

MODELADO, SIMULACIÓN, DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLA POR FUGA EN EL SELLO DEL PISTÓN DE UN SERVOACTUADOR HIDRÁULICO

DIEGO ALEXANDER SEPULVEDA FLOREZ

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

2018

MODELADO, SIMULACIÓN, DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLA POR FUGA EN EL SELLO DEL PISTÓN DE UN SERVOACTUADOR HIDRÁULICO

DIEGO ALEXANDER SEPULVEDA FLOREZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero mecánico

Director

CARLOS BORRÁS PINILLA

Ingeniero Mecánico, PhD, Msc.

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

2018

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	18
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	18
1.2. JUSTIFICACION PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	18
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	19
1.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	20
1.4.1 Objetivo general	20
1.4.2. Objetivos específicos.....	20
2. MÉTODOS DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS	22
2.1. REDUNDANCIA FÍSICA.....	22
2.2. REDUNDANCIA ANALÍTICA.....	23
2.2.1. Espacios de paridad.....	24
2.2.2. Filtro detector de fallas.....	25
2.2.3. Estimación paramétrica.....	26
2.3. TIPOS DE FALLAS.....	26
2.4. DETECCIÓN DE FALLAS CON ECUACIONES DE PARIDAD	30
2.4.1. Ecuaciones de paridad para procesos de una entrada y una salida (SISO).	30
2.4.2. Ecuaciones de paridad para procesos de multiples entradas y multiples salidas (MIMO).	31
2.4.3. Evaluación del residuo	32
2.5. FALLAS EN CILINDROS HIDRÁULICOS	35
2.5.1. Acción falsa o mal funcionamiento de la acción	36

2.5.2. Trabajo irregular y falta de fuerza.....	37
2.5.3. Resbalón o arrastre del cilindro hidráulico.....	38
3. MODELADO DINÁMICO DEL SISTEMA	40
3.1. ANÁLISIS DINÁMICO DEL COMPORTAMIENTO DEL ACTUADOR	41
3.2. ANÁLISIS DINÁMICO DEL FLUJO EN EL CILINDRO	43
3.3. ANÁLISIS DINÁMICO DEL FLUJO A TRAVÉS DE LA SERVOVÁLVULA..	45
3.4. MODELO DEL SISTEMA SIN FALLA.....	48
3.5. MODELO DEL SISTEMA CON FALLA.....	48
4. SIMULACIÓN	50
4.1. SIMULACIÓN DEL SISTEMA.....	50
4.2. SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN PRECENCIA DE FALLA	54
4.3. COMPARACIÓN DEL SISTEMA CON FALLA Y SIN FALLA.....	58
5. VALIDACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL PROPUESTO	61
5.1. GENERACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS.	61
5.1.1. Tarjeta de adquisición de datos Quanser q8.....	62
5.1.2. Caracterización lvdv.....	63
5.1.3. El banco de pruebas.....	64
5.2. TOMA DE DATOS.....	67
5.2.1. Datos para frecuencia 0,1 Hz.	67
5.2.3. Datos para frecuencia 1 Hz.	70
5.2.3. Datos para frecuencia 10 Hz.	73
5.3. CALIBRACIÓN Y AJUSTE DEL MODELO.....	76
5.4. VALIDACIÓN.....	77
5.4.1. Métodos de validación utilizados.....	78

5.4.2. Validación onda cuadrada, frecuencia 0,1 Hz.	80
5.4.3. Validación onda sinusoidal, frecuencia 0,1 Hz.	83
5.4.4. Validación onda cuadrada, frecuencia 1 Hz.	86
5.4.5. Validación onda sinusoidal, frecuencia 1 Hz.	89
5.4.6. Validación onda cuadrada, frecuencia 10 Hz.	92
5.4.6. Validación onda sinusoidal, frecuencia 10 Hz.	95
6. CLASIFICACIÓN DE LA FALLA Y RESULTADOS	100
6.1. MUESTRA A CLASIFICAR.....	100
6.2. GENERACIÓN DE RANGOS DE CLASIFICACIÓN.....	103
6.3. CLASIFICACIÓN DE LA FALLA.....	104
6.3.1. Límites para frecuencia baja, 0.1 Hz.	105
6.3.2. Límites para frecuencia media, 1 Hz.	110
6.3.3. Límites para frecuencia alta, 10 Hz.	114
6.4. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN DE LA MUESTRAS.	118
6.4.1. Resultados para frecuencia baja, onda cuadrada, 0.1 Hz.....	118
6.4.2. Resultados para frecuencia baja, onda sinusoidal, 0.1 Hz.	121
6.4.3. Resultados para frecuencia media, onda cuadrada, 1 Hz.....	124
6.4.4. Resultados para frecuencia media, onda sinusoidal, 1 Hz.	127
6.4.5. Resultados para frecuencia alta, onda cuadrada, 10 Hz.	130
6.4.6. Resultados para frecuencia alta, onda sinusoidal, 10 Hz.....	133
6.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	136
7. CONCLUSIONES	138
8. RECOMENDACIONES.....	139
BIBLIOGRAFÍA	140

LISTA DE FIGURAS

Figura. 1. Ejemplo esquemático de redundancia física.....	22
Figura. 2. Representación gráfica de espacio de paridad.....	24
Figura. 3. Representación gráfica del filtro detector de fallas.	25
Figura. 4. Falla aditiva.....	26
Figura. 5. Falla multiplicativa.....	27
Figura. 6. Ejemplo de fallas aditivas y multiplicativas.	28
Figura. 7. Tipos de fallas según su comportamiento en el tiempo.	29
Figura. 8. Método de error en la salida. Sistema de una entrada y una salida (SISO).	30
Figura. 9. Método de ecuación de error. Sistema de una entrada y una salida (SISO).	31
Figura. 10. Ecuación de estado y Ecuación de salida para un sistema MIMO.	32
Figura. 11. Esquema del sistema con múltiples entradas y salidas MIMO.	32
Figura. 12. Esquema general del sistema dinámico.	40
Figura. 13. Distribución del volumen de fluido dentro del actuador.....	43
Figura. 14. Esquema de la servoválvula.	45
Figura. 15. Ubicación de la falla en el sistema.....	48
Figura. 16. Subsistema del modelo matemático del sistema.	51
Figura. 18. Resultado de la simulación del sistema sin falla, Posición del cilindro con onda cuadrada.....	53
Figura. 19. Resultado de la simulación del sistema sin falla, Posición del cilindro con onda sinusoidal.	54
Figura. 20. Modelo del sistema con falla.....	55

Figura. 21. Subsistema del modelo matemático del sistema en presencia de falla.	55
Figura. 22. Resultado de la simulación del sistema en falla, Posición del cilindro con onda cuadrada.	57
Figura. 23. Resultado de la simulación del sistema en falla, Posición del cilindro con onda sinusoidal.	58
Figura. 24. Comparación de modelos.	59
Figura. 25. Residuo de posición, señal cuadrada.	59
Figura. 26. Residuo de posición, señal seno.	60
Figura 27. Esquema de las conexiones en el banco Mesa sísmica.	61
Figura 28. Tarjeta de adquisición de datos Quanser Q8USB.	62
Figura 29. Modelo para toma de datos.	63
Figura 30. Banco de pruebas.	64
Figura 31. Servo válvula y Válvula Bypass.	65
Figura 32. Conexión del hardware.	65
Figura 33. Caja negra y Tarjeta de adquisición de datos.	66
Figura 34. Conexión de la tarjeta de adquisición de datos Quanser.	66
Figura 35. Toma de datos y promedio, onda cuadrada con frecuencia 0,1 Hz.	67
Figura 36. Detalle de toma de datos y promedio, onda cuadrada y frecuencia 0,1 Hz.	68
Figura 37. Toma de datos y promedio, onda seno con frecuencia 0,1 Hz.	69
Figura 38. Detalle de toma de datos y promedio, onda seno y frecuencia 0,1 Hz.	70
Figura 39. Toma de datos y promedio, onda cuadrada con frecuencia 1 Hz.	71

Figura 40. Detalle de toma de datos y promedio, onda cuadrada y frecuencia 1 Hz.	71
Figura 41. Toma de datos y promedio, onda seno con frecuencia 1 Hz.	72
Figura 42. Detalle de toma de datos y promedio, onda seno y frecuencia 1 Hz. ..	73
Figura 43. Toma de datos y promedio, onda cuadrada con frecuencia 10 Hz.	74
Figura 44. Detalle de toma de datos y promedio, onda cuadrada y frecuencia 10 Hz.	74
Figura 45. Toma de datos y promedio, onda seno con frecuencia 10 Hz.	75
Figura 46. Detalle de toma de datos y promedio, onda seno y frecuencia 10 Hz.	75
Figura 47. Modelo final de simulación del sistema.....	77
Figura 48. Posición del cilindro y error en cada instante de tiempo. Onda cuadrada, Frecuencia 0,1 Hz.....	80
Figura 41. Error y Error absoluto para cada instante de tiempo. Onda cuadrada, Frecuencia 0,1 Hz.....	81
Figura 50. Resultados en workspace de coeficientes de correlación. Onda Cuadrada, Frecuencia 0,1 Hz.	82
Figura 51. Posición del cilindro y error en cada instante de tiempo. Onda Seno, Frecuencia 0,1 Hz.....	83
Figura 52. Error y Error absoluto para cada instante de tiempo. Onda Seno, Frecuencia 0,1 Hz.....	84
Figura 53. Resultados en workspace de coeficientes de correlación. Onda Seno, Frecuencia 0,1 Hz.....	85
Figura 54. Posición del cilindro y error en cada instante de tiempo. Onda cuadrada, Frecuencia 1 Hz.....	86
Figura 55. Error y Error absoluto para cada instante de tiempo. Onda cuadrada, Frecuencia 1 Hz.....	87

Figura 56. Resultados en workspace de coeficientes de correlación. Onda Cuadrada, Frecuencia 1 Hz.	88
Figura 57. Posición del cilindro y error en cada instante de tiempo. Onda sinusoidal, Frecuencia 1 Hz.	89
Figura 58. Error y Error absoluto para cada instante de tiempo. Onda sinusoidal, Frecuencia 1 Hz.	90
Figura 59. Resultados en workspace de coeficientes de correlación. Onda Seno, Frecuencia 1 Hz.	91
Figura 60. Posición del cilindro y error en cada instante de tiempo. Onda cuadrada, Frecuencia 10 Hz.	92
Figura 61. Detalle onda cuadrada con frecuencia 10 Hz.	93
Figura 62. Error y Error absoluto para cada instante de tiempo. Onda cuadrada, Frecuencia 10 Hz.	93
Figura 63. Resultados en workspace de coeficientes de correlación. Onda Cuadrada, Frecuencia 10 Hz.	94
Figura 64. Posición del cilindro y error en cada instante de tiempo. Onda sinusoidal, Frecuencia 10 Hz.	96
Figura 65. Detalle onda sinusoidal con frecuencia 10 Hz.	96
Figura 66. Error y Error absoluto para cada instante de tiempo. Onda sinusoidal, Frecuencia 1 Hz.	97
Figura 67. Resultados en workspace de coeficientes de correlación. Onda Seno, Frecuencia 10 Hz.	98
Figura 68. Muestra a clasificar.	100
Figura 69. Esquema de la válvula simulando la fuga del sello pistón.	101
Figura 70. Detalle de la posición final de la mesa bajo efecto de falla.	102
Figura 71. Caudales durante parte del avance del cilindro.	103

Figura 72. Límites por pérdida de caudal, Onda cuadrada 0,1 Hz.....	106
Figura 73. Caudales involucrados en la simulación. Onda Cuadrada 0,1 Hz.	107
Figura 74. Límites por pérdida de caudal, Onda sinusoidal 0,1 Hz.....	108
Figura 75. Caudales involucrados en la simulación. Onda Sinusoidal 0,1 Hz.	109
Figura 76. Límites por pérdida de caudal, Onda cuadrada 1 Hz.....	110
Figura 77. Caudales involucrados en la simulación. Onda Cuadrada 1 Hz.	111
Figura 78. Límites por pérdida de caudal, Onda sinusoidal 1 Hz.....	112
Figura 79. Caudales involucrados en la simulación. Onda Sinusoidal 1 Hz.	113
Figura 80. Límites por pérdida de caudal, Onda cuadrada 10 Hz.....	114
Figura 81. Caudales involucrados en la simulación. Onda Cuadrada 10 Hz.	115
Figura 82. Límites por pérdida de caudal, Onda sinusoidal 10 Hz.....	116
Figura 83. Caudales involucrados en la simulación. Onda Sinusoidal 10 Hz.	117
Figura 84. Posición y fallas. Onda cuadrada 0,1Hz.	118
Figura 85. Resultado para CERO vueltas de apertura. Onda cuadrada, 0.1Hz...	119
Figura 86. Resultado para UNA vuelta de apertura. Onda cuadrada, 0.1Hz.	119
Figura 87. Resultado para DOS vueltas de apertura. Onda cuadrada, 0.1Hz.	120
Figura 88. Resultado para SEIS vueltas de apertura. Onda cuadrada, 0.1Hz.	120
Figura 89. Posición y fallas. Onda sinusoidal 0,1Hz.	121
Figura 90. Resultado para CERO vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 0.1Hz..	122
Figura 91. Resultado para UNA vuelta de apertura. Onda sinusoidal, 0.1Hz.	122
Figura 92. Resultado para DOS vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 0.1Hz. ...	123
Figura 93. Resultado para SEIS vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 0.1Hz. ...	123
Figura 94. Posición y fallas. Onda cuadrada 1Hz.	124
Figura 95. Resultado para CERO vueltas de apertura. Onda cuadrada, 1Hz.....	125

