

MONTAJE ELÉCTRICO, ELECTRÓNICO Y CONTROL COMPUTARIZADO DE
LA MÁQUINA DE ENSAYOS INSTRON DEL LABORATORIO DE POTENCIA
FLUIDA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD
INDUSTRIAL DE SANTANDER

EMMANUEL JOSEPH CAMACHO FLÓREZ
LUIS CARLOS PARADA GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2019

MONTAJE ELÉCTRICO, ELECTRÓNICO Y CONTROL COMPUTARIZADO DE
LA MÁQUINA DE ENSAYOS INSTRON DEL LABORATORIO DE POTENCIA
FLUIDA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD
INDUSTRIAL DE SANTANDER

EMMANUEL JOSEPH CAMACHO FLOREZ
LUIS CARLOS PARADA GONZÁLEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director de Proyecto:
ABEL PARADA CORRALES
MSc. Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2019

AGRADACIMIENTOS

Quisiéramos dar las gracias a nuestros familiares y amigos, por toda la paciencia y apoyo que han tenido durante la realización de este proyecto y el hecho de que sin su ayuda nada de esto hubiera sido posible.

Queremos agradecer en gran medida a nuestra compañera Kathe, a ti, gracias siempre, siempre contigo, siempre con nosotros.

Gracias a nuestro director Abel Parada, por brindarnos la oportunidad de demostrar nuestras habilidades y límites, su compañía, asesoramiento y dirección.

*A mamá y Eder, quienes representan un motivo para siempre levantarse, no desfallecer y, sobre todo, entender que “vivir no es solo respirar”.
A mi nono Ramón y nona Mariela, siempre conmigo, siempre en mi corazón.*

A Papá, Leila y hermanos míos, presentes en mi pensamiento, aunque lejos, siempre un abrazo con amor.

A Doña Lida y Don Gonzalo, por ser siempre un impulso, un apoyo, sin ustedes esto definitivamente no se hubiera culminado. Muchas gracias.

Por supuesto a Joseph, más que un amigo, un hermano, desde Wekeeeeeeee hasta siempre

A todos quienes de una forma u otra fueron parte de este logro, muchas gracias.

Luis Parada.

Realmente me cuesta mucho expresar mis agradecimientos por medio de las palabras, lo único que mi corazón puede demostrar es supremo aprecio y admiración por la gente que nos rodeó e instruyó en este duro camino, es difícil mencionar nombres ya que el listado de personas que me encantaría agradecer es infinito, incluso gente con la que solo pudimos intercambiar un par de palabras. ¡Solo puedo resumir en un GRACIAS POR TODO!

Joseph Camacho.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
2. JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA.....	21
3. OBJETIVOS.....	22
3.1 OBJETIVO GENERAL	22
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
4. DESCRIPCIÓN INSTRON 1323.....	23
4.1 ELEMENTOS DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS INSTRO 1323.	23
4.1.1 Módulo de potencia:.....	23
4.1.3 Paquete auxiliar de control:.....	24
4.1.4 Módulo de carga:	25
5. MARCO TEÓRICO	26
5.1 ESTRATEGIAS DE CONTROL.	26
5.1.1 Control en lazo abierto	26
5.1.2 Control en lazo cerrado.....	27
5.2 CONTROL ROBUSTO.....	27
5.2.1 Control Proporcional	28
5.2.2 Control Integral	28
5.2.3 Control Derivativo	29
5.2.4 Compensador Feedforward:	30
5.3 SERVOSISTEMAS DE POTENCIA FLUIDA	32
5.3.1 Servo de posición	34
5.3.2 Servo de fuerza.....	35
6. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	37

6.1 MONTAJE ELÉCTRICO	37
6.1.1 Módulo de potencia.....	37
6.1.1.1 Motor bomba de pistones:.....	37
6.1.1.2 Conexión de alimentación de terminales para el enfriador:	38
6.1.1.3 Salida del módulo:	39
6.1.2 Módulo Auxiliar de Control:	40
6.1.2.1 Conexiones provenientes del módulo de potencia y módulo de carga: 40	
6.1.2.2 Válvula Direccional Piloto:.....	41
6.1.2.3 Inicio, apagado y funcionamiento.....	42
6.2 MONTAJE ELECTRÓNICO	46
6.2.1 Transductor de posición:.....	46
6.2.2 Transductor de presión	47
6.2.3 Servoamplificador	48
6.2.4 Circuito corrector de voltaje y PID análogo	55
6.2.5 Conexiones NI USB DAQ 6212	59
6.2.6 Encendido y apagado automático	61
6.2.7. Control de temperatura	64
6.3 CONTROL COMPUTARIZADO	67
6.3.1 Caracterización transductor de posición	67
6.3.2 Caracterización transductores de presión.....	68
6.3.3. Encendido y apagado automático:.....	70
6.3.4 Comando y despegar servo válvula.....	71
6.3.5 Código Servo de Posición:.....	72
6.3.6. Código Servo de fuerza	73
6.3.7 Código servo de posición y fuerza	75
6.3.8 Código servo de posición y fuerza Feedforward	76

6.3.9 Opciones Set Point	79
7. DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA	83
7.1 OPCIÓN ARRANQUE	83
7.2 OPCIÓN COMANDO Y DESPEGUE DE VÁLVULA.....	85
7.3 OPCIÓN SERVO DE POSICION.....	87
7.4 SERVO DE FUERZA	89
7.5 SERVO DE POSICIÓN Y FUERZA	91
7.6 SERVO DE POSICIÓN Y FUERZA FEEDFORWARD	93
8. RESULTADOS.....	94
8.1. RESULTADOS SERVO DE POSICIÓN.....	94
8.2 RESULTADOS SERVO DE FUERZA.....	99
8.3 RESULTADOS CONTROL DE POSICIÓN Y FUERZA.....	103
8.4 RESULTADOS CONTROL DE POSICION Y FUERZA FEEDFORWARD	107
8.5 RESULTADOS DE CONFIABILIDAD SERVO DE POSICIÓN	111
8.6 RESULTADOS DE CONFIABILIDAD SERVO DE FUERZA.....	115
8.7 RESULTADOS DE ROTURA DE MATERIALES	119
CONCLUSIONES	122
BIBLIOGRAFÍA.....	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Módulo de potencia (Estado inicial).	19
Figura 2. Módulo de carga y módulo de control (Estado inicial)	20
Figura 3. Módulo de potencia (Estado final).	24
Figura 4. Módulo de control (Estado final)	25
Figura 5. Módulo de carga (Estado final).	25
Figura 6. Esquema de control en lazo abierto.	27
Figura 7. Esquema de control en lazo cerrado o retroalimentado.....	27
Figura 8. Respuesta a señal escalón para diferentes estrategias de control....	30
Figura 9. Diagrama de bloques compensador Feedforward.	31
Figura 10. Válvula proporcional direccional pilotada centrada por resortes.	33
Figura 11. Corte servoválvula MOOG 73 SERIES.....	33
Figura 12. Esquema de control de posición usando servoválvula.	35
Figura 13. Esquema de control de fuerza usando servoválvula.....	36
Figura 14. Desmontaje de arrancador de la bomba.....	38
Figura 15. Antes y después del arrancador de motor-bomba de pistones.....	38
Figura 16. Conexión de motor del enfriador a 220V	39
Figura 17. Salida del módulo y válvula de seguridad.....	40
Figura 18. Conexiones costado izquierdo y derecho.	41
Figura 19. Válvula direccional piloto.	41
Figura 20. Válvula direccional piloto y antirretorno pilotada.....	42
Figura 21. Lógica cableada para arranque manual.....	43
Figura 22. Relés de lógica cableada.....	44
Figura 23. Elementos de lógica cableada.	44
Figura 24. Secuencia de encendido, desventeo y antirretorno.	45
Figura 25. Relés lógica cableada FINDER 60.12.....	45
Figura 26. Conexión y esquema eléctrico del transductor de posición.	46
Figura 27. Fuente 24V.	47
Figura 28. Conexión transductores de presión.	47
Figura 29. Esquema circuito servoamplificador.	49
Figura 30. Amplificador Operacional.....	50
Figura 31. Amplificador no inversor	51

Figura 32. Seguidor de tensión.	52
Figura 33. Esquema fuente simétrica y derivados.	53
Figura 34. PCB circuito servoamplificador.	54
Figura 35. Vista sin componentes circuito servoamplificador.	54
Figura 36. Circuito corrector de voltaje	55
Figura 37. PCB circuito correcto de voltaje.	57
Figura 38. Vista sin componentes circuito corrector de voltaje.	57
Figura 39. Circuito PID analógico.	58
Figura 40. PCB circuito PID analógico.	59
Figura 41. Vista sin componentes circuito PID analógico.	59
Figura 42. DAQ NI USB 6212 pinout.	60
Figura 43. Conexión de elementos en tarjeta NI USB DAQ 6212.	61
Figura 44. Circuito optoacoplador en módulo de control.	62
Figura 45. Optoacoplador 4N35 Series.	62
Figura 46. Esquema básico de optoacoplador.	63
Figura 47. Relé divisor de señal automática y manual.	63
Figura 48. Control de temperatura (Módulo de potencia).	64
Figura 49. Código Arduino para control de temperatura.	65
Figura 50. Caracterización transductor de posición.	68
Figura 51. Caracterización transductor de presión (Derecha, Comprensión). ..	69
Figura 52. Caracterización transductor de presión (Izquierda, Tracción).	69
Figura 53. Código gráfico para encendido y apagado.	70
Figura 54. SubVI arranque.	71
Figura 55. Código gráfico opción comando,	72
Figura 56. Código gráfico opción despegar servo válvula.	72
Figura 57. Código gráfico servo de posición.	73
Figura 58. Código gráfico servo de fuerza.	74
Figura 59. Código gráfico servo de posición y fuerza.	76
Figura 60. Código servo de posición y fuerza Feedforward.	77
Figura 61. Cálculo de compensador Feedforward.	78
Figura 62. Implementación de compensador Feedforward.	79
Figura 63. Set Point "Escalón"	79

Figura 64. Set Point " <i>Random</i> ".	80
Figura 65. Set Point " <i>Rampa</i> ".	81
Figura 66. Set Point " <i>Frecuencia</i> ".	81
Figura 67. Set Point " <i>Repetitividad</i> ".	82
Figura 68. Pestaña " <i>Arranque</i> ".	84
Figura 69. Pestaña " <i>Comando</i> ".	85
Figura 70. Pestaña " <i>Despegar Servo Válvula</i> ".	86
Figura 71. Interfaz Servo de Posición.	87
Figura 72. Pestaña " <i>Servo de Fuerza</i> ".	89
Figura 73. Pestaña " <i>Servo de Posición y Fuerza</i> ".	92
Figura 74. Pestaña " <i>Servo de Posición y Fuerza Feedforward</i> ".	93
Figura 75. Respuesta a la señal " <i>Escalón</i> " servo de posición.	94
Figura 76. Respuesta señal " <i>Random</i> " servo de posición.	95
Figura 77. Respuesta señal " <i>Rampa</i> " avance 0.2 cm/s servo de posición.	96
Figura 78. Respuesta señal " <i>Frecuencia</i> " servo de posición.	97
Figura 79. Respuesta señal " <i>Frecuencia</i> " 2 servo de posición.	97
Figura 80. Respuesta señal " <i>Repetitividad</i> " servo de posición.	98
Figura 81. Respuesta señal " <i>Escalón</i> " servo de fuerza.	99
Figura 82. Respuesta señal " <i>Random</i> " servo de fuerza.	100
Figura 83. Respuesta señal " <i>Rampa</i> " servo de fuerza.	100
Figura 84. Respuesta señal " <i>Frecuencia</i> " servo de fuerza.	101
Figura 85. Respuesta señal " <i>Repetitividad</i> " servo de posición.	102
Figura 86. Respuesta a la ubicación de material columna.	103
Figura 87. Respuesta señal " <i>Escalón</i> " servo de posición y fuerza.	104
Figura 88. Respuesta señal " <i>Random</i> " servo de posición y fuerza.	104
Figura 89. Respuesta señal " <i>Rampa</i> " 10 psi/s servo de posición y fuerza.	105
Figura 90. Respuesta señal " <i>Frecuencia</i> " servo de posición y fuerza.	105
Figura 91. Respuesta señal " <i>Repetitividad</i> " servo de posición y fuerza.	106
Figura 92. Respuesta señal " <i>Escalón</i> " sin compensador.	107
Figura 93. Respuesta señal " <i>Escalón</i> " con compensador.	108
Figura 94. " <i>Escalón</i> " de 700 psi sin compensador.	109
Figura 95. " <i>Escalón</i> " de 700 psi con compensador.	109

Figura 96. Montaje para servo de fuerza, columna y resorte.	110
Figura 97. Respuesta "Escalón" 10 [cm] (sin perturbación).	111
Figura 98. Respuesta "Escalón" 10[cm] (Con perturbación).	112
Figura 99. Respuesta "Escalón" 12[cm] (Sin perturbación).	112
Figura 100. Respuesta "Escalón" 12[cm] (Con perturbación).	113
Figura 101. Respuesta "Escalón" 14 [cm] (Sin perturbación).	113
Figura 102. Respuesta "Escalón" 14 [cm] (Con perturbación).	114
Figura 103. Respuesta "Escalón" 500 [psi] para columna.	115
Figura 104. Respuesta "Escalón" 500 [psi] para madera.	116
Figura 105. Respuesta "Escalón" 500 [psi] para concreto.	116
Figura 106. Respuesta "Escalón" 500 [psi] para resorte.	117
Figura 107. Montaje de pruebas de confiabilidad.	118
Figura 108. Rampa hasta rotura aplicada a madera.	119
Figura 109. Rotura listón de madera.	120
Figura 110. Rampa hasta rotura para concreto.	120
Figura 111. Rotura cilindro de concreto.	121

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos en el CD y se puede visualizar en la base de datos de biblioteca UIS).

Anexo A. TRANSDUCTOR DE POSICIÓN PL 150 T6

Anexo B. TRANSDUCTOR DE PRESIÓN SITRANS P Z SERIES 7MF1563.

Anexo C. SERVOVÁLVULA MOOG 73 SERIES

Anexo D. PLANO DE CONEXIÓN ENCENDIDO/ APAGADO DIGITAL.

Anexo E. ENTORNO DE PROGRAMACIÓN GRÁFICA LABVIEW.

Anexo F. CARACTERÍSTICAS NI USB DAQ 6212.

Anexo G. GUIA DE OPERACIÓN MÁQUINAS INSTRON 1323.

RESUMEN

TITULO:

MONTAJE ELÉCTRICO, ELECTRÓNICO Y CONTROL COMPUTARIZADO DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS INSTRON DEL LABORATORIO DE POTENCIA FLUIDA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER*.

AUTORES:

Emmanuel Joseph Camacho Flórez

Luis Carlos Parada González**

PALABRAS CLAVE:

Prensa, servomecanismos, servo de posición, servo de fuerza, potencia fluida, control, laboratorios, instalación.

DESCRIPCIÓN:

Durante la construcción y adecuación del nuevo edificio de laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, se realizó un proceso de desmantelamiento de los antiguos laboratorios, los equipos existentes que servían para labores teórico-prácticas en diferentes materias de la carrera, entre ellas, Potencia Fluida, se desinstalaron y guardaron. La escuela acaba de terminar el proceso de adecuación de la infraestructura que incluía ensamblar y colocar en operación cada una de las maquinas, dentro de ellas la INSTRON 1323 muy importante en la capacitación de los estudiantes en los servomecanismos de posición y fuerza.

El control computarizado se realizó mediante el uso de una tarjeta de adquisición de datos NI DAQ USB 6212, la cual servirá como puente de comunicación entre los diferentes elementos involucrados en la acción de control de posición y fuerza con el software LabVIEW.

Finalmente, la interfaz gráfica muestra la compilación de las diferentes formas en las cuales se puede realizar el control de posición y fuerza, todo ello formando parte de un proyecto de LabVIEW que mediante subVI's logre tener de manera separada cada una de las opciones, brindando a los estudiantes la posibilidad de poder diferenciar las variables involucradas en el proceso.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director de proyecto MSc. Abel Antonio Parada Corrales.

ABSTRACT

TITLE:

ELECTRICAL, ELECTRONIC AND COMPUTERIZED CONTROL OF THE INSTRON TESTING MACHINE OF THE FLUID POWER LABORATORY OF THE MECHANICAL ENGINEERING SCHOOL OF THE INDUSTRIAL UNIVERSITY OF SANTANDER.*

AUTORS:

Emmanuel Joseph Camacho Flórez

Luis Carlos Parada González**

KEYWORDS:

Press, servomechanisms, position servo, force servo, fluid power, control, laboratories, installation.

DESCRIPTION:

During the construction and adaptation of the new laboratory building of the School of Mechanical Engineering of the Industrial University of Santander, a dismantling process of the old laboratories was carried out, the existing equipment that served for theoretical-practical work in different subjects of the career, among them, Fluid Power, were uninstalled and saved. The school has just finished the process of adaptation of the infrastructure that included assembling and putting into operation each of the machines, within them the INSTRON 1323 very important in the training of students in the position and force servomechanisms.

The computerized control was carried out through the use of an NI DAQ USB 6212 data acquisition card, which will serve as a communication bridge between the different elements involved in the position and force control action with the LabVIEW software.

Finally, the graphic interface shows the compilation of the different ways in which position and force control can be performed, all of which are part of a LabVIEW project that through subVI's manages to have each of the options separately, providing Students can differentiate the variables involved in the process.

* Degree Work.

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Project director. MSc. Abel Antonio Parada Corrales.

INTRODUCCIÓN

El presente documento contiene la ejecución del proyecto de grado “*MONTAJE ELÉCTRICO, ELECTRÓNICO Y CONTROL COMPUTARIZADO DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS INSTRON DEL LABORATORIO DE POTENCIA FLUIDA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER*”, a la cual se realizaron las adecuaciones necesarias para su puesta a punto con funciones de servo de posición y fuerza para su uso en el laboratorio de potencia fluida.

Con esta adecuación del equipo INSTRON 1323 se busca dotar a la escuela de ingeniería mecánica de un instrumento capaz de realizar prácticas de servo de posición y fuerza, con el fin de instruir a los estudiantes de la asignatura potencia fluida y servosistemas de potencia fluida en el uso y alcance de sistemas de control por medio de una tarjeta de adquisición de datos NI USB DAQ 6212, para tal fin se dispuso del software LabVIEW como entorno de programación gráfica, muy sencillo en la adquisición de datos y eficiente en la generación de reportes que presenta por medio, una interfaz gráfica que muestre las variables y respuesta del sistema en todo momento.

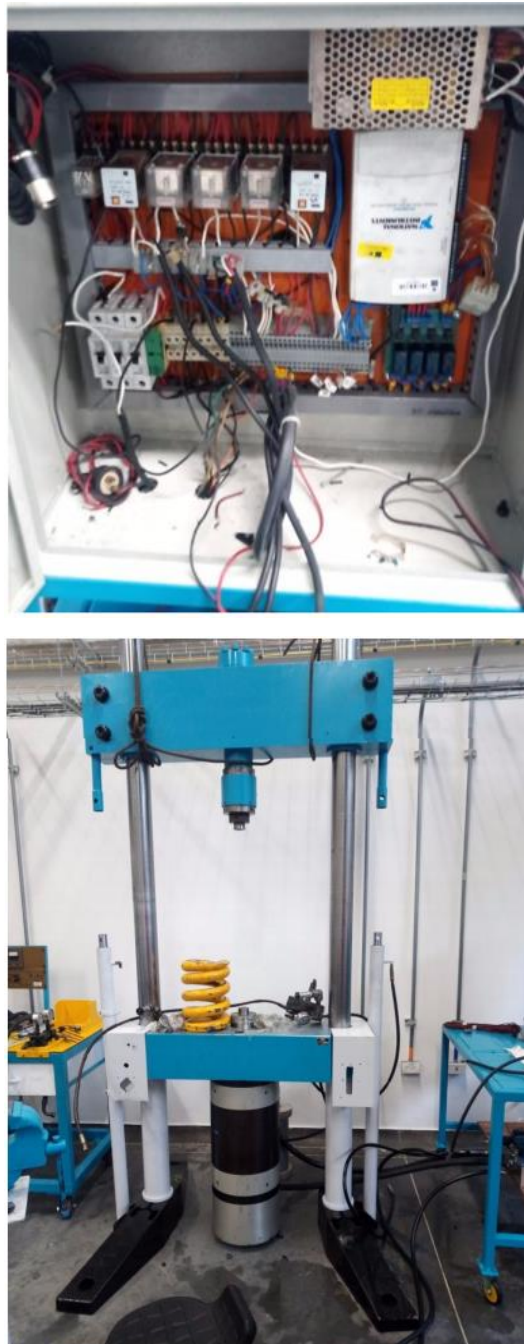
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Con el desmonte y demolición de la edificación antigua donde funcionaban los laboratorios y la construcción de la nueva edificación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, se realizó un proceso de desmantelamiento de los antiguos laboratorios, que conllevó la desinstalación de los equipos que servían para labores teórico-prácticas, con la única finalidad de potencializar las capacidades de docencia, investigación y extensión. La nueva infraestructura cuenta con entre otras cosas, con 20 laboratorios, uno de ellos es el de potencia fluida. En el Laboratorio de servosistemas de potencia fluida se encuentra la INSTRON 1323 totalmente desarmada y se necesita colocarla puesta a punto para que los estudiantes tengan la posibilidad aplicar los conocimientos adquiridos en los sistemas hidráulicos servo – actuados.

Figura 1. Módulo de potencia (Estado inicial).



Figura 2. Módulo de carga y módulo de control (Estado inicial)



2. JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

La Escuela de Ingeniería Mecánica ha contado con la INSTRON 1323 como una herramienta de experimentación, para que el estudiante adquiriera conocimiento en cuanto a los tipos de control, recopile datos, realice gráficos y aumente la eficiencia de los sistemas servo actuados.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Aportar a la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de construcción, aplicación y divulgación del conocimiento mediante la dotación de la máquina de ensayos universal INSTRON 1323 como un servomecanismo de posición y fuerza para los estudiantes del laboratorio de servosistemas de potencia fluida de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Acondicionar la máquina universal de ensayos INSTRON MODELO 1323 para su operación como servo de posición y de fuerza en el laboratorio de potencia fluida.
- Controlar la máquina como un servo de posición y fuerza mediante una revisión y optimización del sistema de control en LABVIEW utilizando la tarjeta de adquisición de datos (Tarjeta USB NI DAQ 6212) con la que cuenta en este momento.
- Elaborar una guía de operación de la máquina.

4. DESCRIPCIÓN INSTRON 1323

La máquina de ensayos universal INSTRON 1323 se trata de una prensa hidráulica capaz de realizar pruebas de compresión y tracción (haciendo uso de mordazas hidráulicas), la cual ha servido para la enseñanza de los servomecanismos de posición y fuerza, en donde se muestra, a los estudiantes de la asignatura servosistemas de potencia fluida, una aplicación industrial de los contenidos teóricos ofrecidos en ella.

4.1 ELEMENTOS DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS INSTRO 1323.

En su conformación existen tres sistemas o módulos que son los que engloban la operación de la **INSTRON 1323** como son:

4.1.1 Módulo de potencia: Este elemento es el encargado de suministrar la potencia hidráulica necesaria para la activación de todo el sistema, cuenta con una bomba de pistones axiales con capacidad fija de 14 gpm acoplada a un motor eléctrico¹, a la par, el módulo contiene el tanque de aceite del sistema y el sistema de enfriamiento de este, el cual contaba con un torre de enfriamiento y un intercambiador de calor, debido a las nuevas instalaciones se dotó a la máquina de un enfriador, prescindiendo así de estos elementos; las implicaciones a nivel eléctrico, electrónico y de control se verán en los siguientes capítulos.

¹REINA GARZÓN, Cristian y ARIZA MEDINA, Samir. REINGENIERÍA APLICADA A LA MÁQUINA DE ENSAYOS INSTRON 1323 DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA PARA AMPLIAR SU CAPACIDAD DE SERVICIO, Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas, 2012. 185 p.

Figura 3. Módulo de potencia (Estado final).



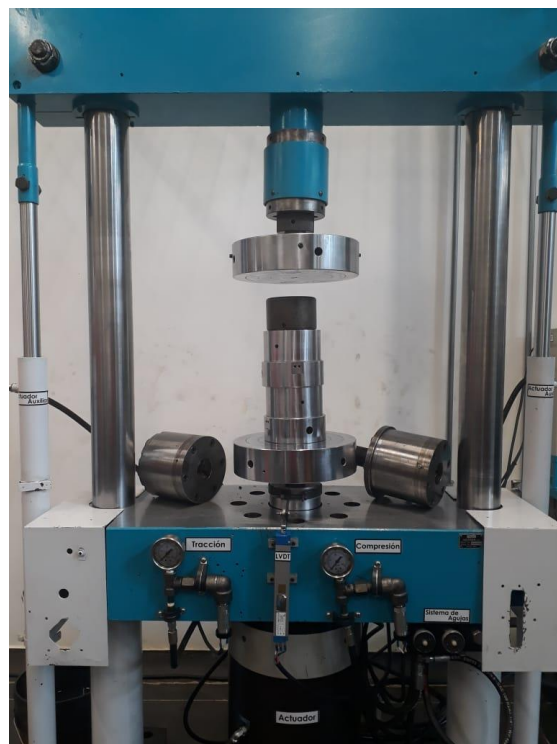
4.1.3 Paquete auxiliar de control: Compuesto por un manifold de control, el cual aloja una válvula antirretorno (Control del paso de aceite presurizado a la servoválvula) y un acumulador para suplir las pulsaciones que se puedan producir en el sistema. Este elemento no solo cuenta con el control de la parte hidráulica de la máquina; también está dispuesto para el control eléctrico y electrónico de la misma, mediante la implementación del cuadro de mando eléctrico, lugar en donde se alojan los elementos necesarios para realizar la lógica eléctrica y alojamiento de la tarjeta de adquisición de datos USB NI DAQ 6212, los sistemas de alimentación para los transductores y la fuente que supe al sistema servoamplificador necesario para la acción de la servoválvula y control PID análogo.

Figura 4. Módulo de control (Estado final)



4.1.4 Módulo de carga: Se puede encontrar en este elemento el destino final de la acción de los dos elementos anteriores, siendo así, el alojamiento del bastidor para el cilindro actuador, el cual posee una carrera de 15 cm y un área efectiva de $40.5 [pulg^2]$, y la servoválvula MOOG SERIE 73.

Figura 5. Módulo de carga (Estado final).



5. MARCO TEÓRICO

5.1 ESTRATEGIAS DE CONTROL.

El presente proyecto de grado tiene como finalidad dejar para el laboratorio de servosistemas de potencia fluida un banco de laboratorio en el que puedan realizar pruebas de control de posición y control de fuerza mediante la aplicación del software LabVIEW, haciendo así una interfaz gráfica fácil de entender por parte de los estudiantes, en la cual, podrán hacer uso del mismo para visualizar de una manera más sencilla el comportamiento y variables implementadas en el proceso de control de posición y/o fuerza a través de una servoválvula.

Las estrategias de control pasan por establecer un estudio del proceso y la interacción de este con el medio²; para una acción se tiene una consecuencia, el control intenta establecer una relación entre dos estados claramente diferenciados como son **Entrada** y **Salida**, una determinada variable de entrada en un proceso, se tendrá entonces una variable de salida acorde a dicho proceso.

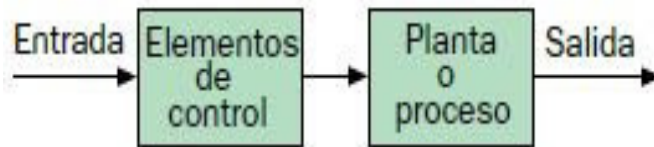
La salida puede estar o no acorde a lo deseado, es entonces cuando se establece forma de realizar un control, donde se puede encontrar:

5.1.1 Control en lazo abierto: El sistema de control en lazo abierto es un modelo matemático en el que la variable de salida no tiene influencia o afectación en la acción de control, de modo que se tiene una relación fija entre el valor de entrada y el de salida, teniendo así, una precisión dependiente de la calibración o exactitud con que el elemento controlador realice su función. En este tipo de

² ÅSTRÖM, Karl J; HÄGGLUND Tore. *PID controllers: Theory, Desing and Tunning*. 2 ed. New York: ISA, 1988. 343 p. ISBN 1-55617-516-7.

control se tiene una desventaja ante la presencia de perturbaciones, las cuales pueden producir errores en la variable de salida controlado³.

Figura 6. Esquema de control en lazo abierto.



Fuente: Makinando: Sistemas de control en lazo abierto y de lazo cerrado. [En línea]. [Recuperado en 22 de junio de 2019] Disponible en: <https://makinandovelez.wordpress.com/2018/02/08/sistemas-de-control-de-lazo-abierto-y-de-lazo-cerrado/>

5.1.2 Control en lazo cerrado: O control con retroalimentación, por que recibe información sobre los estados que va tomando la variable de salida. El elemento comparador recibe información de los cambios que va sufriendo el proceso y establece con ella una comparación (diferencia) o error del estado actual de la variable con respecto al punto de referencia, entre la variable de salida y el valor deseado (set point), para mandarla nuevamente al elemento de control y la decisión tomada por éste estará ayudada de la información del proceso actual, dando así una relación entre la acción de control y la variable de salida, una continua comunicación entre los diferentes elementos del control, generando una mejor forma de controlar y tener menor afectación por perturbaciones internas o externas que puedan producirse. Según Ogata el control en lazo cerrado debe incluir una acción retroalimentada para reducir el error presente en el sistema.

Figura 7. Esquema de control en lazo cerrado o retroalimentado.



Fuente: makinando: Sistemas de control en lazo abierto y de lazo cerrado. [En línea]. [Recuperado en 22 de junio de 2019] Disponible en: <https://makinandovelez.wordpress.com/2018/02/08/sistemas-de-control-de-lazo-abierto-y-de-lazo-cerrado/>

³ OGATA, K, et al, A, Ingeniería de control moderna, Madrid: Prentice Hall. 2010.

5.2 CONTROL ROBUSTO

Existen diferencias entre ambos enfoques de control debido a la naturaleza de estos, en el presente proyecto de grado se tiene un análisis hecho en base a un control en lazo cerrado, así pues, para este caso se hace necesario establecer las bases de los controles en lazo cerrado, se pretende establecer una estrategia de control robusto basado en estrategias de control Proporcional, Derivativo e Integral, o bien, una mezcla entre ellos:

En el presente proyecto, se tomó en cuenta un estudio previo basado en controles en lazo cerrado y a partir de él se determinó que era necesario el diseño de un controlador apoyado en un modelo robusto que funcionara adecuadamente con la INSTRON 1323.

5.2.1 Control Proporcional: Se trata de una relación directa y proporcional del controlador, es una acción de control que lee los cambios en la entrada generando inmediata y proporcionalmente cambios en la salida. A partir de la señal de retroalimentación, o error, se envía una respuesta proporcional al sistema controlado haciendo una merma gradual en la acción, logrando un valor cercano a la salida deseada. Por sí solo, este tipo de control no logra llegar al valor del set point o salida deseada, necesitando del complemento que brindan otras acciones de control.

$$e(t) = SP - PV \rightarrow P_{out} = K_p * e(t) \quad (1)$$

$$SP = Set\ Point \quad PV = Process\ Variable \quad (2)$$

5.2.2 Control Integral: Es una acción de control que provoca un cambio en la salida respecto del tiempo, a una razón proporcional de la cantidad del error. Este tipo de control disminuye al punto de eliminar el error producido en estado estacionario en caso de que la acción proporcional, debido a ser muy grande o pequeña su constante, no fuera suficiente para llegar al valor de set point, así, la acción integral consiste integrar (promediar) el error durante un tiempo

determinado. Este tipo de control, en conjunto con la acción proporcional, corrige el error generado por este último.

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3)$$

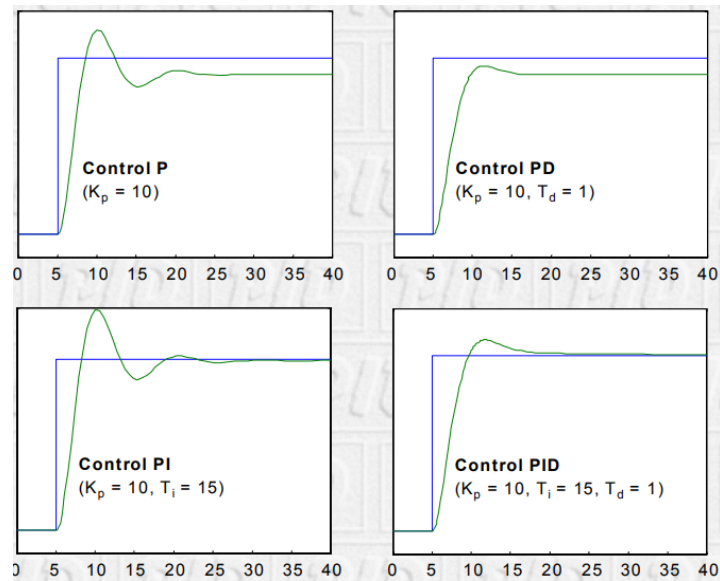
5.2.3 Control Derivativo: Es una acción de control que realiza un desplazamiento en la señal de salida proporcional a la tasa a la cual cambia la entrada. La acción derivativa del controlador reacciona a qué tan rápido cambia la entrada respecto al tiempo, alterando la señal de salida en proporción con la tasa de cambio de entrada. La acción derivativa tiene por característica anticipar el cambio en la pendiente para un sistema lineal bajo una entrada de escalón, su objetivo es mantener lo más bajo posible la medida del error, corrigiéndolo de manera proporcional a la velocidad con que cambio, siendo así una anticipación a los cambios bruscos debido a perturbaciones, aportando estabilidad en un proceso

$$D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Su implementación no es recomendable para sistemas altamente inerciales o constantes.

