

**SISTEMA DE CONTROL BASADO EN TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS
(DAQ) PARA LA MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS INSTRON 1323**

JAVIER ALEXANDER HUÉRFANO PUENTES

LUIS CARLOS QUITIAN NIÑO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2011

**SISTEMA DE CONTROL BASADO EN TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS
(DAQ) PARA LA MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS INSTRON 1323**

JAVIER ALEXANDER HUÉRFANO PUENTES

LUIS CARLOS QUITIAN NIÑO

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el titulo de
Ingeniero Mecánico**

Director

ABEL A. PARADA C.

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2011

A mi madre por su paciencia,
Esmero y amor, a toda mi familia por su ayuda
Colaboración y amor
A Diana por estar siempre a mi lado

LUIS CARLOS QUITIAN

A mi madre Nubia, mi padre y mi hermana, por su infinito cariño, dedicación,
esfuerzo e incondicional apoyo.

A todas aquellas personas que directa o indirectamente me brindaron una mano a
lo largo del camino.

A mi Nonita Ana.

ALEXANDER HUERFANO PUENTES

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Abel Parada por su gran aporte intelectual para la realización de este proyecto de grado, por su paciencia y comprensión.

Al profesor Omar Gelvez por su colaboración y acompañamiento a lo largo de la ejecución de este proyecto.

A todas aquellas personas que en algún momento nos colaboraron en la obtención de esta meta

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	22
1. ENSAYOS EN PROBETAS DE MATERIALES METALICOS	24
1.1 DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACION	24
1.1.1 Esfuerzo ingenieril.	24
1.1.2 Deformación ingenieril.	24
1.2 PROPIEDADES MECANICAS OBTENIDAS DEL ENSAYO	26
1.2.1 Resistencia a la tensión.	26
1.2.2 Esfuerzo de fluencia.	27
1.2.3 Modulo de elasticidad o de Young (E).	28
1.2.4 Modulo de resiliencia (E_r).....	28
1.2.5 Relación de Poisson (μ).....	29
1.2.6 Ductilidad.	29
1.3 NORMAS ENSAYO DE TENSION Y COMPRESION.....	30
1.3.1 Norma Técnica Colombiana NTC 2.	30
1.3.2 Norma ASTM Sección E 8M – 04. Ensayo de tensión.....	30
1.3.3 Norma ASTM Sección E 9. Ensayo de compresión.....	31
1.4 ENSAYO DE TENSION	31
1.4.1 Terminología y definiciones.	31
1.4.2 Velocidad de la maquina.....	35
1.4.3 Tipos de probeta.	36
1.4.3.1 Probetas maquinadas y no maquinadas.....	37
1.4.3.2 Probetas Proporcionales y no proporcionales.....	37
1.4.3.3 Radio de transición.	38
1.4.3.4 Longitud paralela.	38
1.4.3.5 Extremos de agarre.	38
1.4.4 Probeta a utilizar en el ensayo.....	39
1.5 ENSAYO DE COMPRESION.....	40
1.5.1 Comportamiento de materiales bajo esfuerzos de compresión.	40
1.5.2 Relación de esbeltez.....	40

2. CONTROL AUTOMÁTICO	42
2.1 SISTEMAS DE CONTROL	42
2.1.1 Representación de un sistema de control	42
2.1.2 Componentes de un sistema de control.....	43
2.1.3 Sistemas de control en lazo abierto y cerrado.	44
2.1.3.1 Sistemas de control en lazo abierto	44
2.1.3.2 Sistemas de control en lazo cerrado.....	45
2.2 CONTROLADORES Y ACCIONES BASICAS DE CONTROL	46
2.2.1 Modos de operación del controlador.....	46
2.2.2 Acciones de control.....	47
2.2.2.1 Acción de control de dos posiciones (on-off)	47
2.2.2.2 Acción de control Proporcional	49
2.2.2.3 Acción de control Integral.....	50
2.2.2.4 Acción de control Proporcional - Integral (PI).....	51
2.2.2.5 Acción de control Proporcional – Derivativa (PD)	52
2.2.2.6 Acción de control Proporcional - Integral - Derivativa (PID).....	53
3. SERVOMECANISMOS ELECTROHIDRAULICOS	56
3.1 SERVOVALVULAS	57
3.1.1 Motor de mando.....	58
3.1.2 Amplificador hidráulico.....	58
3.1.3 Posición central.....	60
3.1.4 Ganancia en caudal.....	61
3.1.5 Ganancia en presión.....	61
3.1.6 Histéresis y umbral.	62
3.2 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS	63
3.2.1 Respuesta a una entrada en escalón.	63
3.2.2 Respuesta en frecuencia.	64
3.2.3 Rigidez hidráulica.....	66
3.2.4 Frecuencia natural del sistema cilindro-masa.....	68
3.3 SERVOMECANISMO CONTROL DE LA POSICION	69
3.3.1 Sistema de control de posición en cadena cerrada.	70
3.3.1.1 Control proporcional más diferencial (PD)	71
3.4 SERVOMECANISMO CONTROL DE LA FUERZA.	75

3.4.1 Sistema de control de la fuerza en cadena cerrada.....	75
3.4.1.1 Control proporcional más integral (PI).....	77
4. DESCRIPCION DEL MODULO DE POTENCIA DE LA INSTRON.....	79
4.1 MODULO DE POTENCIA HIDRAULICA	80
4.1.1 Bomba-motor.	80
4.1.2 Manifold de control.....	81
4.1.3 Sistema de enfriamiento.	81
4.1.4 Manifold de control de fluido.	82
4.1.5 Cilindro Actuador.	82
4.1.6 Mordazas Hidráulicas.	82
5. HARDWARE UTILIZADO EN LA AUTOMATIZACION	84
5.1 TRANSDUCTOR DE POSICIÓN LINEAL.....	84
5.1.1 Principio de funcionamiento del sensor lineal magneto-restrictivo.....	85
5.1.2 Acondicionador de señal del transductor de posición.	86
5.1.2.1 Ajuste de parámetros de salida en el acondicionador de señal.	87
5.1.3 Calibración del transductor de posición.	89
5.2 TRANSDUCTORES DE PRESION.....	90
5.2.1 Principio de funcionamiento del transductor piezo- resistivo.....	91
5.2.2 Acondicionamiento de la señal de salida del transductor de presión.....	92
5.2.3 Calibración de los manómetros.....	93
5.2.4 Calibración de los transductores de presión.	94
5.3 SERVOVÁLVULA	95
5.4 SELECCIÓN TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS (DAQ)	95
5.4.1 Requisitos del sistema.	96
5.4.2 Descripción equipo seleccionado.....	97
5.5 CONEXIÓN ENTRADAS/SALIDAS ANALOGAS A LA DAQ USB-6211.....	99
5.6 CONEXIÓN SALIDAS DIGITALES DE ENCENDIDO DE LA MAQUINA.....	101
6. CARACTERIZACION DEL SISTEMA	104
6.1 RESPUESTA A LA FRECUENCIA DEL SISTEMA.....	104
6.2 FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA	108
7. SOFTWARE IMPLEMENTADO Y DISEÑO EN LA AUTOMATIZACION	111
7.1 INTERFAZ GRAFICA	111
7.1.1 Interfaz de inicio.....	112
7.1.2 Interfaz de selección de velocidad.	113

7.1.3 Interfaz de encendido del sistema de potencia hidráulico.....	114
7.1.4 Interfaz de Posicionamiento de mordazas y apriete de probeta.	114
7.1.5 Interfaz de inicio de ensayo.	115
7.1.6 Interfaz de progreso del ensayo.....	116
7.1.7 Interfaz de resultados.	117
7.2. CODIGO GRAFICO DISEÑADO E IMPLEMENTADO.....	118
7.2.1 VI Ensayo de tracción.	118
7.2.1.1 Adquisición de datos.....	119
7.2.1.2 Generación de datos.....	121
7.2.1.3 Programación de servo de posición.....	122
7.2.1.4 Programación de servo de fuerza.....	124
7.2.2 SubVI Cronometro.	125
7.2.3 SubVI elongación.....	126
7.2.4 SubVI rampa.....	127
7.2.5 SubVI PD.....	128
7.2.6 SubVI PI.....	129
7.3 SINTONIZACION DEL CONTROLADOR	130
7.3.1 Sintonización del servo de posición.....	131
7.3.2 Sintonización del servo de fuerza.....	132
8. PRUEBAS Y RESULTADOS	134
8.1 PROCEDIMIENTO.....	134
8.1.1 Encendido de la maquina.....	134
8.1.2 Selección de la velocidad de la prueba.....	134
8.1.3 Agarre de la probeta.....	134
8.2 PRUEBA DE TENSIÓN PARA MATERIAL DUCTIL.....	136
8.2.1 Análisis e interpretación de los datos.....	137
8.3 PRUEBA DE TENSIÓN PARA MATERIAL FRAGIL.....	140
8.3.1 Análisis e interpretación de datos.....	141
8.4 PRUEBA DE COMPRESION.....	145
9. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES	146
10. RECOMENDACIONES.....	147
BIBLIOGRAFÍA	148
ANEXOS.....	149

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama típico Esfuerzo - deformación	25
Figura 2. Zona de estricción en la probeta.....	26
Figura 3. Esfuerzo de fluencia superior e inferior.....	27
Figura 4. Límite elástico convencional al 0.2%	28
Figura 5. Módulo de resiliencia	29
Figura 6. Probeta de ensayo de sección circular	33
Figura 7. Probeta antes del ensayo	34
Figura 8. Probeta después del ensayo	35
Figura 9. Dimensiones básicas de la probeta estándar tipo proporcional.....	37
Figura 10. Tipos de extremos estándar para probetas	38
Figura 11. Dimensiones de la probeta de ensayo	39
Figura 12. Tipos de falla bajo esfuerzos de compresión.....	41
Figura 13. Diagrama de bloques.....	43
Figura 14. Componentes básicos de un sistema de control	43
Figura 15. Diagrama de bloques de sistema de lazo abierto	45
Figura 16. Diagrama de bloques de sistema de lazo cerrado	45
Figura 17. Controlador automático.....	46
Figura 18. Controlador on-off con zona muerta	48
Figura 19. Controlador on-off con zona muerta	48
Figura 20. Diagrama de bloques controlador proporcional	49
Figura 21. Respuesta al variar la ganancia proporcional	49
Figura 22. Diagrama de bloques controlador integral	50
Figura 23. Respuesta de control integral con perturbación	50
Figura 24. Diagrama de bloques controlador integral	51
Figura 25. Comparación respuesta integral vs PI	52
Figura 26. Diagrama de bloques controlador integral	52
Figura 27. Comparación respuesta proporcional vs PD.....	53
Figura 28. Diagrama de bloques controlador integral	54
Figura 29. Comparación respuesta P, PD, PID.....	54
Figura 30. Salida del controlador PID con y sin ruido	50
Figura 31. Servoválvula tipo lengüeta/boquilla	57
Figura 32. Motor de torque	58
Figura 33. Sistema de toberas - lengüeta	59
Figura 34. Sistema de toberas - lengüeta	59
Figura 35. a) Centro cerrado, b) Centro crítico, c) Centro abierto	60

Figura 36. Ganancia en caudal	61
Figura 37. Ganancia en presión.....	62
Figura 38. Histéresis	62
Figura 39. Umbral	62
Figura 40. Respuesta a entrada en escalón	63
Figura 41. Respuesta a frecuencias bajas.....	64
Figura 42. Respuesta a frecuencias altas.....	65
Figura 43. Diagrama de bode, Atenuación	66
Figura 44. Diagrama de bode, desfase	66
Figura 45. Rigidez pistón sencillo	67
Figura 46. Cilindro controlado por Servoválvula	68
Figura 47. Cilindro de vástago pasante	68
Figura 48. Válvula de corredera deslizante.....	69
Figura 49. Tipos de válvulas	70
Figura 50. Sistema de control de posición	70
Figura 51. Amplificador proporcional	72
Figura 52. Respuesta a una entrada escalón	72
Figura 53. Efecto de la ganancia proporcional.....	73
Figura 54. Amplificador proporcional más derivativo	73
Figura 55. Respuesta y efecto en un sistema PD	74
Figura 56. Respuesta P y PD.....	74
Figura 57. Sistema de control de fuerza	75
Figura 58. Sistema de control de posición y presión.....	76
Figura 59. Amplificador proporcional más integral	77
Figura 60. Efecto del término integrador	78
Figura 61. Comparación de respuesta proporcional e integral	78
Figura 62. Máquina de ensayos universal INSTRON 1323	79
Figura 63. Modulo de potencia.....	80
Figura 64. Bomba – motor	80
Figura 65. Manifold de control.....	81
Figura 66. Sistema de enfriamiento	81
Figura 67. Manifold de control de flujo	82
Figura 68. Esquema hidráulico de las mordazas de agarre.....	83
Figura 69. Esquema de funcionamiento del sistema de control.....	84
Figura 70. Sensor de posición lineal MTS, modelo EP	85
Figura 71. Principio magneto-restrictivo del sensor de posición	86
Figura 72. Acondicionador de señal del transductor de posición	86
Figura 73. Diagrama de flujo modo programación de parámetros de salida.....	87
Figura 74. Ajuste de parámetros de salida	88

Figura 75. Posición vs Voltaje.....	90
Figura 76. Transductores de presión SIEMENS	91
Figura 77. Circuito de un puente de Wheatstone.....	91
Figura 78. Circuito acondicionador de señal del transductor	92
Figura 79. Manómetro.....	93
Figura 80. Manómetros con cilindro sin movimiento	93
Figura 81. Grafica de los transductores de presión	94
Figura 82. Servoválvula MOOG 73-103.....	95
Figura 83. DAQ NI - USB 6211	97
Figura 84. Conector panel frontal.....	99
Figura 85. Diagrama de conexión entradas y salidas en la DAQ.....	101
Figura 86. Diagrama de conexión salidas digitales de encendido	102
Figura 87. Panel frontal de respuesta a la frecuencia.....	105
Figura 88. Código de la respuesta en frecuencia.....	105
Figura 89. Curvas de Lissajouse para 0,5 a 2 hz.....	106
Figura 90. Respuesta a la frecuencia para 90°	107
Figura 91. Respuesta a la frecuencia para 3db.	107
Figura 92. Diagrama de Bode del sistema	108
Figura 93. Ventana de inicio 1	112
Figura 94. Ventana de inicio 2	112
Figura 95. Ventana de selección de velocidad	113
Figura 96. Posicionamiento de mordazas.....	115
Figura 97. Interfaz de inicio de ensayo	116
Figura 98. Interfaz de progreso del ensayo	116
Figura 99. Interfaz de Resultados	118
Figura 100. VI Ensayo de tracción	119
Figura 101. SubVI DAQ Assistant.....	119
Figura 102. VI's DAQ-mx	119
Figura 103. SubVi Timing	120
Figura 104. Generación de datos.....	121
Figura 105. SubVI Write.....	121
Figura 106. Código del Servo de posición	123
Figura 107. Código del servo de fuerza	124
Figura 108. SubVI cronometro	125
Figura 109. Código del cronometro.....	126
Figura 110. SubVI elongación.....	126
Figura 111. Código del subVI elongación	127
Figura 112. SubVI rampa	127
Figura 113. Código del SubVI rampa.....	128

Figura 114. SubVI PD.....	128
Figura 115. Código del subVI PD.....	129
Figura 116. SubVI PI.....	129
Figura 117. Código del subVI PI.....	130
Figura 118. Oscilación servo de posición.....	131
Figura 119. Sintonización servo de posición.....	132
Figura 120. Oscilación del servo de fuerza.....	132
Figura 121. Servo de fuerza sintonizado.....	133
Figura 122. Mordazas hidráulicas.....	136
Figura 123. Accionadores de las mordazas hidráulicas.....	136
Figura 124. Rotura en probeta dúctil.....	137
Figura 125. Zona de estricción.....	137
Figura 126. (a) Respuesta del sistema, (b) Fuerza al ocurrir la rotura.....	138
Figura 127. Diagrama esfuerzo deformación (probeta dúctil).....	138
Figura 128. Diagrama Esfuerzo deformación obtenido.....	139
Figura 129. Rotura en probeta frágil.....	141
Figura 130. Diagrama esfuerzo deformación (probeta frágil).....	142
Figura 131. Diagrama esfuerzo deformación y límite elástico convencional.....	143
Figura 132. Diagrama esfuerzo deformación con filtros.....	144
Figura 133. Diagrama esfuerzo deformación (prueba de compresión).....	144

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Designación de variables geométricas en la probeta de ensayo	14
Tabla 2. Velocidades de esfuerzos	17
Tabla 3. Dimensiones de la probeta de ensayo	21
Tabla 4. Valores máximo y mínimo del cilindro	88
Tabla 5. Datos de posición y voltaje del LVDT	89
Tabla 6. Datos de presión y voltaje del transductor de presión	94
Tabla 7. Asignación de las variables análogas de entrada y salida	100
Tabla 8. Asignación de las variables digitales de salida	102
Tabla 9. Respuesta a la frecuencia	106
Tabla 10. Velocidad de aplicación de esfuerzos	113

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. CATALOGO TEMPOSONIC	150
ANEXO B. CATALOGO REGULADOR DE TENSION.....	155
ANEXO C. ACONDICIONADOR DE SEÑAL LVDT	157
ANEXO D. CATALOGO TRANDUCTOR DE PRESION	160
ANEXO E. DIAGRAMA CONTROL MANUAL.....	162
ANEXO F. PLANO PROBETA ESTANDAR	163

RESUMEN

TITULO: SISTEMA DE CONTROL BASADO EN TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS (DAQ) PARA LA MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS INSTRON 1323*

AUTORES: LUIS CARLOS QUITIAN **
ALEXANDER HUERFANO **

PALABRAS CLAVE:

Automatización, Control PID, Servomecanismo, Ensayo de tracción.

DESCRIPCIÓN:

La escuela de ingeniería mecánica cuenta con una maquina universal de ensayos INSTRON la cual solo podía ser operada de manera análoga, es decir, con el procesamiento directo de las señales obtenidas por los transductores de posición y de presión. Es por esta razón que se tomó la decisión de automatizar la maquina con un sistema de control digital, con el cual ya no se manipulan de forma análoga las señales obtenidas de los transductores, sino que se toman estos valores y se trabajan de forma digital. Para lograr esto se optó por la tarjeta de adquisición de datos USB 6211 la cual cumple con todas las condiciones necesarias impuestas por la Servoválvula, los transductores y la maquina, en cuanto a valores de voltaje, resolución, velocidad de respuesta y muestreo. Por lo tanto con el fin utilizar la máquina para su fin el cual es la aplicación de los conceptos adquiridos en la materia de control automático, se diseñó una aplicación en el lenguaje gráfico LabView para llevar a cabo el ensayo de tracción en materiales metálicos. Luego de diseñado el código y el entorno grafico necesario para la prueba, se procedió a la sintonización por tanteo de las constantes de control PID, para llevar a cabo el ensayo de una forma adecuada. De igual forma se realizó la respuesta a la frecuencia del sistema y se graficaron los datos. Del ensayo de tracción se obtuvo las curvas esfuerzo vs. deformación para materiales dúctiles y frágiles, estas curvas muestran el comportamiento esperado, lo cual demuestra el control eficiente logrado mediante esta automatización, lo que también se evidencia en el desempeño y comportamiento de la maquina durante la prueba.

* Proyecto de Grado

** Facultad de ingenierías físico mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Abel Parada

ABSTRACT

TITLE: SISTEM CONTROL BASED IN FOR INSTRON TESTING UNIVERSAL MACHINE

AUTHORS: LUIS CARLOS QUITIAN**
ALEXANDER HUERFANO**

KEYWORDS:

Automation, Control PID, Servomechanism, Tensile Test.

DESCRIPTION:

Mechanical engineering school has a universal testing machine INSTRON which could only be operated in a similar manner, the direct processing of signals obtained by the position transducers and pressure. It is for this reason it was decided to automate the machine with a digital control system with which it no longer handled in a similar manner the signals obtained from transducers, but take these values and work digitally. To achieve this we chose the data acquisition card USB 6211 which meets all the conditions imposed by the servo valve, the transducer and the machine, in terms of voltage settings, resolution, speed of response and sampling. So to use the machine for its purpose which is to apply the concepts learned in the field of automatic control, we designed an application in LabView graphical language to perform tensile test on metallic materials. After designed the code and the graphical environment necessary for testing, we proceeded to trial and error tuning of PID control constants, to perform the test adequately. Likewise was the frequency response of the system and plotted the data. Tensile test of the curves vs. effort. deformation for ductile and brittle materials, these curves show the expected behavior, demonstrating the efficient control is achieved through automation, which is also evident in the performance and behavior of the machine during the test.

* Undergraduate thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Director: Abel Parada.

INTRODUCCION

En el estudio de ingeniería de materiales y de diseño así como en la industria, es de suma importancia conocer las características físicas y propiedades mecánicas de los materiales que van a ser utilizados en el diseño y fabricación de maquinas que facilitan y mejoran la calidad de vida.

Con el fin de realizar los diferentes tipos de pruebas a materiales, tales como el ensayo de tracción y compresión, desde hace varios años atrás la Universidad Industrial de Santander adquirió una maquina universal de ensayos INSTRON, con una capacidad máxima de trabajo que alcanza las 80 toneladas a una presión de 3000 Psi.

En la actualidad esta máquina cuenta con el paquete de potencia y el marco de carga en buenas condiciones sin presentar inconvenientes ni dificultades. Sin embargo, el sistema de control automático de la maquina está basado en un autómatas programable el cual cuenta con una muy baja velocidad de muestreo además, de que se encuentra fuera de funcionamiento, obstaculizando las labores de enseñanza y puesta en marcha de las pruebas.

Con el desarrollo de este proyecto se busca poner de nuevo en marcha el sistema de control automático y automatización de la maquina universal de ensayos Instron, buscando cumplir uno de los objetivos primordiales de la escuela de ingeniería mecánica, que es brindar a sus estudiantes la herramientas para poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos. En este caso relacionados específicamente con el servo control de posición y servo control de fuerza en el campo del control automático, mediante la realización de los ensayos de tensión y compresión.

Para obtener un correcto funcionamiento de la maquina se implemento un sistema de control basado en tarjeta de adquisición de datos DAQ, que presenta un procesamiento de datos y velocidad de muestreo más avanzados y permiten un registro casi instantáneo de los datos a medida que se realiza la prueba, el cual cuenta con la interfaz grafica LabView, que facilita la operación por parte del usuario de la maquina y el manejo de los datos de la prueba.

A través de este material se presenta la recopilación de los procedimientos llevados a cabo en el desarrollo de este trabajo de grado. Empezando el capítulo uno con la definición de conceptos y seguimiento de las normas que rigen el ensayo de tracción. En el segundo capítulo se encuentra la información teórica y

análisis relacionado con los conceptos generales de control automático. En el capítulo tres se encuentra la documentación acerca del análisis de los sistemas y elementos componentes del control electro hidráulico.

En el capítulo cuarto se hace una breve descripción del modulo de potencia y los diferente elementos que componen a la maquina. En el capítulo cinco se realiza la descripción y funcionamiento del hardware utilizado para el sistema de control, así como el acondicionamiento del mismo a la maquina Instron.

En el capítulo seis se presenta la caracterización del sistema, estudiando la respuesta dinámica del sistema. En el capítulo siete se presentan el diseño y programación del software y la interfaz implementada para el desarrollo de la automatización, así como la sintonización del controlador para el sistema de control implementado en la maquina. En el capítulo 8 se presentan las pruebas y análisis de los resultados obtenidos en el desarrollo del ensayo de tracción y compresión. Finalmente en el capítulo 9 se muestran algunas conclusiones y recomendaciones tomadas en el desarrollo del proyecto de grado.

1. ENSAYOS EN PROBETAS DE MATERIALES METALICOS

En el estudio de la ingeniería de materiales así como en el campo del diseño de maquinaria es de suma importancia conocer cómo responden los materiales a cargas externas que serán aplicadas en su ciclo útil de trabajo y así llevar a cabo una selección óptima para los requerimientos de servicio del sistema.

Para tal fin se hace necesario conocer las propiedades mecánicas de cada material, las cuales se determinan realizando ensayos bajo condiciones ideales de laboratorio en el cual una probeta es sometida a una carga y se observa su comportamiento hasta ser llevada a la falla inminente de la misma.

1.1 DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACION

En un ensayo dado de tracción a una probeta se le aplica una fuerza que puede ser estática o gradualmente aplicada que se le denomina carga y se mide la resistencia del material a esta carga por medio de esfuerzos, al ser aplicada esta fuerza el material presenta una deformación que será medida por medio de un sensor de posición.

1.1.1 Esfuerzo ingenieril.

Se le denomina esfuerzo ingenieril a la carga aplicada sobre la probeta dividida en el área transversal inicial de la probeta antes de iniciarse el ensayo y se expresa mediante la siguiente ecuación 1.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{Ecuación 1}$$

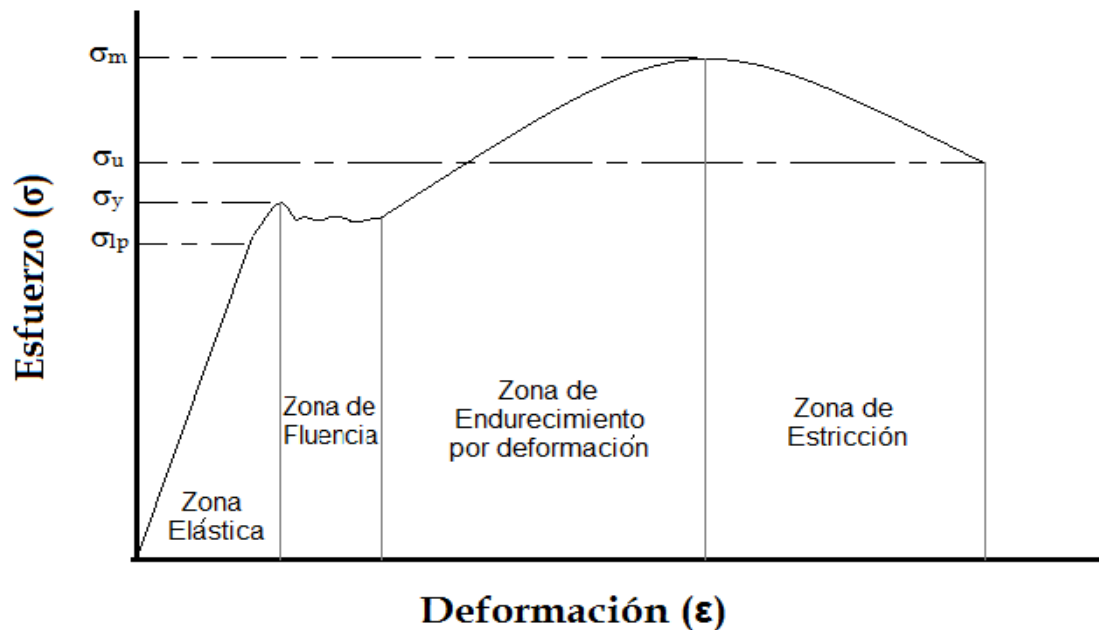
1.1.2 Deformación ingenieril.

Se le denomina deformación ingenieril a la diferencia de la longitud calibrada inicial antes de comenzar el ensayo y la longitud calibrada después de haberse aplicado la carga, dividida sobre la longitud calibrada inicial y se expresa por medio de la siguiente ecuación.

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad \text{Ecuación 2}$$

Los valores de esfuerzo y deformación que se obtienen del ensayo pueden ser presentados por medio de una grafica en el eje cartesiano donde el eje x y en el eje Y se encuentran la deformación y los esfuerzos, respectivamente. Esta curva se conoce como diagrama esfuerzo deformación unitaria Figura 1 y es de suma importancia en el análisis ingenieril ya que permite determinar las propiedades mecánicas del material de los materiales.

Figura 1. Diagrama típico Esfuerzo deformación.



Fuente. Autores.

En el diagrama de la figura 1 se puede observar que el material inicialmente presenta un esfuerzo proporcional a la deformación esto hasta llegar al punto llamado esfuerzo en el límite proporcional (σ_{lp}), al aumentar la carga pierde el comportamiento lineal hasta llegar a un punto llamado Limite elástico o esfuerzo de fluencia (σ_y), esta es la zona elástica lo que quiere decir que si se dejara de aplicar la fuerza al material en esta zona este volvería a su estado inicial. Luego viene la zona de fluencia en donde el material presenta una deformación permanente sin presentar ningún aumento de carga considerable, en esta zona el material ya presenta una deformación plástica es decir que al dejar de aplicar la carga el material quedaría deformado permanentemente.

Después viene la zona de endurecimiento, en esta zona el material presenta un endurecimiento por deformación debido a las dislocaciones del material que

genera un aumento de la carga hasta llegar al valor máximo de esfuerzo (σ_m) que es capaz de soportar el material. A lo largo de la prueba se presenta una disminución del área de la sección transversal a lo largo de la longitud calibrada, luego del esfuerzo máximo esta disminución del área empieza a ser localizada lo cual provoca una estricción o cuello en una zona de la probeta, esta es llamada la zona de estricción en la cual el material empieza a disminuir el esfuerzo hasta llevarlo a la falla o rotura de la probeta.

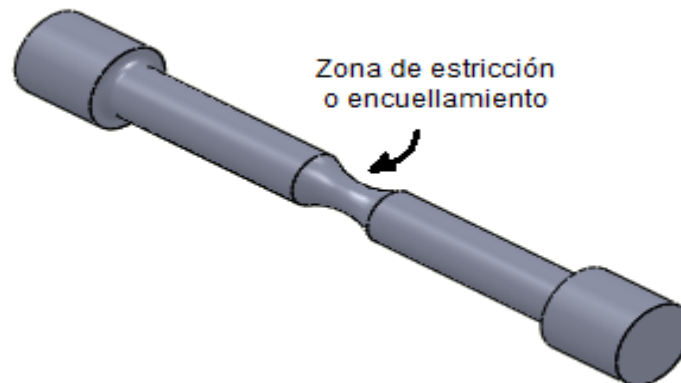
1.2 PROPIEDADES MECANICAS OBTENIDAS DEL ENSAYO

1.2.1 Resistencia a la tensión.

El esfuerzo obtenido de la fuerza más alta aplicada es la resistencia a la tensión, que es el esfuerzo máximo sobre la curva esfuerzo deformación. Esto quiere decir que esta es la máxima carga a tensión que puede ser soportada por el material antes que el material empiece a fallar, si esta carga es aplicada se producirá la rotura del material.

La resistencia a la tensión es el esfuerzo en el cual empieza el encuellamiento o zona de estricción en materiales dúctiles, que es cuando se presenta la disminución de área de la sección transversal localizada, la cual al ser más pequeña el área en ese punto, se reduce el esfuerzo y se requerirá una fuerza menor para continuar su deformación.

Figura 2. Zona de estricción en la probeta.



Fuente. Autores

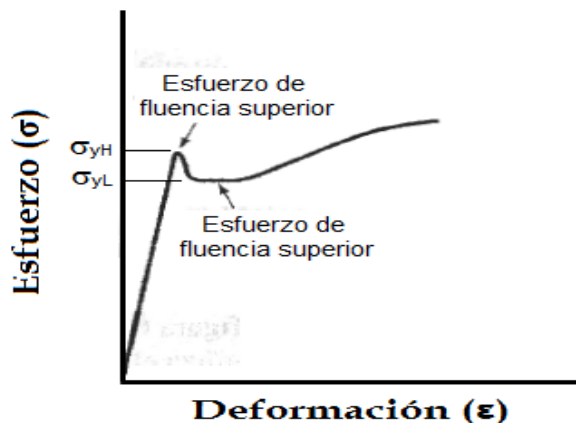
1.2.2 Esfuerzo de fluencia.

También es conocido como esfuerzo de cedencia y es el esfuerzo necesario en los metales para que las dislocaciones se deslicen, esto quiere decir que a partir de este esfuerzo el material pasa de una deformación elástica a presentar una deformación plástica. esto es muy importante el campo de la ingeniería de diseño si se desea q el componente no presente deformación plástica se debe seleccionar un material con alto esfuerzo de fluencia y las cargas a las que puede estar sometidas el componente debe ser menor al esfuerzo de cedencia para garantizar una deformación elástica.

En algunos materiales como por ejemplo aceros de bajo carbono presentan en la curva esfuerzo deformación un esfuerzo de cedencia doble como se puede observar en la figura 3 y se conocen como límite de fluencia superior (σ_{yH}) y límite de fluencia inferior (σ_{yL}).

Esto es debido a los átomos intersticiales de carbono agrupados alrededor de las dislocaciones que interfieren con el deslizamiento esto ocasiona un aumento en la resistencia de fluencia hasta llegar al límite de fluencia superior (σ_{yH}) en donde empieza la deformación plástica y baja la resistencia del material hasta el límite inferior de fluencia en donde el material presenta una deformación sin amento considerable de la carga.

Figura 3. Esfuerzo de fluencia superior e inferior

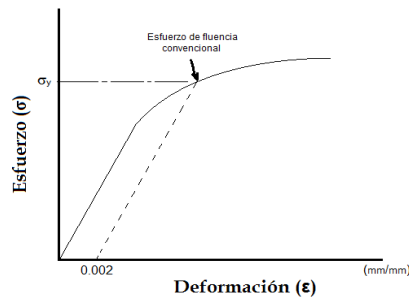


Fuente. Autores

En algunos materiales el esfuerzo al cual el material cambia su comportamiento de elástico a plástico no es muy fácil de detectar, para esto se determina el esfuerzo

de fluencia convencional, para esto se traza una línea paralela a la línea proporcional del diagrama pero corrida 0.002 mm/mm (0.2% de deformación total) del origen. El esfuerzo de fluencia convencional es el esfuerzo al cual dicha línea intercepta la curva esfuerzo deformación como se puede observar en la figura 4.

Figura 4. Limite elástico convencional al 0.2%



Fuente. Autores

1.2.3 Modulo de elasticidad o de Young (E).

En el diagrama deformación esfuerzo en la zona elástica la figura se comporta como una línea recta que se rige por medio de la ley de hooke que establece que el alargamiento unitario que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{Ecuación 3}$$

El modulo de Young es la pendiente de la curva esfuerzo deformación en esta región elástica y está íntimamente relacionado con la energía de enlace de los átomos. Una pendiente demasiado acentuada indica que se requieren grandes fuerzas para separar sus átomos y se deforme elásticamente, por tanto el material tiene un modulo de Young alto.

El modulo es una medida de rigidez del material. Ya que un material con un alto modulo de Young, conserva su tamaño y su forma al ser sometido a una carga en la región elástica, por lo tanto es un material rígido.

1.2.4 Modulo de resiliencia (E_r).

Este modulo es la capacidad de un material de absorber o liberar energía elástica durante la aplicación o liberación de una carga respectivamente y esta dado por el área bajo la curva de esfuerzo deformación en la región elástica Figura 5.

$$E_r = \frac{1}{2} * \sigma_y * \epsilon_y \quad \text{Ecuación 4}$$

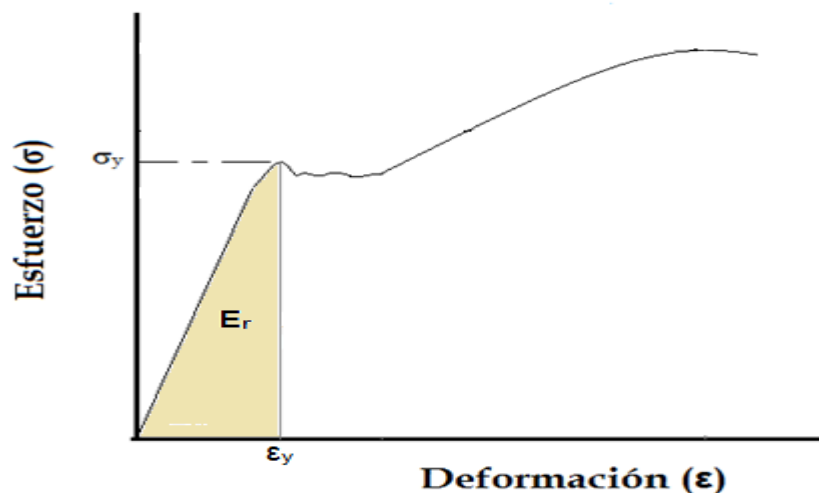
Donde σ_y es el esfuerzo en el límite de fluencia y ϵ_y es la deformación en el límite de fluencia.

1.2.5 Relación de Poisson (μ).

Esta relaciona la deformación elástica longitudinal que se produce al ser aplicada una fuerza de tensión o compresión, con la deformación lateral que ocurre simultáneamente y se determina según la ecuación 5.

$$\mu = \frac{-\epsilon_{lateral}}{\epsilon_{longitudinal}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Figura 5. Modulo de resiliencia



Fuente. Autores

1.2.6 Ductilidad.

La ductilidad es la propiedad que mide el grado de deformación que puede soportar un material sin romperse. Un material que presenta una alta deformación plástica se considera un material dúctil, por el contrario un material frágil es aquel que presenta poca deformación plástica.

La ductilidad se puede medir por medio del porcentaje de deformación después de la rotura (A), que representa la distancia que la probeta se alarga plásticamente en el ensayo, o por medio del porcentaje de reducción de área (Z) que expresa el adelgazamiento sufrido por el material durante la prueba.

$$A = \frac{l_f - l_o}{l_o} * 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

$$Z = \frac{s_f - s_o}{s_o} * 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

La ductilidad es una propiedad importante en el diseño y fabricación de un componente debido a que en el momento de diseñar se preferirá un material que tenga cierta ductilidad, así al aplicar una carga demasiado alta el componente se deformará antes de fallar y resulta más fácil al manufacturar formas complicadas sin que se rompa en el proceso.

1.3 NORMAS ENSAYO DE TENSION Y COMPRESION

Para la realización de ensayos de tracción bajo condiciones de laboratorio, el ensayo debe estar sujeto a normas específicas o requerimientos particulares que han sido creadas para la estandarización y reglamentación del método de ensayo. Estas normas fueron creadas por organizaciones como *The American Society for Testing and Materials (ASTM)*, como también la Norma técnica colombiana (NTC).

En el desarrollo de este proyecto se tuvieron en cuenta específicamente las siguientes normas:

1.3.1 Norma Técnica Colombiana NTC 2.

SIDERURGIA ENSAYO DE TRACCION PARA MATERIALES METALICOS. METODOS DE ENSAYO A TEMPERATURA AMBIENTE.

Esta norma especifica el método para el ensayo de tensión de materiales metálicos y define las propiedades mecánicas que se pueden determinar bajo el ensayo a temperatura.

1.3.2 Norma ASTM Sección E 8M – 04. Ensayo de tensión.

STANDARD TEST METHODS FOR TENSION TESTING OF METALLICS MATERIALS.

Esta norma dada por la ASTM *The American Society for Testing and Materials*, especifica el método de ensayo estándar internacional para la prueba de tensión en materiales metálicos a temperatura ambiente.

1.3.3 Norma ASTM Sección E 9. Ensayo de compresión.

STANDARD TEST METHODS FOR COMPRESSION TESTING OF METALLIC MATERIALS AT ROOM TEMPERATURE.

Esta norma especifica el método de ensayo que abarca los aparatos y el procedimiento para la prueba de compresión por carga axial en materiales metálicos a temperatura ambiente.

1.4 ENSAYO DE TENSION

El ensayo comprende la aplicación de una fuerza axial a la probeta, esta fuerza de tensión que puede ser estática o gradualmente aplicada y produce un alargamiento o deformación en la probeta de ensayo generalmente hasta llevarla a la rotura, con el propósito de determinar una o más de las propiedades mecánicas y características de material como resistencia, rigidez, ductilidad, entre otros.

El ensayo se debe llevar a cabo a temperaturas ambientes que pueden estar entre 10 °C y 35 °C según la norma NTC 2.

La carga en la probeta debe ser aplicada lentamente y totalmente axial.

1.4.1 Terminología y definiciones.

Para efectos del desarrollo del ensayo y seguimiento de aplicación de la norma se hacen las siguientes definiciones y distinciones.

- **Longitud calibrada (L).** Es la longitud de la sección cilíndrica o prismática de la probeta en la que se va a medir la elongación para cualquier momento durante el ensayo. Esta se distingue como la distancia entre marcas superficiales hechas en la probeta.

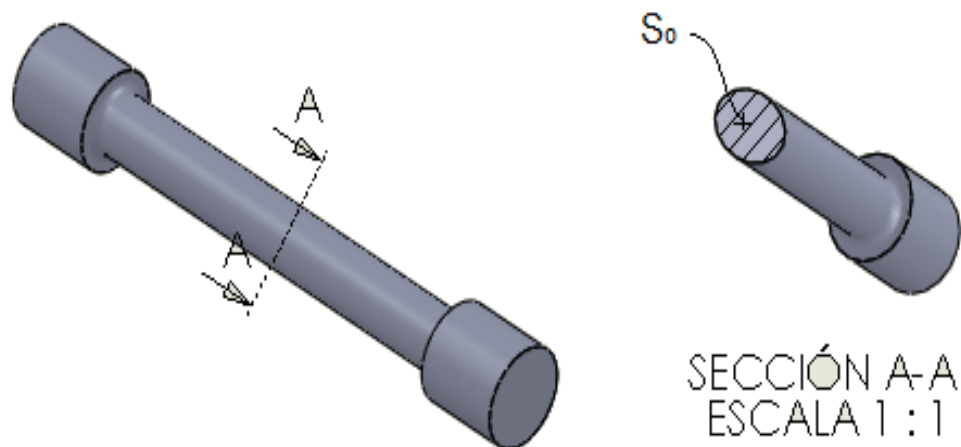
Para antes y después del ensayo se puede hacer una distinción de estas como:

- ✓ **Longitud calibrada inicial (L_0).** Longitud calibrada antes de la aplicación de la carga, es decir la distancia entre marcas inicial.
- ✓ **Longitud calibrada final (L_u).** Longitud calibrada después de la rotura de la probeta de ensayo, es decir la distancia entre marcas final.

- **Longitud paralela (L_c).** Longitud de la sección de área reducida paralela de la probeta de ensayo.
- **Longitud total (L_t).** Longitud total de la probeta de ensayo.
- **Elongación o alargamiento (ΔL).** Incremento de la longitud calibrada inicial L_0 al final del ensayo.
- **Deformación (ϵ).** Es el alargamiento (ΔL) expresado como un porcentaje de la longitud calibrada inicial L_0 .
 - ✓ **Deformación en el límite elástico (ϵ_y).** Es el incremento de la longitud calibrada inicial en una probeta para el esfuerzo en el límite elástico y se expresa como porcentaje de la longitud calibrada inicial.
 - ✓ **Deformación al esfuerzo máximo (ϵ_m).** Es la elongación de la probeta de ensayo en el momento cuando la fuerza es máxima (F_m) y expresado como porcentaje de la longitud calibrada inicial.
 - ✓ **Deformación total a la rotura (ϵ_{tr}).** Es la elongación total (elongación elástica mas elongación plástica) de la probeta de ensayo en el momento de ocurrir la rotura y expresado como porcentaje de la longitud calibrada inicial.
 - ✓ **Deformación después de la rotura (A).** Es la elongación permanente de la probeta de ensayo después de ocurrir la rotura ($L_u - L_0$) y expresado como porcentaje de la longitud calibrada inicial.
- **Porcentaje de reducción de área (Z).** Cambio máximo en el área de la sección transversal ocurrido durante el ensayo ($S_u - S_0$), expresado como porcentaje del área transversal S_0 .
- **Carga máximo (F_m).** Es la carga más alta que ha resistido la probeta durante el ensayo después de haber pasado el límite de fluencia.
- **Carga final (F_u).** Es la carga que soporta la probeta en el momento de la rotura.