Figura 96. Resultado para UNA vuelta de apertura. Onda cuadrada, 1Hz.	125
Figura 97. Resultado para DOS vueltas de apertura. Onda cuadrada, 1Hz.	126
Figura 98. Resultado para SEIS vueltas de apertura. Onda cuadrada, 1Hz.	126
Figura 99. Posición y fallas. Onda Sinusoidal 1Hz.....	127
Figura 100. Resultado para CERO vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 1Hz...	128
Figura 101. Resultado para UNA vuelta de apertura. Onda sinusoidal, 1Hz.	128
Figura 102. Resultado para DOS vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 1Hz.	129
Figura 103. Resultado para SEIS vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 1Hz.	129
Figura 104. Posición y fallas. Onda cuadrada 10Hz.	130
Figura 105. Resultado para CERO vueltas de apertura. Onda cuadrada, 10Hz..	131
Figura 106. Resultado para UNA vuelta de apertura. Onda cuadrada, 10Hz.	131
Figura 107. Resultado para DOS vueltas de apertura. Onda cuadrada, 10Hz. ...	132
Figura 108. Resultado para SEIS vueltas de apertura. Onda cuadrada, 10Hz. ...	132
Figura 109. Posición y fallas. Onda Sinusoidal 10Hz.....	133
Figura 110. Resultado para CERO vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 10Hz.	134
Figura 111. Resultado para UNA vuelta de apertura. Onda sinusoidal, 10Hz.	134
Figura 112. Resultado para DOS vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 10Hz. ..	135
Figura 113. Resultado para SEIS vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 10Hz. ...	135

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos utilizados en la simulación.	52
Tabla 2. Datos utilizados en la simulación con falla.	56
Tabla 3. Variables físicas del modelo.	76
Tabla 4. Resultados para otros indicadores de verificación. Onda Cuadrada, Frecuencia 0,1 Hz.	82
Tabla 5. Resultados para otros indicadores de verificación. Onda Seno, Frecuencia 0,1 Hz.	85
Tabla 6. Resultados para otros indicadores de verificación. Onda Cuadrada, Frecuencia 1 Hz.	88
Tabla 7. Resultados para otros indicadores de verificación. Onda Sinusoidal, Frecuencia 1 Hz.	91
Tabla 8. Resultados para otros indicadores de verificación. Onda Cuadrada, Frecuencia 10 Hz.	95
Tabla 9. Resultados para otros indicadores de verificación. Onda Sinusoidal, Frecuencia 10 Hz.	99
Tabla 10. Nivel de falla según el porcentaje de caudal perdido.	104
Tabla 11. Límites para clasificación de falla, Onda cuadrada 0,1 Hz.	106
Tabla 12. Límites para clasificación de falla, Onda sinusoidal 0,1 Hz.	108
Tabla 13. Límites para clasificación de falla, Onda cuadrada 1 Hz.	110
Tabla 14. Límites para clasificación de falla, Onda sinusoidal 1 Hz.	112
Tabla 15. Límites para clasificación de falla, Onda cuadrada 10 Hz.	114
Tabla 16. Límites para clasificación de falla, Onda sinusoidal 10 Hz.	116
Tabla 17. Tabla de resultados.	137

RESUMEN

TITULO: MODELADO, SIMULACIÓN, DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLA POR FUGA EN EL SELLO DEL PISTÓN DE UN SERVOACTUADOR HIDRÁULICO¹

AUTORES: DIEGO ALEXANDER SEPULVEDA FLOREZ²

PALABRAS CLAVE: Modelamiento, Simulación, Servomecanismo, Sistema dinámico.

DESCRIPCIÓN: Los sistemas hidráulicos son, en la actualidad, parte esencial de las industrias gracias a las ventajas que presentan frente a otros sistemas, como su gran capacidad de carga y su alta respuesta dinámica. El grupo de investigación DicBot, de la escuela de ingeniería mecánica, cuenta con un servo actuador hidráulico Parker, acoplado a una mesa sísmica, con el cual se desarrolló éste proyecto. En el inicio del proyecto se modeló el sistema dinámico compuesto por el servo actuador hidráulico, su masa de prueba (el banco mesa sísmica) y la válvula de control de caudal que controla la fuga. Tras la obtención del modelo dinámico se hicieron simulaciones para comprobar que estuviera correcto y luego se instala la válvula que simularía la fuga hidráulica, ésta válvula conecta las dos cámaras del cilindro hidráulico simulando una fuga en el sello del pistón. Luego se hizo la adquisición de datos para la validación del modelo desarrollado y además se tomaron datos en presencia de falla para detectarlos y clasificarlos posteriormente. Para la toma de datos se utilizó una tarjeta Quanser Q8, la simulación del sistema se hizo a través de Simulink de MatLab y el procesamiento de los datos se realizó por medio de MatLab obteniendo un buen nivel de validación para el modelo planteado y las respuestas esperadas para los casos de estudio.

¹ Proyecto de Grado.

² Facultad de ingenierías físico mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Carlos Borrás Pinilla.

ABSTRACT

TITLE: MODELING, SIMULATION, DETECTION AND DIAGNOSIS OF LEAK FAILURE IN THE SEAL OF THE PISTON OF A SERVO HYDRAULIC ACTUATOR.³

AUTHORS: DIEGO ALEXANDER SEPULVEDA FLOREZ⁴

KEY WORDS: Modeling, Simulation, Servomechanism, Dynamic System.

DESCRIPTION: Hydraulic systems are currently an essential part of industries thanks to the advantages they have over other systems, such as their high load capacity and high dynamic response. The research group DicBot, of the school of mechanical engineering, has a servo hydraulic actuator Parker, coupled to a seismic table, with which this project was developed. At the beginning of the project, the dynamic system composed of the hydraulic actuator servo was modeled, with its test mass (the bench seismic table) and the flow control valve that controls the leak. After obtaining the dynamic model, simulations were made to verify that it was correct and then the valve that would simulate the hydraulic leak was installed. This valve connects the two chambers of the hydraulic cylinder simulating a leak in the piston seal. Then the data was acquired for the validation of the developed model and data were also taken in the presence of failure to detect them and classify them later.

For the data collection a Quanser Q8 card was used, the simulation of the system was done through Matlab Simulink and the processing of the data was done through MatLab obtaining a good level of validation for the proposed model and the expected responses for the case studies.

³ Thesis.

⁴ Faculty of Physical – Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineer. Directress: Engineer Carlos Borrás Pinilla.

INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales cada día presentan mayores retos en temas de mantenimiento y mejoramiento de los procesos, es por eso que los sistemas hidráulicos son ampliamente utilizados en robótica y sistemas mecatrónicos gracias a su alta confiabilidad y precisión, por lo tanto, es imprescindible desarrollar, y avanzar aún más su investigación, técnicas de mantenimiento predictivo ya que son herramientas que brindan información puntual sobre los posibles problemas en los procesos y maquinaria que los desarrolla, generando aumento en la vida útil de los equipos, ahorros en mantenimiento y renovación de equipos industriales.

El objetivo de esta investigación es adelantar estudios sobre la detección y el diagnóstico de fallas para un servo actuador hidráulico PARKER, quien es una de las piezas de mayor importancia y quien otorga la potencia hidráulica en el banco de pruebas de la mesa sísmica, la cual hace parte del centro de investigación en sistemas dinámicos y robótica, DicBot, de la Universidad Industrial de Santander.

En la primera sección de éste trabajo se hace la presentación del proyecto con el planteamiento del problema analizado durante el desarrollo del mismo, su justificación y los objetivos propuestos para su realización. La segunda parte contiene el marco teórico, donde se encuentran otros métodos de detección de fallas y características de la metodología utilizada. El modelamiento dinámico del sistema se encuentra en el capítulo tres, contiene el desarrollo de las ecuaciones que rigen el sistema a estudiar. En el cuatro bloque se encuentran la simulación del modelo desarrollado anteriormente. El proceso de validación del modelo propuesto se encuentra en la sección cinco, donde se comparan las respuestas del modelo dinámico con las muestras reales del funcionamiento del servo actuador. En el capítulo siguiente se explica el proceso de detección y clasificación de las fallas y además se exhiben los resultados obtenidos tras clasificar las muestras bajo efectos de fallas inducidas en el banco de pruebas. Por último, conclusiones.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Las industrias actualmente desarrollan un gran número de aplicaciones diferentes dependiendo de las necesidades emergentes en el día a día, para suplir esta demanda de actividades se diseñan continuamente diversos procesos manufactura en los cuales se utilizan múltiples sistemas para transmitir y transformar la energía, entre los cuales podemos encontrar sistemas eléctricos, mecánicos, hidráulicos, etc.

Los sistemas hidráulicos tienen un amplio número de aplicaciones gracias a la buena relación que existe entre su tamaño relativamente pequeño y la gran potencia que manejan, la precisión, simplicidad, flexibilidad y demás ventajas. Pero los sistemas hidráulicos, al igual que cualquier tipo de sistema, también sufren fallas inesperadas de sus elementos y fallas debido al desgaste y uso normal. Las fugas internas son fallas típicas en los sistemas hidráulicos las cuales pueden generar pérdidas económicas de gran valor o incluso poner en riesgo vidas humanas, se hace indispensable entonces, que estos sistemas sean lo más fiables y seguros posibles. Por lo cual la detección y diagnóstico de fallas en los sistemas hidráulicos recibe cada vez más atenciones.

1.2. JUSTIFICACION PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

En los procesos industriales es común el uso de maquinaria hidráulica, los actuadores hidráulicos pueden presentar diferentes tipos de fallas provocando todo tipo de problemas, algunos muy costosos y peligrosos, lo cuales pueden ser evitados o mitigados si se detectan y evalúan a tiempo. La detección de fallas no solo mejora la fiabilidad y la seguridad de los procesos, también aumenta la disponibilidad de la planta, el sistema puede detectar una falla en su estado inicial,

antes de producir una catástrofe, o una tendencia que indique se producirá una falla pronto, dando la oportunidad de tomar las medidas correspondientes para evitarla, reducir su impacto o corregirla si es posible conservar un margen de operación establecido.

Lastimosamente este tipo de metodología basada en modelos, diagnóstico y gestión de fallas aún no se utiliza ampliamente en la industria ya que los empresarios aún no son conscientes de los enormes beneficios que trae la detección temprana de fallas en etapas iniciales y el diagnóstico de la falla detectada (en función del tipo, causa, lugar y tamaño). Por lo cual el estudio en esta área brinda un amplio margen de investigación y desarrollo.

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Con la idea de mejorar día a día los márgenes de productividad y operatividad de las diversas aplicaciones y procesos utilizados industrialmente se pretende avanzar en las investigaciones sobre seguridad y confiabilidad en procesos industriales por medio del desarrollo y la implementación de un sistema de detección y diagnóstico de fallas para un sistema hidráulico que contará principalmente con una servo válvula MOOG de alta respuesta dinámica de serie 76-263, un actuador hidráulico PARKER no diferencial de alta respuesta dinámica, acumulador y demás componentes que pueda necesitar el sistema.

Nuestro sistema de detección de fallas estará basado en el uso de la redundancia analítica, la cual funciona a partir de un modelo del proceso con el que se compararán los datos obtenidos por medio de un sensor LVDT instalado en el actuador, esto arrojará un residuo, que en circunstancias ideales debería ser cero, ya que corresponde a la diferencia entre el valor medido por el sensor LVDT y el valor predicho por el modelo, un valor diferente de cero supone entonces un error

en el sistema. Los residuos, que representan fallas potenciales y reales, deben clasificarse para no incurrir en falsas alarmas y hacer el diagnóstico de la falla.

La falla en el sello del pistón se recreará físicamente por medio de un Bypass entre las dos cámaras del cilindro. Para tener un control total sobre la falla el flujo a través de las cámaras será regulado por una válvula instalada en el ducto del bypass.

Una interfaz gráfica permitirá observar el comportamiento del sistema, los diferentes valores involucrados y la comparación con los datos del modelo para sustentar de forma visible la detección y el diagnóstico de la falla inducida por medio de la válvula reguladora en el bypass.

1.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.4.1 Objetivo general

Contribuir a la misión de la Universidad Industrial de Santander de formar personas de alta calidad ética y profesional, la generación y adecuación de conocimientos a través del desarrollo de una metodología que permita avanzar en la investigación en sistemas de detección y diagnóstico de fallas por fugas en el sello pistón de servo actuadores hidráulicos.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Diseñar el modelo dinámico del funcionamiento de un servo actuador hidráulico con falla inducida de fuga en el sello del pistón, compuesto por un cilindro PARKER no diferencial ($D_p=2.5''$, $D_v=1.75''$ y Carrera=10") y una servo válvula MOOG de alta respuesta dinámica de serie 76-263 (10 GPM a 1000 Psi).
2. Simular el modelo dinámico del funcionamiento del servo actuador

hidráulico con falla inducida de fuga en el sello del pistón por medio de herramientas computacionales como Matlab y/o Simulink.

3. Validar experimentalmente la simulación del modelo dinámico del funcionamiento del servo actuador hidráulico con falla inducida de fuga en el sello del pistón en el laboratorio de sistemas dinámicos.

4. Realizar la detección y el diagnóstico de la falla de funcionamiento del servo actuador hidráulico con falla inducida de fuga en el sello del pistón a través del análisis de residuos generados por medio de ecuaciones de paridad.

2. MÉTODOS DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS

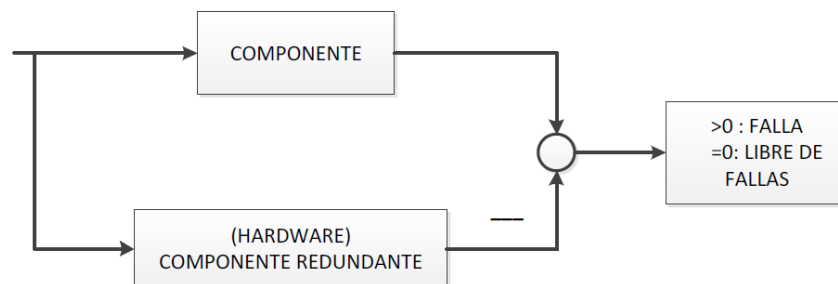
Dentro de las opciones para lograr la de detección y diagnóstico de fallas encontramos principalmente los métodos de redundancia física y redundancia analítica.