En la estrategia de control robusto se tiene como acción la unión de los anteriores tipos de controles, en donde en función de la acción a implementar tendremos una combinación de estas, como pueden ser PI, PD o PID según sea necesario, cada uno tiene un comportamiento diferente a la respuesta en cambio de escalón.

Figura 8. Respuesta a señal escalón para diferentes estrategias de control.



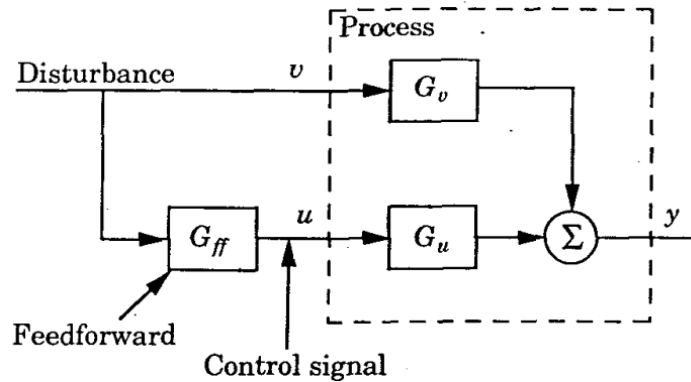
Fuente: MORILLA GARCÍA, Fernando. Controladores PID: El controlador PID [Diapositivas] Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia. Departamento de Informática y automática. 2007

Se aprecia como la combinación de estos parámetros conlleva a una determinada conducta en un sistema a controlar; es propicio para el desarrollo del sistema establecer correctamente el valor de las constantes del controlador, lo que bien se puede realizar usando herramientas de sintonización o de manera empírica (prueba y error).

5.2.4 Compensador Feedforward: El control de un sistema dinámico está propenso a perturbaciones que puedan interferir en su labor, para lo cual, se precisa establecer un control robusto, en donde, adicionando a la acción del controlador PID se necesita tener un agente que se encargue de suplir la afectación producida por estas perturbaciones; perturbaciones que se pueden entender como cambios realizados a la carga soportada por el actuador, un elemento que entra a formar impedimento para la aplicación de la fuerza o posición que se quiera tener, es así que, siguiendo la teoría del control robusto se precisa establecer un compensador por adelantado, el cual, añade la señal de comando necesaria que le haría falta al controlador para que el sistema pueda

afrontar esta perturbación. En la siguiente imagen se ilustra un esquema del diagrama de bloques que especifica complemento al control^{4,5,6,7}.

Figura 9. Diagrama de bloques compensador Feedforward.



Fuente: ÅSTRÖM, Karl J; HÄGGLUND Tore. PID controllers: Theory, Desing and Tunning. 2 ed. New York: ISA, 1988. 343 p. ISBN 1-55617-516-7.

Siguiendo su función de transferencia se tiene que para un compensador Feedforward o por adelante se encuentra que:

$$G_{ff} = K_c \frac{s + zero}{s + polo} \quad (5)$$

Siendo el Zero y Polo, valores que forman un punto en el plano cartesiano, los cuales se debe calcular mediante el denominado método de las raíces⁹, Por el cual se realiza el diseño del compensador, el procedimiento se mostrará anexado en los anexos del presente documento.

⁴ ANDERSON, Wayne, Controlling electrohydraulic systems, New York: Marcel Dekker Inc, 1988.

⁵: ÅSTRÖM, Karl J; HÄGGLUND Tore. PID controllers: Theory, Desing and Tunning. 2 ed. New York: ISA, 1988. 343 p. ISBN 1-55617-516-7.

⁶. FUENTES VILLALOBOS, J., y SARMIENTO VILLAMIZAR, O., Repotenciación de la práctica de servos de posición en control automático (servosistemas de potencia fluida), Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico, Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas, 2013.

⁷. MOHSIN H, A.; JASSIM A, M, Desing and Analisys of Electro-Hydraulic Servo System for Speed Control of Hydraulic Motor", Journal of Engineering, 19(5), pp.[564-566]. 2013.

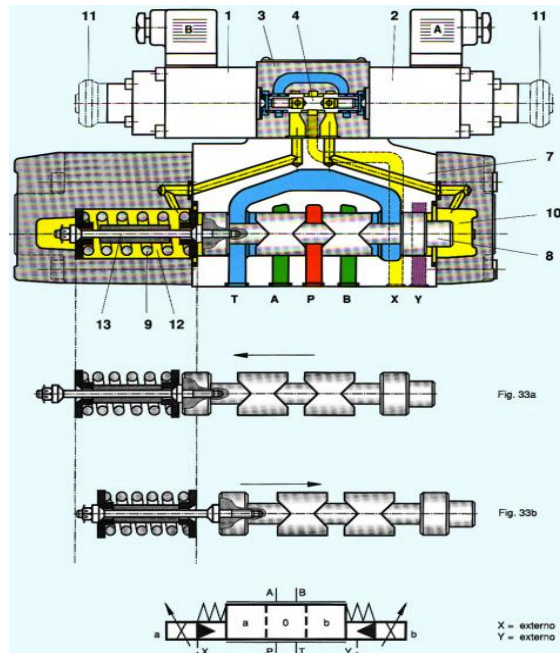
5.3 SERVOSISTEMAS DE POTENCIA FLUIDA

La necesidad de unir la hidráulica y el control electrónico se fue abriendo camino en la industria conllevando al desarrollo y aplicación de conceptos como control de posición, velocidad o fuerza, diseñar válvulas que puedan aportar una mejor consecución en estos objetivos sin acudir a accesorios, es por tanto que partiendo de las válvulas *“todo o nada”*, donde la acción de mando conlleva a un movimiento total en el desplazamiento de un spool (en el caso de las válvulas de control de dirección), por un tipo de válvulas, en donde el movimiento de éste resulta controlado mediante la acción de un solenoide proporcional, que de igual forma, aplica un control proporcional al mando de la válvula basado en el valor de tensión que entre a él; esto sumado a las mejoras en la ingeniería de control conllevó a la creación de las válvulas proporcionales, siendo de gran importancia en la industria; con su implementación se fue mejorando el control de los procesos, y se evidenció, que se precisaba una mejora en su respuesta y precisión, dando origen a las válvulas denominadas *“Servo”* o bien *“servoválvulas”* las cuales cuentan con un tecnología alejada de los solenoides proporcionales para establecer una mayor precisión en el manejo de fluido hidráulico, en las siguientes imágenes se podrán apreciar cortes típicos de este tipo de válvulas y la diferencia en su operación⁸

Durante el semestre se realiza múltiples prácticas en donde el estudiante tiene acceso a este tipo de válvulas, enseñándoles la diferencia en su forma, comportamiento y respuesta ante diferentes valores de tensión, es así que se hace prioritario que antes de abordar el desarrollo de las prácticas de servo de posición y fuerza se halla enseñado una introducción a válvulas proporcionales y servoválvulas, de modo que se pueda apreciar, el cómo el control reacciona con mayor o menor precisión dependiendo de qué tipo de válvula se implemente.

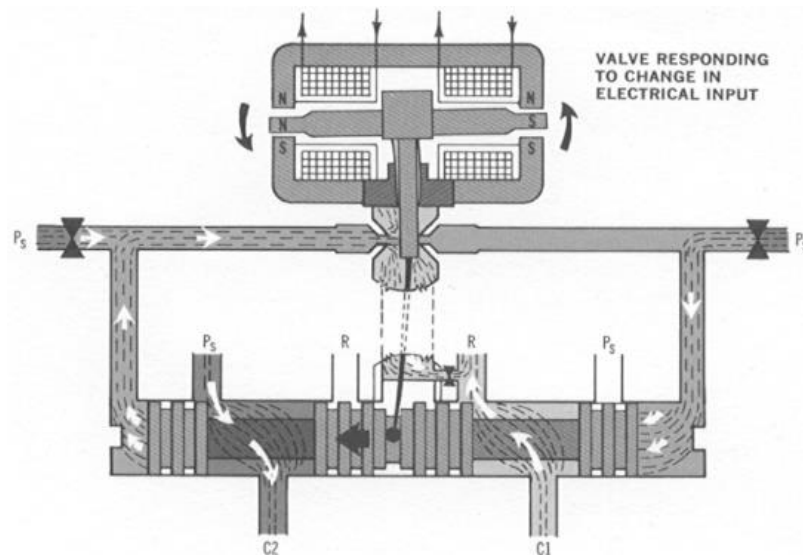
⁸.Maskrey, R, and Thayer, W., A Brief History of Electrohydraulic Servomechanisms", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 100(2), 1978, pp. 110-116.

Figura 10. Válvula proporcional direccional pilotada centrada por resortes.



Fuente: Ewald, R, et al. Proportional and servo valve technology, Lohr am Main. Hinkel-Druck GmbH, 1989.

Figura 11. Corte servoválvula MOOG 73 SERIES.



Fuente: Catálogo 731 480 MOOG 73 Series.

Se observa la gran diferencia entre el modo de operación de una válvula proporcional y una servo válvula, dado que si bien la primera se sirve de una acción proporcional aplicada a un solenoide para generar la acción de mando, en la segunda tenemos la acción de un motor de torsión, el cual, ante una señal de entrada flexiona la lengüeta conectada al spool y obturando uno de los orificios, haciendo así que la presión se aumente en él y generando un desequilibrio hidráulico que genera un corrimiento en el spool hasta el punto en que vuelva a estar en equilibrio^{9,10,11}

Las acciones de control de posición, velocidad y fuerza se pueden realizar sin el uso de accesorios adicionales como finales de carrera, válvulas reguladoras de caudal y válvulas reguladoras de presión, para ello, se acude al control electrónico según las estrategias mencionadas anteriormente, así pues, en el presente proyecto de grado se tiene como finalidad adecuar la máquina de ensayos INSTRON 1323 del laboratorio de potencia fluida de la escuela de ingeniería mecánica como un servo de posición y fuerza, para lo cual, se parte de las siguientes ilustraciones de las actividades a realizar.

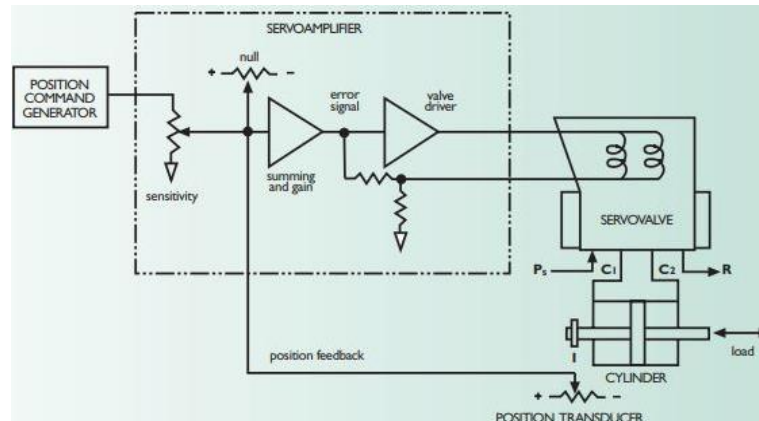
5.3.1 Servo de posición: En esta acción de control, como su nombre indica, el objetivo consiste en obtener un control de la posición del actuador de acuerdo con una cierta señal deseada (set point) a la cual se debe llegar, para ello, se tiene como esquema el siguiente ejemplo de un típico control de la posición.

⁹. Ewald, R, et al. Proportional and servo valve technology, Lohr am Main. Hinkel-Druck GmbH, 1989.

¹⁰. JELALI, M, Hydraulic servo-systems: Modelling, Identification and Control, Londres: Springer.2003

¹¹. Maskrey, R, and Thayer, W., A Brief History of Electrohydraulic Servomechanisms", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 100(2), 1978, pp. 110-116.

Figura 12. Esquema de control de posición usando servoválvula.



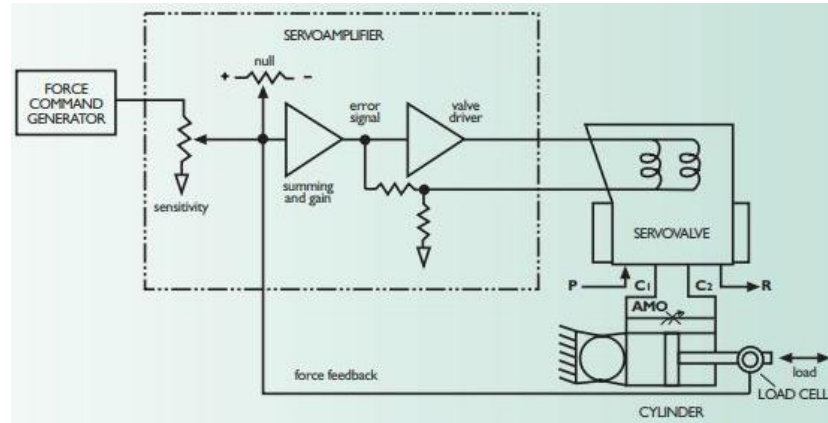
Fuente: MOOG. ELECTRO-HYDRAULIC VALVES A TECHNICAL LOOK [En línea] (Recuperado en 12 de enero de 2019) Disponible en: http://www.mooginfo.com/Global/FileLib/EH/Moog-ServoValves-Techn_Look-Overview-en.pdf.

Se puede apreciar entonces, que bajo una señal de comando se empieza el desplazamiento del actuador, el cual, consigo, lleva acoplado un transductor de posición, siendo esta la señal de “**feedback**” o retroalimentación y generará una mayor o menor señal de error, en función de qué tan cerca o lejos se halle de la posición deseada, así pues, a medida que se acerca el transductor de posición a la señal deseada, hará que la señal de error enviada sea cada vez más pequeña, deteniendo entonces el movimiento del spool en la servoválvula, logrando así el control de la posición en el actuador. Para el presente proyecto se tiene como tal adaptado un transductor de posición PL 150 T6, el cual, al igual que el actuador cuenta con una carrera de 150 [mm], será éste el máximo comando de “*set point*” posible que podrá alcanzar el sistema.

5.3.2 Servo de fuerza: La estrategia de control de la presión, y por ende de la fuerza, consiste en establecer la lectura proveniente de dos transductores de presión (ubicados en lado compresión y tensión), de modo que sean estos, quienes aporten la posibilidad de establecer la presión (o fuerza) que se quiere aplicar en el sistema; para ello, se acude a una resta de ambas lecturas (diferencial de presión), y teniendo en cuenta que la fuerza es el producto de la presión por su área; para el presente proyecto se cuenta con un área efectiva de $40,5 \text{ pulg}^2$, lo cual arrojaría una lectura indirecta del valor de la fuerza aplicada

al sistema. En la siguiente imagen se puede apreciar un esquema típico de un servo de fuerza.

Figura 13. Esquema de control de fuerza usando servoválvula.



Fuente: MOOG. ELECTRO-HYDRAULIC VALVES A TECHNICAL LOOK [En línea] (Recuperado en 12 de enero de 2019) Disponible en: http://www.mooginfo.com/Global/FileLib/EH/Moog-ServoValves-Techn_Look-Overview-en.pdf.

Existe la posibilidad, como se ve en la imagen, de realizar un servo de fuerza teniendo como elemento de retroalimentación una celda de carga, ejemplo, una celda de carga tipo S, la cual, ante la aplicación de una fuerza genera una diferencia de tensión que será leída y establecida como variable de proceso durante la operación de control de fuerza; para el caso concreto de este proyecto de grado se tienen dos transductores de presión *SIEMENS SISTRANS P Z SERIES 7MF1563*, en los cuales la diferencia en sus lecturas sea la variable del proceso durante el control de fuerza en el sistema.

Para ambos sistemas (control de posición y fuerza) se efectúa un arreglo en lazo cerrado porque se genera un mayor control en el sistema, haciendo lectura y efecto sobre los elementos directamente implicados en la medición de las variables físicas a controlar, como lo son el transductor de posición y los transductores de presión.

6. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La realización del presente proyecto de grado se llevó a cabo en diferentes fases, en las cuales se evaluó el estado de la INSTRON 1323, la cual se encontraba desarmada y para colocarla en funcionamiento se determinaron, tres ejes principales de acción: montaje eléctrico, montaje electrónico y control computarizado, todo ello con el fin de adecuarla como un servo de posición y fuerza.

6.1 MONTAJE ELÉCTRICO

En esta etapa del proyecto se partió de la recepción de los diferentes módulos que componen la máquina desconectados entre sí, a nivel eléctrico, y su paulatino arreglo, a saber:

6.1.1 Módulo de potencia:

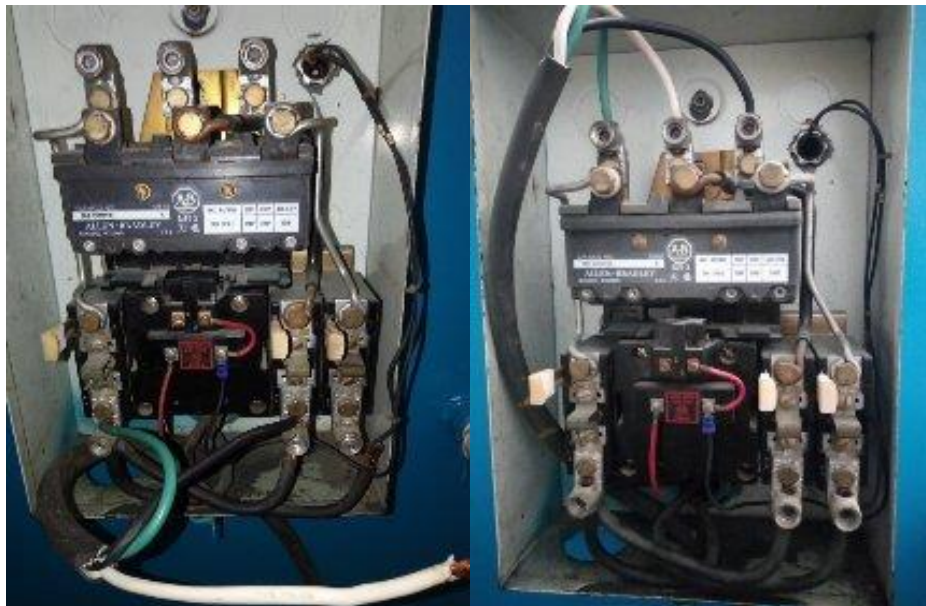
6.1.1.1 Motor bomba de pistones: Las conexiones para alimentar el motor eléctrico de la bomba se hallaban desconectadas de la fuente trifásica necesaria para su funcionamiento, una vez establecida la conexión, se evidenció que existía un problema en la acción del “*star*” del motor, el cual debió ser desmontado para su posterior reparación: El problema encontrado fue la sulfatación en las borneras del arrancador, lo cual producía un mal contacto entre las terminales eléctricas impidiendo una completa ejecución con las líneas de alimentación.

Figura 14. Desmontaje de arrancador de la bomba.



Una vez realizada la reparación y comprobación del correcto funcionamiento se estableció la conexión para dar arranque al motor de la bomba en la máquina.

Figura 15. Antes y después del arrancador de motor-bomba de pistones.

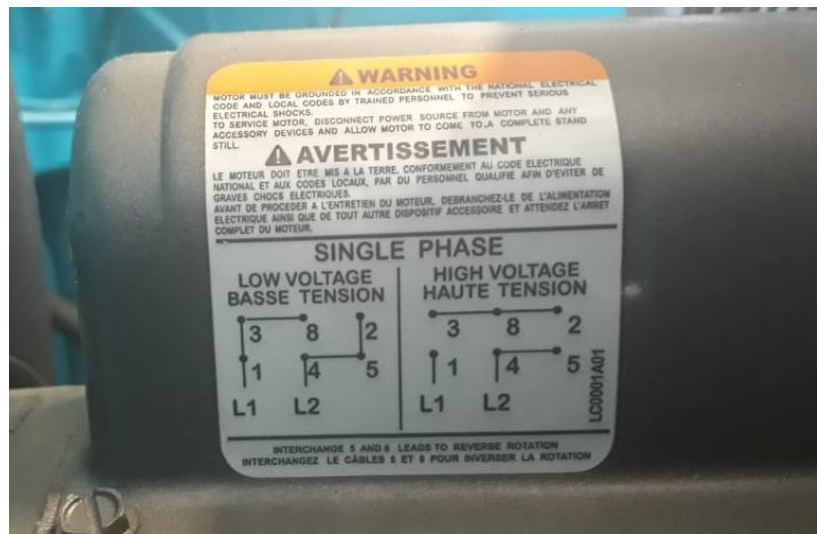


6.1.1.2 Conexión de alimentación de terminales para el enfriador: El ventilador del enfriador cuenta con un motor alimentado a 220V, el cual es conectado en los cables de salida del arrancador del motor de la bomba,

haciendo uso de dos fases; de las tres existentes. La conexión viene especificada por el fabricante y es la siguiente:

Es importante aclarar que la conexión de motor del ventilador se realizó para alto voltaje (HIGH VOLTAGE) y no fue realizada directamente al arrancador, porque primero pasa por un control de temperatura el cual se profundiza el ítem 4.2.6.

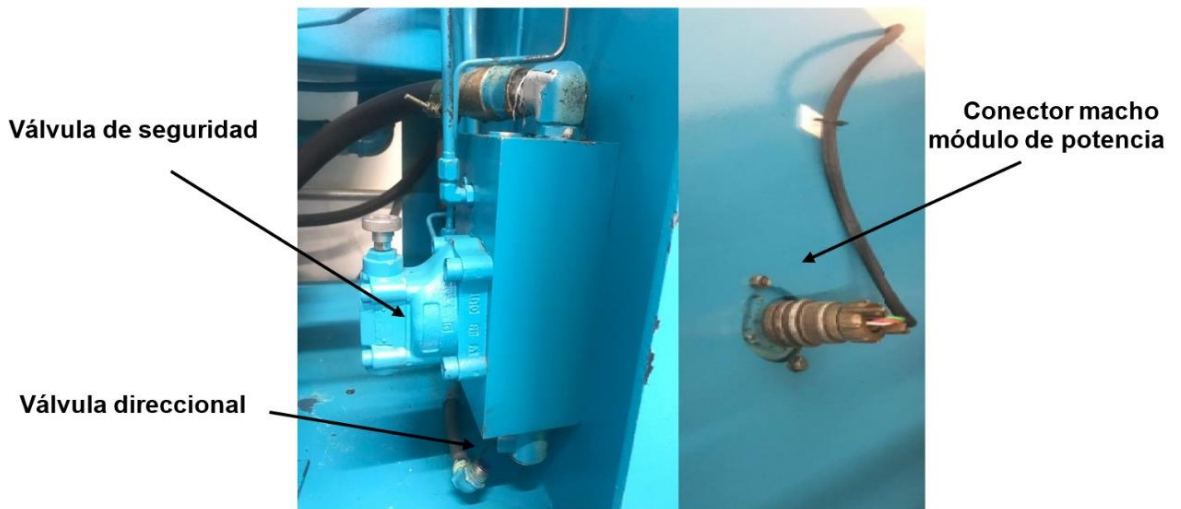
Figura 16. Conexión de motor del enfriador a 220V



Se realizó la conexión para alta tensión.

6.1.1.3 Salida del módulo: En este punto se identificaron las conexiones necesarias para realizar el control de la bomba de pistones y la válvula de seguridad, y dejarlas listas para realizar la conexión en el cuadro de control. Antes se disponía de un cable con 12 conexiones, de las cuales 6 estaban operando realmente, y los sobrantes estaban cortados antes del conector macho al módulo de potencia; esto generaba cortos y energización de la estructura metálica de este módulo, la solución fue usar un cable rencauchutado de 4 hilos, calibre 12, uno de ellos dirigido al solenoide del arrancador del motor trifásico de la bomba de pistones, otro al solenoide de la válvula direccional encargada del desventeo del sistema y los otros dos son las respectivas tierras.

Figura 17. Salida del módulo y válvula de seguridad.

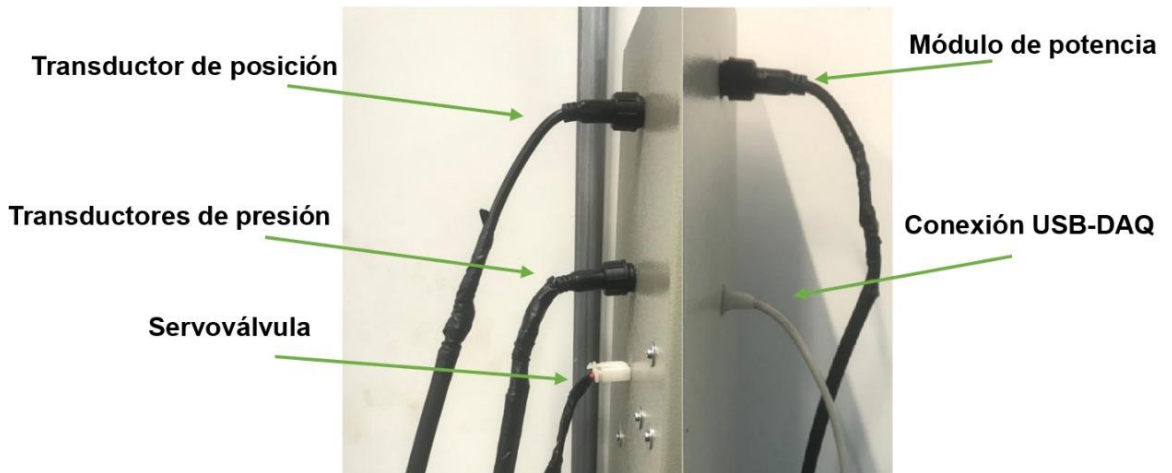


6.1.2 Módulo Auxiliar de Control: Para este elemento se realizaron varias acciones, tales como:

6.1.2.1 Conexiones provenientes del módulo de potencia y módulo de carga: En el módulo de carga se encuentran alojados el transductor de posición, los dos transductores de presión y la servoválvula, todos conectados y acoplados al módulo de control mediante orificios realizados en su lado izquierdo; al costado derecho ubicamos la salida del módulo de potencia y la conexión USB-DAQ

Antiguamente, las conexiones llegaban de manera directa, al módulo, en esta etapa se decidió que cada conexión sea independiente y desmontable lo cual hace que la INSTRON 1323 sea un conjunto de módulos independientes

Figura 18. Conexiones costado izquierdo y derecho.



6.1.2.2 Válvula Direccional Piloto: En el manifold de control se encuentra incorporada la válvula antirretorno pilotada hidráulicamente que restringe el paso de aceite presurizado hacia la servoválvula, su acción viene dada por la conmutación de un solenoide de una válvula direccional, que es quien, da el pilotaje para su activación; para la realización de este elemento con el cuadro de control se procedió con un orificio en la parte baja del mismo que conlleve los cables de la válvula.

Figura 19. Válvula direccional piloto.



Ambos elementos alojados en el manifold de control, en la siguiente figura se puede apreciar la identificación de cada uno.

Figura 20. Válvula direccional piloto y antirretorno pilotada.



6.1.2.3 Inicio, apagado y funcionamiento: Para proteger la INSTRON 1323 y evitar errores en su funcionamiento se estableció un protocolo de operación el cual garantiza que solo hay una única manera de encenderla y apagarla.

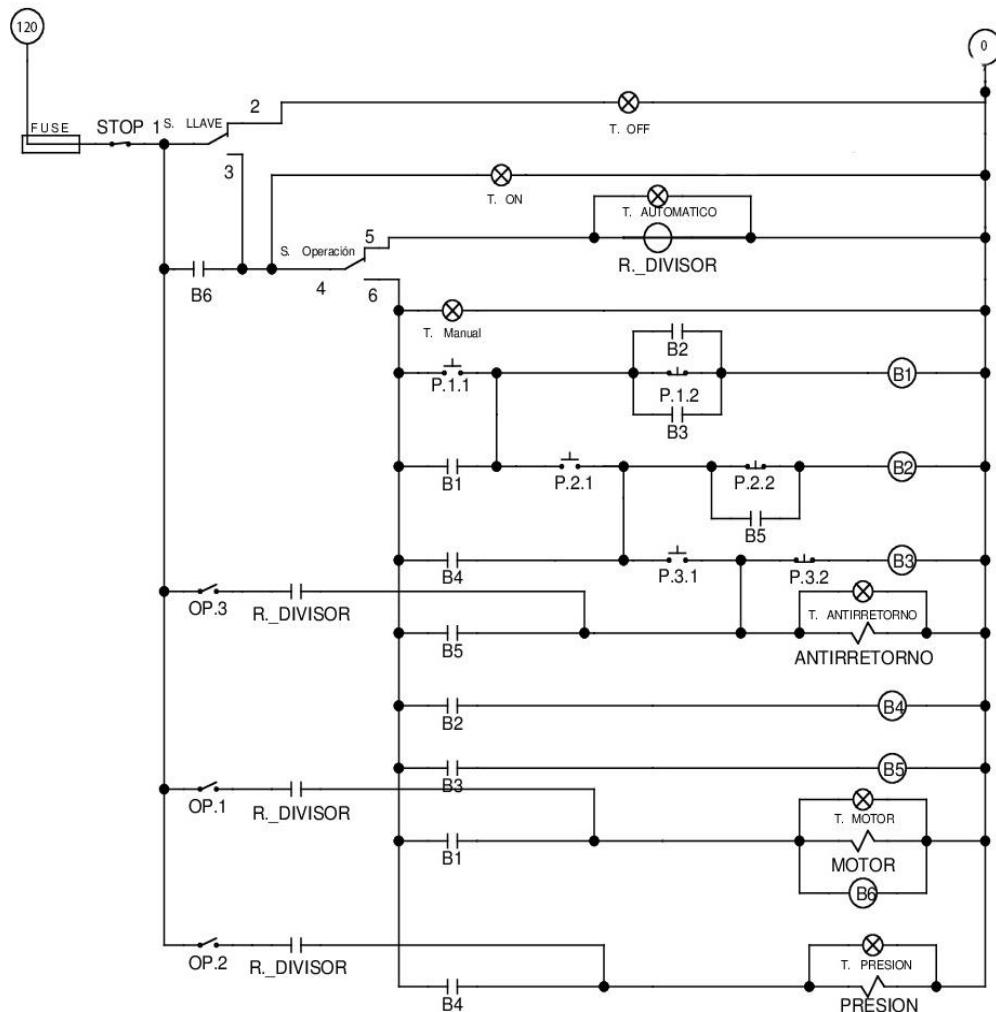
El protocolo del encendido consiste en primer lugar energizar el motor eléctrico, segundo paso: “desventear” la válvula de seguridad y finalmente se activa la válvula direccional encargada de abrir la antirretorno.

Para el apagado también se diseñó una única forma, y es realizar la secuencia anterior, en sentido contrario, es decir, primero desactivar la válvula direccional piloto la cual produce el cierre de la válvula antirretorno, segundo, ventear la válvula de seguridad y finalmente realizar apagado del motor eléctrico de la bomba. Intentar colocar en marcha o apagar la INSTRON con un orden diferente al descrito anteriormente es infructuoso.

La INSTRON cuenta con un “switch” accionado por una llave, el cual energiza el tablero de control. El protocolo de seguridad hace que cuando la maquina está encendida no se pueda desenergizar porque el relé #6 guarda la señal eléctrica del motor de la bomba. La lógica cableada se realiza a través de relés, cada uno de 6 pines y un relé de 12 pines, los cuales ya venían anteriormente dispuestos

en el módulo de control. Solamente se adicionó uno que se necesitaba para guardar la señal eléctrica de del encendido del tablero de control. La lógica cableada se observa en la siguiente imagen.

Figura 21. Lógica cableada para arranque manual.

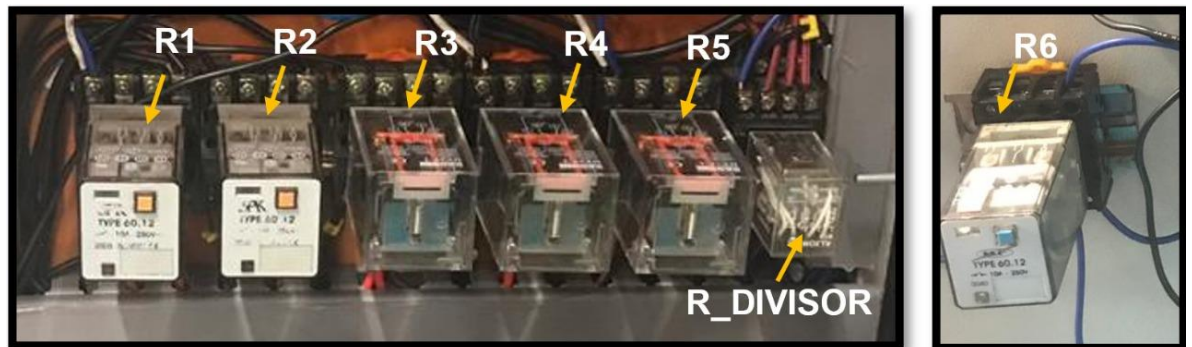


Los elementos denominados con “S.” indican selector (switch de tres posiciones); los elementos denominados como “T” hacen referencia a testigos (leds); el elemento denominado “R_divisor” denotan un relé de 12 pines (del cual se hablará en un posterior apartado, 4.2.6); la denominación Px, y, hace referencia a los pulsadores dispuestos en el módulo de control, siendo x la fila, y la columna. Los elementos denominados con la letra “B” hacen referencia a la activación de las bobinas en cada uno de los respectivos relés y finalmente, la

referencia realizada con las letras “OP.” Hace referencia a los optoacopladores (Apartado 4.2.6).