- **Carga en el límite de fluencia (F_y).** Es la carga que soporta la probeta en el momento que se presenta el fenómeno de cedencia en donde hay una deformación de la probeta sin aumento considerable de la carga.
- **Esfuerzo.** Es la carga aplicada a la probeta en cualquier momento del ensayo dividida por al área de la sección transversal inicial.
- **Resistencia máximo a la tensión (σ_m).** Es el esfuerzo que corresponde a la carga máxima F_m .
- **Resistencia a la fluencia (Limite de fluencia σ_y).** El material metálico muestra un fenómeno de cedencia en el cual en este punto el aparece una deformación plástica sin ningún tipo de incremento de carga.
 - ✓ **Limite de fluencia superior (σ_{yH}).** Es el valor del esfuerzo en el ensayo en el momento en que se ocurre el primer decremento de la carga.
 - ✓ **Limite de fluencia inferior (σ_{yL}).** Es el valor más bajo de esfuerzo en el campo plástico cuando ocurre la fluencia.

Figura 6. Probeta de ensayo de sección circular.



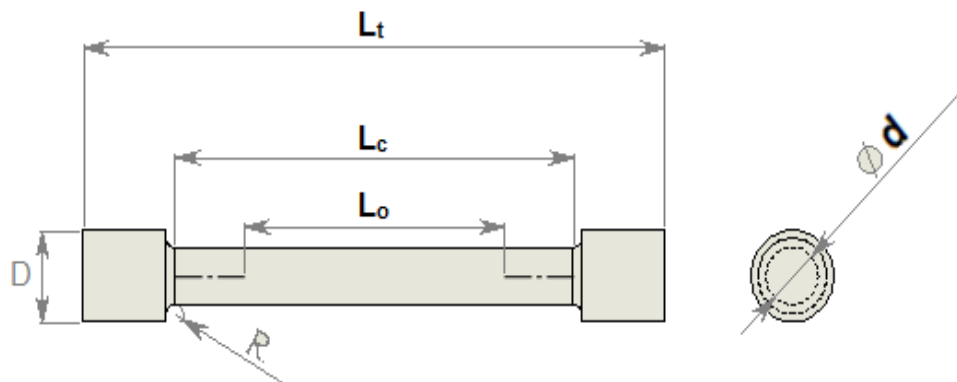
Fuente. Autores.

Tabla 1. Designación de variables geométricas en la probeta de ensayo.

Probeta de ensayo			
SIMBOLO	FORMULA	DESIGNACION	UNIDADES
d	-	Diámetro de la longitud paralela de la probeta de ensayo	mm
Lo	-	Longitud calibrada inicial	mm
Lu	-	Longitud calibrada final	mm
Lc	-	Longitud paralela	mm
Lt	-	Longitud total	mm
So	$(\pi*d^2)/4$	Área inicial de la sección transversal de la (Lc)	mm ²
Su	$(\pi*d_u^2)/4$	Área mínima de la sección transversal después de la rotura	mm ²
Z	$\frac{(S_o - S_u)}{S_o} * 100$	Porcentaje reducción de área	%
ΔL	$(L_u - L_o)$	Elongación a la rotura	mm
A	$\frac{(L_u - L_o)}{L_o} * 100$	Deformación después de la rotura	%

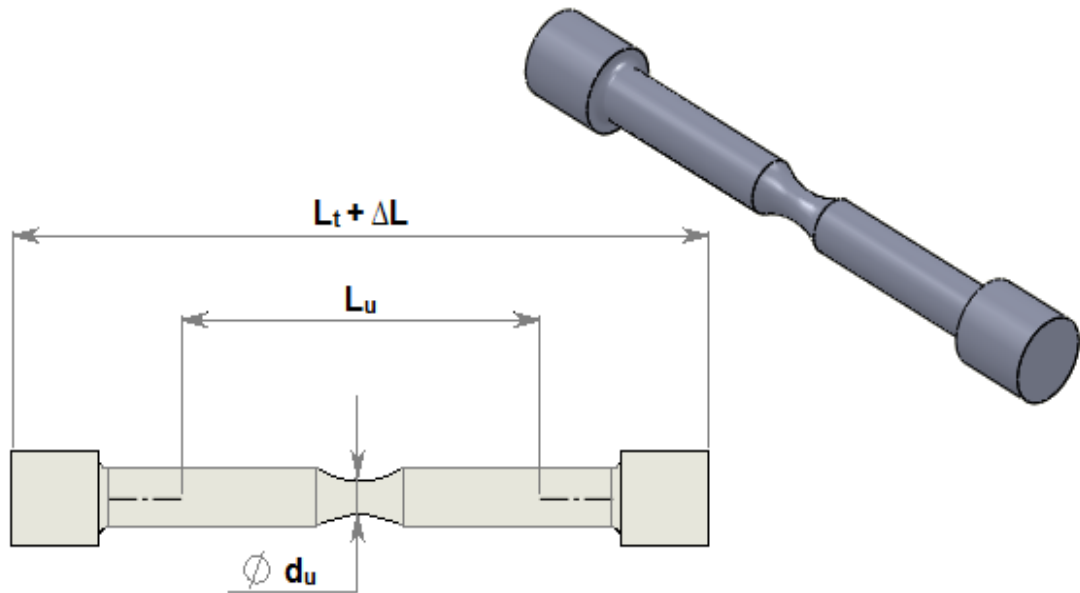
Fuente. Autores

Figura 7. Probeta antes del ensayo.



Fuente. Autores

Figura 8. Probeta después del ensayo.



Fuente. Autores

1.4.2 Velocidad de la maquina.

La velocidad de la maquina según la norma NTC 2 debe ajustarse a los siguientes requerimientos que dependen de la naturaleza del material:

- Dentro del campo elástico y hasta el límite de fluencia superior la velocidad de separación de las mordazas de la maquina debe tratar de mantenerse constante hasta donde sea posible.
- Las velocidades para la aplicación de esfuerzos debe mantenerse dentro de los rangos correspondientes a la tabla 2 y en ningún caso debe exceder estas velocidades máximas dadas en el campo elástico
- Si se va a determinar solamente el límite de fluencia inferior, la velocidad de aplicación de esfuerzos durante la cedencia de la longitud paralela en la probeta de ensayo debe estar entre 0.00025 y 0.0025 por segundo. La tasa de esfuerzos se debe mantener constante hasta donde sea posible.

Tabla 2. Velocidades de esfuerzos

MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL MATERIAL (N/mm ²)	VELOCIDAD DE APLICACIÓN DE ESFUERZOS (N/mm ²)*S ⁻¹	
	mínimo	máximo
< 150 000	2	10
≥ 150 000	6	30

Fuente. Autores

1.4.3 Tipos de probeta.

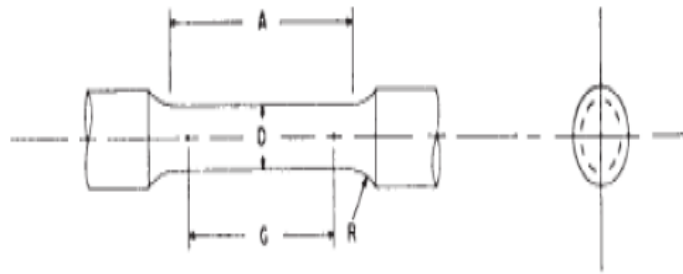
En el ensayo de tracción la forma y dimensiones de la probeta depende generalmente de los productos metálicos y de las propiedades mecánicas q se vayan a determinar, La sección transversal de la probeta puede ser rectangular, cuadrada, circular, anular o para determinados casos especiales de cualquier otra forma.

Generalmente la probeta de ensayo se obtiene por maquinado de una muestra del producto fundido, sin embargo pueden en algunos casos ser sometidos al ensayo probetas sin maquinado.

Para el desarrollo de las pruebas de tracción en el proyecto se utilizaran las probetas de sección transversal circular por ser la más común y por su facilidad en el maquinado.

Para probetas de sección circular de tipo proporcional existen las dimensiones para la probeta estándar de 12.5 mm de diámetro según la norma ASTM E8 como se puede observar en la figura 9.

Figura 9. Dimensiones básicas de la probeta estándar tipo proporcional



	Dimensions, mm				
	Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional To Standard			
		12.5	9	6	4
G—Gage length	62.5 ± 0.1	45.0 ± 0.1	30.0 ± 0.1	20.0 ± 0.1	12.5 ± 0.1
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2	9.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	4.0 ± 0.1	2.5 ± 0.1
R—Radius of fillet, min	10	8	6	4	2
A—Length of reduced section, min (Note 2)	75	54	36	24	20

Fuente. Norma ASTM Sección E 8M – 04.

1.4.3.1 Probetas maquinadas y no maquinadas. Las probetas maquinadas son aquellas que por medio de una muestra del producto trabajado o fundido se le lleva a cabo un mecanizado. Para estas se debe tener en cuenta una curva de transición entre los agarres de la mordaza y la longitud paralela y los extremos de agarre pueden ser de cualquier forma de tal manera que se adapten a las mordazas.

Las probetas no maquinadas como los productos de secciones transversales uniformes como perfiles, alambres, barras y las probetas fundidas como fundiciones de hierro o aleaciones no ferrosas pueden ser sometidas a la prueba de tracción sin ser maquinadas.

1.4.3.2 Probetas Proporcionales y no proporcionales. Las probetas de ensayo proporcionales son aquellas en las que la longitud calibrada (L_o) depende del diámetro (d) de la probeta y se relacionan por medio de la constante k , donde el valor adoptado internacionalmente para K es igual a 5.65

$$L_o = K\sqrt{S_o} = 5d \quad \text{Ecuación 8}$$

Las probetas no proporcionales son aquellas en las que la longitud calibrada no depende del diámetro de esta.

1.4.3.3 Radio de transición. Para las probetas maquinadas la longitud paralela en sus extremos debe rematarse con un radio de transición, este radio de transición debe ser por lo menos de 2 mm para probetas de sección circular según la norma NTC 2.

1.4.3.4 Longitud paralela. La longitud paralela debe ser por lo menos igual a la longitud calibrada inicial más la mitad del diámetro en las probetas circular según la norma.

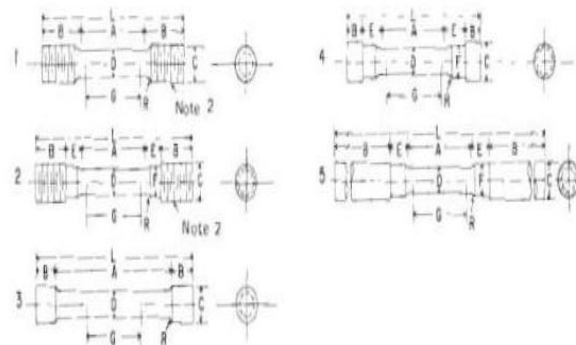
$$L_c \geq L_o + d/2$$

Ecuación 9

1.4.3.5 Extremos de agarre. El extremo final de agarre de la probeta de ensayo puede ser de cualquier forma, esta dependerá principalmente de las mordazas de agarre de la máquina de ensayos de tensión.

Existen varios tipos de extremos de agarre estandarizados según la norma ASTM como se puede observar en la figura 10. Entre estos se encuentran los más comunes como los de extremos liso, extremo bordeado y extremo roscado.

Figura 10. Tipos de extremos estándar para probetas



	Dimensions, mm				
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gage length	62.5 ± 0.1	62.5 ± 0.1	62.5 ± 0.1	62.5 ± 0.1	62.5 ± 0.1
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2	12.5 ± 0.2	12.5 ± 0.2	12.5 ± 0.2	12.5 ± 0.2
R—Radius of fillet, min	10	10	2	10	10
A—Length of reduced section	75, min	75, min	100, approximately	75, min	75, min
L—Overall length, approximate	145	155	140	140	255
B—Length of end section (Note 3)	35, approximately	25, approximately	20, approximately	15, approximately	75, min
C—Diameter of end section	20	20	20	22	20
E—Length of shoulder and fillet section, approximate	...	15	...	20	15
F—Diameter of shoulder	...	15	...	15	15

Fuente. Norma ASTM Sección E 8M – 04.

1.4.4 Probeta a utilizar en el ensayo.

Para el desarrollo de las pruebas de tensión que se llevaran a cabo en el desarrollo del proyecto se utilizaran probetas de sección transversal circular estándar de 12.5 mm de diámetro, según la norma ASTM E8.

La probeta será maquinada y de tipo proporcional lo que quiere decir que cumple con la relación $L_0 = 5d$ y de extremo de agarre tipo liso (*specimen 3*) de la figura 10 ya que cumple con las condiciones de las mordazas hidráulicas de agarre de la maquina.

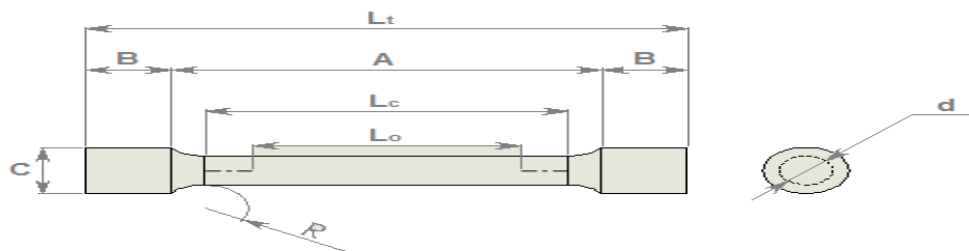
A continuación se puede observar las dimensiones para la probeta de 12.5 mm de diámetro y de menores diámetros a este con medidas proporcionales a la estándar y siguiendo la norma ASTM E8 tenemos:

Tabla 3. Dimensiones de la probeta

	Dimensiones (mm)				
	Probeta estándar	Probetas de menor tamaño proporcionales a la estándar			
		<u>12.5</u>	<u>9</u>	<u>6</u>	<u>4</u>
d	12.5 ± 0.2	9 ± 0.1	6 ± 0.1	4 ± 0.1	2.5 ± 0.1
L ₀	62.5 ± 0.1	45 ± 0.1	30 ± 0.1	20 ± 0.1	12.5 ± 0.1
R	10	8	6	4	2
A	100	100	100	100	100
L _c	84.4	-	-	-	-
B	20	20	20	20	20
L _t	140	140	140	140	140
C	20	20	20	20	20

Fuente. Autores

Figura 11. Dimensiones de la probeta de ensayo



Fuente. Autores

1.5 ENSAYO DE COMPRESION

Los ensayos de compresión son relativamente similares a los ensayos de tensión en la forma de realizar la prueba, así como la velocidad de aplicación de esfuerzos y la forma de analizar e interpretar los datos de la misma.

Cuando los materiales son sometidos a cargas de compresión pueden presentar comportamientos muy diferentes al comportamiento bajo la aplicación de esfuerzos de tensión.

1.5.1 Comportamiento de materiales bajo esfuerzos de compresión.

Muchos materiales que son frágiles bajo esfuerzos de tensión, presentan este comportamiento debido a grietas y poros que crecen y combinan las causas de falla a lo largo de los planos perpendiculares al eje de la probeta. Estos mismos materiales al ser sometidos a esfuerzos de compresión son menos susceptibles a este tipo de defectos, de modo que llegan a tener una resistencia considerablemente más alta bajo esfuerzos de compresión, presentando el material un comportamiento un poco más dúctil.

Los metales dúctiles tienden a presentar un comportamiento muy similar en cuanto a los segmentos iniciales de la curva deformación esfuerzo, cuando son sometidos a ensayos de tensión o compresión.

Al ocurrir la falla en la probeta cuando es sometida a esfuerzos de compresión, generalmente se asocia la falla con un esfuerzo cortante, por lo que la probeta presenta una fractura inclinada con respecto al eje de la probeta.

1.5.2 Relación de esbeltez.

Cuando una probeta es sometida a compresión el tipo de falla dependerá de la relación de esbeltez, el cual es igual a la relación entre la longitud entre apoyos de la probeta sobre el diámetro de esta como se observa en la ecuación:

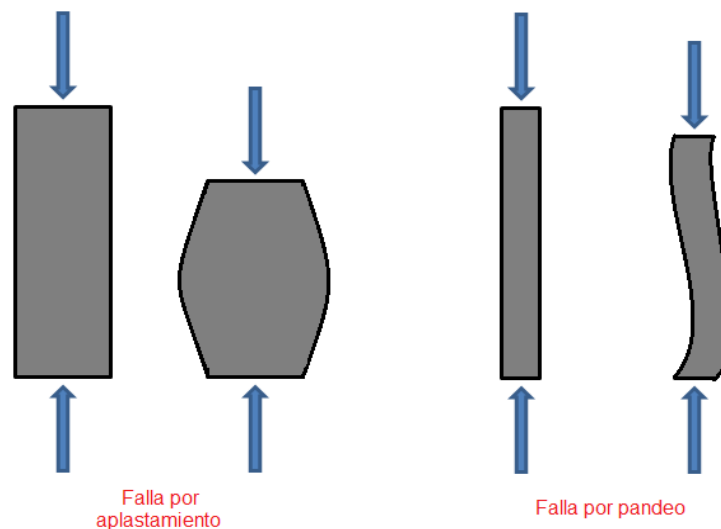
$$Re = \frac{L}{d} \qquad \text{Ecuación 10}$$

Aunque no existe una división clara entre el tipo de columna según la relación de esbeltez, se acostumbra a clasificar como columnas cortas, intermedias y largas. Las diferencias vienen determinadas por su comportamiento, donde las columnas largas fallan por flexión o pandeo, las intermedias por una combinación de pandeo y aplastamiento y por último las columnas cortas fallan por aplastamiento.

Cuando se tiene un elemento corto (relación de esbeltez relativamente pequeña) sometido a compresión, esta se acortará según la ley de Hooke hasta que el esfuerzo llegue al límite elástico del material, en este caso la carga crítica será aquella que hace que el esfuerzo sea igual al límite de fluencia y cualquier valor por encima de este causará la falla por aplastamiento.

Ahora si se considera que la probeta presenta una relación de esbeltez relativamente alta (columna larga) bajo la acción de una carga de compresión gradualmente creciente, inicialmente a medida que aumenta la carga, esta se deformará según la ley de Hooke, si se sigue aumentando la carga se llega a un punto en el cual el elemento alcanza un punto de equilibrio inestable, de esta manera el elemento presentará una falla por flexión o pandeo bajo una carga mucho menor que la carga a la que fallaría por aplastamiento o fluencia.

Figura 12. Tipos de falla bajo esfuerzos de compresión



Fuente. Autores

Una recomendación razonable a la hora de realizar la prueba de compresión para la relación de esbeltez es:

$L/d = 3$, para materiales dúctiles.

$L/d = 1.5$ o 2 , para materiales frágiles.

2. CONTROL AUTOMÁTICO

El control automático ha desempeñado una función vital en el avance de la ingeniería y de la ciencia, pasando desde simples funciones de confort como el control interruptor de la luz, el control de llama en la estufa o de temperatura en el hogar a grandes aplicaciones en sistemas de vehículos espaciales, robótica, procesos modernos industriales y de manufactura, entre otros.

Los avances en la teoría y la práctica del control automático aportan los medios para obtener un desempeño óptimo de los sistemas dinámicos, mejoran la productividad y aligeran operaciones manuales repetitivas y rutinarias. Se puede definir el control como la manipulación indirecta de las magnitudes de un sistema llamado planta a través de otro sistema llamado sistema de control.

2.1 SISTEMAS DE CONTROL

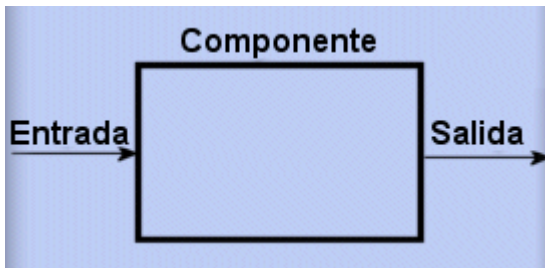
Un sistema se define como un juego conjunto de componentes que en conjunto realizan una tarea específica y la palabra control se usa para designar regulación o comando a una variable. Por lo tanto un sistema de control es un conjunto de componentes conectados de tal manera que regule comande y dirija a sí mismo o a otro sistema. Es decir el objetivo de un sistema de control es gobernar la respuesta de la planta sin el hecho que un operador intervenga directamente sobre sus elementos.

2.1.1 Representación de un sistema de control.

Como se ha visto, los sistemas de control incluyen una cantidad de componentes que están constantemente comunicados. La interacción entre los componentes puede hacerse muy complicada. Por lo tanto, es de gran utilidad representar gráficamente un sistema de control por medio de diagramas de bloques. En donde los bloques se usan para representar componentes interconectados por flechas para representar el flujo de las señales entre los componentes como se puede observar en la figura 13. En donde en base a la entrada que recibe el componente se genera una salida.

Estos diagramas ofrecen la ventaja de indicar de una manera más realista lo que ocurre en el sistema y representar ordinariamente las relaciones matemáticas.

Figura 13. Diagrama de bloques

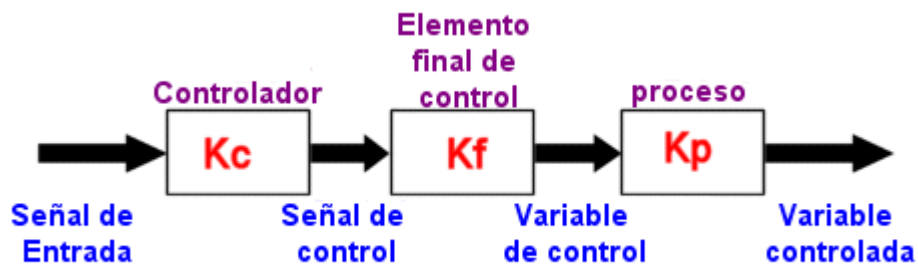


Fuente. Autores

2.1.2 Componentes de un sistema de control.

Como se ha visto anteriormente un sistema de control incluyen dos o más componentes que lo conforman junto con sus interconexiones o señales en la figura 14 se puede observar un sistema de control con sus componentes básicos.

Figura 14. Componentes básicos de un sistema de control



Fuente. Autores

- **Controlador.** El controlador es el elemento que se encarga de comparar el valor real de salida de una planta con la entrada de referencia o set point, determina la desviación y produce una señal de error que tiende a reducir la desviación a cero. Puede tratarse de un PC o un PLC que realicen las funciones de comparación y computación.
- **Elemento final de control.** El elemento final de control utiliza la señal de control para manipular la variable controlada, este es un preactuador como ejemplo, para nuestro caso, la Servoválvula le llega una señal de control que moverá la corredera permitiendo un paso de caudal que sería la variable de control.
- **Planta o proceso.** La planta se le conoce a la parte o conjunto de partes de una maquina que se manipula para obtener un cambio físico, es decir, el lugar

en donde se encuentra la variable controlada o salida del sistema como por ejemplo e recinto de un horno en un control de temperatura o específicamente para nuestro caso un cilindro actuador lineal en donde el flujo que entra al cilindro es la variable de control que desplaza el cilindro y se transforma en la variable física a medir que es la posición o variable controlada.

- **Sensor.** Los sensores o transductores son utilizados específicamente en sistemas de control de lazo cerrado y se encargan de medir continuamente la variable física controlada y transformar la señal, según sea el caso, para compararla con la señal de entrada o set point.

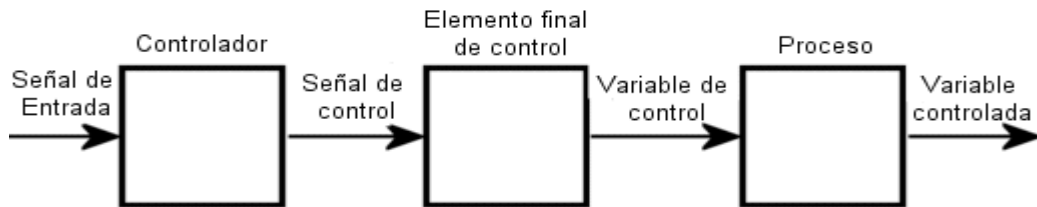
Asociados al sistema de control se tienen diferentes tipos de señales o variables como lo son: La variable controlada que es la variable física del sistema a la cual se está buscando llevar un control, con relación a esto existe la señal de entrada o set point que es el valor al cual se quiere que este la variable controlada, es por esto que estas dos señales se comparan continuamente determinando así una señal conocida como señal de error del sistema que en el controlador produce la señal de control dirigida al elemento final de control, que produce la variable de control y por último se dirige a la planta del sistema para manipular la variable controlada y cerrar así el ciclo del sistema.

2.1.3 Sistemas de control en lazo abierto y cerrado.

Dependiendo del tratamiento que el sistema de control realiza con la señal de salida, pueden distinguirse dos topologías de control generales: los sistemas de control en lazo cerrado y sistemas de control en lazo abierto.

2.1.3.1 Sistemas de control en lazo abierto. Un sistema de lazo abierto se caracteriza principalmente porque la salida del sistema no se compara con la entrada de referencia, por lo tanto no se tiene forma de saber si la variable controlada corresponde a la deseada. Por ello cada entrada corresponderá a una operación prefijada sobre la señal de salida. En este tipo de sistemas se puede asegurar que la exactitud depende en gran parte de la calibración del mismo y por lo tanto cualquier perturbación externa a la que esté sometida el sistema (señales indeseadas) provocará inexactitud en el sistema y que este no cumpla con la función deseada.

Figura 15. Diagrama de bloques de sistema de lazo abierto



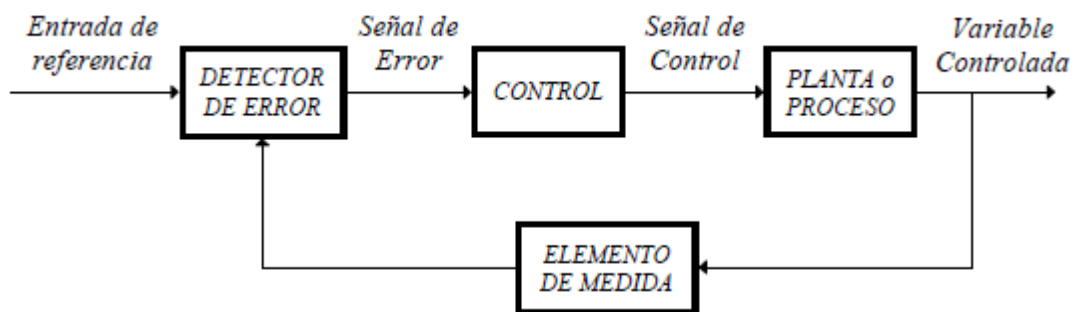
Fuente. Autores

Para poder considerar la utilización de sistemas de lazo abierto, se hace necesario conocer la relación de entrada y salida del sistema, además de garantizar la no presencia de perturbaciones externas e internas del sistema, lo cual es difícil de cumplir en la práctica, y su resultado implica sistemas relativamente caros.

2.1.3.2 Sistemas de control en lazo cerrado. La principal característica de un sistema en cadena de lazo cerrado es que la señal de salida tiene efecto sobre la señal de control. A este efecto se denomina realimentación o feedback.

La variable controlada debe realimentarse y compararse con la entrada de referencia, La diferencia encontrada entre la señal de entrada y la señal de realimentación se le conoce como señal de error, tras lo cual se envía una señal proporcional a través del controlador al sistema, con el objetivo de corregir la desviación que pueda existir.

Figura 16. Diagrama de bloques de sistema de lazo cerrado



Fuente. Autores

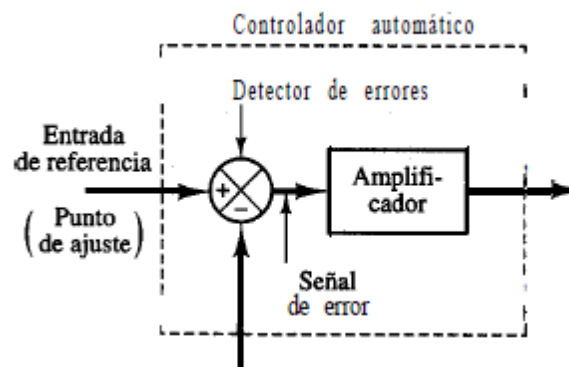
La principal ventaja de los sistemas de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación hace al sistema menos sensible a perturbaciones externas y a las variaciones de los parámetros internos. Es decir, Al haber realimentación el

sistema continuamente está midiendo la salida y corrigiendo cualquier error que se presente en el sistema ya sea por perturbaciones externas o internas.

2.2 CONTROLADORES Y ACCIONES BASICAS DE CONTROL

En los sistemas de control, el controlador es el elemento encargado de comparar la señal de referencia con la señal de salida del proceso y producir una señal de control, la cual, es enviada al actuador para tratar de corregir el error y mantener la variable controlada en el valor deseado de entrada.

Figura 17. Controlador automático



Fuente. Prentice Hall - Ingeniería de Control Moderna (Ogatta)

Los controladores se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de energía que utiliza en su operación, como neumáticos, electrónicos, digitales e hidráulicos. También suelen clasificarse de acuerdo con sus acciones de control como: de dos posiciones, proporcionales, integrales y derivativos.

El tipo de controlador que se use debe seleccionarse de acuerdo a factores como condiciones de la planta y de operación, seguridad, costo, confiabilidad, precisión, entre otros.

2.2.1 Modos de operación del controlador.

- **Automático.** En este modo de operación el controlador decide y emite la señal apropiada hacia el elemento final de control, con el fin de mantener la variable controlada en el punto de referencia.
- **Manual.** Cuando el controlador está en manual, este cesa de decidir, entonces el operario puede cambiar el set point. El punto de referencia no tiene ninguna

influencia en la salida del controlador, solamente el ajuste manual tiene efecto sobre la salida del controlador.

- **Local.** Este modo de operación se elige cuando el punto de referencia lo manipula el operador desde el panel donde esta ubicada la maquina mediante una perilla o interruptor.
- **Remoto.** Es cuando el punto de referencia se fija desde otro dispositivo, controlador, relevador o computador. Cuando se selecciona el modo remoto la perilla de ajuste local no tiene ningún efecto.
- **Acción directa.** En este modo, si hay un incremento en la señal de entrada al controlador se presenta un incremento en la señal de salida.
- **Acción inversa.** En este caso, si hay un incremento en la señal de entrada al controlador, presenta un decremento en la señal de salida.
- **Controladores auto operados.** Los controladores auto operados son elementos muy sencillos y poco costosos, que se integran en una unidad, estos elementos utilizan la potencia desarrollada por el elemento de medición para hacer su operación específica.

2.2.2 Acciones de control.

La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se le denomina acción de control. El conocimiento de las características de las acciones de control es útil para predecir la respuesta del sistema, especialmente en aquellos casos en donde las funciones de transferencia no están bien definidas y resulta de gran utilidad en el momento de seleccionar la más apropiada para cada aplicación del sistema.

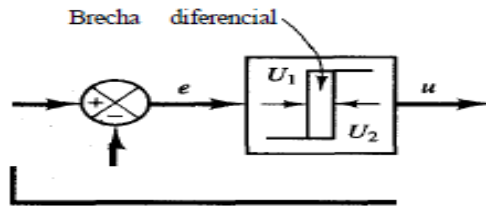
2.2.2.1 Acción de control de dos posiciones (on-off). En un sistema de control de dos posiciones el elemento final de control se caracteriza por que tiene dos posiciones fijas que son “todo o nada” o “on-off”. Es ampliamente utilizado en sistemas industriales como domésticos debido a que es relativamente simple y económico.

En un controlador de dos posiciones la señal de salida del controlador $U(t)$ permanecerá siempre en un valor máximo o mínimo, según sea el error $e(t)$ positivo o negativo. En general los controladores de dos posiciones son

dispositivos eléctricos tales como válvulas solenoides, relés o controladores neumáticos proporcionales.

En la figura 18. Se puede observar un controlador todo o nada en donde si el error $e(t) > 0$, entonces $U(t) = U_1$ y si $e(t) < 0$, entonces $U(t) = U_2$. donde los valores de U_1 y U_2 son constantes. De esta forma la variable controlada puede moverse continuamente entre los límites requeridos y hacer que el elemento de control vaya de una posición fija a otra. El rango en el que la señal de error puede variar antes que se produzca la conmutación, se denomina banda diferencial o zona muerta y hace que la salida del controlador $U(t)$ mantenga su valor hasta que la señal de error haya rebasado ligeramente el valor mínimo, a veces es provocada de forma deliberada para impedir la excesiva conmutación del elemento final de control o elementos del sistema, debido a que la frecuente conmutación de elementos generan desgaste mecánico, reduciendo la vida útil del sistema.

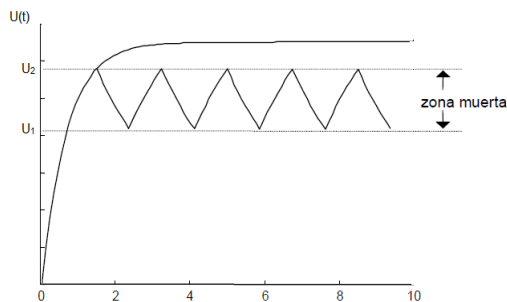
Figura 18. Controlador on-off con zona muerta



Fuente. Prentice Hall - Ingeniería de Control Moderna (Ogatta)

En la figura 19. Se puede observar como la salida del sistema $U(t)$ fluctúa entre dos valores mínimo y máximo U_1 y U_2 , generando en la salida una zona muerta. La amplitud de la oscilación de la salida puede reducirse disminuyendo la zona muerta o banda diferencia, sin embargo, esto aumentaría las oscilaciones reduciendo la vida útil en componentes del sistema.

Figura 19. Controlador on-off con zona muerta



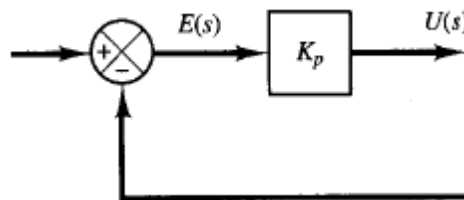
Fuente. Prentice Hall - Ingeniería de Control Moderna (Ogatta)

2.2.2.2 Acción de control Proporcional. Para un control proporcional la acción correctiva o salida del controlador es proporcional al error.

La relación entre la salida y la entrada del controlador en función del tiempo o en transformadas de Laplace son:

$$U(t) = K_p * e(t) \quad \text{ó} \quad \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad \text{Ecuación 11}$$

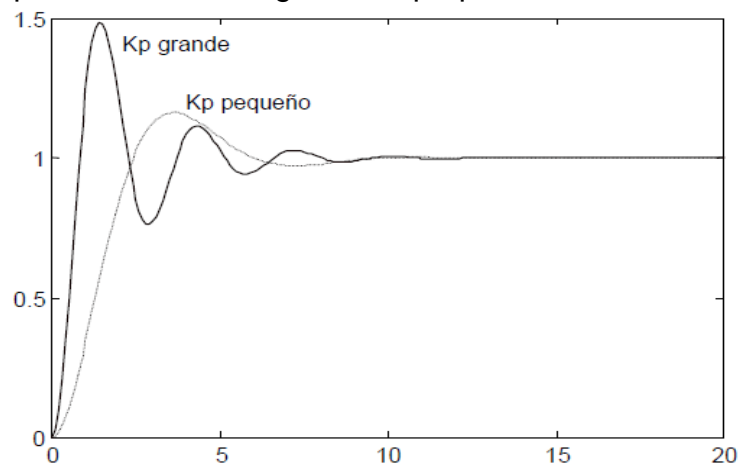
Figura 20. Diagrama de bloques controlador proporcional



Fuente. Prentice Hall – Ingeniería de Control Moderna (Ogatta)

En la figura 21 se puede observar una respuesta típica para un sistema sin perturbación y el comportamiento dinámico de esta, al variar el valor de la ganancia proporcional. Se observa que al aumentar K_p la salida es más oscilatoria, pero disminuye el error en estado estacionario. Para sistemas en donde la precisión y el tiempo de respuesta son de suma importancia se debe tener cuidado con la ganancia proporcional, debido a q si se aumenta mucho K_p , aumenta la amplitud de la salida, pero tiende a llegar al punto de referencia en un menor tiempo, oscilando entre este punto.

Figura 21. Respuesta al variar la ganancia proporcional



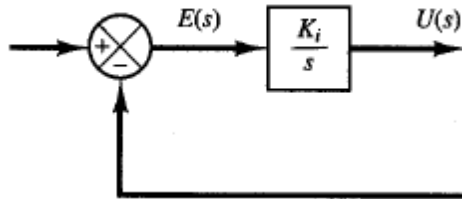
Fuente. Autores

2.2.2.3 Acción de control Integral. En un controlador integral, el valor de la salida del controlador $U(t)$ varía a una razón proporcional a la señal de error, como se puede observar el diagrama de bloques para un controlador integral en la figura 22.

La relación entre la entrada y la salida del controlador se presenta según siguiente ecuación en función del tiempo o Laplace:

$$U(t) = K_i * \int e(t) dt \quad \text{ó} \quad \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad \text{Ecuación 12}$$

Figura 22. Diagrama de bloques controlador integral

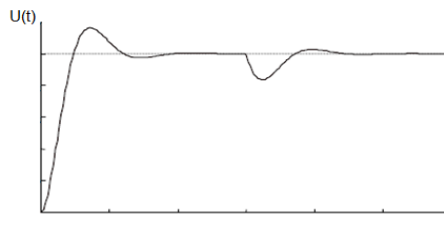


Fuente. Prentice Hall – Ingeniería de Control Moderna (Ogatta)

La corrección se hace proporcional al error, de manera que un controlador integral continuará corrigiendo hasta que el error sea cero. Esta tendencia a eliminar cualquier error del sistema en el estado estable es la principal ventaja que se obtiene de la acción de control integral; pero la desventaja radica en que el control integral tiende a sobre corregir, produciendo por tanto una respuesta oscilatoria y en algunos casos inestabilidad.

En la figura 23, se puede observar la respuesta típica de un sistema con perturbación externa, para un controlador integral. Se observa que el controlador integral corrige el error en estado estable ante la perturbación externa impuesta en el sistema.

Figura 23. Respuesta de control integral con perturbación.



Fuente. Autores

En el control integral de una planta, la señal de salida del controlador, es en todo momento el área bajo la curva de la señal error hasta ese momento. La señal de control $U(t)$ tendrá un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero.

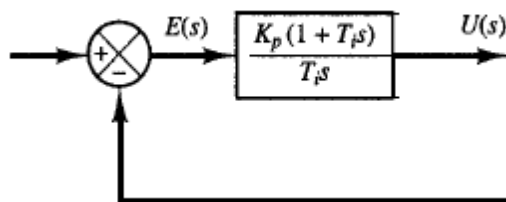
2.2.2.4 Acción de control Proporcional - Integral (PI). Las acciones de control proporcional e integral pueden combinarse para producir una corrección que es la suma de las contribuciones individuales, se le denomina control (PI). La relación matemática y la función de transferencia del control PI se muestra en la siguiente ecuación.

$$U(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} * \int e(t) dt \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p * \left(1 + \frac{1}{T_i * s}\right) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde K_p es la ganancia proporcional y afecta tanto la ganancia proporcional como la integral, y T_i se denomina tiempo integral. Ambos valores son ajustables. La inversa del tiempo integral se le denomina velocidad de reajuste y es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control.

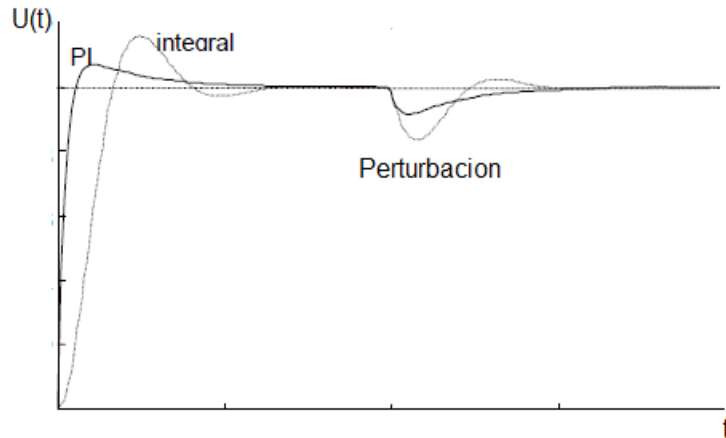
Figura 24. Diagrama de bloques controlador integral



Fuente. Prentice Hall – Ingeniería de Control Moderna (Ogatta)

Con este tipo de control puede eliminarse la condición indeseable de inestabilidad limitada, como se puede observar en la figura 25. La acción proporcional estabiliza el sistema y la acción integral elimina el error en estado estacionario.

Figura 25. Comparación respuesta integral vs PI.



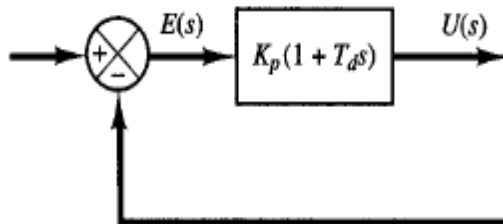
Fuente. Autores

2.2.2.5 Acción de control Proporcional – Derivativa (PD). La acción de control derivativa ocurre donde la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal error, es decir hace una corrección que es proporcional a la derivada del error con respecto al tiempo. Junto con la acción de control proporcional se le denomina control PD, y viene dado por la siguiente relación matemática y función de transferencia.

$$U(t) = K_p * e(t) + K_p * T_d * \frac{d e(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p * (1 + T_d * s) \quad \text{Ecuación 16}$$

Figura 26. Diagrama de bloques controlador integral



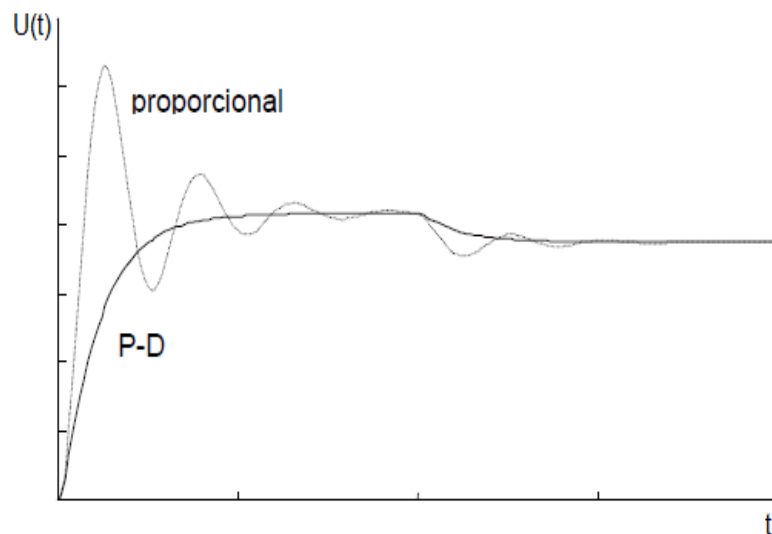
Fuente. Prentice Hall – Ingeniería de Control Moderna (Ogatta)

En donde T_d es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de velocidad hace avanzar el efecto de la acción proporcional. Se dice que el control derivativo tiene un carácter de previsión, debido a que se anticipa el error, porque responde a la

rapidez del cambio del error y puede producir una corrección significativa antes de que la magnitud real del error sea grande. Sin embargo la acción de control derivativa nunca se usa sola, debido a que solo es eficaz durante periodos de tiempo transitorios y tiene la desventaja de que amplifica las señales de ruido y puede provocar un efecto de saturación en el actuador.

Como se puede observar en la figura 27. La respuesta del sistema PD es mucho más rápida al inicio, debido a que responde al cambio de la señal de error, cuando se acerca la respuesta del sistema al punto de referencia o set point, el cambio en la velocidad del error disminuye y la curva se atenúa hacia el punto de referencia sin oscilaciones, mejorando ampliamente la precisión en la respuesta del sistema, además de responder mucho más rápido a las perturbaciones externas.

Figura 27. Comparación respuesta proporcional vs PD.



Fuente. Autores

2.2.2.6 Acción de control Proporcional - Integral - Derivativa (PID). La combinación de los efectos de la acción de control proporcional, integral y derivativo, se denomina acción de control PID. Esta combinación presenta la ventaja de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un control con esta acción y su función de transferencia son.

