,38
1,00	542	1100	50,77	49,23
0,99	569	1100	48,28	51,72
1,00	589	1100	46,49	53,51

1,00	616	1100	44,00	56,00
1,00	640	1100	41,86	58,14
1,00	667	1100	39,36	60,64
1,01	687	1100	37,58	62,42
1,01	722	1100	34,37	65,63
1,02	745	1100	32,23	67,77
1,02	761	1100	30,81	69,19
1,02	773	1100	29,74	70,26
1,02	796	1100	27,60	72,40
1,02	816	1100	25,81	74,19
1,03	832	1100	24,39	75,61
1,03	855	1100	22,25	77,75
1,04	879	1100	20,11	79,89
1,04	898	1100	18,33	81,67
1,04	922	1100	16,19	83,81
1,04	942	1100	14,40	85,60
1,04	957	1100	12,98	87,02
1,04	973	1100	11,55	88,45
1,04	993	1100	9,77	90,23
1,05	1008	1100	8,34	91,66
1,06	1016	1100	7,63	92,37
1,06	1028	1100	6,56	93,44
1,07	1036	1100	5,85	94,15
1,07	1047	1100	4,78	95,22
1,08	1055	1100	4,06	95,94
1,08	1067	1100	2,99	97,01
1,09	1079	1100	1,92	98,08
1,10	1095	1100	0,50	99,50
1,11	1106	1100	-0,57	100,57
1,11	1110	1100	-0,93	100,93
1,12	1118	1100	-1,64	101,64
1,13	1134	1100	-3,07	103,07
1,13	1146	1100	-4,14	104,14
1,13	1153	1100	-4,85	104,85
1,15	1157	1100	-5,21	105,21
1,18	1157	1100	-5,21	105,21

1,21	1157	1100	-5,21	105,21
1,24	1157	1100	-5,22	105,22
1,26	1157	1100	-5,22	105,22
1,29	1154	1100	-4,86	104,86
1,31	1154	1100	-4,87	104,87
1,33	1154	1100	-4,87	104,87
1,35	1150	1100	-4,51	104,51
1,37	1150	1100	-4,51	104,51
1,38	1146	1100	-4,16	104,16
1,41	1146	1100	-4,16	104,16
1,42	1138	1100	-3,45	103,45
1,47	1146	1100	-4,16	104,16
1,53	1146	1100	-4,17	104,17
1,57	1138	1100	-3,46	103,46
1,61	1146	1100	-4,17	104,17
1,64	1134	1100	-3,11	103,11
1,67	1134	1100	-3,11	103,11
1,70	1130	1100	-2,75	102,75
1,73	1130	1100	-2,76	102,76
1,77	1130	1100	-2,76	102,76
1,80	1130	1100	-2,76	102,76
1,83	1130	1100	-2,76	102,76
1,85	1130	1100	-2,77	102,77
1,87	1138	1100	-3,48	103,48
1,88	1138	1100	-3,48	103,48
1,91	1138	1100	-3,48	103,48
1,94	1138	1100	-3,48	103,48
1,97	1138	1100	-3,49	103,49
2,00	1138	1100	-3,49	103,49
2,02	1138	1100	-3,49	103,49
2,03	1138	1100	-3,49	103,49
2,05	1138	1100	-3,49	103,49
2,06	1131	1100	-2,78	102,78
2,08	1131	1100	-2,78	102,78
2,11	1131	1100	-2,78	102,78
2,14	1131	1100	-2,79	102,79
2,17	1131	1100	-2,79	102,79
2,19	1131	1100	-2,79	102,79
2,21	1131	1100	-2,79	102,79
2,23	1127	1100	-2,44	102,44

2,25	1127	1100	-2,44	102,44
2,28	1119	1100	-1,73	101,73
2,30	1119	1100	-1,73	101,73
2,33	1119	1100	-1,73	101,73
2,36	1119	1100	-1,73	101,73
2,39	1119	1100	-1,73	101,73
2,42	1119	1100	-1,74	101,74
2,45	1119	1100	-1,74	101,74
2,47	1119	1100	-1,74	101,74
2,50	1119	1100	-1,74	101,74
2,53	1119	1100	-1,74	101,74
2,56	1119	1100	-1,75	101,75
2,58	1119	1100	-1,75	101,75
2,60	1127	1100	-2,46	102,46
2,63	1127	1100	-2,46	102,46
2,65	1131	1100	-2,82	102,82
2,67	1131	1100	-2,82	102,82
2,70	1127	1100	-2,47	102,47
2,73	1127	1100	-2,47	102,47
2,75	1119	1100	-1,76	101,76
2,79	1119	1100	-1,76	101,76
2,83	1119	1100	-1,77	101,77
2,86	1119	1100	-1,77	101,77
2,90	1119	1100	-1,77	101,77
2,93	1120	1100	-1,77	101,77
2,96	1120	1100	-1,78	101,78
2,99	1120	1100	-1,78	101,78
3,03	1120	1100	-1,78	101,78
3,05	1120	1100	-1,78	101,78
3,09	1120	1100	-1,78	101,78
3,13	1120	1100	-1,79	101,79
3,17	1120	1100	-1,79	101,79
3,19	1120	1100	-1,79	101,79
3,21	1116	1100	-1,44	101,44
3,25	1116	1100	-1,44	101,44
3,28	1120	1100	-1,80	101,80
3,31	1120	1100	-1,80	101,80
3,34	1116	1100	-1,45	101,45
3,37	1116	1100	-1,45	101,45
3,39	1120	1100	-1,81	101,81

3,43	1120	1100	-1,81	101,81
3,47	1120	1100	-1,81	101,81
3,50	1120	1100	-1,81	101,81
3,54	1120	1100	-1,82	101,82
3,56	1120	1100	-1,82	101,82
3,58	1120	1100	-1,82	101,82
3,61	1112	1100	-1,11	101,11
3,63	1112	1100	-1,11	101,11
3,66	1112	1100	-1,11	101,11
3,70	1112	1100	-1,11	101,11
3,74	1112	1100	-1,12	101,12
3,76	1112	1100	-1,12	101,12
3,77	1120	1100	-1,83	101,83
3,80	1120	1100	-1,84	101,84
3,83	1116	1100	-1,48	101,48
3,85	1116	1100	-1,48	101,48
3,88	1116	1100	-1,48	101,48
3,91	1116	1100	-1,49	101,49
3,94	1120	1100	-1,84	101,84
3,98	1120	1100	-1,85	101,85
4,01	1120	1100	-1,85	101,85
4,05	1120	1100	-1,85	101,85
4,07	1120	1100	-1,85	101,85
4,10	1120	1100	-1,86	101,86
4,14	1120	1100	-1,86	101,86
4,17	1120	1100	-1,86	101,86

4,21	1121	1100	-1,86	101,86
4,23	1121	1100	-1,87	101,87
4,26	1117	1100	-1,51	101,51
4,29	1117	1100	-1,51	101,51
4,33	1121	1100	-1,87	101,87
4,36	1121	1100	-1,87	101,87
4,40	1117	1100	-1,52	101,52
4,43	1117	1100	-1,52	101,52
4,46	1117	1100	-1,53	101,53
4,49	1121	1100	-1,88	101,88
4,52	1121	1100	-1,89	101,89
4,55	1121	1100	-1,89	101,89
4,59	1121	1100	-1,89	101,89
4,63	1121	1100	-1,89	101,89
4,66	1121	1100	-1,90	101,90
4,68	1121	1100	-1,90	101,90
4,72	1117	1100	-1,54	101,54
4,74	1117	1100	-1,55	101,55
4,77	1113	1100	-1,19	101,19
4,81	1113	1100	-1,19	101,19
4,83	1113	1100	-1,20	101,20
4,86	1113	1100	-1,20	101,20
4,90	1113	1100	-1,20	101,20
4,92	1113	1100	-1,20	101,20
4,96	1113	1100	-1,20	101,20
5,00	1113	1100	-1,21	101,21

Anexo I. Datos digitalizados en base a las gráficas de respuesta transitoria del control de fuerza PI utilizando la tarjeta DAQ NI 6212 con entrada rampa.

t[s]	F [lb]	F_t [lb]	% Error
0,00	0	0	NA
0,01	0	3	100,00
0,04	4	8	51,32
0,07	8	13	41,58
0,09	8	18	56,19
0,12	16	23	32,59
0,13	16	27	41,58
0,16	20	32	39,15
0,18	20	36	45,23
0,19	23	38	38,86
0,21	27	42	34,74
0,23	35	46	22,68
0,24	39	47	17,33
0,25	43	51	15,45
0,27	47	54	12,37
0,31	47	62	23,80
0,33	51	65	21,97
0,35	51	71	27,90
0,39	51	79	35,27
0,44	51	88	41,88
0,51	51	103	50,47
0,54	51	107	52,53
0,57	51	114	55,50
0,65	51	129	60,72
0,70	51	139	63,49
0,75	51	150	66,10
0,80	51	161	68,36
0,85	51	171	70,18
0,88	51	177	71,23
0,90	51	180	71,80
0,92	59	183	67,94
0,93	59	187	68,55
0,95	59	190	69,14
0,96	63	193	67,55
0,97	63	195	67,84

0,99	63	197	68,28
1,00	67	201	66,90
1,02	67	204	67,33
1,03	70	206	65,86
1,05	70	210	66,44
1,06	78	212	63,03
1,07	78	214	63,49
1,09	78	219	64,23
1,10	78	221	64,52
1,12	82	223	63,20
1,13	82	227	63,78
1,16	82	231	64,47
1,16	86	232	62,93
1,17	94	234	59,86
1,18	98	236	58,51
1,19	106	238	55,53
1,21	125	242	48,26
1,23	133	246	45,83
1,24	145	248	41,69
1,25	145	251	42,31
1,26	149	253	41,17
1,28	149	256	41,99
1,30	153	260	41,28
1,32	156	263	40,59
1,34	156	269	41,78
1,37	156	273	42,73
1,40	156	279	44,01
1,42	156	284	44,89
1,44	156	288	45,74
1,47	160	294	45,40
1,50	160	301	46,69
1,52	168	304	44,59
1,54	188	307	38,86
1,57	215	313	31,35
1,59	239	318	24,93
1,62	246	324	23,96
1,65	254	329	22,82

1,67	254	333	23,65
1,69	258	338	23,70
1,71	266	342	22,21
1,74	266	347	23,41
1,76	266	352	24,38
1,78	266	355	25,14
1,81	266	362	26,44
1,86	266	371	28,38
1,92	266	383	30,55
1,97	266	395	32,59
2,01	270	402	32,82
2,04	278	408	31,93
2,05	293	410	28,41
2,06	317	413	23,18
2,08	336	415	18,97
2,08	348	417	16,50
2,09	364	419	13,12
2,11	387	421	8,10
2,12	403	423	4,79
2,13	415	426	2,64
2,15	422	429	1,62
2,16	426	432	1,33
2,18	434	437	0,54
2,20	442	440	-0,43
2,22	446	444	-0,50
2,26	446	452	1,29
2,28	446	455	2,06
2,32	446	463	3,76
2,34	446	469	4,86
2,38	446	476	6,29
2,42	450	483	6,86
2,45	442	490	9,82
2,48	442	496	10,95
2,50	446	501	10,97
2,53	446	505	11,75
2,55	450	510	11,76
2,58	454	515	11,92
2,61	454	521	12,97
2,64	454	528	14,00
2,67	454	534	15,01