Para complementar lo anteriormente expuesto se tienen las siguientes figuras.

Figura 22. Relés de lógica cableada.



La ubicación de los pulsadores, llaves y selector se observa en la siguiente figura:

Figura 23. Elementos de lógica cableada.



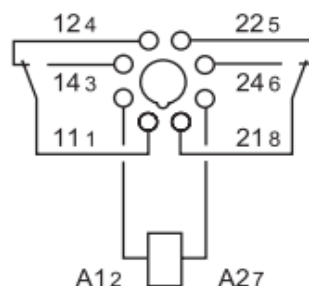
En la siguiente figura se observa el protocolo de encendido de la INSTRON 1323, testigo a testigo.

Figura 24. Secuencia de encendido, desventeo y antirretorno.



Detalles de relés usado en la lógica cableada.

Figura 25. Relés lógica cableada FINDER 60.12.



Fuente: Finder. General Purpose relay 6-10A [En línea]. [Recuperado en 12 de Julio de 2019] Disponible en: http://www.farnell.com/datasheets/2790240.pdf?_ga=2.167507134.1259680180.1563031934-96503796.1563031934.

Existen dos formas para operar la INSTRON una en modo automático y la otra en el manual. En el panel de control se ubicó un interruptor de selección que energiza o desenergiza los elementos necesarios de la operación que el usuario haya seleccionado. Si es manual permite la operación por medio de los botones del tablero, si se elige la forma automática activa la funcionalidad por medio del computador cuya comunicación se realiza por el puerto USB-DAQ, para ser activado mediante la interfaz gráfica LabVIEW.

6.2 MONTAJE ELECTRÓNICO

En esta fase se realizaron los ajustes para el correcto funcionamiento electrónico de la alimentación del transductor de posición y la alimentación de los dos transductores de presión; más los circuitos del servoamplificador, PID análogo y corrector de voltaje, además se realizaron las conexiones que entran y salen de la tarjeta de adquisición para la correcta operación desde el computador.

6.2.1 Transductor de posición: Este elemento es el encargado de medir la posición del actuador durante el desarrollo del servo de posición, y lo hace mediante el envío de un diferencial de voltaje (en el rango de 0V a 10V) La comunicación entre el control computarizado y el transductor se realiza por medio de la tarjeta de adquisición de datos, consiste en leer el voltaje emitido, enviarlo al computador, ejecutar, borrar y comenzar una nueva lectura. Para la alimentación del LVDT se requiere una tensión de 10 V, la cual es suministrada a través de una fuente $\pm 12V$, con la cual se logró un diferencial de 24V, que pasa por un regulador fijo de tensión LM7810.

Figura 26. Conexión y esquema eléctrico del transductor de posición.

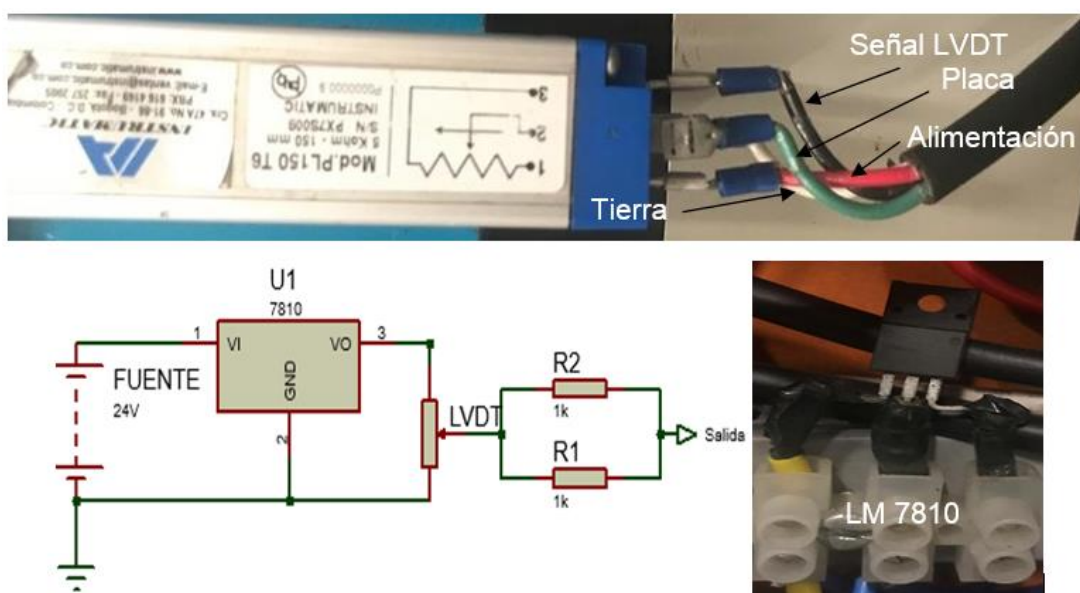
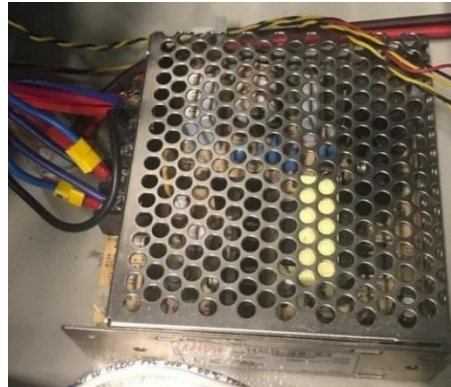


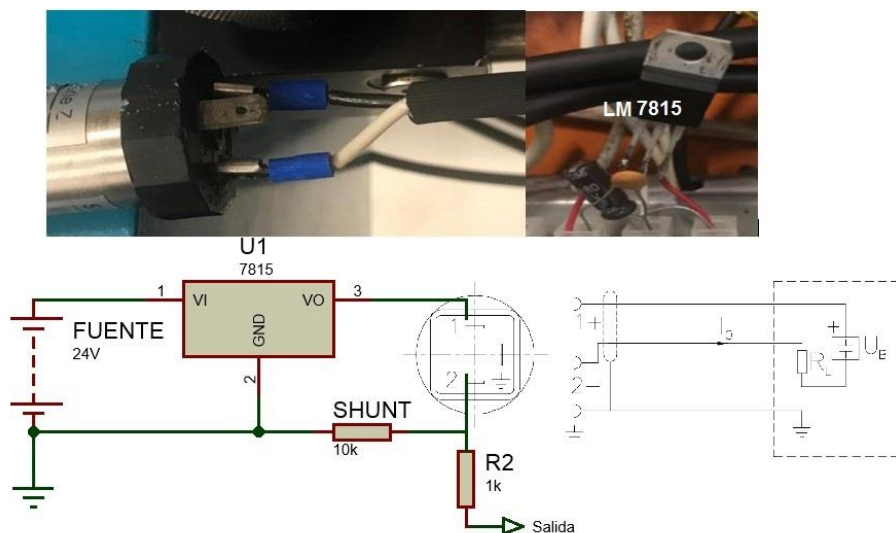
Figura 27. Fuente 24V.



6.2.2 Transductor de presión: Para la detección de la presión en ambos lados de las cámaras del actuador se cuenta con dos transductores de presión piezo-eléctricos, cada uno de ellos requiere una alimentación de tensión de 15 V, que se toman a partir de la fuente ± 12 V pasando por un regulador fijo de tensión LM7815.

La comunicación entre el control computarizado y los transductores de presión se realiza por medio de la tarjeta de adquisición de datos y consiste en leer el voltaje emitido, enviarlo al computador, ejecutar, borrar y comenzar una nueva lectura.

Figura 28. Conexión transductores de presión.



Debido a que los transductores de presión transducen su lectura en corriente, con un valor mayor a la capacidad de la DAQ, se implementa una resistencia denominada “*Shunt*”, que convierte la lectura en corriente a tensión eléctrica que puede ser leída por la tarjeta de adquisición de datos.

6.2.3 Servoamplificador: La conexión de la servoválvula hacia la tarjeta de adquisición debe estar atravesando un circuito servoamplificador, debido a que la corriente que suministra la tarjeta es incapaz de suplir la necesidad de la válvula; y en vista que el motor de torsión de la servoválvula requiere de valores de corriente mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 1. Valores de corriente desarrollada en servoválvula 73 series MOOG

Resistencia nominal por bobina (OHMS)	Corriente recomendada (mA)	
	Configuración paralela, diferencial o simple	CONFIGURACIÓN SERIE
22	200	100
40	201	25
80	202	20
130	203	15
200	204	10

Fuente: Moog: Moog series 73 (Adaptada) [En línea]. [Recuperado en 12 de Julio de 2019] Disponible en: <https://www.moog.com/literature/ICD/73seriesvalves.pdf>

Como se observa, los valores de corriente recomendada superan de manera ostensible los permitidos por la tarjeta de adquisición, así se evidencia en la siguiente tabla.

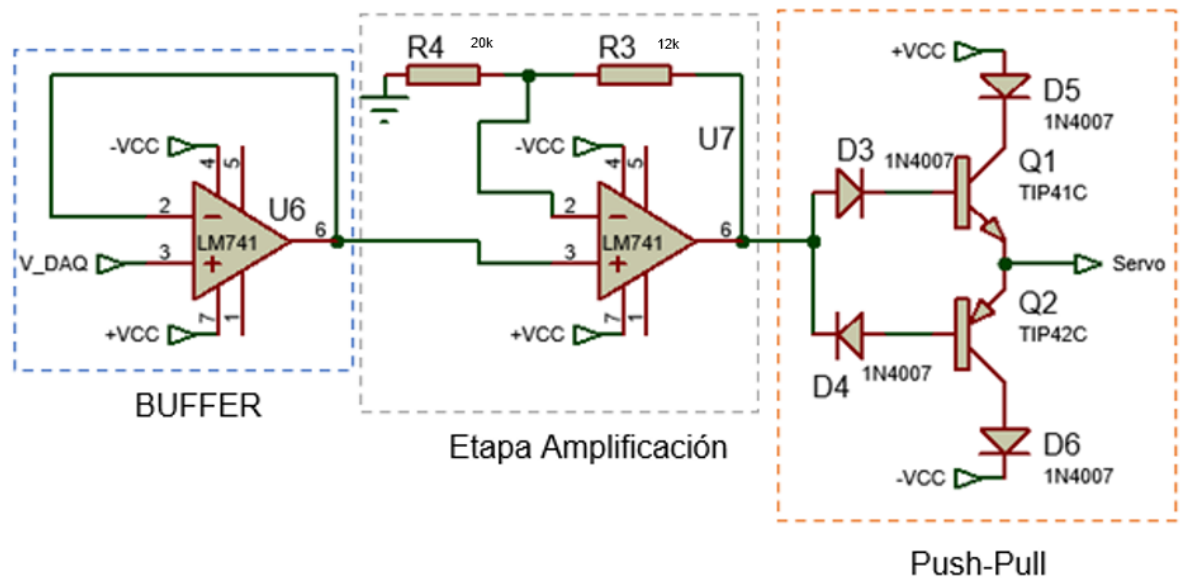
Tabla 2. Límite de corriente productos NI USB

Salida Analógica	
Número de canales	2
Rango de salida	$\pm 10V$
Corriente de conducción en la salida	2mA
Corriente máxima	2,4mA

Fuente: Moog: Moog series 73 (Adaptada) [En línea]. [Recuperado en 12 de Julio de 2019] Disponible en: <https://www.moog.com/literature/ICD/73seriesvalves.pdf>

El motor de torsion con el que cuenta la servovalvula es alimentado por una tension de ± 10 [V] y los valores de corriente requeridos por las bobinas son superiores a los que puede soportar la DAQ, en caso de omitir este circuito se quemaría tarjeta de adquisición 6212, por lo se hizo necesaria la implementación de un circuito que se describe en la siguiente figura.

Figura 29. Esquema circuito servoamplificador.



Este circuito cuenta con diferentes etapas, una vez la señal de tensión que envía la tarjeta DAQ 6212 para comandar la válvula llega a un seguidor de tensión, o “*Buffer*” hecho a partir de un OPAM (Amplificador Operacional (por sus siglas en inglés)) se aísla esta señal y la respuesta del OPAM es el mismo valor de tensión

que envió la tarjeta, pero suministrada a partir de la fuente que alimenta a este seguidor de tensión.

Tras realizar pruebas se determinó que los valores suministrados de tensión enviados por la DAQ se reducían debido a distancia de los cables en un factor de aproximadamente de 1.6, por lo cual, se hacía necesaria una etapa de amplificación de voltaje (Ver ecuación 20).

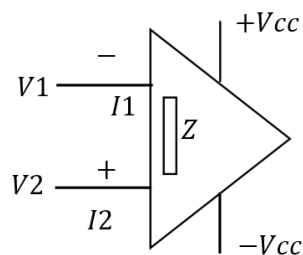
Una vez superada la etapa de amplificación, se pasa por un “*Push-Pull*”, el cual suministra la corriente que los OPAM no pueden dar para el funcionamiento del motor de torsión.

Los amplificadores operacionales tienen una impedancia (Z) de entrada muy alta, incluso en los cálculos se aproxima a infinito, por ende, se dice que la corriente es igual a cero ($I = 0$) por lo tanto:

$$I1 = I2 = 0 \quad (6)$$

En la siguiente figura se tiene una ilustración de un amplificador operacional en su forma básica.

Figura 30. Amplificador Operacional.



Entendiéndose entonces que para los amplificadores se tiene la siguiente afirmación.

$$\underline{I1 = I2 = 0} \quad (6)$$

$$V_2 - V_1 = V_Z \quad (7)$$

$$V_2 - V_1 = I * Z \text{ "Ley de Ohm"} \quad (8)$$

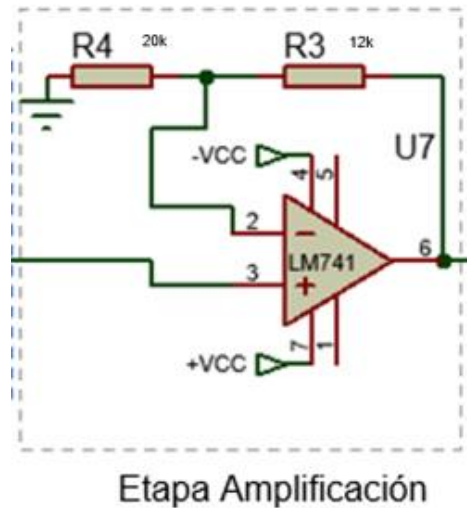
$$V_2 - V_1 = 0 \quad (9)$$

$$\underline{V_2 = V_1} \quad (10)$$

Estas expresiones 6 y 10, rigen a todos los amplificadores.

Para la etapa de amplificación, la cual consta de un amplificador no inversor, se recurre al siguiente cálculo.

Figura 31. Amplificador no inversor



De la ecuación (6) y la ecuación (10) se llega al siguiente procedimiento, en el cual, se ilustra que el voltaje de entrada por la bornera 3 y la bornera 6 son la entrada y salida respectivamente.

$$\text{Segun (5)} \quad V_3 = V_{in} \quad (11)$$

$$V_6 = V_{out} \quad (12)$$

$$V_2 = V_{in} \quad (13)$$

$$I_1 = \frac{(V_{out} - V_{in})}{R_3} \quad (14)$$

$$I_2 = \frac{V_{in}}{R_4} \quad (15)$$

$$\text{Segun (1)} \quad \frac{(V_{out} - V_{in})}{R_3} = \frac{V_{in}}{R_4} \quad (16)$$

$$V_{out}R_4 - V_{in}R_4 = V_{in}R_3 \quad (17)$$

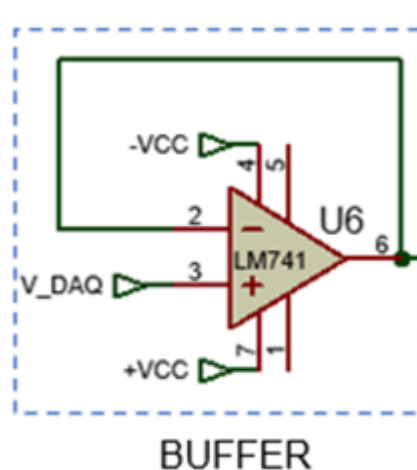
$$V_{in}(R_3 + R_4) = V_{out}R_4 \quad (18)$$

$$V_{in} \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right) = V_{out} \quad (19)$$

$$\text{Reemplazando } \frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(1 + \frac{12}{20} \right) = 1.6 \quad (20)$$

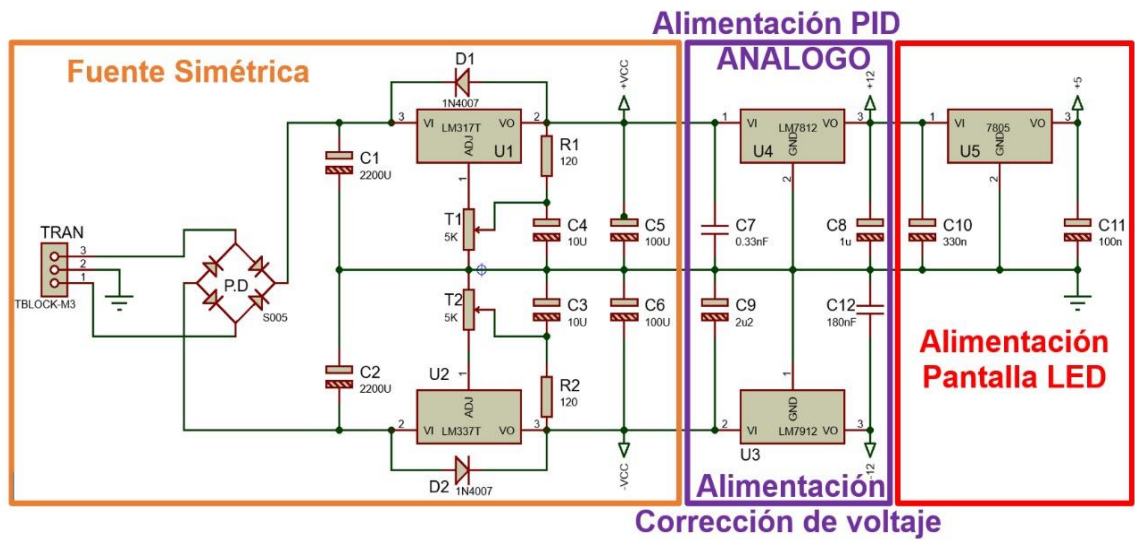
La ecuación 19 es una expresión general para amplificadores no inversores; en caso de necesitar un seguidor de tensión o buffer (ganancia 1) se requiere que R3 sea cero (por lo tanto se quita la resistencia) y R4 tenga obligatoriamente un valor infinito (Por ello se quita esta conexión).

Figura 32. Seguidor de tensión.



En el fondo del tablero de control se encuentra el servoamplificador, al cual se le integra la fuente simétrica de alimentación y sus derivados. En la siguiente figura se muestra el esquema de conexión de esta fuente y sus derivados.

Figura 33. Esquema fuente simétrica y derivados.



Además de la regulación a $\pm 15V$, se cuenta con una derivación para una tensión de $\pm 12V$ que alimenta el sistema de PID analógico y el circuito corrector de voltaje, junto a una derivación de tensión de $+5V$ que alimenta la pantalla, ubicada en el módulo de control.

Para el montaje de la fuente se utilizó un transformador de 120 V AC a 26 V AC, el cual presenta impedancia primaria (L_p) e impedancia secundaria (L_s), que influye en la salida de la potencia y la respuesta de la frecuencia.

$$L_p = \left(\frac{V_i}{V_o} \right)^2 * L_s$$

$$\text{Reemplazando } L_p = \left(\frac{120}{26} \right)^2 * 1 = 21.3 \Omega$$

Este dato de impedancia primaria fue importante para la realización de las simulaciones en el software proteus 8.8 professional.

Al rectificar la señal de tensión alterna para llevarla a tensión continua mediante el puente rectificador de diodos, se genera un aumento en la tensión del puente

rectificador, lo cual es importante en la tensión de llegada a los reguladores de tensión usados (LM317 y LM337).

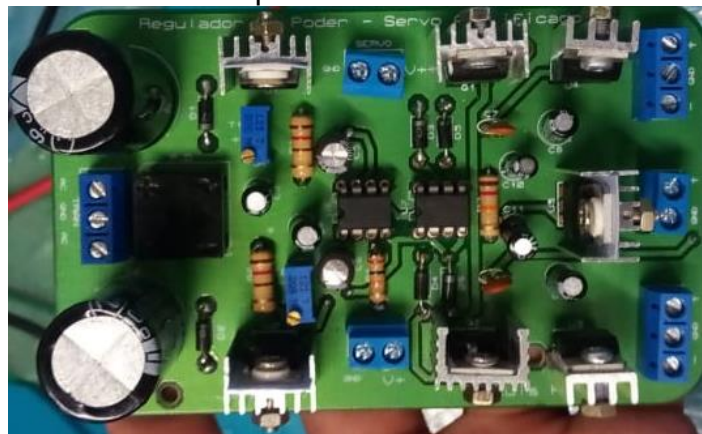
Este aumento en la tensión se tiene patente en la siguiente ecuación

$$V_{rms} = V_{transformador_{out}} * \sqrt{2}$$

$$V_{rms} = 26\sqrt{2} = 36.77 \text{ V (DC)}$$

Conforme a lo anterior, el circuito servoamplificador está integrado en su conjunto por la fuente de alimentación, el seguidor de voltaje y finalmente el “Push-Pull”, esto se ilustra en la siguiente figura.

Figura 34. PCB circuito servoamplificador.



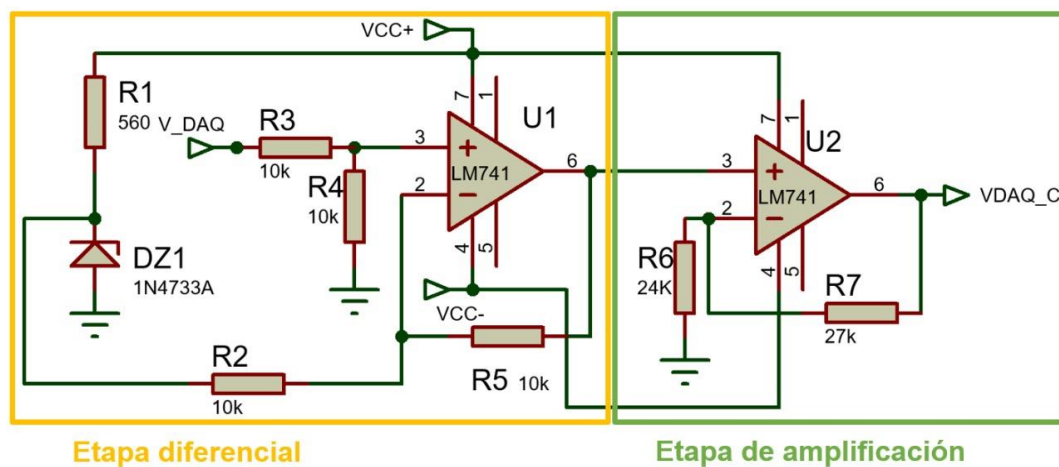
De una forma más detallada, los componentes se ubican de la siguiente manera.

Figura 35. Vista sin componentes circuito servoamplificador.



6.2.4 Circuito corrector de voltaje y PID análogo: Como se mencionó en el anterior apartado se tiene un circuito corrector de voltaje, debido a que durante las labores de montaje la DAQ sufrió un percance y tuvo que ser reemplazada por otra muy similar, la cual se encuentra descalibrada, es decir, entrega un rango de tensiones entre 0.81 V y 10 V, cuando debería suministrar $\pm 10V$; se hace necesario implementar este circuito para relevar esta función en el rango que aporta la DAQ. El circuito empleado se muestra en la siguiente figura.

Figura 36. Circuito corrector de voltaje



Para implementar el circuito de corrección de voltaje se desarrollaron dos etapas, para convertir el rango de la DAQ que presenta una descalibración de 0.81V a 10V, siendo lo correcto de -10V a 10V. Para lograrlo lo primero que se realizó fue determinar el rango máximo de operación posible de la DAQ, y se hizo hallando la diferencia entre el máximo y el mínimo valor de tensión ($10 - 0.81 = 9.19V$). El rango máximo es en el que la DAQ desarrolla su mayor sensibilidad. La segunda etapa consistió en determinar un nuevo punto de simetría que determine un nuevo “0” o inflexión el cual se comunica a la tarjeta de adquisición de datos para que lo traduzca en tensiones positivas o negativas; para lograrlo se determinó que a la mitad del rango era necesario adicionarle el mínimo valor de la DAQ. Hallado el nuevo punto de simetría en el rango ideal ($9.19/2 + 0.81 = 5.405V$); solo faltaría encontrar la constante de aumento para que la salida de la DAQ de 0.81V, su voltaje corregido sea -10V, por ende $(0.81 - 5.05) \times \text{ganancia} = -10$, se tendría una ganancia de 2.3584. Matemáticamente hallado

el valor, se empleó un diodo Zener con tensión nominal 5.1V para corregir el voltaje, cuyo valor es el más similar encontrado a nivel comercial; las referencias se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3. Voltajes nominal diodo Zener.

Referencia	Tensión nominal
1N4732A	4,7
1N4733A	5,1
1N4734A	5,6

Fuente: Vishay. Zener Diodes (Adaptada) [En línea]. [Recuperado en 13 de Julio de 2019] Disponible en: <https://www.vishay.com/docs/85816/1n4728a.pdf>.

Mediante pruebas se determinó que había una mayor simetría con los voltajes usando el diodo Zener 1N4733A. Finalmente se cuenta con la etapa de amplificación, la cual se encarga de recibir el valor de tensión diferencial y amplificarla, esto mediante la expresión (19):

$$V_{in} \left(1 + \frac{R3}{R4} \right) = V_{out} \quad (19)$$

$$\text{Reemplazando } \frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(1 + \frac{27}{24} \right) = 2.125 \quad (25)$$

Obteniendo así una ecuación para el sistema de la siguiente forma:

$$(V_{DAQ} - V_{zener}) * \left(1 + \frac{R7}{R6} \right) = V_{DAQc} \quad (26)$$

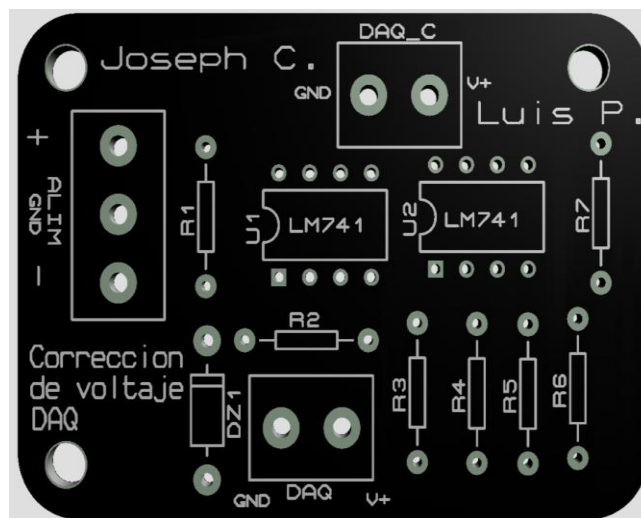
Reemplazando se tiene un rango de voltajes entre -9.2 V y 10.4 V.

Figura 37. PCB circuito correcto de voltaje.



De modo que el circuito mostrado se muestra a continuación ya dispuesto en la PCB.

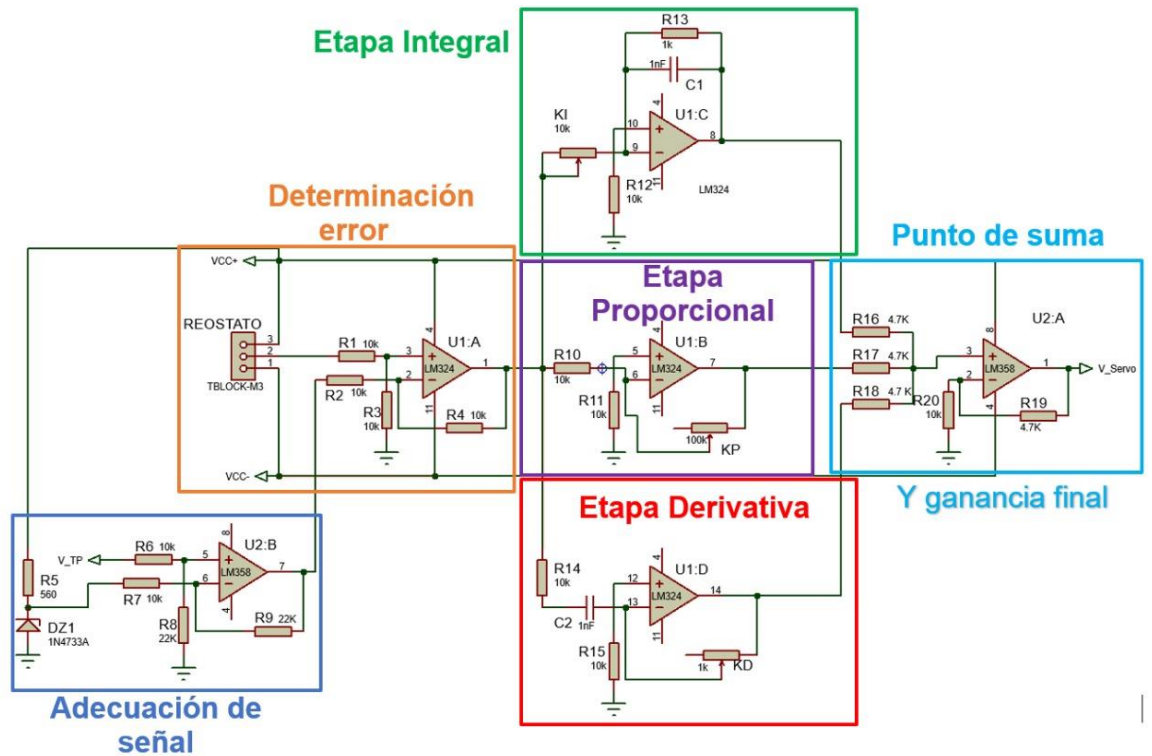
Figura 38. Vista sin componentes circuito corrector de voltaje.



La implementación de un PID analógico surgió de la evidencia de que la operación manual está ligada únicamente al encendido y apagado del equipo, lo cual, en aras de dar una utilidad práctica a la operación manual de la máquina se implementó un circuito de control analógico, donde se logre hacer el control

de la posición del actuador mediante el accionamiento de un reóstato lineal de 10 vueltas, alojado en el módulo de control en su parte frontal.

Figura 39. Circuito PID analógico.



La etapa de adecuación de la señal del transductor de posición (LVDT) consiste en que, a partir de una señal de 0 a 10 V; se hace la lectura y a este valor se le resta la constante suministrada por el diodo Zener (5.1 V), su resultado es la cantidad de voltios necesarios para la adecuada retroalimentación del transductor. El rango producto de la diferencia estará entre $\pm 5V$; este rango se multiplica por dos (2), para tener así un rango total de $\pm 10V$. De modo que una vez pasada esta adecuación de señal se llega a un amplificador diferencial donde, del reóstato, se establece la señal de “set point” o valor deseado en el rango $\pm 11V$, la cual se le restará la posición actual del actuador, este valor de voltaje es la señal “error” que se afectará por las etapas proporcional, integral y derivativa, las cuales se suman y se le aplica la última ganancia de 1.47, que terminará llegando al circuito servoamplificador, por ende a la servoválvula.

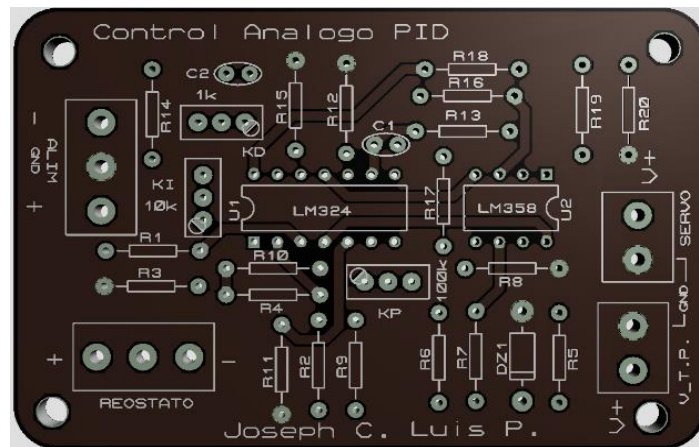
Teniendo entonces que su montaje en PCB quedaría de la siguiente manera:

Figura 40. PCB circuito PID analógico.