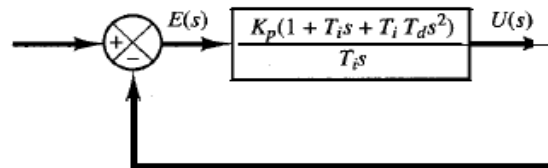
$$U(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} * \int e(t) dt + K_p * T_d * \frac{d e(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p * \left(1 + \frac{1}{T_i * s} + T_d * s \right)$$

Ecuación 18

En la figura 28. Se puede observar el diagrama de bloques para un controlador proporcional, integral y derivativo.

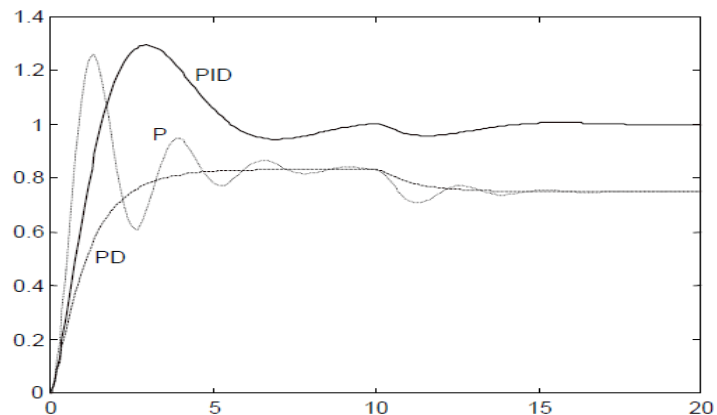
Figura 28. Diagrama de bloques controlador integral



Fuente. Prentice Hall – Ingeniería de Control Moderna (Ogatta)

En la figura 29 se puede observar la diferencia de la respuesta del sistema para los distintos tipos de controladores proporcional, proporcional derivativo y proporcional integral derivativo.

Figura 29. Comparación respuesta P, PD, PID

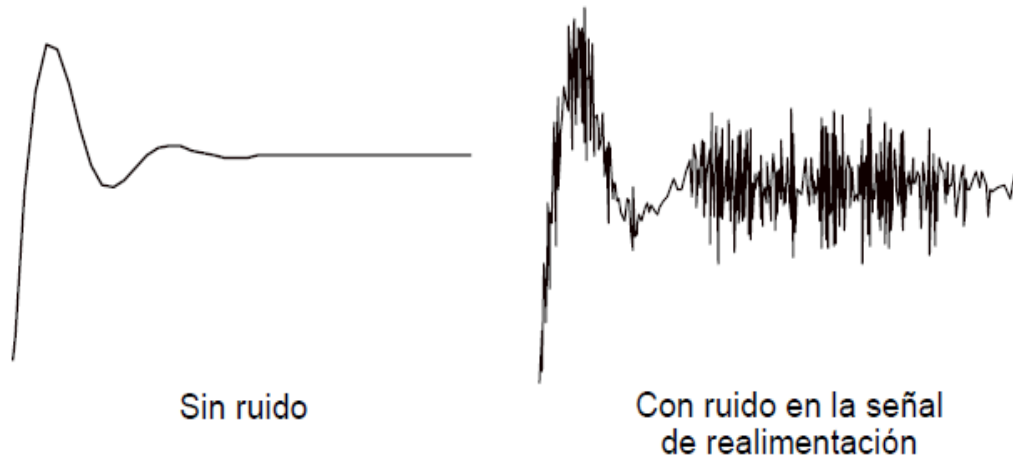


Fuente. Autores

Los controladores PID son utilizados en procesos en donde las constantes de tiempo son relativamente largas como por ejemplo en procesos de control de temperatura y control de concentración que presenta inercias altas en el sistema. Los procesos en los que las constantes de tiempo son pequeñas, como en el caso de control de presión o control de flujo, los procesos son rápidos y susceptibles al ruido.

Cuando la señal de realimentación presenta mucho ruido, sea por el transmisor o por el proceso en sí, se hace necesario tomar precauciones, filtrando la señal que sale del transmisor, antes de llevarla al controlador, debido a que la acción derivativa amplificaría la señal de ruido. En la figura 30 se puede observar la diferencia en la señal de salida de un controlador, con y sin ruido en la señal de realimentación.

Figura 30. Salida del controlador PID con y sin ruido



Fuente. Autores

3. SERVOMECANISMOS ELECTROHIDRAULICOS

Al hablar de servohidráulica ó hidráulica proporcional implícitamente nos referimos a circuitos de regulación en las cuales se usan elementos hidráulicos. En un servomecanismo electrohidráulico se busca principalmente controlar las variables de posición (ángulo o desplazamiento), velocidad (caudales) y fuerza (presiones) en el sistema.

La utilidad de la electrohidráulica ha sido bien comprobada durante muchos años en aplicaciones aeroespaciales, móviles e industriales, en donde por medio de sistemas hidráulicos se pueden manejar potencias elevadas con componentes relativamente pequeños y el control de esta potencia hidráulica se consigue de forma rutinaria por medio de la electrónica.

La combinación del uso de las señales electrónicas con la capacidad de los componentes hidráulicos de responder con precisión, ha desarrollado una tecnología de control adecuada en cadena cerrada, que comparadas con otros tipos de control presentan las siguientes ventajas:

- Al ser el fluido hidráulico e elemento que transmite la potencia este transporta el calor generado lejos de los elementos y componentes mecánicos lubricándolos continuamente lo que asegura un funcionamiento más fiable y una vida útil más larga.
- Los actuadores hidráulicos pueden ser lineales o rotativos como cilindros o motores respectivamente en donde puede invertirse el sentido de giro, pararse o hacerse intermitente según sea el caso, sin el desgaste típico de componentes electromecánicos. Con grandes intervalos de velocidad y ciclos continuos de trabajo.
- Los actuadores hidráulicos rotativos no vienen limitados por efectos de saturación magnética como en el caso de motores eléctricos, por lo tanto pueden conseguirse pares muy elevados de trabajo en dispositivos pequeños ya que este depende de la diferencia de presiones que está limitada solamente por el diseño del componente.

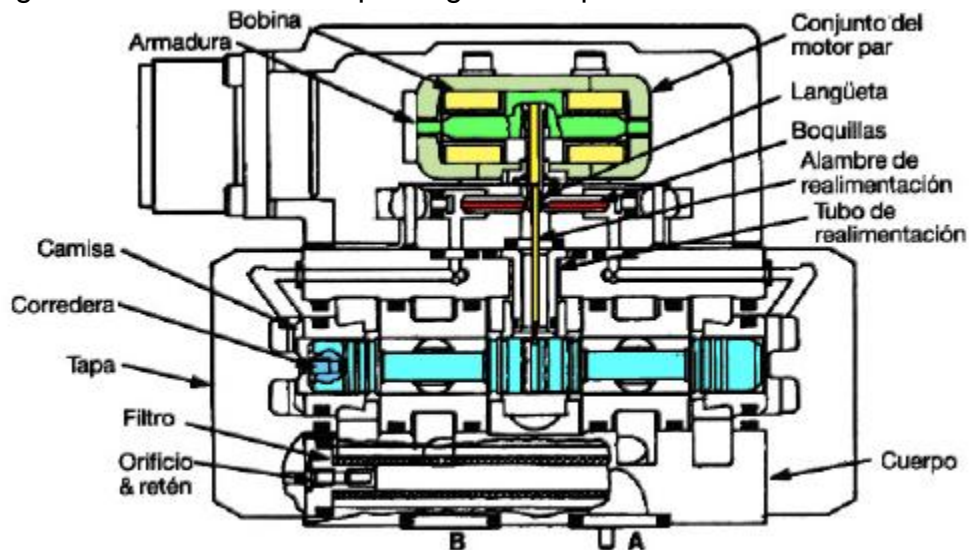
- Presentan un tiempo de respuesta, aceleración y transferencia de energía y de potencia mayor, lo que origina una ganancia del sistema, precisión y amplitud de banda mucho mejores.

3.1 SERVOVALVULAS

Los desarrollos fundamentales de las servo válvulas provienen de la aviación y se construyeron para comandar mediante pequeñas señales eléctricas cuerpos y volantes con gran exactitud. Con el pasar del tiempo para poder hacer frente a las grandes demandas de exactitud se adoptó esta técnica en el sector industrial.

En las aplicaciones industriales se pueden encontrar varios tipos diferentes de servo válvulas, sin embargo, el modelo más utilizado es el tipo lengüeta /boquilla como se puede observar en la figura 31.

Figura 31. Servoválvula tipo lengüeta/boquilla



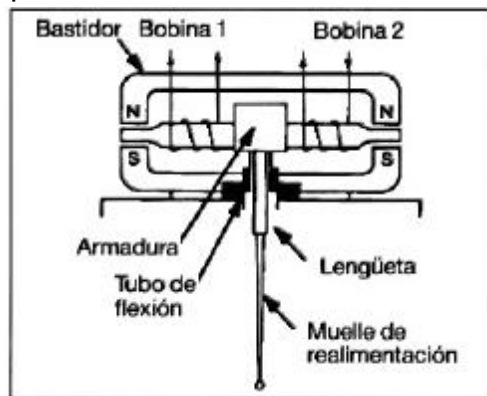
Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

Esta es una Servoválvula de dos etapas (pilotada) con retro posicionamiento mecánico, en la que por medio de un motor par que se encarga de accionar la lengüeta de pilotaje. El conjunto lengüeta/boquilla controla la presión en ambos extremos de la corredera principal moviéndola al generar el desequilibrio de presiones y creando un movimiento de retroalimentación mecánica de la lengüeta en la etapa de pilotaje.

3.1.1 Motor de mando.

El motor de mando o de torque en las servoválvulas se encarga de transformar una pequeña señal eléctrica en un movimiento mecánico rotativo. Este es un motor con excitación magnética permanente formado por dos imanes, rodeados cada uno por un bastidor. El conjunto armadura y lengüeta esta soportado entre los bastidores mediante un tubo de flexión que permite que la armadura se mueva garantizando estanqueidad para el fluido entre las áreas eléctrica e hidráulica. Al pasar una corriente eléctrica a través de las dos bobinas que rodean la armadura, esta se magnetiza y uno de sus extremos se convierte en polo sur y el otro en polo norte generando un momento en el motor, el momento generado es proporcional a la corriente de mando, es decir cuando la corriente es nula $i=0$ el momento también lo es y el tubo conduce a la armadura a su posición central.

Figura 32. Motor de torque



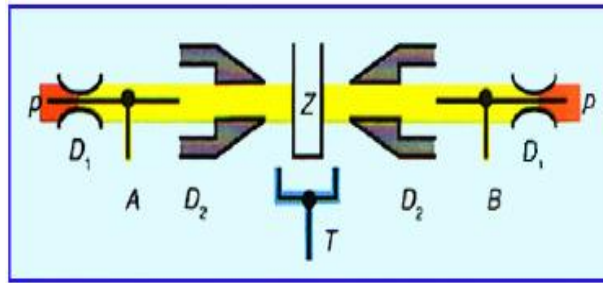
Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

3.1.2 Amplificador hidráulico.

Unido al centro de la armadura del motor de mando hay un conjunto lengüeta y muelle de retroalimentación que se extienden hacia abajo en donde una bola en el extremo se sitúa en un alojamiento en la corredera. La transformación de la desviación de la lengüeta del motor en una magnitud hidráulica se produce en el amplificador hidráulico Figura 33.

En el sistema a ambos lados de la lengüeta hay dos boquillas o toberas de regulación, la presión de mando o piloto actúa sobre ambos conjuntos de boquillas y es proporcionada por el orificio de suministro de presión de la válvula a través de un filtro incorporado que se encarga de aislar el sistema de partículas contaminantes y un orificio fijo que limitan el caudal que llega a las boquillas

Figura 33. Sistema de toberas - lengüeta



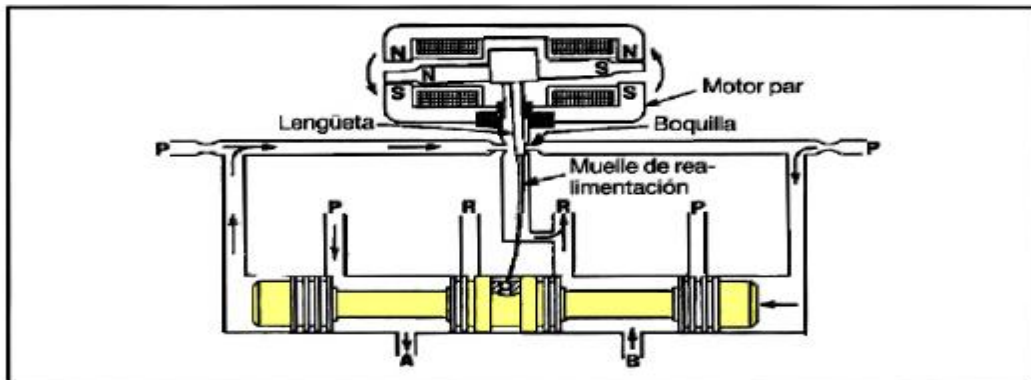
Fuente. Mannesmann Rexroth, Técnica de válvulas proporcionales y de servoválvulas

La presión de mando o piloto va a su vez a las cámaras a cada uno de los extremos de la corredera, es decir que la presión en las cámaras de la corredera viene determinada por la restricción de caudal en las boquillas que, a su vez, viene controlada por la posición de la lengüeta.

De tal manera que con una señal de cero aplicada en el motor par, la lengüeta está situada a medio camino entre las dos boquillas, lo que crea un equilibrio en las presiones a ambos lados de la corredera, en esta situación la corredera permanece centrada.

Al aplicar una señal al motor de torque, la lengüeta se mueve creando una mayor restricción en una boquilla y una menor restricción en la otra, lo que desequilibra las presiones en las cámaras de los extremos de la corredera, esta diferencia de presiones en las cámaras genera un desplazamiento de la corredera dentro de la camisa permitiendo el paso de caudal a través de la válvula.

Figura 34. Sistema de toberas - lengüeta



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

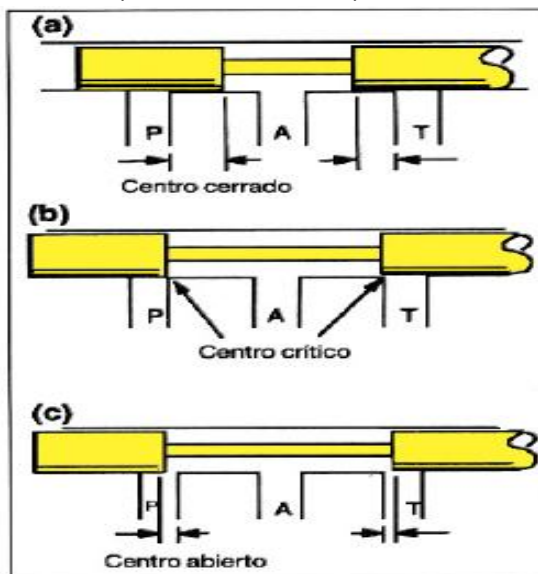
La retroalimentación mecánica ocurre en el momento en que la corredera se desplaza, esta arrastra el muelle de retroalimentación, llevando la lengüeta hacia la posición central de las dos boquillas e igualando las presiones en las cámaras de la corredera y se detiene, es decir, la corredera principal se desplaza hasta que la fuerza del motor par y la mecánica del muelle se equilibran. Puesto que la fuerza del motor par es proporcional a la corriente en la bobina, la magnitud del desplazamiento viene determinada por esta corriente de entrada.

3.1.3 Posición central.

La corredera principal se desliza sobre la camisa de la válvula creando vías de paso del fluido hidráulico en donde se consigue un control de caudal según el desplazamiento de la corredera para descubrir el orificio de paso en un grado mayor o menor. Una característica crítica de la válvula es la posición relativa del extremo del resalte de la corredera y del extremo del orificio en la posición que es lo que se considera como la posición central.

En la figura 35(a) se puede observar una corredera de centro cerrado en la que la anchura del resalte sobrepasa el extremo del orificio. En la figura 35(b) la corredera de centro critico en la que el extremo del resalte esta exactamente alineado con el del orificio y por ultimo en la figura 35(c) una corredera de centro abierto.

Figura 35. a) Centro cerrado b) Centro critico c) Centro abierto



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

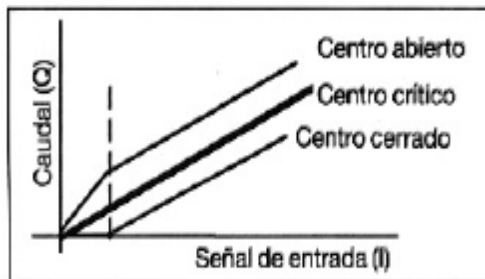
3.1.4 Ganancia en caudal.

La linealidad entre el caudal (Q) y el desplazamiento (S), depende de la forma de los orificios y de ranuras en los resaltes de la corredera, generalmente orificios cuadrados y sin ranuras dan aproximadamente una relación proporcional para la curva Q y S. Debido a que la relación de la corriente de entrada (I) es lineal al desplazamiento de la corredera de la válvula se obtiene una relación muy similar si el caudal se refiere a la señal de entrada (I).

La pendiente de la grafica correspondiente a esta relación se denomina ganancia en caudal, que es la variación del caudal para un cambio en la señal de entrada a una diferencia de presiones.

En la figura 36, se puede observar la relación entre caudal y la señal de entrada para una válvula. Para el centro cerrado se puede observar que presenta una zona denominada banda muerta en la que a pesar de haber una señal de entrada todavía no hay caudal hasta que el extremo del resalte de la corredera no empiece a descubrir el orificio. En el centro critico se elimina esta zona muerta y el caudal puede atravesar la válvula incluso a niveles muy bajos de señal de entrada haciéndola muy sensible alrededor de la zona nula. Para la corredera de centro abierto incluso en ausencia de señal un caudal pequeño puede atravesar la válvula y presenta una pendiente más elevada alrededor de la posición central debido al efecto de los dos orificios.

Figura 36. Ganancia en caudal

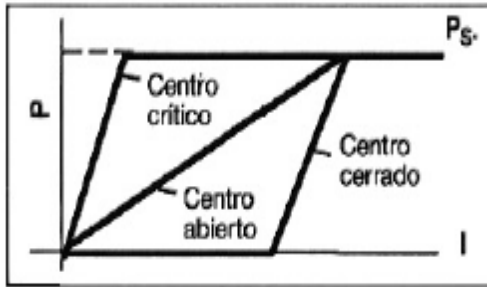


Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

3.1.5 Ganancia en presión.

La ganancia en presión de una válvula es un criterio muy importante para aplicaciones de control de presión en cadena cerrada y se define como la relación de cambio de la presión de salida en función de la corriente de entrada, suponiendo un caudal nulo y los orificio bloqueados.

Figura 37. Ganancia en presión

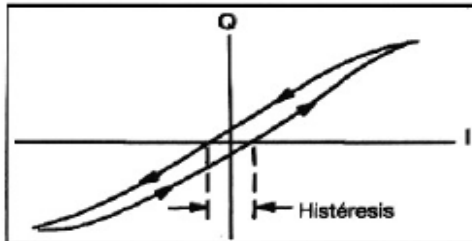


Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

3.1.6 Histéresis y umbral.

El caudal de salida de la válvula, para una señal de entrada dada difiere según si la señal va disminuyendo o aumentando debido a que como con cualquier dispositivo electromecánico existe la fricción y efectos magnéticos que no hacen ideal el sistema y originan la histéresis.

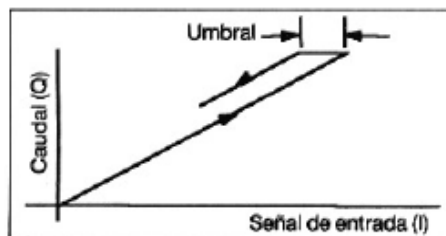
Figura 38. Histéresis



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

Una característica similar es el umbral de sensibilidad o error de inversión. Para pasar de una condición de caudal creciente a decreciente o viceversa se requiere una diferencia de corriente de entrada.

Figura 39. Umbral



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

3.2 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS

En las servoválvulas la corredera de la válvula se autoposiciona mediante un mecanismo de control de cadena cerrada que algunas veces se denomina cadena interna, En el caso de la Servoválvula la señal de retroalimentación se suministra mecánicamente por acción del movimiento de la corredera que actúa sobre el conjunto lengüeta y muelle. En efecto, la lengüeta actúa como una conexión sumadora con la señal de entrada del movimiento de la armadura del motor de mando, por lo tanto se produce el sistema control de posición en cadena cerrada de la válvula, haciendo esta consideración pueden determinarse las características dinámicas de la válvula examinando su respuesta ya sea a una entrada escalón o a una entrada que varía sinusoidalmente llamada también respuesta en frecuencia.

3.2.1 Respuesta a una entrada en escalón.

La respuesta dinámica típica de la corredera de una Servoválvula a una entrada en escalón se muestra en la figura 40. Esta respuesta es una curva característica de un sistema de segundo orden, en donde la corredera responde moviéndose rápidamente hacia la posición requerida, la sobrepasa en cierta magnitud pasando por una serie de oscilaciones amortiguadas hasta estabilizarse en la posición deseada. Todo el proceso es llevado cabo en solamente unas pocas milésimas de segundos

Figura 40. Respuesta a entrada en escalón



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

Con base a lo anterior se puede definir la respuesta a un escalón como:

- El tiempo en alcanzar el 100% de la salida requerida, despreciando el hecho de que la corredera oscilará.

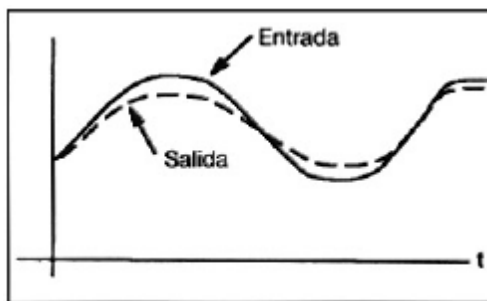
- El tiempo para pasar del 10% al 90% del movimiento requerido, esto es una medida de la velocidad máxima de la corredera despreciando algunas irregularidades.
- El tiempo en alcanzar un porcentaje del 63% de movimiento de la posición requerida, conocida como una constante de tiempo.
- El tiempo de estabilización necesario para que las oscilaciones se reduzcan a un nivel normalmente dentro del 5% del nivel requerido.

3.2.2 Respuesta en frecuencia.

Frecuentemente resulta muy útil examinar la respuesta en frecuencia a una señal de entrada que varía sinusoidalmente. A esto se le denomina respuesta en frecuencia.

Cuando la frecuencia de la señal de entrada es relativamente baja, la salida de la válvula (movimiento de la corredera o caudal) es capaz de seguir estrechamente la señal de mando sin ningún inconveniente como se puede observar en la figura 41.

Figura 41. Respuesta a frecuencias bajas

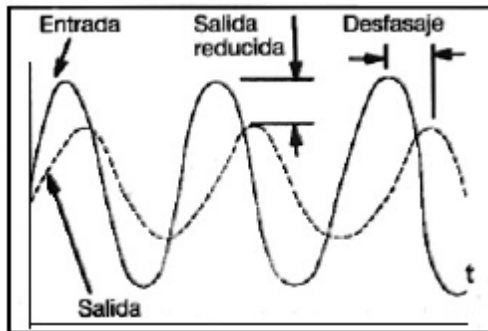


Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

Cuando la frecuencia de la señal aumenta, la salida o movimiento de la corredera es menos capaz de seguir con precisión la señal de mando de entrada. En primer lugar la salida o respuesta de la válvula empieza a presentar un retraso en el tiempo con relación a la entrada, este retraso entre las señales de entrada y de salida se denomina desfase y en segundo lugar, la salida no puede alcanzar a llegar a su máximo valor de amplitud antes de que la señal de entrada se esté invirtiendo, a este nivel reducido de la amplitud de la salida a frecuencias elevadas se le conoce como atenuación.

En la figura 42 se puede observar la respuesta o salida a una señal de entrada a alta frecuencia y el fenómeno de atenuación y desfase que se presentan.

Figura 42. Respuesta a frecuencias altas



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

Generalmente los resultados de la respuesta a la frecuencia se presentan en forma grafica y la atenuación es medida en decibeles (db):

$$db = 20 \log \frac{salida}{entrada} \quad \text{Ecuación 19}$$

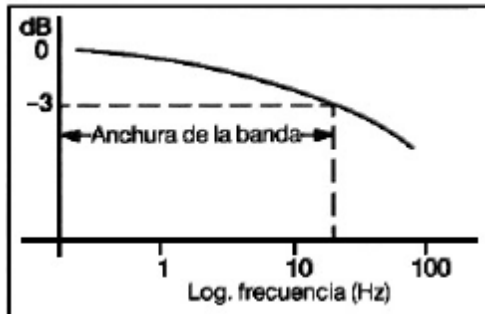
En donde la entrada será en porcentaje de la señal de entrada máxima y la salida en porcentaje de la señal de salida máximo.

Cuando la señal de entrada varia a frecuencias muy bajas, las magnitudes de entrada y salida son prácticamente iguales, por lo tanto el cociente salida/ entrada será aproximadamente 1, lo que quiere decir que la atenuación resulta ser de 0 db.

Cuando la señal de entrada varia a frecuencias altas, la salida es menos capaz de responder a la entrada como se vio anteriormente, La atenuación (db) se puede representar gráficamente en función de la frecuencia de la señal de entrada en un diagrama que es conocido como diagrama de Bode como se puede observar en la figura 43, a frecuencias bajas la atenuación se aproxima a cero y a frecuencias más elevadas aumenta la atenuación.

La anchura de banda de un componente es la frecuencia a la que su salida queda reducida por un factor del 70.7% ($1/\sqrt{2}$), lo que origina una atenuación de aproximadamente -3 db.

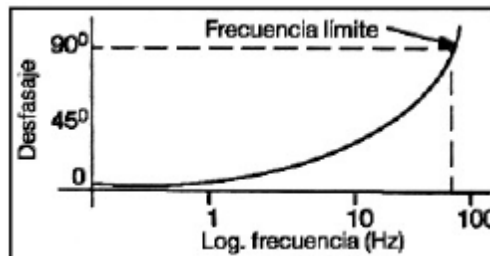
Figura 43. Diagrama de bode, Atenuación



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

También en el diagrama de bode se puede representar el desfase o retraso de la salida con relación a la entrada, que se va haciendo mayor a medida que se va aumentando la frecuencia de entrada.

Figura 44. Diagrama de bode, desfase



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

La frecuencia límite de una válvula se le conoce a la frecuencia a la que el retraso de la salida con relación a la entrada es de 90°. Es el criterio utilizado normalmente para comparar o seleccionar la válvula adecuada para una aplicación determinada.

La respuesta en frecuencia en las servoválvulas se obtiene de las curvas características propias del fabricante.

3.2.3 Rigidez hidráulica.

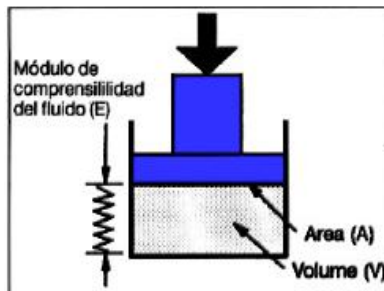
Para muchas aplicaciones el fluido es tomado como un líquido incompresible, esto no es completamente cierto puesto que se comprime cuando se presuriza de manera similar a un muelle.

Para sistemas en donde el volumen comprimido es relativamente pequeño o sistemas de poca carga en donde el movimiento es relativamente lento es despreciable la compresibilidad del fluido hidráulico. Por el contrario para el caso de sistemas de actuación rápida con cargas dinámicas elevadas la rigidez hidráulica es el factor que limita el funcionamiento total del sistema.

Cuando las cargas se mueven con aceleraciones y desaceleraciones rápidas pueden originarse presiones elevadas en el fluido hidráulico, si la rigidez es demasiado baja se creara un volumen significativo de compresión en el fluido hidráulico que originara oscilaciones en el movimiento de la carga y un tiempo de estabilización elevado, por tanto la rigidez hidráulica debe ser lo más elevada posible.

Los factores que afectan la rigidez de un actuador (figura 45.) viene dado por el área del pistón, el volumen del fluido y el modulo de compresibilidad del aceite E que es una medida de la facilidad con que el fluido puede comprimirse, entre más bajo sea su valor, mas compresible será.

Figura 45. Rigidez pistón sencillo



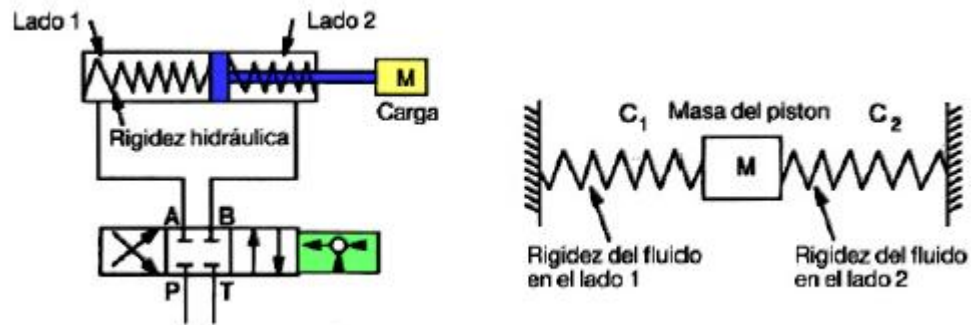
Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

La rigidez (C_H) o constante de muelle del actuador mostrado en la figura X se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$C_H = \frac{E \cdot A^2}{V} \quad \text{Ecuación 20}$$

Para el caso en el que el cilindro es controlado por una válvula proporcional o Servoválvula en donde en donde hay restricciones en ambas vías de la válvula y ambos lados del pistón se encuentran presurizados como se puede observar en la figura 46.

Figura 46. Cilindro controlado por Servoválvula



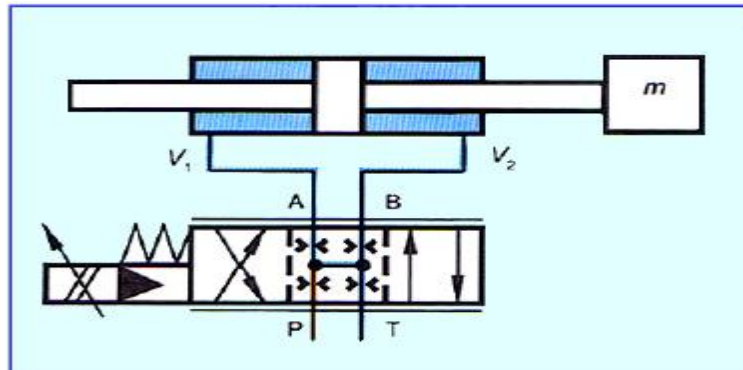
Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

Para encontrar el efecto total de dos o más muelles, la rigidez hidráulica del actuador en este caso viene dada por:

$$C_H = C_1 + C_2 \quad \text{Ecuación 21}$$

3.2.4 Frecuencia natural del sistema cilindro-masa.

Figura 47. Cilindro de vástago pasante



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

La determinación de la frecuencia natural para el caso propio de cilindros de vástago pasante se calcula por medio de la ecuación

$$\omega_l = \sqrt{\frac{2 \cdot E_o \cdot A_r^2}{V \cdot m_{red}}} \quad (s^{-1}) \quad \text{Ecuación 22}$$

$$V = V_1 = V_2 = A_r * H / 2 + V_{Lr} \quad \text{Ecuación 23}$$

En donde:

E_o = modulo de elasticidad del aceite $1.4 \cdot 10^7$, A_r = Área anular del cilindro, H = Carrera, V = Volumen total del aceite, $m_{red} = m / i^2$ = masa reducida al eje del cilindro, i = relación de transmisión, V_{Lr} = Volumen d aceite en las tuberías del lado vástago.

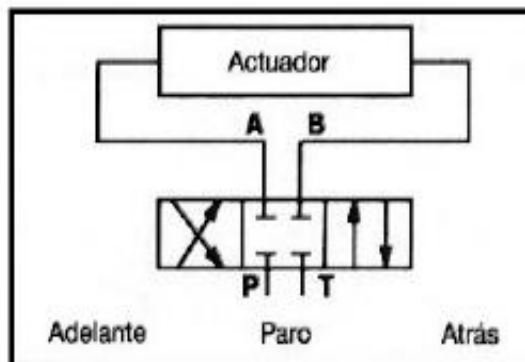
3.3 SERVOMECANISMO CONTROL DE LA POSICION

Estos sistemas se utilizan típicamente para sistemas en donde la variable a controlar es la posición.

Como ya su nombre lo dice, la finalidad de de un sistema de control de posición es mover una carga hasta cierta posición o serie de posiciones deseadas por medio de un actuador hidráulico en donde el movimiento puede ser lineal efectuado por un cilindro o el giratorio efectuado por un motor, o en dado caso se pueden utilizar accionamientos mecánicos, tales como husillos de avance o de bola cuando se requieren niveles de precisión elevados.

El control del actuador se lleva a cabo por medio de una válvula hidráulica de corredera deslizante, básicamente de tres posiciones, que lo hace avanzar, retroceder y parar, como se puede observar en la figura 48.

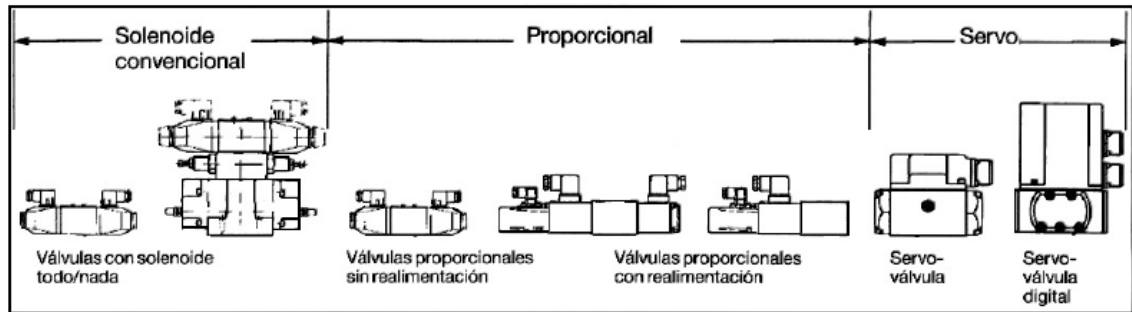
Figura 48. Válvula de corredera deslizante



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

La gama de válvulas a seleccionar para un control de posición empieza desde las válvulas todo o nada que permiten un control on-off de posición, hasta las servoválvulas que permiten un control continuo de posición en cadena cerrada.

Figura 49. Tipos de válvulas

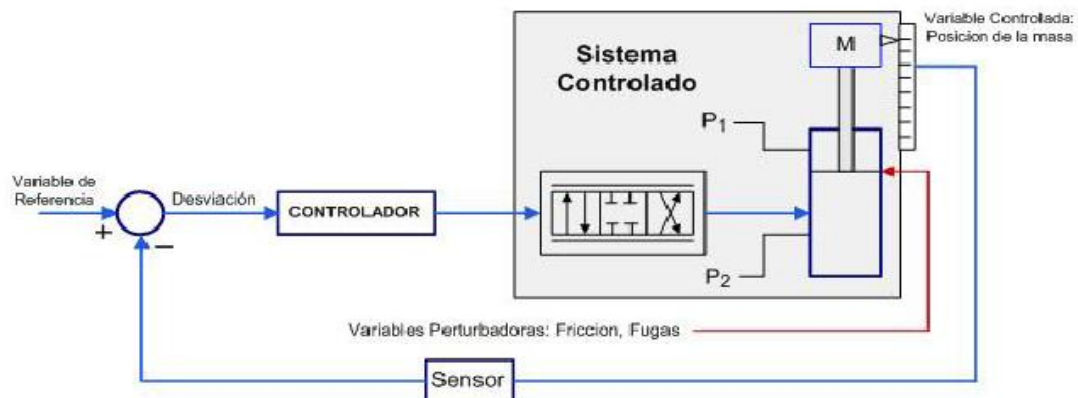


Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

3.3.1 Sistema de control de posición en cadena cerrada.

Un sistema de control de posición en lazo cerrado típico presenta una señal de entrada de referencia o set point. El sensor se encarga de medir la variable física a controlar (Posición) y suministra una señal de retroalimentación o feedback que será comparada de manera continua con la señal de referencia. Al resultado de esta comparación en el punto de suma se le conoce como error o desviación, esta señal de error será manejada por el controlador en el cual enviara una señal de control al actuador o válvula, permitiendo mover la corredera principal y dejando pasar caudal en donde por último se genera el movimiento del cilindro y desplazamiento de la masa cerrando así el ciclo cerrado de control.

Figura 50. Sistema de control de posición



Fuente. Autores

Una de las características más importantes del sistema de control de lazo cerrado es que no se ve afectado por las perturbaciones externas, debido a la retroalimentación de la salida, el sistema se encarga de corregir estos errores constantemente.

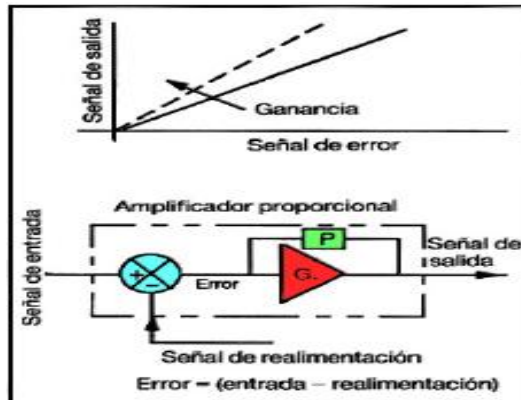
En un sistema de control de la posición, el tiempo durante el cual el actuador se mueve puede ser relativamente pequeño, debido a que el actuador es mandado para moverse hasta una cierta posición y después pararse, por lo tanto para un porcentaje elevado de tiempo la válvula de control estará cerrada, manteniendo el actuador en posición.

Las características de la válvula alrededor de la región nula son críticas para determinar el funcionamiento del sistema en términos de precisión estática y su capacidad para mantener una posición contra una carga reactiva. Un recubrimiento de la corredera o zona muerta grandes no dan los mejores resultados en términos de precisión del sistema.

El control de la posición del cilindro se hace posible al controlar la posición de la corredera principal dentro del cuerpo de la válvula, haciendo variar la corriente, lo que suministra un control eléctrico del caudal que atraviesa la válvula. Las válvulas proporcionales ya sea con o sin retroalimentación no son idealmente adecuadas para las aplicaciones de control de posición en cadena cerrada, excepto en el caso que se trate de sistemas relativamente sencillos en donde las velocidades son relativamente bajas y la precisión no sea un factor crítico en el sistema. Por otro lado se encuentran las válvulas proporcionales de prestaciones elevadas que presentan una gran mejora en el tiempo de respuesta además de una buena precisión, haciéndola adecuada para la mayoría de aplicaciones que antes requerían de servoválvulas las cuales han sido la selección automática para todos los sistemas de control de la posición en cadena cerrada con rápidos tiempos de respuesta menores a 10 ms para una entrada escalón, buena linealidad entre la señal de entrada y caudal, histéresis baja y alta precisión.

3.3.1.1 Control proporcional más diferencial (PD). El amplificador que se utiliza normalmente en los sistemas de control de posición se denomina amplificador proporcional, en donde la salida es directamente proporcional a la entrada como se puede observar en la figura 51.

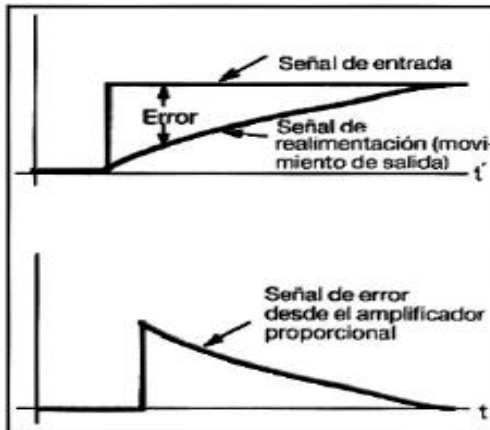
Figura 51. Amplificador proporcional



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

La respuesta de un sistema de control de posición a una señal de entrada en escalón puede originar el resultado mostrado en la figura 52. Un poco después de la aplicación de la señal de entrada, la señal de error es grande, produciendo una señal de salida grande del amplificador. A medida que el actuador se mueve hacia la posición deseada, la señal de error y la salida del amplificador se reducen hasta el instante en que la posición real alcanza la posición deseada en donde la señal de error y la salida del amplificador se hacen nula.

Figura 52. Respuesta a una entrada escalón

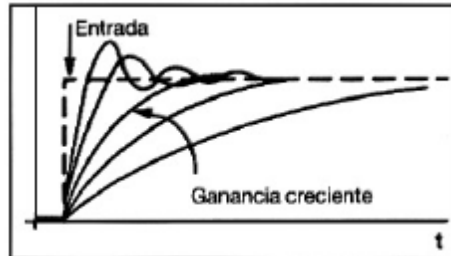


Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

La respuesta de un sistema de control de posición en cadena cerrada a una entrada en escalón y el efecto de aumentar la ganancia del sistema, como puede verse en la figura 53. un aumento de la tiene por efecto un aumento en la

velocidad de respuesta, pero más allá de cierto punto empiezan a presentarse sobreimpulsos que se hacen mayores al seguir aumentando la ganancia y el tiempo de respuesta de estabilización se hace más largo.

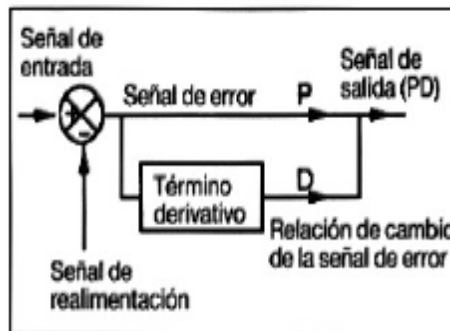
Figura 53. Efecto de la ganancia proporcional



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

Si ahora se considera el efecto de añadir un término diferencial al amplificador de control. Este término es proporcional a la relación de cambio de la señal de error, cuando esta cambia rápidamente el término diferencial es grande y cuando cambia lentamente el término es pequeño. Análogamente cuando la señal de error es constante el término diferencial se hace nulo.

Figura 54. Amplificador proporcional más derivativo



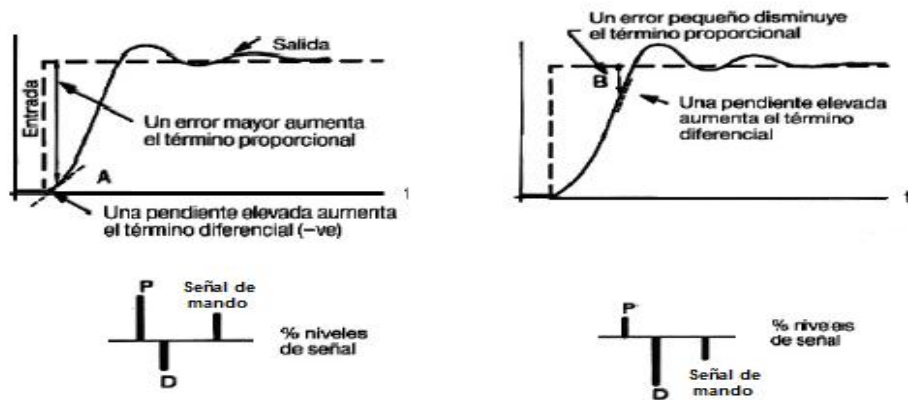
Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

Una curva de respuesta típica como la mostrada en la figura 55. Se puede observar en el punto A, el error es grande lo que origina un término proporcional también grande y la relación de cambio de error en este punto es grande puesto que la salida se mueve rápidamente hacia la posición de entrada deseada, de forma que el término diferencial es también grande. En términos relativos el término proporcional es mayor que el término diferencial y la señal de mando total

será el termino proporcional menos el diferencial, en la práctica esta señal de mando total continua siendo lo suficientemente grande para saturar la señal de accionamiento de la válvula, de forma que el termino diferencial no afecta la respuesta del sistema en este punto.