2,72	454	544	16,54
2,77	454	554	18,16
2,80	458	560	18,24
2,83	458	565	19,02
2,83	466	567	17,89
2,84	485	569	14,71
2,86	505	571	11,69
2,88	528	575	8,15
2,88	548	577	5,05
2,90	563	579	2,79
2,91	583	581	-0,28
2,92	599	585	-2,34
2,96	614	592	-3,75
2,98	618	596	-3,63
3,00	626	601	-4,16
3,03	630	606	-3,89
3,07	630	613	-2,68
3,10	630	620	-1,64
3,13	630	625	-0,77
3,17	630	633	0,51
3,21	630	641	1,75
3,25	626	649	3,57
3,28	626	655	4,49
3,30	626	661	5,27
3,34	626	668	6,28
3,37	626	674	7,15
3,41	626	682	8,24
3,45	622	689	9,76
3,47	626	695	9,89
3,50	626	701	10,70
3,52	630	704	10,59
3,54	638	709	10,05
3,56	645	712	9,29
3,58	657	715	8,11
3,59	665	718	7,36
3,61	677	721	6,19
3,62	685	724	5,46
3,65	685	729	6,15
3,68	689	736	6,42
3,71	689	741	7,09

3,72	689	745	7,54
3,75	689	749	8,09
3,77	692	754	8,11
3,79	692	758	8,66
3,81	692	762	9,08
3,82	700	763	8,27
3,83	708	766	7,57
3,84	716	769	6,88
3,86	720	771	6,69
3,87	728	774	6,00
3,88	735	776	5,21
3,89	739	779	5,04
3,92	739	783	5,58
3,94	739	788	6,11
3,96	739	792	6,64
3,97	739	794	6,85
3,99	739	797	7,27
4,00	743	800	7,09
4,01	743	803	7,40
4,03	747	806	7,33
4,04	747	809	7,63
4,06	755	812	6,97
4,07	755	814	7,28
4,08	759	816	7,00
4,09	763	818	6,73
4,11	767	821	6,66
4,12	775	824	6,01

4,13	775	826	6,21
4,14	778	828	5,94
4,16	782	832	5,98
4,17	782	835	6,28
4,21	782	841	6,98
4,23	782	846	7,57
4,25	782	851	8,05
4,28	782	855	8,53
4,31	786	862	8,74
4,33	786	865	9,12
4,34	794	868	8,50
4,35	798	870	8,23
4,36	806	872	7,62
4,38	818	875	6,56
4,39	829	878	5,51
4,40	837	879	4,81
4,41	845	882	4,21
4,43	857	886	3,27
4,45	865	890	2,88
4,47	872	894	2,39
4,48	876	896	2,25
4,50	876	899	2,54
4,50	884	901	1,86
4,53	884	906	2,44
4,55	884	911	2,92
4,58	884	915	3,40
4,60	884	920	3,86

NOTA: El valor resaltado en amarillo corresponde al error porcentual máximo presentado.

Anexo J. Datos digitalizados en base a las gráficas de respuesta transitoria del control de fuerza PI con adelanto de señal (feedforward) utilizando la tarjeta DAQ NI 6212 con entrada rampa.

t [s]	F [lb]	F_t [lb]	% Error
0,00	178	178	0,00
0,01	178	180	0,96
0,02	178	181	1,90
0,02	182	182	0,29
0,03	182	185	1,69
0,05	182	187	3,05
0,06	182	191	4,80
0,08	182	193	6,08
0,10	182	198	8,13
0,12	182	202	10,09
0,14	182	206	11,97
0,16	182	211	13,77
0,19	182	216	15,84
0,21	182	220	17,49
0,23	182	224	18,77
0,24	185	225	17,71
0,25	185	228	18,65
0,26	193	230	15,96
0,27	193	231	16,59
0,28	197	233	15,58
0,29	197	236	16,51
0,29	200	236	15,22
0,30	200	238	15,83
0,31	200	240	16,43
0,31	204	241	15,16
0,32	208	242	14,21
0,33	208	243	14,51
0,34	212	245	13,57
0,35	216	247	12,64
0,36	219	249	12,03
0,37	223	251	11,13
0,38	227	253	10,24
0,38	231	255	9,36

0,40	235	257	8,80
0,41	238	259	7,95
0,42	242	262	7,72
0,44	242	265	8,62
0,45	242	268	9,80
0,47	246	271	9,26
0,48	246	274	10,40
0,50	246	277	11,24
0,52	246	282	12,87
0,54	246	286	14,18
0,55	250	288	13,38
0,57	250	292	14,41
0,59	250	295	15,41
0,60	250	298	16,14
0,61	253	299	15,36
0,61	257	300	14,35
0,62	261	301	13,34
0,63	269	305	11,84
0,64	276	305	9,61
0,65	280	308	9,14
0,66	284	310	8,43
0,67	291	312	6,50
0,68	295	313	5,81
0,68	299	314	4,87
0,69	303	317	4,45
0,70	303	318	4,97
0,71	310	320	3,12
0,72	310	323	3,89
0,73	314	324	3,24
0,75	314	327	4,00
0,75	318	329	3,36
0,77	318	332	4,36
0,79	322	335	3,97
0,81	322	339	5,19

0,82	325	343	5,04
0,85	325	347	6,22
0,87	325	351	7,38
0,89	325	356	8,50
0,91	325	359	9,38
0,92	325	362	10,03
0,93	329	364	9,63
0,95	329	368	10,48
0,97	329	371	11,31
0,98	333	374	10,91
0,99	337	376	10,52
1,00	340	378	9,93
1,01	348	381	8,55
1,03	356	383	7,20
1,04	359	386	6,84
1,05	363	387	6,28
1,06	367	390	5,93
1,07	371	392	5,38
1,09	371	395	6,20
1,10	371	399	7,02
1,13	374	403	7,07
1,14	374	406	7,86
1,16	378	409	7,52
1,18	382	413	7,57
1,19	382	416	8,15
1,20	386	419	7,81
1,21	386	419	8,00
1,23	390	423	7,86
1,24	390	425	8,42
1,25	393	427	7,90
1,26	397	429	7,39
1,27	405	431	6,19
1,28	409	433	5,69
1,29	416	435	4,33
1,29	424	437	2,97
1,30	431	438	1,63
1,32	439	441	0,49
1,32	446	443	-0,83
1,34	454	445	-1,94
1,35	461	447	-3,24

1,36	461	450	-2,65
1,37	465	452	-2,90
1,38	469	455	-3,14
1,39	469	456	-2,75
1,41	473	459	-3,00
1,42	473	462	-2,42
1,43	477	464	-2,66
1,45	480	468	-2,71
1,46	480	470	-2,15
1,48	480	473	-1,59
1,49	484	476	-1,65
1,51	484	481	-0,74
1,54	484	485	0,16
1,55	484	488	0,87
1,57	484	492	1,56
1,59	480	496	3,18
1,61	480	500	4,01
1,64	480	505	4,83
1,66	477	510	6,54
1,67	480	513	6,28
1,69	484	516	6,17
1,71	484	519	6,79
1,72	484	522	7,26
1,74	492	525	6,43
1,75	499	527	5,30
1,76	511	530	3,62
1,77	522	532	1,95
1,79	537	536	-0,24
1,80	548	538	-1,86
1,81	560	540	-3,64
1,82	567	543	-4,54
1,84	567	545	-4,04
1,86	571	550	-3,91
1,88	575	554	-3,79
1,90	575	557	-3,14
1,92	575	561	-2,51
1,93	575	564	-1,88
1,95	579	568	-1,93
1,97	575	571	-0,65
1,99	579	576	-0,55

2,01	579	579	0,05
2,03	579	584	0,93
2,05	579	588	1,51
2,07	583	591	1,45
2,09	583	596	2,30
2,11	583	601	3,01
2,14	583	606	3,83
2,17	583	612	4,78
2,19	583	616	5,45
2,22	586	621	5,63
2,23	586	624	6,02
2,26	586	630	6,92
2,28	586	633	7,43
2,30	590	638	7,46
2,30	598	639	6,40
2,31	609	640	4,88
2,32	620	641	3,24
2,32	628	642	2,19
2,33	639	644	0,69
2,33	651	645	-0,94
2,34	662	645	-2,56
2,35	673	647	-4,04
2,36	685	649	-5,51
2,36	696	650	-7,12
2,37	711	651	-9,16
2,37	722	652	-10,75
2,39	730	655	-11,47
2,40	734	658	-11,61
2,42	738	661	-11,59
2,43	741	664	-11,73
2,45	745	667	-11,72
2,46	745	670	-11,29
2,47	753	672	-11,98
2,48	753	675	-11,55
2,50	753	678	-10,99
2,52	753	682	-10,42
2,53	757	683	-10,70
2,55	757	687	-10,14
2,56	757	690	-9,59
2,58	757	695	-8,91

2,60	757	698	-8,37
2,62	753	702	-7,30
2,64	753	707	-6,51
2,67	753	711	-5,87
2,69	757	715	-5,76
2,70	753	719	-4,72
2,73	749	724	-3,45
2,75	749	728	-2,84
2,77	749	733	-2,23
2,80	749	738	-1,52
2,83	749	743	-0,81
2,85	749	747	-0,23
2,88	749	753	0,58
2,89	749	757	1,03
2,92	753	761	1,09
2,94	753	765	1,65
2,97	753	771	2,42
2,99	753	777	3,07
3,02	753	783	3,82
3,04	753	786	4,24
3,06	753	790	4,76
3,09	753	796	5,49
3,11	757	799	5,32
3,13	757	803	5,83
3,14	757	807	6,23
3,16	764	809	5,60
3,16	772	810	4,76
3,17	779	812	4,03
3,18	787	814	3,31
3,19	798	815	2,12
3,19	809	816	0,83
3,20	817	818	0,12
3,21	828	820	-1,06
3,22	836	821	-1,76
3,23	843	823	-2,47
3,24	855	825	-3,63
3,25	859	828	-3,66
3,27	859	833	-3,12
3,29	862	836	-3,15
3,32	862	842	-2,41

3,34	866	846	-2,33
3,37	866	852	-1,61
3,40	866	859	-0,89
3,43	866	865	-0,19
3,46	866	871	0,51
3,49	862	875	1,43
3,51	859	879	2,34
3,53	859	884	2,82
3,55	859	888	3,29
3,58	859	894	3,95
3,60	859	897	4,32
3,62	859	901	4,68
3,62	862	903	4,45
3,64	870	905	3,88
3,65	874	909	3,83
3,67	881	911	3,28
3,68	889	914	2,72
3,69	893	916	2,58
3,71	896	919	2,45
3,71	896	921	2,63
3,74	900	925	2,67
3,75	904	928	2,63
3,77	908	933	2,67
3,80	908	938	3,21
3,83	908	944	3,83
3,86	908	949	4,35
3,88	908	954	4,87
3,90	908	959	5,30
3,92	912	961	5,16
3,94	912	966	5,59
3,96	915	970	5,62
3,98	919	973	5,56
3,99	930	976	4,65

4,00	938	978	4,13
4,01	949	980	3,14
4,03	957	984	2,71
4,04	968	985	1,73
4,06	980	989	0,93
4,06	987	991	0,33
4,08	995	993	-0,17
4,09	995	997	0,18
4,11	995	1000	0,52
4,15	999	1000	0,14
4,19	999	1000	0,14
4,22	999	1000	0,14
4,25	1006	1000	-0,61
4,28	1006	1000	-0,61
4,32	1006	1000	-0,61
4,36	1006	1000	-0,61
4,39	999	1000	0,14
4,42	999	1000	0,14
4,45	995	1000	0,52
4,50	995	1000	0,52
4,53	995	1000	0,52
4,56	995	1000	0,52
4,59	1002	1000	-0,24
4,62	1002	1000	-0,24
4,64	1006	1000	-0,61
4,68	1002	1000	-0,24
4,71	1006	1000	-0,61
4,75	1006	1000	-0,61
4,79	999	1000	0,14
4,85	999	1000	0,14
4,89	999	1000	0,14
4,92	999	1000	0,14

NOTA: El valor resaltado en amarillo corresponde al error porcentual máximo presentado.