La disposición de componentes queda ilustrada a continuación.

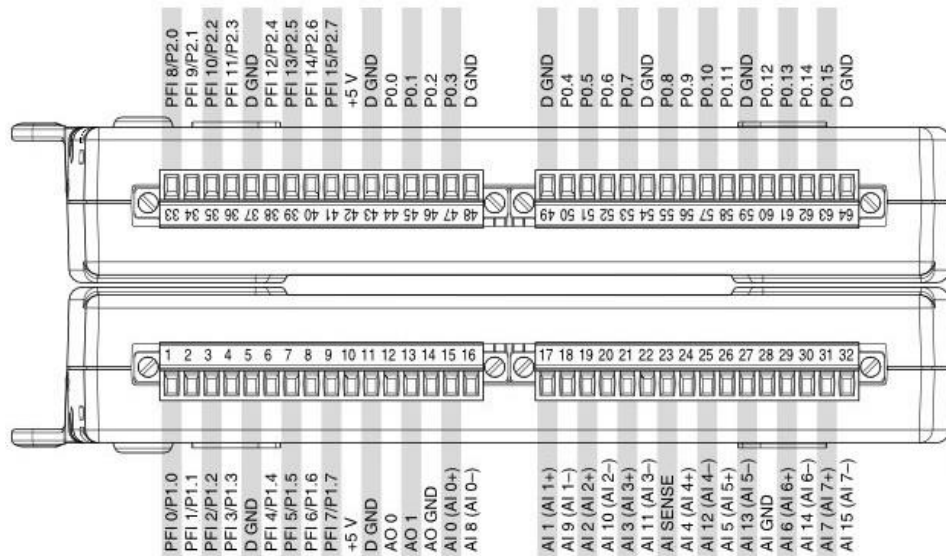
Figura 41. Vista sin componentes circuito PID analógico.



6.2.5 Conexiones NI USB DAQ 6212: Las señales para la realización del control de posición y fuerza del equipo, parten del algoritmo de programación en LabVIEW pasando a través de la DAQ se convierten en comandos para la servoválvula.

La tarjeta de adquisición cuenta con una serie de puertos dispuestos para generación y adquisición de señales analógicas, puertos similares para señales digitales, entre otras aplicaciones. En la siguiente figura se muestra un esquema de los diferentes puertos de los que dispone la tarjeta para su operación.

Figura 42. DAQ NI USB 6212 pinout.



Fuente: National Instruments. [En línea]. [Recuperado en 10 de Julio de 2019] Disponible en: <http://www.ni.com/documentation/en/multifunction-io-device/latest/usb-6212/pinout-screwterm/>. [Acceso: 10- Jun- 2019].

La tarjeta de adquisición cuenta con las siguientes características:

- 16 entradas analógicas (pin 17 y 32).
- 2 salidas analógicas (pin 12 y 1 [AO 0; AO 1]).
- 32 puertos digitales (E/S).
- Resolución 400 kS/s.
- Alimentación mediante cable USB.
- Rango de operación [-15V,15V].

Con los puertos disponibles se establecieron las conexiones de los siguientes elementos:

- Encendido de motor de bomba de pistones (Módulo de potencia).
- Activación de válvula de seguridad (Módulo de potencia).
- Activación válvula direccional piloto (Módulo de control).

- Señal proveniente del transductor de posición.
- Señal de transductores de presión.
- Señal comando servoválvula.

Tabla 4. Conexiones de elementos a USB NI DAQ 6212.

Color	Puerto DAQ	PIN #	Descripción
Rosado	DGND	5	Tierra Digital
Blanco	P.1.0	1	Motor bomba de pistones
Gris	P.1.1	2	Desventeo
Azul	P.1.2	3	Antirretorno
Verde	AO.0	12	Servoválvula
Amarillo	AO.GND	14	Tierra servoválvula
Piel	AI.0	15	Transductor de posición
Rojo	AI.GND	28	Tierra Transductor de posición
Marrón	AI.1	17	Transductor de presión derecho
Negro	AI.2	19	Transductor de presión izquierdo

La conexión física de los cables, teniendo en cuenta la tabla anterior se muestra en la siguiente figura.

Figura 43. Conexión de elementos en tarjeta NI USB DAQ 6212.



6.2.6 Encendido y apagado automático: En la fase de montaje eléctrico se implementó la lógica cableada con el fin de realizar el encendido y apagado de una única manera para que el sistema no se vea afectado por un error de operación del usuario. Para el diseño de la interfaz gráfica se estableció la manera realizar el encendido y apagado desde el computador; para ello se usó un circuito con optoacopladores, que funciona como un interruptor que se activa al percibir una luz emitida por medio de un led, es así como las señales digitales de 5V para la activación de la bomba, válvula de seguridad y válvula direccional piloto son enviadas desde la tarjeta de adquisición

Figura 44. Circuito optoacoplador en módulo de control.



Circuito compuesto por la unión de 4 optoacopladores 4N35 (Figura 45) los cuales se aprovechan de la fuente +24V dispuesta en el fondo del módulo de control; los optoacopladores hacen la conmutación para activar el relé que conecta la tensión de fase, generando la lógica de encendido.

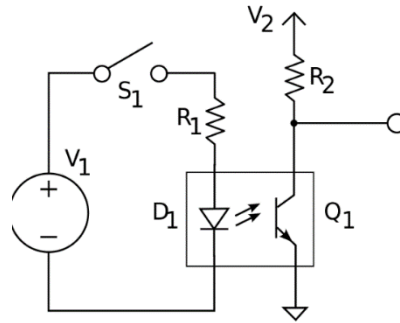
Figura 45. Optoacoplador 4N35 Series.



Fuente Digchip.: Solid State Optronics TR115-F1 datasheet. [En línea]. [Recuperado en 14 de julio de 2019]
Disponible en: <https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/450/TR115-F1-pdf.php>.

Su esquema de funcionamiento electrónico es como se muestra a continuación.

Figura 46. Esquema básico de optoacoplador.



Fuente: Wikipedia: Optoacoplador. [En línea]. [Recuperado en 14 de julio de 2019] Disponible en. <https://es.wikipedia.org/wiki/Optoacoplador>.

El esquema de conexión de las salidas de la tarjeta de adquisición y el circuito de optoacoplador, se pueden apreciar con más detalle en los anexos del presente documento.

Para lograr separar la operación automática de la manual, se usó un relé de 12 pines que activa los elementos del arranque, presión y antirretorno según la opción escogida, a continuación se muestra el relé en cuestión.

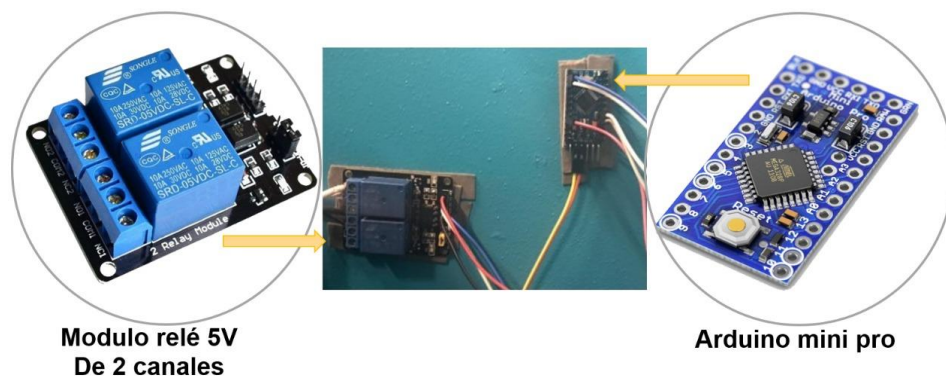
Figura 47. Relé divisor de señal automática y manual.



Fuente: Parts Express[En línea]. [Recuperado en 14 de julio de 2019] Disponible en. <https://www.parts-express.com/nte-r12-17d3-12-3a-12-vdc-4pdt-general-purpose-relay--075-120>

6.2.7. Control de temperatura: Finalmente para añadir un mayor control a las variables que intervienen en la operación, se adaptó un sistema de control de temperatura tipo ventana, el cual, el cual la mantiene en un rango de 40°C a 45°C en el tanque. Se enciende el ventilador de manera automática controlando la temperatura. Para realizar esto se implementó una programación mediante *Arduino mini pro* y un módulo relé 2 canales 5V que conmuta la alimentación del enfriador para que no sobrepase el valor set.

Figura 48. Control de temperatura (Módulo de potencia).



De modo que la temperatura presente en el tanque define el encendido o apagado de la unidad enfriadora, haciendo que el aceite mantenga una temperatura óptima, mejorando el desempeño de la máquina.

En la siguiente figura se puede apreciar el código arduino utilizado para este fin.

Figura 49. Código Arduino para control de temperatura.

```
#include <OneWire.h>           //Incluimos librerías
#include <DallasTemperature.h> //Incluimos librerías
int A= 12;                     //Declaramos Puertos
int B= 11;                     //Declaramos puertos

OneWire ourWire(2);           //Se establece el pin 2 como bus OneWire

DallasTemperature sensors(&ourWire) //Se declara una variable u objeto para nuestro
                                     sensor

void setup() {
  delay(1000);                  //1 Segundo de demora
  Serial.begin(9600);           //Iniciamos el canal
  sensors.begin();              //Se inicia el sensor
  pinMode (A,OUTPUT);           //Declaramos el puerto A como salida
  pinMode (B,OUTPUT);           //Declaramos el puerto B como salida

  void loop() {                 //Mandamos una señal al modulo relevo Bobiana 1
    sensors.requestTemperatures(); //Mandamos una señal al modulo relevo Bobiana 2
    float temp= sensors.getTempCByIndex(0);

    Serial.print("Temperatura= "); //Se envía el comando para leer la temperatura
    Serial.print(temp);           //Se obtiene la temperatura en °C
    Serial.println(" C");         "Temperatura"
    delay(100);                  //Imprimimos en el serial monitor la palabra

                                     //Imprimimos la Temperaruta
    if(temp < 30){                //Imprimimos grados C
      digitalWrite(A,HIGH);       //Segundo de demora
      digitalWrite(B,HIGH);
      digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); //Control de Temperatura
    }                             //Señal de salida A
    if(temp > 45){                //Señal de salida B
      digitalWrite(A,LOW);        //Testigo de arduino mini
      digitalWrite(B,LOW);
      digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); //Control de Temperatura
    }                             //Señal de salida B
    digitalWrite(B,LOW);          //Señal de salida A
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); //Apaga testigo arduino mini
  }
```

La decisión de usar Arduino para este control se debe a que es un control que se realiza netamente en el módulo de potencia, de modo que se procuró no extender las líneas de cables que vayan o provengan de la DAQ.

Una vez establecida y finalizada la fase de montaje electrónico en la que se realizaron las actividades que se acabaron de relatar se procede a la etapa final, y que como se verá, será la que más tiempo conllevará en explicación y extensión.

Como se verá en el siguiente apartado (6.3 Control computarizado) la lógica cableada establecida en la fase de montaje eléctrico se desarrolló de igual forma para el accionamiento digital.

El objetivo de estas dos fases anteriores (6.1 y 6.2) fue la de proporcionar las herramientas necesarias para poder desarrollar el control de la posición y la fuerza con el computador usando el software LabVIEW y la tarjeta de adquisición NI-USB DAQ 6212.

6.3 CONTROL COMPUTARIZADO

Para esta fase del proyecto se estableció la elaboración de un programa usando el software LabVIEW, el cual por sus siglas en inglés, *Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench* ofrece un entorno de programación gráfica en el cual se puede realizar la interfaz gráfica para el control de la máquina, y visualización de las variables que están interviniendo en el proceso en tiempo real, es así que se cuenta con un sinnúmero de opciones disponibles para poder elaborar un programa mediante LabVIEW, independiente del lenguaje de programación, en este software se necesitan conocimientos básicos en cuanto a procesos y algoritmos de programación, logrando que de manera gráfica se haga más ameno para el usuario.

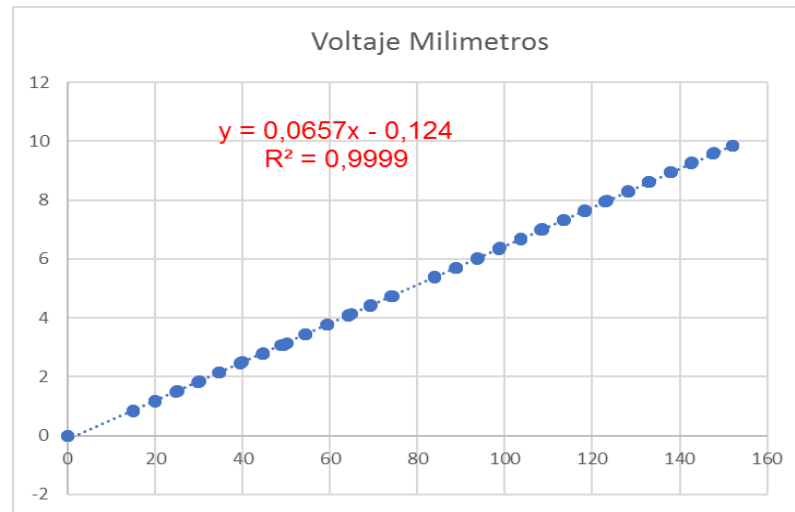
Debido a la amplia gama de opciones y elementos con que cuenta LabVIEW se podría hacer más extensa la explicación de cada uno de los componentes que fueron usados, para los usuarios que no manejen el software se ha elaborado una serie de hojas que se encontrarán en los anexos del presente documento, en las cuales, se establecen los elementos básicos y de control usados en LabVIEW.

Dentro de las labores de control computarizado se estableció la caracterización de los transductores para su posterior uso en el esquema de control, para eso se empleó el software y las aplicaciones de este.

6.3.1 Caracterización transductor de posición: Se necesitaba tener una lectura de la tensión enviada como señal a medida que el actuador asciende o desciende bajo una orden de la válvula, siendo necesario establecer la caracterización del transductor de posición, para ello se realizó un proceso en el cual para una medida de posición comprendida entre 0 y 15 cm se registró el valor de la tensión enviada por el transductor, y al realizar su respectiva regresión lineal se establece una ecuación que relaciona la tensión de salida hacia la válvula y la posición deseada; se estableció entonces que esta señal será la

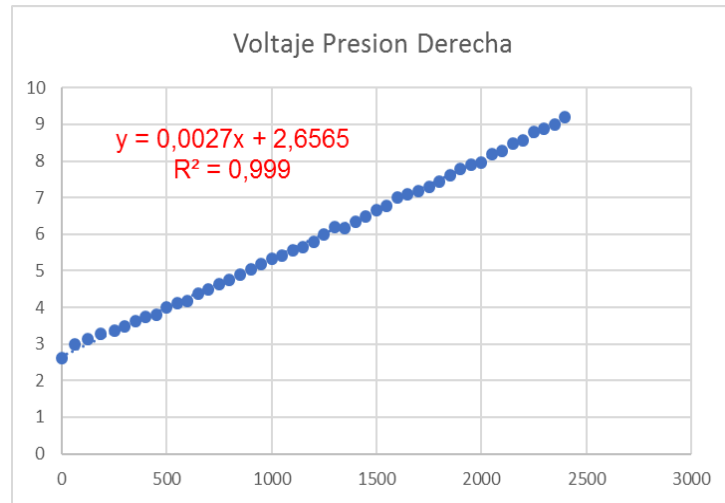
variable de proceso en el control del servo de posición, y la relación entre ellos ayuda a entablar comunicación con el controlador PID implementado en el código de control.

Figura 50. Caracterización transductor de posición.



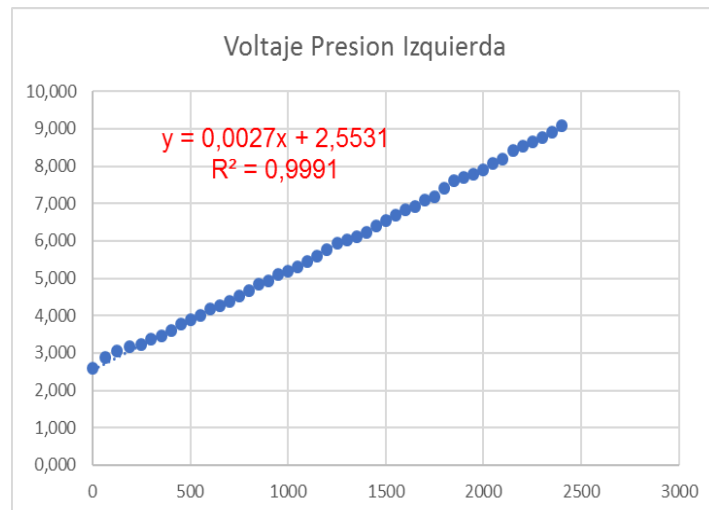
6.3.2 Caracterización transductores de presión: En el proceso de control de fuerza se necesita conocer la diferencia de presiones en la cámara de compresión y la cámara de tracción del actuador, por ello que se realizó un proceso similar al transductor de posición pero ahora, con los transductores de presión, en el cual se fue registrando diferentes valores de presión presentes en estas cámaras en un rango comprendido entre los 0 PSI y 2400 PSI, estableciendo una relación para cada transductor, de tal manera en el programa implementado quedará una diferencia entre ellos, dicha diferencia multiplicada por el área efectiva de actuador dará como resultado el valor de fuerza.

Figura 51. Caracterización transductor de presión (Derecha, Compresión).



Para el lado tracción la caracterización del comportamiento es muy similar, la única diferencia es el punto de intercepción de la recta, la disparidad no es tan ostensible.

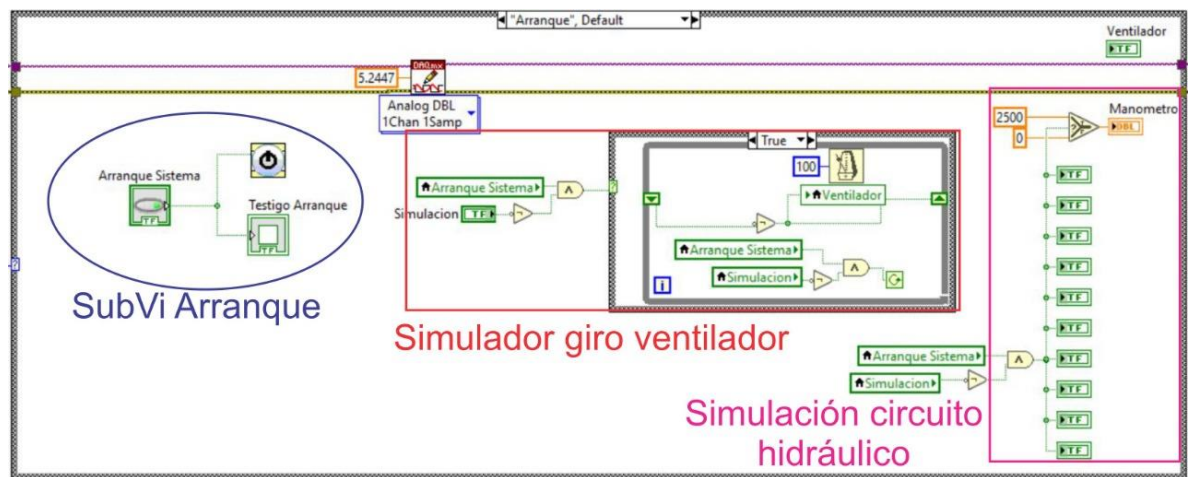
Figura 52. Caracterización transductor de presión (Izquierda, Tracción).



La expresión de valor para cada uno de los transductores se expresa en las figuras anteriores (tan solo varía en un 3% en el término independiente de la recta), se tomó como ecuación del modelo un promedio entre ellas.

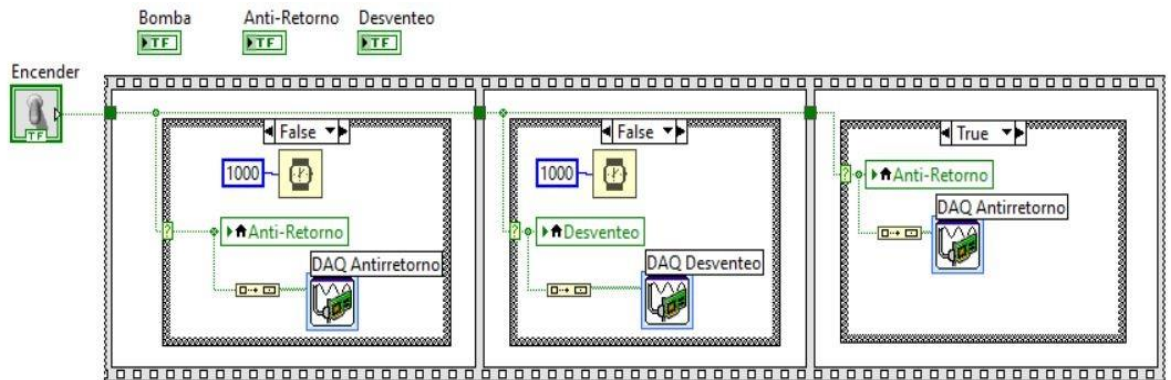
6.3.3. Encendido y apagado automático: El control automático implementado mediante LabVIEW se realizó usando una estructura de secuencia, en la cual, tras completar una acción se pasa a la siguiente, con lo que se puede establecer que una vez se realiza la acción de encendido de la bomba de pistones, se procede a desventear la válvula de seguridad y finalmente activar la válvula direccional encargada de abrir la antirretorno en el módulo de control, con lo que a partir de este momento se tendría la posibilidad de hacer uso del aceite presurizado en el actuador.

Figura 53. Código gráfico para encendido y apagado.



Se puede apreciar que la acción de esta estructura está limitada a la señal que envíe el booleano de encendido o apagado, o bien, true o false, la cual será la que al entrar a la estructura secuencia, en caso ser true, realizará el encendido de los componentes y en caso false el apagado de los mismos, lo que se traduce en que se estará enviando en todo momento una señal “1” digital o “0” digital, a los puertos de la DAQ asignados para tal fin, es así como la misma, envía para esas señales digitales, una tensión 5V o 0V según corresponda, valor que llegará hasta el circuito optoacoplador mencionado líneas atrás (4.2.6). El circuito que muestra su funcionamiento se puede hallar con más detalle en los anexos de este documento, en donde se mostrará el esquema de conexión para la conmutación del encendido digital.

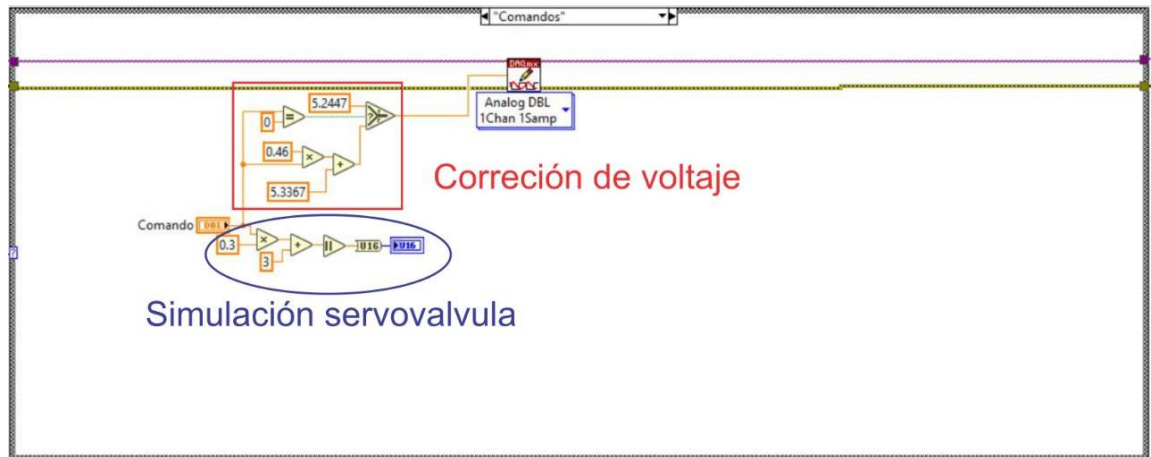
Figura 54. SubVI arranque.



6.3.4 Comando y despegar servo válvula: Con el fin de brindar un complemento a la interfaz gráfica se adicionó al control dos opciones extras, las cuales permiten dar un valor de tensión variable en el rango de $\pm 10V$ que iría directamente a la servoválvula (En el caso de la opción comando) y ésta respondería en consecuencia, teniendo así la posibilidad de preciar el comportamiento natural de una válvula de este tipo, por ejemplo, se envía un valor de tensión de 1V empieza el ascenso del actuador a una velocidad baja, esto debido a la característica de la servoválvula de regular caudal a medida que el spool se desplaza. En la pestaña del entorno gráfico “despegue de válvula” se tiene un código que envía como señal de salida a la válvula una onda cuadrada de amplitud positiva 10 y negativa -10 esto con el fin de tener la posibilidad disponer de una herramienta digital para hacer, como su nombre indica, despegue de válvula, esto debido a que uno de los problemas recurrentes en las servoválvulas es que el spool no se desplaza debido a que la fuerza ejercida por la lengüeta acoplada al motor de torsión no sea suficiente para desplazarlo, hecho que suele suceder por el aumento de la viscosidad en el aceite al enfriarse tras cesar la operación de la misma; generando un aumento en las fuerzas de fricción. Esto se evidenció al inicio del desarrollo del proyecto, debido a la falta de respuesta de la servoválvula cuando se le enviaba una señal de comando desde una tarjeta especial moog que dispone el laboratorio y es la usada para realizar la muestra de las prácticas de posición y fuerza en servoválvulas moog a nivel analógico durante los semestres en la escuela, en consecuencia, se

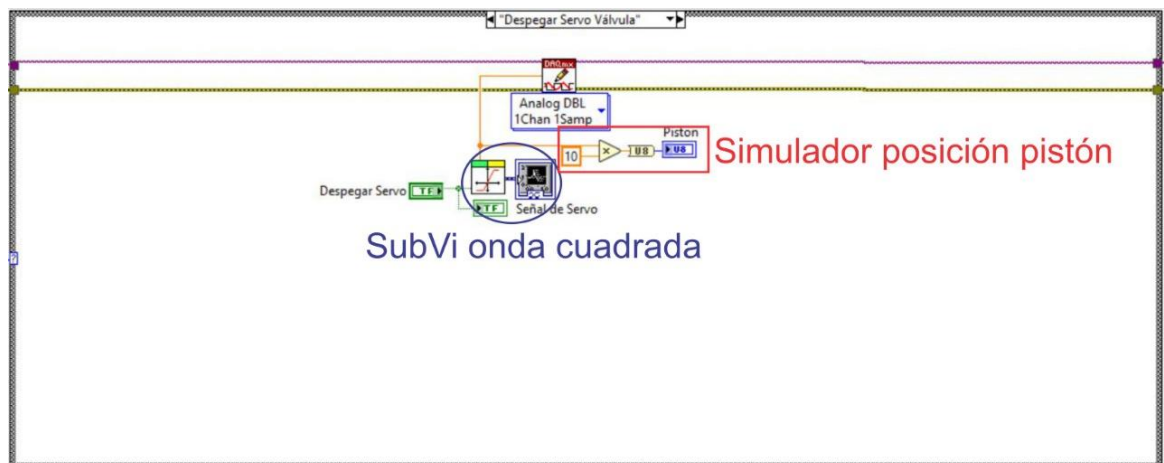
dispone de la capacidad de hacer el despegue de la válvula a través del programa.

Figura 55. Código gráfico opción comando,



Haciendo uso de subprogramas, para estas opciones, y con el fin de organizar de mejor manera toda la codificación del proyecto, en la figura anterior, y la siguiente, se puede apreciar el código gráfico implementado.

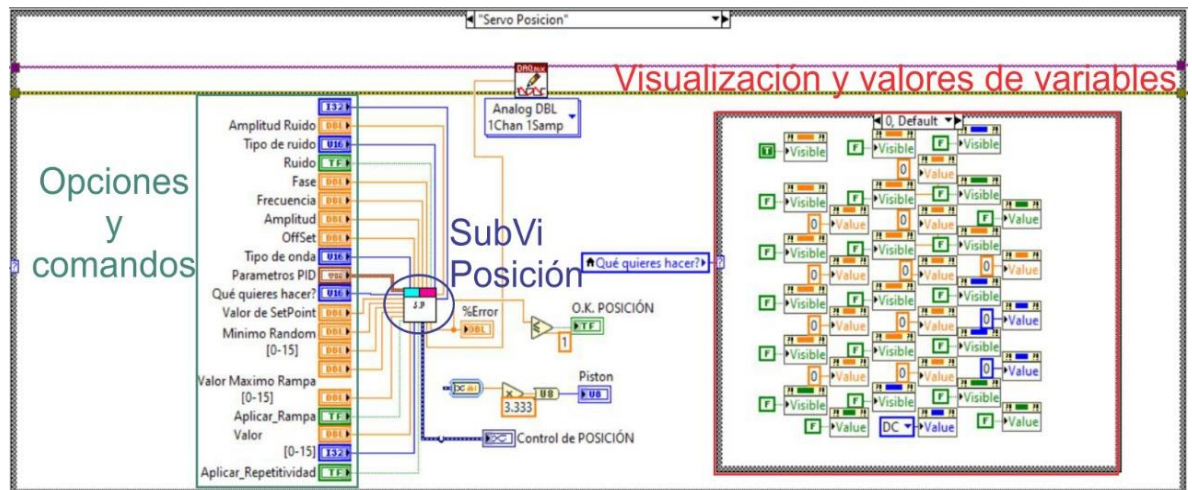
Figura 56. Código gráfico opción despegar servo válvula.



6.3.5 Código Servo de Posición: Para establecer el control de posición se acudió a la herramienta "PID CONTROLLER" encargada de recibir las señales que intervienen en el control de servo de posición, para este caso, sería la variable "Set Point" o bien la medida a la que queremos llegar y la "Process

variable” o señal LVDT proveniente del transductor de posición, el proceso establecerá su control a través de las constantes de sintonización establecidas, la determinación de éstos valores se realizó a punta de prueba y error, otorgando valores de set point e inmediatamente se observó la respuesta en el sistema; finalmente la salida del controlador otorga un valor comprendido entre el rango de 0 y 100 el cual será una orden de comando dirigida a la servoválvula, es decir, un valor comprendido entre -10 V y -10 V, para valores deseados por encima de la variable de proceso se tendrá una salida de tensión positiva y viceversa, en el caso en el que se halle la posición deseada por debajo de la variable de proceso se observará una tensión de salida negativa.

Figura 57. Código gráfico servo de posición.



Como se aprecia en la imagen, el control de la posición se realiza a través de un código simple donde el subVI marcado con “s.p”, que no es más que el llamado a la acción del servo de posición por parte de un subprograma.

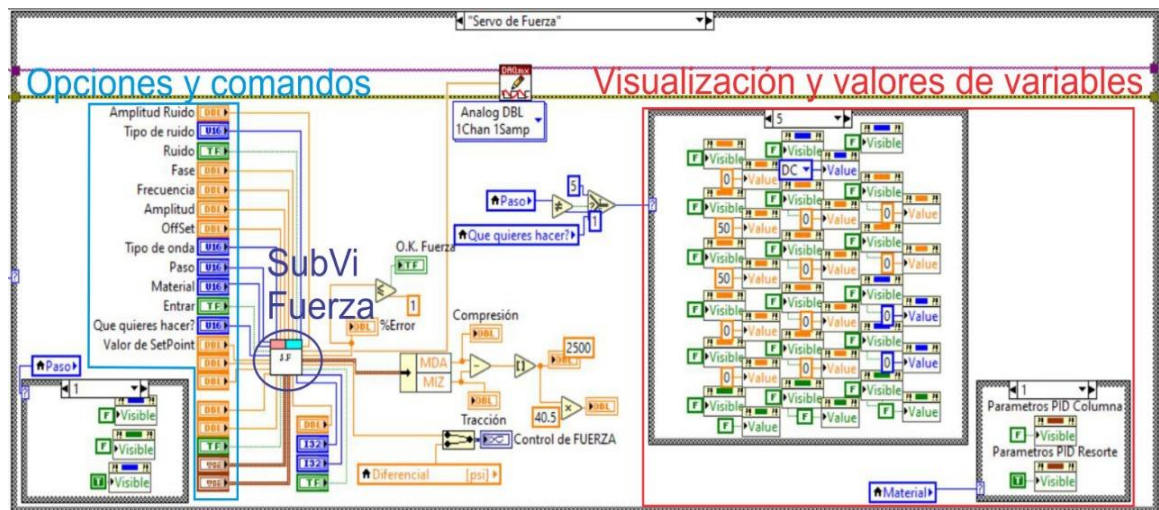
6.3.6. Código Servo de fuerza: En este segmento se tiene la implementación del código gráfico para el control de la presión (y por ende de la fuerza) en el sistema; tenemos entonces que en esta operación se cuenta como variable de proceso la diferencia en la lectura de los valores de presión entre las cámaras de compresión y tracción, dando así el diferencial de presión suministrado en todo momento, el cual al ser multiplicado por el área efectiva (40.5 pulg²) dará el

valor de fuerza suministrado, la expresión que registrará el valor de la fuerza vendría siendo:

$$F = (P_{\text{lado Compresión}} - P_{\text{lado Tracción}}) * (40.5) [Lb] \quad (27)$$

De forma similar a lo implementado en el servo de posición, se acude al uso de la herramienta *PID CONTROLLER* de LabVIEW, y a ella, se llevan los valores de presión deseada (set point), diferencial de presión (process variable) y constantes de sintonización (Kp, Ti, Td), de igual forma que en el servo de posición tendremos en este control una determinación de las constantes de manera empírica.