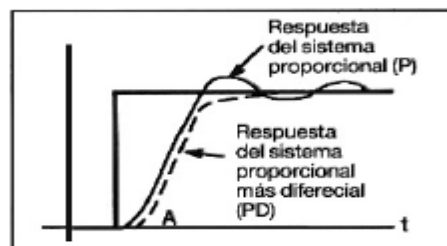
En el punto B, la salida se acerca a la posición deseada, entonces el error es menor y por lo tanto el termino proporcional más pequeño. La relación de cambio del error es todavía grande puesto que la velocidad también lo es y el termino diferencial empieza a reducir la señal de mando total, lo que origina que la corredera de la Servoválvula retroceda hacia la posición nula, desacelerando así el actuador más pronto de lo que ocurriría con un término proporcional sencillo, lo que permite utilizar una ganancia proporcional relativamente más elevada, evitando de esta manera los sobreimpulsos grandes y los tiempos de estabilización elevados, además de la ventaja de reducir los errores estacionarios del sistema.

Figura 55. Respuesta y efecto en un sistema PD



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

Figura 56. Respuesta P y PD



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

Puesto que el término diferencial es proporcional a la relación de cambio del error, no es útil en sistemas de bajo amortiguamiento con coeficiente de amortiguación menores a 0.3 y elevadas oscilaciones de salida.

3.4 SERVOMECANISMO CONTROL DE LA FUERZA.

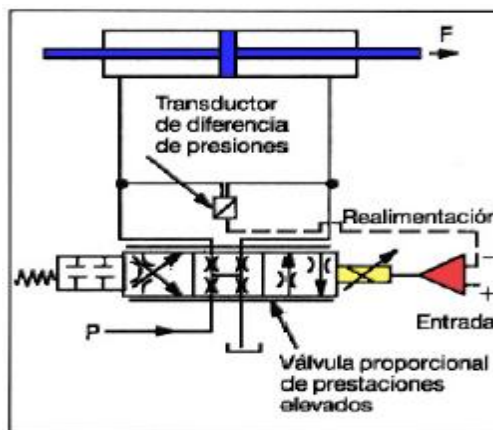
El control de la fuerza o del par de la salida de un actuador se consigue básicamente por medio del control de la presión en este.

En el control más sencillo de presión en un sistema es el de cadena abierta el cual se puede ejercer control de la presión por medio de una válvula de seguridad o una válvula reductora de presión, sin embargo la precisión de estos sistemas está limitada por la capacidad de las válvulas para mantener una presión constante bajo condiciones variables como variaciones de caudal en la válvula, cambios en la viscosidad del fluido o cargas reactivas del actuador.

3.4.1 Sistema de control de la fuerza en cadena cerrada.

Con el objetivo de conseguir niveles más elevados de precisión, pueden utilizarse un transductor de presión para obtener una señal de realimentación en un sistema de cadena cerrada. Las servoválvulas o válvulas proporcionales de prestaciones elevadas con centro crítico o abierto, pueden ser utilizadas para el control de la presión del actuador. En la figura 57 se puede observar una disposición típica para un sistema de control de la fuerza en cadena cerrada.

Figura 57. Sistema de control de fuerza.



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

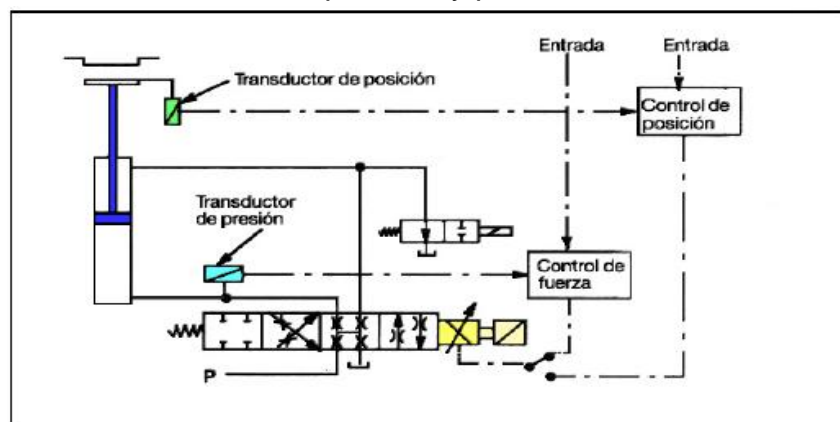
En este sistema de cadena cerrada está compuesto básicamente por un transductor de presión diferencial que se encarga de sensar las presiones a cada lado del cilindro de vástago pasante y compararlas determinando así una señal de realimentación. Para crear la señal de realimentación la salida del sistema puede detectarse directamente por medio de un transductor de fuerza o indirectamente detectando la presión, en muchas ocasiones puede ser más conveniente detectar una presión que una fuerza, si se mide la presión, debe tenerse en cuenta el efecto de la contrapresión en el orificio de salida del actuador, debido a que esta presión tiende a restarse de la fuerza de salida.

Un transductor diferencial de presiones compensa automáticamente la contrapresión, si se tiene un actuador de áreas iguales (cilindro de vástago pasante o motor). Para un cilindro diferencial hacen falta dos transductores de presión, en donde uno de ellos estará tarado adecuadamente teniendo en cuenta la diferencia de áreas.

La señal de realimentación se compara con la señal de entrada de comando obteniendo una señal de control dirigida a la Servoválvula para finalmente ejercer control de la fuerza en el actuador cerrando el ciclo.

Una de la grandes ventajas al utilizar válvulas proporcionales o servoválvulas es la opción de que puede controlarse al mismo tiempo la posición y la fuerza del actuador como se puede ver en la figura 58, un ejemplo típico de este sistema, en donde en primer lugar el actuador se dirige a buscar la posición deseada por medio del sistema de control de posición y luego se cambia al control de fuerza.

Figura 58. Sistema de control de posición y presión

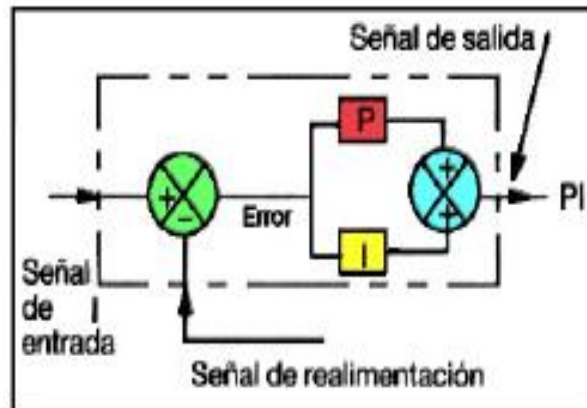


Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

3.4.1.1 Control proporcional más integral (PI). Las fugas en la válvula de control o en el actuador tienden a generar un error constante en el sistema y esta válvula debe accionarse parcialmente para compensar estas fugas, para poder accionarla, debe existir una señal error, lo mismo que si el actuador se mueve mientras se está controlando la presión, la corredera de la válvula debe desplazarse cierta magnitud para originar un caudal, lo que a su vez requiere una señal de error. Esto se puede corregir en parte aumentando la ganancia, pero no elimina este error completamente.

Al utilizar en el control de la fuerza un amplificador proporcional combinado con un amplificador tipo integrador que permite que la señal de la salida aumente hasta un valor constante y que se mantenga cuando el error se reduce a cero. El amplificador se denomina tipo PI en donde la parte proporcional suministra la respuesta rápida y la parte integral elimina el error constante.

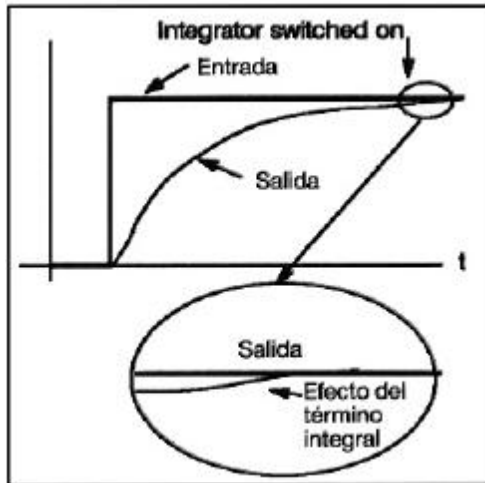
Figura 59. Amplificador proporcional más integral



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

Utilizando un amplificador PI cualquier error estacionario en el sistema creará ahora una señal de accionamiento gradualmente creciente a la Servoválvula. La corredera de este se moverá lo suficiente para accionar el actuador y corregir el error. Cuando el error se reduce a cero la salida del integrador se nivela y se mantiene.

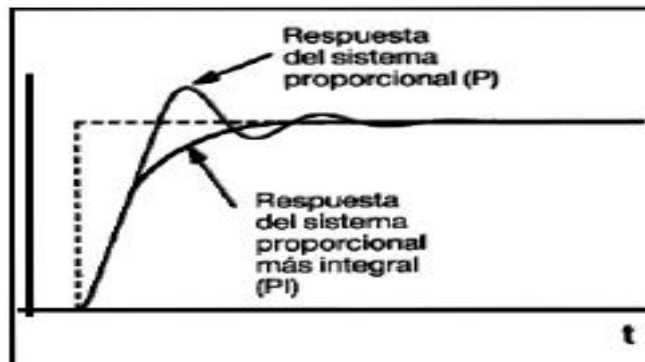
Figura 60. Efecto del término integrador



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

Cuando el sistema responde a un cambio en la entrada repentino, como en el caso de una entrada en escalón la señal de error es grande y origina un aumento rápido en el término integral lo que crea un sobreimpulso grande, seguido por una serie de subimpulsos y sobreimpulsos antes de estabilizarse la salida, en algunos casos el sistema tiende a divergir lo que lo convierte en un sistema inestable. Bajo condiciones dinámicas el término integral tiende a aumentar el nivel de sobreimpulsos y alargar el tiempo de respuesta, esto se puede solucionar reduciendo la ganancia del término integral o desconectándolo cuando no sea necesario.

Figura 61. Comparación de respuesta proporcional e integral



Fuente. Vickers, Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada

4. DESCRIPCION DEL MODULO DE POTENCIA DE LA INSTRON

En este capítulo se refiere a la identificación y descripción de sistemas y subsistemas de potencia de la maquina Instron.

La máquina de ensayos universal Instron 1323, es una maquina hidráulica diseñada para una capacidad máxima de trabajo alrededor de 80 ton a 4000 Psi. Se le conoce a la Instron como maquina universal de ensayos, debido la capacidad de realizar pruebas de ensayos de tracción, compresión y fatiga a baja frecuencia (2 Hz).

La presión máxima de trabajo se encuentra limitada por el diseño de las mordazas hidráulicas, de modo que la válvula de seguridad se encuentra tarada para una presión máxima de trabajo de 2000 Psi, alcanzando una capacidad de carga de 36 ton.

Figura 62. Máquina de ensayos universal INSTRON 1323.



Fuente. Autores

4.1 MODULO DE POTENCIA HIDRAULICA

Este modulo utiliza un servosistema electrohidráulico, fue diseñado para un alto grado de funcionamiento y cuenta con los equipos e instrumentación necesaria para su funcionamiento, ofreciendo versatilidad, exactitud, funcionalidad y fácil operación.

Figura 63. Modulo de potencia



Fuente. Autores

En la figura 63 se puede observar el modulo de potencia el cual está compuesto básicamente por los siguientes elementos:

4.1.1 Bomba-motor.

Bomba hidráulica de desplazamiento positivo con alimentación por gravedad, con capacidad de 10 (gpm) a 3000 (Psi) Accionada por un motor eléctrico trifásico de 20 (HP).

Figura 64. Bomba – motor



Fuente. Autores

4.1.2 Manifold de control.

En esta unidad se encuentra ubicada internamente una válvula de seguridad y un filtro, externamente cuenta con puertos para conexión de dos presostatos y los puertos de presión y retorno a tanque con diferentes tamaños de conexiones con el fin de evitar una conexión errónea.

Figura 65. Manifold de control

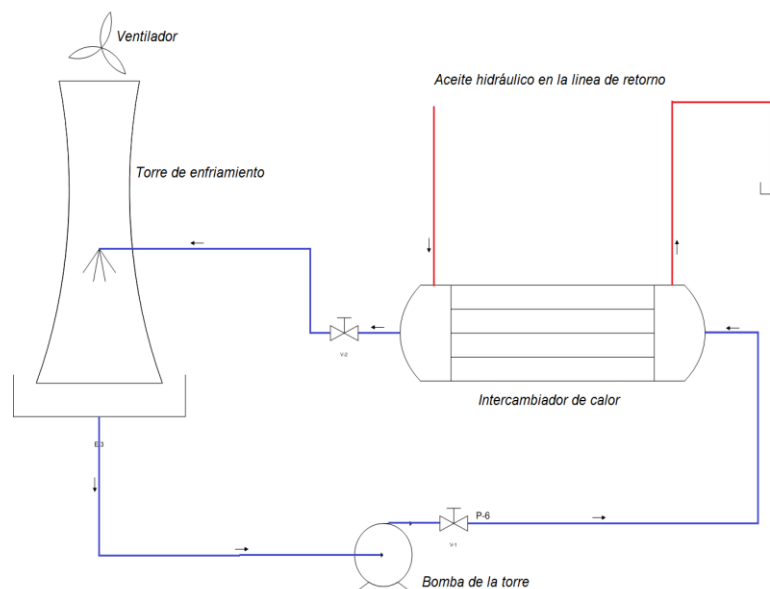


Fuente. Autores

4.1.3 Sistema de enfriamiento.

El sistema de enfriamiento del aceite consta de un intercambiador de calor conectado en la línea de retorno del aceite hidráulico, el cual retira el calor de este, por medio de agua de enfriamiento y la dirige a una torre de enfriamiento que cuenta con un ventilador y una bomba que se encarga de impulsar el fluido por el circuito de refrigeración.

Figura 66. Sistema de enfriamiento



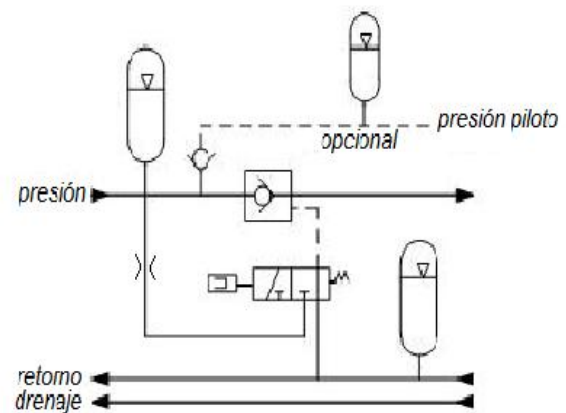
Fuente. Autores

4.1.4 Manifold de control de fluido.

Este manifold tiene la función de controlar el paso de flujo de desde el modulo de potencia al cilindro actuador, por medio de la válvula direccional 3/2 que al accionarla permite el paso para activar el piloto del cheque. Además el manifold cuenta con dos acumuladores para amortiguar las pulsaciones y una reguladora de caudal.

Presenta tres puertos físicos que son el puerto de presión, retorno y drenaje. Además, un cuarto puerto de salida de presión piloto.

Figura 67. Manifold de control de flujo.



Fuente. Autores

4.1.5 Cilindro Actuador.

La maquina cuenta con un cilindro actuador lineal de doble acción y vástago pasante, apoyado en el marco de carga. Este alcanza una carrera o desplazamiento de 150 mm y tiene un área efectiva de 40.5 in². El cilindro hidráulico alcanza a aplicar una fuerza efectiva de 36 toneladas para una presión de operación de 2000 Psi.

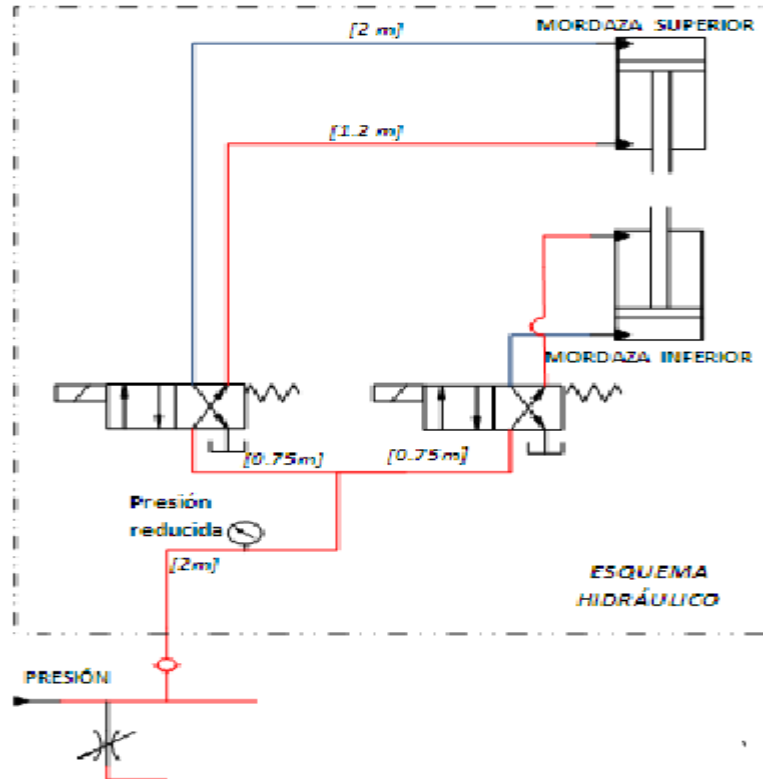
El cilindro cuenta con un transductor posición para medir su desplazamiento y dos transductores de presión con sus respectivos manómetros para medir su presión a cada lado.

4.1.6 Mordazas Hidráulicas.

El respectivo agarre de la probeta se realiza por medio de las mordazas superior e inferior, en las que se produce el cierre hidráulico al accionar su respectiva válvula

direccional 4/2, permitiendo pasar el flujo desde el puerto de presión piloto ubicado en el manifold de control, hacia la mordaza, para producir el agarre. El sistema de mordazas está diseñado para soportar pruebas para materiales con probetas estándar de 12.5 mm de sección y resistencias máximas a la tracción de 110 Kg/mm².

Figura 68. Esquema hidráulico de las mordazas de agarre

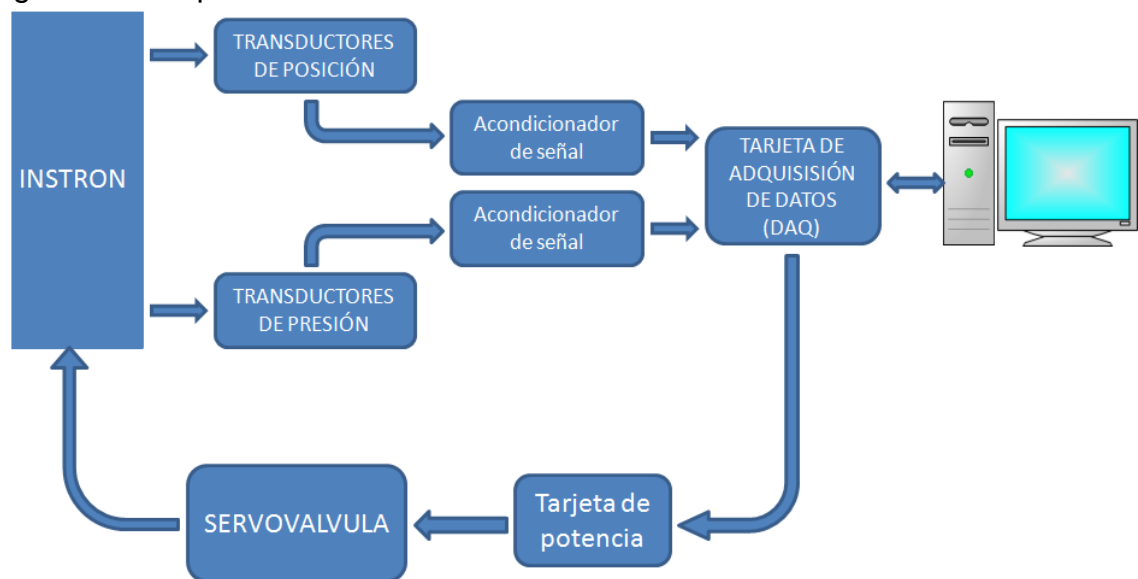


Fuente. Tesis rediseño y construcción del sistema de mordazas hidráulicas para la máquina de pruebas universal Instron.

5. HARDWARE UTILIZADO EN LA AUTOMATIZACION

El esquema de funcionamiento del sistema de control basado en tarjeta de adquisición de datos se puede observar en la figura 69. De la planta, en este caso la maquina Instron. Se disponen a medir las variables físicas de presión a ambos lados del cilindro actuador y posición del mismo. Estas señales debidamente acondicionadas llegan a la tarjeta de adquisición de datos DAQ, en donde pasa al computador en donde se realiza la función del controlador y procesamiento en el sistema de control, enviando una señal de corrección, de salida por medio de la DAQ, que es dirigida a Servoválvula pasando antes por la tarjeta de potencia.

Figura 69. Esquema de funcionamiento del sistema de control



Fuente. Autores

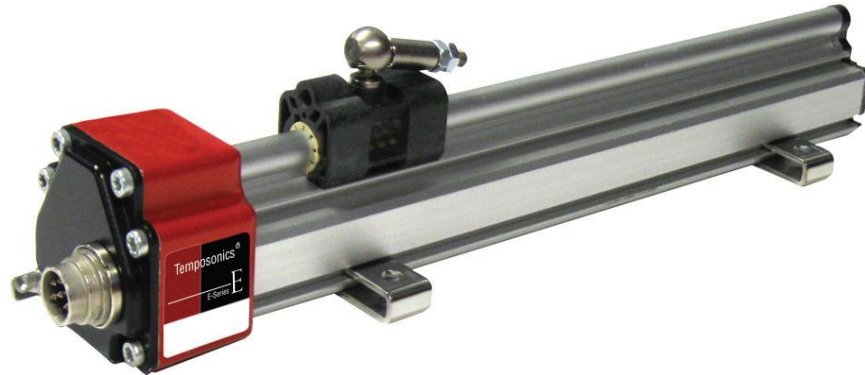
5.1 TRANSDUCTOR DE POSICIÓN LINEAL.

El funcionamiento del transductor de posición, en el servomecanismo de posición de la maquina universal de ensayos Instron, es básicamente sensar el desplazamiento del cilindro-actuador, con el fin de llevar a cabo la realimentación o feedback en el sistema de control de posición en la maquina.

La máquina de ensayos Instron cuenta con un transductor de posición lineal de tipo magneto-restrictivo. Corresponde a un sensor de posición lineal, MTS

Temposonics, de la serie E - modelo EP, Figura 70. (cuya ficha técnica se encuentra en los anexos), el cual presenta las siguientes características:

Figura 70. Sensor de posición lineal MTS, modelo EP.



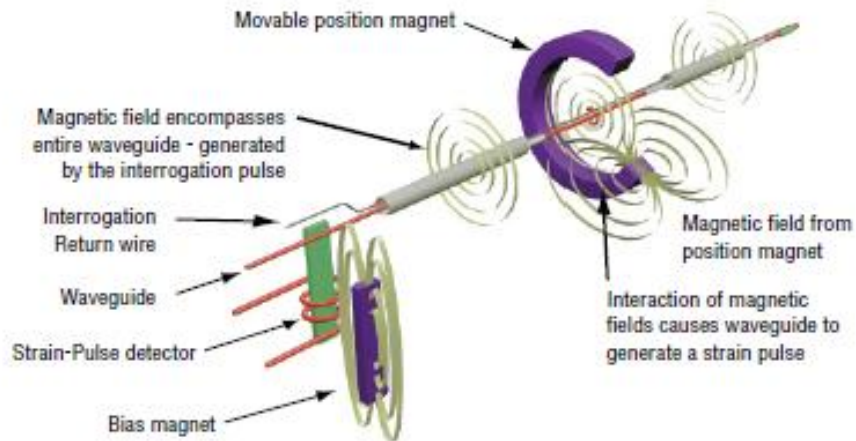
Fuente. MTS, E-series model EP. Data sheet

- Salida análoga, voltaje: de 0 a +10 Vdc, en avance y retroceso.
- Variable de salida medida: posición lineal, con un rango de medida de 150 mm.
- Alimentación: +24 vdc nominal.
- Maneja una no-linealidad por debajo del 0.02%.
- Repetibilidad dentro de 0.001%.
- Detección sin contacto, que elimina el desgaste y garantiza mayor durabilidad y capacidad de repetición.

5.1.1 Principio de funcionamiento del sensor lineal magneto-restrictivo.

En el elemento de detección, un pulso de tensión sónico es inducido en una guía de onda (waveguide) magneto-restrictivo diseñada especialmente para la interacción momentánea de dos campos magnéticos. Un campo proviene de un imán móvil permanente que pasa por el exterior del sensor, el otro campo proviene de un pulso de corriente “interrogación” aplicado a lo largo de la guía. El pulso de tensión resultante viaja a la velocidad del sonido a lo largo de la guía de onda y es detectado por la cabeza del elemento de detección.

Figura 71. Principio magneto-restrictivo del sensor de posición.



Fuente. MTS, E-series model EP. Data sheet

La posición del imán es determinada con gran precisión y velocidad, midiendo el tiempo transcurrido entre la aplicación del pulso de interrogación y la llegada del pulso de tensión, con un contador de alta velocidad. La medición del tiempo transcurrido es proporcional a la posición del imán y es un valor absoluto, por lo tanto, la señal de salida del sensor corresponde a la posición absoluta.

5.1.2 Acondicionador de señal del transductor de posición.

El acondicionador de señal del transductor de posición, permite energizar el transductor de posición temposonic y obtener señal del mismo. Este dispositivo se encarga de tomar esta señal, procesarla y amplificarla a un rango de voltaje de 0 a +10 voltios, para enviarla a la tarjeta de adquisición de datos o autómatas programables, según sea el caso. Además, dispone de un display, en el cual se puede observar los valores de la variable de medición (desplazamiento).

Figura 72. Acondicionador de señal del transductor de posición



Fuente. Autores.

Se cuenta con un acondicionador de señal modelo Pax – 1/8 DIN, de la casa fabricante RED LION (cuya ficha técnica se encuentra en los anexos al documento).

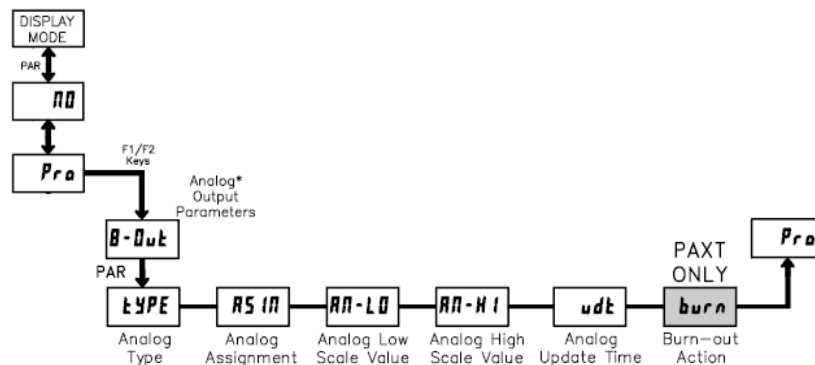
Especificaciones generales:

- Conversión A/D: 16 bits de resolución.
- Rata de conversión A/D: 20 lecturas/ segundo.
- Alimentación: 85 ~ 250 VAC, 50/60 Hz.
- Display: 5 dígitos, 0.56", luz roja.
- Modo de programación y ajuste.

5.1.2.1 Ajuste de parámetros de salida en el acondicionador de señal. El acondicionador de señal permite un modo de programación por medio del menú que dispone. En este modo de programación se pueden cambiar los parámetros de la salida análoga, permitiendo que la señal de salida de 0 a +10 v, se pueda configurar para que sea entregada solo para un rango de posiciones deseado. Además del ajuste del punto inicial de medida o cero deseado en el sistema de medición.

Al menú de modo de programación se puede acceder presionando la tecla pro, que se encuentra en el display. La cual abre la lista de de parámetros para ser vistos o modificados. Se selecciona por medio de F1 y F2, el modulo 8 en donde se encuentra el menú de parámetros de salida análoga, por último se seleccionan los valores máximo y mínimo del rango deseado. En la figura 73 se puede observar un diagrama de flujo para llevar a cabo la tarea de ajuste de los parámetros de salida análoga.

Figura 73. Diagrama de flujo modo programación de parámetros de salida.



Fuente. Autores

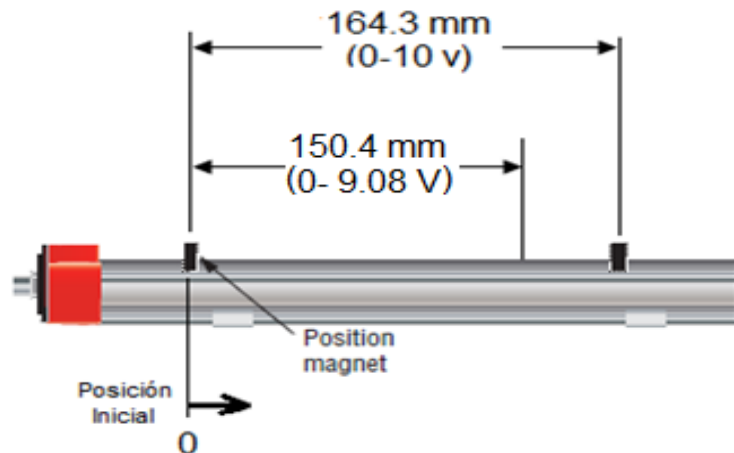
El acondicionador de señal del sensor de posición tiene una salida de voltaje de 0 a +10 voltios, los cuales se puede configurar para un rango de posiciones requerido, que dependen del rango de trabajo del cilindro y la precisión deseada en el sistema.

El valor máximo de desplazamiento del LVDT es de 16.46 cm, por lo tanto el rango de posiciones en el acondicionador de señal ha sido ajustado de tal manera que a una posición inicial de cero (cuando el cilindro este completamente contraído), indique una salida de voltaje de 0 voltios en el acondicionador de señal. Y para una posición final de 16.46 cm, indique la salida de voltaje máxima en el acondicionador de señal de +10 voltios. Es decir, que la resolución de entrega del acondicionador de señal será de 0.06 voltios por cada milímetro de desplazamiento.

$$Resolucion = \frac{10 v}{164.6 mm} = 0.06 v/mm \quad \text{Ecuación 24}$$

De este modo el rango de trabajo quedara configurado de tal manera que en la posición inicial del cilindro (cilindro contraído), el LVDT indique la posición mínima de cero y salida de voltaje del acondicionador en cero. Y en la posición final máxima a la que puede llegar el cilindro en la parte superior (cilindro completamente extendido) de 15.04 mm, con una salida de voltaje de 9.08 Voltios

Figura 74. Ajuste de parámetros de salida.



Fuente. Autores

Tabla 4. Valores máximo y mínimo del cilindro

	Posición (mm)	Voltaje de salida (v)
Cilindro contraído	0	0
Cilindro extendido	150.4	9.08
Posición máx. del LVDT	164.3	10

Fuente. Autores

5.1.3 Calibración del transductor de posición.

Con el objetivo se comprobar la linealidad del transductor de posición LVDT. Se tomaron un grupo de datos de voltaje de salida del acondicionador de señal para distintas posiciones del actuador desde cero a la máxima.

Tabla 5. Datos de posición y voltaje del LVDT

Posición	Voltaje
0	0
1,2	0,71
2,63	1,57
3,53	2,12
5,04	3,03
6,21	3,74
7,62	4,59
8,22	4,96
8,8	5,31
9,62	5,8
10,94	6,61
11,69	7,06
12,3	7,42
12,96	7,82
14,23	8,59
15,97	9,63
16,43	9,93

Fuente. Autores

En la figura 75. Se puede observar la grafica de posición vs voltaje, para los datos correspondientes a la tabla anterior, en donde se presentan por medio de la línea azul (LVDT), los datos de posición en el eje X, y los valores de voltaje respectivos en el eje Y.

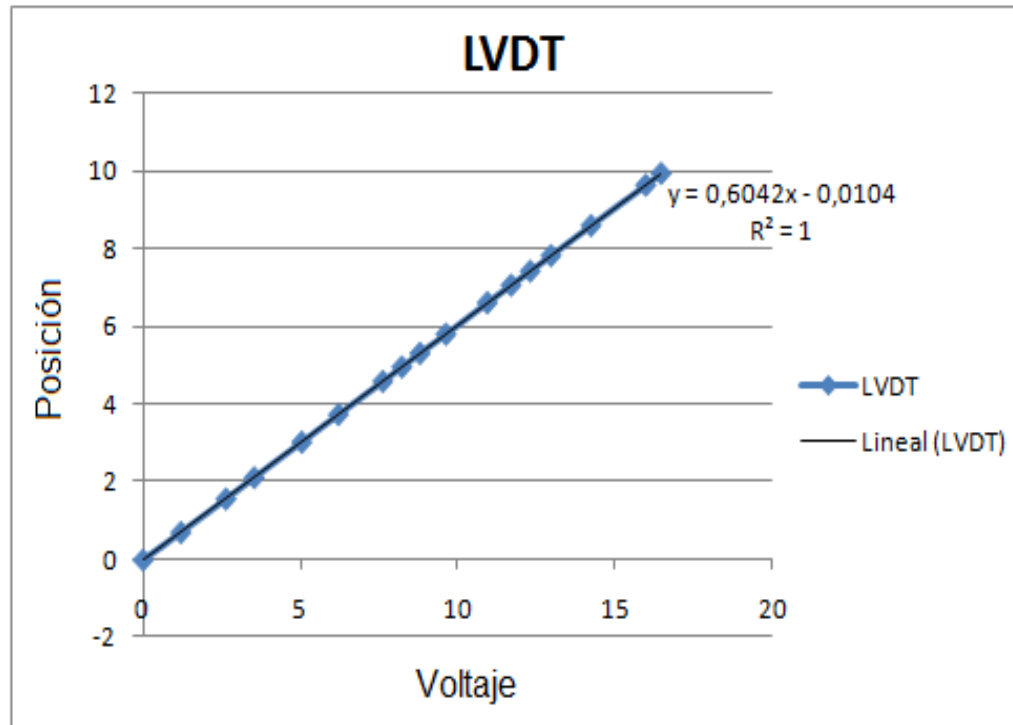
Como se puede comprobar en la grafica de la figura 75, la linealidad de la función. La línea negra (lineal LVDT), muestra la línea de tendencia o regresión lineal respecto a la serie de puntos de la función, dando como resultado la ecuación lineal de voltaje en función de la posición $V = f(P)$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 1$, que indica la confiabilidad de que tanto la línea de tendencia se ajunta a los valores correspondientes, donde un coeficiente de determinación

$R^2 = 1$, indica una correspondencia perfecta entre la línea de relación y los datos insertados.

$$P = 0.6042 * V - 0.0104$$
$$R^2 = 1$$

Ecuación 25

Figura 75. Posición vs Voltaje



Fuente. Autores

5.2 TRANSDUCTORES DE PRESION

El objetivo de un transductor de presión es llevar a cabo la medición de la variable física (presión) en el sistema y transformarla a una señal eléctrica directamente proporcional a la presión, que será utilizada en el servomecanismo de control de presión para realizar la realimentación del sistema.

Debido a que la maquina Instron cuenta con un cilindro-actuador de vástago pasante y controlado por una servo válvula que genera restricción de caudal y por ende se presurizan los dos lados del cilindro actuador, se hace necesario utilizar dos transductores de presión. Donde cada transductor sensa la presión a lado y

lado del cilindro y las dos señales se restan determinando la diferencia de presiones en el actuador.

La maquina Instron, para el servomecanismo de presión cuenta con dos transductores de presión piezo-resistivos SIEMENS SISTRANS P serie Z, tipo 7MF1563 cuya ficha técnica se añade en los anexos y las características principales son las siguientes:

Figura 76. Transductores de presión SIEMENS



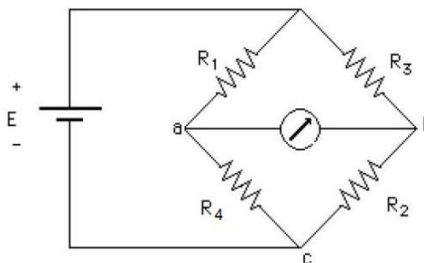
Fuente. Autores

- Señal de salida: 4 ~ 20 mA (dc)
- Tensión de alimentación: 8..35 Vdc
- Error global (linealidad, histéresis y repetibilidad): menor a 0.4%.
- Tiempo de respuesta: menor de 0.1 ms.

5.2.1 Principio de funcionamiento del transductor piezo- resistivo

El principio de funcionamiento de este transductor de presión es el piezo- resistivo. La aplicación de esta tecnología en los transductores de presión está relacionada con la deformación del diafragma en el cual están grabadas cuatro resistencias eléctricas, las cuales forman lo que se conoce como puente de Wheatstone.

Figura 77. Circuito de un puente de Wheatstone



Fuente. Autores

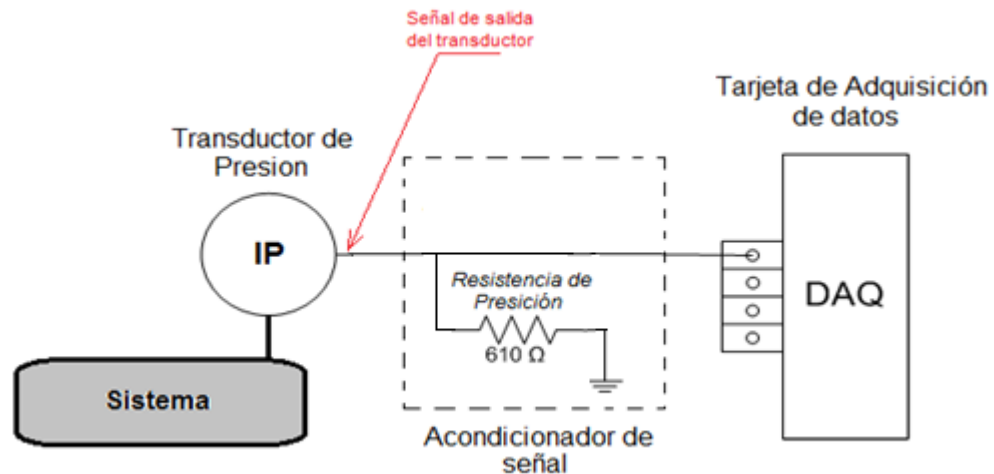
Por consiguiente cualquier deformación que tenga lugar en el diafragma por efecto de una presión en el diafragma, desequilibrará el circuito electrónico de alta precisión y se conformará una señal normalizada en el rango de 4 a 20 mAdc, que es proporcional a la presión que soporta la célula cerámica.

5.2.2 Acondicionamiento de la señal de salida del transductor de presión.

En la señal de salida del transductor de presión será entregada una corriente de 4 a 20 mAdc. Debido a que en las entradas análogas de la tarjeta de adquisición de datos DAQ, solo acepta rangos de voltaje se hace necesario acondicionar la señal de salida del transductor para entregarla a la tarjeta y así mismo, aislarla de cualquier corriente proveniente de la señal que pueda perjudicar el funcionamiento óptimo de esta.

Como puede ser observado en la figura 78. El circuito de aislamiento realizado se lleva a cabo por medio de una resistencia de precisión de 610Ω y una conexión a tierra para cada transductor. La señal de salida del transductor es conectada en paralelo a la resistencia y a tierra, lo que hace que la corriente se dirija a tierra por la resistencia, de esta manera la señal obtenida será la diferencia de voltaje al pasar por la resistencia. Además, protegiendo la tarjeta de adquisición de datos de cualquier entrada en corriente.

Figura 78. Circuito acondicionador de señal del transductor

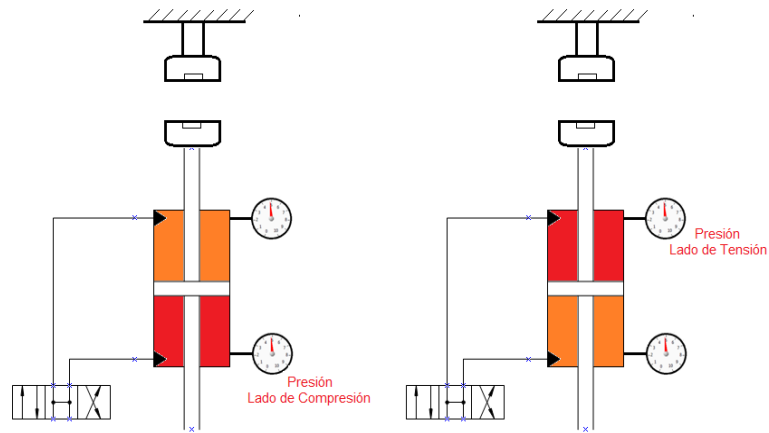


Fuente. Autores

5.2.3 Calibración de los manómetros.

Cada transductor de presión en la máquina de ensayos Instron cuenta con su respectivo manómetro, que indica directamente la presión a cada lado del cilindro actuador.

Figura 79. Manómetro



Fuente. Autores

Una manera de corroborar la calibración de los manómetros, es observar en el momento en que el cilindro se encuentra en una posición intermedia, sin movimiento. Los manómetros deben marcar la misma presión a cada lado del cilindro, si las presiones a ambos lados del cilindro son iguales y actúa a cada lado del pistón sobre áreas iguales, el cilindro debe permanecer quieto.

En la figura 80 podemos observar los manómetros indicando la misma presión, cuando el cilindro se encuentra quieto. De esta manera comprobamos que los manómetros si están indicando la presión requerida y se encuentran perfectamente calibrados.

Figura 80. Manómetros con cilindro sin movimiento.



Fuente. Autores

5.2.4 Calibración de los transductores de presión.

La salida de voltaje en los transductores es directamente proporcional a la presión ejercida por el fluido hidráulico en el sistema, siendo esta relación voltaje/ presión lineal para el rango de medida de trabajo.

Para determinar la proporcionalidad de los transductores se tomaron para cada uno los valores de menor y máxima presión a la que están sometidos.

Tabla 6. Datos de presión y voltaje del transductor de presión

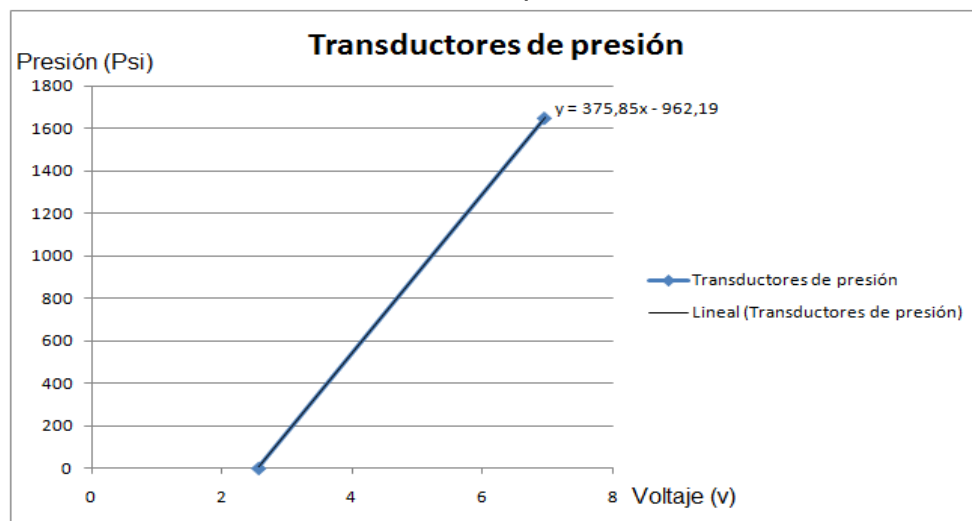
		Punto máximo		Punto mínimo	
		P (Psi)	V (voltios)	P (Psi)	V (voltios)
Transductor (Lado compresión)		1650	6,95	0	2,56
Transductor (Lado tensión)		1650	6,9	0	2,53

Fuente. Autores

Al graficar los datos se puede observar en la figura 81 que la línea de proporcionalidad de la presión y voltaje para los transductores de presión, con esto se puede determinar relación de la presión con respecto al voltaje que se muestra en la siguiente ecuación:

$$P(\text{psi}) = 375.85 * V - 962.19 \quad \text{Ecuación 26}$$

Figura 81. Grafica de los transductores de presión



Fuente. Autores

5.3 SERVOVÁLVULA

El elemento que cumple con la función de elemento final de control es la Servoválvula MOOG MODELO 73-103 SERIE 2974. Esta es la encargada de regular el flujo de aceite al actuador, en proporción a la señal de comando que viene del controlador en el sistema de control. Tiene la capacidad de permanecer en cierre total (no permite paso de flujo) o de llevar flujo de aceite dentro y fuera de los dos lados del actuador.