INA125

INSTRUMENTATION AMPLIFIER With Precision Voltage Reference

FEATURES

- LOW QUIESCENT CURRENT: 460µA
- PRECISION VOLTAGE REFERENCE: 1.24V, 2.5V, 5V or 10V
- SLEEP MODE
- LOW OFFSET VOLTAGE: 250µV max
- LOW OFFSET DRIFT: 2µV/°C max
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 20nA max
- HIGH CMR: 100dB min
- LOW NOISE: 38nV/√Hz at f = 1kHz
- INPUT PROTECTION TO ±40V
- WIDE SUPPLY RANGE
Single Supply: 2.7V to 36V
Dual Supply: ±1.35V to ±18V
- 16-PIN DIP AND SO-16 SOIC PACKAGES

DESCRIPTION

The INA125 is a low power, high accuracy instrumentation amplifier with a precision voltage reference. It provides complete bridge excitation and precision differential-input amplification on a single integrated circuit.

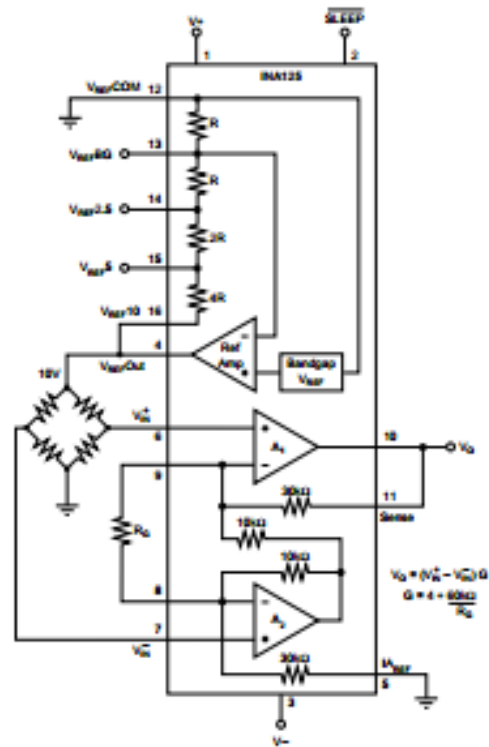
A single external resistor sets any gain from 4 to 10,000. The INA125 is laser-trimmed for low offset voltage (250µV), low offset drift (2µV/°C), and high common-mode rejection (100dB at G = 100). It operates on single (+2.7V to +36V) or dual (±1.35V to ±18V) supplies.

The voltage reference is externally adjustable with pin-selectable voltages of 2.5V, 5V, or 10V, allowing use with a variety of transducers. The reference voltage is accurate to ±0.5% (max) with ±35ppm/°C drift (max). Sleep mode allows shutdown and duty cycle operation to save power.

The INA125 is available in 16-pin plastic DIP and SO-16 surface-mount packages and is specified for the -40°C to +85°C industrial temperature range.

APPLICATIONS

- PRESSURE AND TEMPERATURE BRIDGE AMPLIFIERS
- INDUSTRIAL PROCESS CONTROL
- FACTORY AUTOMATION
- MULTI-CHANNEL DATA ACQUISITION
- BATTERY OPERATED SYSTEMS
- GENERAL PURPOSE INSTRUMENTATION



International Airport Industrial Park • Building Address: PO Box 11460, Tucson, AZ 85711 • Street Address: 4720 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85710 • Tel: (520) 746-1111 • Fax: (520) 746-1111
 Internet: <http://www.burr-brown.com> • FAX/Int: (800) 544-4133 (US/Canada Only) • Cable: BURROPP • Telex: 980-6631 • FAX: (520) 889-1510 • Immediate Product Info: (800) 544-4133

LM78XX LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

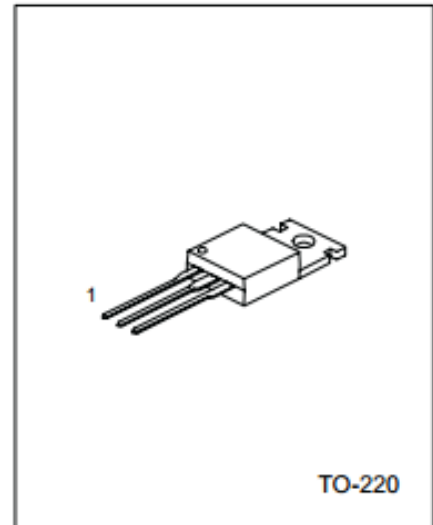
3-TERMINAL 1A POSITIVE VOLTAGE REGULATOR

DESCRIPTION

The Contek 78XX family is monolithic fixed voltage regulator integrated circuit. They are suitable for applications that required supply current up to 1 A.

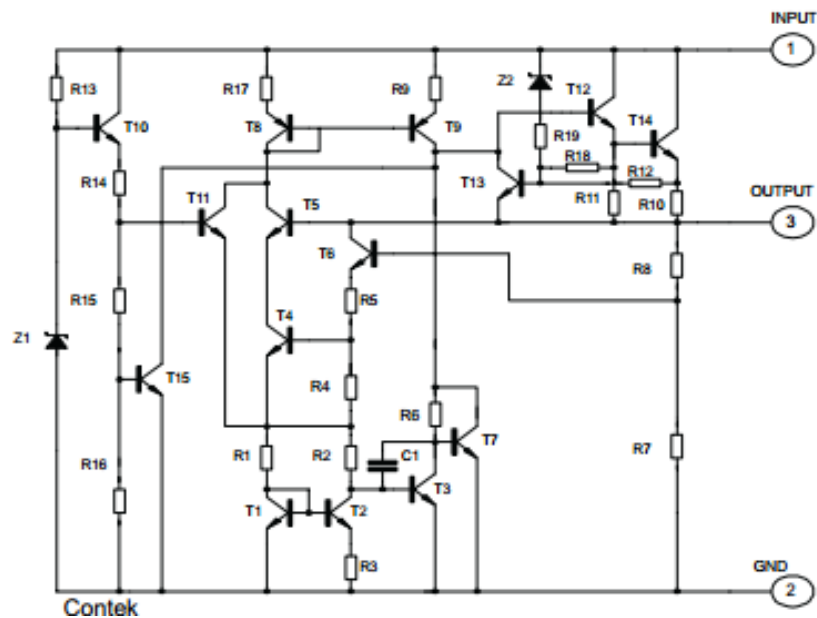
FEATURES

- *Output current up to 1.5 A
- *Fixed output voltage of 5V, 6V, 8V, 9V, 10V, 12V, 15V, 18V and 24V available
- *Thermal overload shutdown protection
- *Short circuit current limiting
- *Output transistor SOA protection



1:Input 2:GND 3:Output

TEST CIRCUIT



LM78XX LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

(Operating temperature range applies unless otherwise specified)

PARAMETER	SYMBOL	RATING		UNIT
Input voltage(for Vo=5~18V) (for Vo=24V)	V _I	35		V
		40		V
Output Current	I _o	1		A
Power Dissipation	PD	Internally	Limited	W
Operating Junction Temperature Range	TOPR	-20	+150	C
Storage Temperature Range	TSTG	-55	+150	C

Contek LM7812 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

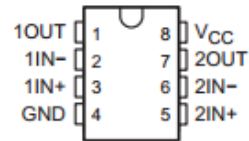
(V_I=19V, I_o=0.5A, T_j= 0 C - 125 C, C₁=0.33uF, C_o=0.1uF, unless otherwise specified)(Note 1)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
Output Voltage	V _o	T _j =25 C, I _o =5mA - 1.0A	11.5	12.0	12.5	V
		V _I =14.5V to 27V, I _o =5mA - 1.0A,PD<15W	11.4		12.6	V
Load Regulation	ΔV _o	T _j =25 C, I _o =5mA - 1.5A			120	mV
		T _j =25 C, I _o =0.25A - 0.75A			60	mV
Line regulation	ΔV _o	V _I =14.5V to 30V, T _j =25 C			120	mV
		V _I =14.6V to 27V, T _j =25 C, I _o =1A			120	mV
Quiescent Current	I _q	T _j =25 C, I _o <1A			8.0	mA
Quiescent Current Change	ΔI _q	V _I =14.5V to 30V			1.0	mA
	ΔI _q	I _o =5mA - 1.0A			0.5	mA
Output Noise Voltage	V _N	10Hz<=f<=100kHz		75		μV
Temperature coefficient of V _o	ΔV _o /ΔT	I _o =5mA		-1.5		mV/ C
Ripple Rejection	RR	V _I =15V - 25V, f=120Hz, T _j =25 C	55	72		dB
Peak Output Current	I _{PK}	T _j =25 C		1.8		A
Short-Circuit Current	I _{sc}	V _I =35V, T _j =25 C		250		mA
Dropout Voltage	V _d	T _j =25 C		2.0		V

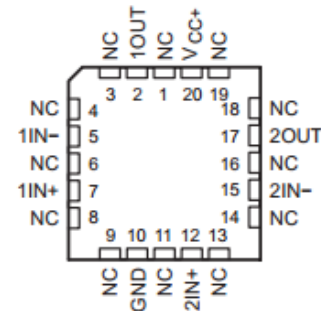
**LM158, LM158A, LM258, LM258A
LM358, LM358A, LM2904, LM2904V
DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS**
SLOS068P – JUNE 1976 – REVISED SEPTEMBER 2004

- **Wide Supply Range:**
 - Single Supply . . . 3 V to 32 V (26 V for LM2904)
 - or Dual Supplies . . . ± 1.5 V to ± 16 V (± 13 V for LM2904)
- **Low Supply-Current Drain, Independent of Supply Voltage . . . 0.7 mA Typ**
- **Common-Mode Input Voltage Range Includes Ground, Allowing Direct Sensing Near Ground**
- **Low Input Bias and Offset Parameters:**
 - Input Offset Voltage . . . 3 mV Typ
A Versions . . . 2 mV Typ
 - Input Offset Current . . . 2 nA Typ
 - Input Bias Current . . . 20 nA Typ
A Versions . . . 15 nA Typ
- **Differential Input Voltage Range Equal to Maximum-Rated Supply Voltage . . . 32 V (26 V for LM2904)**
- **Open-Loop Differential Voltage Amplification . . . 100 V/mV Typ**
- **Internal Frequency Compensation**

LM158, LM158A . . . JG PACKAGE
LM258, LM258A . . . D, DGK, OR P PACKAGE
LM358 . . . D, DGK, P, PS, OR PW PACKAGE
LM358A . . . D, DGK, P, OR PW PACKAGE
LM2904 . . . D, DGK, P, PS, OR PW PACKAGE
(TOP VIEW)



LM158, LM158A . . . FK PACKAGE
(TOP VIEW)



NC – No internal connection

description/ordering information

These devices consist of two independent, high-gain, frequency-compensated operational amplifiers designed to operate from a single supply over a wide range of voltages. Operation from split supplies also is possible if the difference between the two supplies is 3 V to 32 V (3 V to 26 V for the LM2904), and V_{CC} is at least 1.5 V more positive than the input common-mode voltage. The low supply-current drain is independent of the magnitude of the supply voltage.

Applications include transducer amplifiers, dc amplification blocks, and all the conventional operational amplifier circuits that now can be implemented more easily in single-supply-voltage systems. For example, these devices can be operated directly from the standard 5-V supply used in digital systems and easily can provide the required interface electronics without additional ± 5 -V supplies.