Figura 58. Código gráfico servo de fuerza.

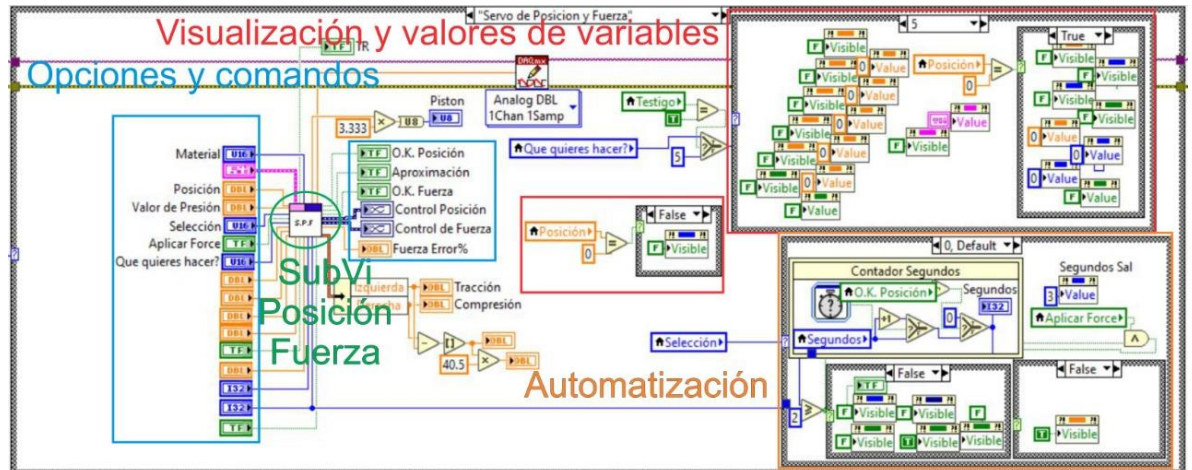


La programación mostrada en la figura anterior, se estableció para realizar las acciones de “Aproximación”, “Compresión” y “Salida”, como se verá en el siguiente capítulo (5. Interfaz gráfica); se tiene entonces que en la opción “Aproximación” el actuador subirá hasta que una columna o resorte toque la placa superior del marco de carga y mantendrá el actuador con un diferencial de presión tal que permita sujetarlo sin hacerle una fuerza mayor a la necesaria para evitar su caída; una vez cumplida esta acción se puede realizar la acción de “Compresión” donde se lleva a cabo como tal el control de presión (y por ende de fuerza); una vez se quiera dar por terminada la acción del servo se procede

a dar la opción “*Salida*” que no es más que el envío de señal de comando -10V a la servoválvula para que el actuador vuelva a la su posición más baja. Las acciones anteriormente mencionadas son necesarias para desarrollar de manera correcta el control de la fuerza, ya que si no se controla la acción de aproximación, hasta no encontrar un obstáculo el actuador ascenderá con una presión muy baja, con lo que la señal de comando enviada por el controlador PID será muy grande, al llegar hasta el contacto la presión se subirá súbitamente y descenderá hasta llegar al valor de set point, lo cual puede conllevar a la fractura o daño en la pieza que se quiera probar.

6.3.7 Código servo de posición y fuerza: En esta etapa de la programación se implementó la unión de ambos servos en un mismo bloque; su acción se fundamenta en realizar un proceso controlado y automático que implique ambas acciones de control (posición y fuerza), en esta sección del código se realiza el control de posición hasta una ubicación muy cercana a la placa superior (entorno a un milímetro) y la mantendrá ahí hasta una nueva orden; la siguiente operación conllevaría la aplicación de presión hasta el valor deseado, para ello, se realiza la aproximación o contacto con la placa superior, y de manera automática se ejecuta el servo de fuerza hasta el valor establecido por el usuario, esto se lleva a cabo con activar el botón “*Aplicar fuerza*” (como se verá en el siguiente capítulo), cuando se quiera finalizar el servo de fuerza, se desactiva dicho botón, e inmediatamente después la presión caerá hasta su valor mínimo y el actuador descenderá hasta la posición más baja.

Figura 59. Código gráfico servo de posición y fuerza.

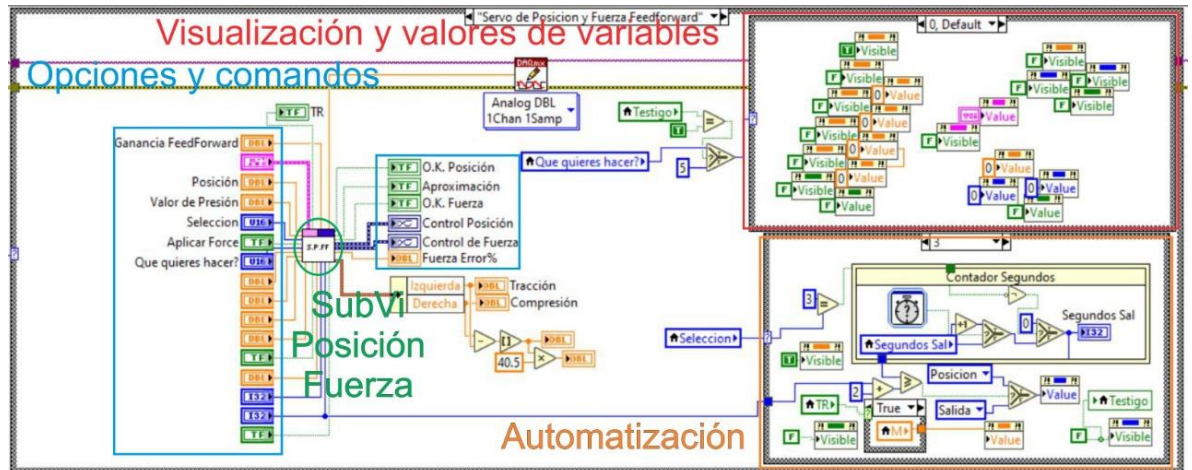


De igual forma que en servo de fuerza, se tiene la implementación de este código para un material que puede ser columna, resorte y suave. La distinción entre columna y resorte se debe a que su comportamiento ante el control de fuerza es diferente, y, por ende, se precisó establecer constantes de sintonización dispares en cada caso.

6.3.8 Código servo de posición y fuerza Feedforward: El control de un sistema dinámico está propenso a la aparición de perturbaciones o cambios que no se tenían previstos, con lo que se precisa establecer una condición para la que se pueda atenuar, se procedió a establecer un diseño de compensador por adelantado o Feedforward, el cual se encargue de suplir la afectación que estos cambios puedan acontecer.

Con fin de cubrir la necesidad de atenuar las perturbaciones se realizó una modificación del código de “*Servo de Posición y fuerza*” para albergar el compensador Feedforward.

Figura 60. Código servo de posición y fuerza Feedforward.



Líneas atrás se mencionó que el control de posición o fuerza se realiza mediante el elemento “*PID CONTROLLER*”, a la hora de implementar el compensador se necesita hacer uso de una función en dominio de la frecuencia, lo cual no puede ser implementado sin utilizar la herramienta “*Control & Simulation Loop*”, por lo que se realizó un cambio en la programación de control de fuerza, en donde se muestra el esquema de control PID y la función del compensador Feedforward envuelto en el entorno “*Control & Simulation Loop*”, el resultado de esto saldrá como comando hacia la servoválvula y ésta actuará en consecuencia.

El cálculo del compensador pasa por establecer la ganancia que aportará al sistema a la hora de realizar el proceso y los valores de *Polo* y *Zero* necesarios para a realizar la compensación; haciendo uso del software EES (*Enginnering Equation Solver* por sus siglas en inglés) y lo expuesto por Ogata¹ se creó un código de cálculo para hallar el valor de la ganancia del compensador, donde teniendo en cuenta parámetros como frecuencia natural de la servoválvula, carrera del actuador, área específica de trabajo, corriente presente en la servoválvula entre otros se logra determinar el valor de dicha ganancia. En la siguiente expresión se muestra la ecuación final del compensador acompañada de su ganancia.

$$G_{ff} = 51.92 \frac{s + 988}{s + 4085} \quad (28)$$

El código creado en EES para el cálculo de dicha constante $K_c = 51.92$ se muestra en la siguiente figura.

Figura 61. Cálculo de compensador Feedforward.

$$f_N = 1 / 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{K_0}{m}} \quad \text{Frecuencia Natural del sistema Hz}$$

$$K_0 = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \beta \cdot A}{X_T}$$

$$\sigma = \frac{A \cdot X_{\mu}}{V}$$

$$A = 40.5 \quad \text{Área específica de trabajo}$$

$$\beta = 200000 \quad \text{Módulo de Bulk}$$

$$X_T = 15 \cdot \left| 0.3937 \cdot \frac{\text{in}}{\text{cm}} \right| \quad \text{Carrera total del pistón}$$

$$X_{\mu} = 15 \cdot \left| 0.3937 \cdot \frac{\text{in}}{\text{cm}} \right| \quad \text{Carrera del pistón utilizada para la aplicación}$$

$$V = 0.117 \cdot 2 + 40.5 \cdot X_{\mu} \quad \text{Volumen total de fluido entre los puertos de la válvula}$$

$$m = 60 \cdot \left| 2.2046226 \cdot \frac{\text{lbm}}{\text{kg}} \right| \quad \text{Masa}$$

$$\omega_n = f_N \cdot 2 \cdot \pi \quad \text{Frecuencia natural Rad/s}$$

$$0 = \frac{V}{4 \cdot \beta} \cdot s_1 + K_{TC} \quad \text{de la función de transferencia de la planta y buscando ceros y polos } G_s$$

$$K_v = \frac{9}{\text{mA}}$$

$$\text{mA} = 40 \quad \text{Corriente presente en la servo válvula}$$

$$K_{TC} = 0.135$$

$$s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2 = 0$$

$$\zeta = 0.7$$

$$\psi = \text{angleDeg} (s)$$

$$S_{1,\text{complejo}} = s - S_1$$

$$\phi = \text{angleDeg} (S_{1,\text{complejo}})$$

$$\phi = \left| 180 - \psi - \delta \right|$$

$$\text{OP} = \text{magnitude} (s)$$

$$\text{OP} = \text{magnitude} (s)$$

$$\theta = 180 - \psi$$

$$\frac{\sin \left[\frac{\psi}{2} \cdot \left| 0.017453293 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{deg}} \right| \right]}{\sin \left[\frac{\theta}{2} \cdot \left| 0.017453293 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{deg}} \right| \right]} = \frac{\text{PB}}{\text{PB}}$$

$$\text{OP} = \text{OB}$$

$$\text{OE} = \left| \text{real} (s) \right|$$

$$\text{EB} = \text{OB} - \text{OE}$$

$$\alpha = 180 - \frac{\phi}{2} - \frac{\psi}{2}$$

$$\frac{\sin \left[\alpha \cdot \left| 0.017453293 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{deg}} \right| \right]}{\sin \left[\frac{\phi}{2} \cdot \left| 0.017453293 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{deg}} \right| \right]} = \frac{\text{PB}}{\text{DB}}$$

$$\varepsilon = 180 - \frac{\psi}{2}$$

$$\gamma = 180 - \varepsilon - \frac{\phi}{2}$$

$$\frac{\sin \left[\gamma \cdot \left| 0.017453293 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{deg}} \right| \right]}{\sin \left[\frac{\phi}{2} \cdot \left| 0.017453293 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{deg}} \right| \right]} = \frac{\text{PB}}{\text{BC}}$$

$$\text{Cero} = \text{OB} - \text{DB}$$

$$\text{Polo} = \text{BC} + \text{OB}$$

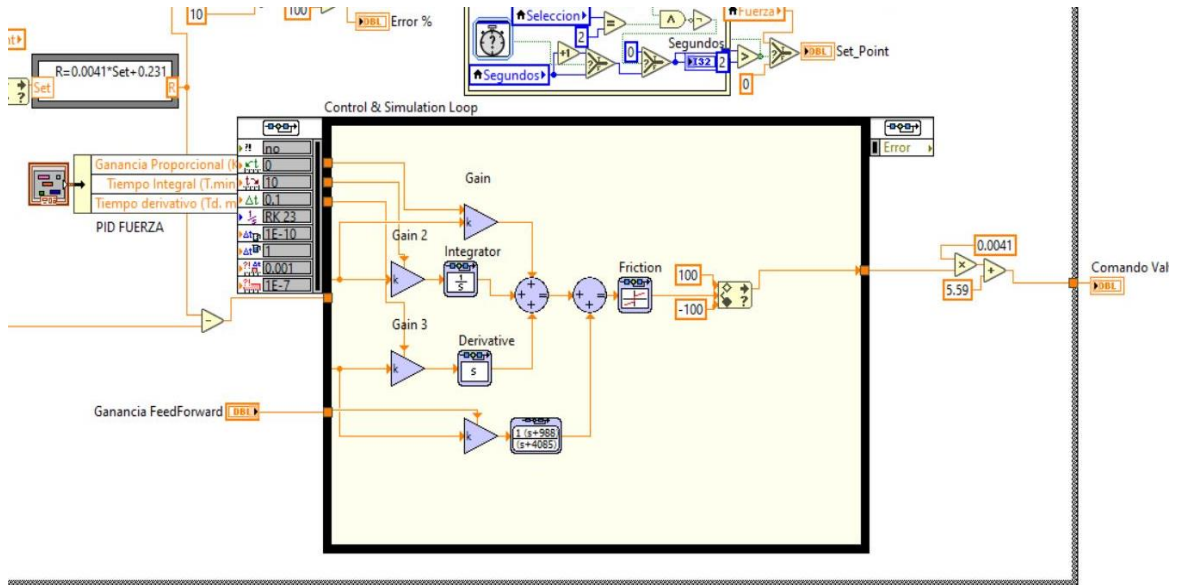
$$K_{z,\text{complejo}} \cdot \left[\frac{s + \text{Cero}}{s + \text{Polo}} \right] \cdot \left[\frac{K_v \cdot A}{\frac{V}{4 \cdot \beta} \cdot s + K_{TC}} \right] = s_1$$

$$K_z = \text{magnitude} (K_{z,\text{complejo}})$$

Para una explicación más detallada y acompañada de los pasos y gráficas necesarias (memorias de cálculo) para lo mostrado en la figura anterior se puede apreciar en los anexos del presente documento.

En vista a lo anterior, en la siguiente figura se muestra la sección donde se usa la herramienta “Control & Simulation Loop”

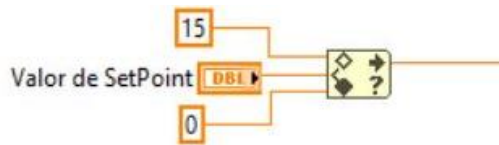
Figura 62. Implementación de compensador Feedforward.



Las constantes de sintonización que acompañan en el control PID fueron determinadas de manera empírica.

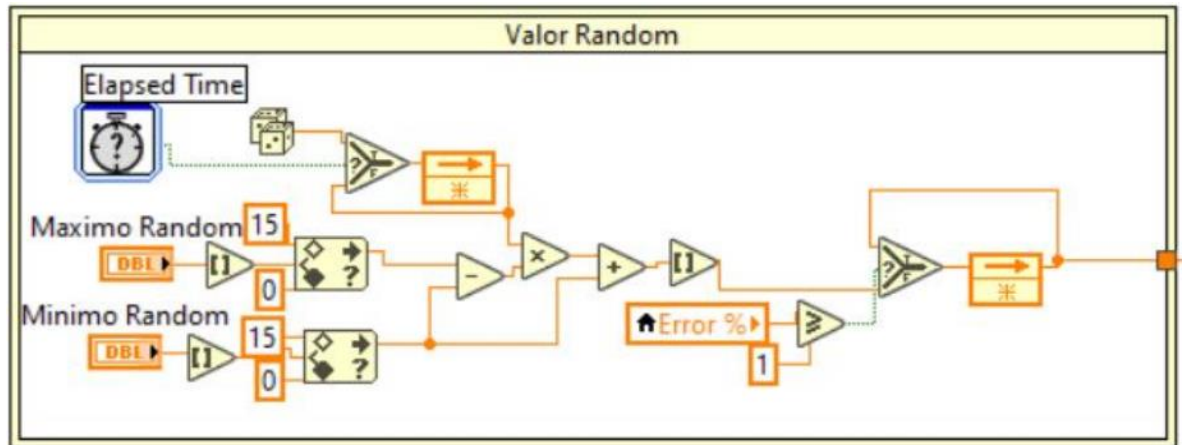
6.3.9 Opciones Set Point: Las pruebas para los diferentes controles, fueron realizadas para ver su respuesta ante valores de set point que pueden adquirir diversas formas, a saber, “Escalón”, “Random”, “Rampa”, “Frecuencia” y “Repetitividad”, las cuales son como siguen:

Figura 63. Set Point “Escalón”



Para un determinado valor de posición o fuerza, este arreglo delimita el valor de set point en el rango establecido de 0 a 15 cm para posición, 50 a 2100 psi para columna y suave, y 50 a 1000 psi para resorte.

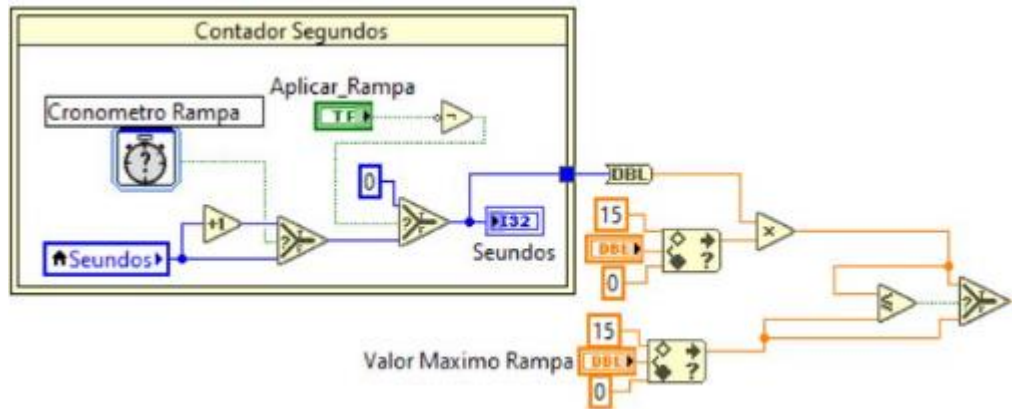
Figura 64. Set Point "Random".



Entre las posibilidades de control implementadas se tiene la opción de aplicar un valor aleatorio al set point de forma que sea el valor deseado y conforme transcurra el tiempo cambie, sin necesidad de tener un orden prefijado; todo ello acotado en un rango comprendido entre 0 y 15 cm, o bien, entre dos valores que se encuentren entre estos ([2.8], [1,13]...). Esta opción se vale de la algoritmia de desarrollar números al azar con la función random de LabVIEW y adaptarla al envío de ésta al valor del set point en el controlador.

Dado que la implementación del control del actuador en este proyecto de grado no solo cuenta con la posibilidad de realizar una función "Escalón" o "Random", se incorpora la posibilidad de realizar un servo de posición o fuerza, en el cual se tenga un valor de set point que vaya variando con el tiempo, a modo de rampa, para ello, se acude a establecer un aumento gradual del valor de set point como se muestra en la siguiente figura.

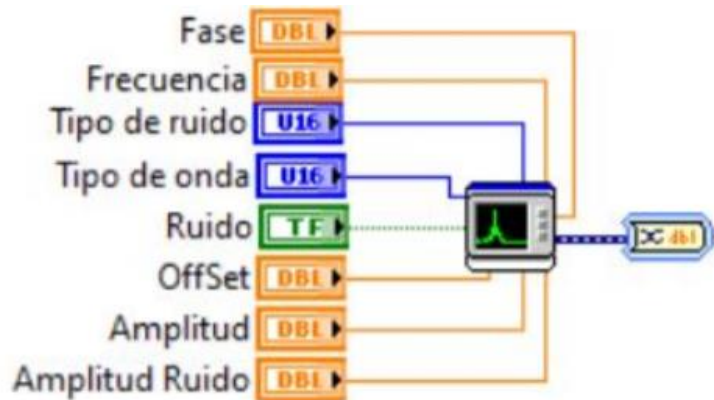
Figura 65. Set Point "Rampa".



Esta opción tendrá las limitaciones anteriormente mencionadas para posición o fuerza (bien sea columna o resorte), y está dispuesto para valores diferentes de rampa hasta un valor máximo, también elegido por el usuario.

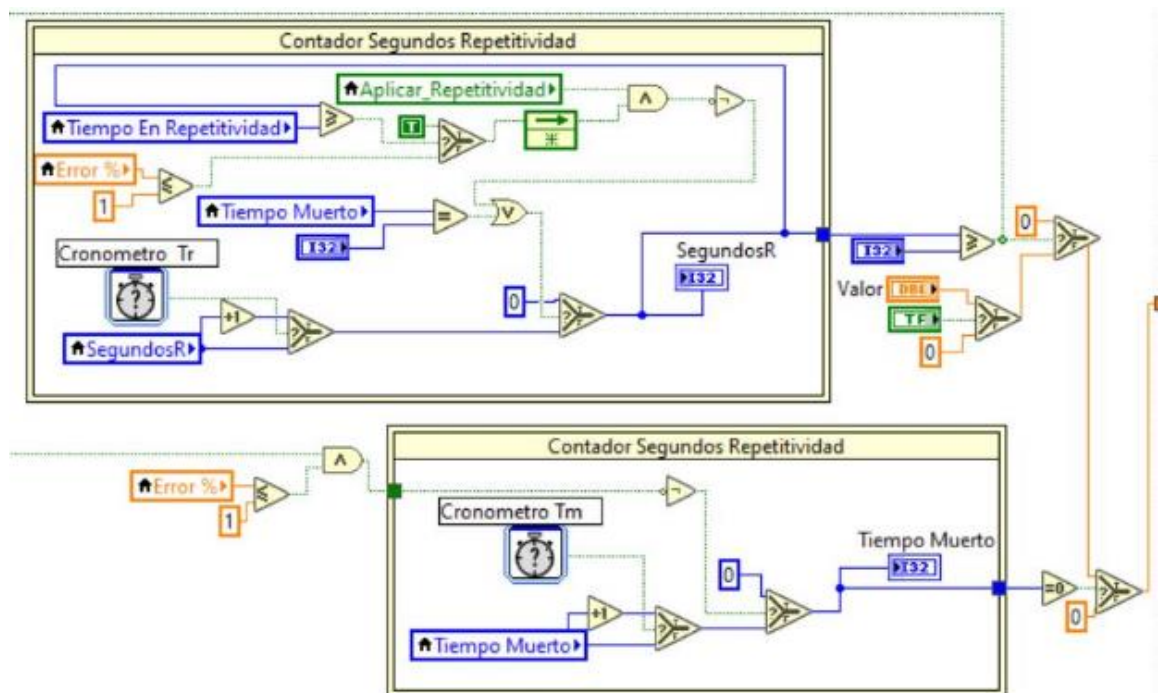
Siguiendo con las opciones de control se tiene la posibilidad de realizar un cambio en el valor de set point siguiendo una forma de onda (sinusoidal, cuadrada, triangular, diente de sierra o constante), para ello se implementó el siguiente código gráfico. A esta opción se le denominó "*Frecuencia*" y ante ella, el control deberá implementarse intentando que el actuador oscile (en caso de posición) o la servoválvula varíe la presión (en caso de control de fuerza) de igual forma a como lo hace la onda emitida.

Figura 66. Set Point "Frecuencia".



Finalmente, entre las opciones de control se precisaba encontrar una forma de comprobar la calidad del servo, para esto se acudió a la comprobación de la repetitividad, la cual no es más que la forma en la que el control logre llegar reiteradas veces a una misma posición o valor de presión, y comprobar qué tan bien realiza esta acción, para ello se implementó la opción “*Repetitividad*”, la cual se muestra en la siguiente figura.

Figura 67. Set Point “*Repetitividad*”.



Con esta opción se completa las formas en que el set point se puede variar, y se establece el modo en que se puede operar el equipo independiente del servo a usar, ya que cada uno de éstos tienen la misma gama de opciones, y como tal, las pruebas realizadas están enfocada a ver la respuesta de cada uno a estas variaciones.

7. DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

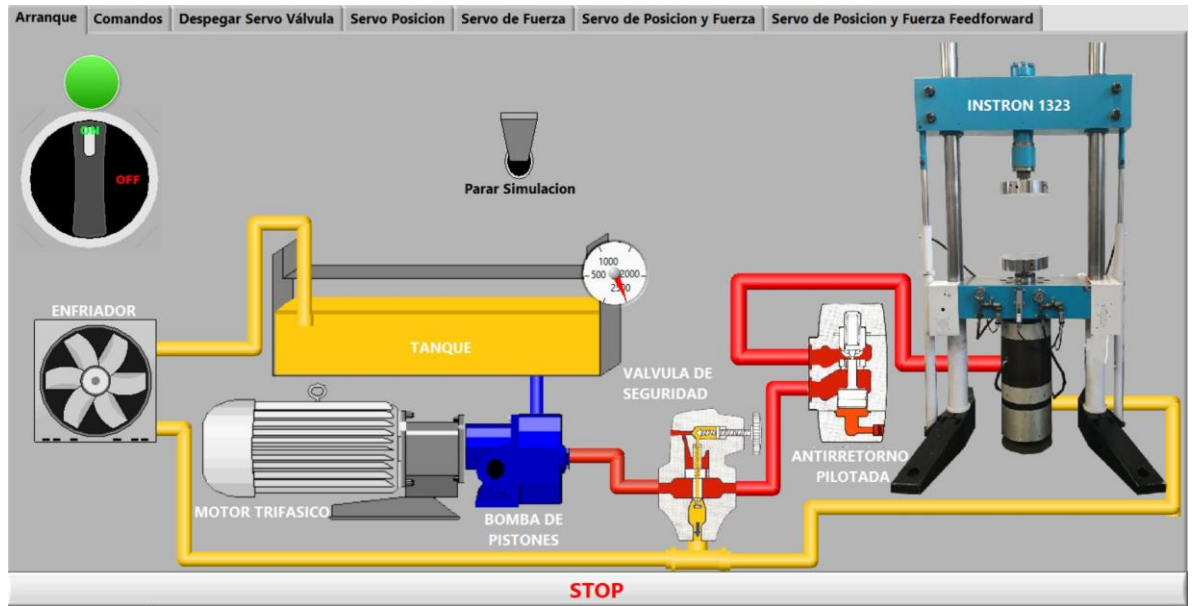
Como se mencionó en el capítulo anterior el desarrollo del código para el control se basó en la idea de establecer de forma separada y esquematizada en un proyecto de LabVIEW las diferentes opciones para el control de fuerza y posición, ello devengó en el siguiente diseño de la interfaz gráfica, en la que para cada pestaña tendremos una prestación diferente, lo cual dado para resulte ameno al usuario realizar el manejo del equipo.

A nivel general se tiene un entorno de trabajo con un menú desplegable el cual agrupa las diferentes formas de control, mencionadas en el capítulo anterior En los siguientes apartados se mostrará la interfaz gráfica establecida para la operación del equipo, en donde una serie de pestañas mostrarán las posibilidades con que se cuenta actualmente.

7.1 OPCIÓN ARRANQUE

En primera instancia se tiene la pestaña “*Arranque*” en donde se muestra una representación de la configuración hidráulica del sistema y simulación de este una vez se arranca el sistema (Se debe parar la simulación para poder hacer uso de las siguientes pestañas).

Figura 68. Pestaña "Arranque".



En esta opción, como su nombre indica, se trata de la interfaz gráfica necesaria para la visualización del arranque, en ella se muestra, al igual que en la lógica cableada la secuencia de arranque establecida (Bomba – Válvula de seguridad – Antirretorno). El tiempo invertido durante esta fase de arranque consta de 3.5 segundos entre el encendido de la bomba de pistones, 1.5 segundos la activación de la válvula de seguridad y finalmente la activación de la válvula anti-retorno pilotada, es decir, un tiempo total de 5 segundos, esto con el fin de no realizar la secuencia de manera abrupta y pueda comprometer la integridad de los elementos.

7.2 OPCIÓN COMANDO Y DESPEGUE DE VÁLVULA.

En pestaña “Comando”, tal como se mencionó en el capítulo anterior esta opción está dada para operar la servo válvula directamente usando un comando controlado desde la interfaz y que puede variar entre un rango de $\pm 10V$, logrando así ver in situ el comportamiento del actuador al enviar una señal a voluntad del usuario en el rango establecido, el cual está definido como tal, debido a lo que la DAQ puede soportar y a su vez, la servo válvula.

Figura 69. Pestaña “Comando”.



Al mover el dial para la señal comando se mostrará una simulación del comportamiento de la servoválvula a través una secuencia de imágenes superpuestas que irán apareciendo indicando su funcionamiento.

La pestaña “Despegar servo válvula” surge debido a la posibilidad de que tras periodos de tiempo sin usar la servoválvula, ésta pueda pegarse e impedir su accionamiento al llegar una señal de comando; para tal fin, se estableció la aplicación de una señal directa a la servoválvula, que irá oscilando en un rango $\pm 10V$, obedeciendo una onda cuadrada, la cual fue ajustada en su frecuencia y ciclo de trabajo para asegurarse que tras la orden de $+10V$ suba y logre alcanzar un pequeña cantidad de tiempo en la posición más extendida del pistón e igual

forma, al descender con la señal de -10V se mantenga en esa posición durante un corto lapso de tiempo, haciendo así dos labores en conjunto, la primera realizar la función de despegue de válvula y la segunda es la de calentar el equipo antes de utilizar las opciones de control de posición y fuerza; en este proceso se evidenció que el control de la temperatura del aceite es un factor importante a controlar, por esta razón se dispuso del arreglo Arduino mostrado en el capítulo anterior.

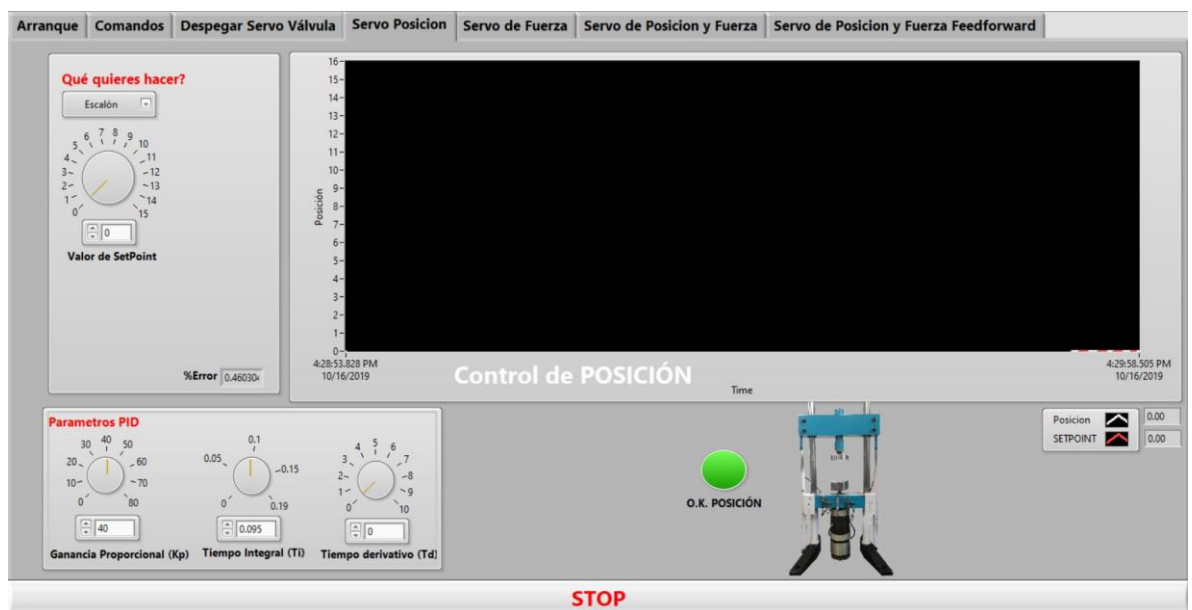
Figura 70. Pestaña "Despegar Servo Válvula".