Figura 82. Servoválvula MOOG 73-103



Fuente. Autores

5.4 SELECCIÓN TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS (DAQ)

Es necesario tener en cuenta algunas consideraciones importantes al llevar a cabo, el proceso de selección de la tarjeta de adquisición de datos óptima. Que cumpla con los objetivos del proyecto y requisitos del sistema para realizar eficientemente el control de posición y fuerza en la máquina universal de ensayos Instron.

- ✓ Consideraciones técnicas.
- ✓ Consideraciones económicas.
- ✓ Accesibilidad en el mercado.
- ✓ Software de programación accesible.
- ✓ Confiabilidad, garantía y respaldo.

5.4.1 Requisitos del sistema.

- La tarjeta de adquisición de datos deberá contar con 3 entradas análogas, que permitan la lectura de los sensores, de presión y posición. Las entradas deben permitir la lectura en rangos específicos de voltaje, como se muestra a continuación:

Especificaciones de las entradas análogas:

- ✓ Transductor de presión lado pistón (compresión)
Rango de voltaje: 0 a 10 V
 - ✓ Transductor de presión lado pistón (Tensión)
Rango de voltaje: 0 a 10 V
 - ✓ Transductor de posición LVDT
Rango de voltaje: 0 a 10 V
- Al ejercer el control la señal de mando que se va a controlar va a la Servoválvula, esta será la señal de salida análoga que se requiere que disponga la tarjeta DAQ. En el momento de ejercer control la señal de salida del controlador puede ser positiva o negativa según sea la desviación que se quiera corregir en el sistema, por esta razón es de gran importancia que la salida análoga de la tarjeta de adquisición de datos pueda proporcionar señales de voltaje tanto positivos como negativos.

Especificaciones salida análoga:

- ✓ Salida para control de la Servoválvula
Rango de voltaje: -10 a 10 V.
- Para realizar el control del encendido de la maquina se debe tener en cuenta una serie de salidas digitales con las cuales debe contar la DAQ seleccionada:

Especificaciones salidas digitales:

- ✓ Encendido motor bomba de agua (torre de enfriamiento)
- ✓ Ventilador (torre de enfriamiento)
- ✓ Encendido motor bomba hidráulica
- ✓ Presión en el sistema (Energizado de la válvula de seguridad, opción venteo).

- Uno de los requisitos importantes es la frecuencia de muestreo. La tarjeta de adquisición debe manejar altas velocidades de muestreo; esto se hace necesario debido a que la velocidad total de muestreo se divide en el número de entradas que se encuentran en procesamiento, resultando solo una parte de la velocidad total para cada una de las actividades de muestreo a manejar (la tarjeta carece de muestreo múltiple). Por lo tanto debemos garantizar una alta velocidad de muestreo para poder obtener una buena precisión en las medidas y control del sistema.
- Una alta capacidad de resolución y almacenamiento de datos, que la haga óptima y eficiente en las tareas de toma, manejo, registro y análisis de datos.

5.4.2 Descripción equipo seleccionado.

Las tarjetas de adquisición de datos DAQ (Data Acquisition) de la casa fabricante de National Instruments, se ajusta a los requerimientos propuestos, debido a la confiabilidad y respaldo de la firma. Además, las DAQ son diseñadas para alto rendimiento y ofrecen las capacidades de entradas y salidas tanto analógicas como digitales, con una alta precisión de medidas con una alta velocidad de muestreo de datos que proporciona soluciones de control y medidas basadas en PC con mayor productividad a través de registro, análisis y visualización definidos por el usuario, además de gran flexibilidad de software en múltiples entornos de programación, incluyendo NI LabView. Gran variedad de buses de PC y formatos físicos a escoger entre los que se encuentran: USB (conexión plug and play), PCI (Peripheral Component Interconnect), PXI, Inalámbrico y Ethernet.

La tarjeta de adquisición de datos seleccionada es la NI USB 6211 de la serie M, de 16 bits, energizada por bus USB (Se anexa ficha técnica).

Figura 83. DAQ NI - USB 6211



Fuente. Autores

Ni USB 6211, está diseñada específicamente para aplicaciones móviles, con restricciones de espacio, debido a la instalación plug and play minimiza el tiempo de configuración y montaje.

Optimizada para obtener una mayor precisión a velocidades de muestreo mas altas. Ofrece 16 entradas analógicas, velocidad de muestreo de un solo canal a 250 Ks/s. Dos salidas análogas, cuatro líneas de entrada digitales, disparo digital y dos contadores/temporizadores.

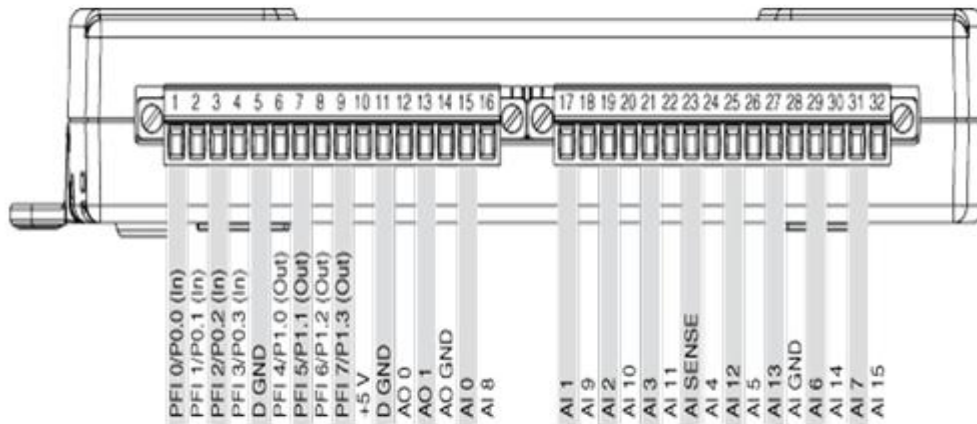
Permite realizar la programación y el control de las variables por medio del Software LabView (del cual cuenta con la licencia la escuela de ingeniería mecánica). Por medio del software LabView, resulta menos dificultosa la tarea de programación, ya que emplea una programación grafica o lenguaje G sencillo. Además, una interfaz (hombre-máquina) agradable para presentación y manejo de datos.

Especificaciones generales:

- Formato físico de conexión: USB
- Sistema operativo. Windows.
- Tipos de medida: Voltaje
- Conector: terminales de tornillo.
- Entradas analógica:
 - ✓ Canales: 8 diferenciales / 16 un solo terminal.
 - ✓ Resolución: 16 bits.
 - ✓ Velocidad de muestreo: 250 Ks/s.
 - ✓ Rango de voltaje máximo: -10V a +10V.
- Salidas analógicas:
 - ✓ Canales: 2
 - ✓ Resolución: 16 bits.
 - ✓ Razón de actualización: 250 Ks/s.
 - ✓ Rango de voltaje máximo: -10V a +10V.
- E/S digitales
 - ✓ Canales de entrada únicamente: 4
 - ✓ Canales de salida únicamente: 4
 - ✓ Máximo rango de entrada: 0 V a 3.8 V.
 - ✓ Máximo rango de salida: 0 V a 5.25 V.
- Contadores/temporizadores: 2

En la figura 84. se muestra el bloque de conexión del panel frontal de la tarjeta USB 6211, donde se encuentran distribuidos 32 pines de conexión por medio de tornillos, haciendo más fácil la conexión del sistema.

Figura 84. Conector panel frontal.



Fuente. National Instruments, Data Sheet USB 6211.

5.5 CONEXIÓN ENTRADAS/SALIDAS ANALOGAS A LA DAQ USB-6211

La conexión de las entradas y salidas análogas se toman de tipo diferencial, por lo tanto consta de dos pines, uno de los cuales se encuentra referenciado a tierra, buscando seguir nuestra convección de signos, de tal manera que si el cilindro se desplaza hacia arriba se tiene un diferencial de voltaje positivo y por el contrario, si el cilindro presenta un desplazamiento hacia abajo el diferencial de voltaje sea negativo.

A continuación en la tabla 7 se encuentra la asignación de las señales análogas del sistema a los puertos de entradas y salidas en la tarjeta de adquisición de datos DAQ USB 6211.

Tabla 7. Asignación de las variables análogas de entrada y salida

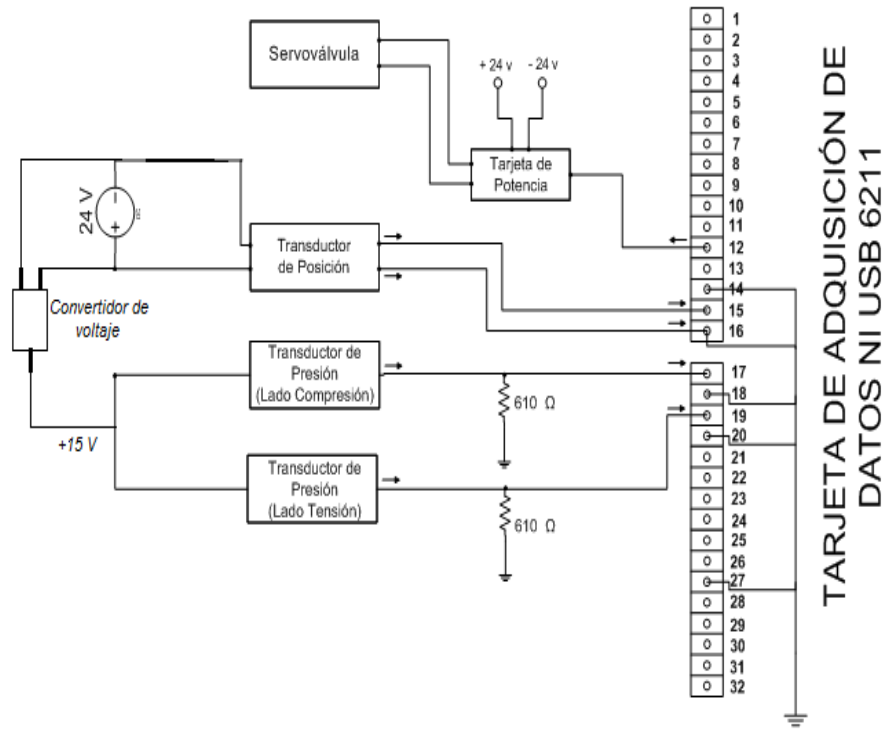
ENTRADA/SALIDA	ASIGNACION
AI 0	Entrada análoga transductor de posición
AI 8	Entrada análoga transductor de posición referenciada a tierra.
AI 1	Entrada análoga transductor de presión (lado compresión).
AI 9	Entrada análoga transductor de presión (lado compresión), referenciada a tierra.
AI 2	Entrada análoga transductor de presión (lado tensión)
AI10	Entrada análoga transductor de presión (lado tensión), referenciada a tierra.
AI GND	Tierra para entrada análoga.
AO 0	Salida análoga para la Servoválvula.
AO GND	Tierra para salida análoga.

Fuente. Autores

En la figura 85 se puede observar el diagrama de conexión de entradas y salidas análogas de la tarjeta de adquisición de datos DAQ NIUSB 6211. La señal del transductor de posición se encuentra conectada a la tarjeta en la entrada diferencial en los puertos 15 y 16. Las señales de los transductores de presión debido a que vienen con corriente y el tipo de medida de la tarjeta es voltaje, se le hace pasar por el acondicionador de señal antes de llegar a la a la tarjeta DAQ, en los puertos 17 y 18 para el lado de compresión y 19 y 20 para el lado de tensión. Los puertos de referencia 14, 16, 18, 20 para las diferentes entradas y salidas análogas se encuentran puenteados a tierra.

Los diferentes transductores a la vez que la tarjeta de potencia de la Servoválvula se encuentran alimentados por medio de la fuente de 24 V como se puede observar en el diagrama de conexión.

Figura 85. Diagrama de conexión entradas y salidas en la DAQ



Fuente. Autores

5.6 CONEXIÓN SALIDAS DIGITALES DE ENCENDIDO DE LA MAQUINA

De los cuatro puertos de salida digitales se encuentran distribuidos para ejercer la función de encendido automático de la máquina universal Instron, que consta del encendido de la bomba y ventilador de la torre, encendido del motor de la bomba principal, válvula de presión del sistema y por último el manifold.

Por medio de un optoacoplador al ser activado con la salida digital de la tarjeta DAQ de 5 voltios, este acciona y permite el paso de la señal que es alimentada por la fuente de 24 voltios. Este optoacoplador debido a que funciona como un interruptor excitado mediante luz emitida por un diodo, se hace necesario por motivos de seguridad ya que aísla la tarjeta del sistema. Además, de la poca corriente que exige este dispositivo para su funcionamiento.

La señal de 24 Vdc es dirigida a activar la bobina de los relés KM6, KM7, KM8, KM9 que al accionar conmuta los puertos de 110 VAC que activan los relés

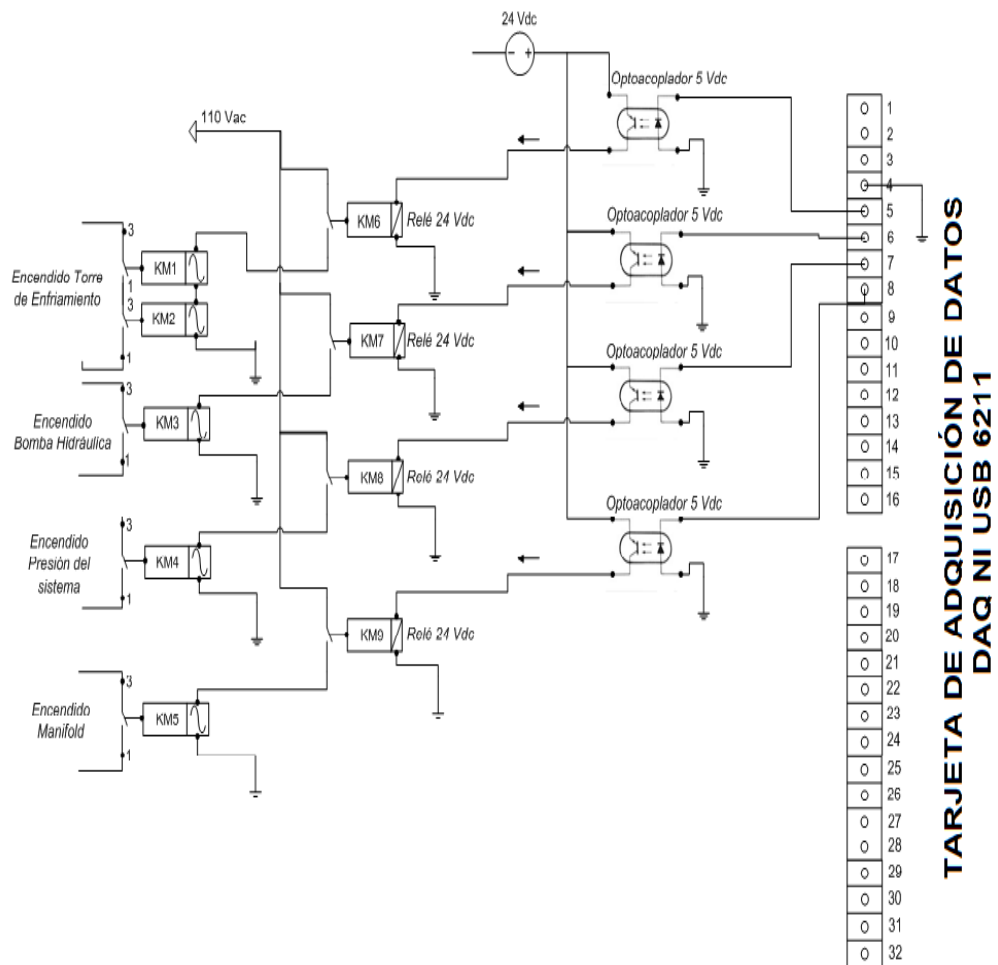
principales KM1, KM2, KM3, KM4, KM5 conmutando los puertos 3 y 1 de encendido de la maquina, Como se puede observar en la figura 86.

Tabla 8. Asignación de las variables digitales de salida

ENTRADA/SALIDA	ASIGNACION
PFI 4/P 1.0	Encendido de la torre
PFI 5/P 1.0	Encendido de la bomba principal
PFI 6/P 1.0	Presión del sistema
PFI 7/P 1.0	Manifold
DGND	Tierra para salida digital

Fuente. Autores

Figura 86. Diagrama de conexión salidas digitales de encendido



Fuente. Autores

El encendido de la maquina en forma digital se adecuo al sistema de encendido de control manual con el cual contaba la maquina anteriormente. De tal manera que la operación de encendido o apagado de la maquina se puede realizar ya sea manualmente por medio del tablero de control o digital por medio de la interfaz grafica creada en LabView. Se selecciona el modo de operación por medio del Switch de dos posiciones ubicado en el tablero, que alimenta el control manual o en su defecto el control digital, teniendo en cuenta que no se pueden operar simultáneamente. En los anexos de este documento se adjuntan el diagrama de funcionamiento eléctrico de la lógica cableada del encendido manual, con el que cuenta la maquina en el tablero de control manual.

6. CARACTERIZACION DEL SISTEMA

Surge la necesidad de conocer cómo respondería el sistema ante una señal de comando dada, es decir cómo es su comportamiento dinámico. Este estudio generalmente se le realiza a la servo válvula, pero para nuestro caso es de mayor utilidad conocer el comportamiento dinámico de todo el sistema en cadena cerrada.

Considerando el sistema como un sistema de control de posición en cadena cerrada, puede determinarse las características dinámicas de todo el sistema, examinando su respuesta ante una entrada escalón o una entrada que varía sinusoidalmente, es decir respuesta en frecuencia.

6.1 RESPUESTA A LA FRECUENCIA DEL SISTEMA

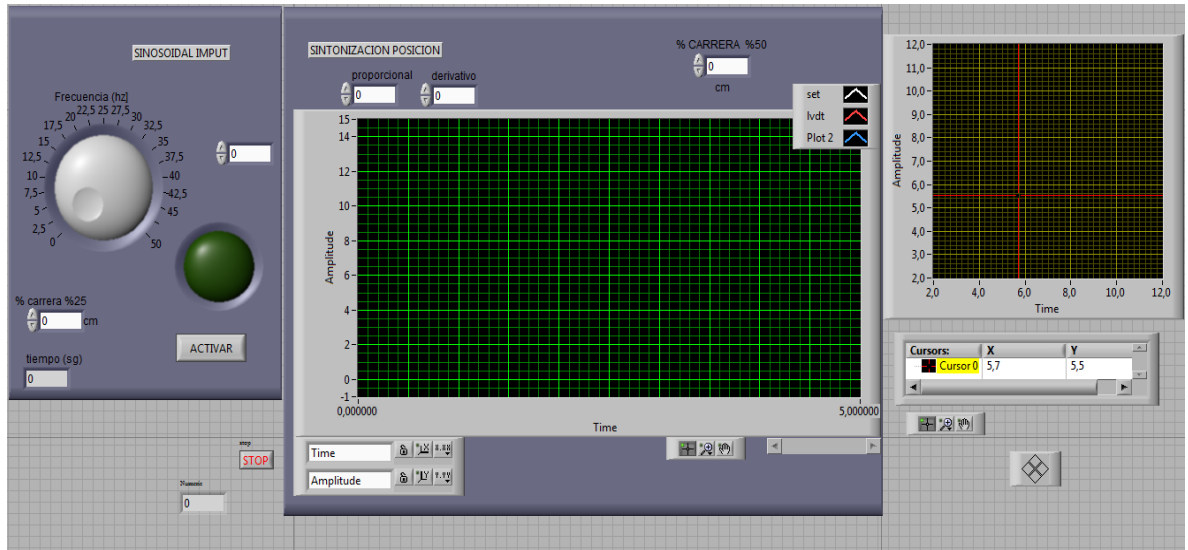
Muchas aplicaciones requieren de un ciclo rápido del sistema, un ejemplo es la prueba de fatiga, la cual es una de las posibles aplicaciones de la maquina INSTRON, por lo tanto se realiza la prueba de respuesta en frecuencia de la maquina.

Para conocer la respuesta en frecuencia del sistema, utilizamos una señal de comando sinusoidal para la cual variamos la frecuencia de 0 a 15hz. Luego procedimos a determinar el diagrama de Bode tanto para amplitud como para fase, pretendiendo determinar el ancho de banda y la frecuencia limite del conjunto de servo válvula y actuador.

Para realizar la prueba se tomó en cuenta las convenciones de procedimiento, las cuales establecen que se debe utilizar un $\pm 25\%$ de carrera como máximo, a partir del 50% de la carrera máxima del actuador. Esto quiere decir que para nuestro actuador que tiene una carrera total de 15cm, se debe ubicar el actuador a una posición central de 7,5 cm y a partir de esta posición se puede desplazar 3,75cm hacia arriba y hacia abajo. Por lo tanto se utiliza una señal de offset que ubique el actuador en la posición central y luego se suministra una señal sinusoidal con amplitud de 3,75 y frecuencia variable.

Para tal objetivo se diseñó un programa en LabView, el cual presenta el panel frontal que se muestra en la siguiente figura.

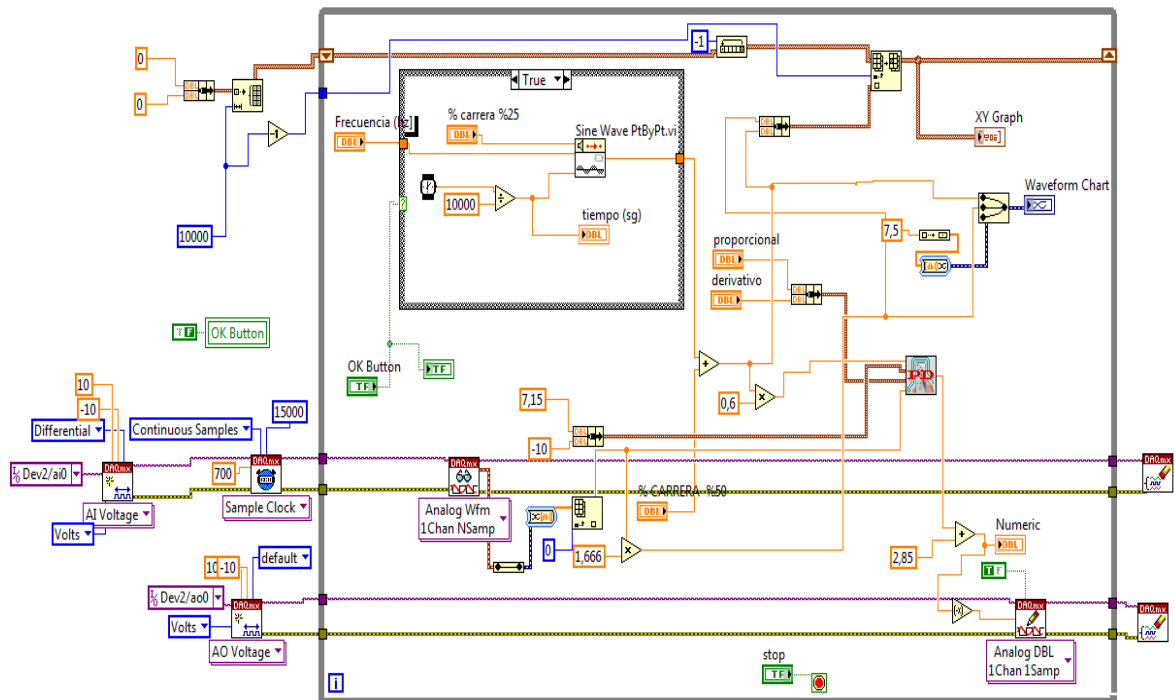
Figura 87. Panel frontal de respuesta a la frecuencia



Fuente. Autores

Con la perilla de la izquierda se le aplica al señal sinusoidal la frecuencia deseada, y luego de que se posiciona el actuador en el punto central, se oprime la opción activar la cual me aplica la señal al set para visualizar la respuesta a la frecuencia.

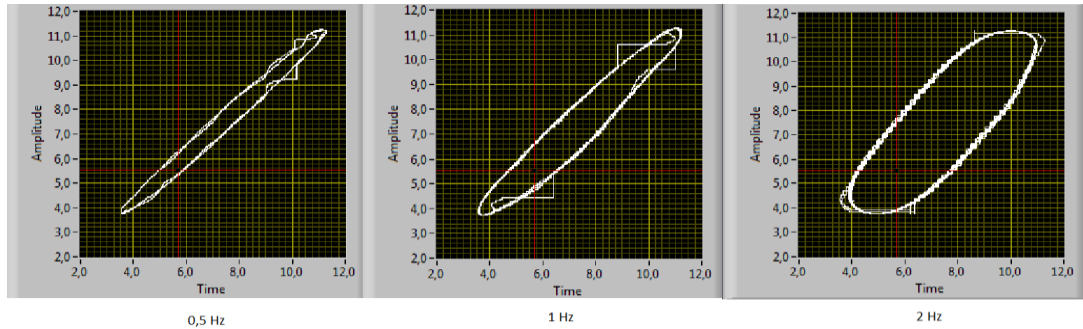
Figura 88. Código de la respuesta en frecuencia



Fuente. Autores

Para las frecuencias de 0Hz a 2Hz la curva de respuesta del actuador es capaz de seguir estrechamente la curva de comando, como se puede ver en las curvas de Lissajouse.

Figura 89. Curvas de Lissajouse para 0,5 a 2 hz



Fuente. Autores

Podemos ver en la siguiente tabla que hasta 2 Hz se alcanza un desfase de alrededor de 45° y una reducción en la amplitud de 0,3 db. Por lo tanto se concluye que es alrededor de esta frecuencia donde la maquina INSTRON tiene una respuesta a la frecuencia donde no existe un gran desfase ni una pronunciada atenuación de la señal de salida con respecto a la señal de comando. Podemos decir entonces que el sistema no tiene la capacidad de realizar ensayos de fatiga, debido a que estos requieren de una alta frecuencia en los ciclos de aplicación de la carga, por lo tanto se descarta la realización de este ensayo.

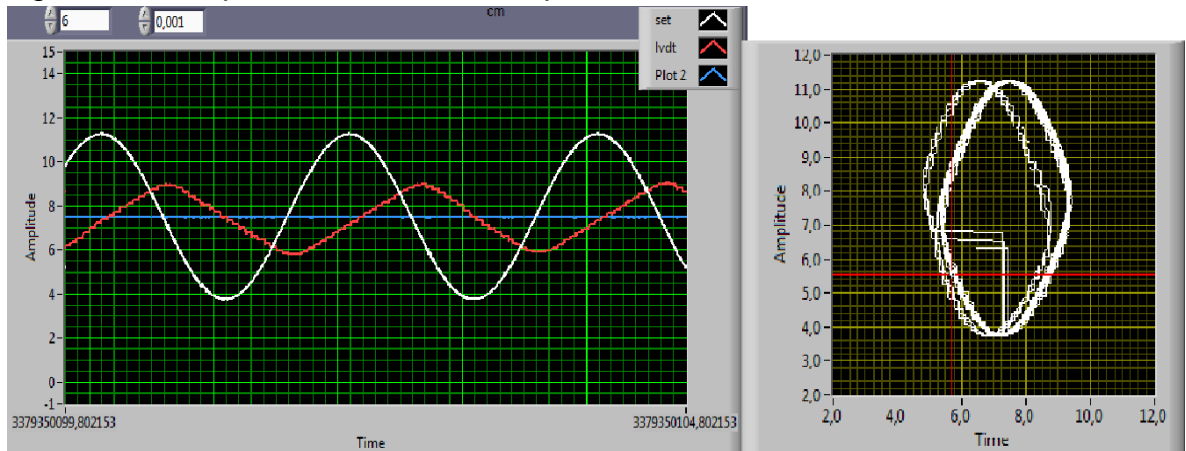
Tabla 9. Respuesta a la frecuencia

hz	xc	xa	Xc	Xa	db	phase lag °
0,5	11,25	11,25	3,75	3,75	0	6,75
1	11,25	11,2	3,75	3,7	-0,11659087	14,4
1,5	11,25	11,2	3,75	3,7	-0,11659087	29,72
2	11,25	11,1	3,75	3,6	-0,35457534	46,8
2,5	11,25	10,5	3,75	3	-1,93820026	64,8
3	11,25	10,18	3,75	2,68	-2,91792947	70,69
3,5	11,25	9,75	3,75	2,25	-4,43697499	75,78
4	11,25	9,45	3,75	1,95	-5,67993313	83,52
4,5	11,25	9,2	3,75	1,7	-6,87164693	89,21
5	11,25	9,15	3,75	1,65	-7,13094647	90,85
5,5	11,25	8,85	3,75	1,35	-8,87394998	98,52
6	11,25	8,75	3,75	1,25	-9,54242509	109,09
6,5	11,25	8,7	3,75	1,2	-9,89700043	118,42
7	11,25	8,6	3,75	1,1	-10,6527717	124,13
7,5	11,25	8,45	3,75	0,95	-11,9261532	130,15
8	11,25	8,4	3,75	0,9	-12,3957752	135

Fuente. Autores

A continuación se presenta una grafica para una señal de frecuencia de 5Hz que es donde se presenta un desfase de 90° y una atenuación de alrededor de 7db, la cual también corresponde a la frecuencia límite y como es de esperar en el grafico de Lissajouse, se obtendrá una grafica muy similar a una circunferencia.

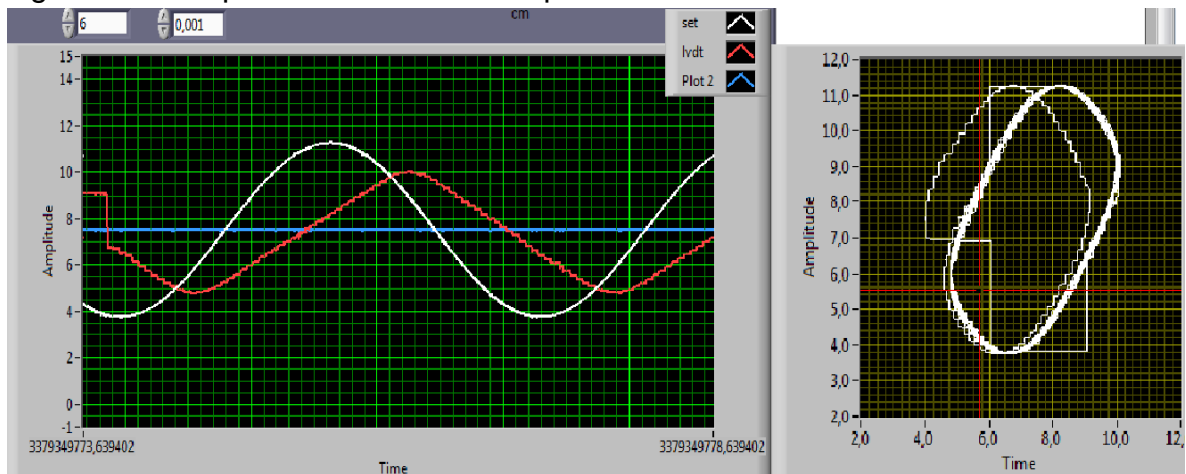
Figura 90. Respuesta a la frecuencia para 90°



Fuente. Autores

Otro punto importante es el ancho de banda el cual corresponde a un rango de 0db a 3 db, la atenuación de 3db se presentó para la frecuencia de 3Hz, lo cual podemos visualizar en la siguiente figura.

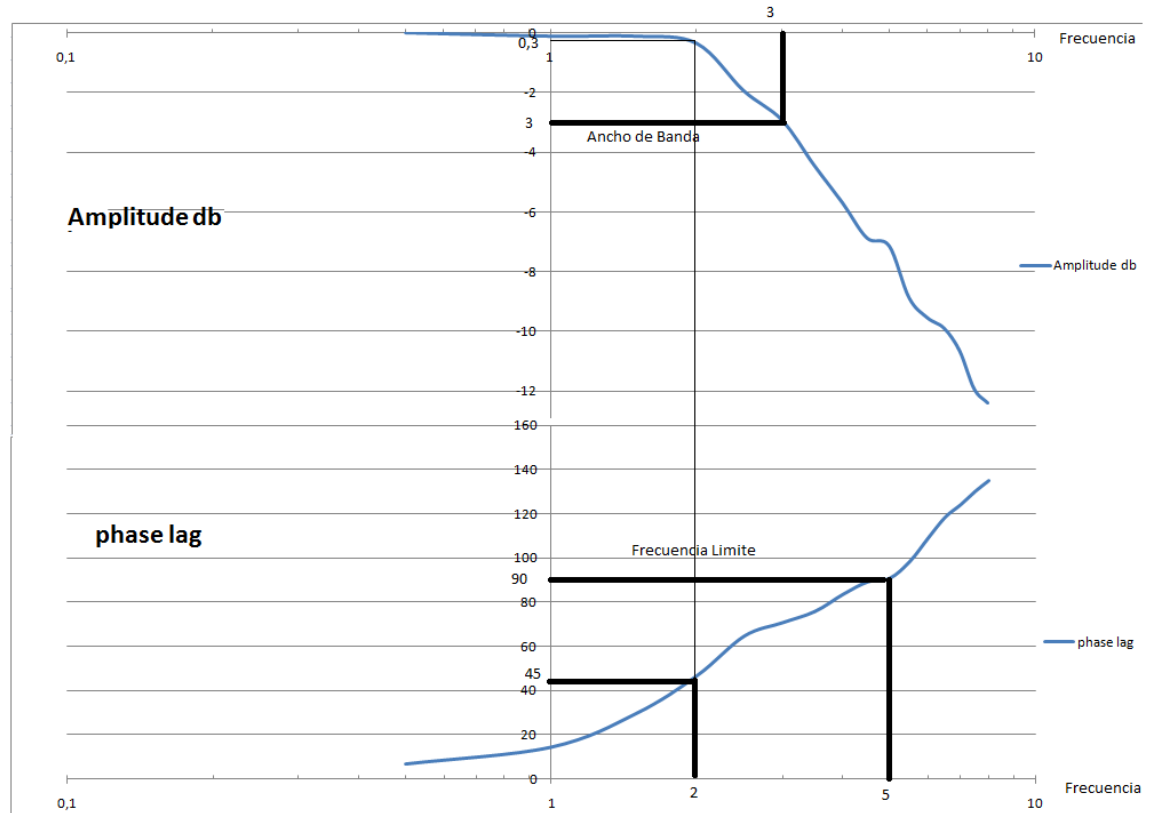
Figura 91. Respuesta a la frecuencia para 3db.



Fuente. Autores

Teniendo en cuenta los datos obtenidos se realizó el diagrama de Bode para el sistema, en donde podemos ver claramente el comportamiento típico de esta curva, y queda definido totalmente la respuesta a la frecuencia de nuestro sistema.

Figura 92. Diagrama de Bode del sistema.



Fuente. Autores

6.2 FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA

En muchos sistemas como el nuestro, el actuador aplicando carga sobre la probeta puede ser representado dinámicamente como un sistema masa resorte. Debemos recordar que todos los sistemas masa resorte tienen una frecuencia natural. Por lo tanto la frecuencia de la servo válvula no puede igualar a la frecuencia natural del cilindro porque se produciría desajustes en todo el sistema.

Para determinar la frecuencia natural del sistema necesitamos conocer la masa del cilindro, el bloque de la mordaza y la masa de aceite. Para esto estimamos una

masa de cilindro y bloque de alrededor de 40Kg y para la masa de aceite tenemos que

$$\gamma = \frac{m \cdot g}{\text{volumen}} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

γ = peso específico del aceite = 0,91 kgf/dm³

m = masa de aceite

A_N = área anular = 40,5 in²

s = 15 cm = 5,9 in

$E = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{Lb}}{\text{in}^2}$ = Modulo de Bulk

Por lo tanto el volumen total de aceite sería de 238 in³

$$g = \text{gravedad} = 386 \frac{\text{in}}{\text{sg}^2}$$

$$m = 0,91 \frac{\text{Kg}}{\text{dm}^3} * 238,95 \text{in}^3 * \frac{2,54^3 \text{cm}^3}{\text{in}^3} * \frac{1 \text{dm}^3}{1000 \text{cm}^3}$$

$$m = \frac{0,91 * 238,95 * 16,38}{1000} = 3,56 \text{kg de aceite}$$

Por lo tanto la masa total será de 43,56 kg que sería también 0,248 $\frac{\text{Lb} \cdot \text{sg}^2}{\text{in}}$

Teniendo que para nuestro actuador se da que la frecuencia natural es igual a:

$$w_0 = \sqrt{\frac{E}{M} * \left[\frac{A_P^2}{V_P} + \frac{A_N^2}{V_N} \right]} \quad \text{Ecuación 28}$$

Ya que el actuador es de doble acción se tiene que el área de pistón es igual a área anular y el volumen de pistón es igual al volumen anular, también se debe considerar que se supone que la rigidez es mínima en el punto central, por lo tanto la carrera sería la mitad de la carrera total, con lo que la ecuación anterior se reduce a:

$$w_0 = \sqrt{\frac{4 * E * A}{M * s}} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$w_o = \sqrt{\frac{4 * 2 * 10^5 * 40.5}{0,248 * 5.9}}$$

$$w_o = 3705,6sg^{-1} = 3705,6 \frac{rad}{sg}$$

$$f_N = \frac{w_o}{2\pi} = \frac{3705,6}{2\pi} = 748,9Hz$$

Por lo tanto tenemos una frecuencia natural del cilindro de 748,9 HZ. Se tiene también que por recomendación se debe utilizar como máximo para la servo válvula una frecuencia igual a la tercera parte de la frecuencia natural del cilindro, por lo que se tendría una frecuencia usable para la válvula de:

$$f_{servo} = \frac{f_N}{3} = \frac{25.7}{3} = 8.56Hz$$

$$w_{servo} = 53.78 \frac{rad}{sg}$$

Podemos concluir entonces que el sistema nunca entrará en resonancia ya que el sistema no tiene la capacidad de alcanzar esta frecuencia.

7. SOFTWARE IMPLEMENTADO Y DISEÑADO EN LA AUTOMATIZACION

Para llevar a cabo un excelente control de la maquina se hace necesario la utilización de un software de alto rendimiento que además de administrar datos tenga disponibilidad para la adquisición y generación de datos además de un entorno de programación de fácil comprensión, por esta razón utilizamos LabView que es un sistema de desarrollo de programación gráfica, orientado a desarrollar aplicaciones para instrumentación, que integra una serie de librerías para comunicación con elementos electrónicos y sistemas de acondicionamiento y adquisición de datos.

La escuela de ingeniería mecánica de la UIS cuenta con la licencia del software LabView el cual es proporcionado por National Instruments Corporation, por lo tanto ha sido utilizado en varios proyectos de automatización y control. La inducción para la manipulación de este software se realizó mediante varios tutoriales y videos que se encuentran a disposición de toda la comunidad en la página de NI.

Para la realización de los ensayos en las probetas de acero se construyó un entorno grafico de fácil comprensión y manejo, donde el usuario tenga todas las herramientas necesarias para llevar a cabo el control de los servos de posición y fuerza, logrando de esta manera un resultado exitoso en las pruebas.

7.1 INTERFAZ GRAFICA

Para los ensayos de tracción y compresión se diseño dos entornos que son básicamente idénticos, con las modificaciones pertinentes para cada tipo de ensayo.

Después de calibrar y conectar todos los transductores a la tarjeta de adquisición de datos se dispone a la USB 6211 a generar una señal de voltaje que pasa por la tarjeta de potencia que llega a la Servoválvula, quedando el sistema listo para la adquisición, control y generación de datos.

A continuación se explica cada una de las partes en que se divide la interfaz principal de usuario.

7.1.1 Interfaz de inicio.

La interfaz de inicio cuenta básicamente con dos ventanas, la primera (figura 93) se muestra al iniciar el programa la cual da una bienvenida al usuario y muestra el tipo de ensayo a realizar además de que presenta a los autores del proyecto y a su director. En la programación se cuenta con un temporizador que al cabo de 3 segundos pasa de la primera a la segunda ventana automáticamente, además que se activa por seguridad un botón que me da la posibilidad de avanzar a la siguiente página.

Figura 93. Ventana de inicio 1



Fuente. Autores

En la segunda ventana (figura 94) se da una breve explicación de el ensayo a realizar y se muestra las dimensiones de la probeta a utilizar en el ensayo, la cual está limitada a unas dimensiones definidas como estándar impuestas por el diseño de las mordazas.

Figura 94. Ventana de inicio 2

ENSAYO DE TRACCION

En un ensayo dado de tracción a una probeta se le aplica una fuerza que puede ser estática o gradualmente aplicada que se le denomina carga y se mide la resistencia del material a esta carga por medio de esfuerzos, al ser aplicada esta fuerza el material presenta una deformación que será medida por medio de un sensor de posición.

STOP

PROBETA ESTANDAR

	Dimensiones (mm)				
	Probeta estándar	Probetas de menor tamaño proporcionales a la estándar			
	12.5	5	3	2	1.5
d	12.5 ± 0.2	9 ± 0.1	6 ± 0.1	4 ± 0.1	2.5 ± 0.1
L	62.5 ± 0.1	45 ± 0.1	30 ± 0.1	20 ± 0.1	12.5 ± 0.1
A	10	8	6	4	2
L0	100	100	100	100	100
L	184.4	-	-	-	-
B	20	20	20	20	20
L	140	140	140	140	140
C	20	20	20	20	20

Siguiente

Fuente. Autores

En la segunda ventana tengo la posibilidad de salir del programa o de seguir a la tercera ventana.

7.1.2 Interfaz de selección de velocidad.

En esta ventana (figura 95) se da a el usuario la posibilidad de establecer la velocidad de aplicación de esfuerzos basándose en la tabla 10, la cual establece un rango posible de velocidad según el modulo de elasticidad de el material. También se muestra una tabla de módulos de elasticidad de varios metales, brindando al usuario la facilidad de elegir.