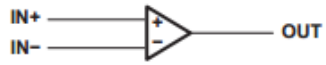
ORDERING INFORMATION

T_A	V_{IOmax} AT 25°C	MAX TESTED V_{CC}	PACKAGE†		ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING
0°C to 70°C	7 mV	30 V	PDIP (P)	Tube of 50	LM358P	LM358P
			SOIC (D)	Tube of 75	LM358D	LM358
				Reel of 2500	LM358DR	
			SOP (PS)	Reel of 2000	LM358PSR	L358
			TSSOP (PW)	Tube of 150	LM358PW	L358
	Reel of 2000	LM358PWR				
	MSOP/VSSOP (DGK)	Reel of 2500	LM358DGKR	M5 ‡		
	3 mV	30 V	PDIP (P)	Tube of 50	LM358AP	LM358AP
			SOIC (D)	Tube of 75	LM358AD	LM358A
				Reel of 2500	LM358ADR	
TSSOP (PW)			Tube of 150	LM358APW	L358A	
			Reel of 2000	LM358APWR		
MSOP/VSSOP (DGK)	Reel of 2500	LM358ADGKR	M6 ‡			
-25°C to 85°C	5 mV	30 V	PDIP (P)	Tube of 50	LM258P	LM258P
			SOIC (D)	Tube of 75	LM258D	LM258
				Reel of 2500	LM258DR	
	MSOP/VSSOP (DGK)	Reel of 2500	LM258DGKR	M2 ‡		
	3 mV	30 V	PDIP (P)	Tube of 50	LM258AP	LM258AP
			SOIC (D)	Tube of 75	LM258AD	LM258A
Reel of 2500				LM258ADR		
MSOP/VSSOP (DGK)	Reel of 2500	LM258ADGKR	M3 ‡			
-40°C to 125°C	7 mV	26 V	PDIP (P)	Tube of 50	LM2904P	LM2904P
			SOIC (D)	Tube of 75	LM2904D	LM2904
				Reel of 2500	LM2904DR	
			SOP (PS)	Reel of 2000	LM2904PSR	L2904
			TSSOP (PW)	Tube of 150	LM2904PW	L2904
	Reel of 2000	LM2904PWR				
	MSOP/VSSOP (DGK)	Reel of 2500	LM2904DGKR	MB ‡		
	7 mV	32 V	SOIC (D)	Reel of 2500	LM2904VQDR	L2904V
			TSSOP (PW)	Reel of 2000	LM2904VQPWR	L2904V
2 mV	32 V	SOIC (D)	Reel of 2500	LM2904AVQDR	L2904AV	
		TSSOP (PW)	Reel of 2000	LM2904AVQPWR	L2904AV	
-55°C to 125°C	5 mV	30 V	CDIP (JG)	Tube of 50	LM158JG	LM158JG
			LCCC (FK)	Tube of 55	LM158FK	LM158FK
	2 mV	30 V	CDIP (JG)	Tube of 50	LM158AJG	LM158AJG
			LCCC (FK)	Tube of 55	LM158AFK	LM158AFK

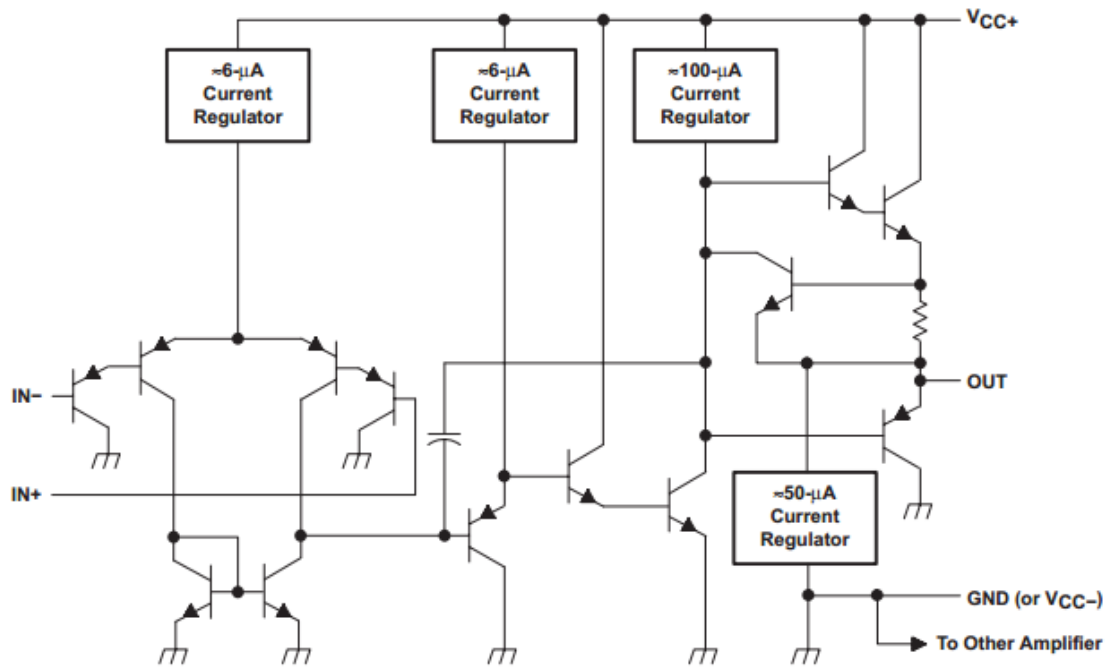
† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at www.ti.com/sc/package.

‡ The actual top-side marking has one additional character that designates the assembly/test site.

symbol (each amplifier)



schematic (each amplifier)



COMPONENT COUNT	
Epi-FET	1
Diodes	2
Resistors	7
Transistors	51
Capacitors	2

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†

		LM158, LM158A LM258, LM258A LM358, LM358A LM2904V	LM2904	UNIT
Supply voltage, V_{CC} (see Note 1)		±16 or 32	±13 or 26	V
Differential input voltage, V_{ID} (see Note 2)		±32	±26	V
Input voltage, V_I (either input)		-0.3 to 32	-0.3 to 26	V
Duration of output short circuit (one amplifier) to ground at (or below) 25°C free-air temperature ($V_{CC} \leq 15$ V) (see Note 3)		Unlimited	Unlimited	
Package thermal impedance, θ_{JA} (see Notes 4 and 5)	D package	97	97	°C/W
	DGK package	172	172	
	P package	85	85	
	PS package	95	95	
	PW package	149	149	
Package thermal impedance, θ_{JC} (see Notes 6 and 7)	FK package	5.61		°C/W
	JG package	14.5		
Operating free-air temperature range, T_A	LM158, LM158A	-55 to 125		°C
	LM258, LM258A	-25 to 85		
	LM358, LM358A	0 to 70		
	LM2904	-40 to 125	-40 to 125	
Operating virtual junction temperature, T_J		150	150	°C
Case temperature for 60 seconds	FK package	260		°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 60 seconds	JG package	300	300	°C
Storage temperature range, T_{stg}		-65 to 150	-65 to 150	°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

- NOTES:
1. All voltage values, except differential voltages and V_{CC} specified for measurement of I_{OS} , are with respect to the network ground terminal.
 2. Differential voltages are at $IN+$ with respect to $IN-$.
 3. Short circuits from outputs to V_{CC} can cause excessive heating and eventual destruction.
 4. Maximum power dissipation is a function of $T_J(max)$, θ_{JA} , and T_A . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is $P_D = (T_J(max) - T_A)/\theta_{JA}$. Operating at the absolute maximum T_J of 150°C can affect reliability.
 5. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.
 6. Maximum power dissipation is a function of $T_J(max)$, θ_{JC} , and T_C . The maximum allowable power dissipation at any allowable case temperature is $P_D = (T_J(max) - T_C)/\theta_{JC}$. Operating at the absolute maximum T_J of 150°C can affect reliability.
 7. The package thermal impedance is calculated in accordance with MIL-STD-883.

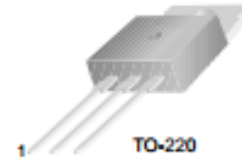
Anexo N. Datasheet TIP 41C



TIP41 Series(TIP41/41A/41B/41C)

Medium Power Linear Switching Applications

• Complement to TIP42/42A/42B/42C



1.Base 2.Collector 3.Emitter

NPN Epitaxial Silicon Transistor

Absolute Maximum Ratings $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CE0}	Collector-Emitter Voltage: TIP41	40	V
	: TIP41A	60	V
	: TIP41B	80	V
	: TIP41C	100	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage: TIP41	40	V
	: TIP41A	60	V
	: TIP41B	80	V
	: TIP41C	100	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	5	V
I_C	Collector Current (DC)	6	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	10	A
I_B	Base Current	2	A
P_C	Collector Dissipation ($T_C=25^\circ\text{C}$)	65	W
P_C	Collector Dissipation ($T_J=25^\circ\text{C}$)	2	W
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	- 65 - 150	$^\circ\text{C}$

Electrical Characteristics $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
$V_{CE0(sus)}$	* Collector-Emitter Sustaining Voltage	$I_C = 30\text{mA}, I_B = 0$	40	80	V
	: TIP41				
	: TIP41A				
	: TIP41B				
I_{CEO}	Collector Cut-off Current	$V_{CE} = 30\text{V}, I_B = 0$ $V_{CE} = 60\text{V}, I_B = 0$		0.7	mA
	: TIP41/41A : TIP41B/41C				
I_{CES}	Collector Cut-off Current	$V_{CE} = 40\text{V}, V_{EB} = 0$ $V_{CE} = 60\text{V}, V_{EB} = 0$ $V_{CE} = 80\text{V}, V_{EB} = 0$ $V_{CE} = 100\text{V}, V_{EB} = 0$		400	μA
	: TIP41				
	: TIP41A				
	: TIP41B				
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current	$V_{EB} = 5\text{V}, I_C = 0$		1	mA
	: TIP41				
h_{FE}	* DC Current Gain	$V_{CE} = 4\text{V}, I_C = 0.3\text{A}$ $V_{CE} = 4\text{V}, I_C = 3\text{A}$	30	75	
	: TIP41				
$V_{CE(sat)}$	* Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 6\text{A}, I_B = 600\text{mA}$		1.5	V
$V_{BE(sat)}$	* Base-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE} = 4\text{V}, I_C = 6\text{A}$		2.0	V
f_T	Current Gain Bandwidth Product	$V_{CE} = 10\text{V}, I_C = 500\text{mA}$	3.0		MHz

* Pulse Test: PW<300 μs , Duty Cycles<2%

Anexo O. Datasheet TIP 42C

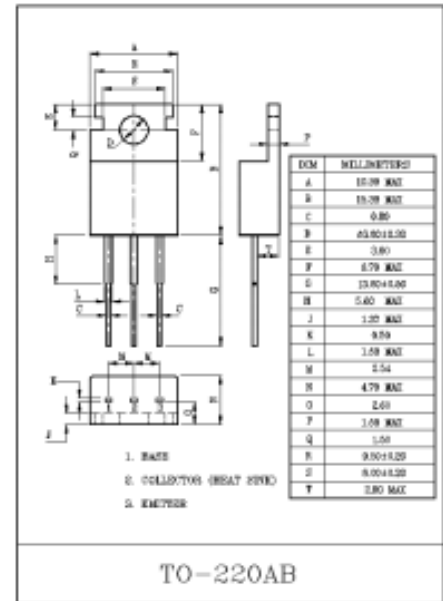
GENERAL PURPOSE APPLICATION.

FEATURES

- Complementary to TIP41C.