7.3 OPCIÓN SERVO DE POSICION

Para los códigos gráficos establecidos para el control mediante LabVIEW se establece la interfaz gráfica del servo de posición, en donde tendremos la posibilidad de gobernar el comportamiento del actuador en un rango igual a su carrera, 15 cm, como se mencionó en el apartado 4.2.5, el control de la posición se realiza a través del llamado de un subVI con el mismo nombre, el cual contiene el algoritmo gráfico para este proceso, en la interfaz gráfica contamos con un “waveform chart” (carta forma de onda), o lo que es lo mismo un visualizador del proceso de control de posición, en el tendremos la visualización de la respuesta que tiene el sistema ante el valor deseado que el usuario quiera, teniendo la respuesta del proceso en tiempo real.

Figura 71. Interfaz Servo de Posición.



Se cuenta también con el menú desplegable “¿Qué quieres hacer? Donde se puede hacer optar a las formas posibles en que se puede tener el set point (apartado 4.3.9), a la par, diales para modificar las constantes de sintonización a voluntad del usuario, al iniciar esta opción se mostrarán unas constantes prefijadas.

El led “*O.K POSICIÓN*” indicará el momento en que el error entre el set point y la variable de proceso sea inferior al 1%, denotando así que el sistema se encuentra en estado estable, y por ende ubicado en la posición deseada.

7.4 SERVO DE FUERZA

En esta opción se pretende mostrar el comportamiento de la máquina a la hora de realizar control de fuerza, el código gráfico mencionado anteriormente (4.2.6), denota que este servo se basa en las lecturas proveniente de los transductores de presión en las cámaras del actuador, la visualización del diferencial de presión, el cual controla la fuerza presente en la compresión se realiza mediante un waveform chart que mostrará en tiempo real el set point deseado y la respuesta del sistema.

Figura 72. Pestaña "Servo de Fuerza".



El desplegable “*Material*” permite elegir el elemento al que se le quiere suministrar fuerza, al elegir uno u otro se tendrán un cambio en las constantes de sintonización (diales alojados en la parte inferior izquierda); el segundo desplegable consta de las opciones “*Entrar*”, “*Compresión*”, y “*Salida*” para que el usuario pueda realizar el servo de fuerza aplicando los pasos necesarios para desarrollarlo.

Para visualizar el modo en que se realiza el servo de fuerza, se cuenta con un led que indica el momento en que se ha llegado al valor de set point deseado, a

la par, en las ilustraciones de tracción y compresión se muestra el comportamiento de los transductores, o bien, la presión experimentada en cada una de las cámaras del actuador.

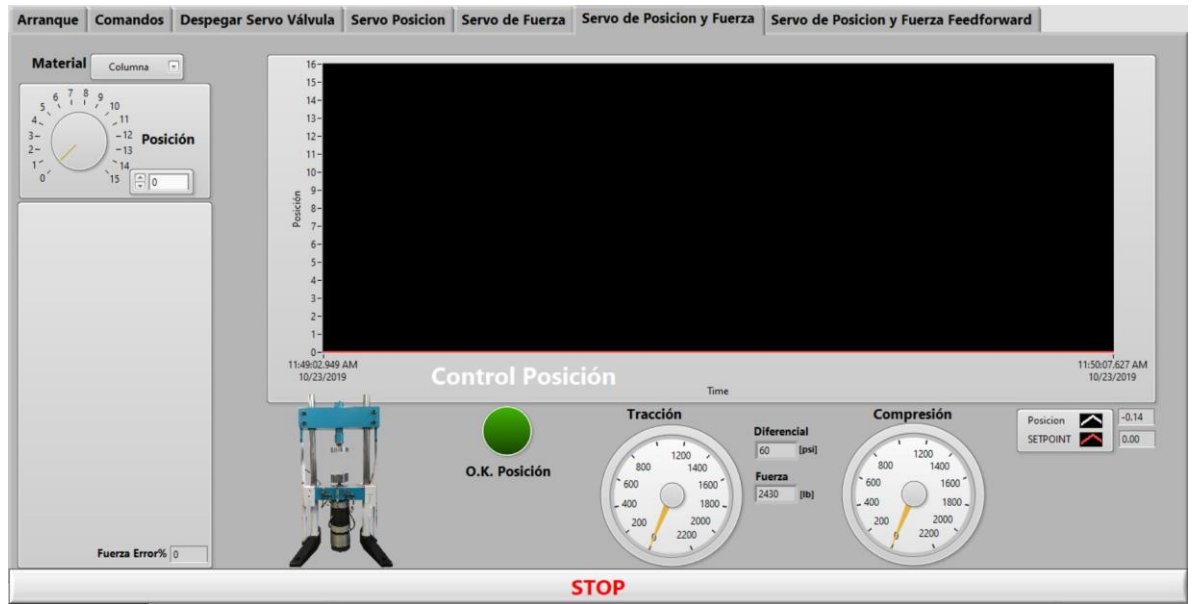
Por último, se muestra en los indicadores alojados entre los transductores, los valores de diferencial de presión y fuerza suministrada en todo momento.

7.5 SERVO DE POSICIÓN Y FUERZA

Como su nombre indica, esta pestaña muestra la posibilidad de realizar ambos servos en una misma interfaz en aras de brindar una aplicación de tipo industrial donde se muestre cómo un equipo de este estilo debe operar y las funciones que debe realizar. Como fin último de esta pestaña se tiene una interfaz que obedece al código gráfico establecido en el capítulo anterior (4.2.7), donde el proceso se realiza de forma automática, de modo que la interfaz gráfica irá mostrando la respuesta del sistema en función que se trate de servo de posición o fuerza.

La interfaz está dada para que el usuario indique qué tipo de material quiere ensayar, bien sea columna o resorte, para luego indicar el valor de posición al que quiera llegar (lo más cercano a la placa superior sin llegar a tocarlo), a partir de aquí la activación del botón *“Aplicar fuerza”* y las opciones de set point (*“Escalón”, “Random”, “Rampa”, “Frecuencia”* o *“repetitividad”*) aparecerán tras dos (2) segundos de ubicado el material en la posición deseada; a partir de este punto e indicado el valor de presión al que se quiera llegar y el modo en que se quiera realizar, con activar *“Aplicar fuerza”* el proceso se realizará de manera automática hasta que se quiera dar por terminada esta aplicación, en dicho caso basta con desactivar *“Aplicar fuerza”*, para que la presión decaiga hasta su valor mínimo, y tras esto, descienda el actuador a su posición más baja.

Figura 73. Pestaña "Servo de Posición y Fuerza".



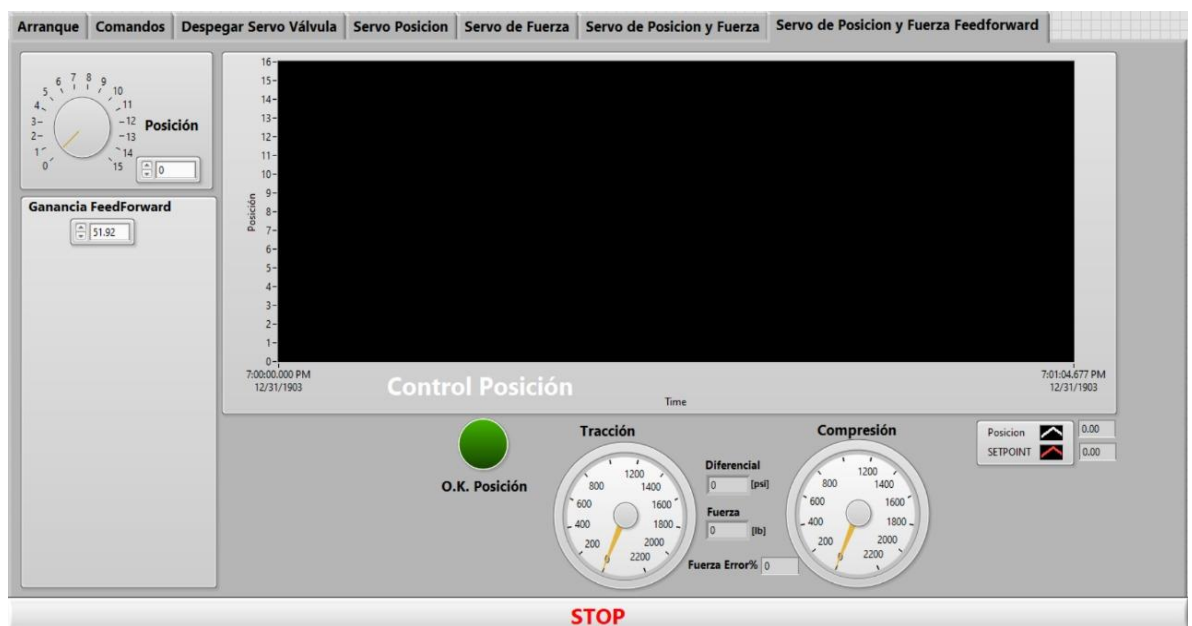
El diseño de la interfaz gráfica es una combinación de las pestañas anteriores, con la excepción de que aquí, la respuesta del sistema en posición y fuerza aparecerá según se encuentre en un servo u otro.

Las opciones de set point están disponibles únicamente para el servo de fuerza, ya que la utilidad del servo de posición en esta pestaña es la de acercar de manera rápida el material a ensayar a una posición muy cercana a su punto de contacto.

7.6 SERVO DE POSICIÓN Y FUERZA FEEDFORWARD

La programación gráfica implementada para esta pestaña es prácticamente igual a la anterior, salvo que ahora el servo de fuerza es realizado a través de la herramienta *“Control & Simulation Loop”* y la respectiva ganancia del compensador Feedforward, para esta opción se tiene como utilidad la de mejorar la respuesta del sistema al realizar servo de fuerza a un resorte; el hecho de tratarse de un medio elástico establece una perturbación variante en el sistema, por lo cual, las constantes de sintonización de columna (elemento rígido) no se pueden aplicar al ensayar un resorte (comportamiento elástico), y que al hacerlo el sistema muestre una respuesta errática en el intento de control de fuerza.

Figura 74. Pestaña *“Servo de Posición y Fuerza Feedforward”*.



Lo diferente en esta interfaz con respecto a la anterior, es la ganancia Feedforward que se puede ir variando según quiera el usuario.

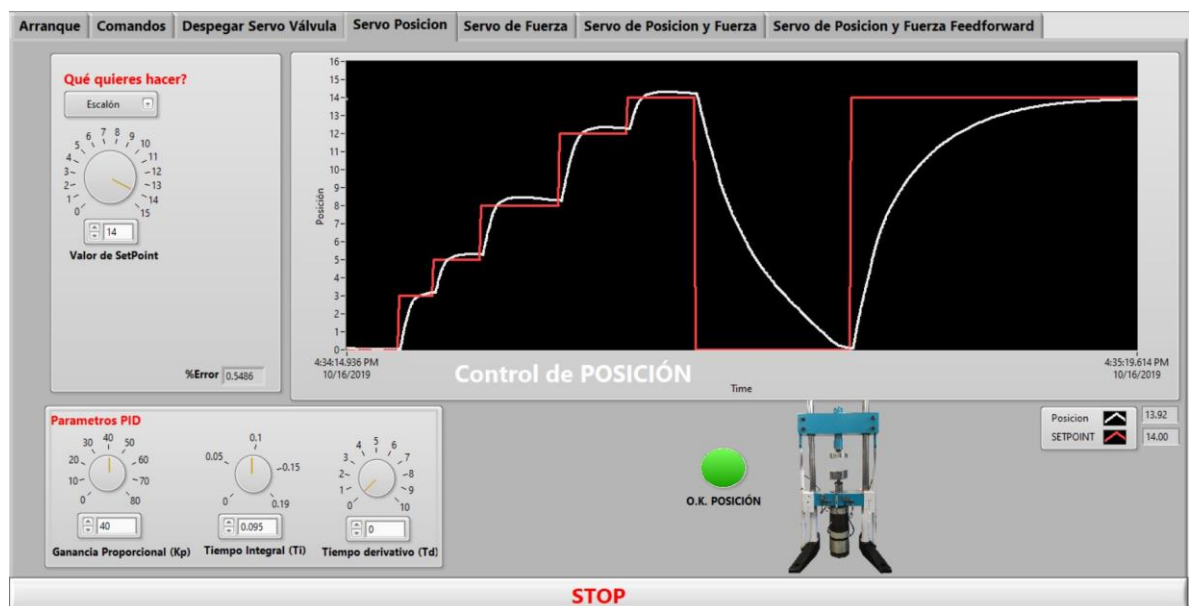
8. RESULTADOS

En esta sección se observará la respuesta presente en los tipos de control desarrollados para este proyecto, se dividirá en consecuencia en los resultados obtenidos en las fases de control de posición, fuerza, la unión de posición y fuerza con y sin compensador (Feedforward).

8.1. RESULTADOS SERVO DE POSICIÓN.

Como indica su nombre, en esta sección se apreciará la forma en la que el sistema llega hasta el valor deseado de posición, lo importante es la visualización gráfica de la respuesta del sistema por parte de los estudiantes, quienes a través de la interfaz puedan interactuar con el sistema, probando diferentes posiciones y la respuesta ante diferentes opciones, de modo que, en sucesivas imágenes se apreciarán las respuestas del sistema a todas estas opciones en diferentes momentos.

Figura 75. Respuesta a la señal "Escalón" servo de posición.

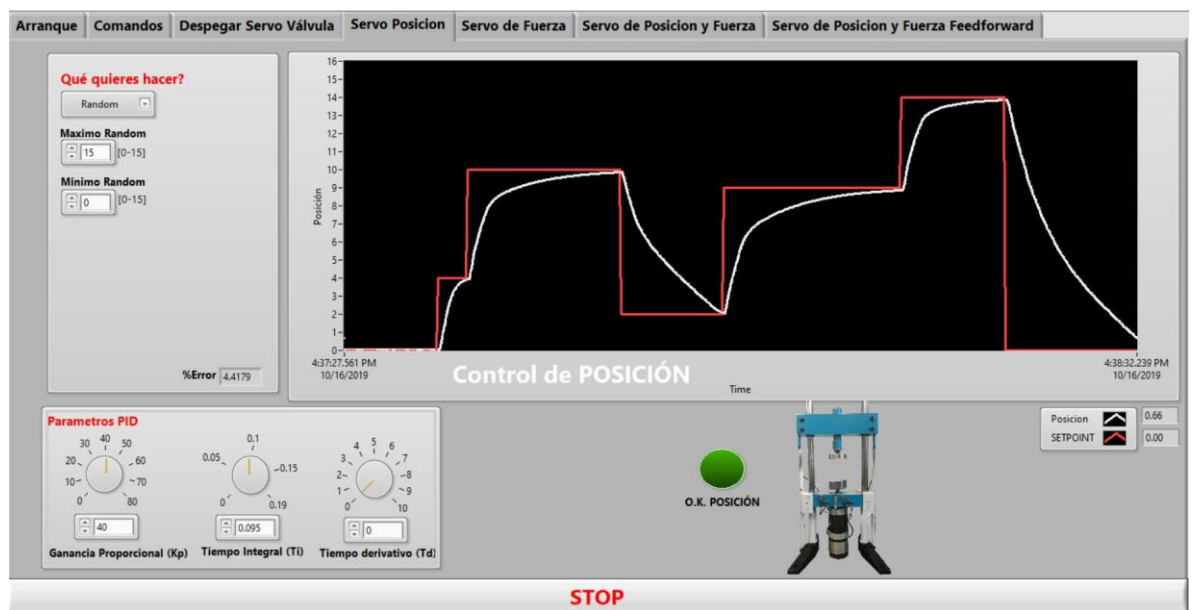


En la visualización se aprecia el grado de error que experimenta en la medida, la cual puede ser corroborada mediante una regla o un pie de rey, cabe resaltar

que la medida mostrada en el display al lado de la pantalla es debido a la conversión de la señal enviada por el sensor de posición (LVDT); en la figura mostrada anteriormente, se tiene la respuesta al escalón para valores de 3, 5, 8, 12 y 14 cm.

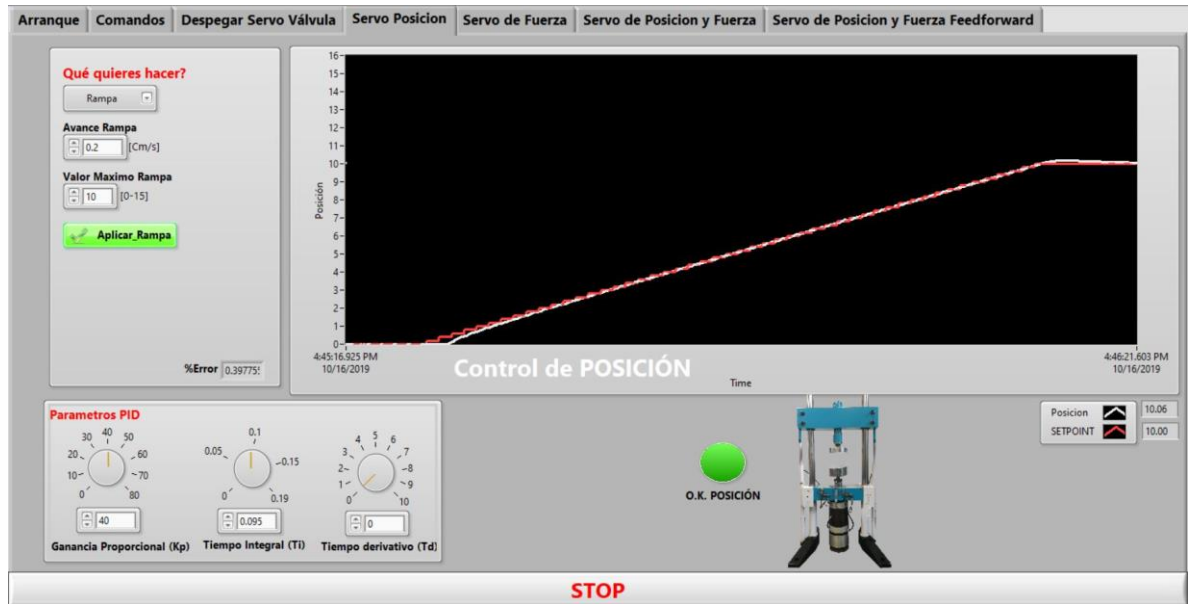
Siguiendo con las opciones que tiene el servo de posición, se aprecia la respuesta del sistema ante un rango de valores al azar.

Figura 76. Respuesta señal "Random" servo de posición.



La configuración del control en rampa está dada para poder dar al usuario la capacidad de establecer, además de la velocidad de avance, el valor máximo al que se quiera llegar, tal como en el ejemplo mostrado en la figura anterior, 10[cm].

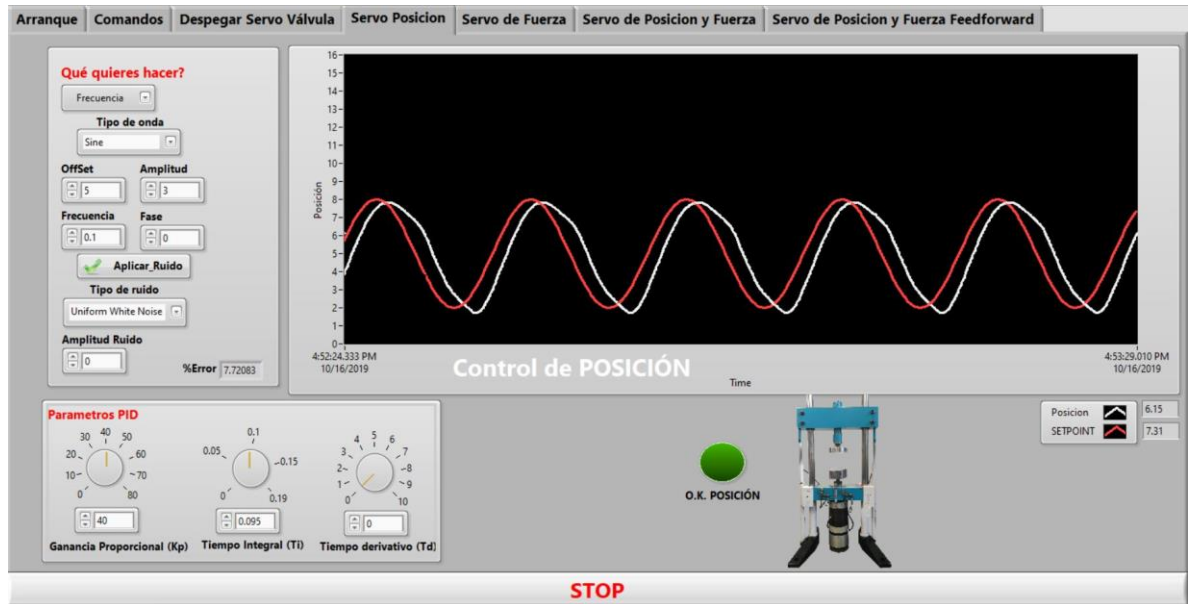
Figura 77. Respuesta señal "Rampa" avance 0.2 cm/s servo de posición.



Se aprecia que la forma en que el sistema se adapta a la señal en rampa acopla a su avance, mostrando una rampa con mayor o menor inclinación.

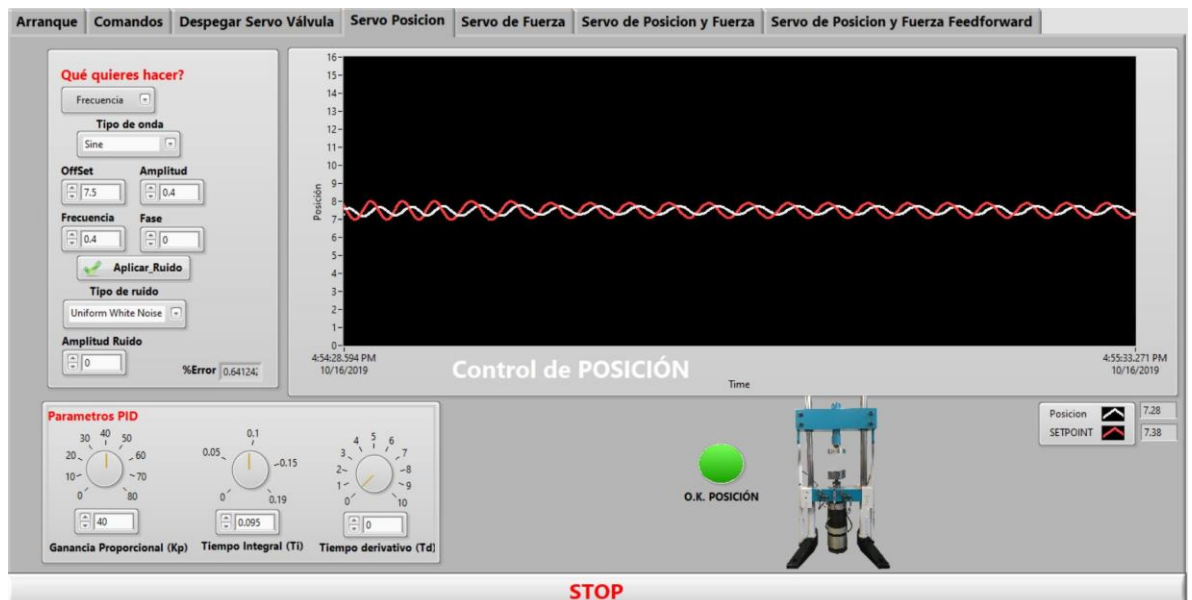
La función frecuencia, como se mencionó, envía una señal sinusoidal, cuadrada, diente de sierra o bien una señal constante; estas ondas se pueden establecer desde la interfaz con parámetros como frecuencia, amplitud, offset e incluso ruido (amplitud y tipo de ruido), de modo que para efecto práctico se mostrará la respuesta a la señal sinusoidal.

Figura 78. Respuesta señal "Frecuencia" servo de posición.



Se aprecia entonces que la adaptación del sistema al envío de una señal sinusoidal mostrada en la figura anterior es para una señal con un offset de 5 [cm], con amplitud de 3 [cm] (con lo que se tendrá valores pico de 8 y 2 [cm]) y una frecuencia de 0.1 [Hz].

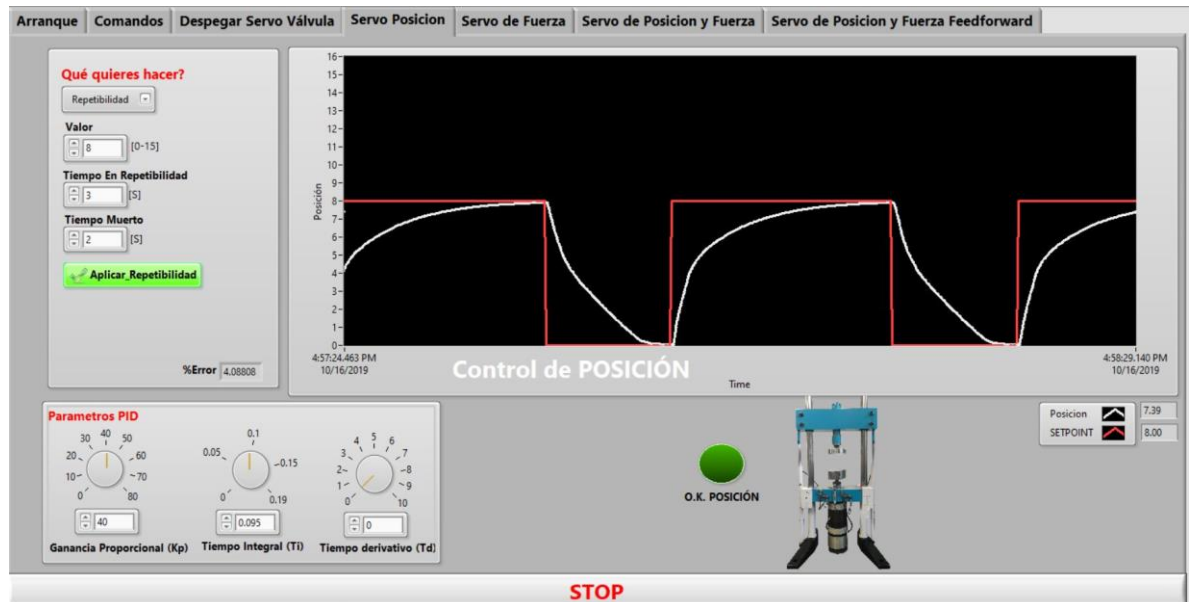
Figura 79. Respuesta señal "Frecuencia" 2 servo de posición.



En la figura anterior se muestra la respuesta ante una señal sinusoidal con una mayor frecuencia, pero menor amplitud, la adaptación es mejor en este caso.

Para la opción de “*Repetitividad*” se muestra la calidad del servo de posición a la hora de llegar reiteradas veces a un mismo valor, en unos rangos de tiempo establecidos por el usuario.

Figura 80. Respuesta señal “*Repetitividad*” servo de posición.

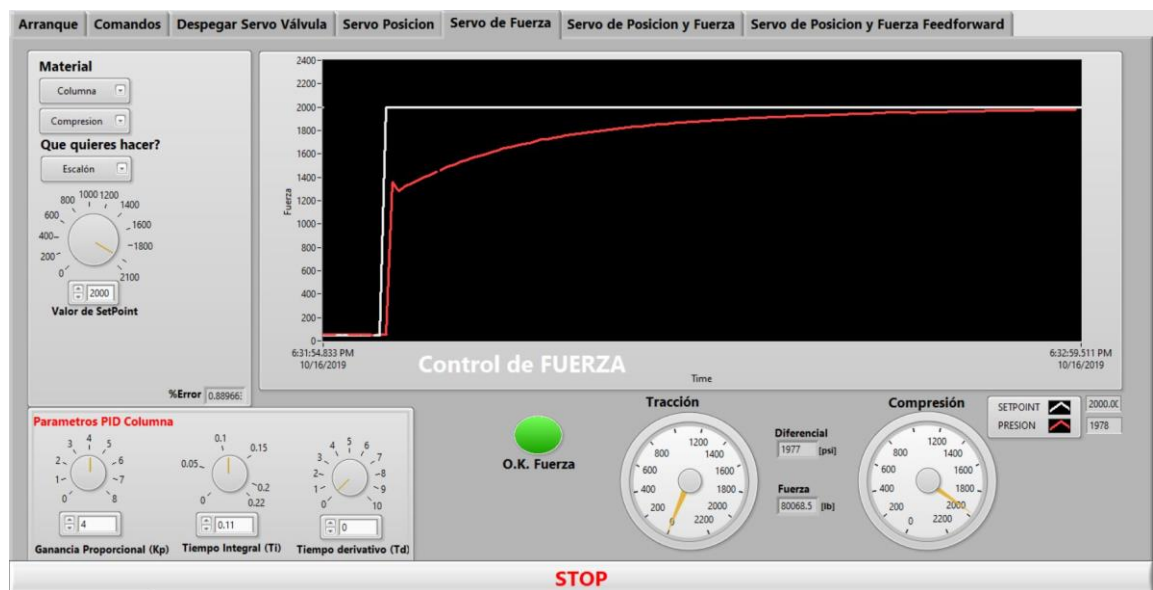


Esta última opción se realiza para comprobar la calidad o capacidad del control de posición para llegar a un valor de 8 cm con un tiempo en esta posición 8 segundos y un tiempo de 2 segundos en la posición más baja; esta operación se realizará ininterrumpidamente, logrando automatizar un proceso mediante un control de posición.

8.2 RESULTADOS SERVO DE FUERZA

El servo de fuerza se realiza mediante el control de la diferencia de presión medida en los transductores y visualizada en la interfaz gráfica, a su vez que se muestra el valor de la fuerza aplicada en todo momento; en sucesivas figuras se irá mostrando, al igual que en servo de posición, la respuesta a las señales de set point para columna.

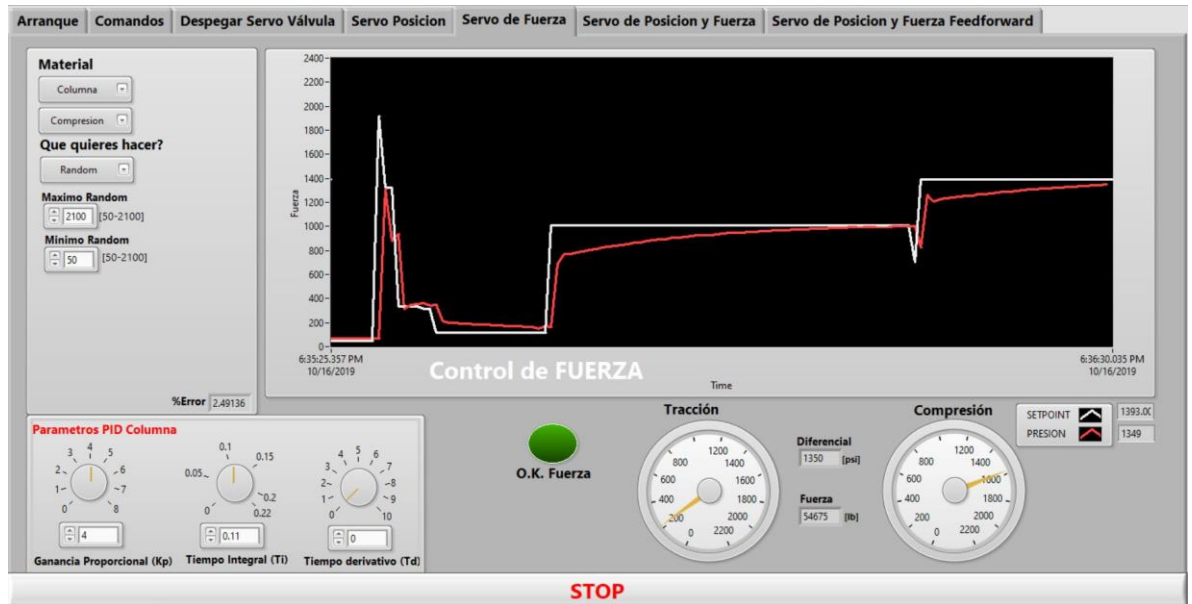
Figura 81. Respuesta señal "Escalón" servo de fuerza.



En el caso concreto de la respuesta a la señal "Escalón" se muestra el comportamiento para el servo de fuerza en un valor de presión de 2000 psi.

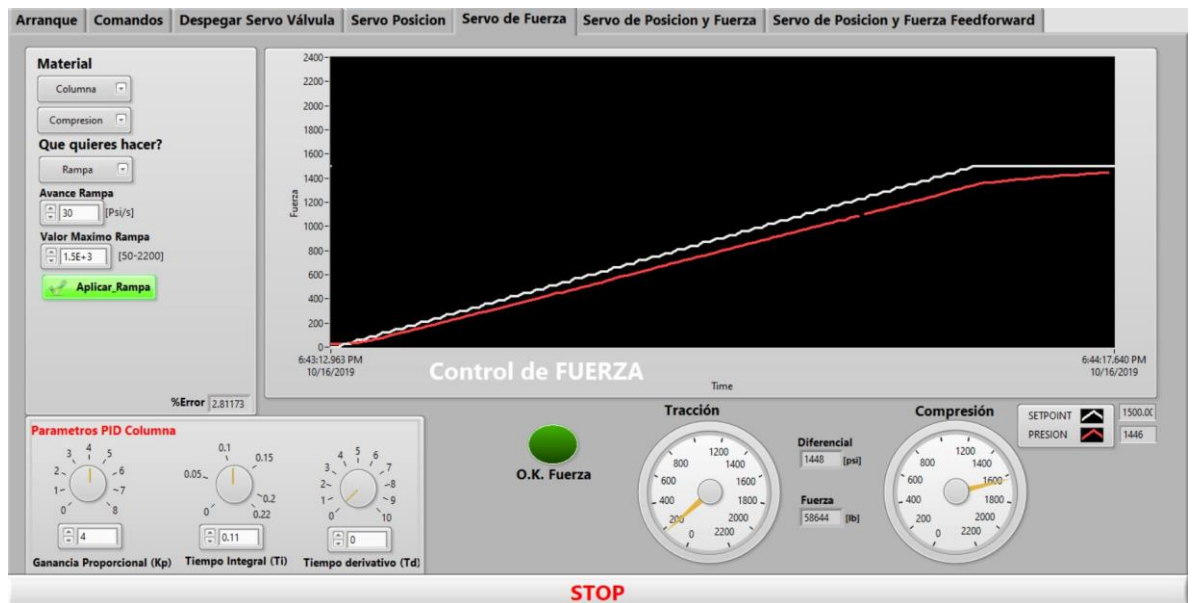
Como en posición, para la señal random una serie de valores de set point al azar se irán sucediendo, teniendo entonces una respuesta en servo de fuerza como se muestra en la siguiente figura.