2.1. REDUNDANCIA FÍSICA

Tradicionalmente los mecanismos de detección de fallas están basados en métodos de redundancia física, es decir, en la utilización de varios elementos repetidos en el sistema (actuadores, sensores, controladores, etc.) para desempeñar la misma función. Esta característica nos permite tomar decisiones sobre la presencia de fallas basándonos en comparaciones de funcionamiento entre los elementos repetidos del sistema.

Los métodos de redundancia física son muy confiables y permiten una rápida detección de la falla, su posterior diagnóstico y toma de acciones correctivas. Sin embargo, no es un método que pueda aplicarse a todos los casos, la duplicación de elementos del sistema supone costos más elevados, el mayor espacio utilizado para un mismo proceso y el peso extra de los elementos repetidos son algunos de los limitantes de este método.

Figura. 1. Ejemplo esquemático de redundancia física.



Fuente: CARREÑO MARTINEZ, Manuel. ALVAREZ TORRES, Luz. MEJÍA FAJARDO, Sergio. DUARTE ANAYA, Rubén. SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN EN MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN SISTEMAS COMPLEJOS. 2011. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.

En la figura anterior podemos ver esquemáticamente cómo está configurado un sistema de redundancia física, donde se detectará una falla si existe diferencia entre la respuesta de salida del componente principal y la respuesta de salida de su elemento redundante.

2.2. REDUNDANCIA ANALÍTICA

Las técnicas de redundancia analítica se consideran más precisas debido a que se fundamentan en un modelo matemático, por lo que resultan muy útiles en la detección de fallos, sobre todo cuando los síntomas son difíciles de percibir por instrumentos de medición convencionales. Al estar basadas en el conocimiento del modelo matemático del sistema en cuestión se permite generar señales a partir de relaciones funcionales que involucran variables medidas del proceso, es decir, se basan en la comparación del comportamiento actual, o medido, del sistema con el comportamiento obtenido a partir del modelo matemático del mismo.

La tarea de detección y diagnóstico de fallas puede realizarse en dos pasos, los cuales son:

- a. **Generación de residuos:** Este paso consiste en generar las señales, denominadas residuos, que contienen únicamente información sobre la falla o las fallas. En el caso ideal, ausencia de fallas, los residuos son iguales a cero y difieren de cero cuando se encuentra alguna falla presente.
- b. **Evaluación de los residuos:** En este paso se realiza la extracción de la información almacenada en el residuo, la evaluación proporciona información sobre el momento en que sucedió la falla y la ubicación de la misma.

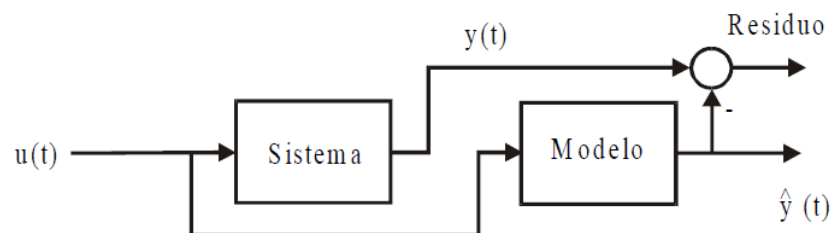
Entre las técnicas más destacadas de generación de residuos para procesos lineales se encuentran los métodos basados en:

- Espacios de paridad.
- Filtro detector de fallas.
- Estimación de parámetros.

2.2.1. Espacios de paridad. Los espacios de paridad consisten en formar ecuaciones a partir del modelo del sistema, las ecuaciones de paridad deben cumplirse si el funcionamiento nominal del sistema no se ve alterado por fallas. Existen varias versiones del espacio de paridad, la más popular de ellas está basada en una representación interna del sistema, en lo que se conoce como variables de estado.

Las ecuaciones de paridad son obtenidas fácilmente después de desarrollar la salida del sistema en el tiempo y formar una ventana de tiempo en la que la variable de salida es conocida. Otra versión trabaja de forma similar pero está basada en la representación externa del sistema. Una tercera versión considera sistemas continuos y retrasos en las mediciones de la salida del sistema. Sin importar cuál sea la versión del espacio de paridad utilizado los residuos deben ser evaluados posteriormente para realizar la detección y el diagnóstico de la falla.

Para todos los casos anteriores puede demostrarse que el espacio de paridad puede ser resumido por medio de la siguiente figura.



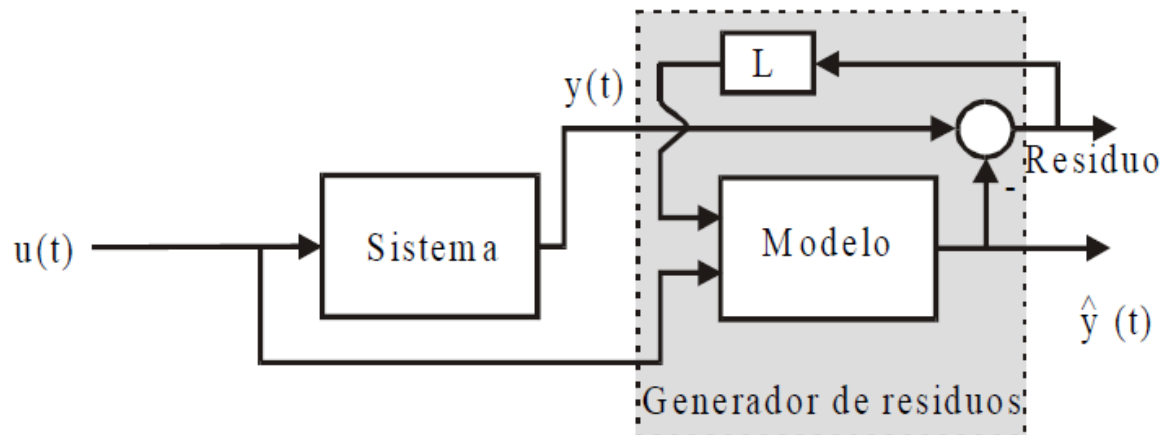
Fuente: ALCORTA G, Efraín. DETECTANDO FALLAS MEDIANTE REDUNDANCIA ANALÍTICA. Ingenierías, abril-junio 2001. Vol IV, No.11.

En la figura anterior podemos ver la señal de entrada, $u(t)$, y las señales de salida del sistema, $y(t)$, y la salida del modelo, $\hat{y}(t)$, el residuo corresponde a la diferencia entre estas dos señales de salida, $r(t) = y(t) - \hat{y}(t)$.

2.2.2. Filtro detector de fallas. La idea básica del filtro detector de fallas es muy parecida a la del espacio de paridad. El filtro corrector de fallas además de contar con un modelo capaz de predecir las salidas del sistema en caso de que hubiera fallas presentes cuenta con un método de corrección.

Si una falla afecta al sistema la diferencia entre las salidas, del proceso y del modelo, será diferente de cero. Para localizar la falla se requiere de más información, la cual se obtiene construyendo residuos sensibles a determinadas fallas. El análisis de todos los residuos proporciona la información deseada.

Figura. 3. Representación gráfica del filtro detector de fallas.



Fuente: ALCORTA G, Efraín. DETECTANDO FALLAS MEDIANTE REDUNDANCIA ANALÍTICA. Ingenierías, abril-junio 2001. Vol IV, No.11.

En la figura anterior podemos ver la señal de entrada, $u(t)$, y las señales de salida del sistema, $y(t)$, y la salida del modelo, $\hat{y}(t)$, el residuo corresponde a la diferencia entre estas dos señales de salida, $r(t) = y(t) - \hat{y}(t)$, el cual se dirige al observador L .

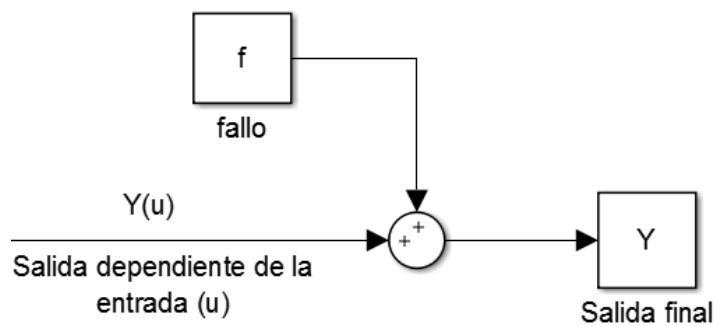
2.2.3. Estimación paramétrica. En éste método los parámetros nominales del proceso, en ausencia de fallas, son comparados con estimaciones actuales. Si existe diferencia entre los parámetros comparados se puede concluir la presencia de la fallas. Aunque éste método permite la localización de la falla de manera directa requiere un amplio conocimiento de las frecuencias de entrada del sistema para poder llevar a cabo la estimación de los parámetros, lo cual hace que sea poco práctico y, generalmente, no operable.

2.3. TIPOS DE FALLAS

Las fallas en los sistemas están divididas según su fuente de origen en el sistema y se dividen en tres partes principales para ubicarlas, las cuales son, fallas en los sensores, actuadores y componentes del sistema, además pueden ser aditivas o multiplicativas:

- **Las fallas aditivas:** Pueden ser modeladas como una superposición de señales en las entradas, estados y salidas del sistema. Los residuos indicadores de fallas se ven afectados aditivamente. Físicamente se pueden encontrar dentro del sistema de control en los sensores cuando se presenta una baja precisión y exactitud en las mediciones, o en el actuador cuando aparece un desplazamiento en su salida, un bloqueo u otros problemas similares.

Figura. 4. Falla aditiva.



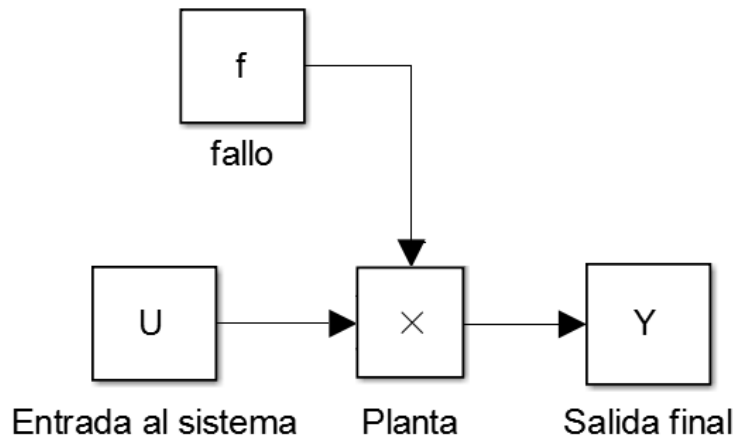
La figura anterior muestra de qué forma se comporta una falla aditiva y la ecuación que la describe, donde los fallos aditivos influyen en la variable “Y” por la adición del fallo f , dando como resultado una salida de la forma.

$$Y = Y(u) + f$$

Donde Y es la salida final, $Y(u)$ es la salida del sistema antes de la adición del fallo y f es el fallo

- **Las fallas multiplicativas:** Afectan parámetros dinámicos del sistema, afectan la señal residual como un producto de términos de variables de estados o de control, se deben a cambios de parámetros en el proceso y pueden mostrarse como cambios en la estructura del modelo. Físicamente son provocadas por el deterioro de los componentes del sistema debido a humedad, fricción, calor, desgaste, etc.

Figura. 5. Falla multiplicativa.



Fuente: Autor.

La figura anterior muestra la forma en que se comportaría el fallo multiplicativo y su ecuación, donde el fallo multiplicativo está dado por el producto de la variable “U” con f . La salida del sistema estaría regida por la siguiente ecuación.

$$Y = U(x + f)$$

Visto de otra forma:

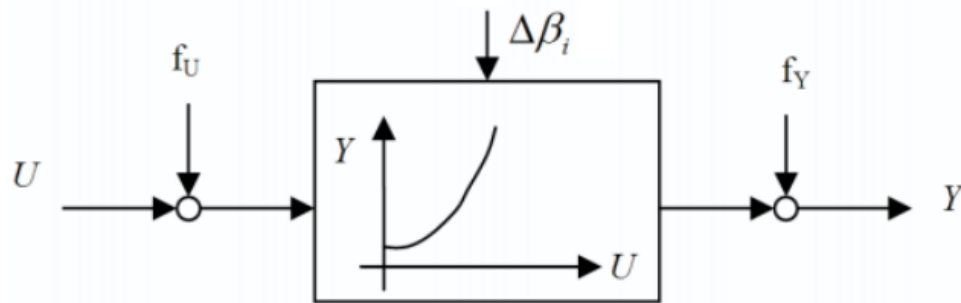
$$Y = U(x) + U(f)$$

Donde Y es la salida del sistema, $U(x)$ es la salida esperada o salida sin fallas y $U(f)$ es la salida provocada por el fallo multiplicativo introducido al sistema.

Por ejemplo, se consideran los parámetros globales del proceso, los cuales operan en lazo abierto el comportamiento estático (estado estable), pueden expresarse frecuentemente por características no lineales, como se muestra en la ecuación y figura siguientes.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 U + \beta_2 U^2 + \dots + \beta_m U^m$$

Figura. 6. Ejemplo de fallas aditivas y multiplicativas.



Fuente: ISERMAN, Rolf. FAULT-DIAGNOSIS SYSTEMS. AN INTRODUCTION FROM FAULT DETECTION TO FAULT TOLERANCE. 2006. Springer. Germany.

Donde los cambios de los parámetros β_i son fallos multiplicativos. Los fallos de señales de entrada f_U y los fallos de señales de salida f_Y son fallos aditivos.