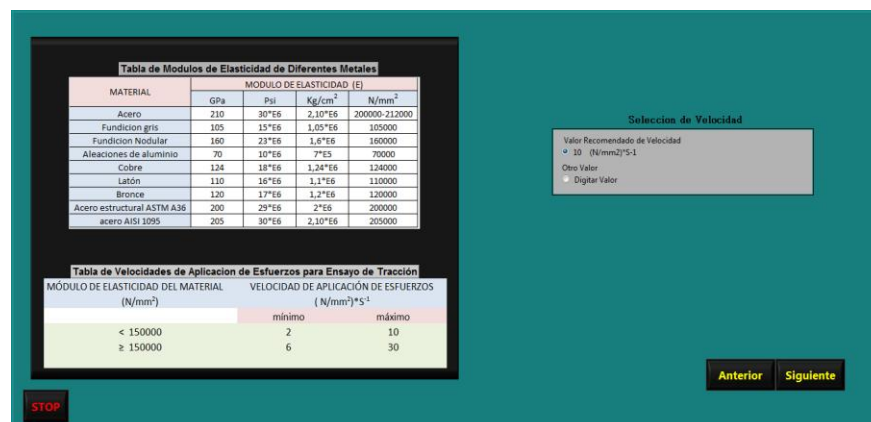
Tabla 10. Velocidad de aplicación de esfuerzos

MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL MATERIAL (N/mm ²)	VELOCIDAD DE APLICACIÓN DE ESFUERZOS (N/mm ²)*S ⁻¹	
	mínimo	máximo
< 150000	2	10
≥ 150000	6	30

Fuente. Autores

Después de muchas pruebas realizadas y según la recomendación hecha por varios profesores se llega a la conclusión que la velocidad recomendada para una prueba exitosa es de alrededor de $10 \frac{N}{mm^2 * sg}$, por lo tanto se da la opción de elegir esta velocidad o digitar otro valor, cuando se escoge esta segunda opción, aparece en la ventana una ventana donde se puede digitar este valor deseado, el cual está limitado con 2 como valor mínimo y 30 como valor máximo.

Figura 95. Ventana de selección de velocidad



Fuente. Autores

En esta ventana también tengo la posibilidad de salir del programa o de continuar a la siguiente.

7.1.3 Interfaz de encendido del sistema de potencia hidráulico.

El sistema tiene la posibilidad de ser encendido de forma mecánica y de forma automática. Se debe tener en cuenta que una forma de encendido deshabilita a la otra por medio de una llave presente en la caja de control. El encendido mecánico se utiliza para la realización de servos de posición, fuerza o para la realización de algún ensayo de forma análoga, es decir, trabajando directamente con las señales de los transductores las cuales son llevadas a tarjetas creadas en el laboratorio.

El encendido automático se realiza en la ventana 4 en donde se cuenta con una serie de botones, el primero de los cuales activa la bomba de agua y el ventilador de la torre de enfriamiento, el segundo botón activa el motor de la bomba de aceite, el tercer botón me activa la válvula de seguridad de todo el sistema que se encuentra tarada a 2000PSI, y el cuarto botón que activa el cierre de una válvula de alivio en el manifold principal.

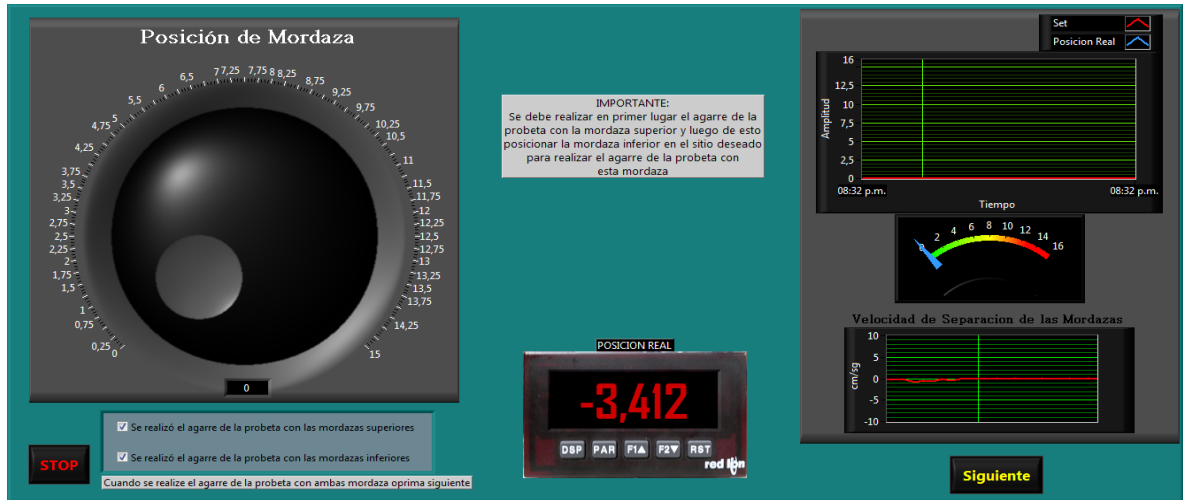
En esta ventana se tiene la posibilidad seguir a la siguiente o de salir del programa, esto desactiva automáticamente la válvula de manifold y envía a venteo, dejando el ventilador y las bombas activadas con el fin de ser utilizadas para un próximo ensayo. Este tipo de desactivación se realizará en las ventanas 4, 5, 6 y 7 del programa de tracción y de compresión

7.1.4 Interfaz de Posicionamiento de mordazas y apriete de probeta.

En esta interfaz (figura 96) se cuenta con un la posibilidad de ubicar la mordaza inferior en el sitio deseado por el usuario mediante una perilla o con el teclado con las teclas Av Pag para subir la mordaza o con Re Pag para bajar la mordaza.

En esta parte del programa se hace uso de un control PD para el posicionamiento de las mordazas en el sitio requerido. Antes de ubicar la mordaza inferior se debe colocar la probeta y ajustarla a la mordaza superior, solo luego de esto se debe ubicar la segunda mordaza y activarla.

Figura 96. Posicionamiento de mordazas



Fuente. Autores

Podemos encontrar también una pequeña pantalla que nos indica la posición real de la mordaza inferior en centímetros, cabe recordar que la carrera de esta mordaza es de 15cm contados desde su parte inferior.

Como uno de los objetivos es la visualización de servo de posición, se cuenta con una grafica que nos proporciona la comparación entre el set o posición deseada y la posición real de la maquina; en esta grafica y con las agujas debajo de esta podemos visualizar el comportamiento del sistema en el servo de posición.

Por medio de una pequeña grafica en la parte inferior de la ventana podemos visualizar el valor de la velocidad de desplazamiento de la mordaza desde una posición a otra.

En esta ventana también se tiene la posibilidad de salir del programa o continuar a la siguiente ventana, pero para continuar primero se debe confirmar la ubicación y luego el agarre de las mordazas para que aparezca en pantalla la opción de seguir adelante con el ensayo.

7.1.5 Interfaz de inicio de ensayo.

En esta ventana (figura 97) se da inicio al ensayo. En el centro de la pantalla se encuentra un botón donde se autoriza el inicio del ensayo, pero se debe tener en cuenta que si autoriza el inicio desaparece la opción de ir hacia atrás en el programa y la única forma de salir será cerrando el programa. Luego de autorizar el inicio del ensayo aparece una ventana de cuenta regresiva que arranca en 5

hasta llegar a 0 segundos y automáticamente envía el programa a la siguiente interface.

Figura 97. Interfaz de inicio de ensayo



Fuente. Autores

7.1.6 Interfaz de progreso del ensayo.

En esta interfaz (figura 98) se le aplica a la probeta una carga variable que va aumentando desde cero hasta el punto de rotura de la probeta, este aumento está programado con una entrada de comando tipo rampa para el servo de fuerza el cual será explicado con detalle más adelante.

Figura 98. Interfaz de progreso del ensayo



Fuente. Autores

Encontraremos en esta ventana la curva esfuerzo vs. Deformación unitaria con la cual podemos ver la deformación del material ante una carga en aumento y seguir su comportamiento durante la prueba, pues esta grafica se realiza en tiempo real.

También encontraremos una grafica de fuerza vs. tiempo donde se grafica simultáneamente el valor de fuerza de comando contra el valor de fuerza real en la probeta, esto con el objetivo de ver el comportamiento del control de fuerza, lo cual es una de las partes más importantes de esta aplicación.

Además encontraremos dos manómetros que me muestran la presión a cada lado del actuador de la INSTRON los cuales corresponden exactamente a los valores reales de los manómetros que se encuentran instalados en la maquina, también podemos ver la posición de la mordaza en tiempo real y la velocidad de su desplazamiento.

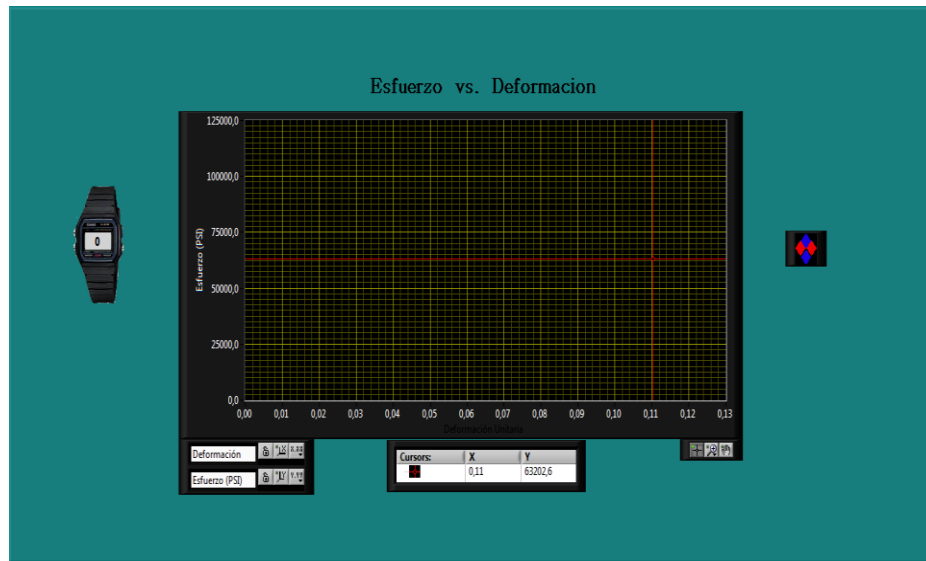
Existe la posibilidad de dar por terminado el ensayo en cualquier momento gracias al botón de parada de ensayo con el cual se activa automáticamente una ventana que me pide el nombre y ubicación de un archivo de Excel donde encuentre los datos generados de la curva esfuerzo vs. deformación. En caso de que la prueba termine por completo, la mordaza tenderá a irse para el inicio de carrera, es decir a 0 cm, por lo tanto al recibirse una señal de 5cm la maquina entrará en venteo automáticamente.

7.1.7 Interfaz de resultados.

Luego de detener el ensayo y enviar la información a un archivo Excel el programa se cierra automáticamente pero me deja en la última página, en donde tengo una grafica de esfuerzo vs. deformación unitaria, en la cual puedo mover un cursor que me indica los valores de esfuerzo y deformación deseados, además de que puedo manipular la escala de ambos ejes para visualizar mejor los resultados.

Cabe mencionar que el usuario no tendrá acceso al código genérico para evitar posibles cambios involuntarios.

Figura 99. Interfaz de Resultados



Fuente. Autores

7.2. CODIGO GRAFICO DISEÑADO E IMPLEMENTADO

La interfaz creada para llevar a cabo los ensayos de tracción y compresión conlleva a la creación de un código para la adquisición, control y generación de datos el cual se describe detalladamente en este capítulo.

Como ya sabemos el lenguaje utilizado fue LabView (Laboratory Virtual Instruments Engineering) en el cual los programas realizados reciben el nombre de VI's o instrumentos virtuales ya que tienen un panel frontal que simulan los instrumentos reales.

Los VI's usan una estructura hereditaria y modular que permite realizar programas por niveles o hacer programas con otros programas o subprogramas. Un VI contenido en otro VI es denominado subVI. Todo VI se puede convertir en subVI sin ningún tipo de cambio en su estructura.

7.2.1 VI Ensayo de tracción.

Este es el nombre del VI principal para el ensayo de tracción, este contiene una sección para la adquisición de datos, una estructura llamada "Case Structure" el cual dependiendo el caso selecciona entre servo de posición y servo de fuerza.

Figura 100. VI Ensayo de tracción



Fuente. Autores

7.2.1.1 Adquisición de datos. Para la adquisición y generación de datos se puede recurrir a el subVI polimórfico llamado DAQ-ASISTAN, el cual no fue utilizado en el código debido a que disminuye la capacidad de muestreo debido a que debe utilizarse dentro de un ciclo denominado “While loop” en el cual se debe esperar a trabajar con un número determinado de datos y luego si capturar otros para procesarlos.

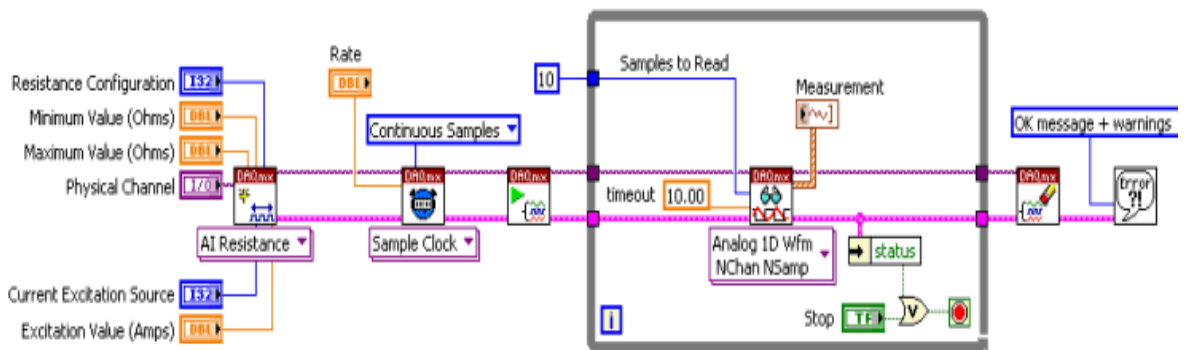
Figura 101. SubVI DAQ Assistant.



Fuente. Tutorial Labview 2009.

Por lo tanto fue necesario la utilización de los subVI's DAQ-mx (figura 102), con este tipo de adquisición puedo establecer el muestreo a la capacidad máxima establecida por la tarjeta y por el computador haciendo más eficiente el programa y mejorando el control del sistema.

Figura 102. VI's DAQ-mx



Fuente. Autores

En la grafica anterior, empezando de izquierda a derecha, el primer subVI es el encargado de crear la tarea, es decir, es con quien establezco el número de entradas análogas y su tipo de medición, además defino los canales físicos asignados a cada lectura y su valores mínimos y máximos. Con el segundo subVI establezco la frecuencia, el numero de muestras y el tipo de muestreo, es decir que puedo elegir si quiero un número fijo de muestras, si quiero un muestreo continuo que es el tipo de muestreo que se eligió para nuestra tarea o si quiero que se tomen datos cada vez que se tenga un cambio en la entrada. Con el cuarto subVi establezco el inicio de la lectura de datos para su posterior procesamiento, este subvi es el encargado de transmitir los datos al código para poder procesarlos.

El muestreo es una variable muy importante en eficiencia del control realizado, por lo tanto debe tomarse el mayor número de muestras posibles. Con el subVI timing (figura 103) se puede establecer una cierta cantidad de muestreo de la tarjeta, este valor depende en gran forma de la capacidad del computador con su sistema operativo, también depende del tipo físico de la tarjeta y del número de canales usados.

Figura 103. SubVi Timing



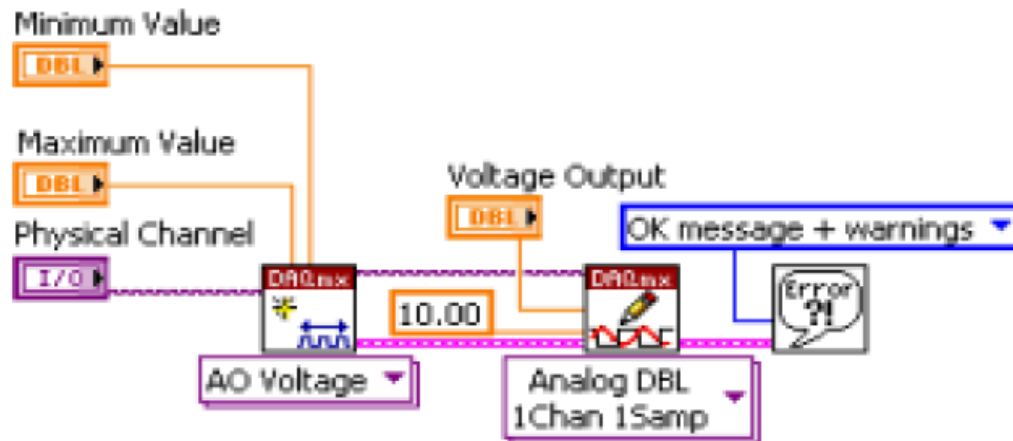
Fuente. Diagrama de bloque LabView

Sabemos que para esta aplicación se utiliza la tarjeta USB 6211 de la cual se sobre entiende que tiene formato físico USB con un muestreo máximo de 250KS/s, esta tarjeta trabaja de muy buena manera con un solo canal de muestreo, pero en nuestro caso trabajamos con tres canales de adquisición, uno para el sensor de posición y otros dos para los transductores de presión, debido a esto la tarjeta baja considerablemente su capacidad de trabajo, debido a su incapacidad de realizar muestreo múltiple, sumado a que se trabaja con el sistema operativo Windows 7, dando por resultado una frecuencia de muestreo de 800 muestras por segundo por canal; este valor de muestreo se determino mediante prueba y error, teniendo como parámetro la visualización de una grafica continua y no a pasos. Para un mayor muestreo se podría trabajar una tarjeta de formato físico PCI la cual cuenta con muestreo múltiple, además de que se podría utilizar un sistema operativo como Linux Real Time, estas modificaciones aumentarían la

capacidad de muestreo de una forma muy significativa, pero su limitante es el alto costo que conllevan.

7.2.1.2 Generación de datos.

Figura 104. Generación de datos



Fuente. Tutorial LabView 2009

Para la generación de datos se utilizan los SubVI's que se muestran en la figura 105, donde se puede observar que el primer subVI empezando de izquierda a derecha es el encargado de crear los canales para la generación de datos además de iniciar la tarea de generación y de establecer los valores máximo y mínimo que puede generar la tarjeta, si durante la ejecución del programa se genera un dato que supera el valor máximo de voltaje disponible de la tarjeta el programa se detiene automáticamente con el fin de prevenir daños en el dispositivo además de que se genera un reporte de error con su respectivo código, con este código puedo averiguar las posibles causas de error. El subVI Write (figura 105) es el encargado de tomar el dato que se desea generar, este dato es proveniente de la etapa de servo de posición o de fuerza, debemos recordar que la tarjeta USB 6211 tiene tanto para sus entradas como salidas analógicas una amplitud máxima de +- 10V.

Figura 105. SubVI Write



Fuente. Diagrama de bloque Labview

Tanto en las tareas de generación como en las de adquisición se debe saber que solo es posible crear canales virtuales del mismo tipo, es decir que si queremos tener varios canales de adquisición, todos estos canales deben ser de voltaje, o de corriente por ejemplo, no puedo mezclar canales de voltaje con canales de corriente.

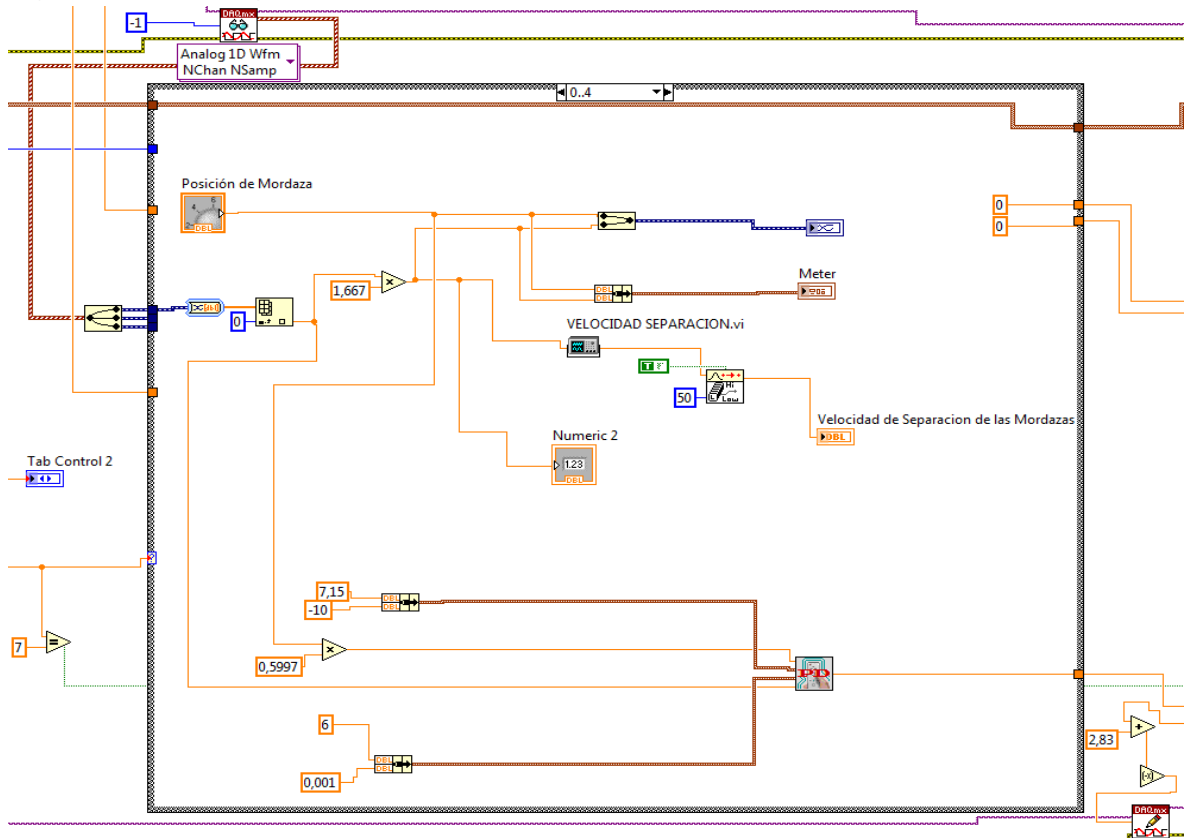
7.2.1.3 Programación de servo de posición. Generalmente para la realización de un servo de posición se usa una de las teorías básicas del control análogo conocido con PID, para esta aplicación el servo de posición se llevó a cabo con un algoritmo PD que se programó en un subVI llamado PD que se explicará más adelante.

Luego de haber establecido la adquisición de la señal de posición del LVDT, se toma esta señal y se acondiciona para que se entregue dato a dato para luego ser comparado con una señal de comando que corresponde a la posición deseada y de esa forma generar la señal de error que entra al PD el cual entrega una señal que se recibe en el Write para ser llevada a la servo.

Dentro del ciclo While Loop que se encarga de mantenerme en el entorno hasta que yo decida salir, se creó una estructura “case” que se muestra en la grafica 106 que dependiendo de la página en donde me encuentre, establece qué tipo de acción tomar, si se realiza servo de posición o servo de fuerza.

Podemos ver que se tomó la señal que viene del LVDT y se multiplica por un factor que me convierte los voltios a centímetros para poder comparar estos datos con los datos de set o posición deseada. Dentro de este “case”, se realiza una grafica de comparación entre el valor set y el valor de posición real, de tal forma que se puede tener una visualización de la acción de control PD caracterizada por una curva suavizada que se aproxima a su valor de set.

Figura 106. Código del Servo de posición



Fuente. Diagrama de bloque LabView

Se puede ver que del lector de datos se despliega un hilo marrón grueso, esto quiere decir que los datos de salida es un vector de dimensión mayor a uno. A la salida de este se le adaptó una función que se encarga de separa las señales de salida del lector, las señales siempre se disponen en el orden en que se crearon los canales, para esta aplicación el primer canal es el correspondiente al LVDT por lo tanto el primer hilo azul transporta los datos de posición, los dos siguientes hilos azules transportan los datos de presión que llegan desde los transductores de presión.

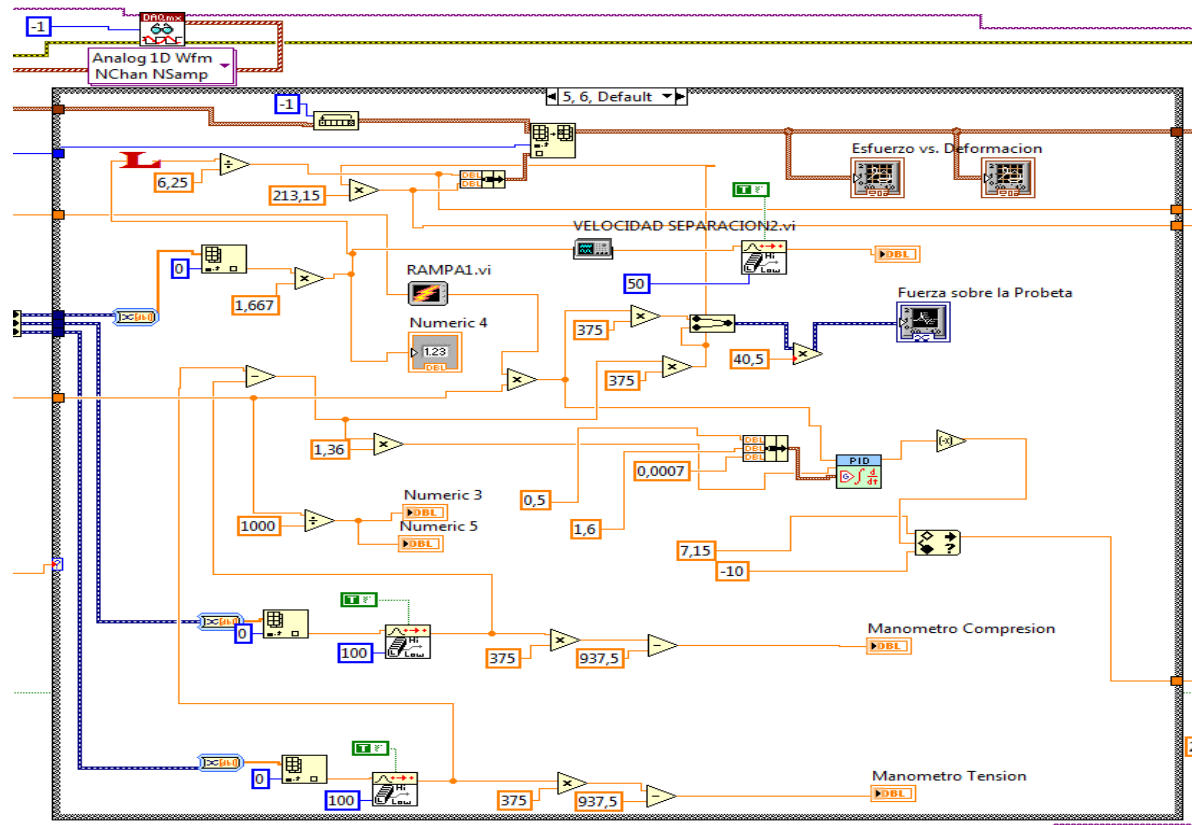
En el código se puede apreciar un valor constante de 2.85, este corresponde al voltaje necesario para posicionar el carretel de la Servoválvula en el punto cero, punto en el cual el cilindro no se debe desplazar ni hacia arriba ni hacia abajo por lo tanto este valor es conocido como el punto cero.

Las lecturas tomadas hasta aquí corresponde al valor real de la posición, las cuales serán llevadas al control PD junto con el set o valor deseado para su respectivo procesamiento y generación de señal para la servo.

7.2.1.4 Programación de servo de fuerza. Cuando se llega a la ventana de realización de la prueba, un contador envía un valor al selector del “case”, imponiendo la realización del servo de fuerza, debe notarse que en esta ocasión se tiene habilitadas las tres entradas creadas con los canales virtuales, por lo tanto estamos tomando una señal de voltaje que se traduce en posición y otras dos señales de voltaje que se traducen en un valor de presión.

El actuador de la INSTRON es de doble acción por lo tanto se tiene la necesidad de tomar el valor de presión a cada lado del pistón, para luego realizar la diferencia entre los dos y de esta manera tener un valor de presión neto sobre el actuador. Esta presión se traduce en una fuerza al ser multiplicada por el área neta de trabajo la cual está alrededor de $40,5 \text{ in}^2$. Sabemos que la presión en el actuador no necesariamente es la presión en la probeta, por lo tanto por ley de Newton de acción y reacción se traslada la fuerza en el actuador la cual sí corresponde a la fuerza sobre la probeta. Por lo tanto el esfuerzo sobre la probeta es igual a la fuerza dividida entre el área de probeta que esta alrededor de $0,2 \text{ in}^2$.

Figura 107. Código del servo de fuerza.



Fuente. Diagrama de bloque LabView.

A la llegada de cada señal de voltaje de los transductores de presión se le coloca un subVI que se encarga de sacar el promedio de cada 100 datos, actuando como un filtro pasa bajas.

A la diferencia de voltaje realizada entre las señales provenientes de los transductores de presión se debió amplificar en un factor de 1,36 para un correcto funcionamiento del código durante el ensayo, este valor se determino por prueba y error durante la sintonización de las constantes PID. Esta diferencia corresponde al valor de set que será enviada junto con el valor deseado al control PI para de esta manera enviar un valor de comando a la salida y que llega a la servo.

Debemos tener en cuenta que la señal de los transductores se da en voltios, mientras que la señal de comando es una rampa con unidades de esfuerzo por segundo, por lo tanto se debe realizar una correcta conversión de unidades, para llevar ambas señales en voltios al controlador PID. Esta conversión se lleva a cabo gracias a la caracterización que se realizó de los transductores de presión de los que se tiene la ecuación de presión en función de voltaje.

Al comienzo de la programación se decidió utilizar un controlador tipo PI, pero luego de la sintonización se llegó a la conclusión que debido a que el comando de entrada es una rampa el sistema presentaba una oscilación debido a la falta de estabilización de la señal de error, por lo tanto se decidió agregar un control derivativo, obteniendo un excelente control de la fuerza y unos resultados en la prueba lo suficientemente satisfactorios.

Para poder realizar la grafica de esfuerzo vs. deformación, fue necesario crear un vector de gran tamaño el cual me almacene los datos que se estén gerando

7.2.2 SubVI Cronometro.

Para la contabilización del tiempo que toma la prueba se creó un subVI el cual inicia desde cero en el momento de su activación.

Figura 108. SubVI cronometro.

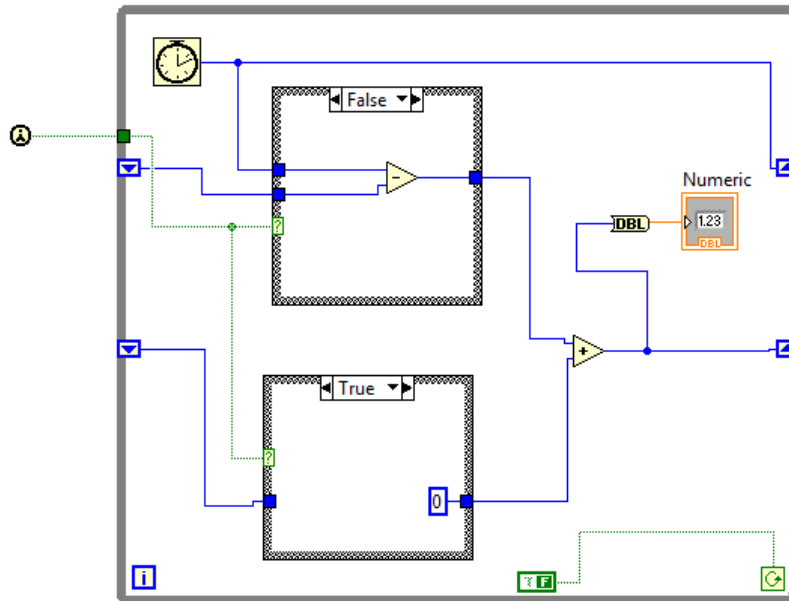


Fuente. Diagrama de Bloque LabView.

Debido a que el comando de set para el servo de fuerza es una rampa, se tuvo la necesidad de utilizar un cronometro para multiplicar la rampa y de esta manera obtener el incremento de fuerza a la velocidad deseada.

En la siguiente figura se puede ver que el código inicia desde cero y luego realiza una suma de pequeños diferenciales de tiempo dentro de un ciclo while loop.

Figura 109. Código del cronometro.

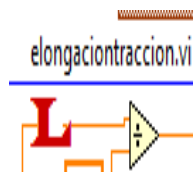


Fuente. Diagrama de bloque LabView.

7.2.3 SubVI elongación.

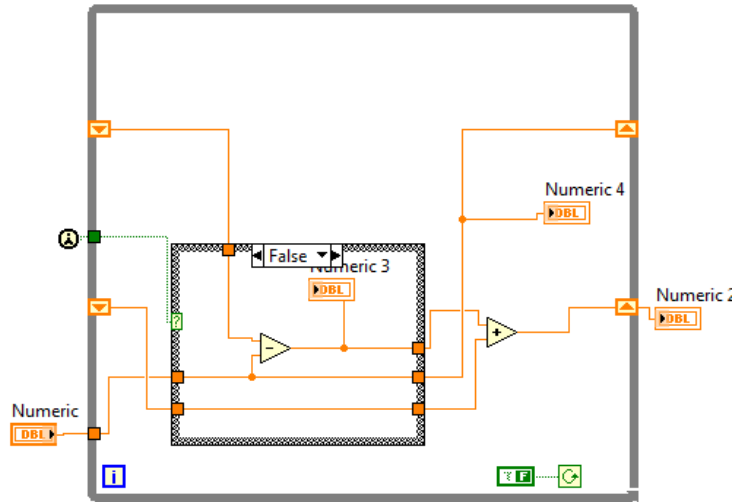
En el diagrama esfuerzo deformación se necesita conocer el valor de la elongación que sufre la probeta durante el ensayo

Figura 110. SubVI elongación



Fuente. Diagrama de bloque LabView

Figura 111. Código del subVI elongación



Fuente. Diagrama de bloques LabView

Cuando se realice el ensayo de tracción se debe invertir el orden de la resta de la grafica anterior porque de lo contrario el programa ante un pequeño aumento en la posición, el programa me entregaría valores negativos de posición.

Donde quiera que se detenga la mordaza inferior para realizar el agarre de la probeta, este será el punto de referencia desde donde se iniciará a contar la elongación de la probeta desde cero hasta un punto hacia abajo. Este subVI se inicia al seleccionarse la ventana de progreso del ensayo, y simplemente suma peños deltas de posición.

7.2.4 SubVI rampa.

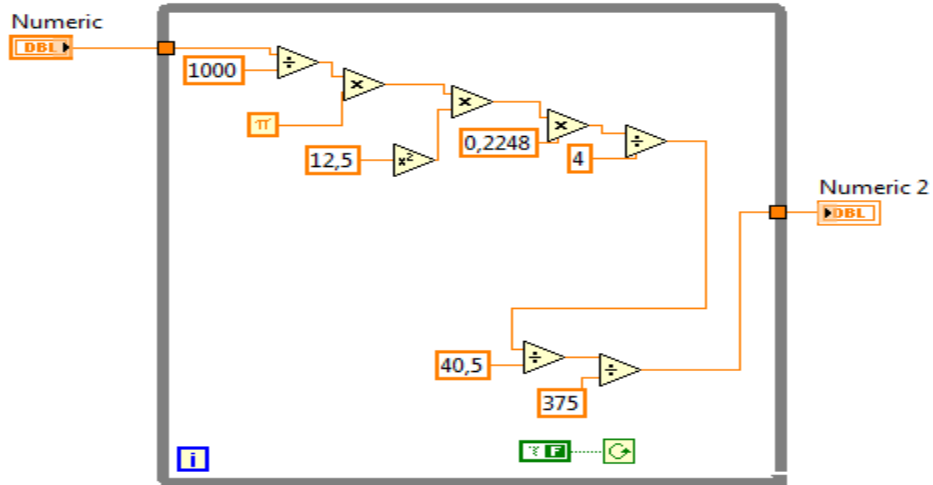
Figura 112. SubVI rampa



Fuente. Diagrama de bloque LabView

Según la norma NTC2 la prueba de tracción en metales se debe realizar a una velocidad constante de aplicación del esfuerzo, por lo tanto se tuvo la necesidad de crear un subVI con las conversiones de unidades necesarias para que la información de salida de la rampa fuera un valor compatible en unidades con el diferencial de voltaje de los transductores.

Figura 113. Código del SubVI rampa



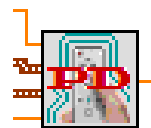
Fuente. Diagrama de bloque LabView.

Este subVI solo multiplica el valor de velocidad de aplicación de esfuerzos sobre la probeta por las constantes necesarias para llevar este valor a su correspondiente valor en voltaje teniendo en cuenta la presión en los transductores. Se debe notar que este valor se multiplica por un cronometro, es decir que la rampa se va creando a medida que avanza el tiempo.

7.2.5 SubVI PD.

El control PD es el típico control de posición que combina el efecto proporcional con un efecto derivativo el cual suaviza la llegada de la mordaza al punto deseado.

Figura 114. SubVI PD

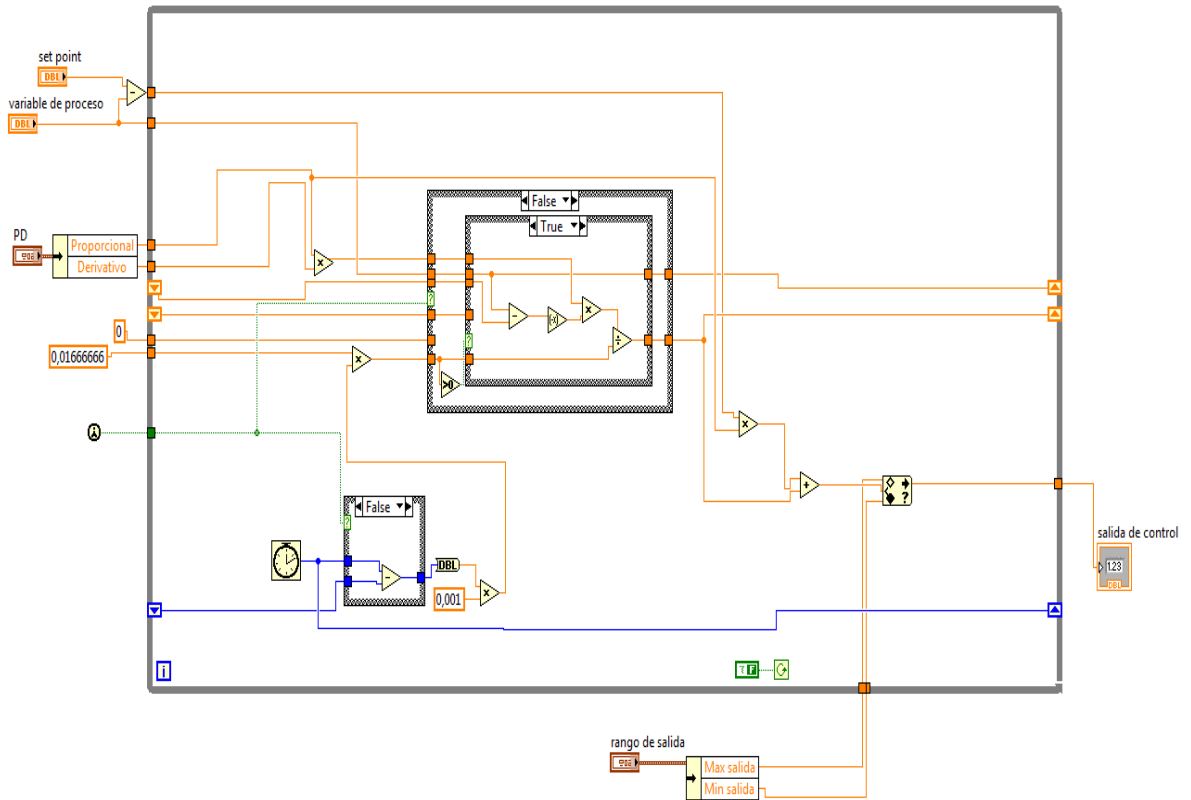


Fuente. Diagrama de bloque LabView

El recibe una señal de set y la compara con la señal proveniente del LVDT para crear una señal de error, la cual entra al algoritmo típico para PD, es decir la suma entre la derivada del error y la proporción del error. Se puede notar que dentro del ciclo while se crea el diferencial del tiempo para la realización de la derivada.

Al subVI también llegan unos valores de las constantes de proporcionalidad y de derivada, así como del rango de salida del comando con el fin de proteger la tarjeta.

Figura 115. Código del subVI PD



Fuente. Diagrama de bloque LabView

7.2.6 SubVI PI.

Para los servos de fuerza el tipo de control utilizado normalmente es el PI el cual combina el efecto proporcional más el efecto de reducción del error estado estable del control integral. La aplicación del esfuerzo se realiza mediante una rampa, por tal motivo durante la sintonización se presentó una oscilación debida a cada incremento por lo que fue necesario implementar un control tipo PID

Figura 116. SubVI PI

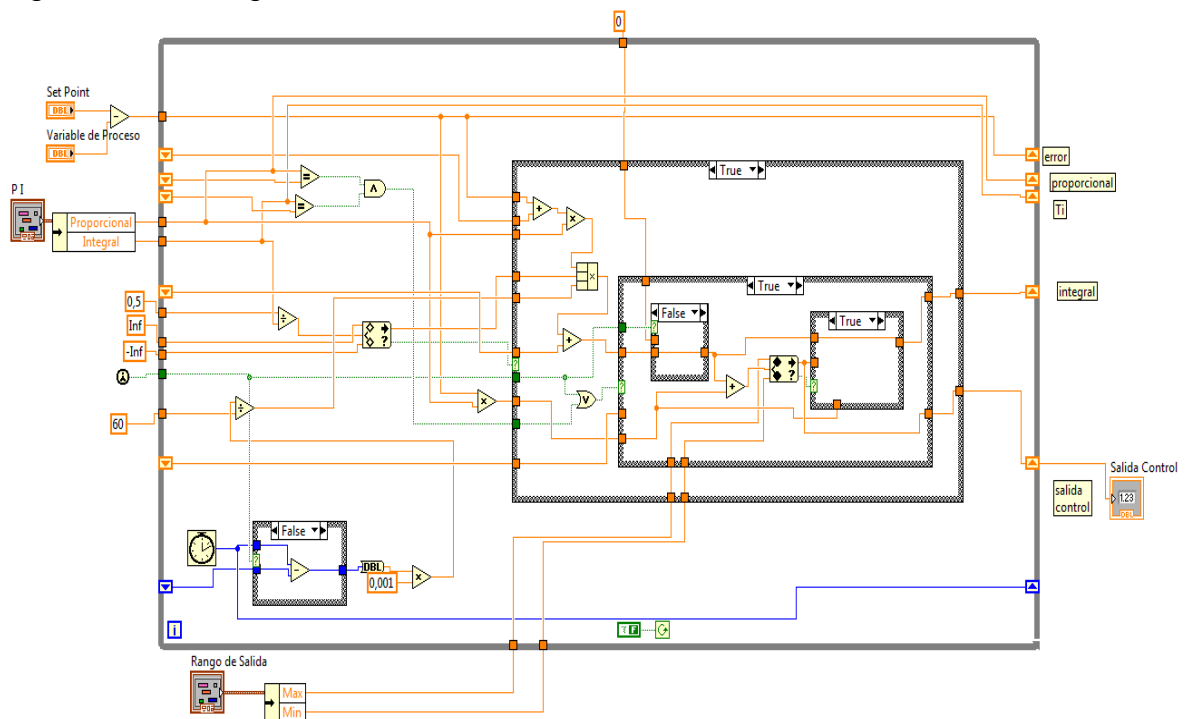


Fuente. Diagrama de bloque LabView

Dentro del ciclo while se encuentran varios “case loop” que se encargan de ir integrando el error mientras se crea un diferencial de tiempo para luego sumarlo con la parte proporcional, esta crea una señal de comando que se corrige todo el tiempo y se dirige a la servo válvula.