Figura 82. Respuesta señal "Random" servo de fuerza.



En el caso de la señal "Rampa" se tiene la respuesta mostrada a continuación.

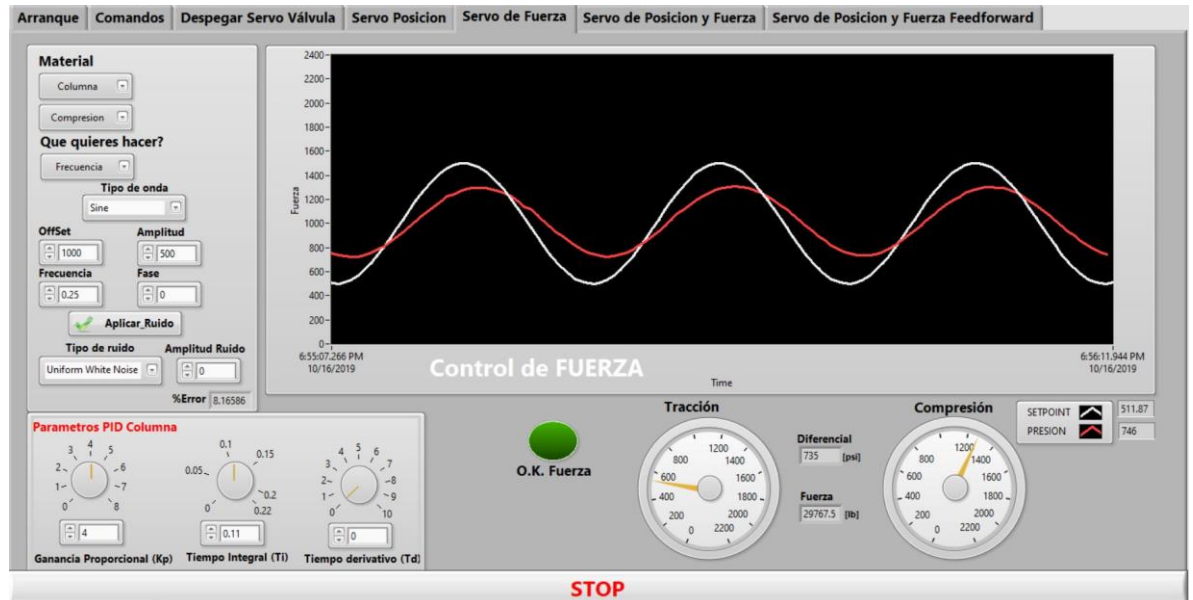
Figura 83. Respuesta señal "Rampa" servo de fuerza.



A medida que se sucede la rampa el sistema adquiere el comportamiento lineal esperado hasta llegar a su valor máximo fijado, en este caso 1500 psi, para un avance 1200 Lb/s

En caso de recibir una señal en forma de onda sinusoidal se tiene la respuesta mostrada a continuación.

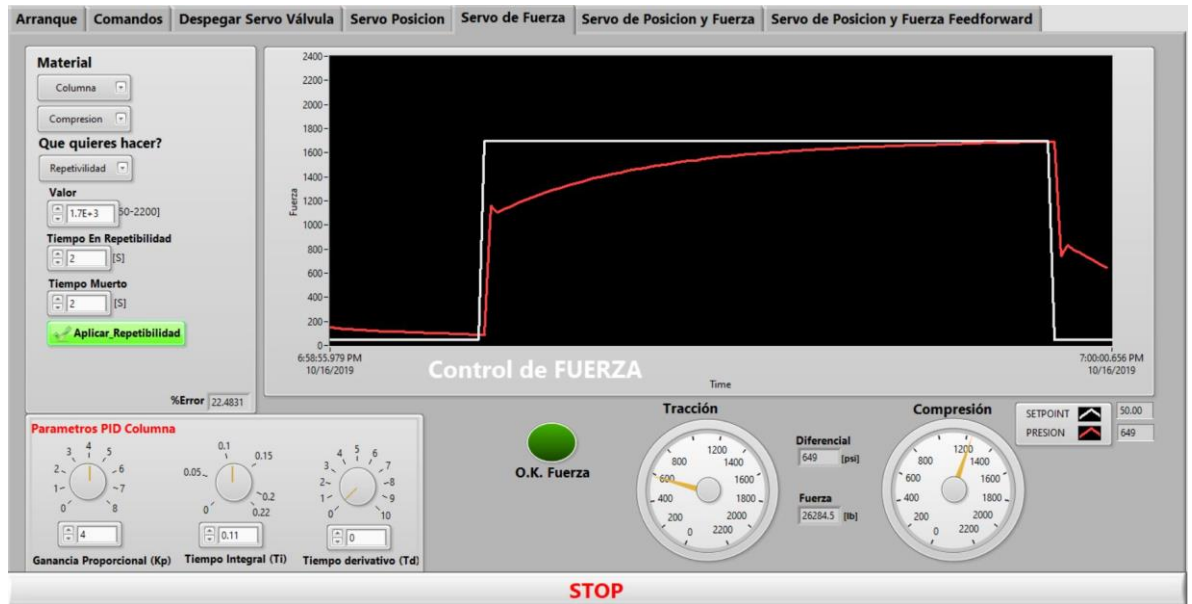
Figura 84. Respuesta señal "Frecuencia" servo de fuerza.



La adaptación de la fuerza a la variación del set point es aceptable y muestra el comportamiento ondulatorio que puede adquirir el control de fuerza para esta opción.

Finalmente, para la función "Repetitividad" se tiene una respuesta de la siguiente forma.

Figura 85. Respuesta señal "Repetitividad" servo de posición.

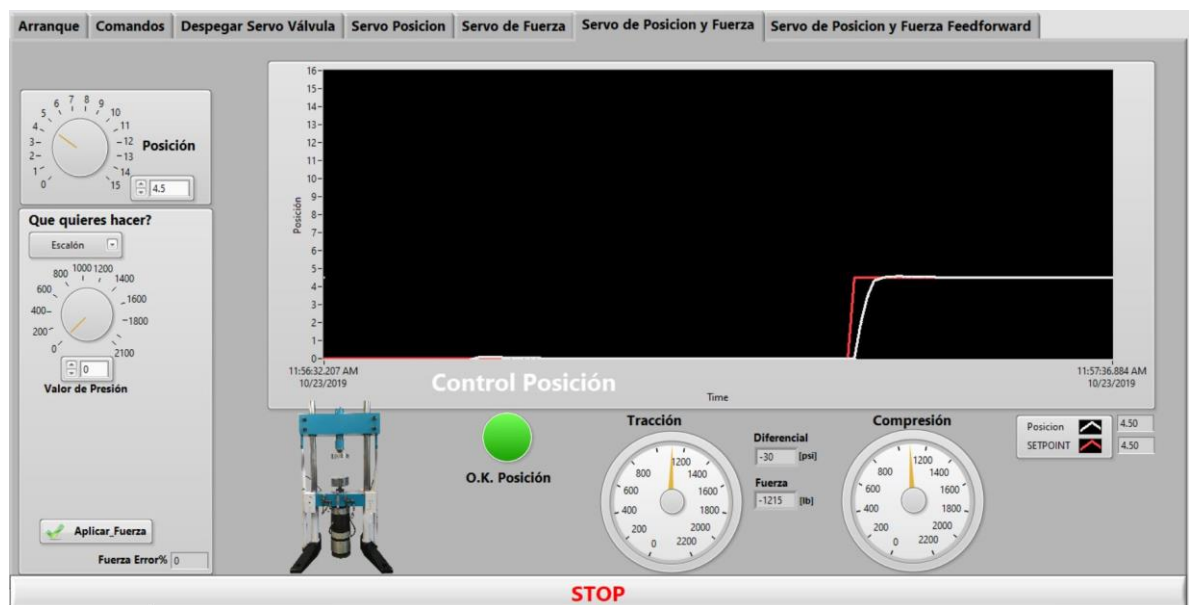


Debido a que la respuesta del sistema en control de fuerza es un poco más lenta que en posición; en la figura anterior se observa para un valor de 1700 psi, con tiempos comprendidos entre 2 segundos de "Tiempo En Repetibilidad", y 2 segundos en presión mínima, o bien, "Tiempo muerto", se muestra uno de los ciclos realizados en esta opción.

8.3 RESULTADOS CONTROL DE POSICIÓN Y FUERZA

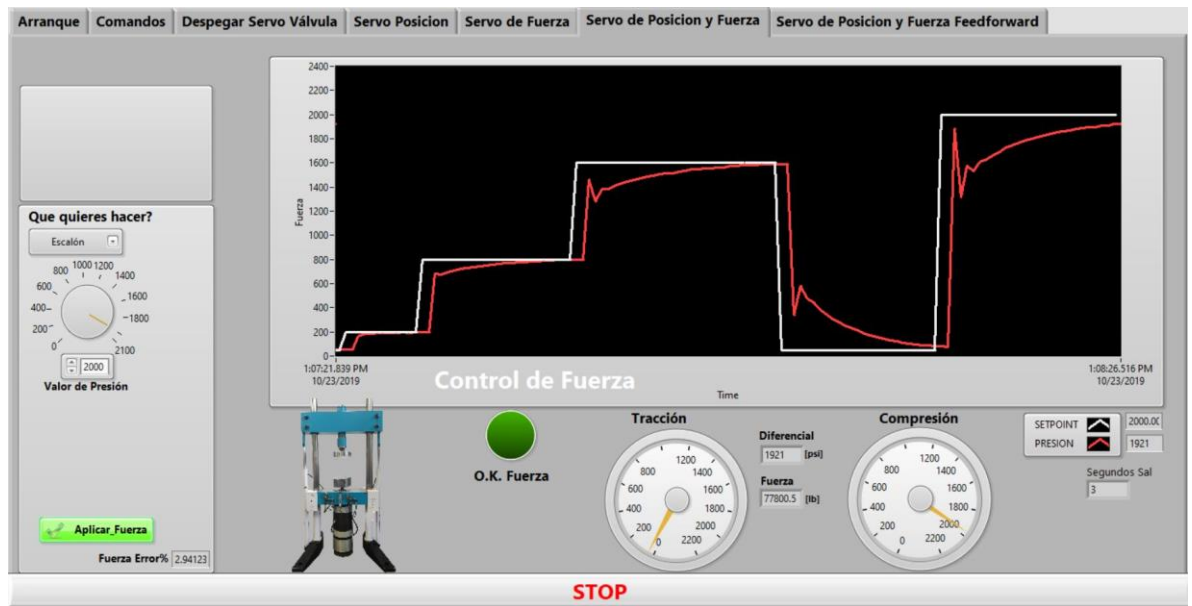
Como se mencionó en el capítulo anterior, la programación establecida dará como respuesta la aparición de la gráfica a medida que se realice uno u otro servo, teniendo así que en un control de fuerza de tipo “Escalón”, “Random”, “Rampa” y “Frecuencia” se tiene primero el posicionamiento del material en la posición cercana al punto de contacto (4.5 cm en caso de columna y 8 cm en caso de resorte), obteniendo una respuesta como se muestra.

Figura 86. Respuesta a la ubicación de material columna.



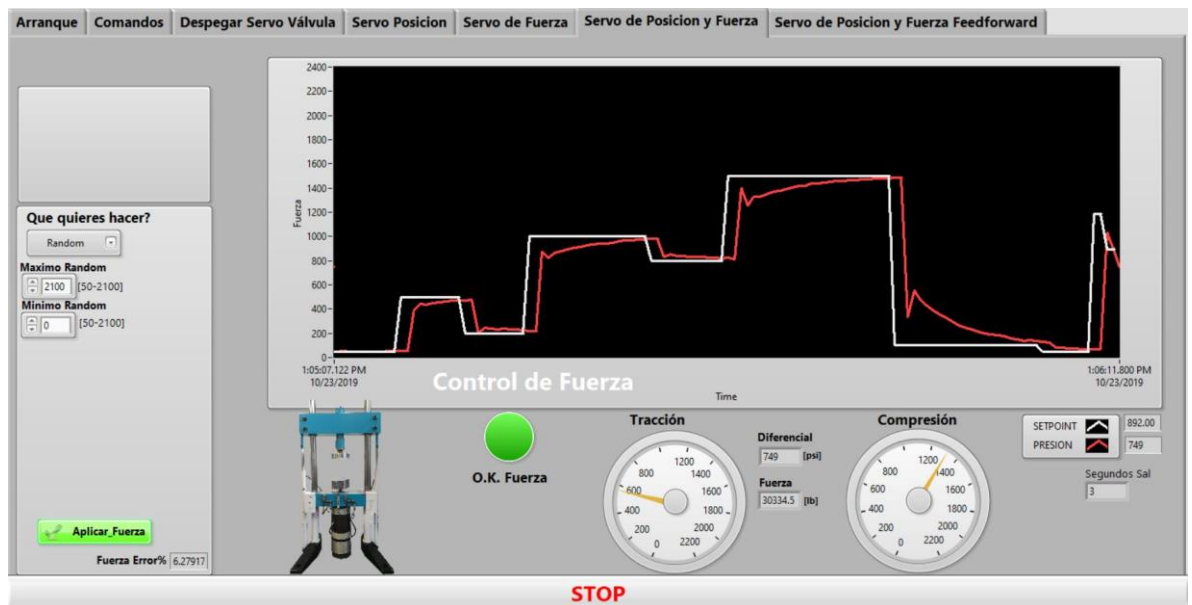
Una vez se llega a esta posición, se procedió a establecer el control de fuerza bajo las opciones disponibles y obteniendo las respuestas siguientes.

Figura 87. Respuesta señal "Escalón" servo de posición y fuerza.



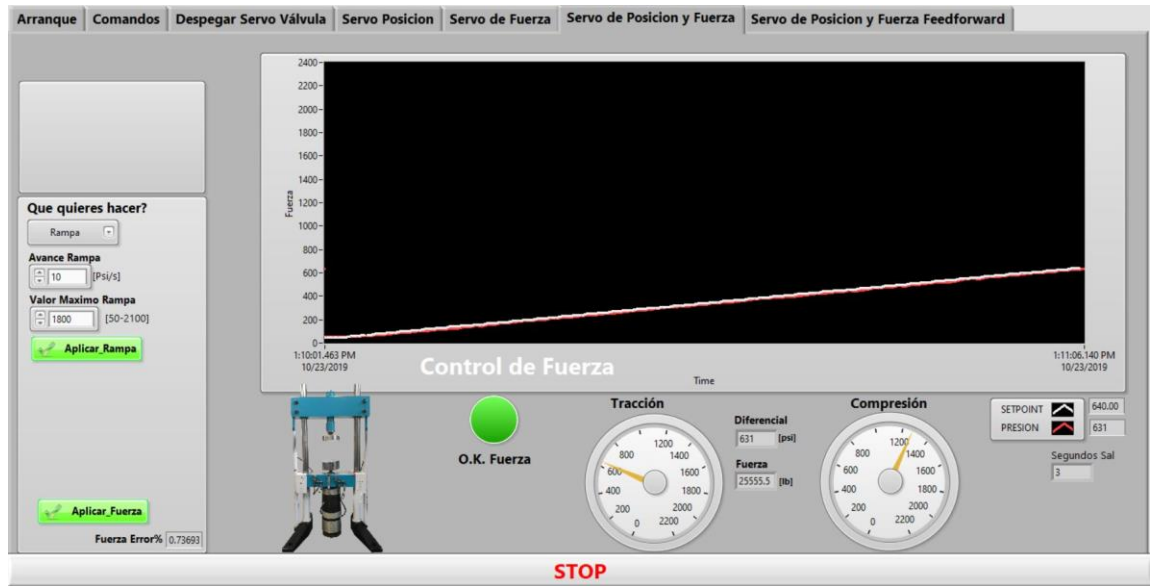
En modo "Random" se obtiene.

Figura 88. Respuesta señal "Random" servo de posición y fuerza.



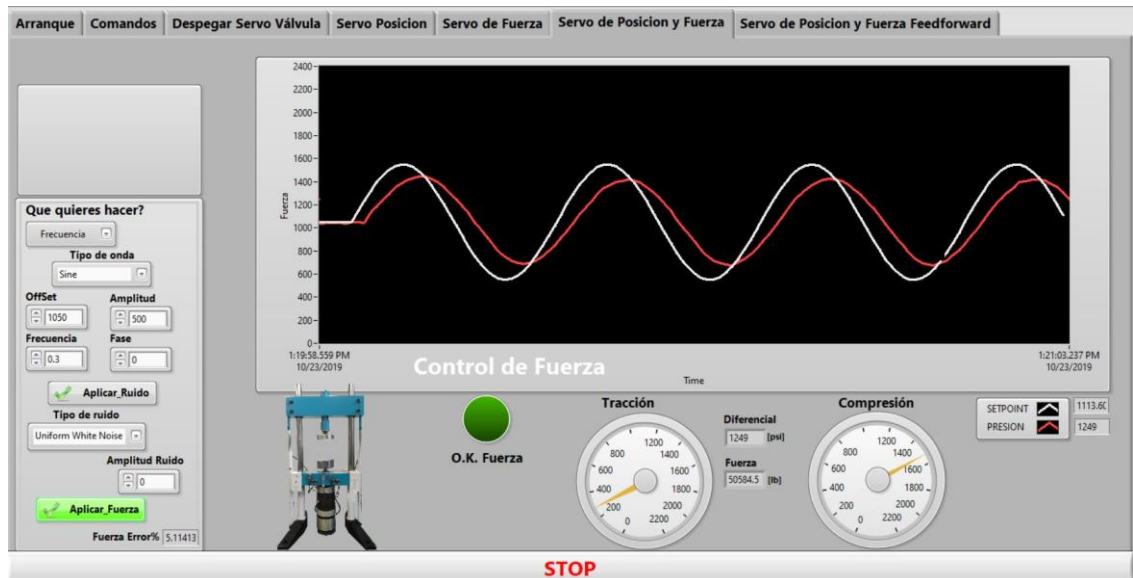
A su vez en modo "Rampa" se consigue una respuesta como se muestra.

Figura 89. Respuesta señal "Rampa" 10 psi/s servo de posición y fuerza.



Respuesta dada para una rampa de 405 Lb/s. En el caso de tener modo "Frecuencia".

Figura 90. Respuesta señal "Frecuencia" servo de posición y fuerza.



La respuesta ante una señal de esta forma es muy similar a la obtenida en el servo de fuerza figuras atrás.

Finalmente, la respuesta del sistema ante el modo "Repetitividad" en su gráfica como se muestra a continuación, cuenta con un tramo de tiempo extra (2

segundos) al de tiempo muerto, debido a que en el valor de mínima presión el actuador desciende hasta la posición más baja para volver a ubicarse en la posición cercana al punto de contacto. Por lo cual el espacio entre un ciclo y otro es mayor.

Figura 91. Respuesta señal "Repetitividad" servo de posición y fuerza.



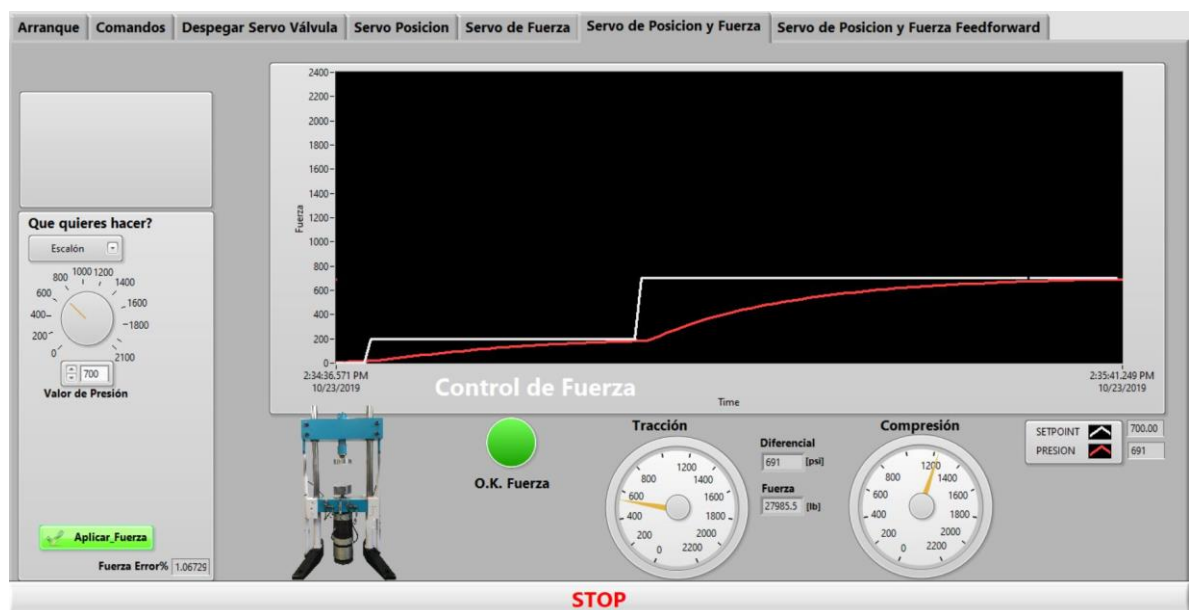
Las anteriores figuras ilustran del comportamiento del sistema ante la unión de ambos servos en una misma interfaz.

8.4 RESULTADOS CONTROL DE POSICION Y FUERZA FEEDFORWARD

Como se mencionó la programación está dispuesta de igual forma que en el apartado anterior, salvo el cambio en la acción de compresión dada por el entorno *"Control & Simulation Loop"* así pues, el testeo de la respuesta del sistema se realizó para ver el cambio en la respuesta del control de fuerza con el resorte cuando no se aplica el compensador por adelanto y cuando se aplica.

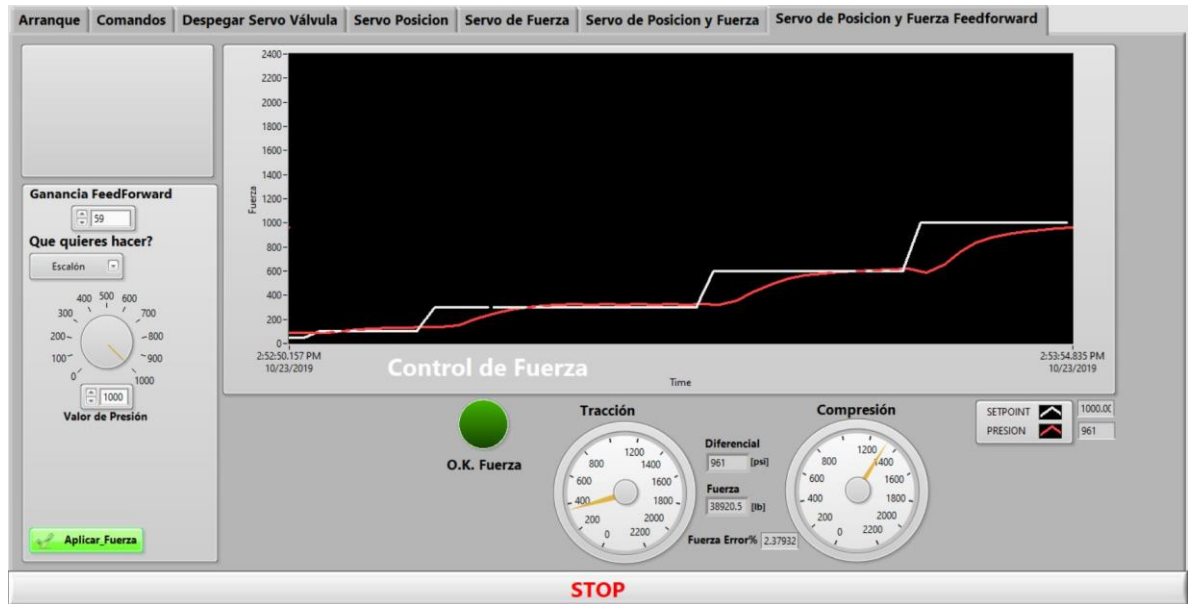
Se tiene entonces en la siguiente figura la respuesta del sistema ante el control de fuerza al resorte con una señal *"Escalón"* para evidenciar su respuesta y compararla con la obtenida al aplicar el compensador Feedforward.

Figura 92. Respuesta señal *"Escalón"* sin compensador



En este punto se puede comparar gráficamente la pendiente de la respuesta ante la señal escalón dada para el resorte con y sin compensador; a continuación, se muestra el comportamiento a diferentes valores de escalón cuando se aplica el compensador Feedforward.

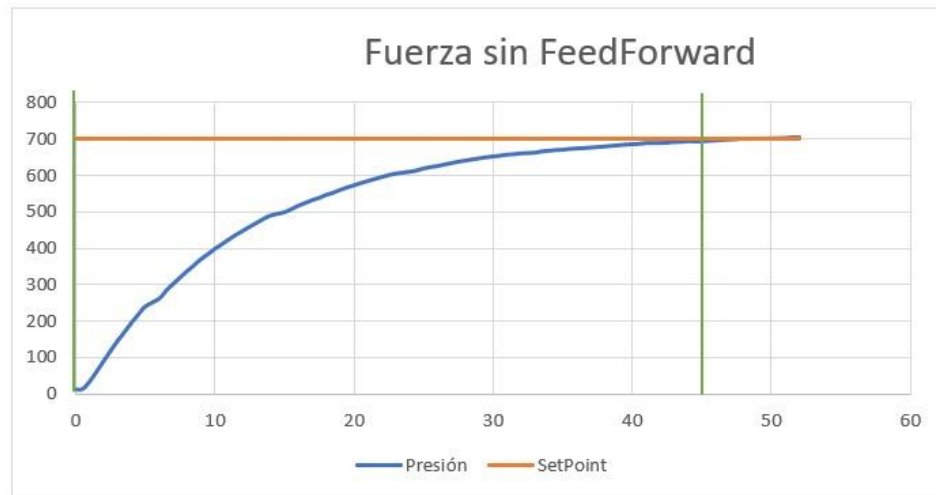
Figura 93. Respuesta señal "Escalón" con compensador.



En este punto se puede apreciar gráficamente como la respuesta ante la señal escalón muestra una mayor pendiente, lo que se traduce en un menor tiempo para llegar hasta el valor del set point establecido, en la anterior figura se evidencia el comportamiento para valores escalón de 400, 600 y 1000 psi.

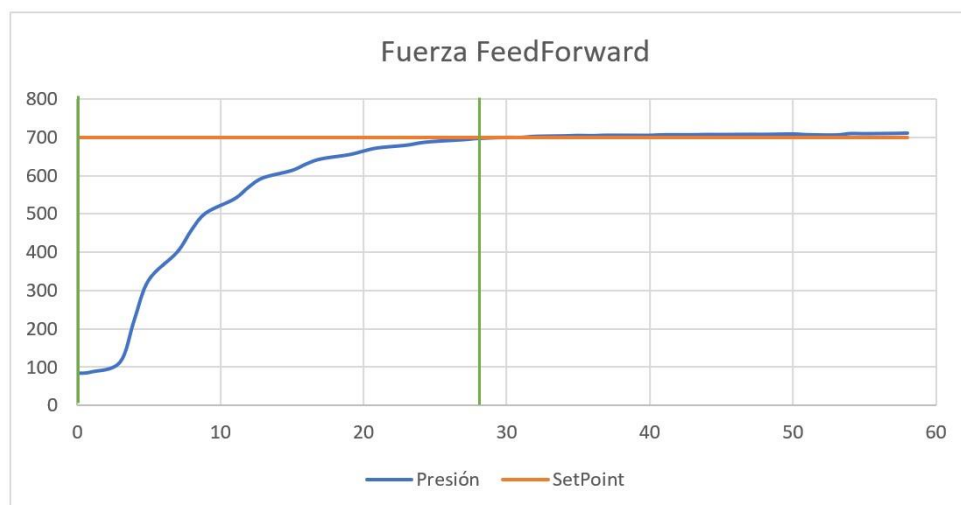
Para apreciar cuantitativamente la mejora en la respuesta debido a la aplicación del compensador Feedforward se exportaron los datos para una señal escalón de 700 psi, al cual se llegó sin compensador y con él, siendo las siguientes figuras la representación de la ristra de datos de manera gráfica.

Figura 94. "Escalón" de 700 psi sin compensador.



Entorno a los 45 segundos el sistema logra llegar al valor de set point establecido sin el uso del compensador.

Figura 95. "Escalón" de 700 psi con compensador.



La pendiente es mayor, lo que denota una disminución en el tiempo en que se llegó al valor de set point establecido haciendo uso del compensador entorno a los 27 segundos; una compilación de los resultados obtenidos se puede observar en la siguiente tabla:

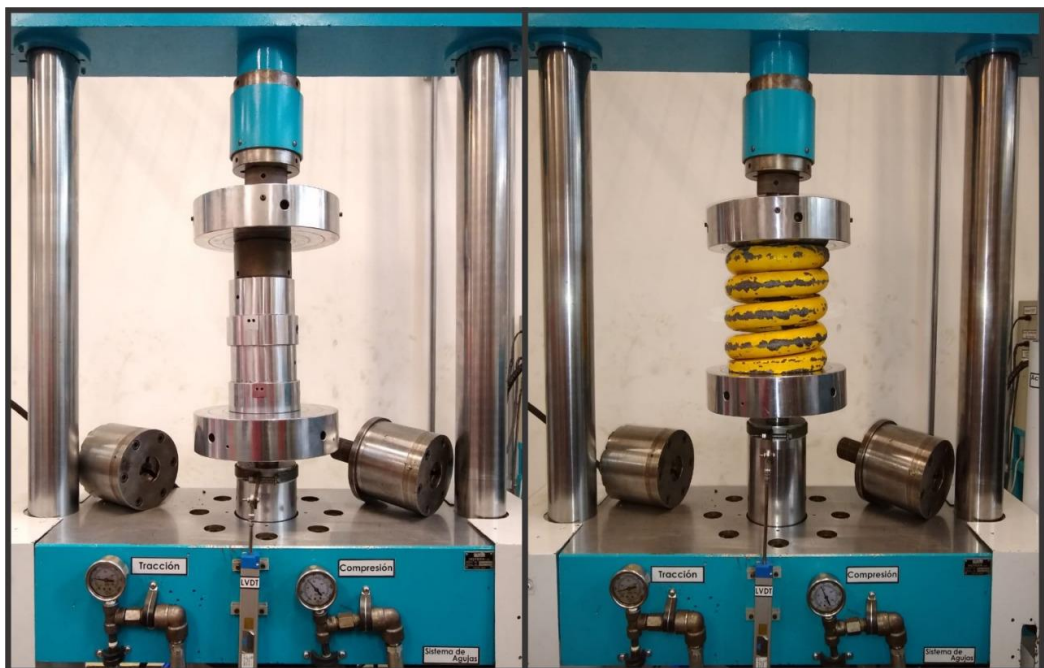
Tabla 5. Resultados control de fuerza con y sin compensador.

	SIN FeedForward			CON FeedForward		
Presión	Tiempo	%Error	%Error 5s	Tiempo	%Error	%Error 5s
700[psi]	45 [s]	0,99%	0,16%	27 [s]	0,73%	0,50%

En la tabla anterior, la columna muestra en qué momento el valor de presión es inferior al 1% de error. La columna “%Error” muestra el valor del error correspondiente al valor de “Tiempo” y “%Error 5s” hace referencia al valor del error tras 5 segundos de que se alcanza un error inferior al 1%, observando así la estabilidad del sistema.

El montaje de servo de fuerza para columna y resorte es como sigue.

Figura 96. Montaje para servo de fuerza, columna y resorte.