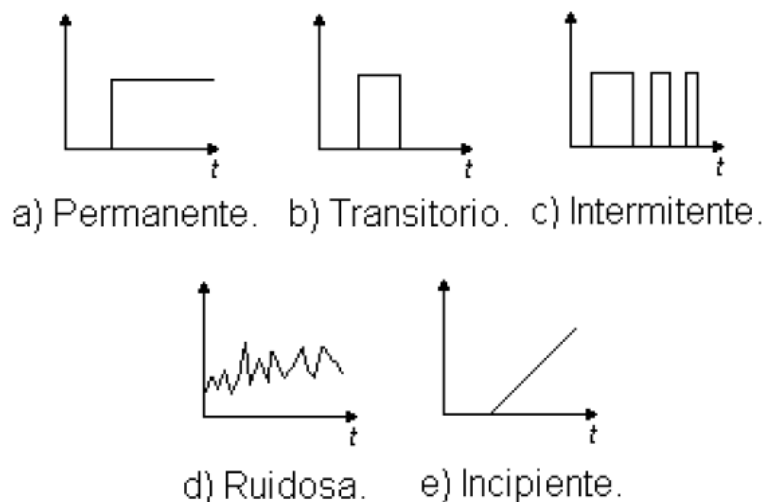
Las fallas también se distinguen por su forma, comportamiento en el tiempo y extensión y son llamadas características dinámicas, las cuales son:

- La forma, puede ser sistemática o aleatoria.
- La extensión de la falla, en referencia a su magnitud, puede ser local cuando afecta un subsistema solamente o global cuando afecta a todo el sistema.
- El comportamiento en el tiempo, como:

- a) **Señal permanente:** Cuando se presenta todo el tiempo hasta ser reparada.
- b) **Señal transitoria:** Cuando puede ser descrita por un transitorio o señal súbita.
- c) **Señal intermitente:** La cual, por ejemplo, es debida a falsos contactos.
- d) **Señal ruidosa:** Cuando modifica su desviación estándar.
- e) **Señal incipiente:** Ca cual tiene una tendencia lenta.

En la siguiente figura se muestra gráficamente cómo se comporta cada una de las fallas anteriormente mencionadas.

Figura. 7. Tipos de fallas según su comportamiento en el tiempo.



Fuente: BUENABAD ARIAS, Héctor. SOBRE LA DETECCIÓN DE FALLAS USANDO EL NÚCLEO HÍBRIDO DE TRANSICIÓN DE ESTADOS: APLICACIÓN A UN SISTEMA ELECTRONICO NO LINEAL. 2004. Centro nacional de desarrollo tecnológico. Cuernavaca, México.

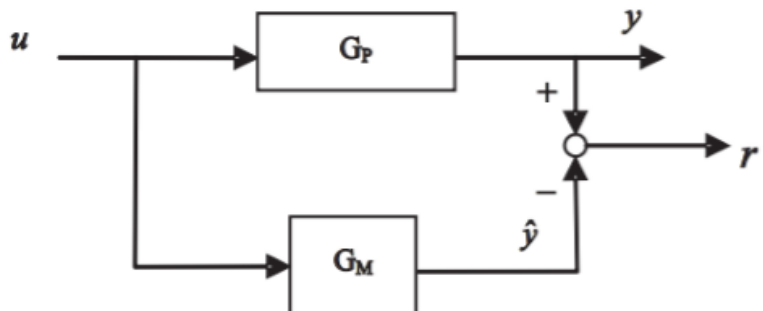
2.4. DETECCIÓN DE FALLAS CON ECUACIONES DE PARIDAD

Este método tiene la propiedad de poder operar en línea. La configuración de estos modelos puede ser en serie o en paralelo, lo que nos lleva a obtener residuos con diferente sensibilidad. Se comparan los residuos de estos dos modelos y se escoge el que tenga mayor sensibilidad para la detección de los fallos.

2.4.1. Ecuaciones de paridad para procesos de una entrada y una salida (SISO). Un método directo basado en el modelo para la detección de fallos es obtener un modelo del sistema “ G_M ” (equivalente a “ G_P ”) y operarlo en paralelo con “ G_P ” y de esta manera formar el error de salida, como se observa en la siguiente ecuación y figura.

$$r'(s) = [G_P(s) - G_M(s)]u(s)$$

Figura. 8. Método de error en la salida. Sistema de una entrada y una salida (SISO).



Fuente: ISERMAN, Rolf. *FAULT-DIAGNOSIS SYSTEMS. AN INTRODUCTION FROM FAULT DETECTION TO FAULT TOLERANCE*. 2006. Springer. Germany.

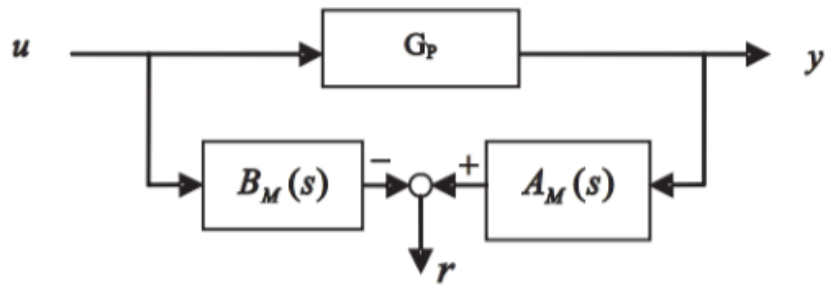
Los parámetros del proceso deben ser conocidos con anterioridad, si $G_P(s)=G_M(s)$, entonces el error de salida será un fallo aditivo de entrada y salida, como se vio anteriormente y puede ser modelado como se vio anteriormente, con la siguiente forma: $r'(s)= G_P(s)fU(s)+fY(s)$.

Otra forma es generar un error polinomial, como se muestra en las siguientes ecuaciones y su respectiva figura.

$$r(s) = A_M(s)y(s) - B_M(s)u(s)$$

$$r(s) = B_P(s)f_u(s) + A_P(s)f_y(s)$$

Figura. 9. Método de ecuación de error. Sistema de una entrada y una salida (SISO).



Fuente: ISERMAN, Rolf. *FAULT-DIAGNOSIS SYSTEMS. AN INTRODUCTION FROM FAULT DETECTION TO FAULT TOLERANCE*. 2006. Springer. Germany.

En ambos casos se obtienen diferentes respuestas de tiempo para un fallo aditivo de entrada y salida. “ $r'(s)$ ” es equivalente al error de salida de la estimación paramétrica vista anteriormente y “ $r(s)$ ” a la ecuación de error también vista en ese mismo punto, ambas ecuaciones son llamadas ecuaciones de paridad. Para procesos SISO solamente un residuo puede ser generado y por lo tanto es difícil distinguir entre diferentes errores.

2.4.2. Ecuaciones de paridad para procesos de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Para los modelos de sistemas con múltiples entradas y salidas (MIMO) se utilizan las ecuaciones de salida que se insertan en las ecuaciones de estado, dando lugar a tiempos diferenciados en el sistema de ecuaciones.

$$\dot{x}(t) = A_x(t) + B_u(t)$$

$$y(t) = C_x(t)$$

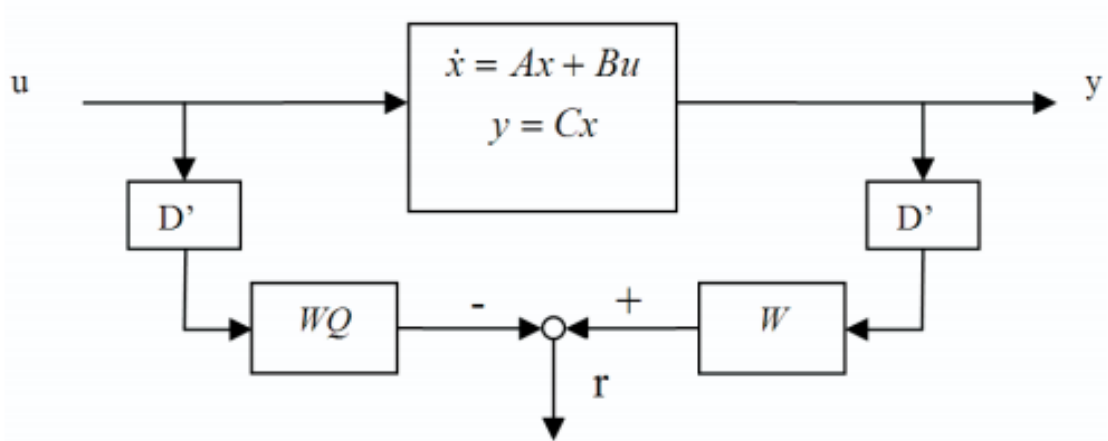
Figura. 10. Ecuación de estado y Ecuación de salida para un sistema MIMO.

$$\begin{bmatrix} y(t) \\ \dot{y}(t) \\ \ddot{y}(t) \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots \\ CB & 0 & 0 \\ CAB & CB & 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \\ \ddot{u}(t) \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Fuente: RAMIREZ VALENZUELA, Julio. *DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN SISTEMAS INDUSTRIALES BASADO EN RAZONAMIENTO BORROSO Y POSIBILÍSTICO*. 2007. Universidad politécnica de valencia. España.

Se eliminan los estados no medibles de x en el tiempo y se aplican filtros de diferenciación para completar el proceso y obtener el residuo que posteriormente será clasificado para diagnosticar con precisión alguna falla presente en el sistema, cabe resaltar que este método permite generar varios residuos a la vez y estos representarían diferentes tipos de fallas en distintos lugares, esquemáticamente tendría la siguiente forma.

Figura. 11. Esquema del sistema con múltiples entradas y salidas MIMO.



Fuente: RAMIREZ VALENZUELA, Julio. *DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN SISTEMAS INDUSTRIALES BASADO EN RAZONAMIENTO BORROSO Y POSIBILÍSTICO*. 2007. Universidad politécnica de valencia. España.

2.4.3. Evaluación del residuo. La evaluación requiere determinar si los residuos sobrepasan un valor de umbral, o rango, determinados. Generalmente la evaluación

de los residuos se realiza obteniendo una medida del residuo que puede ser estadística o determinista.

La evaluación estadística se basa en el cálculo de la desviación estándar, media, kurtosis, etc. La evaluación determinista se basa en la noción definida de los espacios vectoriales, tales como norma, siendo las más utilizadas la norma euclidiana y la norma infinito.

Durante el desarrollo del trabajo se clasificaran los residuos por medio de las características estadísticas de los residuos, las cuales son principalmente: la media, la media cuadrática, desviación estándar, sesgo y oblicuidad. A continuación una breve explicación de cada una de ellas.

- a. La **Media**, corresponde al valor representativo central de observaciones secuenciales y estrechamente relacionadas entre sí, tales como tasas de: interés, inflación, devaluación, variación, crecimiento, disminución. El promedio geométrico de los valores:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- b. La **RMS**, o media cuadrática, es una medida que permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. Toma valores desde el cero hasta infinito, un valor cercano a cero indica muy poca variación. Consiste en elevar al cuadrado todas las observaciones (así los signos negativos desaparecen), en obtener después su media aritmética y en extraer, finalmente, la raíz cuadrada de dicha media para volver a la unidad de medida original. La desviación estándar es una media cuadrática.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

- c. La **Desviación estándar** es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Dicho de otra forma, es el "promedio" o variación esperada con respecto a la media aritmética.

La desviación estándar de un grupo repetido de medidas nos da la precisión de éstas. Cuando se va a determinar si un grupo de medidas está de acuerdo con el modelo teórico, la desviación estándar de esas medidas es de vital importancia, por ejemplo, si la media de las medidas está demasiado alejada de la predicción (con la distancia medida en desviaciones estándar), entonces consideramos que las medidas contradicen la teoría. Esto es coherente, ya que las mediciones caen fuera del rango de valores en el cual sería razonable esperar que ocurrieran si el modelo teórico fuera correcto. La desviación estándar es uno de tres parámetros de ubicación central; muestra la agrupación de los datos alrededor de un valor central (la media o promedio).

$$Std = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}$$

- d. La **Oblicuidad**, o **Skewnees** (en inglés), es una medida de que tan asimétrica es una distribución alrededor de su media. Si el sesgo es igual a cero, la distribución es simétrica; si el sesgo es positivo, la distribución una tendrá una cola asimétrica extendida hacia los valores positivos y un sesgo negativo indica una distribución con una cola asimétrica extendida hacia los valores negativos. Debido a la tercera potencia involucrada en su cálculo, también se le llama tercer momento de la distribución.

$$Skw = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{(x_i - m)^3}{Std} \right)$$

e. La **Kurtosis**, o **Sesgo**, una medida que sirve para analizar el grado de concentración que presentan los valores de una variable analizada alrededor de la zona central de la distribución, sin necesidad de generar el gráfico. Un número igual a tres indica una distribución normal o *mesocúrtica*, si es mayor indica una distribución apuntada y con colas cortas llamada *leptocúrtica*, y, si es menor muestra una distribución dispersa y con colas más largas, también llamada *platicúrtica*.

$$Kur = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{(x_i - m)^4}{Std} \right)$$

2.5. FALLAS EN CILINDROS HIDRÁULICOS

Los actuadores hidráulicos son los encargados de transformar la energía hidráulica en energía mecánica, dependiendo del tipo de actuador se desprende su movimiento y por ende sus posibles aplicaciones. Un tipo de actuador hidráulico son los actuadores hidráulicos lineales, como los cilindros hidráulicos, que transforman la energía entregada por el fluido hidráulico en un movimiento lineal que puede ser utilizado para empujar, comprimir, halar, guiar, entre otras aplicaciones.

Los cilindros hidráulicos, como cualquier otro equipo mecánico, llega a presentar fallos en algún momento de su vida útil ya sea por una mala operación, un accidente, por desgaste, etc. Éste tipo de fallos se pueden resumir como la faltas de funcionamiento del cilindro hidráulico como falta de fuerza para empujar la carga, deslizamientos en el pistón o gateo. Debido al mal funcionamiento del equipo se pueden presentar paradas del equipo y accidentes, por eso es necesario dar importancia al diagnóstico de las fallas y al mantenimiento de los cilindros

hidráulicos. A continuación algunos de los modos de falla del cilindro hidráulico y sus posibles causas.