MAXIMUM RATINGS (Ta=25°C)

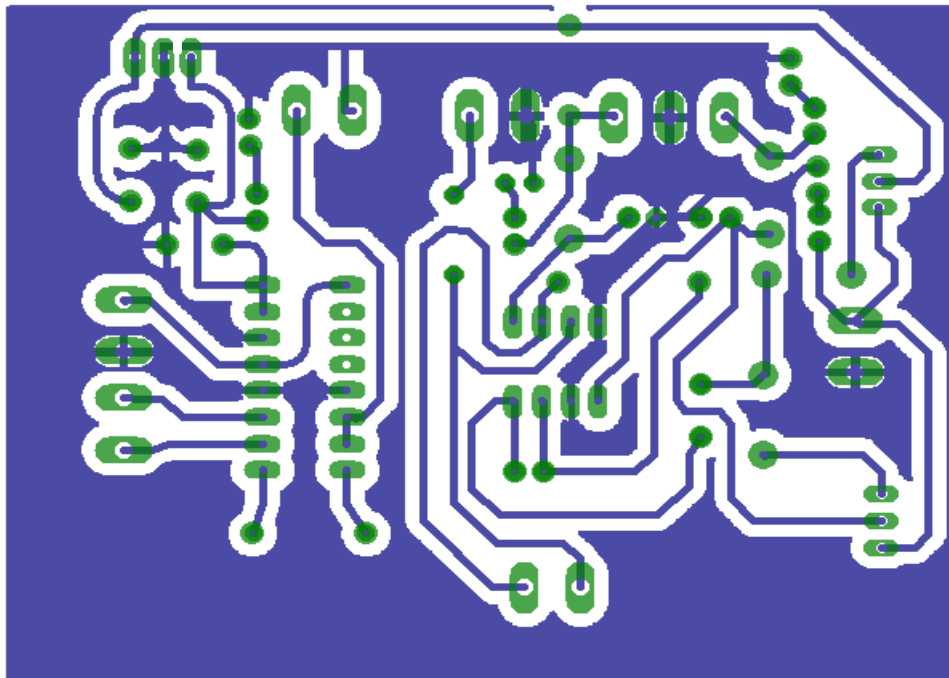
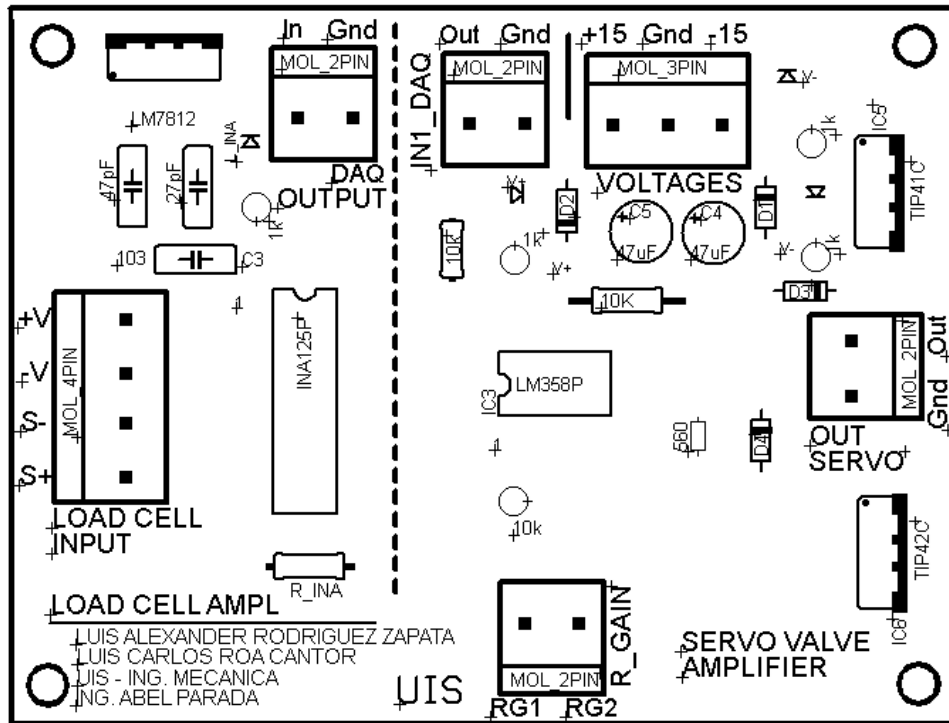
CHARACTERISTIC		SYMBOL	RATING	UNIT
Collector-Base Voltage		V_{CBO}	-100	V
Collector-Emitter Voltage		V_{CEO}	-100	V
Emitter-Base Voltage		V_{EBO}	-5	V
Collector Current	DC	I_C	-6	A
	Pulse	I_{CP}	-10	
Base Current		I_B	-2	A
Collector Power Dissipation	(Ta=25°C)	P_C	2	W
	(Tc=25°C)		65	
Junction Temperature		T_j	150	°C
Storage Temperature Range		T_{stg}	-55-150	°C



ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta=25°C)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	TEST CONDITION	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Collector-Emitter Sustaining Voltage	$V_{CE(sus)}$	$I_C = -30mA, I_B = 0$	-100	-	-	V
Collector Cut-off Current	I_{CBO}	$V_{CE} = -60V, I_B = 0$	-	-	-0.7	mA
Collector Cut-off Current	I_{CBS}	$V_{CE} = -100V, V_{EB} = 0$	-	-	-400	μA
Emitter Cut-off Current	I_{EBO}	$V_{EB} = -5V, I_C = 0$	-	-	-1	mA
DC Current Gain	h_{FE}	$V_{CE} = -4V, I_C = -0.3A$	30	-	-	
		$V_{CE} = -4V, I_C = -3A$	15	-	75	
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_C = -6A, I_B = -600mA$	-	-	-1.5	V
Base-Emitter On Voltage	$V_{BE(on)}$	$V_{CE} = -4V, I_C = -6A$	-	-	-2.0	V
Transition Frequency	f_T	$V_{CE} = -10V, I_C = -500mA$ $f = 1MHz$	3.0	-	-	MHz

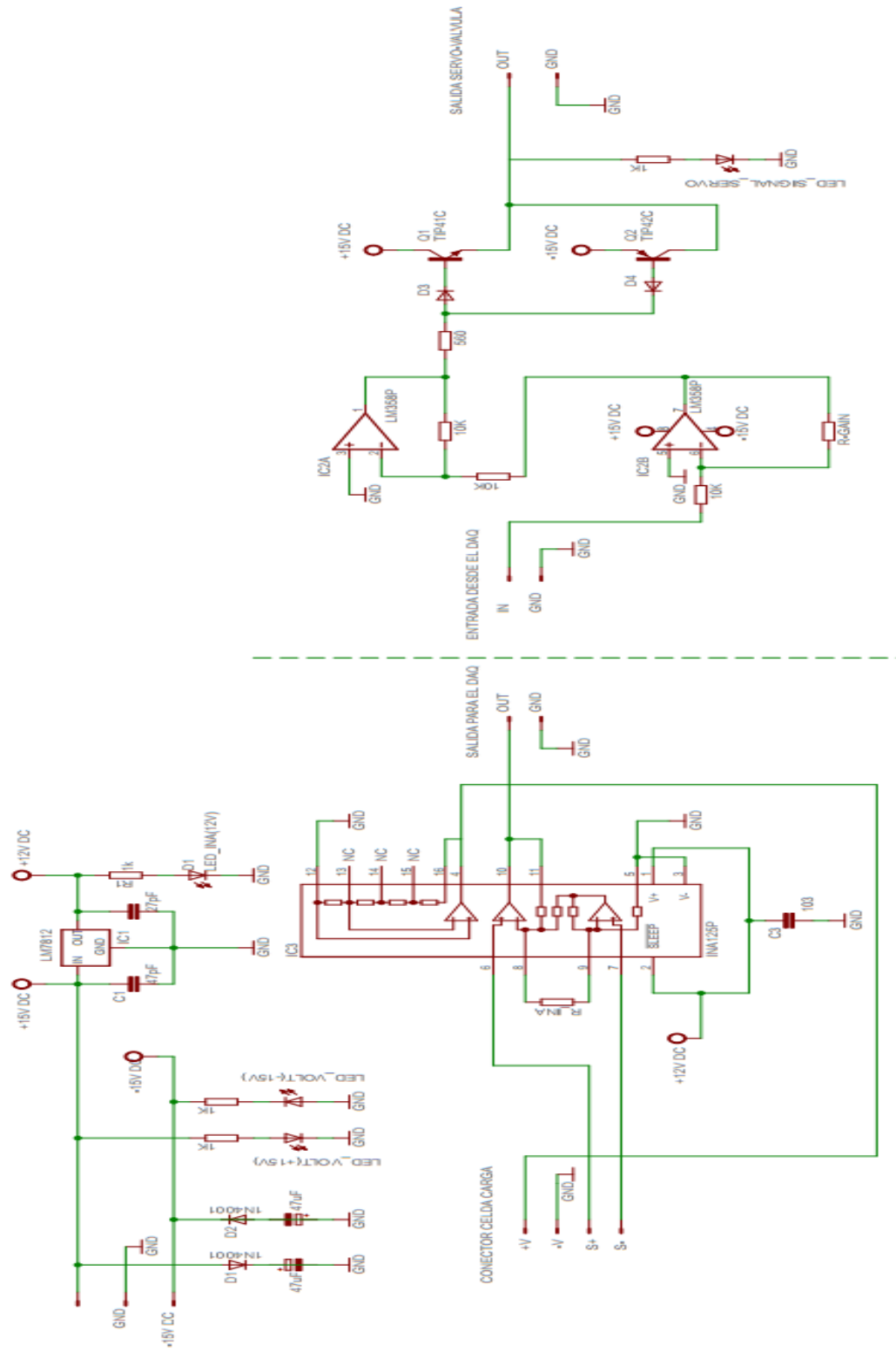
Anexo P. Diseño de las tarjetas de amplificación.



LISTADO DE PARTES TARJETA DE POTENCIA (86 mm X 65 mm)

PARTE	VALOR	DESCRIPCION	POSICION	(mm)	ORIENTACION
C1	47pF	C050-025X075	(27.586	75.298)	90 grados
C2	27pF	C050-025X075	(33.542	75.252)	90 grados
C3	103	C050-025X075	(33.326	68.65)	0 grados
C4	47uF	E2,5-6	(80.1	71.2)	0 grados
C5	47uF	E2,5-6	(73.5	71.3)	0 grados
D1	1N4001	D_7.5VER2	(84.9	73.4)	270 grados
D2	1N4001	D_7.5VER2	(66.9	73.1)	90 grados
D3	1N4001	D_7.5VER2	(88.4	65.8)	180 grados
D4	1N4001	D_7.5VER2	(84.4	52.3)	270 grados
D5	LED_ROJO	D-2.5	(38.2	79.4)	270 grados
D6	LED_ROJO	D-2.5	(62.4	74.6)	180 grados
D7	LED_ROJO	D-2.5	(86.8	85.3)	270 grados
D8	L12v	D-2.5	(89.3	74.8)	90 grados
IC1	LM7812	78XXS_V2	(30.464	86.628)	0 grados
IC2	INA125P	DIL16_VER2	(43.18	55.88)	270 grados
IC3	LM358P	DIL08_VER2	(65.768	57.414)	0 grados
IC5	TIP41C	78XXS	(97.28	74.748)	270 grados
IC6	TIP42C	78XXS	(97.496	42.122)	270 grados
IN1_DAQ	MOL_2PIN	1X2MTAV2	(60.006	81.026)	0 grados
INPUT	MOL_4PIN	1X4MTA	(26.924	53.904)	90 grados
OUT	MOL_2PIN	1X2MTAV2	(92.602	59.37)	270 grados
OUTPUT	MOL_2PIN	1X2MTAV2	(44.45	81.534)	0 grados
R1	10k	RS-2,5	(63.3	46.8)	0 grados
R2	10K	0207/12	(72.3	65)	0 grados
R3	10k	0204/7	(56.5	69.6)	270 grados
R4	560	R-5	(78.7	52.7)	90 grados
R5	1k	RS-2,5	(89.4	70.2)	90 grados
R6	1k	RS-2,5	(62.1	70)	90 grados
R7	1k	RS-2,5	(38.8	72.2)	270 grados
R8	1k	RS-2,5	(89	80.5)	90 grados
R_GAIN	MOL_2PIN	1X2MTAV2	(65.946	35.722)	180 grados
R_INA	0207/10	rcl	40.9)	R180	180 grados
VOLTAGES	MOL_3PIN	1X3MTAV2	(76.262	82.126)	0 grados

Anexo Q. Diseño de los circuitos de amplificación.