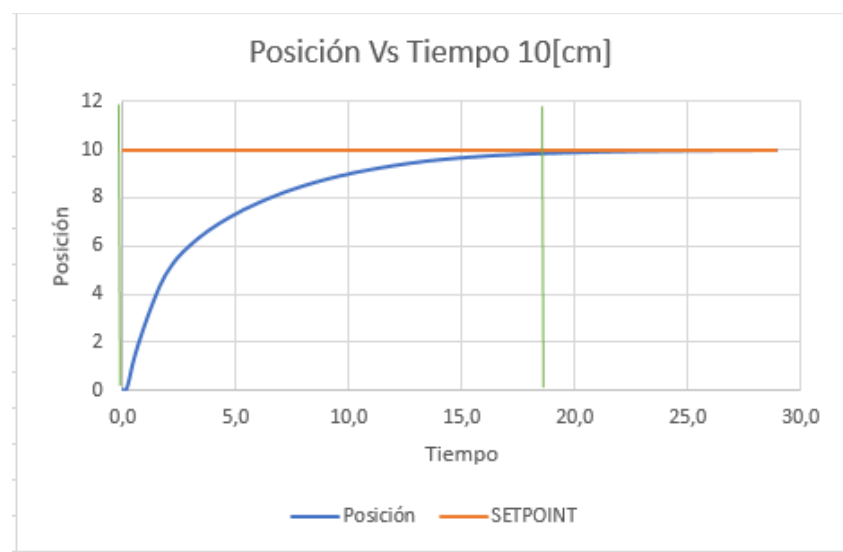
Continuando así con la lectura de manómetros la cual se puede realizar manera visual o en el software como las variables de proceso involucradas durante el servo de fuerza.

8.5 RESULTADOS DE CONFIABILIDAD SERVO DE POSICIÓN

Las pruebas realizadas estaban enfocadas a comprobar la capacidad de los servos de llegar al valor solicitado sin importar lo cambiante de la situación; en el caso de servo de posición se estableció una condición para la cual ante una señal escalón se muestre la respuesta del servo sin ningún tipo de perturbación y con un resorte que actuaría como perturbación.

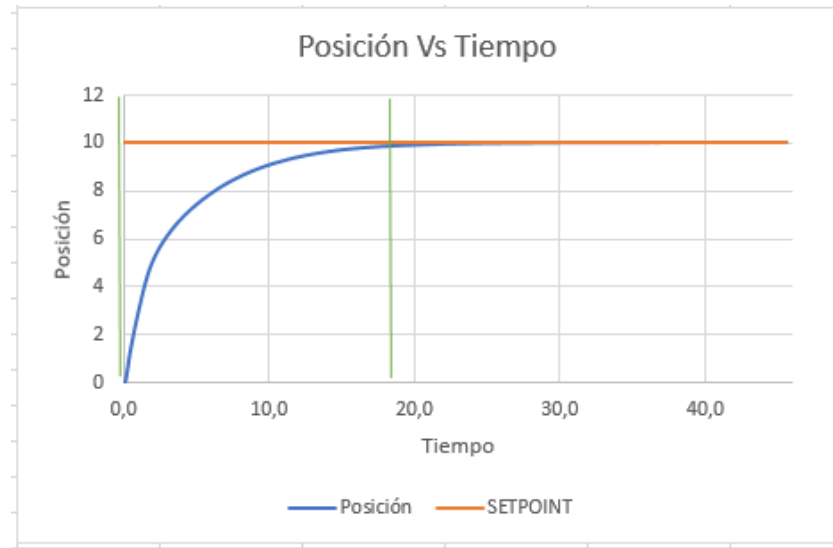
Los valores establecidos para estas pruebas de escalón fueron de 10 12 y 14 [cm] en ausencia y presencia del resorte; con el fin de cuantificar las respuestas obtenidas en uno u otro caso se exportaron los datos a Excel y se obtuvieron los siguientes resultados.

Figura 97. Respuesta "Escalón" 10 [cm] (sin perturbación).



A la hora de aplicar el mismo valor de posición, pero con la presencia de un resorte se obtuvo la siguiente respuesta.

Figura 98. Respuesta "Escalón" 10[cm] (Con perturbación).



De forma similar se exportaron los datos para valores escalón de 12 y 14 [cm], se obtuvo.

Figura 99. Respuesta "Escalón" 12[cm] (Sin perturbación).

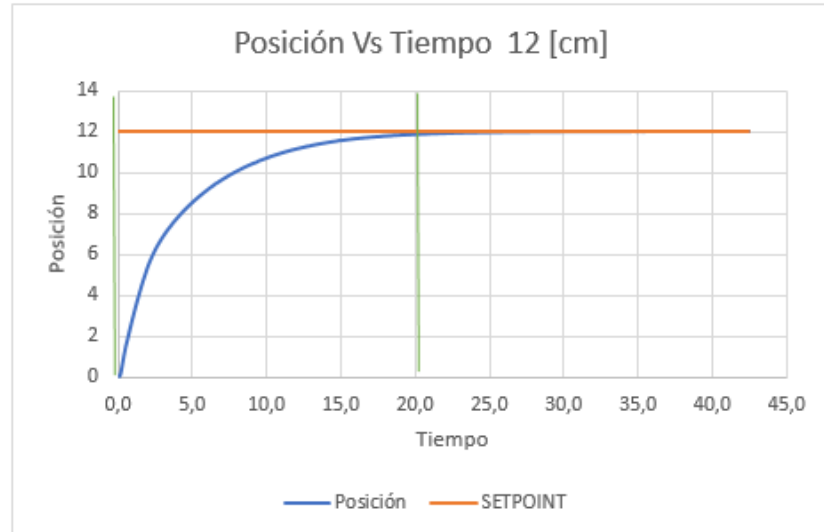
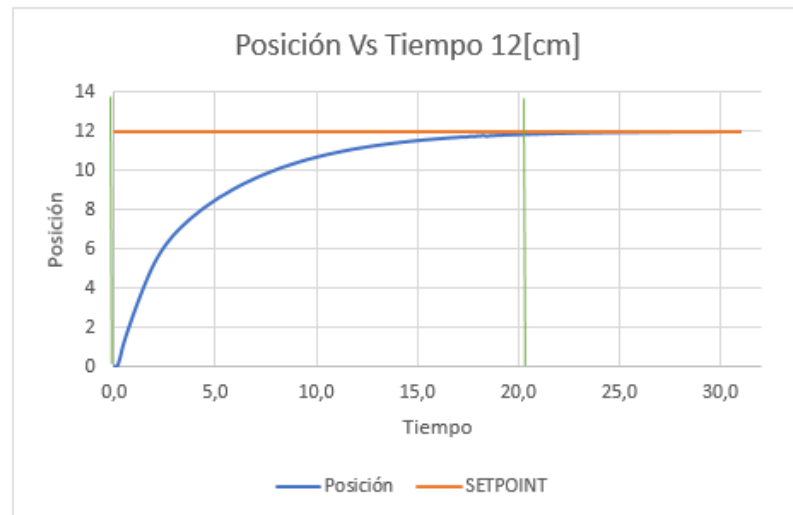


Figura 100. Respuesta "Escalón" 12[cm] (Con perturbación).



Finalmente, para 14 [cm] se obtuvo la siguiente respuesta.

Figura 101. Respuesta "Escalón" 14 [cm] (Sin perturbación).

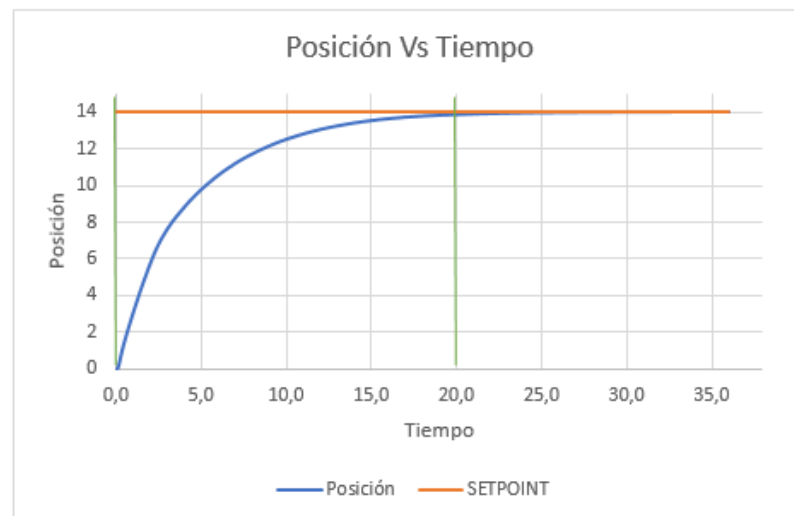
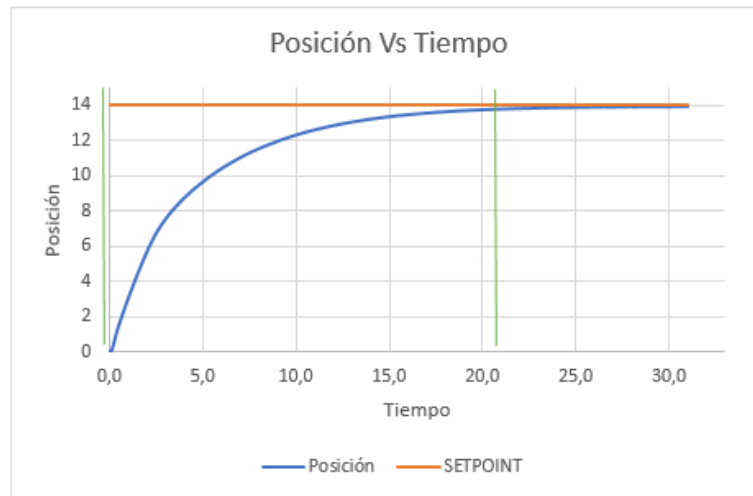


Figura 102. Respuesta "Escalón" 14 [cm] (Con perturbación).



A partir de las figuras 97 hasta 104 se compilaron los datos en la siguiente tabla.

Tabla 6. Resultados de confiabilidad ante distintos valores "Escalón".

	SIN RESORTE		CON RESORTE			
Posición	Tiempo	%Error 10s	Tiempo	%Error 10s	%Deformación	Fuerza Perturbación
10 [cm]	18.6 [s]	0,19%	18.5 [s]	0,12%	12%	7351 [lb]
12 [cm]	20.1 [s]	0,14%	20.5 [s]	0,14%	34%	22054 [lb]
14 [cm]	20.6 [s]	0,17%	21.7 [s]	0,17%	56%	36757 [lb]

De la tabla anterior cabe resaltar que los datos en la columna "*Tiempo*" se deben al tiempo en que se llegó a un valor inferior al 1% de error, o lo que es lo mismo, al encender el led "*O.K. Posición*" el cual indica que se llegó al valor deseado. Los datos contenidos en la columna "*%Error 10s*" fueron los valores de error registrados tras 10 segundos de alcanzado el "*O.K. Posición*" del sistema. La columna "*%Deformación*" muestra el porcentaje de longitud que se deformó el resorte al aplicar el escalón de 10, 12 o 14 [cm], finalmente debajo del título "*Fuerza Perturbación*" se muestran los datos de los valores de fuerza de perturbación experimentada en cada caso, realizado en base a la ley de Hooke.

$$F = K * \delta \quad (29)$$

Expresión para la cual se tiene la constante del resorte¹² de $3334,56 \left[\frac{kg}{cm} \right]$.

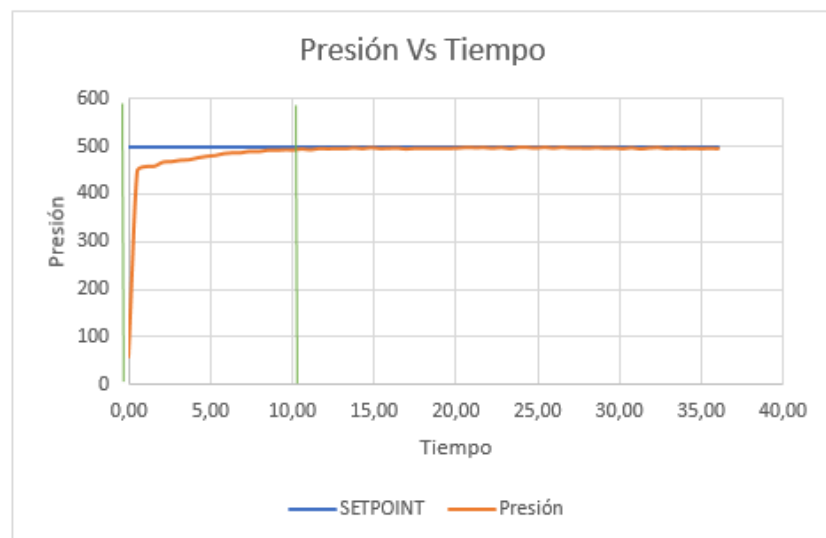
12. REINA GARZÓN, C, ARIZA MEDINA, S. REINGENIERÍA APLICADA A LA MÁQUINA DE ENSAYOS INSTRON 1323 DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA PARA AMPLIAR SU CAPACIDAD DE SERVICIO, Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico, Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingenierías fisicomecánicas, 2012.

8.6 RESULTADOS DE CONFIABILIDAD SERVO DE FUERZA

De igual forma que en el servo de posición, para el servo de fuerza se tienen pruebas similares, en las cuales para un valor de set point de 500[psi] se exportaron los datos al aplicar el control de fuerza para distintos materiales como columna, madera, concreto y resorte.

La aplicación del control de fuerza se desarrolló para los distintos materiales, a los cuales se intentó llegar a un mismo valor de 500 [psi], y tras alcanzar la estabilidad, observar el valor de error arrojado, esto con el fin de comprobar la capacidad del equipo de suministrar un valor de presión o fuerza, independientemente del material que se tenga.

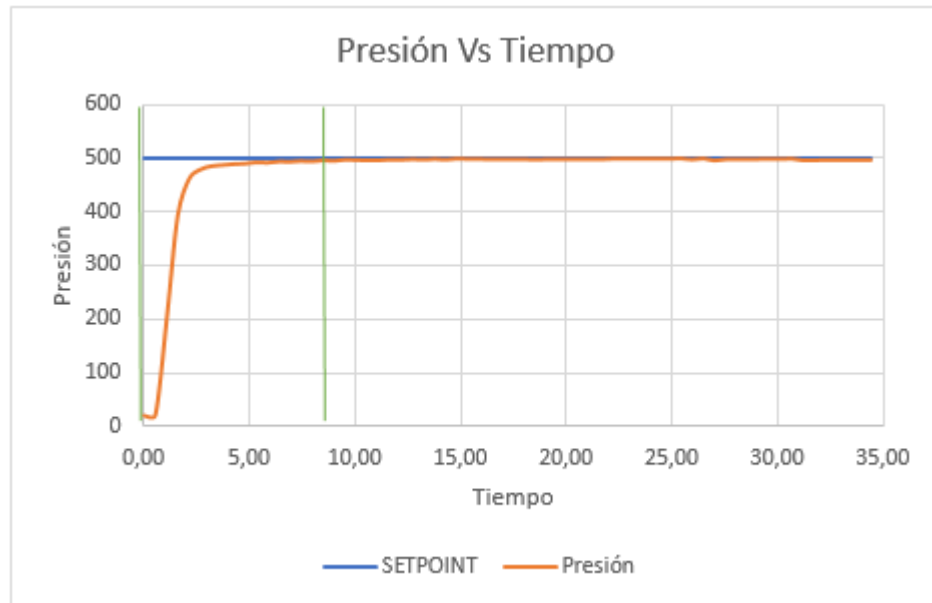
Figura 103.Respuesta "Escalón" 500 [psi] para columna.



De igual forma para un trozo de madera se tiene la respuesta siguiente

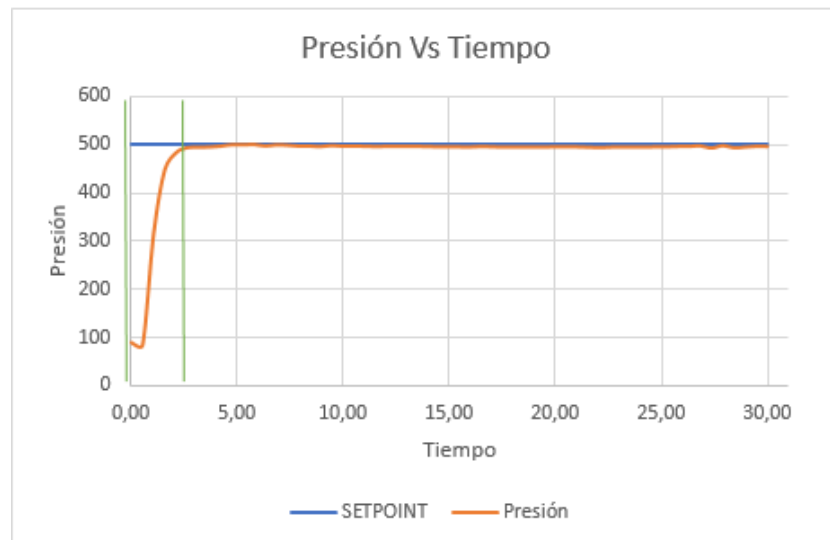
.

Figura 104. Respuesta "Escalón" 500 [psi] para madera.



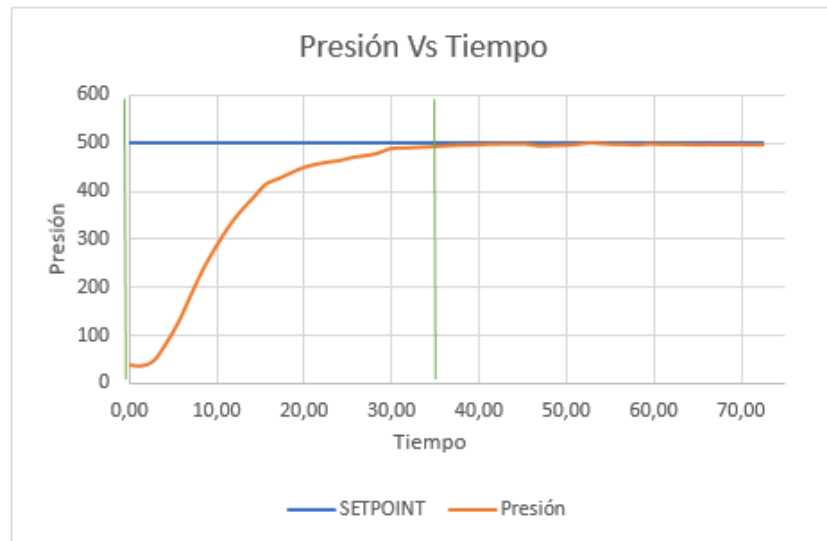
En el caso del concreto se obtiene

Figura 105. Respuesta "Escalón" 500 [psi] para concreto.



Finalmente, ante la presencia del resorte.

Figura 106. Respuesta “Escalón” 500 [psi] para resorte.



Los datos anteriores se compilaron para dar forma a la siguiente tabla.

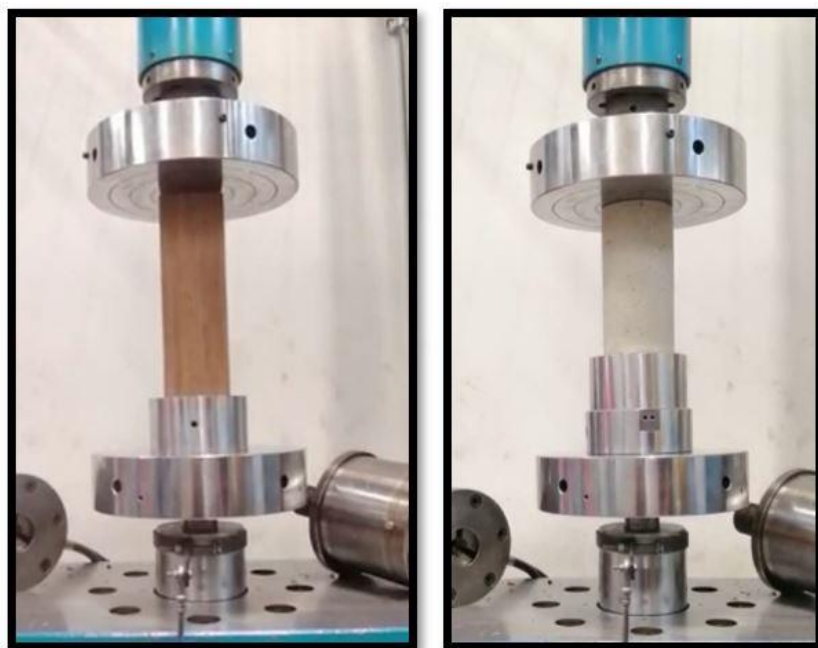
Tabla 7.Resultados confiabilidad servo de fuerza.

SetPoint 500 [psi]		
Elemento	Tiempo	%Error 10s
Columna	10.59 [s]	0,55%
Madera	8.47 [s]	0,65%
Concreto	2.63[s]	0,25%
Resorte	35.48[s]	0,03%

La tabla anterior muestra el tiempo en que se llegó a un valor menor a 1% de error para cada uno de los materiales probados, como también el valor del error al alcanzar la estabilidad del sistema, evidenciando la confiabilidad y estabilidad que tiene el equipo al aplicar fuerza independiente del material al que se le haga.

El montaje para las pruebas de confiabilidad es como se muestra en a la siguiente figura.

Figura 107. Montaje de pruebas de confiabilidad.



8.7 RESULTADOS DE ROTURA DE MATERIALES

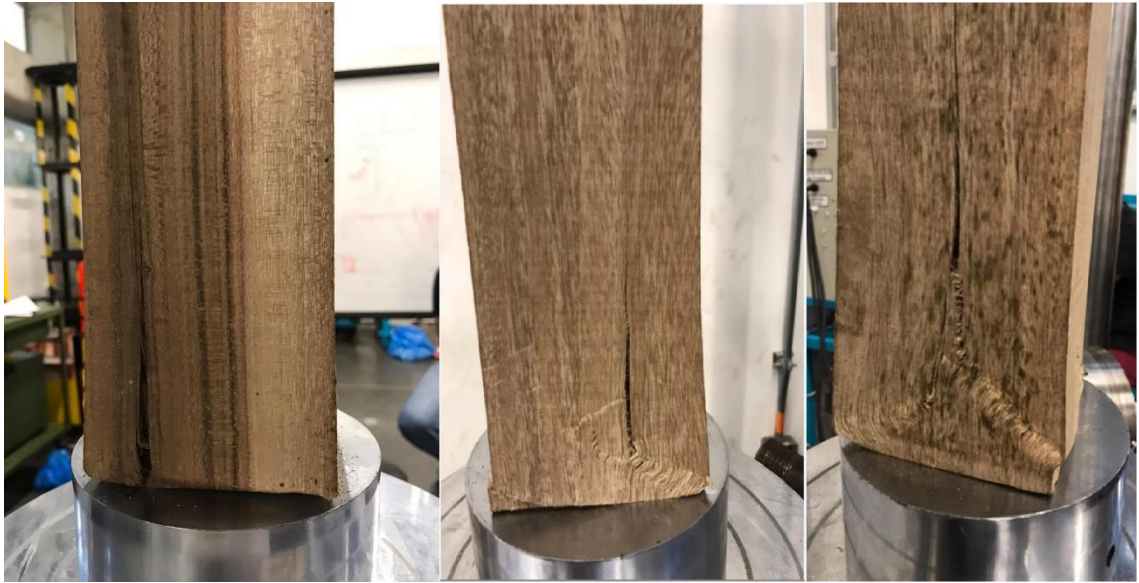
Con el objetivo de comprobar la aplicación de fuerza del equipo ante distintos materiales hasta llevarlos a una condición de falla, se estableció el uso de la función “*Rampa*”, para la cual, una vez realizada la aproximación se aplicó una rampa de fuerza al concreto y a la madera hasta llevarlos a un punto de rotura, para ello, la aplicación de la rampa arrojó el siguiente comportamiento.

Figura 108. Rampa hasta rotura aplicada a madera.



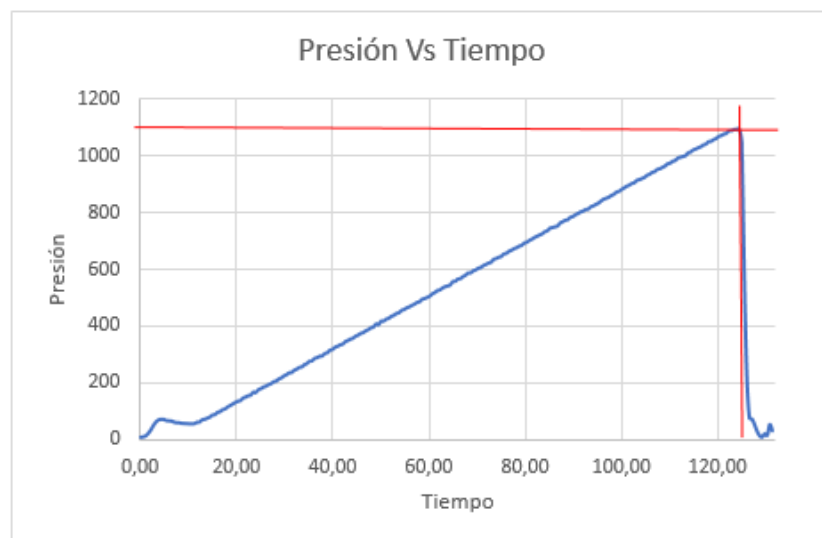
Entorno a un valor de 1622,13 *psi*, o bien, 65695,27 *Lb* se llegó al punto de rotura del listón de manera, punto en el cual la fuerza aplicada empieza a descender, la rotura de este material se evidencia en la siguiente figura.

Figura 109. Rotura listón de madera.



La aplicación de la rampa para un cilindro de concreto hasta su punto de rotura se muestra a continuación.

Figura 110. Rampa hasta rotura para concreto.



Para un valor cercano a 1045 *psi*, o bien, 42322 *Lb* se llegó al punto de rotura del concreto, valor para el cual, desciende la fuerza aplicada. La rotura del cilindro de concreto se evidencia en la siguiente figura.

Figura 111. Rotura cilindro de concreto.



De las anteriores situaciones se tomaron datos para realizar la siguiente tabla:

Tabla 8. Resultados rotura madera y concreto.

Rampa de 10 [psi/s]			
Elemento	Tiempo	Presión [psi]	Fuerza [lb]
Madera	184.92 [s]	1622,13	65696,27
Concreto	124.85 [s]	1044,99	42322,10

Nuevamente haciendo uso de la ecuación 28 se halló el valor de fuerza suministrado en el punto de rotura obtenido a partir de la medida de presión registrada por el transductor de presión.

CONCLUSIONES

Se realizó el montaje a nivel eléctrico y electrónico que permite ejecutar como servo de posición y fuerza la máquina INSTRON 1323.

La guía de operación presente en los anexos de este documento es un documento introductorio simple y de fácil lectura que establece las directrices para una correcta operación del equipo. Este documento ha sido desarrollado para: Usuarios Principiantes que no han tenido ningún contacto con la INSTRON 1323 y a los cuales se recomienda leer toda la guía o usuarios con experiencia que buscan un documento de consulta para las inquietudes básicas surgidas en el proceso de servo de posición y de fuerza.

El estado final del módulo de control (Figura 4) muestra la identificación y comunicación de los elementos del equipo, haciendo más efectivo la operación y evitando confusiones al querer accionarlos.

El diseño operativo de la INSTRON 1323 ofrece la posibilidad de realizar el servo de posición y fuerza de manera separada, como también de forma conjunta haciendo uso de las pestañas dispuestas en la interfaz gráfica.

El servo de fuerza cuenta con la capacidad de actuar para una columna o un resorte mediante el uso de un menú desplegable.

Para la operación de la INSTRON es importante contar con información básica a nivel eléctrico y electrónico, teniendo en cuenta que la realización de un servosistema conlleva la transferencia de datos estructurados, mediante estándares de mensajes acordados, desde una aplicación computarizada hacia otra, a través de medios electrónicos integrado al proceso conocimientos hidráulicos. Los temas más relevantes fueron fuente reguladas, amplificadores operacionales, sistema servoamplificador, y la correcta identificación de circuitos y componentes.

Se dotó a la máquina de una complejidad modular que facilita la identificación de cada una de las etapas involucradas en la operación del equipo como su conexión a nivel eléctrico.

La INSTRON se dotó con un protocolo de lógica cableada que imposibilita la operación errónea de la máquina al generar un protocolo de secuencia de encendido o apagado que se puede realizar tanto a nivel analógico como digital. En el apartado 4.1.2.3 se muestra el esquema “Ladder” de dicho arreglo.

Actualmente se innovó en la capacidad operativa de realizar un servo de posición analógico, haciendo que la operación manual del cuadro de control no sea para el encendido de la máquina, sino que tenga una prestación extra.

La nueva interfaz gráfica permite realizar la interacción del usuario con la variación del set point dotando de una gama de opciones en que se puede alternar para ver la respuesta del sistema en control de posición o fuerza.

Otras de las novedades del proyecto es el uso del Lenguaje Gráfico otorgado por LabVIEW en la programación de la de la INSTRON para su instrumentación y control, lo que permitió organizar y comunicar los subprogramas de forma sencilla logrando que su inspección se pueda realizar de manera separada, el análisis y registro de datos se den en tiempo real y la comprensión para el usuario sea muy fácil puesto que cuenta con un respaldo gráfico del diagrama que comunica como se realiza el proceso deseado.

El dispositivo de adquisición de datos NI USB DAQ 6212 demostró ser una poderosa herramienta para el control de los servos de posición y fuerza, y su versatilidad se ve patente en la posibilidad de realizar la lectura de los tres transductores al tiempo (servo de posición y fuerza (y Feedforward), al tiempo que realizaba el envío de señales en puertos digitales (para mantener encendidos los elementos de potencia) y en su salida analógica (señal de comando a la válvula).

Los resultados presentados en el capítulo 6 para los diferentes tipos de control muestran una buena respuesta del sistema ante las opciones disponibles de set point tanto en posición como en fuerza.

El comportamiento elástico del resorte altera el control de fuerza haciendo que las constantes de sintonización aplicadas para columna no sean las mismas a la hora de actuar sobre este material, este aspecto fue mejorado con el compensador Feedforward, aumentando su velocidad de respuesta, y por ende tiempo en que logra llegar al valor de set point establecido.

Para el diseño de un compensador Feedforward fue necesario mejorar la respuesta del control de fuerza con el resorte; el cálculo de la ganancia del compensador establece el uso de un conocimiento en teoría de control un poco más profundo que las estrategias de control PID, estableciendo las bases para poder desarrollar un control robusto al intento de manejar un sistema dinámico propenso a perturbaciones.

BIBLIOGRAFÍA

ANDERSON, Wayne, Controlling electrohydraulic systems, New York: Marcel Dekker Inc, 1988.

ÅSTRÖM, Karl J; HÄGGLUND Tore, PID controllers: Theory Desing and Tunning, New York: ISA, Research Triangle Park, 1988.

BOLTON, W, Mecatrónica: sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario (5a. ed.), México: Alfaomega Grupo Editor, 2013.

DEROSE, D, 2019, Proportional and Servo Valve Technology [En línea]. Moog Inc, 2003. (Recuperado en 02 de abril de 2019.) Disponible en <https://www.moog.com/literature/ICD/ProportionalServoValveTechnologyarticle.pdf>.

EWALD, R, *et al.* Proportional and servo valve technology, Lohr am Main. Hinkel-Druck GmbH, 1989.

FUENTES VILLALOBOS, J., y SARMIENTO VILLAMIZAR, O., Repotenciación de la práctica de servos de posición en control automático (servosistemas de potencia fluida), Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico, Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas, 2013.

JELALI, M, Hydraulic servo-systems: Modelling, Identification and Control, Londres: Springer.2003.

MASKREY, R, and THAYER, W., "A Brief History of Electrohydraulic Servomechanisms", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 100(2), 1978, pp. 110-116.

MOHSIN H, A.; JASSIM A, M, Desing and Analisis of Electro-Hydraulic Servo System for Speed Control of Hydraulic Motor", Journal of Engineering, 19(5), pp. [564-566]. 2013.

OGATA, K, *et al*, A, Ingeniería de control moderna, Madrid: Prentice Hall. 2010.

RYDBERG, K, Feedbacks in Hydraulic Servo Systems", [En línea]. (Recuperado en 26 de enero de 2019) Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/265028216_Feedbacks_in_Hydraulic_Servo_Systems.

RYDBERG, K, "Hydraulic servo systems", Pdfs.semanticscholar.org [En línea]. (Recuperado en 01 de julio de 2019) Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/1bc5/1a1ab04287ea2418c9ad710de168c916493d.pdf>.

REINA GARZÓN, C, ARIZA MEDINA, S. REINGENIERÍA APLICADA A LA MÁQUINA DE ENSAYOS INSTRON 1323 DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA PARA AMPLIAR SU CAPACIDAD DE SERVICIO, Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico, Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingenierías fisicomecánicas, 2012.

RODRÍGUEZ ZAPATA, L, ROA CANTOR, L., REDISEÑO DE LA PRÁCTICA DE SERVOS DE FUERZA EN CONTROL AUTOMÁTICO (SERVOSISTEMAS DE POTENCIA FLUIDA), Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico, Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas, 2015.

SARMIENTO RAMOS, J; ORTIZ BELEÑO, J, DISEÑO DE LA PRÁCTICA DE SERVOS DE FUERZA EN EL BANCO REXROTH DEL LABORATORIO DE SERVOSISTEMAS DE POTENCIA FLUIDA, Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico, Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas, 2016.

SEBORG, D *et al*, Process dynamics and control, Hoboken: John Wiley and Sons, 2011.