2.5.1. Acción falsa o mal funcionamiento de la acción. Coloquialmente podríamos decir que es cuando el cilindro no sale. Existen varios motivos y acciones que se pueden realizar:

a. La bobina de la válvula se atasca o los orificios de la válvula se encuentran obstruidos. Cuando la bobina de la válvula se atasca, generalmente, se conectan los orificios internos de la válvula, generando pérdidas de presión y caudal.

Es necesario revisar las condiciones en las que se encuentra el aceite hidráulico, si su contaminación es excesiva, esta contaminación contribuye a obstruir los orificios de la válvula, además puede rayar las superficies internas de los elementos hidráulicos. Revise, lave y cambie, si es necesario, el filtro del sistema; lave el tanque de almacenamiento y reemplace el fluido hidráulico si se encuentra en malas condiciones.

b. El cilindro hidráulico se encuentra atascado. De ser así, apenas se detectará movimiento en el cilindro o ningún movimiento.

El sello del pistón puede estar muy apretado o ajustado con sedimentos por suciedad del aceite hidráulico, el vástago se encuentra torcido, algunos sellos rotos que causen pérdidas de presión en el sistema o puede que la carga a la cual está siendo sometido es demasiado grande.

c. La presión del sistema hidráulico es demasiado baja. Las pérdidas en las tuberías pueden ser demasiado grandes, la válvula de alivio está regulada incorrectamente, la fuente de presión, bomba, sufre algún problema. Se debe revisar la fuente de presión para asegurar la regulación de la presión es la necesaria para un correcto funcionamiento del sistema.

- d. Entra aire en el circuito hidráulico.** Principalmente porque hay fugas en el sistema. En este punto debe comprobar, al menos, el nivel del tanque de almacenamiento, puerto de succión de la bomba y filtros que pueden estar muy sucios. Si es así, debe complementar el aceite hidráulico, lavar, ajustar y/o cambiar los filtros involucrados.

- e. La acción inicial del cilindro hidráulico es lenta.** Este problema puede ser causado por bajas temperaturas en el aceite hidráulico, aumentando su viscosidad y disminuyendo la fluidez del mismo por el circuito. La solución para lugares donde las temperaturas ambiente son muy bajas es usar calentadores para el aceite en el tanque e incluso en algunas tuberías si es necesario, la temperatura normal de trabajo para equipos hidráulicos es alrededor de 40° C.

2.5.2. Trabajo irregular y falta de fuerza. En este caso tendremos empuje insuficiente, inestabilidad en el movimiento del pistón, irregularidad en su velocidad y movimientos inesperados del cilindro. Sus posibles causas son:

- a. Fuga interna en el cilindro hidráulico.** Este tipo de fuga comprende la fuga en la junta del cilindro hidráulico, la fuga el vástago del pistón y la fuga en el cierre hermético, también es posible que la abrasión excesiva en la junta del pistón contribuya en este problema

El motivo por el cual las fugas en el vástago y la cubierta del sello son el pliegue, la extrusión, el rasgón, la abrasión, el envejecimiento, el metamorfismo y la deformación, entre otros, del sello.

La abrasión excesiva puede ser causada por una mala regulación de válvulas de control de presión, velocidad o secuencia, que crean contrapresiones innecesarias o excesivas, la instalación incorrecta de los sellos y contaminación del aceite hidráulico.

- b. Fugas en el circuito hidráulico.** Toda fuga presente en el sistema afecta directamente el desempeño del actuador hidráulico, incluyendo fugas en válvulas y fugas de tuberías hidráulicas. El método de reacondicionamiento consiste en buscar en dónde puede encontrarse la fuga y repararla.

- c. El aceite hidráulico vuelve al tanque a través de la válvula de alivio.** Entre las posibles causas encontramos que la carga de trabajo es demasiado grande y el sistema no puede alcanzar la presión necesaria para moverla así la válvula de alivio se encuentre en su valor nominal máximo, también puede tener obstrucciones en alguna parte del circuito causando presiones indeseadas que junto a las pérdidas terminan abriendo la válvula de alivio, o simplemente el taraje de la válvula es muy bajo para el trabajo deseado.

2.5.3. Resbalón o arrastre del cilindro hidráulico. El resbalón o arrastre del cilindro hará que éste funcione de manera inestable. Algunas de las razones por las que se presenta este problema son:

- a. Problemas en las partes internas del cilindro.** Las partes internas del cilindro hidráulico pueden estar mal ensamblado, deformado, gastado o las tolerancias de forma y posición arruinadas, además la resistencia al movimiento puede ser demasiado grande causando irregularidades en la velocidad que varían posición del cilindro causando el resbalón. La mayoría de las causas para este problema se deben a mala calidad de montaje, rayas en las superficies de los elementos móviles y aumento de la suciedad del aceite, también agravado por la viruta dejada cuando se rayan las piezas móviles de los elementos hidráulicos. La solución es reparar, ajustar o reensamblar, reemplazar las piezas dañadas y eliminar la suciedad del aceite.

- b. Pobre lubricación o mecanizado del diámetro del cilindro hidráulico.** Debido a que el pistón y el cilindro, el carril y el vástago del pistón y así sucesivamente tienen movimiento relativo, la mala lubricación y un mal

acabado del cilindro hidráulico agravará la abrasión, causando desgastes en las piezas móviles. De esta manera, el pistón está trabajando en el cilindro hidráulico con resistencia a la fricción pequeña, dando como resultado deslizamiento o arrastre. Éste tipo de problemas generalmente termina con el cambio de la pieza en cuestión y el mejoramiento de la lubricación y ajustes del sistema.

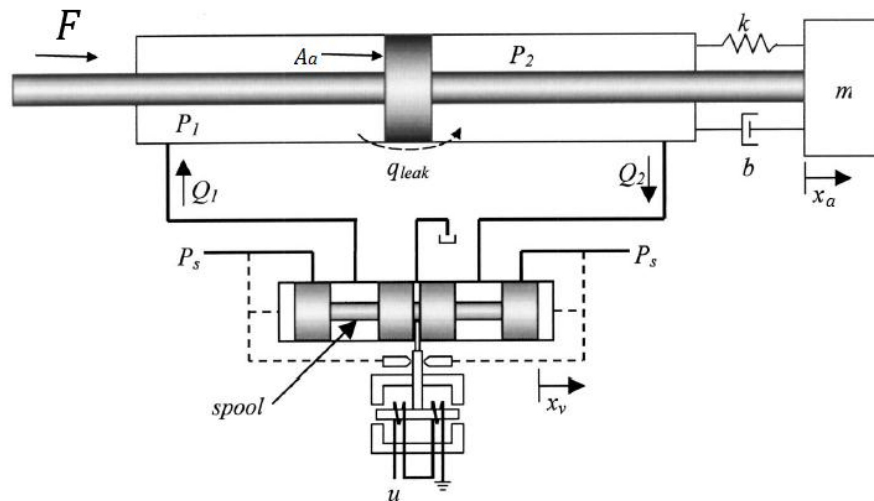
- c. Entrada de aire en el cilindro.** El aire comprimido puede hacer que el pistón se deslice o se arrastre. La medida de exclusión es comprobar el nivel del tanque de almacenamiento para que la bomba hidráulica no esté succionando aire.

3. MODELADO DINÁMICO DEL SISTEMA

El sistema a modelar es un servo actuador hidráulico, el cual está compuesto por una servo válvula y un actuador hidráulico no diferencial de doble efecto.

Para llevar a cabo el modelado es necesario realizar un esquema general del mecanismo para visualizar la dinámica del sistema.

Figura. 12. Esquema general del sistema dinámico.



Fuente: Sepehri N, Karpenko M. *Robust Position Control of an Electrohydraulic Actuator with a Faulty Actuator Piston* Seal. 2003.

La figura anterior muestra las variables que se han tenido en cuenta durante el proceso de modelado del sistema, en donde P_1 y P_2 son las presiones en cada una de las cámaras del cilindro; Q_1 y Q_2 son los caudales que entran y salen del actuador; q_{leak} es el caudal de pérdidas a través de las cámaras del cilindro; A_a es el área efectiva en el actuador; k es la constante de amortiguación del sistema; b es la constante de fricción viscosa; x_a representa la posición del cilindro y x_v la posición del spool de la servoválvula y F es la fuerza ejercida por el sistema.

La dinámica del sistema depende de:

- La mecánica newtoniana del movimiento del actuador.
- La ecuación de continuidad para los volúmenes de fluido.
- Las características de flujo en la servo válvula y la fuga del sello del pistón.

3.1. ANÁLISIS DINÁMICO DEL COMPORTAMIENTO DEL ACTUADOR

Teniendo en cuenta estas aclaraciones podemos empezar aplicando la segunda ley de newton en el cilindro.

$$\sum F = m * a \quad (3.1)$$

La sumatoria de fuerzas es igual a la masa por la aceleración.

$$F - b * \frac{dx_a}{dt} - k * x_a = m * \frac{d^2x_a}{dt^2} \quad (3.2)$$

Donde m es la masa, b el coeficiente de fricción viscosa, k el coeficiente de amortiguación, F es la fuerza ejercida por el cilindro y x_a es la posición.

El actuador para el cual fue realizado el modelo es un cilindro no diferencial de doble efecto, por lo tanto, el área efectiva de trabajo en cualquiera de sus dos cámaras será la misma.

$$A_1 = A_2 = A_a \quad (3.3)$$

$$A_a = A_p - A_v \quad (3.4)$$

Donde A_1 y A_2 son las áreas de cada una de las cámaras del cilindro, A_v corresponde al área del vástago y A_p al área del pistón.

De forma similar, la presión ejercida sobre el área activa es igual a la diferencia entre las presiones en cada una de las cámaras del cilindro, la cual llamaremos ΔP_L o sencillamente P_L .

$$P_L = P_1 - P_2 \quad (3.5)$$

Donde P_1 y P_2 son las presiones en cada una de las cámaras del actuador.

Entonces, la fuerza ejercida por el cilindro será igual al área activa (A_a) por la presión ejercida sobre ella (P_L):

$$F = P_L * A_a \quad (3.6)$$

Reemplazando y despejando de las ecuaciones 1 y 2 se obtiene:

$$P_L * A_a - b * \frac{dx_a}{dt} - k * x_a = m * \frac{d^2x_a}{dt^2} \quad (3.7)$$

$$\frac{d^2x_a}{dt^2} = \frac{1}{m} * \left[P_L * A_a - k * x_a - b * \frac{dx_a}{dt} \right] \quad (3.8)$$

Dicho de otra manera

$$\ddot{x}_a = \frac{1}{m} * \left[A_a * P_L - k * x_a - b * \dot{x}_a \right] \quad (3.9)$$

Donde \ddot{x}_a es la aceleración, \dot{x}_a la velocidad y x_a la posición del cilindro.

3.2. ANÁLISIS DINÁMICO DEL FLUJO EN EL CILINDRO

Para el analizar el comportamiento del fluido dentro del actuador debemos tener en cuenta que éste es compresible, el módulo del Bulk indica la presión necesaria para lograr una reducción unitaria del volumen.

$$\beta = V * \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T \quad (3.10)$$

O dicho de otra forma

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V}{\beta} * \frac{dP}{dt} \quad (3.11)$$

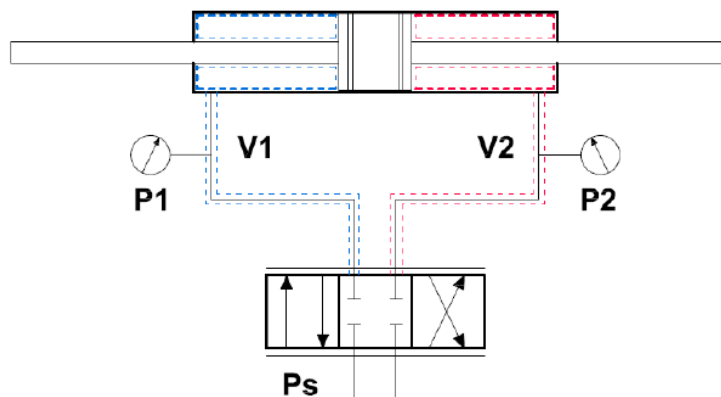
Ahora, lo que se sería el caudal inicial en cada una de las cámaras, cuando el cilindro se encuentra en su posición inicial $x_a = 0$.

$$Q_i = \frac{V_i}{\beta} * \dot{P} \quad (3.12)$$

El cambio en el caudal con respecto al tiempo es

$$\Delta Q = A_a * \dot{x}_a \quad (3.13)$$

Figura. 13. Distribución del volumen de fluido dentro del actuador.



Fuente: MARIÑO, Carlos. CHAVARRO, Johan. MODELADO Y CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE UN SERVOACTUADOR HIDRÁULICO. 2010. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.

En la figura anterior se puede observar la forma en que está contenido el fluido dentro del actuador.

Teniendo en cuenta esto se analiza el flujo en cada una de las cámaras del actuador y la forma en que éste varía con respecto al tiempo.