Anexo R. Referencias de la resistencia R_{INA} para el circuito amplificador de la señal de la celda de carga.

VOLTAJE ALIMENTACION INA 125 (V)	R_INA (Ω)	FUERZA MAXIMA (Lb)	VOLTAJE AMPLIFICADO CELDA CARGA (V)
12	51	1100	3,74
	42	1250	4,37
	40	1250	4,71
10	44	1100	4,15
	42	1250	4,19
	40	1200	4,64
5	96	1000	1,1
	88,9	1250	1,27
	77,6	1100	1,67
	70,4	1000	2,74
	68,4	1100	1,74
	51	1100	2,37
	44	1100	2,81
	42	1100	2,81
	34	1100	3,53
	25	1100	3,7
	17	500	4,13
	8,5	FALLA	FALLA

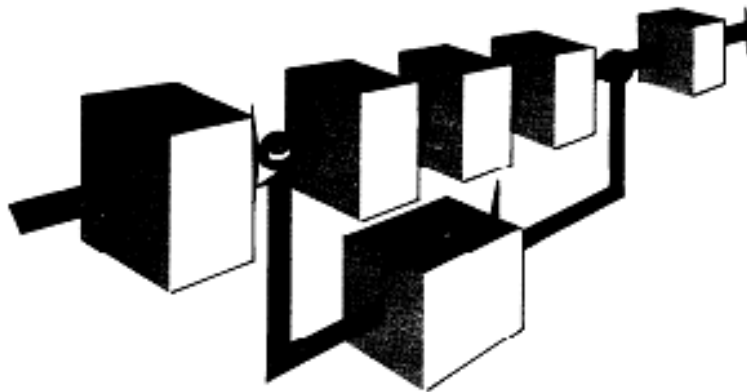
NOTA: Se recomienda usar los valores de resistencias resaltados en amarillo para la amplificación de la señal de celda de carga. Los cuales ofrecen una mayor resolución y estabilidad. (Datos tomados de forma experimental durante la realización del diseño del circuito de amplificación para la celda de carga.)

- Si se va a usar una tarjeta de adquisición de datos ARDUINO MEGA o ARDUINO UNO, se recomienda usar una resistencia de 34 Ω para R_{INA} , el cual se muestra en el circuito de amplificación de celda de carga.
- Si se va a usar una tarjeta de adquisición de datos USB DAQ 6212, se recomienda usar una resistencia de 42 Ω para R_{INA} , el cual se muestra en el circuito de amplificación de celda de carga.

TECHNICAL BULLETIN 103

MOOG[®]

MOOG INC. CONTROLS DIVISION, EAST AURORA, NY 14052



TRANSFER FUNCTIONS FOR MOOG SERVOVALVES

W. J. THAYER, DECEMBER 1958
Rev. JANUARY 1965

INTRODUCTION

It is often convenient in servoanalysis or in system synthesis work to represent an electrohydraulic servovalve by a simplified, equivalent transfer function. Such a representation is, at best, only an approximation of actual servovalve performance. However, the usefulness of linear transfer functions for approximating servovalve response in analytical work is well established.

The difficulty in assuming an explicit transfer function for electrohydraulic servovalves is that many design factors and many operational and environmental var-

iables produce significant differences in the actual dynamic response. Consider the variables of the valve design. It is well known that internal valve parameters (e.g., nozzle and orifice sizes, spring rates, spool diameter, spool displacement, etc.) may be adjusted to produce wide variations in dynamic response. An analytic approach for relating servovalve dynamic response to internal valve parameters is given in Appendix I of this technical bulletin.

Once a servovalve is built, the actual dynamic response will vary somewhat

with operating conditions such as supply pressure, input signal level, hydraulic fluid temperature, ambient temperature, valve loading, and so forth. These effects are insignificant for small variations about design values, but should be considered where wide excursions are anticipated. It is important to appreciate and control these and other operational variables when performing measurements of servovalve dynamics. If such precautions are not taken, misleading and inaccurate results may be obtained. Appendix II to this Bulletin describes the production

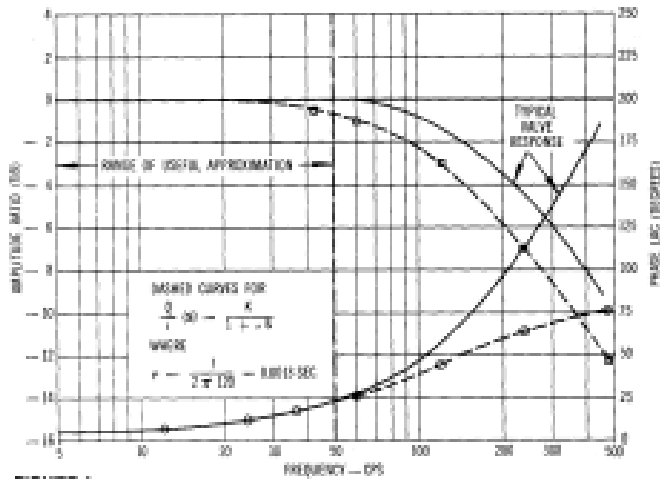


FIGURE 1

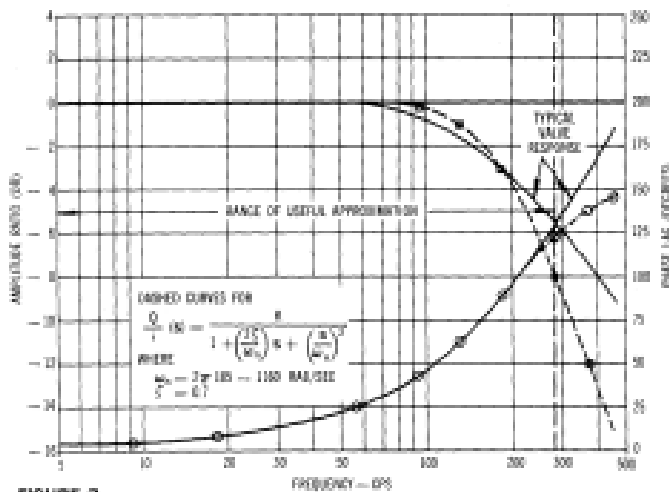


FIGURE 2

equipment presently used by Moog to measure servovalve dynamic response.

Another difficulty in assigning simplified, linear transfer functions to represent servovalve response is that these valves are highly complex devices that exhibit high-order, nonlinear responses. If a first, second, or even third-order transfer function is selected to represent servovalve dynamics, still only an approximation to actual response is possible. Fortunately, for most physical systems, the servovalve is not the primary dynamic element, so it is only necessary to represent valve response throughout a relatively low frequency spectrum. For instance, if a servovalve-actuator is coupled to a load which exhibits a 50 cps resonant frequency, it is meaningful only to represent valve dynamic response in the frequency range to 50 cps. Similarly, for lower response physical systems, the contribution of valve dynamics throughout a correspondingly smaller frequency range need be considered. This simplification of actual servo response should be applied whenever practicable, for the reduced analytical task associated with the system analysis is obvious.

These approximations to servovalve response have resulted in such expressions as "the equivalent time constant of the servovalve is - seconds" or "the apparent natural frequency of the servovalve is - radians /second." If a representation of servovalve response throughout the frequency range to about 50 cps is sufficient, then a first-order expression is usually adequate. Figure 1 shows a typical valve dynamic response, together with the response of a first-order transfer function. The first-order approximation is seen to be quite good throughout the lower frequency region. The time constant for the first-order transfer function (i.e., the equivalent servovalve time constant) is best established by curve fitting techniques. If a quick approximation is desired, the equivalent time constant should correspond to the 45° phase point rather than the 0.7

amplitude point (-3 db). In general, these points will not coincide as the higher-order dynamic effects contribute low frequency phase lag in the servovalve response, while not detracting appreciably from the amplitude ratio.

If servovalve response to frequencies near the 90° phase lag point is of interest, then a second-order response should be used. In a positional servo-mechanism, a second-order representation of the servovalve response is usually sufficient, as the actuator contributes an additional 90° phase lag from the inherent integration. Figure 2 shows a second-order approximation to the servovalve dynamics of Figure 1. Here, the natural frequency is best associated with the 90° phase point, and the damping ratio with the amplitude characteristic. Other factors will often weigh more heavily in the choice of an approximate natural frequency and damping ratio. For example, it may be desirable to approximate the low frequency phase characteristic accurately and, to do so, a second-order transfer function which does not correlate with the 90° phase point may be used. A good deal of judgment must, therefore, be exercised to select the most appropriate transfer function approximation.

SERVOVALVE TRANSFER FUNCTIONS

Appropriate transfer functions for standard Moog servovalves are given below. These expressions are linear, empirical relationships which approximate the response of actual servovalves when operating without saturation. The time constants, natural frequencies, and damping ratios cited are representative; however, the response of individual servovalve designs may vary quite widely from those listed. Nevertheless, these representations are very useful for analytical studies and can reasonably form the basis for detailed system design.

FLOW CONTROL SERVOVALVES

This basic servovalve is one in which the control flow at constant load is proportional to the electrical input current. Flow from these servovalves will be influenced in varying degrees by changing load pressures, as indicated in Figure 4. For null stability considerations, only the region of this plot about the origin need be considered. Here, the influence of the load on flow gain of the servovalve can be considered negligible. In general, the assumption of zero load influence is conservative with respect to system stability analyses.

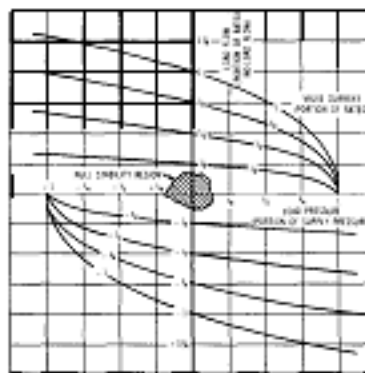


FIGURE 4

Another linearity assumption which is often made is that servovalve flow gain is constant through null. This is theoretically true for an ideal "zero lap" null cut of the valve spool; however, the actual lap condition will vary with production tolerances. If the spool becomes overlapped, the servovalve flow gain is reduced at null. Likewise, an underlap produces higher-than-normal servovalve gain. Normal production tolerances maintained at Moog hold the spool lap within ±0.0001 inch for all four null edges. This close control gives a very small range of possible nonlinear flow control through null (about ±3% for an "axis" null cut);

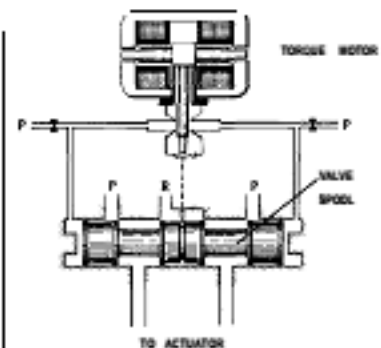


FIGURE 3

SYMBOLS FREQUENTLY USED

i	differential current input to servovalve	mA
Q	servovalve flow to the load	in ³ /sec (gpm)
p	servovalve differential pressure output	lbs/in ² (psi)
K	servovalve sensitivity, as defined	
T	time constants	sec.
ω_n	natural frequencies	rad/sec.
ζ	damping ratios	non-dimensional
s	Laplace operator	

but within this range, flow gain may be from 50% to 200% of nominal.