Este subVI tiene como entrada las constantes de proporcional e integral, las cuales pueden variar para realizar la sintonización, además del rango de salida de control para proteger la tarjeta de adquisición de datos

Figura 117. Código del subVI PI



Fuente. Diagrama de bloque LabView

7.3 SINTONIZACION DEL CONTROLADOR

Para la sintonización del las constantes de control de un sistema existen varios métodos, como tener el modelo matemático de la planta o función de transferencia y luego utilizar entornos como MatLab para determinar las constantes, pero también existen sistemas demasiado complicados como para obtener una función de transferencia, por lo tanto se acude a la sintonización por tanteo el cual simplemente consiste en ir variando las constantes teniendo en cuenta los conceptos que cada constante implica hasta obtener el comportamiento deseado de la maquina.

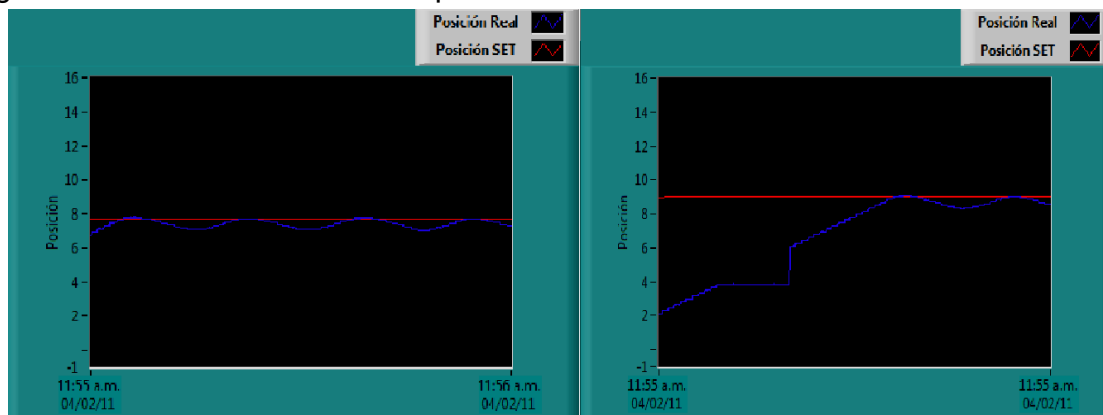
Para poner en práctica la sintonización por tanteo es necesario que la maquina se encuentre totalmente instalada y funcionando en forma normal. Se dispone entonces a aumentar la constante proporcional hasta obtener una leve oscilación de la señal real alrededor del set, para luego ir aumentando la banda integral y derivativa.

7.3.1 Sintonización del servo de posición.

Para el servo de posición fue necesario un controlador del tipo PD, luego de determinar la ecuación del LVDT que relacionara la posición con el voltaje de feedback, se realizó el código en LabView.

En primer lugar se procedió a aumentar la constante proporcional hasta obtener una oscilación. Se pudo establecer que si aumentábamos la constante proporcional, la mordaza llegaba a la posición de set utilizando menor tiempo pero de igual manera se aumentaba la oscilación.

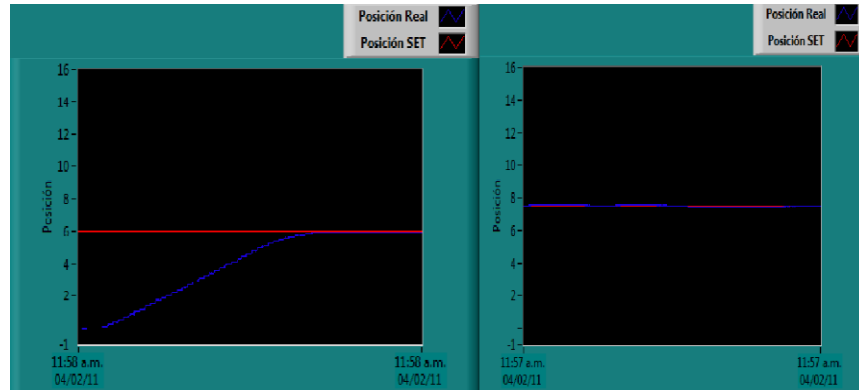
Figura 118. Oscilación servo de posición



Fuente. Autores

Cuando se obtuvo una respuesta que no fuese tan rápida ni tan lenta y una oscilación aceptable, procedimos entonces a aumentar la constante derivativa hasta eliminar la oscilación. Si se aumentaba demasiado la constante derivativa se presentaba una oscilación o la inestabilidad del sistema.

Figura 119. Sintonización servo de posición



Fuente. Autores

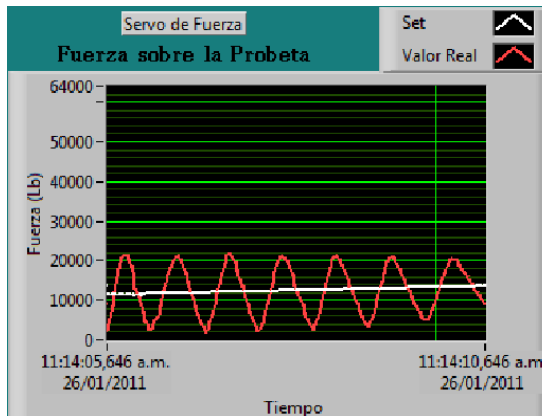
Luego de algunas iteraciones y pruebas se logro la respuesta esperada como se pudo observar en la grafica anterior.

7.3.2 Sintonización del servo de fuerza.

Para poder realizar esta sintonización se debía disponer de algún tipo de material sobre el cual se pudiese realizar la aplicación de cargas, sin dañar el sistema general, por lo tanto se tuvo la necesidad de realizar la sintonización con maderas de prueba.

En un principio se implementó un control del tipo PI al cual luego de algunas pruebas se logró su sintonización, esto se debía a que en un comienzo se le imponía al controlador un valor de set constante, es decir de tipo escalón, pero cuando se implementó un valor de set de tipo rampa el sistema presentó una gran oscilación, dañando todos los materiales de prueba.

Figura 120. Oscilación del servo de fuerza

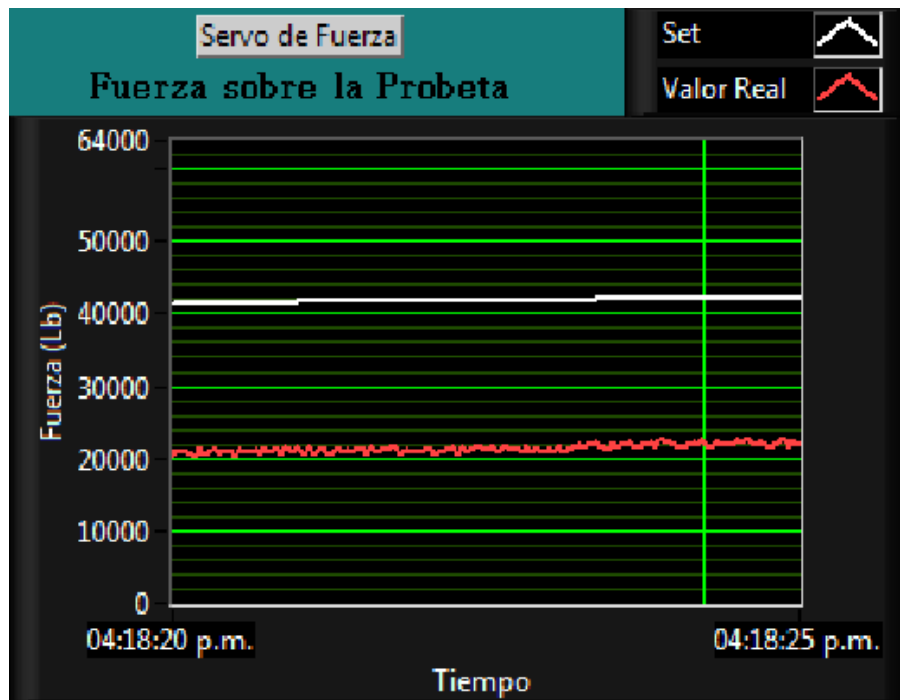


Fuente. Autores

Esto se ocasionaba debido al carácter variante del set, por lo que se implemento un control derivativo al control ya existente, que se encargara de amortiguar los cambios de set de la rampa.

Luego de sintonizar la constante derivativa, se obtuvo un resultado muy bueno en el control de la fuerza. Aunque se presentaba un error de estado estable, el valor real aumentaba con la pendiente deseada, lo que me entregaba un ensayo con buenas condiciones y un muy buen control, teniendo en cuenta que se trataba de un servo de fuerza realizado con transductores de presión, los cuales presentan un alto grado de ruido, lo que hace que el control sea un poco más difícil de lograr.

Figura 121. Servo de fuerza sintonizado



Fuente. Autores

Aunque la constante integral me elimina el error en estado estable, en esta ocasión fue inevitable este error, además que si aumentamos esta constante se producía inestabilidad del sistema.

8. PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para el ensayo de tensión en probetas metálicas teniendo en cuenta las disposiciones de las normas de tensión y compresión vigentes.

Para ello se utilizaron probetas de medidas estándar (se adjunta en los anexos el plano de la probeta estándar), las cuales son las recomendadas para las mordazas hidráulicas con la que cuenta la maquina Instron.

8.1 PROCEDIMIENTO

Las pruebas son realizadas por medio de la interfaz grafica, siguiendo el procedimiento diseñado por medio del software programado en LabView, para el cual se adjunta un manual de operación y manejo para llevar a cabo paso a paso el procedimiento del ensayo de tracción.

8.1.1 Encendido de la maquina.

Se debe llevar a cabo el encendido de la maquina el cual se puede realizar de forma manual o digital. Verificar el encendido y correcto funcionamiento de la bomba y ventilador de la torre de enfriamiento, encendido del motor y bomba hidráulica, accionamiento de la presión de trabajo (sistema en no venteo) y manifold.

8.1.2 Selección de la velocidad de la prueba.

Para realizar el ensayo de tracción se debe seleccionar la velocidad de aplicación de la fuerza que depende del modulo de elasticidad de Young del material a probar. Se puede seleccionar la velocidad recomendada para la prueba de $10 \text{ (N/mm}^2\text{)*s}^{-1}$ ó alguna otra velocidad deseada, la cual debe estar en el rango de velocidad permitido por la norma que la rige.

8.1.3 Agarre de la probeta.

El agarre de la probeta se lleva a cabo por medio de las mordazas hidráulicas, para las cuales se debe tener cuidado, según el diseño de estas, en tarar la válvula de seguridad a la presión de operación de 2000 Psi.

El sistema de mordazas hidráulicas se encuentra diseñado para soportar pruebas con materiales de 12.5 mm de sección y resistencias máximas a la tracción de 110 Kg/mm² (152000 Psi).

Figura 122. Mordazas hidráulicas.

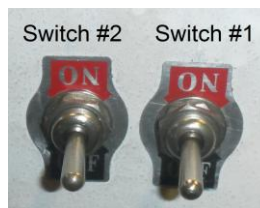


Fuente. Autores

Primero se realiza el agarre de la probeta a la mordaza hidráulica superior. Se debe introducir la probeta en la mordaza hasta hacer coincidir el borde de la tapa de alineamiento con el cambio de sección de la probeta, acto seguido se acciona el Switch # 1, que acciona el cerrado de la mordaza. Se debe tener especial cuidado en que la probeta no quede muy afuera ni muy adentro.

A continuación se realiza el posicionamiento del cilindro (control de posición), acercándolo, al extremo inferior de la probeta, de la misma manera haciendo coincidir el borde y accionando el Switch # 2 para llevar a cabo al agarre y cierre y agarre de la mordaza inferior.

Figura 123. Accionadores de las mordazas hidráulicas.



Fuente. Autores

Después de verificar el correcto agarre de la probeta se dispone a pasar al servo control de la fuerza, en el cual aplicara una fuerza a la probeta, incrementándola gradualmente esta fuerza en el tiempo hasta llevar a cabo la rotura y falla de la probeta.

Después de la falla o rotura de la probeta, se lleva a cabo la retirada de la probeta por abriendo las mordazas superior e inferior por medio del Switch # 1 y Switch # 2, respectivamente.

Por último se lleva a cabo el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en el ensayo.

8.2 PRUEBA DE TENSIÓN PARA MATERIAL DUCTIL

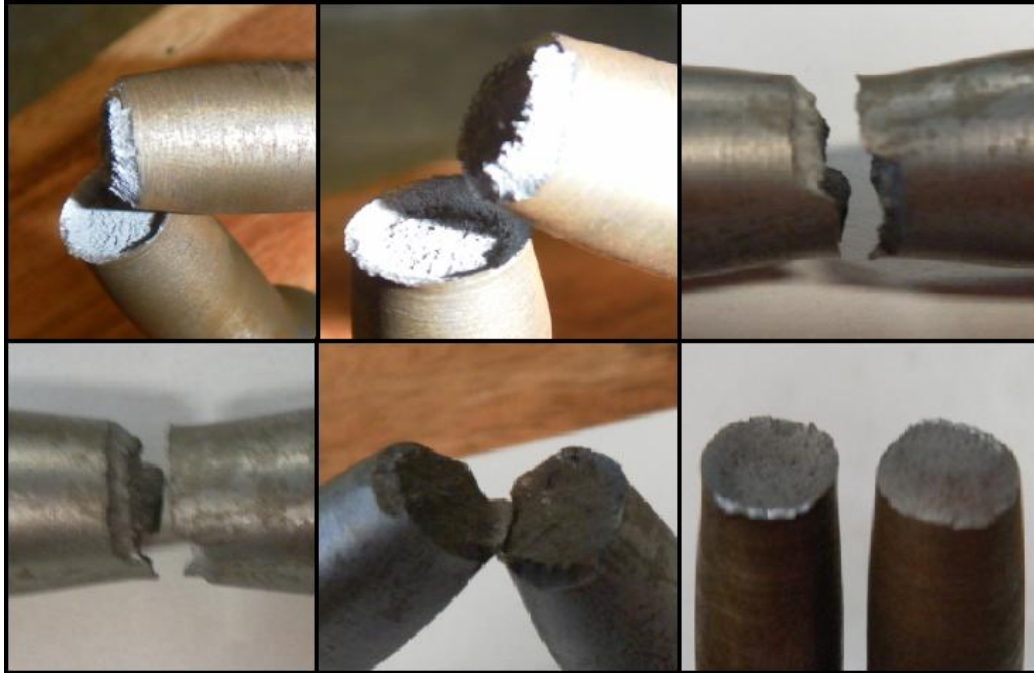
En este caso se realizaron las pruebas de tensión para material dúctil con probeta estándar mecanizada de diámetro 12.5 mm en acero AISI-SAE 1045.

Para el acero dúctil AISI-SAE 1045 que presenta un modulo de elasticidad de Young de 210 GPa, la Velocidad de aplicación de fuerza de la maquina según la norma NTC 2, debe estar en el rango correspondiente de 6 a 30 N/mm² por segundo, el prueba se realizo a una velocidad recomendada de aplicación de esfuerzos de 10 N/mm² por segundo.

El ensayo desde el agarre de las mordazas hasta la rotura de la probeta, a esta velocidad de aplicación de esfuerzos es realizado en 3 minutos aproximadamente. Las pruebas en probeta dúctil se realizaron satisfactoriamente, presentando rotura en todas las probetas y presentando las características físicas típicas de la rotura de un material tipo dúctil.

En la figura 124, se puede observar que la probeta presenta una rotura o falla típica debido a un esfuerzo cortante, característica de un material dúctil. En el cual la rotura se observa en un ángulo con respecto al eje longitudinal de la misma.

Figura 124. Rotura en probeta dúctil



Fuente. Autores

En la figura 125 se puede observar otra de las características físicas en probeta dúctil que se pudo observar en la prueba es el encuellamiento o zona de estricción de la probeta, que es cuando se presenta la disminución de área de la sección transversal localizada.

Figura 125. Zona de estricción



Fuente. Autores

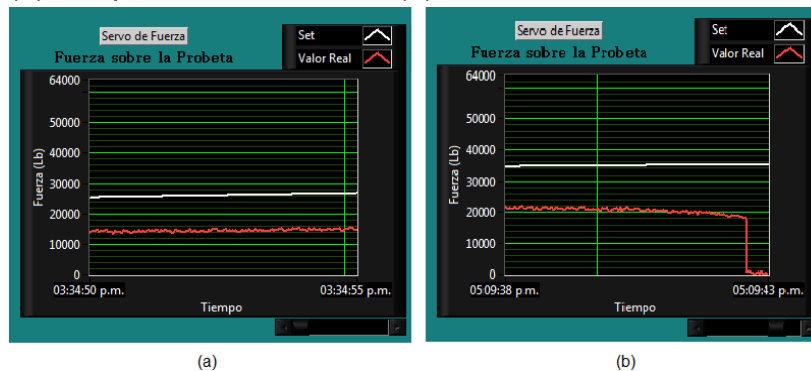
8.2.1 Análisis e interpretación de los datos.

En parte de servo de fuerza en realización del ensayo, se le aplica una carga gradualmente creciente a una velocidad constante. En la figura 126(a), se observa en la línea blanca la señal de entrada (set point) en rampa y en la línea roja, el

valor real de la fuerza ejercida a la probeta. El valor real responde a la señal de entrada en rampa siguiéndola y manteniendo la misma pendiente de variación de la fuerza en el tiempo, lo que quiere decir que se está ejerciendo un buen control de fuerza, a la velocidad de variación deseada.

En la figura 126(b) se puede observar la disminución de la fuerza aplicada a la probeta antes de que falle (debido a la disminución del área) y la fuerza en el momento de la rotura de la probeta, que ocurre alrededor de las 20000 lb.

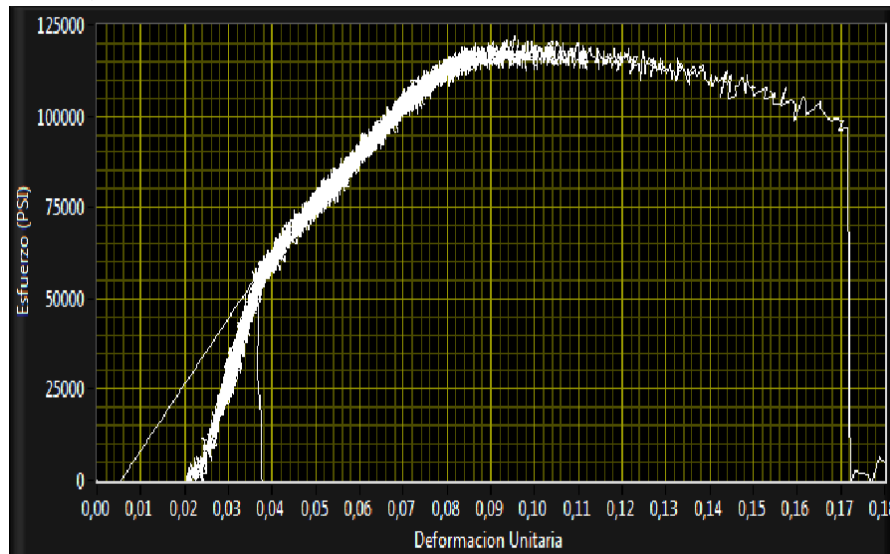
Figura 126. (a) Respuesta del sistema, (b) Fuerza al ocurrir la rotura



Fuente. Autores

El diagrama esfuerzo deformación obtenido al final de la prueba por medio de LabView se muestra en la figura 127.

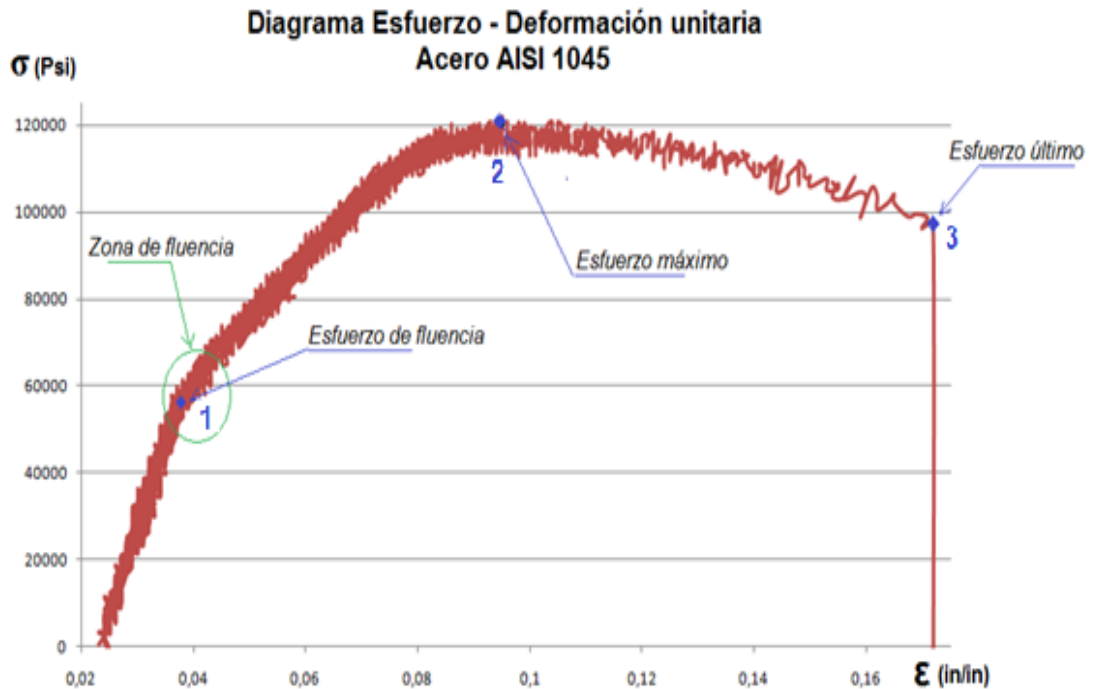
Figura 127. Diagrama esfuerzo deformación (probeta dúctil) obtenido de LabView



Fuente. Autores

De los datos obtenidos de la prueba, tabulados en la hoja de cálculo, archivo tipo .xlsx de Excel, se obtiene la grafica deformación esfuerzo por este medio como se muestra en la figura 128. En el diagrama obtenido del ensayo para el acero AISI 1045, se puede observar que presenta un buen acercamiento a la curva típica deformación esfuerzo para un material dúctil. El cual presenta al inicio de la prueba una deformación directamente proporcional al esfuerzo aplicado, según la ley de Hooke, la linealidad en la zona elástica continua hasta el punto 1, en donde se presenta el esfuerzo de fluencia y empieza la zona de fluencia que presenta fluctuación de la carga con una relativa deformación. Al salir de esta zona se observa que empieza a aumentar el esfuerzo del material debido al endurecimiento por deformación, esto ocurre hasta llegar al esfuerzo máximo (punto 2), en donde disminuye el esfuerzo debido a la reducción de área localizada, que lleva a la falla inminente de la probeta, hasta el esfuerzo ultimo (punto 3).

Figura 128. Diagrama Esfuerzo deformación obtenido.



Fuente. Autores

➤ **Resultados obtenidos del ensayo.**

- ✓ Esfuerzo de fluencia: $\sigma_y = 54\ 000$ Psi.
- ✓ Esfuerzo máximo: $\sigma_m = 118\ 000$ Psi.

- ✓ Esfuerzo rotura: $\sigma_B = 98\ 000$ Psi.
- ✓ Elongación: 15.2 % (en 62.5 mm).

➤ **Valores teóricos obtenidos de tabla.**

Tomamos los valores teóricos de tablas, dados por el fabricante para un acero AISI 1045 tenemos:

- ✓ Esfuerzo de fluencia: $\sigma_y = 50\ 000$ Psi.
- ✓ Esfuerzo máximo: $\sigma_m = 82\ 000$ Psi.
- ✓ Elongación: 16% (en 50 mm).

Al analizar los resultados obtenidos del ensayo y compararlos con los valores reales obtenidos de fabricantes se puede observar una buena aproximación entre estos, presentando una gran similitud en las propiedades tanto físicas como mecánicas del material. Con lo que podemos concluir que los resultados obtenidos del la prueba fueron satisfactorios para el ensayo realizada.

8.3 PRUEBA DE TENSIÓN PARA MATERIAL FRÁGIL

Para el caso del ensayo de tensión para material frágil, las pruebas se realizaron con probeta estándar mecanizada de diámetro 12.5 mm en fundición nodular.

Para el material fundición nodular, que presenta un modulo de elasticidad de Young de 160 GPa, la Velocidad de aplicación de fuerza de la maquina según la norma NTC 2, debe estar en el rango correspondiente de 6 a 30 N/mm² por segundo, el prueba se realizo a una velocidad recomendada de aplicación de esfuerzos de 10 N/mm² por segundo.

Para el ensayo de tensión para probeta frágil, las pruebas se realizaron satisfactoriamente, presentando rotura en todas las probetas mostrando las características físicas típicas para la rotura de un material tipo frágil y la curva de típica esfuerzo deformación esperada para materiales frágiles.

Las cuales presentan una deformación muy mínima y un porcentaje de reducción de área relativamente pequeño, por esto no se forma las zona de encuellamiento o reducción de área pronunciada como es el caso de un material dúctil y la falla se da en la probeta debido a esfuerzos normales. Por lo tanto, la rotura de la probeta se presenta un corte transversal al eje longitudinal de la probeta en el que está siendo aplicada la carga.

Figura 129. Rotura en probeta frágil.



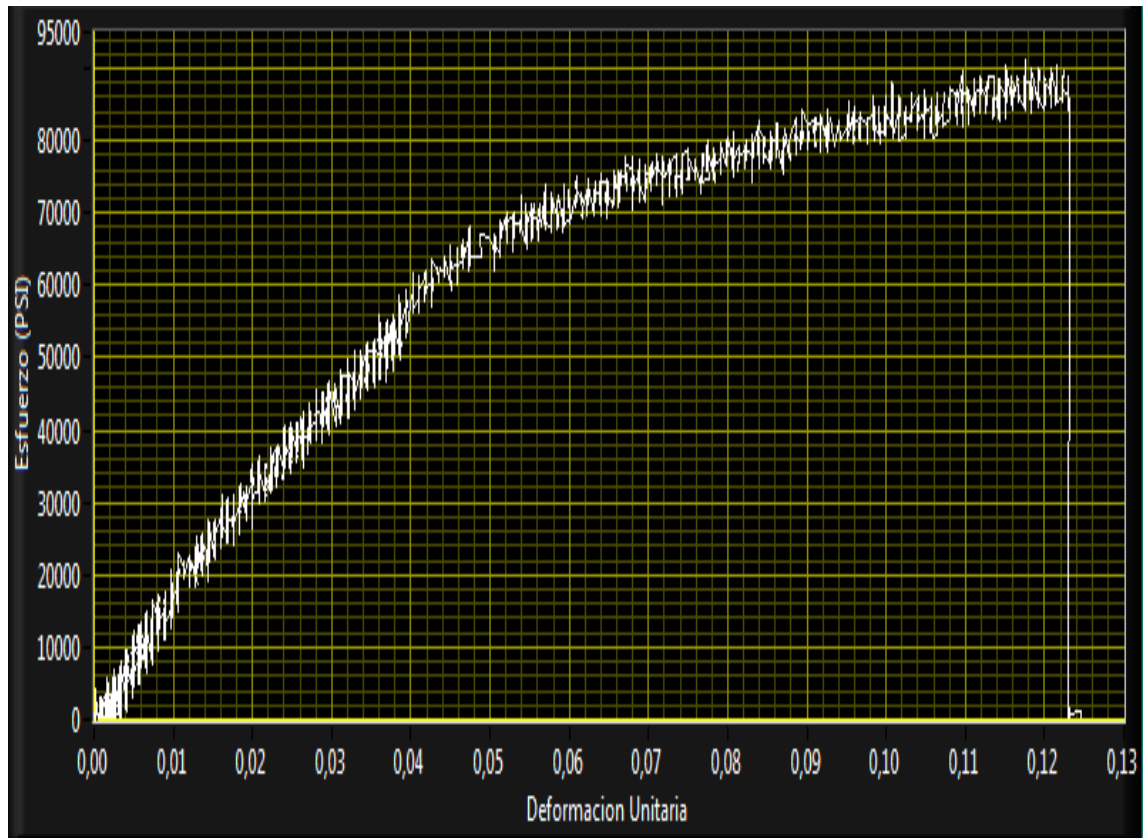
Fuente. Autores

8.3.1 Análisis e interpretación de datos.

El sistema de control de servo de la fuerza durante el ensayo fue realizado satisfactoriamente. En donde se consigue una variación de la fuerza real aplicada a la probeta, que tiende a seguir la velocidad constante de aplicación de esfuerzos deseada por la rampa de entrada, ejerciendo un control adecuado, cumpliendo así con los requisitos de variación de esfuerzos de la prueba.

El diagrama esfuerzo deformación obtenido al final de la prueba por medio de LabView se muestra en la figura 130. Esta muestra una curva típica de un diagrama esfuerzo deformación unitaria para un material frágil, en el cual no se presenta la zona de fluencia apreciable, además de que el esfuerzo ultimo de rotura es igual el esfuerzo máximo a la tracción, debido a que no se presenta zona de estricción en la probeta. En el diagrama se puede apreciar al inicio cuando empieza a aplicarse la carga como el esfuerzo aumenta proporcionalmente a la deformación según la ley de Hooke.

Figura 130. Diagrama esfuerzo deformación (probeta frágil) obtenido de LabView

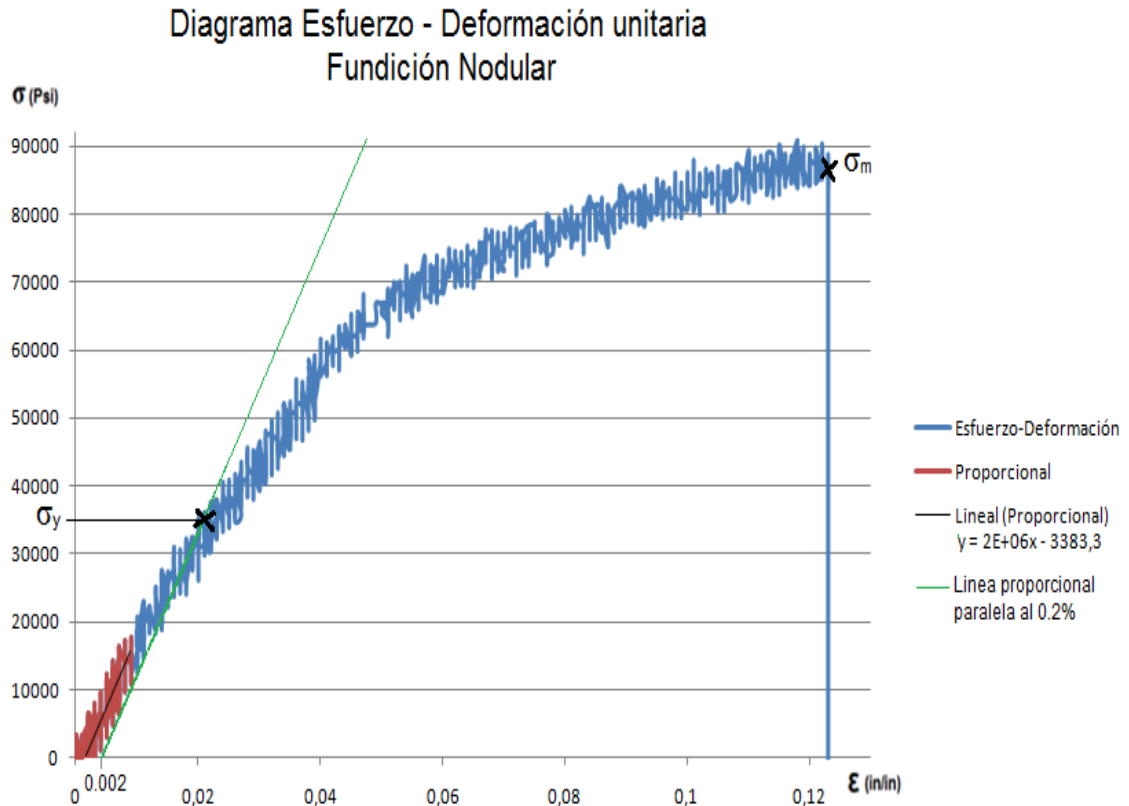


Fuente. Autores

Debido a que la fundición nodular es un material frágil, no se puede detectar el fácilmente el punto donde el material cambia su comportamiento de elástico a plástico. Para esto se determina el esfuerzo de fluencia convencional como se muestra en la figura 131. Se traza una línea paralela a la línea proporcional del diagrama pero corrida del origen 0.2% de deformación, el esfuerzo de fluencia convencional será donde interceptan esta línea y la curva del diagrama.

También se puede observar en el diagrama deformación esfuerzo el punto de rotura, el cual es el máximo esfuerzo a la tracción soportado por el material. Los resultados obtenidos de la prueba se listan a continuación:

Figura 131. Diagrama esfuerzo deformación y limite elástico convencional



Fuente. Autores

➤ **Resultados obtenidos del ensayo.**

- ✓ Esfuerzo de fluencia: $\sigma_y = 35\ 000$ Psi.
- ✓ Esfuerzo máximo: $\sigma_m = 87\ 000$ Psi.
- ✓ Elongación: 12.2 % (en 62.5 mm).

➤ **Valores teóricos obtenidos de tabla**

Tomamos los valores teóricos de tablas, dados por el fabricante para fundición nodular tenemos:

- ✓ Esfuerzo de fluencia: $\sigma_y = 40\ 000$ Psi.
- ✓ Esfuerzo máximo: $\sigma_m = 82000$ Psi.
- ✓ Elongación a la rotura: 6%.

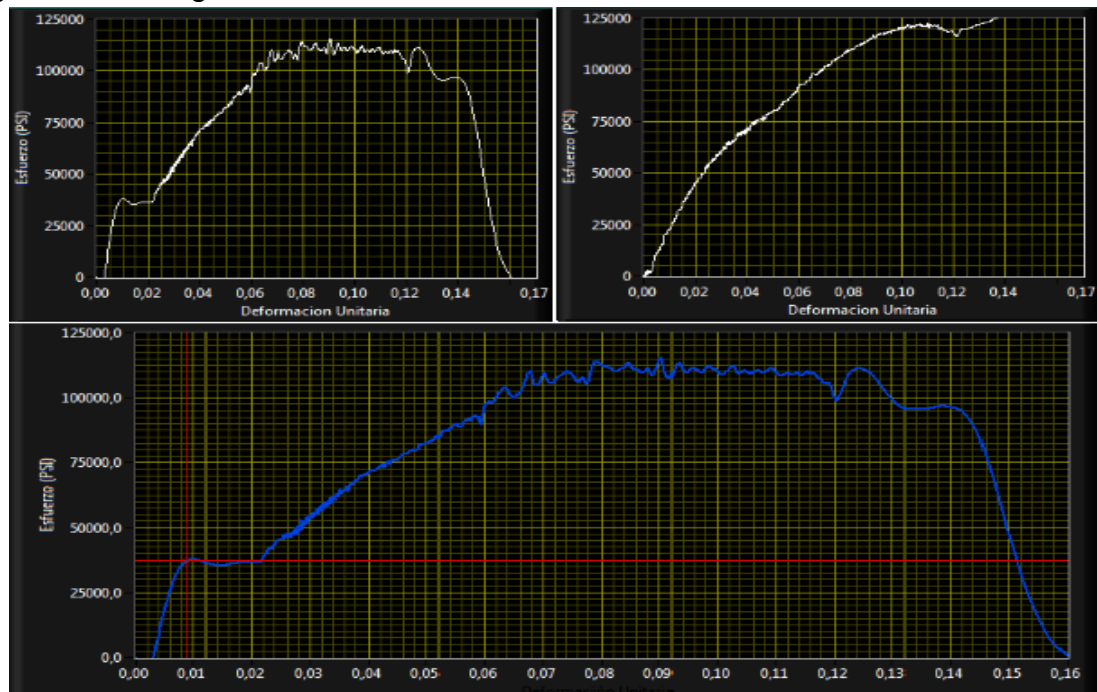
Realizando la comparación entre los valores obtenidos del ensayo de tensión y los valores reales obtenidos de fabricantes, se puede observar una gran similitud en las propiedades tanto físicas como mecánicas del material. Con lo que podemos

concluir que los resultados obtenidos de la prueba fueron satisfactorios para el ensayo realizado.

En los diagramas de esfuerzos deformación unitaria presentados anteriormente, obtenidos de los ensayos de tracción, como se puede observar al graficar la curva, esta presenta una banda de oscilación ancha. Esto es debido mayormente al ruido que pueda presentar los elementos de medición, en nuestro caso el transductor de posición y los transductores de presión. Además, de que la fuerza es medida indirectamente por medio de la presión, siendo este un sistema muy fluctuante.

Para esto fue considerado añadir al sistema de control un filtrado de las señales de los transductores (posición y presión), Obteniendo unos notorios resultados en el trazo de la curva esfuerzo deformación, como se puede observar en la figura 132, reduciendo de una manera favorable la banda de ruido que anteriormente presentaba. Como también mejorando satisfactoriamente el sistema de control, obteniendo una mayor precisión en el sistema.

Figura 132. Diagrama esfuerzo deformación con filtros.



Fuente. Autores

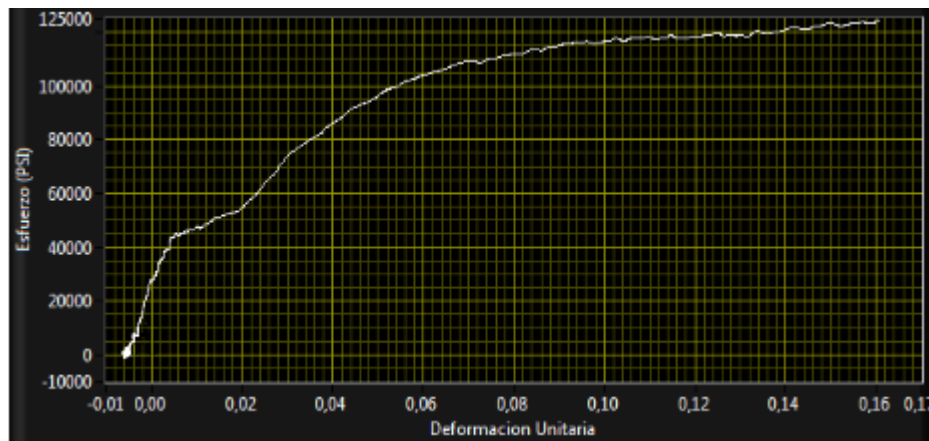
8.4 PRUEBA DE COMPRESION

El ensayo consistió en aplicarle a la probeta una fuerza axial de compresión gradualmente aplicada hasta presentar un centímetro de deformación, sin llevarla a la falla inminente de la probeta, con esto se busca únicamente observar el comportamiento elástico y plástico del material mientras este no falle por pandeo o aplastamiento, en donde no se pueden observar adecuadamente las propiedades físicas del material.

La maquina permitirá un centímetro máximo de deformación por compresión, en este instante se detendrá la prueba. Esto se realizo debido a motivos de seguridad, ya que la probeta se puede fracturar por pandeo y despedir material a los alrededores, pudiendo ocasionar lesiones a operario u observadores.

La prueba de compresión fue realizada utilizando la probeta estándar de tensión. En la figura 133, se puede observar la grafica del diagrama esfuerzo deformación obtenidos del ensayo de compresión realizado.

Figura 133. Diagrama esfuerzo deformación (prueba de compresión)



Fuente. Autores

Los ensayos de compresión fueron realizados satisfactoriamente, obteniendo buenos resultados característicos del material y de la prueba. En el diagrama esfuerzo deformación se puede observar como inicialmente la probeta presenta deformación elástica, proporcional a la carga aplicada, según la ley de Hooke, hasta llegar a un esfuerzo alrededor de los 42000 Psi, en donde la probeta empieza a presentar ya deformación plástica, en este punto se observa un endurecimiento por deformación, hasta llevarla a una falla por pandeo sin rotura.

9. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

La maquina universal de ensayos INSTRON con la que se cuenta en la escuela, me permite realizar ensayos de tracción de buena calidad mediante servo de posición y fuerza, esta máquina también se puede adaptar para realizar ensayos de compresión, pero de debe tomar precauciones con las mordaza y con el material utilizado en la prueba.

Se pudo determinar mediante la prueba de respuesta a la frecuencia aplicada al sistema que la prensa no está diseñada para responder a frecuencias mayores de 2Hz, es decir que no es posible realizar ensayos de fatiga.

El sistema de servo válvula y cilindro del que consta la prensa es un sistema no lineal de segundo orden, por lo tanto es muy difícil establecer una función de transferencia por métodos analíticos, y por lo tanto se realizó la sintonización de los servos de posición y fuerza por el método del tanteo.

Para la sintonización del servo de posición se utilizó un control tipo PD con el cual el sistema respondió de forma adecuada. En el servo de fuerza se utilizó un control tipo PI que respondió de forma adecuada para entradas de comando tipo escalón, pero cuando se implementó una estrada tipo rampa, el sistema empezó a oscilar debido al cambio constante de comando, por lo tanto se implementó al sistema para el servo de fuerza un control tipo PID. La parte derivativa del control se encargó de suavizar la respuesta ante los cambios constantes de comando de entrada, presentándose una respuesta satisfactoria durante el ensayo.

El lenguaje de programación utilizado en la automatización fue LabView, el cual resultó ser un programa muy asequible y de fácil aprendizaje, que ofrece muchas herramientas que facilitan la concepción y realización de diversos proyectos. Durante la programación de los ensayos se utilizó el entorno que ofrece LabView, permitiendo crear una interfaz mucho más amigable y de fácil entendimiento para cualquier persona que lo utilice aun por primera vez.

Al Observar el diagrama deformación esfuerzo obtenido en el ensayo de tracción realizado, el cual presenta la curva característica típica tanto para materiales dúctiles como frágiles. En estos se identifica claramente las propiedades mecánicas del material y el comportamiento cuando se deforma elástica y plásticamente

10. RECOMENDACIONES

En las curvas de esfuerzo vs. deformación obtenidas se observó una alta presencia de ruido aun utilizando filtros digitales, por lo tanto este ruido se debe a la calidad de los transductores de presión, por lo tanto se recomienda para un futuro el uso de celda de carga, la cual genera una señal de salida mucho más limpia de ruido y me da la ventaja de medir directamente la fuerza.

Se debe estar siempre atento a la correcta colocación de las probetas en las mordazas para asegurar su correcto agarre y evitar daños en las mordazas, a demás de tener presente de no utilizar probetas cuyo esfuerzo de rotura supere la capacidad máxima de diseño de las mordazas.

La velocidad de aplicación de esfuerzos influye directamente en los resultados de la prueba, por lo tanto se recomienda no utilizar velocidades demasiado bajas pues estas producen un modulo de elasticidad no esperado, debido a la deformación por flujo que se da cuando se somete la probeta a una carga muy prolongada.

BIBLIOGRAFÍA

ASKELAND, Donald. Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Editorial Thomson, 3ª edición, 1999.

BEER, Ferdinand P. Mecánica De Materiales, Tercera Ed. México, MacGraw-Hill, 1986.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. NTC 2: Ensayo de tracción para materiales metálicos, a temperatura ambiente. Tercera actualización. Santafé de Bogotá D.C

NATIONAL INSTRUMENTS, Manual de usuario NI USB 6211, 2009.

OGATA, Katsuhiko. Dinámica de Sistemas. México: Prentice-Hall, 1987.

REXROTH, Mannesmann. Training Hidráulico, Vol. 2: Técnica de válvulas proporcionales y de servoválvulas, 1986.

REXROTH, Mannesmann. Training Hidráulico, Vol. 1: Fundamentos y componentes de la oleohidráulica, 1991.

VICKERS. Manual de Oleohidráulica Industrial, España, Editorial Blume, 1981.

VICKERS. Manual para servoválvulas y válvulas proporcionales en cadena cerrada, España, Editorial Blume, 1981.