Para la posición inicial el volumen en las dos cámaras del cilindro es igual, el cual llamaremos Volumen inicial V_i

$$V_{c1} = V_{c2} = V_i \quad (3.14)$$

Por lo tanto, el Volumen total del cilindro V_T será:

$$V_T = V_{c1} + V_{c2} \quad \text{ó} \quad V_T = 2V_i \quad (3.15)$$

Además, el volumen de cada cámara varía según el movimiento del actuador, de la siguiente forma:

$$V_1 = V_i + A_a * x_a \quad (3.16)$$

$$V_2 = V_i - A_a * x_a \quad (3.17)$$

Entonces, para las cámaras 1 y 2, el caudal será

$$Q_1 = \frac{V_1}{\beta} * \dot{P}_L + A_a * \dot{x}_a \quad (3.18)$$

$$Q_2 = \frac{V_2}{\beta} * \dot{P}_L - A_a * \dot{x}_a \quad (3.19)$$

El caudal mínimo para vencer la carga (Q_L) es el caudal promedio de los dos caudales establecidos más el caudal de pérdidas del sistema.

$$Q_L = Q_{leak} + \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad (3.20)$$

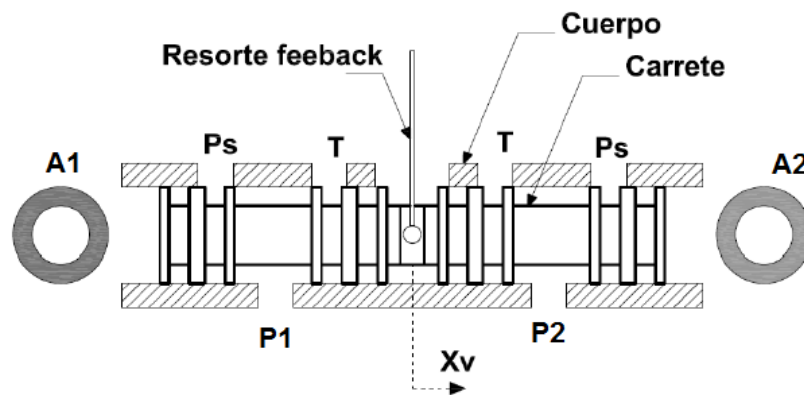
$$Q_L = Q_{leak} + \frac{V_T}{4\beta} * \dot{P}_L + A_a * \dot{x}_a \quad (3.21)$$

Donde Q_{leak} es el caudal de pérdidas.

3.3. ANÁLISIS DINÁMICO DEL FLUJO A TRAVÉS DE LA SERVOVÁLVULA

Suponemos que la válvula es completamente simétrica y que la inercia del carrete es despreciable, además no tiene punto muerto y la ganancia es constante sin importar la frecuencia.

Figura. 14. Esquema de la servoválvula.



Fuente: MARIÑO, Carlos. CHAVARRO, Johan. MODELADO Y CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE UN SERVOACTUADOR HIDRÁULICO. 2010. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.

Para mantener el equilibrio dentro de la servoválvula sabemos que:

$$P_s - P_1 = P_2 - P_R \quad (3.22)$$

Donde P_s es la presión de suministro del sistema y P_R la presión de tanque.

Suponiendo que la presión de retorno al tanque P_R es muy cercana a cero podemos despreciarla

$$P_s = P_1 + P_2 \quad (3.23)$$

Si la presión diferencial del sistema es

$$P_L = P_1 - P_2 \quad (3.24)$$

Entonces:

$$P_1 = \frac{P_s}{2} - \frac{P_L}{2} \quad (3.25)$$

$$P_2 = \frac{P_s}{2} + \frac{P_L}{2} \quad (3.26)$$

Para el análisis dentro de la servoválvula asumimos que el fluido es incompresible y gracias a su simetría los caudales de los puertos 1 y 2 son exactamente iguales, entonces, las ecuaciones de flujo a través de dichos orificios de la válvula son:

Para el flujo que conecta al cilindro por medio de la cámara 1:

$$Q_1 = C_d * x_v * w * \sqrt{\frac{2}{\rho} * (P_s - P_1)} \quad (3.27)$$

Para el flujo que conecta al cilindro por medio de la cámara 2:

$$Q_2 = C_d * x_v * w * \sqrt{\frac{2}{\rho} * (P_2 - P_R)} \quad (3.28)$$

Reemplazando, las ecuaciones del flujo en la válvula son:

$$Q_1 = Q_2 = C_d * x_v * w * \sqrt{\frac{1}{\rho} * (P_s - P_L)} \quad (3.29)$$

Donde C_d es el coeficiente de pérdidas energéticas, x_v es el desplazamiento del carrete de la válvula y w es el gradiente que relaciona el área con el desplazamiento del carretel.

Podemos observar que el caudal de entrada es igual al caudal de salida en la válvula, entonces sólo dependerá del desplazamiento del carretel de la válvula, entonces:

$$Q_L = Q_1 = Q_2 \quad (3.30)$$

$$Q_L = C_d * x_v * w * \sqrt{\frac{1}{\rho} * (P_s - P_L)} \quad (3.31)$$

La relación entre el desplazamiento del carrete con respecto a la señal de entrada está dada por:

$$u = \frac{\tau}{k_{ev}} * \dot{x}_v + \frac{1}{k_{ev}} * x_v \quad (3.32)$$

Sin embargo, las servoválvulas tienen respuestas dinámicas muy elevadas, con tiempos de respuesta de algunos milisegundos, por tanto, la constante de tiempo (τ) puede ser despreciada en este caso, de esta forma tendremos:

$$u = \frac{1}{k_{ev}} * x_v \quad (3.33)$$

$$x_v = u * k_{ev} \quad (3.34)$$

Donde u es la señal de entrada a la servo válvula y k_{ev} es la constante eléctrica de la servo válvula.

De las ecuaciones (6) y (7) el flujo queda:

$$Q_L = u * k_{ev} * C_d * w * \sqrt{\frac{1}{\rho} * (P_s - P_L)} \quad (3.35)$$

3.4. MODELO DEL SISTEMA SIN FALLA.

A partir de las ecuaciones anteriormente deducidas podemos definir las ecuaciones diferenciales que modelan el sistema sin falla.

De las ecuaciones 9 y 35, cuando $Q_{leak} = 0$, obtenemos:

$$\dot{P}_L = \frac{4*\beta}{V_T} [Q_L - A_a * \dot{x}_a] \quad (3.36)$$

Entonces, tendremos el modelo del sistema sin falla, representado por medio de las siguientes ecuaciones, 3 y 9:

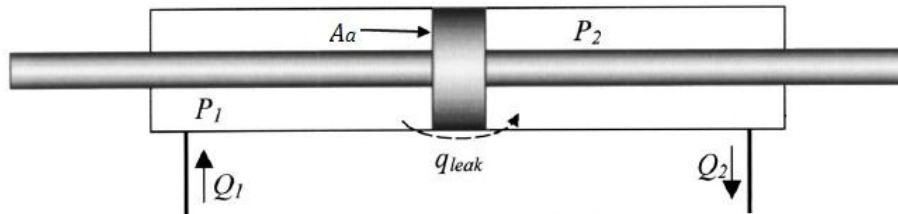
$$\ddot{x}_a = \frac{1}{m} * [A_a * P_L - k * x_a - b * \dot{x}_a] \quad (3.9)$$

$$\dot{P}_L = \frac{4*\beta}{V_T} \left[u * k_{ev} * C_d * w * \sqrt{\frac{1}{\rho} * (P_s - P_L)} - A_a * \dot{x}_a \right] \quad (3.37)$$

3.5. MODELO DEL SISTEMA CON FALLA.

De manera similar definiremos las ecuaciones que modelan el sistema pero esta vez sí se tendrá en cuenta la pérdida por fuga interna en el cilindro.

Figura. 15. Ubicación de la falla en el sistema.



De las ecuaciones 9 y 35, obtenemos:

$$\dot{P}_L = \frac{4*\beta}{V_T} [Q_L - Q_{leak} - A_a * \dot{x}_a] \quad (3.38)$$

La pérdida por fuga interna Q_{leak} se calcula como un flujo turbulento a través de un orificio. Según Sepehri⁵, el caudal de pérdidas se puede modelar de la siguiente manera:

$$Q_{leak} = C_{leak} * w_{leak} * \sqrt{\frac{1}{\rho} * (2P_L)} \quad (3.39)$$

Donde C_{leak} de fuga a través de un orificio y w_{leak} es el área del orificio de fuga.

Reemplazando obtenemos las ecuaciones, 3 y 12, que representan modelo del sistema con falla:

$$\ddot{x}_a = \frac{1}{m} * [A_a * P_L - k * x_a - b * \dot{x}_a] \quad (3.9)$$

$$\dot{P}_L = \frac{4*\beta}{V_T} \left[u * k_{ev} * C_d * w * \sqrt{\frac{1}{\rho} * (P_s - P_L)} - C_{leak} * w_{leak} * \sqrt{\frac{1}{\rho} * (2P_L)} - A_a * \dot{x}_a \right] \quad (3.40)$$

⁵ Sepehri. N, Karpenko. M. Robust Position Control of an Electrohydraulic Actuator with a Faulty Actuator Piston Seal. Journal of dynamic systems, measurement and control.125, September 2003. Pg. 415.

4. SIMULACIÓN

La simulación se realiza por medio de un software computarizado, el cual nos permite analizar la respuesta del sistema modelado anteriormente ante diferentes entradas y parámetros, además brinda la posibilidad de realizar una comparación entre el comportamiento ideal del sistema con el comportamiento bajo efectos de falla antes de intervenir físicamente el banco de pruebas.

Para la simulación se usó el software Simulink de MatLab porque su metodología gráfica, por medio de diagramas de bloques, permite resolver ecuaciones diferenciales de orden superior de forma relativamente fácil y rápida, además, agiliza el análisis del comportamiento de cada una de las variables que intervienen en el modelo y cada uno de los componentes del sistema.

Primero veremos la simulación del sistema en condiciones ideales, sin la presencia ninguna falla, después su comportamiento ante una fuga interna en el pistón y luego la comparación entre los dos estados, de esta última parte se obtienen como resultados los residuos que permiten evaluar y clasificar la falla.

4.1. SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Es necesario simular el sistema en estado ideal para confirmar que las respuestas entregadas por el modelo ante las respectivas entradas correctas y que se comporta de la forma esperada.

La simulación del sistema en ausencia de falla utiliza las ecuaciones deducidas anteriormente, ecuaciones 4.9 y 4.38.

$$\ddot{x}_a = \frac{1}{m} * [A_a * P_L - k * x_a - b * \dot{x}_a] \quad (3.9)$$

$$\dot{P}_L = \frac{4*\beta}{V_T} \left[u * k_{ev} * C_d * w * \sqrt{\frac{1}{\rho} * (P_s - P_L)} - A_a * \dot{x}_a \right] \quad (3.37)$$

Las siguientes figuras muestran las ecuaciones de forma gráfica en Simulink y el sistema completo.

Figura. 16. Subsistema del modelo matemático del sistema.

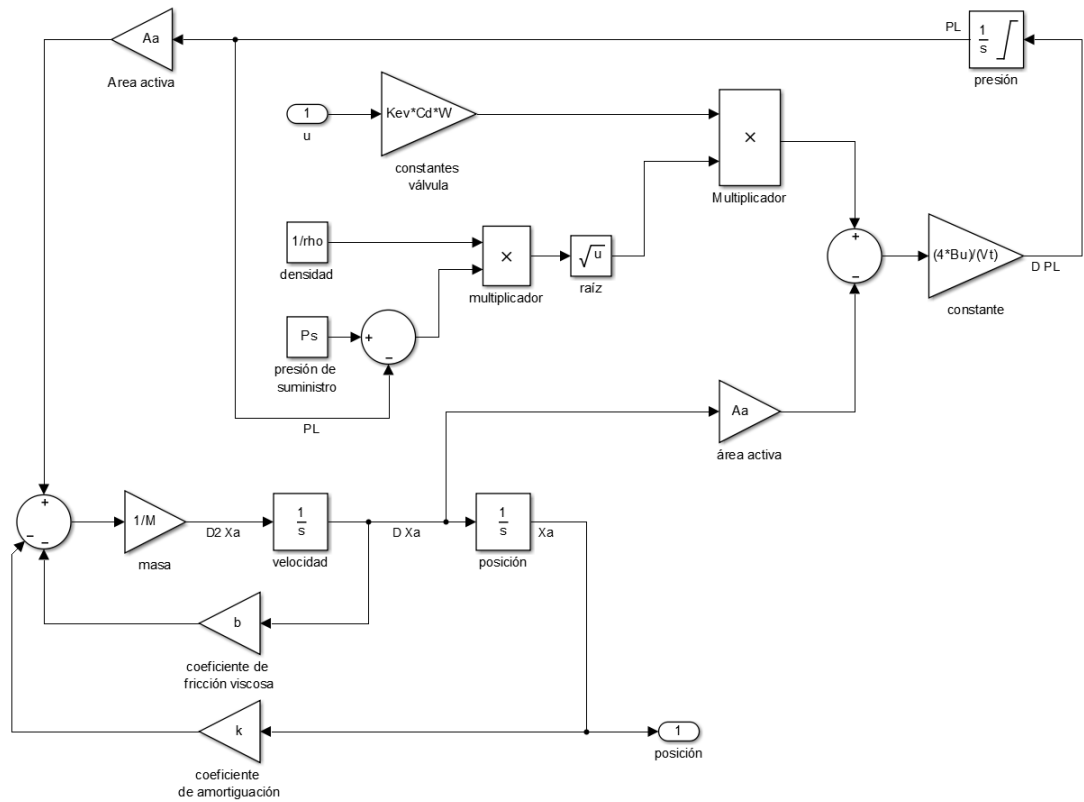
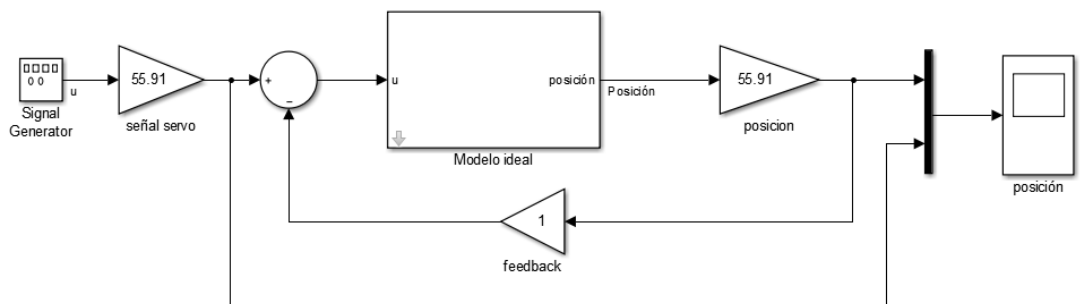


Figura. 17. Modelo del sistema.