The change in servovalve flow gain at null may sometimes cause system instability; or, in other cases, poor positioning accuracy, or poor dynamic response of the actuator at low-amplitude input signals. This situation can be varied one way or the other by holding a nominal overlap or underlap, as appropriate.

The dynamic response of Moog flow control servovalves can be approximated in the frequency range to about 50 cps by the following first-order expression:

$$\frac{Q}{I}(s) = K \left(\frac{1}{1 + \tau s} \right)$$

where

K = servovalve static flow gain cia
 at zero load pressure drop m a

τ = apparent servovalve time constant SEC

Standard flow control servovalves are available in several sizes and with many internal design configurations. The value of servovalve sensitivity K depends upon the rated flow and input current. Typically, for a 5 gpm valve at a rated 8 ma input current, $K = 2.4$ ciam.

The appropriate time constant for representing servovalve dynamics will depend largely upon the flow capacity of the valve. Typical time constant approximations for Moog Type 30 servovalves are given in the table below.

If it is necessary to represent servovalve dynamics through a wider frequency range, a second-order response can be used, as:

$$\frac{Q}{I}(s) = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{2\zeta}{\omega_n} \right) s + \left(\frac{s}{\omega_n} \right)^2} \right]$$

where

$\omega_n = 2\pi f_n$, apparent natural frequency rad/sec

ζ = apparent damping ratio nondimensional

Flow-Control Servovalve Series	Max. Flow Capacity at 3000 psi gpm	Approximate Dynamics 3000 psi 200°F P.P. load (at 50% rated)		
		1st Order τ sec	2nd Order f_n cps	ζ
30	2	.0023	240	.5
31	6	.0045	200	.5
32	12	.0090	180	.55
34	18	.0135	180	.6
35	30	.0225	150	.55

The first and second-order transfer function approximations for servovalve dynamic response listed in the above table give reasonably good correlation with actual measured response. It is possible to relate servovalve response to internal valve parameters, as discussed in Appendix I. However, the analytical approach to servovalve dynamics is most useful during preliminary servovalve design, or when attempting to change the response of a given design. It is better, and more accurate, for system design to use empirical approximations of the measured servovalve response.

PRESSURE CONTROL SERVOVALVES

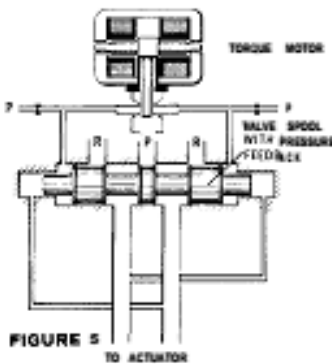


FIGURE 5 TO ACTUATOR

These servovalves provide a differential pressure output in response to the electrical input current. The static flow-pressure curves for a typical pressure control servovalve are shown in Figure 6. A small droop, or decrease in the controlled pressure with flow, does occur, even throughout the null region. This droop is usually small in pressure-control servovalves; however, in some applications even a small droop can significantly alter the system response. In pressure-flow servovalves, droop is purposely introduced. Transfer functions for these valves are discussed in the next section.

It is convenient to measure the dynamic response of a pressure control servovalve by capping the load lines and

measuring the relationship of load pressure to input current. A second-order transfer function closely approximates the measured response in the frequency range to about 200 cps.

$$\frac{P}{I}(s) = K_s \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{2\zeta}{\omega_n} \right) s + \left(\frac{s}{\omega_n} \right)^2} \right]$$

where

K_s = pressure control servovalve static gain ps/ma

$\omega_n = 2\pi f_n$, apparent natural frequency rad/sec

ζ = apparent damping ratio nondimensional

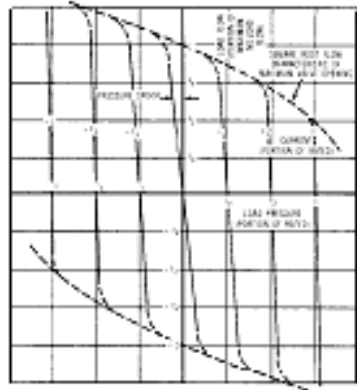


FIGURE 6

The controlled differential pressure may be any rated maximum up to the system pressure. For a 1000 psi rated control pressure at 8 ma electrical input, $K_s = 125$ ps/ma.

With a blocked load, the apparent natural frequency for pressure control servovalves is approximately 250 cps, and the damping ratio is about 0.3 to 0.5. The actual blocked-load response for a pressure-control servovalve depends somewhat on the entrapped oil volume of the load, so the load volume should be noted with response data.

When a pressure control servovalve is required to supply flow to the load, the blocked-load transfer function no longer

Anexo T: Ficha técnica de la servoválvula Moog 62.

62 SERIES TWO STAGE SERVOVALVES

62 SERIES SERVOVALVES

The 62 Series flow control servovalves are throttle valves for 3- and preferably 4-way applications. They are a standard performance, two-stage design that covers the range of rated flows from 2.5 to 20 gpm at 1000 psi valve drop. The output stage is a closed center, four-way sliding spool. The pilot stage is a symmetrical double-nozzle and flapper, driven by a double air gap, dry torque motor. Mechanical feedback of spool position is provided by a cantilever spring. The valve

design is simple and rugged for dependable, long life operation. These valves are suitable for electrohydraulic position, speed, pressure or force control systems with high dynamic response requirements.

Principle of operation

An electrical command signal (flow rate set point) is applied to the torque motor coils, and creates a magnetic force which acts on the ends of the pilot stage armature. This causes a deflection of the armature/flap-

per assembly within the flexure tube. Deflection of the flapper restricts fluid flow through one nozzle which is carried through to one spool end, displacing the spool.

Movement of the spool opens the supply pressure port (P) to one control port, while simultaneously opening the tank port (T) to the other control port. The spool motion also applies a force to the cantilever spring, creating a restoring torque on the armature/flapper assembly.

Once the restoring torque becomes equal to the torque from the magnetic forces, the armature/flapper assembly moves back to the neutral position, and the spool is held open in a state of equilibrium until the command signal changes to a new level.

In summary, the spool position is proportional to the input current and with constant pressure drop across the valve, flow to the load is proportional to the spool position.

VALVE FEATURES

- > 2-stage design with dry torque motor
- > Low friction double nozzle pilot stage
- > High spool control forces
- > High dynamics
- > Low cost design
- > Rugged, long-life design
- > High resolution, low hysteresis
- > Completely set-up at the factory

The actual flow is dependent upon electrical command signal and valve pressure drop. The flow for a given valve pressure drop can be calculated using the square root function for sharp edge orifices:

$$Q = Q_N \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta p_N}}$$

Q [gpm] = calculated flow

Q_N [gpm] = rated flow

Δp [psi] = actual valve pressure drop

Δp_N [psi] = rated valve pressure drop



This catalog is for users with technical knowledge. To ensure that all necessary characteristics for function and safety of the system are given, the user has

to check the suitability of the products described here. In case of doubt, please contact Moog Inc.

**62 SERIES
GENERAL TECHNICAL DATA**

Operating Pressure
ports P, A and B up to 3,000 psi
port T up to 2,000 psi

Temperature Range
Fluid 0°F to 200°F
Ambient 0°F to 200°F

Seal Material
Viton, others on request

Operating Fluid
Compatible with common hydraulic fluids, other fluids on request.

Recommended viscosity 60-450 SUS @ 100°F

System Filtration: High pressure filter (without bypass, but with dirt alarm) mounted in the main flow and if possible, directly upstream of the valve.

Class of Cleanliness: The cleanliness of the hydraulic fluid greatly effects the performance (spool positioning, high resolution) and wear (metering edges, pressure gain, leakage) of the servovalve.

Recommended Cleanliness Class
For normal operation ISO 4406 < 14/11
For longer life ISO 4406 < 13/10

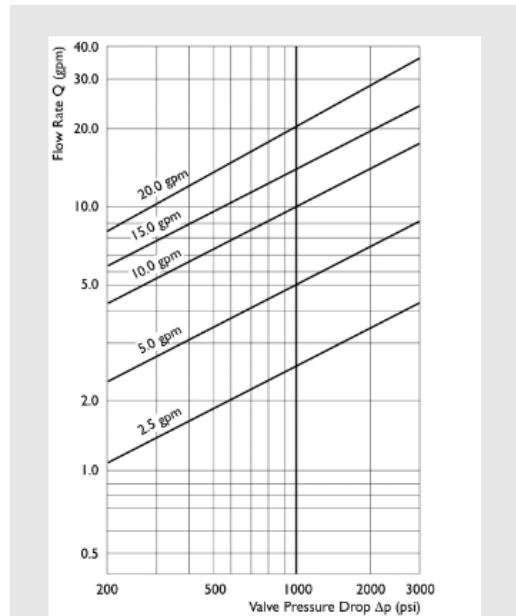
Filter Rating Recommended
For normal operation $\beta_{10} \geq 75$ (10 μ m absolute)
For longer life $\beta_5 \geq 75$ (5 μ m absolute)

Installation Operations
Any position, fixed or moveable.

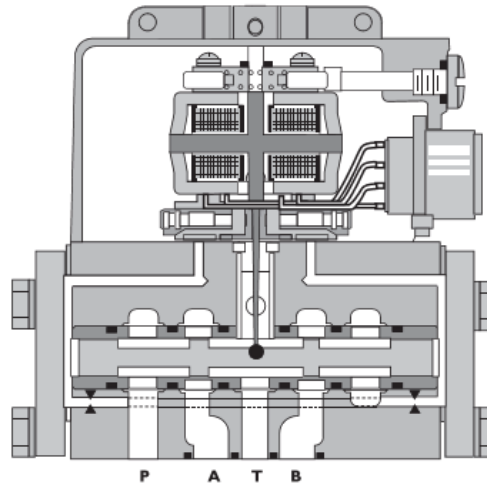
Vibration
30 g, 3 axes

Weight
2.7 lb. (1.2 kg)

Shipping Plate
Delivered with an oil sealed shipping plate.



Valve Flow Diagram
Valve flow for maximum valve opening (100% command signal) as a function of the valve pressure drop.