ANEXOS

ANEXO A. CATALOGO TEMPOSONIC

Temposonics®

Magnetostrictive, Absolute, Non-contact
Linear-Position Sensors

E-Series Model EP
Analog / Digital-Pulse (Start/Stop) Outputs

Data Sheet



Document Part Number
550741 Revision C



Model EP profile-style position sensor

FEATURES

- Linear, Absolute Measurement
- Non-Contact Sensing Technology
- Non-Linearity Less Than 0.02%
- Repeatability Within 0.001%
- Two Outputs Available:
 - Analog (Voltage/Current) Forward or Reverse Acting
 - Digital Position Output: Start/Stop Pulse
- Simple Sensor Parameter Upload (Digital-Pulse Output)
- Measuring Range From 50 mm (2 in.) to 1525 mm (60 in.)
- EMI Shielded and CE Certified

BENEFITS

- Rugged, Cost Effective, Precise, and Durable Non-Wear Alternative to Linear Potentiometers
- Simultaneous Multi-Position Measurements for Digital-Pulse (Start/Stop) Outputs
- Over voltage Protection to 36 Vdc and Polarity Protection up to -30 Vdc

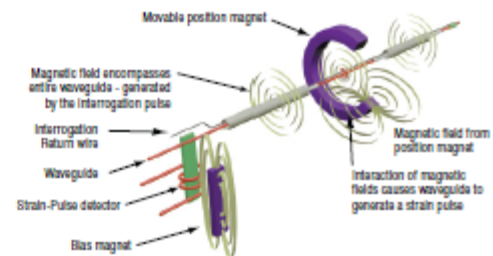
APPLICATIONS

- Continuous Operation in Harsh Industrial Conditions

TYPICAL INDUSTRIES

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

Time-based Magnetostrictive position sensing principle



Benefits of Magnetostriction

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

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

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

Product overview

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

The Temposonics model EP sensor consists of a robust aluminum profile-style housing that offers flexible mounting configurations and easy installation. It is ideal for demanding industrial applications where simple, reliable non-contact feedback is essential.

Product specifications

Parameters	Specifications
OUTPUT	
Measured output variables:	Position
Resolution:	Analog: Infinite (restricted by output ripple) Digital-pulse: 0.1, 0.01 and 0.005 mm (controller dependent)
Non-linearity:	< ± 0.02% full stroke (minimum ± 60 µm)
Repeatability:	< ± 0.001% full stroke (minimum ± 5 µm)
Outputs:	Analog (voltage or current) Voltage: 0 to 10 Vdc and 10 to 0 Vdc (controller input resistance RL > 5k Ohm) Current 4 to 20 mA or 20 to 4 mA (min/max. load: 0/500 Ohm) Digital-pulse (start/stop): RS-422 differential signal Serial parameter upload available for: Measuring range, offset, gradient, status
Position measurement:	Measurement stroke lengths: 50 mm (2 in.) to 1525 mm (60 in.) Update Frequency: Voltage or Current: > 1.5 kHz Start/Stop: Controller dependent

Parameters	Specifications
ELECTRONICS	
Operating voltage:	+24 Vdc nominal: -15% or +20% Polarity protection: up to -30 Vdc Over voltage protection: up to 36 Vdc Current drain: Analog: 50 - 140 mA Start/Stop: 50 - 100 mA (Stroke length dependent) Dielectric withstand voltage: 500 Vdc (DC ground to machine ground)
ENVIRONMENTAL	
Operating conditions:	Operating temperature: -40 °C (-40 °F) to 75 °C (167 °F) Relative humidity: 90% no condensation Ingress protection: IP 65 (when mating connector is correctly fitted)
EMC test:	Emissions: IEC/EN 50081-1 Immunity: IEC/EN 50082-2 IEC/EN 61000-4-2/3/4/6, Level 3/4, criterium A, CE qualified
Shock rating:	100 g (single hit)/ IEC standard 68-2-27 (survivability)
Vibration rating:	10 g/10 to 2000 Hz, IEC standard 68-2-6 (operational)
Wiring	
Connection type:	6-pin DIN (M16) male D60 integral connector

PROFILE-STYLE SENSOR	
Electronic head:	Aluminum housing
Sensor extrusion:	Aluminum (Temposonics profile style)
Mounting:	Adjustable mounting feet or T-slot nut (M5 threads) in base channel
Magnet type:	Captive-sliding magnets, open-ring magnet or block magnet

Outputs

ANALOG (VOLTAGE/CURRENT) OUTPUTS

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

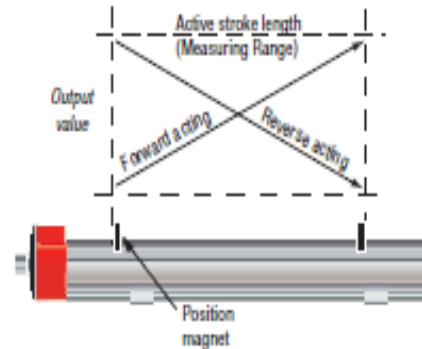


Figure 1. Analog Output signals

DIGITAL (START/STOP) OUTPUTS

The Temposonics E-Series Model EP digital-pulse (start/stop) output sensor requires a start signal from a controller or interface module to initiate the measurement cycle. The sensor generates a stop signal at the end of the measurement cycle that is used to stop the controller's counter clock.

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

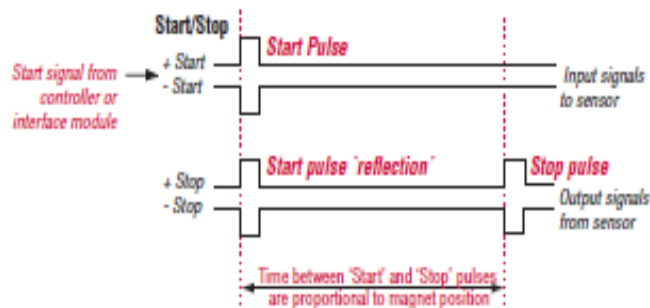


Figure 2. Start/stop output signals (RS-422 differential pairs)

Communication and programmability

SENSOR PARAMETER UPLOAD FEATURE

For applications using smart sensor interfaces, the E-Series Model EP with digital-pulse output (option R3) comes with the ability to perform sensor parameter uploads. This feature replaces the task of entering sensor data manually saving time and preventing possible entry errors during start-up or for system maintenance.

The upload feature supports the following sensor parameters:

- Measuring range
- Offset
- Gradient (Inverse speed of sensing pulse)
- Status

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

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

Model EP Rod-and-Cylinder sensor dimension references

MODEL EP, ROD-AND-CYLINDER SENSOR

Drawing is for reference only, contact applications engineering for tolerance specific information.

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

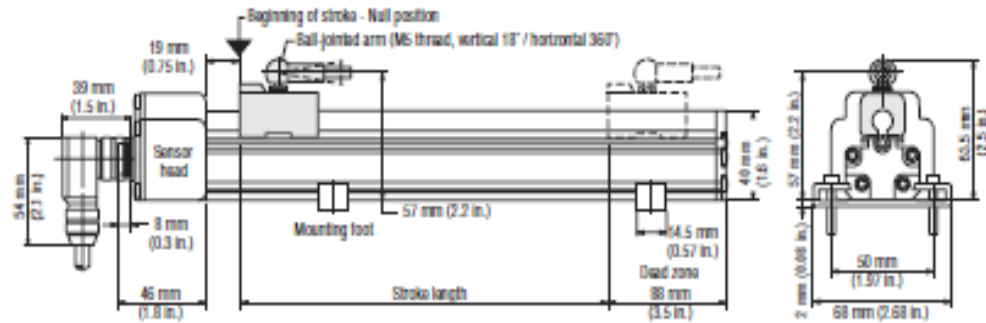


Figure 3. E-Series Model EP sensor dimension reference (Shown with Style S captive-sliding magnet)



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

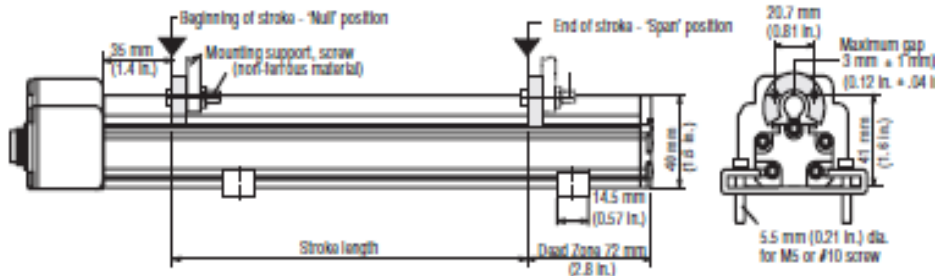


Figure 5. E-Series Model EP sensor dimension reference (Shown with Style M open-ring magnet)

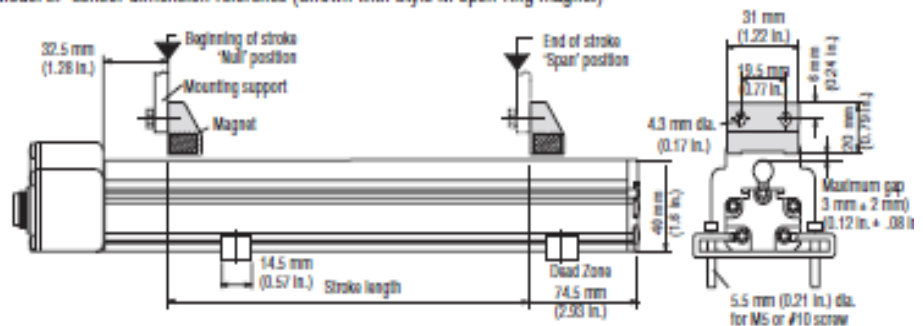


Figure 6. E-Series Model EP sensor dimension reference (Shown with Style L Block magnet)

Sensor Mounting

Sensor mounting

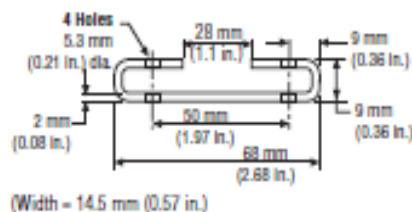
MODEL EP SENSOR MOUNTING

Temposonics model EP sensors are mounted onto the machine with moveable mounting feet. Mounting feet slide into side grooves and should be evenly distributed along the sensor extrusion to best secure the sensor for each particular application.

Notes:

1. Model EP sensors include two mounting feet, (part number 400802), for stroke lengths up to 1250 mm (50 in.). One additional mounting foot is included for longer stroke lengths.
2. MTS recommends using 10-32 cap screws (customer supplied) at a maximum torque of 44 in. lbs. when fastening mounting feet.

Model EP sensor mounting and installation reference

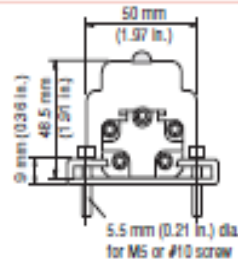


Mounting method

Mounting feet, standard (304 SS)
Rod-and-Cylinder sensor mounting
for sensor model EP

Part number

400802



Model EP mounting configuration
using mounting feet and screws

Mounting
feet,
part number
400802

Model EP connections and wiring

SENSOR INTEGRAL CONNECTOR (D60 MALE) PINOUT/WIRE COLOR CODE

The E-Series Model EP sensor connects directly to a controller or interface module with the standard male, 6-pin Integral connector and an extension cable as described in 'Table 1'.

Attention:

The EP sensor's aluminum housing has an anodic coating which prevents the sensor's mounting feet, (part no. 400802) from providing the appropriate grounding. A grounding lug, (see 'Figure 3') is provided near the connector end of the sensor for a convenient connection to earth ground. The appropriate grounding of the cable shield is required at the controller end.



Figure 3. EP Sensor grounding lug location



Integral D6 connector (male) as viewed from the end of the sensor

Pin no.	Extension Cable Wire color	Signal/Function Digital-pulse outputs	Signal/Function Analog outputs†
1	Gray	(-) Stop	0 to 10 Vdc or 4 to 20 mA
2	Pink	(+) Stop	Return for pin 1
3	Yellow	(+) Start	10 to 0 Vdc or 20 to 4 mA
4	Green	(-) Start	Return for pin 3
5	Red or Brown	+24 Vdc (+20% / -15%)	+24 Vdc (+20% / -15%)
6	White	DC Ground (0 Vdc)	DC Ground (for supply)

† The sensor model number indicates the specific analog outputs that are provided.

Table 1. ER sensor connector pinout and extension cable wiring

ANEXO B. CATALOGO REGULADOR DE TENSION



L7800 SERIES

POSITIVE VOLTAGE REGULATORS

- OUTPUT CURRENT TO 1.5A
- OUTPUT VOLTAGES OF 5; 5.2; 6; 8; 8.5; 9; 10; 12; 15; 18; 24V
- THERMAL OVERLOAD PROTECTION
- SHORT CIRCUIT PROTECTION
- OUTPUT TRANSITION SOA PROTECTION

DESCRIPTION

The L7800 series of three-terminal positive regulators is available in TO-220, TO-220FP, TO-220FM, TO-3 and D²PAK packages and several fixed output voltages, making it useful in a wide range of applications. These regulators can provide local on-card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation. Each type employs internal current limiting, thermal shut-down and safe area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltage and currents.

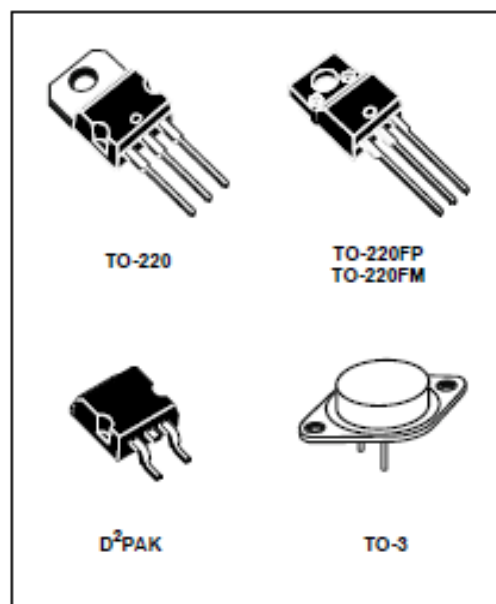


Figure 1: Schematic Diagram

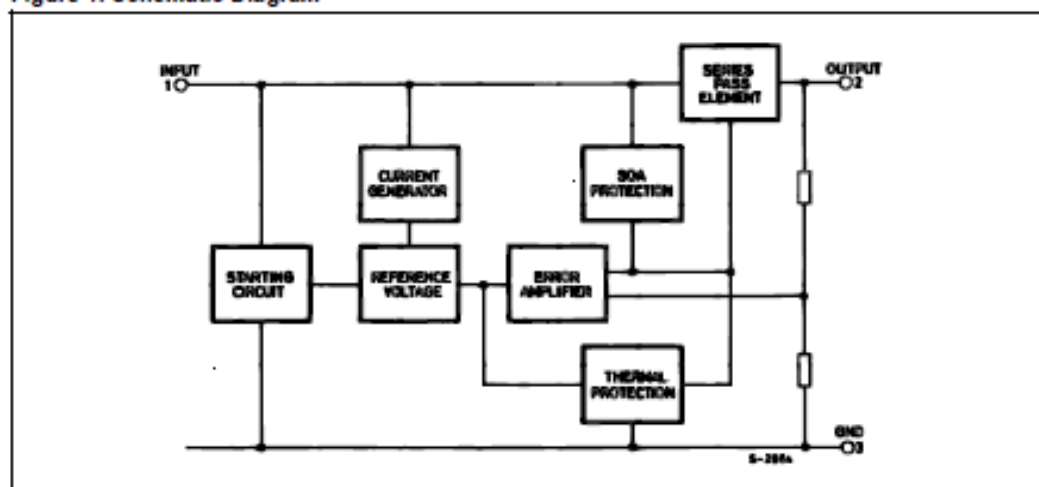


Table 7: Electrical Characteristics Of L7812 (refer to the test circuits, $T_J = -55$ to 150°C , $V_I = 19\text{V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $C_I = 0.33\ \mu\text{F}$, $C_O = 0.1\ \mu\text{F}$ unless otherwise specified).

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_O	Output Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	11.5	12	12.5	V
V_O	Output Voltage	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 15.5\text{ to }27\text{ V}$	11.4	12	12.6	V
$\Delta V_O(\%)$	Line Regulation	$V_I = 14.5\text{ to }30\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			120	mV
		$V_I = 16\text{ to }22\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			60	
$\Delta V_O(\%)$	Load Regulation	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			100	mV
		$I_O = 250\text{ to }750\text{ mA}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			60	
I_d	Quiescent Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$			6	mA
ΔI_d	Quiescent Current Change	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$			0.5	mA
		$V_I = 15\text{ to }30\text{ V}$			0.8	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output Voltage Drift	$I_O = 5\text{ mA}$		1.5		mV/ $^\circ\text{C}$
eN	Output Noise Voltage	B = 10Hz to 100KHz $T_J = 25^\circ\text{C}$			40	μVV_O
SVR	Supply Voltage Rejection	$V_I = 15\text{ to }25\text{ V}$ $f = 120\text{Hz}$	61			dB
V_d	Dropout Voltage	$I_O = 1\text{ A}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		2	2.5	V
R_O	Output Resistance	$f = 1\text{ KHz}$		18		m Ω
I_{sc}	Short Circuit Current	$V_I = 35\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.75	1.2	A
I_{scp}	Short Circuit Peak Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$	1.3	2.2	3.3	A

(*) Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

Table 8: Electrical Characteristics Of L7815 (refer to the test circuits, $T_J = -55$ to 150°C , $V_I = 23\text{V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $C_I = 0.33\ \mu\text{F}$, $C_O = 0.1\ \mu\text{F}$ unless otherwise specified).

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_O	Output Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	14.4	15	15.6	V
V_O	Output Voltage	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 18.5\text{ to }30\text{ V}$	14.25	15	15.75	V
$\Delta V_O(\%)$	Line Regulation	$V_I = 17.5\text{ to }30\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			150	mV
		$V_I = 20\text{ to }26\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			75	
$\Delta V_O(\%)$	Load Regulation	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			150	mV
		$I_O = 250\text{ to }750\text{ mA}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			75	
I_d	Quiescent Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$			6	mA
ΔI_d	Quiescent Current Change	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$			0.5	mA
		$V_I = 18.5\text{ to }30\text{ V}$			0.8	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output Voltage Drift	$I_O = 5\text{ mA}$		1.8		mV/ $^\circ\text{C}$
eN	Output Noise Voltage	B = 10Hz to 100KHz $T_J = 25^\circ\text{C}$			40	μVV_O
SVR	Supply Voltage Rejection	$V_I = 18.5\text{ to }26.5\text{ V}$ $f = 120\text{Hz}$	60			dB
V_d	Dropout Voltage	$I_O = 1\text{ A}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		2	2.5	V
R_O	Output Resistance	$f = 1\text{ KHz}$		19		m Ω
I_{sc}	Short Circuit Current	$V_I = 35\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.75	1.2	A
I_{scp}	Short Circuit Peak Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$	1.3	2.2	3.3	A

(*) Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

ANEXO C. ACONDICIONADOR DE SEÑAL LVDT

PAXP
INDICADOR DE PROCESOS

RED LION CONTROLS 

CARACTERISTICAS

- Display de 5 dígitos de 14 mm de altura
- Dos rangos de entrada: 20 mA ó 10 V
- Rango de display de -19999 a 99999
- Alimentación para sensores 24 VCC
- Linealización con 16 segmentos
- Memoria de lecturas máxima y mínima
- Tiempos de respuesta de entrada y salida programables
- Integración en el tiempo de la señal de entrada
- Cinco teclas de función programables
- Tres entradas digitales programables
- Cuatro salidas de alarma (opcional)
- Salida de señal analógica (opcional)
- Comunicaciones y conectividad a buses (opcional)
- Configuración desde PC
- Panel frontal NEMA 4X/IP65



UL Recognized Component,
File # E179259



DESCRIPCION GENERAL

El PAXP puede cubrir un amplio espectro de requerimientos debido a su gran capacidad de operación y flexibilidad de programación. El instrumento emplea tecnología de avanzada para obtener lecturas estables y libres de comilmentos e incorpora características que proporcionan flexibilidad ahora y en el futuro con plaquetas enchufables opcionales. Esta plaquetas opcionales permiten configurar fácilmente las necesidades presentes, mientras que proporcionan la posibilidad de mejoras futuras a medida que las necesidades de control e indicación evolucionan.

El Indicador PAXP tiene dos rangos de entrada: 0 a 20 mA CC ó 0 a 10 V CC. Tiene una fuente de 24 VCC para alimentar los transmisores de señal. Linealización para entradas no-lineales mediante escalado en 16 puntos.

El indicador tiene una memoria de lecturas máxima y mínima con tiempo de captura de datos programable. El tiempo de captura se utiliza para evitar la detección de lecturas falsas de máximo y mínimo que pueden ocurrir durante el arranque del sistema bajo control o frente a eventos del proceso no usuales.

El integrador de la señal (totalizador) se puede utilizar para computar un producto tiempo-entrada. Puede utilizarse para proporcionar una lectura de flujo totalizado, pesaje de lotes, etc.

El indicador tiene hasta cuatro salidas de alarma, implementadas como tarjetas opcionales enchufables. Los distintos tipos de tarjeta proporcionan 2 salidas a relé (5 A), cuatro salidas a relé (3 A) o cuatro salidas de estado sólido a colector abierto NPN o PNP. Los puntos de alarma pueden configurarse en distintos modos para ajustarse a una gran variedad de requerimientos de control y alarma.

- Alta y baja absoluta, desvío alta y baja, banda
- Histéresis balanceada o desbalanceada
- Retardos a la conexión y desconexión
- Reposición automática o con retención
- Funcionamiento normal abierto o normal cerrado
- Selección de listas alternativas de valores de ajuste

También existen tarjetas de comunicaciones para facilitar la interconexión a buses de comunicación RS232, RS485 o DeviceNet. Se puede leer datos y modificar ajustes de alarmas a través de la interfase de comunicaciones. Además, la computadora remota puede controlar directamente las salidas del indicador, característica especialmente útil en las etapas de puesta en marcha, ajuste y mantenimiento del sistema. Con la tarjeta de comunicaciones instalada, se puede configurar todos los parámetros del PAX desde una PC mediante el software provisto. Los datos de configuración pueden archivarlos como referencia o para reconfiguración.

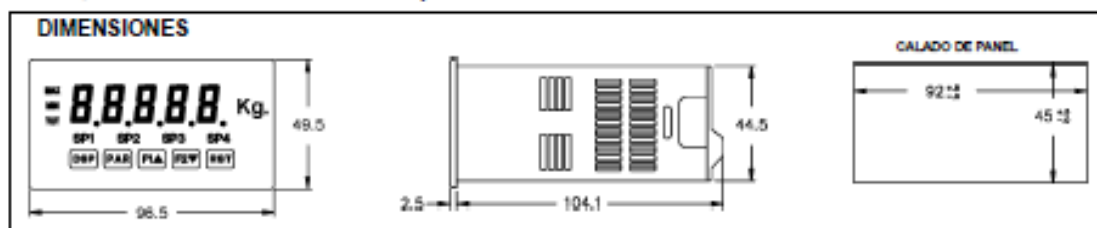
Otra tarjeta opcional proporciona salida analógica. Esta plaqueta proporciona salidas 0-10 VCC y 4-20 mA. Las salidas pueden escalarse en forma independiente del rango de entrada. Las características de las plaquetas de salida analógica son:

- La salida puede seguir a la entrada, el totalizador o las lecturas máxima o mínima.

- El periodo de actualización de la salida es programable.

Una vez configurado el indicador, la modificación de parámetros puede bloquearse en forma total o puede dejarse acceso a la modificación de los ajustes de alarma únicamente.

El PAXP se ha diseñado específicamente para ambientes industriales cumpliendo con los requerimientos de CE en cuanto a sensibilidad a ruidos y perturbaciones eléctricas. El panel frontal tiene una protección NEMA4 X/IP65.



PAXP

SILGE ELECTRONICA S.A.

1

ESPECIFICACIONES

1. **DISPLAY:** 5 dígitos LED rojos de 14 mm (-19999 a 99999)
 2. **ALIMENTACION:**
 Versiones CA (PAXP0000):
 Alimentación: 85 a 260 VCA, 50/60 Hz, 15 VA
 Aislación: 2300 Vrms durante 1 min a todas las entradas y salidas
 Versiones CC (PAXP0010):
 Alimentación CC: 11 a 36 VCC, 11 W
 (límite la temperatura de operación a 40 °C si la alimentación < 15 VCC y hay tres plaquetas instaladas)
 Alimentación CA: 24 VCA, ± 10%, 50/60 Hz, 15 VA
 Aislación: 500 Vrms durante 1 min a todas las entradas y salidas

3. **INDICADORES:**
 MAX - lectura máxima seleccionada
 MIN - lectura mínima seleccionada
 TOT - lectura del totalizador seleccionada, destella cuando se excede el rango del totalizador
 SP1 - salida de alarma 1 activa
 SP2 - salida de alarma 2 activa
 SP3 - salida de alarma 3 activa
 SP4 - salida de alarma 4 activa
 Unidades - etiqueta con indicación de unidades, con iluminación posterior controlada por programa

4. **TECLADO:** 3 teclas de función programables, 5 teclas en total
 5. **CONVERSION A/D:** resolución de 16 bits
 6. **VELOCIDADES DE ACTUALIZACION:**
 Conversor A/D: 20 lecturas/seg
 Respuesta a escala: 200 mseg máx. dentro del 99% del valor final de lectura (con filtro digital y corrección interna de cero bloqueados)**
 700 mseg máx. (con filtro digital bloqueado y corrección interna de cero habilitada)**
 Actualización del display: 1 a 20 actualizaciones/seg.
 Temporización de alarmas: 0,0 a 3275,0 seg
 Actualización de salida analógicas: 0,0 a 10,0 seg
 Retardo para capturar Max/Min: 0,0 a 3275,0 seg

7. **INDICACION DE ENTRADA FUERA DE RANGO:**
 Indicación [OLCL] destellante a 130% del rango.
 Indicación [ULUL] destellante a -10% del rango.

8. **ENTRADAS PARA SENSOR:**

Rango	Precisión* (18 a 28 °C)	Precisión* (0 a 50 °C)	Impedancia	Sobrecarga continua máxima	Resolución ***
20 mA (-2 a 20 mA)	0,02% de la lectura +2 µA	0,12% de la lectura +3 µA	20 Ω	150 mA	1 µA
10 VCC (-1 a 13 VCC)	0,02% de la lectura +2 mV	0,12% de la lectura +3 mV	500 KΩ	300 V	1 mV

* Luego de 20 minutos de conectado. La precisión se define de dos maneras: Precisión sobre 18 a 28 °C y 10 a 75% HR; y precisión sobre 0 a 50 °C y 0 a 85% HR (sin condensación). La precisión sobre 0 a 50 °C incluye el coeficiente de temperatura del instrumento.

** El instrumento impone periódicamente (cada 12 segundos) un retardo de 500 mseg en la medición para compensación interna del enfriamiento del cero. Si este retardo afecta en aplicaciones donde la respuesta al escalón es crítica, puede anularse. Para anularlo, ajustar la velocidad de muestreo 20/seg. En este caso, se debe agregar un error de cero de 0,1% del fondo de escala sobre 0 a 50 °C.

*** Resolución nominal. La resolución interna es el rango de entrada dividido por 65535.

8. **ALIMENTACION PARA EL TRANSMISOR:**
 Alimentación transmisor: 24 VCC, ± 5%, regulada, 50 mA máx
 10. **RECHAZO DE RUIDO DE BAJA FRECUENCIA:**
 Modo normal: > 60 dB @ 50 ó 60 Hz ± 1%, sin filtro digital
 Modo común: > 100 dB, CC a 120 Hz

11. **ENTRADAS DE USUARIO:** Tres entradas de usuario definidas por programa, entradas NPN o PNP seleccionable con puentes.
 Máxima entrada continua: 30 VCC

Estado de Entrada	Entrada NPN (22K a +5V)	Entrada PNP (22K a 0V)
Activo	$V_{in} < 0,7 VCC$	$V_{in} > 2,5 VCC$
Inactivo	$V_{in} > 2,5 VCC$	$V_{in} < 0,7 VCC$

Aislación: No aislado con respecto al común de la entrada de sensor. Las Entradas de Usuario están aisladas de todos los terminales de las tarjetas opcionales.

12. **TOTALIZADOR:**
 Base de Tiempo: segundo, minuto, hora o día
 Precisión de la base de tiempo: 0,01% típico
 Punto decimal: 0 a 0,0000
 Factor de escala: 0,001 a 65,000
 Corte por baja señal: -19999 a 99999
 Total: 9 dígitos, el display alterna entre las lecturas de orden alto y bajo

13. **LINEALIZACION:**
 Puntos de ajuste: seleccionables de 2 a 16
 Rango de display: -19999 a 99999
 Punto decimal: 0 a 0,0000

14. **COMUNICACIONES SERIE (RS232 o RS485)**
 Aislación a sensor y entradas de usuario: 500 Vrms por 1 min. No aislado a los demás comunes.
 Tensión de trabajo: 50 V
 Datos: 7/8 bits
 Velocidad: 300 a 19200 baudios
 Paridad: par, impar o ninguna
 Dirección del bus: seleccionable 0 a 99, 32 instrumentos por línea (RS485)
 Retardo de transmisión: 2 a 50 mseg ó 50 a 100 mseg (RS485)

15. **SALIDA ANALOGICA:**
 Tipos: 0 a 20 mA, 4 a 20 mA y 0 a 10 VCC
 Aislación a sensor y entradas de usuario: 500 Vrms por 1 min. No aislado a los demás comunes.
 Tensión de trabajo: 50 V
 Precisión: 0,17 % FS (18 a 28 °C); 0,4 % FS (0 a 50 °C)
 Resolución: 1/3500
 Resistencia de carga: 10 VCC: 10 KΩ mínimo
 20 mA: 500 Ω máximo

16. **SALIDAS DE ALARMA:** Cuatro tipos de tarjetas de salida, instalables en campo

Tarjeta Doble relé:

Tipo: dos salidas a relé
 Aislación a sensor y entradas de usuario: 2000 Vrms, 1 min
 Capacidad de contactos:
 Un relé energizado: 5 A @ 120/240 VCA ó 28 VCC (carga resistiva).
 La corriente total no debe exceder 5 amperes.

Especificativa de vida: 100 K ciclos mínimo, a plena carga. El uso de redes RC externas extiende la vida operativa del relé cuando se opera con cargas inductivas.

Tarjeta Cuadruple relé:

Tipo: cuatro salidas a relé
 Aislación a sensor y entradas de usuario: 2300 Vrms, 1 min.
 Capacidad de contactos:
 Un relé energizado: 3 A @ 250 VCA ó 30 VCC (carga resistiva).
 La corriente total con los cuatro relés energizados no debe exceder 4 amperes.

Especificativa de vida: 100 K ciclos mínimo, a plena carga. El uso de redes RC externas extiende la vida operativa del relé cuando se opera con cargas inductivas.

Tarjeta Cuadruple transistor NPN:

Tipo: cuatro transistores NPN a colector abierto, aislados
Aislación a sensor y entradas de usuario: 500 Vrms durante 1 min. No aislado de otros comunes.
Tensión de trabajo: 50 VCC
Capacidad: 100 mA máx. @ $V_{OUT} = 0,7 V$ máx. $V_{MAX} = 30 V$

Tarjeta Cuadruple transistor PNP:

Tipo: cuatro transistores PNP a colector abierto, aislados
Aislación a sensor y entradas de usuario: 500 Vrms durante 1 min. No aislado de otros comunes.
Tensión de trabajo: 50 VCC
Capacidad:
Fuente interna: 24 VCC $\pm 10\%$, 30 mA máx. total para todas las salidas.
Fuente externa: 30 VCC máx., 100 mA máx cada salida

17. MEMORIA: EPROM no volátil retiene todos los parámetros programables y las lecturas.

18. CERTIFICACIONES:

COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNETICA

Inmunidad según EN 6082-2

descarga electrostática	EN 61000-4-2	nivel 3; 8 Kv aire nivel 3; 10 V/m ¹ 80 MHz - 1 GHz
campos de RF	EN 61000-4-3	nivel 4; 2 Kv I/O nivel 3; 2 Kv aliment.
transitorios rápidos	EN 61000-4-4	nivel 3; 10 Vrms 150 KHz - 80 MHz
conducción de RF	EN 61000-4-6	nivel 3; 10 V/m 900 MHz ± 5 MHz 200 Hz, 50% c. serv.
simul. teléfono inalámbrico	ENV 50204	

Emisiones según EN 6081-2

interferencia de RF	EN 55011	carcasa clase A alimentación clase A
---------------------	----------	---

Notas:

1. Pérdida de performance autorecuperable durante interferencias EMI a 10 V/m. El error de medición excede las especificaciones de la unidad.

Para operación sin pérdida de performance:

Montar la unidad en gabinete metálico. Tíenda los cables de alimentación por conductos metálicos conectados a tierra.

18. CONDICIONES AMBIENTALES

Temperatura de operación: 0 a 50 °C (0 a 45 °C con las tres tarjetas opcionales instaladas)

Temperatura de almacenamiento: -40 a 60 °C

Humedad relativa: 0 a 85 % máx, sin condensación

Altitud: Hasta 2000 metros

20. CONEXIONES: Mediante bloque de conexiones de alta compresión

21. CONSTRUCCION: La unidad cumple con NEMA 4X/IP65 para uso en interiores. Protección de contactos IP20. Instalación Categoría II. Grado de Contaminación 2. Gabinete de una pieza. Resistente a llamas. Teclado de goma sintética. Junta de panel y clips de montaje incluidos.

22. PESO: 295 g.

SEGURIDAD

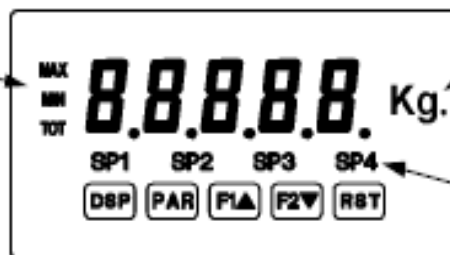


Para resguardar la seguridad personal y para prevenir daños al instrumento o a los equipos conectados al mismo debe observarse el cumplimiento de todas las instrucciones que aparecen en esta documentación o en el equipo y las regulaciones y códigos locales relativos a seguridad. Si el equipo se utiliza en una forma no especificada por el fabricante, la protección que brinda el mismo puede degradarse.

No use este instrumento para comandar directamente motores, válvulas u otros actuadores que no estén equipados con protecciones adecuadas. Esto puede ser potencialmente dañino a personas o equipos ante la eventual falla de la unidad.

PANEL FRONTAL

Señalización de variable indicada



Etiqueta de indicación de unidad de medida

Indicadores de actuación de alarmas

TECLA

DSP	OPERACION EN MODO DISPLAY
PAR	Rotación de las indicaciones máx/min/total/entrada
F1	Acceso a la lista de parámetros
F2	Tecla de función 1; mantener 3 seg para segunda función 1
RST	Tecla de función 2; mantener 3 seg para segunda función 2
	Reset (tecla de función)

OPERACION EN MODO PROGRAMACION

Sale del modo programación y retorna al modo normal
Memoriza el parámetro seleccionado y pasa al siguiente
Incrementa el valor del parámetro seleccionado
Decrementa el valor del parámetro seleccionado
Mantener con F1, F2 para aumentar el valor x1000

ANEXO D. CATALOGO TRANSDUCTOR DE PRESION

Instrumentos para medida de presión SITRANS P Transmisores de presión relativa y absoluta

Serie Z para presión relativa y absoluta

Sinopsis



Transmisor de presión SITRANS P, serie Z para presión relativa y absoluta (7MF1564-...)

El transmisor SITRANS P de la serie Z (7MF1564-...) mide la presión relativa y absoluta y el nivel de líquidos y gases.

Beneficios

- Alta precisión de medida
- Caja robusta de acero inoxidable
- Para fluidos corrosivos y no corrosivos
- Para medir la presión de gases, líquidos y vapores
- Célula de medida con compensación de temperatura
- Diseño compacto

Gama de aplicación

El transmisor de la serie Z para presión relativa y absoluta (7MF1564-...) se utiliza en primer lugar en los siguientes sectores industriales:

- Industria química
- Industria farmacéutica
- Industria alimenticia
- Fabricación de maquinaria
- Construcción naval
- Abastecimiento de agua

Construcción

La construcción del transmisor de presión depende del rango de medida.

Rango de medida < 1 bar (< 14,5 psi)

Componentes principales:

- Caja de acero inoxidable con célula de medida de silicio (con membrana de acero inoxidable, con compensación de temperatura) y módulo electrónico
- Conexión al proceso de acero inoxidable en diversas variantes (ver Datos de selección y pedido)
- Conexión eléctrica mediante conectores de enchufe según DIN 43650 con pasacables M16 x 1,5, 1/4-14 NPT o con conectores macho redondos M12.

Rango de medida ≥ 1 bar ($\geq 14,5$ psi)

Componentes principales:

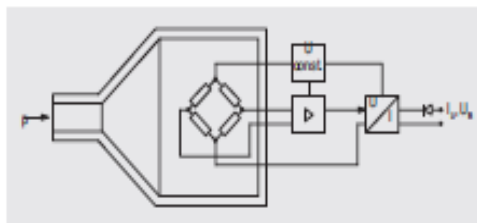
- Caja de acero inoxidable con célula de medida en cerámica y módulo electrónico. La célula de medida en cerámica con compensación de temperatura tiene una galga extensométrica de película fina, la cual está alojada en una membrana cerámica. La membrana cerámica puede utilizarse también con fluidos corrosivos.
- Conexión al proceso de acero inoxidable en diversas variantes (ver Datos de selección y pedido)
- Conexión eléctrica mediante conectores de enchufe según DIN 43650 con pasacables M16x1,5, 1/4-14 NPT o con conectores macho redondos M12.

El transmisor de presión con el rango nominal de medida de ≥ 1 bar ($\geq 14,5$ psi) está disponible con y sin protección contra explosiones.

Funciones

El transmisor de presión mide la presión relativa y absoluta y el nivel en líquidos y gases.

Funcionamiento



Transmisor de presión SITRANS P, serie Z (7MF1564-...), diagrama de función

El funcionamiento del transmisor de presión depende del rango de medida.

Rango de medida < 1 bar (< 14,5 psi)

La célula de medida de silicio del transmisor de presión está dotada de un puente de resistencias piezoeléctricas, al cual la presión de servicio "p" se transmite por aceite de silicona y una membrana de acero inoxidable.

La tensión de salida de la célula de medida se conduce hacia el amplificador y se transforma en una señal de salida tipo corriente de 4 a 20 mA. La corriente de salida es linealmente proporcional a la presión de entrada.

Rango de medida ≥ 1 bar ($\geq 14,5$ psi)

La célula de medida de película fina dispone de un puente de resistencias de película fina, al cual la presión de servicio "p" se transmite a través de una membrana cerámica.

La tensión de salida de la célula de medida se conduce hacia el amplificador y se transforma en una señal de salida tipo corriente de 4 a 20 mA o en una tensión de salida de 0 a 10 V DC.

La corriente y la tensión de salida son linealmente proporcionales a la presión de entrada.

Transmisores de presión relativa y absoluta

Serie Z para presión relativa y absoluta

Datos técnicos

Transmisor de presión SITRANS P, serie Z para presión relativa y absoluta y para nivel

Funcionamiento

• Rango de medida < 1 bar (< 14,5 psi)	piezoresistivo
• Rango de medida ≥ 1 bar (≥ 14,5 psi)	galga extensométrica de película fina

Entrada

Magnitud de medida	presión relativa y absoluta
Rango de medida	
• presión relativa	
- métrico	0 ... 400 bar g (0 ... 5802 psi g)
- rango de medida para EE.UU.	0 ... 6000 psi g
• presión absoluta	
- métrico	0 ... 16 bar a (0 ... 232 psi a)
- rango de medida para EE.UU.	0 ... 300 psi a

Salida

Señal de salida	
• Señal de salida de corriente	4 ... 20 mA
• Señal de salida de tensión (sólo rango de medida ≥ 1 bar (14,5 psi))	0 ... 10 V DC

Precisión de medida

según EN 60770-1	
Desviación de medida (a 25 °C ó 77 °F, desviación de característica, histéresis y repetibilidad incluidas)	0,25% del fondo, típico
Tiempo de ajuste T_{90}	< 0,1 s
Deriva a largo plazo	
• Inicio de medida	0,25% del fondo/año
• Fin de medida	0,25% del fondo/año
Influencia de la temperatura ambiente	
• Inicio de medida	0,25%/10 K del valor de fin de escala
• Fin de medida	0,25%/10 K del valor de fin de escala

Condiciones de aplicación

Temperatura del fluido a medir	-30 °C ... +120 °C (-22 ... +248 °F)
Temperatura ambiente	-25 °C ... +85 °C (-13 ... +185 °F)
Temperatura de almacenamiento	-50 °C ... +100 °C (-58 ... +212 °F)
Grado de protección según EN 60529	IP65

Construcción mecánica

Peso	≈ 0,25 kg (≈ 0,55 lb)
Material de las partes en contacto con el fluido	
• Célula de medida	
- Rango de medida < 1 bar (< 14,5 psi)	Acero inox., N° de mat. 1.4571/316Ti
- Rango de medida ≥ 1 bar (≥ 14,5 psi)	Al ₂ O ₃ - 96 %
• Conexión al proceso	Acero inox., N° de mat. 1.4571/316Ti
• Junta anular	Viton
Conexión al proceso	ver datos de selección y pedido

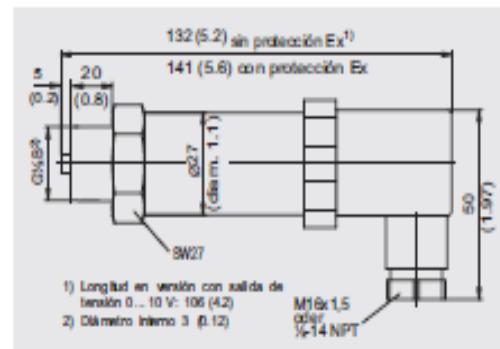
Alimentación auxiliar U_H

Tensión en bornas del transmisor	
• para salida de corriente	10 ... 36 V DC
• para salida de tensión (sólo rango de medida ≥ 1 bar (14,5 psi))	15 ... 36 V DC

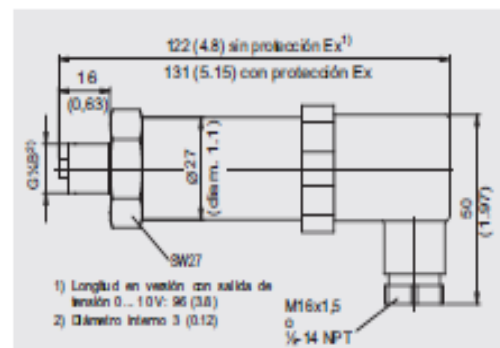
Certificaciones y homologaciones

Clasificación según la Directiva de aparatos a presión (97/23/CE)	Para gases del Grupo de fluidos 1 y líquidos del Grupo de fluidos 1; cumple los requisitos según artículo 3, sección 3 (prácticas de la buena Ingeniería)
Protección contra explosiones	
• seguridad intrínseca "i" (sólo para salida de corriente)	TÜV 02 ATEX 1953X
- identificación	Ex II 1/2G EEx ia IIC T4
• seguridad intrínseca "T.I.I.S." (sólo para salida de corriente)	solicitada
Lloyd's Register of Shipping	Certificate No. 03/30003

Croquis acolados



Transmisores 7MF1564... con conexión al proceso G1/2" exterior, medidas en mm (pulgadas)



Transmisores 7MF1564... con conexión al proceso G1/2" exterior, medidas en mm (pulgadas)

ANEXO E. DIAGRAMA CONTROL MANUAL