En la figura 16, la parte superior corresponde a la ecuación 3.9 donde se encuentran los caudales y las presiones que intervienen en el sistema; la parte inferior

representa ecuación 3.3, despejada a partir de la segunda ley de newton. El valor de entrada al subsistema es la señal u y la salida del mismo es la posición del cilindro x_a . La figura 17 muestra el sistema completo en donde se encuentra el subsistema anteriormente mostrado, la señal de entrada, la de salida y el feedback.

No se conocen todas las constantes ni las variables que involucra el sistema, por lo cual deben ser asumidas para obtener resultados de la simulación y analizar su comportamiento.

Los valores utilizados son:

Tabla 1. Datos utilizados en la simulación.

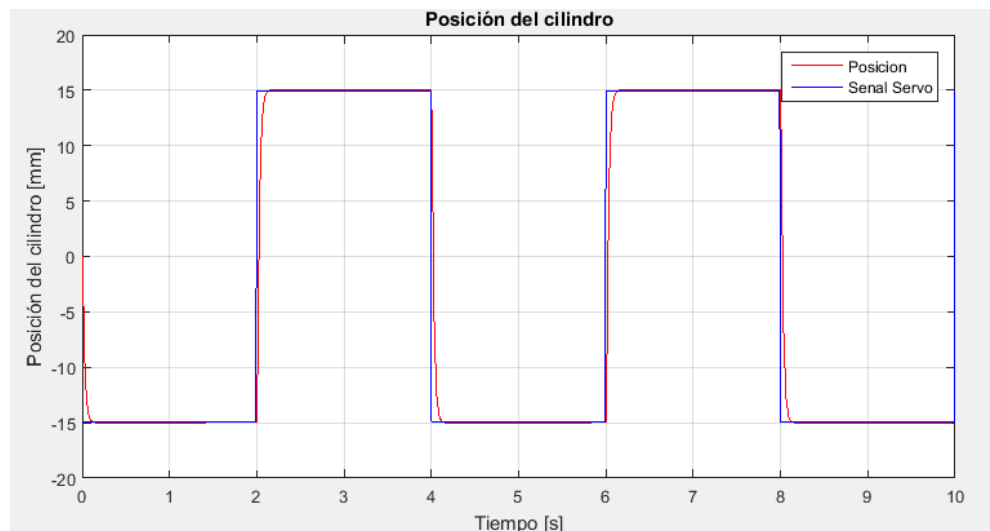
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Presión de suministro	Ps	17,2	Mpa
Masa	m	12	kg
Coefficiente defricción viscosa	b	1000	$\frac{N * s}{m}$
Coefficiente de amortiguación	k	75	$\frac{kN}{m}$
Área anular del cilindro	Aa	633	mm ²
Volumen del cilindro	V	468	mm ³
Densidad del aceite	ρ	847	$\frac{kg}{m^3}$
Módulo de BULK	Bu	689	Mpa
Coefficiente de descarga servoválvula	Cd	0,6	--
Orificio de la servoválvula	w	20,75	$\frac{mm^2}{mm}$
Ganancia de posición del carrete	Kev	0,0406	$\frac{mm}{V}$

En este caso los valores físicos y de las constantes fueron tomados del trabajo de investigación sobre un control de posición para un actuador con fuga interna, de Karpenko y Sepehri⁶, para confirmar que el modelo desarrollado trabaja correctamente.

Como señal de entrada se usaron, una onda cuadrada de amplitud 15mm con periodo de 4 segundos, y una onda sinusoidal con características similares.

El resultado de la simulación es el siguiente:

Figura. 18. Resultado de la simulación del sistema sin falla, Posición del cilindro con onda cuadrada.



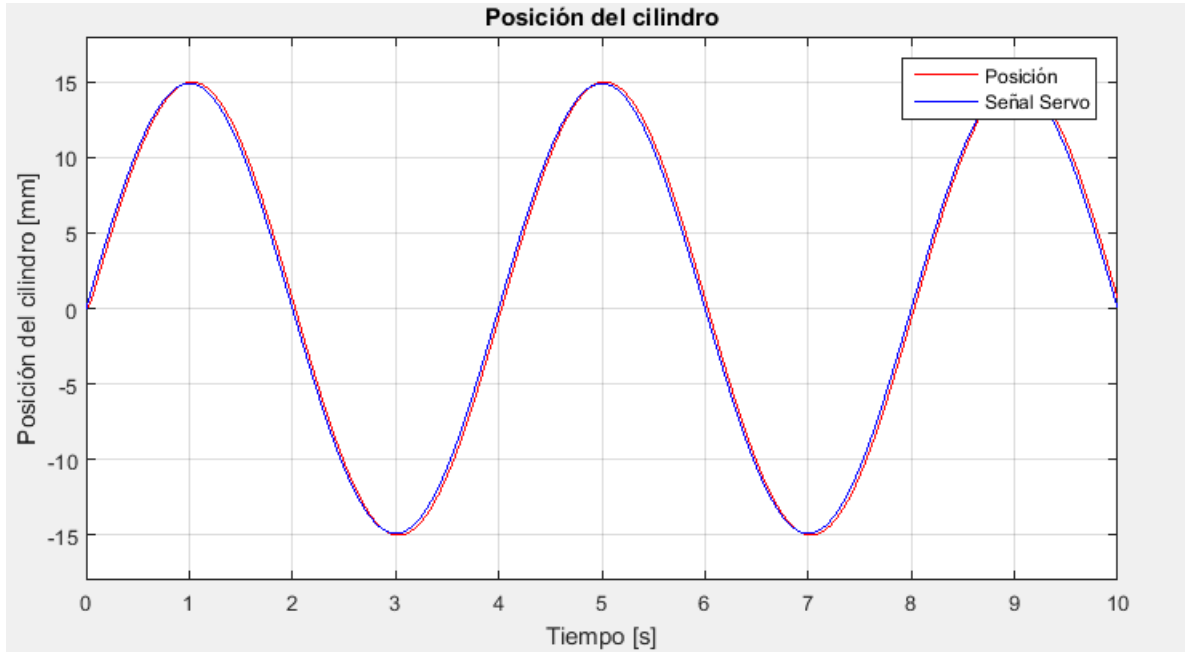
En la figura 18 se muestra la posición del cilindro, línea roja, en cada instante de tiempo con respecto a la señal de entrada, línea azul.

El cilindro llega a la posición deseada en poco tiempo, mantiene su posición y luego la cambia según la señal de control, el error es insignificante y la respuesta es de la forma esperada, de forma similar sucede con la señal sinusoidal.

En la figura siguiente muestra la posición del cilindro para señal sinusoidal, en línea roja, para cada instante de tiempo con respecto a la señal de entrada, línea azul.

⁶ SEPEHRI, N. KARPENKO, M. ROBUST POSITION CONTROL OF AN ELECTROHYDRAULIC ACTUATOR WITH A FAULTY ACTUATOR PISTON SEAL. Journal of dynamic systems, measurement and control.125, September 2003. Pg. 415.

Figura. 19. Resultado de la simulación del sistema sin falla, Posición del cilindro con onda sinusoidal.



Ante este tipo de señal también encontramos una buena respuesta, de forma similar a la respuesta para la señal cuadrada, encontramos que el cilindro en simulación se ajusta bastante bien a la señal de entrada.

4.2. SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN PRECENCIA DE FALLA

Tras la simulación del sistema en ausencia de falla es necesario ver el comportamiento del mismo en condiciones de falla, en este caso con fuga en el sello pistón del cilindro hidráulico.

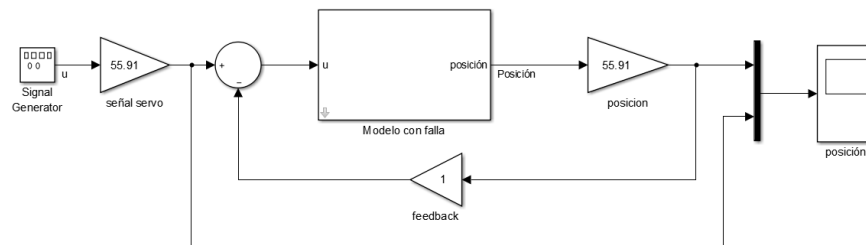
Para simular en sistema con falla se usan las ecuaciones 3.9 y 3.40 deducidas en el capítulo anterior.

$$\ddot{x}_a = \frac{1}{m} * [A_a * P_L - k * x_a - b * \dot{x}_a] \quad (3.3)$$

$$\dot{P}_L = \frac{4*\beta}{V_T} \left[u * k_{ev} * C_d * w * \sqrt{\frac{1}{\rho} * (P_s - P_L)} - C_{leak} * w_{leak} * \sqrt{\frac{1}{\rho} * (2P_L)} - A_a * \dot{x}_a \right] \quad (3.40)$$

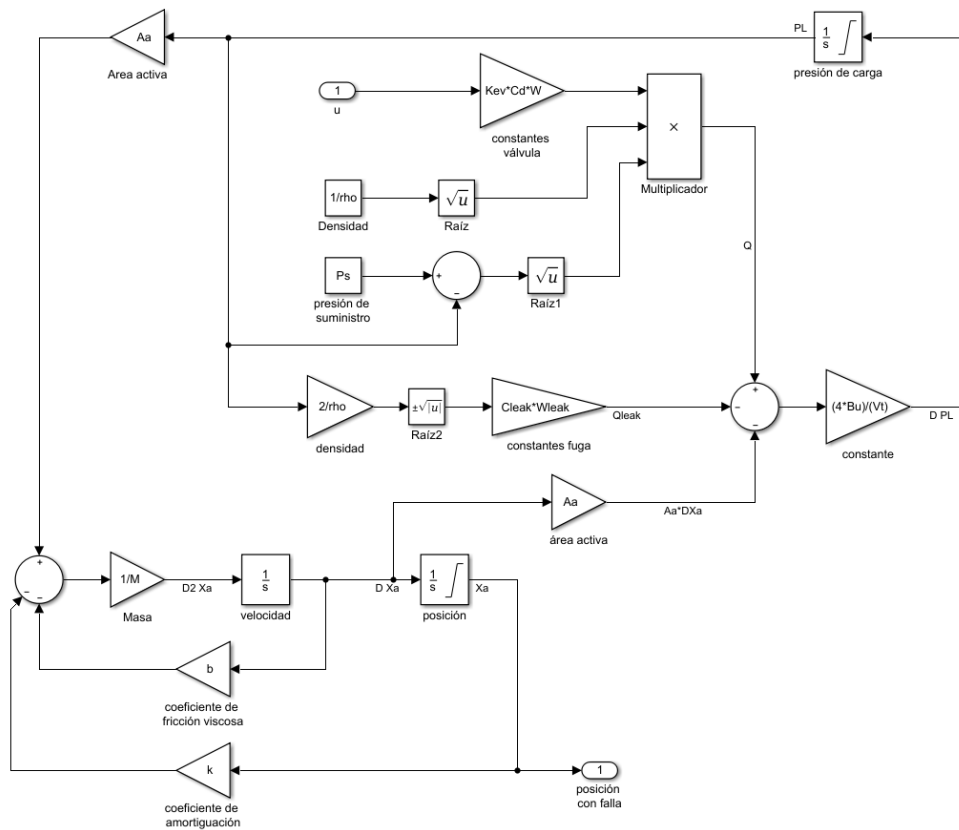
La siguiente figura muestra el sistema completo. Dentro del subsistema encontramos las ecuaciones mencionadas anteriormente de forma gráfica en el programa Simulink.

Figura. 20. Modelo del sistema con falla.



La figura siguiente muestra el subsistema contenido en el sistema anteriormente mostrado.

Figura. 21. Subsistema del modelo matemático del sistema en presencia de falla.



En la figura 21, la parte superior corresponde a la ecuación 3.12 donde se encuentran los caudales, de trabajo y pérdida, y las presiones que intervienen en el sistema; la parte inferior representa ecuación 3.3, despejada a partir de la segunda ley de newton. El valor de entrada al subsistema es la señal u y la salida del mismo es la posición del cilindro x_a .

De nuevo, no se conocen todas las constantes ni las variables que involucra el sistema, por lo cual deben ser asumidas para obtener resultados de la simulación y analizar su comportamiento.

Los valores utilizados durante la simulación son:

Tabla 2. Datos utilizados en la simulación con falla.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Presión de suministro	P_s	17,2	Mpa
Masa	m	12	kg
Coefficiente de fricción viscosa	b	1000	$\frac{N \cdot s}{m}$
Coefficiente de amortiguación	k	75	$\frac{kN}{m}$
Área anular del cilindro	A_a	633	mm^2
Volumen del cilindro	V	468	mm^3
Coefficiente de fugas	C_{leak}	0,7	--
Densidad del aceite	ρ	847	$\frac{kg}{m^3}$
Módulo de BULK	B_u	689	Mpa
Coefficiente de descarga servoválvula	C_d	0,6	--
Orificio de la servoválvula	w	20,75	$\frac{mm^2}{mm}$
Ganancia de posición del carrete	K_{ev}	0,0406	$\frac{mm}{V}$

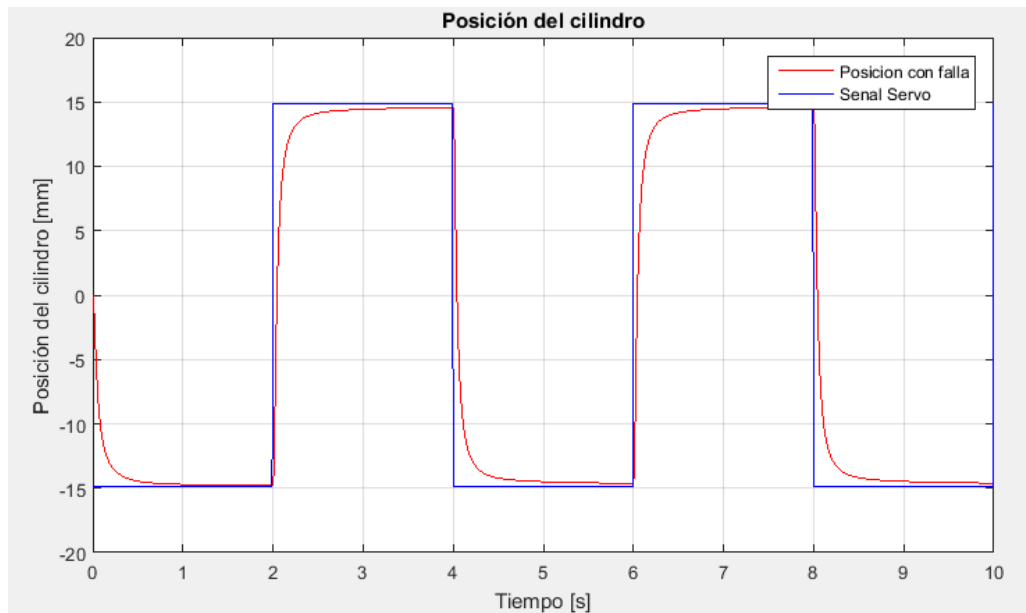
De forma similar al modelo anterior los valores físicos y de las constantes fueron tomados del trabajo de Karpenko y Sepehri⁷ para confirmar que el modelo desarrollado trabaja correctamente.