**62 SERIES
TECHNICAL DATA**

Model ... Type
Mounting Pattern
Valve Body Version

Pilot Stage

Pilot Connection

Rated Flow (±10%) at $\Delta p_N = 1,000$ psi [gpm] 2.5

Response Time* [ms] 60

Threshold* [%] < 1%

Hysteresis* [%] < 5%

Null Shift at $\Delta T = 100^\circ\text{F}$ [%] < 5%

Null Leakage Flow* max. [gpm] 0.35 to 0.55

* Measured at 1,000 psi operating pressure

62

ISO 10372 - 04 - 04 - 0 - 92

4-way

2-stage with spool bushing design

Nozzle/Flapper; High flow

Internal only

5.0 10.0 15.0 20.0

60 60 60 60

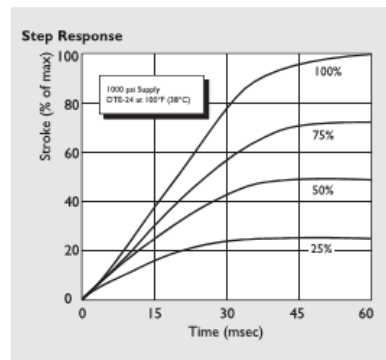
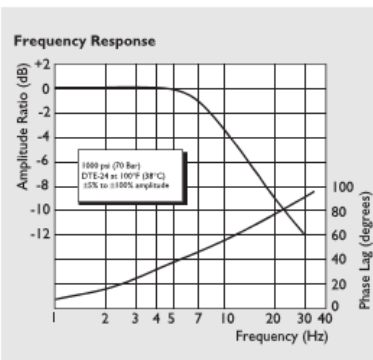
< 1%

< 5%

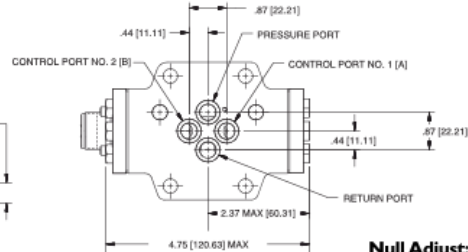
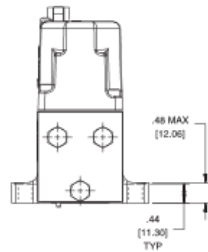
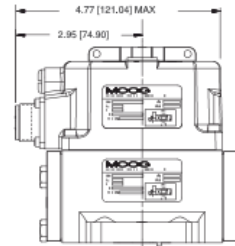
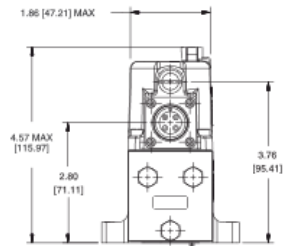
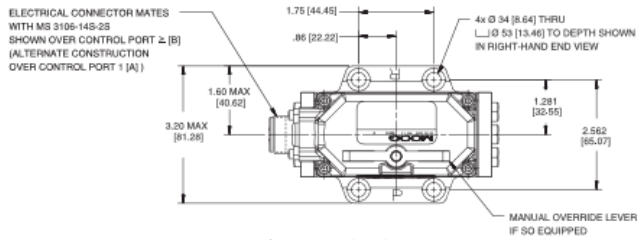
< 5%

0.35 to 0.55

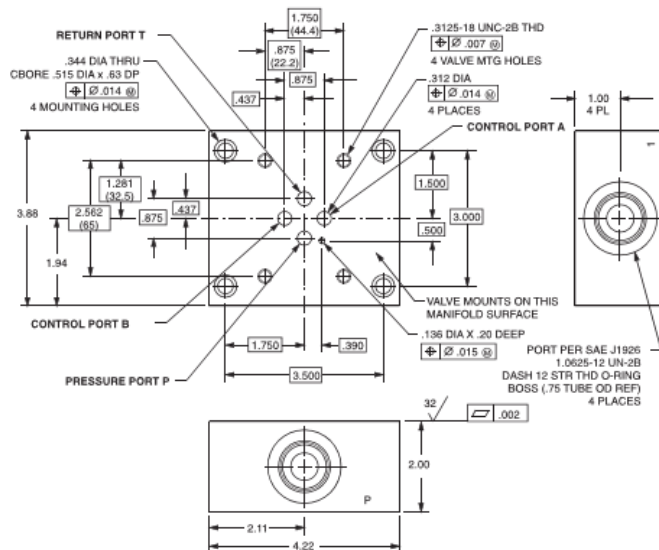
Typical characteristic curves with ±5% to ±100% input signal, measured at 1,000 psi operating pressure.



**62 SERIES
INSTALLATION DRAWINGS**



TYPICAL SUBPLATE MANIFOLD



Null Adjust: Flow out of Control Port B will increase with clockwise rotation of null adjust screw (1/8 hex key).

The mounting manifold must conform to ISO 10372-04-04-0-92
Surface to which valve is mounted requires a $\sqrt{3}$ [ΔΔ] finish, flat within 0.002 [0.05] TIR.

62 SERIES ELECTRICAL CONNECTIONS

Rated current and coil resistance

Two different coil designs are available for 62 Series Servovalves. See Table 1.

Coil connections

A four-pin electrical connector (that mates with an MS3106R14S-2S) is standard. All four torque motor leads are available at the connector so external connections can be made for series, parallel or differential operation.

Servoamplifier

The servovalve responds to input current, therefore a servoamplifier that has high internal impedance (as obtained with current feedback) should be used. This will reduce the effects of coil inductance and will minimize changes due to coil resistance variations.

ELECTRICAL CONNECTIONS (Example with typical 62 series coils)		Parallel	Series	Single
Coil Resistance	[Ω]	14	56	28
Rated Current	[mA]	± 100	± 50	± 100
Electrical Power	[W]	.14	.14	.28
Connections for Valve Opening		A and C (+) B and D (-)	A (+), D (-) B and C connected	A (+), B (-) or C (+), D (-)

Note: Before applying electrical signals, the pilot stage has to be pressurized.

TABLE I

Nominal Resistance Per Coil at 77°F (25°C) Ω	Recommended Rated Current—mA		Approximate Coil Inductance*—Henry		
	Parallel, Differential or Single Coil Operation	Series Coils	Single Coils	Series Coils	Parallel Coils
28	100	50	0.2	0.8	0.2
300	30	15	2	7	2

* Measured at 50 Hz.

62 SERIES
ORDERING INFORMATION
SPARE PARTS AND ACCESSORIES

Model Number		Type Designation													
62		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Optional Feature		Optional Accessories													
	Series specification	M Manual Override													
K	Intrinsically safe*	Signals for 100% Spool Stroke													
Model Designation		Q ±15 mA Series (±30 mA parallel)													
	Assigned at the factory	R ±50 mA Series (±100 mA parallel)													
Factory Identification (Revision Level)		Y Special signal (see spec sheet)*													
Value Version		Valve Connector													
S	Standard response	A Connector C1 (A) – side (RH)													
Rated Flow Q_N[gpm] at $\Delta p_N = 1,000$ psi		B Connector C2 (B) – side (LH)													
10	2.5	Seal Material													
20	5.0	V Fluorocarbon													
40	10.0	N NBR (Buna)													
60	15.0	Others on request													
75	20.0	Pilot Connection													
XX	Non-Standard Flow	4 internal													
Maximum Operating Pressure P_r and Body Material		Spool Position without Electrical Signal													
F	3,000 psi aluminum	M Mid position													
Main Spool Type		A A → T													
O	4-way / axis cut / linear	B B → T													
D	4-way / +/-10% overlap / linear	Pilot Stage													
X	Special	F Standard dynamics													

Preferred configurations highlighted.
All combinations may not be available.
Options may increase price and delivery.
Technical changes are reserved.

* Optional designs are available with intrinsically safe coils (FM, CSA and ATEX approved).

SPARE PARTS AND ACCESSORIES

O-Rings (included in delivery) for P,T,A and B	FPM 85 Shore ID 0.426 x .070	Moog P/N -42082-022
Mating Connector, waterproof IP 65 (not included in delivery)		-49054F014S002S (MS3106F14S-2S)
Flushing Block		-23718-001K001
Mounting Bolts (not included in delivery) 5/16 - 18 NC x 1.0 long (4 pieces)		C66391-216B
Orifice Assembly with Filter (2 required)		A25446-001
Filter Replacement Kit		B52555RK206K001

Anexo U. Ficha técnica de la celda de carga Lexus SC, modificado.

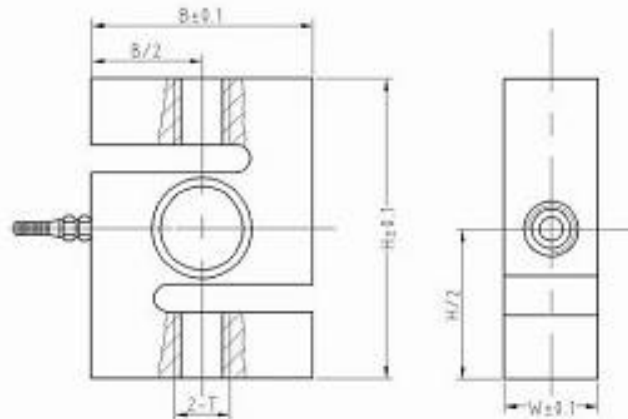
Data Sheet



SC LOAD CELL "S"

Has superiority in loading and its structure. Easy installation. High precision. High reliability. Can be used in combination scale, package scale, systematic scale and belt scale.

Dimensions



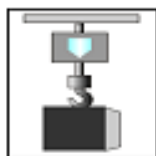
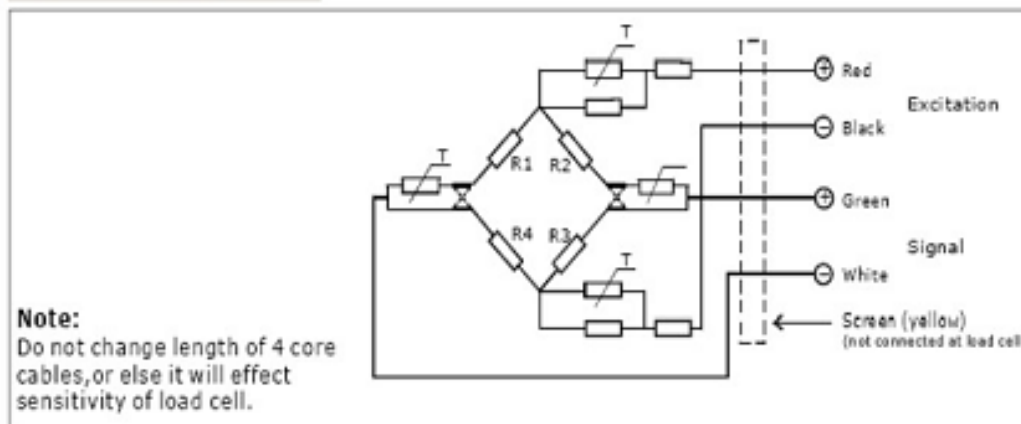
Rated load (t)	H	B	W	T
0.5, 1, 2, 3	86	64	28	M16
5	106	80	36	M24*2
7.5, 10	178	130	51	M30*2
15, 20	190	160	60	M39*2



Specification

ITEM \ PARAMETER	C2	C3	UNIT
Rated load (E _{max}):	0.5-20		t
Maximal numbers of load cell intervals(N _{ic}):	2000	3000	
Minimum load cell verification intervals(V _{min})	0,03		% of rated load
Sensitivity(C _n):	2±0.2%		mV/V
Total error:	0,03	0,02	±% of rated output
Temperature effect on sensitivity (TK _c):	0,0024	0,0012	±% of rated output/°C
Temperature effect on zero balance (TK ₀):	0,002	0,0008	±% of rated output/°C
Zero balance:	1		±% of rated output
Input impedance(red+,black-):	385±5		Ω
Output impedance(green+,blue-):	350±2		Ω
Insulation impedance:	≥5000		MΩ
Safe overload:	150		% of rated capability
Ultimate overload:	300		% of rated capability
Operating temperature range:	-30~+70/-20~+160		°C/°F
Recommend excitation:	5~12		V(AC or DC)
Maximum excitation:	15		V(AC or DC)
Material of elastomer :	alloy steel / stainless steel		
Protection class:	IP67/IP68		
Cable:	0.5~3t-3m,5t-6m,20t-13m		Ø6
Citation:	OIML R60 / GB7551-1997		
The data for deviation of synthesis error · TK ₀ · TK _c are typical values · The sum of these data meets the requirements according to OIML R60 ·			

Circuit Diagram



NOTA: Los valores resaltados en amarillo corresponden a la celda de carga utilizada en el banco.