Como señal de entrada se usó una onda cuadrada de amplitud 15mm con periodo de 4 segundos, y una onda sinusoidal de características similares.

El valor de w_{leak} representa el valor del orificio de la fuga, en esta simulación es de $5e-7$ para que la falla pueda ser vista fácilmente en la gráfica. El error en la posición final es del 5%.

El resultado de la simulación con falla se muestra en la siguiente gráfica, donde la línea roja es la posición para cada instante de tiempo y la línea azul es la señal de entrada.

Figura. 22. Resultado de la simulación del sistema en falla, Posición del cilindro con onda cuadrada.

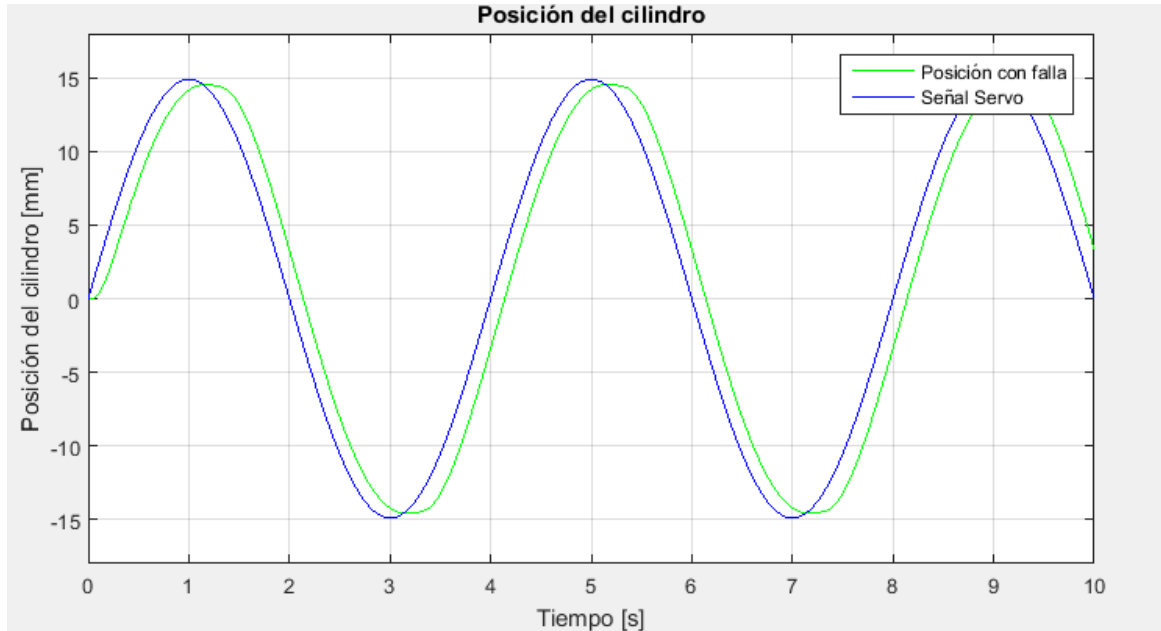


Es evidente que se encuentra bajo efectos de falla cuando se realiza la comparación entre los dos resultados, veremos que el cilindro no se comporta de la misma forma.

⁷ Sepehri, N, Karpenko, M. Robust Position Control of an Electrohydraulic Actuator with a Faulty Actuator Piston Seal. Journal of dynamic systems, measurement and control.125, September 2003. Pg. 415.

De la misma manera se comporta cuando la señal es sinusoidal, tampoco llega a la posición esperada y además presenta un leve retraso en la señal.

Figura. 23. Resultado de la simulación del sistema en falla, Posición del cilindro con onda sinusoidal.



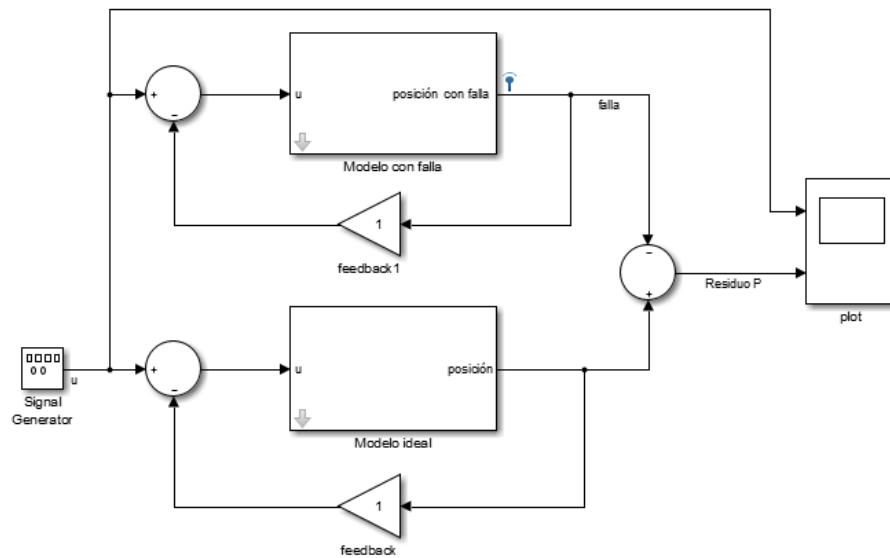
4.3. COMPARACIÓN DEL SISTEMA CON FALLA Y SIN FALLA

Para realizar la detección de la falla en el sistema es necesario comparar el comportamiento del sistema en ambos casos, es decir, cómo se comporta normalmente y cómo se comporta bajo los efectos de la fuga interna entre las cámaras del cilindro.

La siguiente simulación consiste en la integración de los dos modelos revisados anteriormente y la respectiva comparación del comportamiento del cilindro en términos de la posición y los caudales utilizados en cada caso.

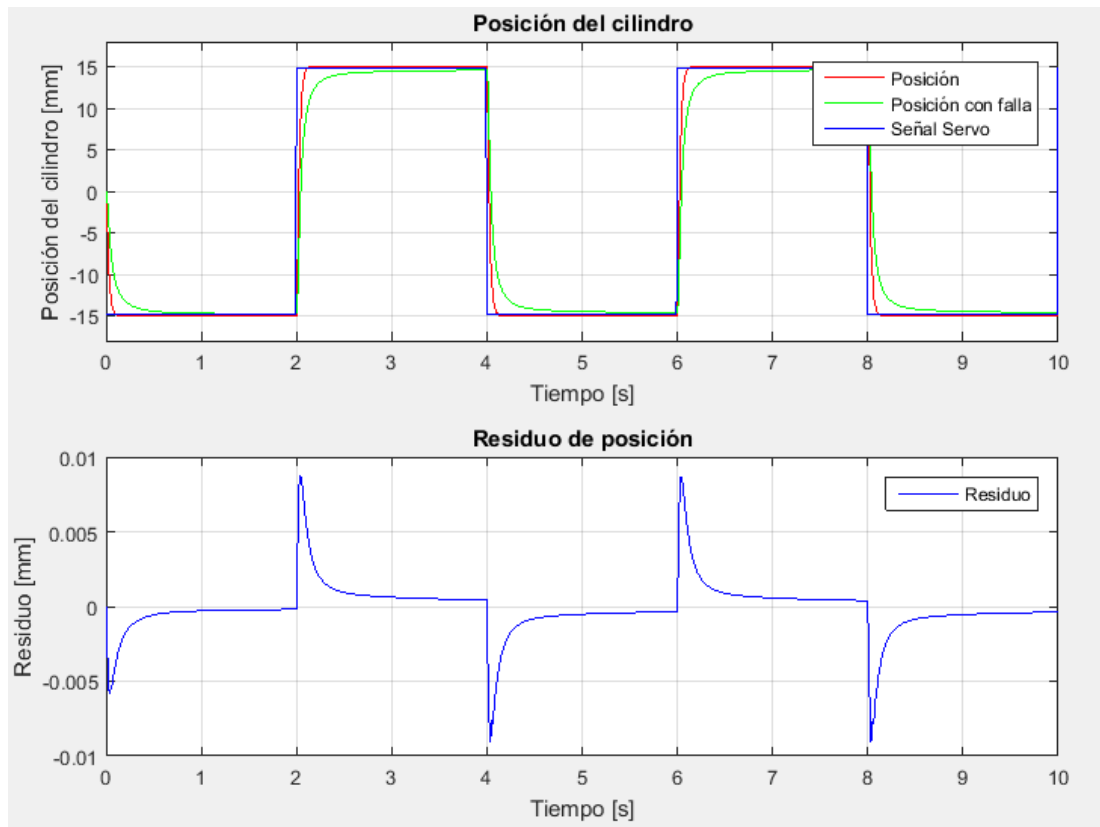
Los datos de posición y de caudal se comparan entre los modelos para obtener un residuo que pueda ser utilizado para determinar la falla y el tipo de falla que se está presentando en el sistema. Los residuos deben ser caracterizados y clasificados de forma experimental para determinar el tipo de falla presente en el sistema.

Figura. 24. Comparación de modelos.



Señal cuadrada:

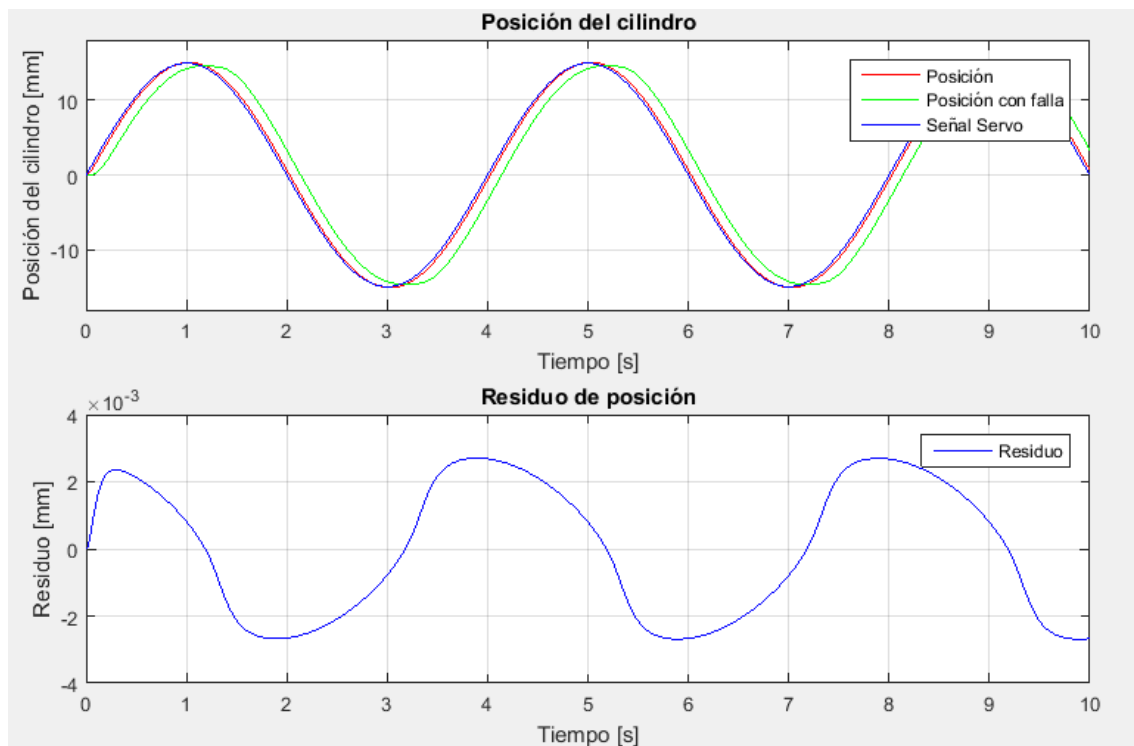
Figura. 25. Residuo de posición, señal cuadrada.



El residuo de posición hace evidente el error causado por la fuga de caudal entre las cámaras. Como se ha visto, el cilindro no llega a la posición final indicada, esta particularidad hace posible detectar que el sistema se encuentra en falla y no trabaja de la manera correcta. Con el residuo de posición es posible encontrar la magnitud del error causado por la falla del sello del pistón, en este caso el error en la posición final es de un valor cercano al 5%.

Señal sinusoidal:

Figura. 26. Residuo de posición, señal seno.



Con la señal seno sucede algo parecido, se puede notar un atraso en la respuesta del sistema además de su déficit en amplitud al no alcanzar el valor estipulado, de igual forma, el residuo muestra que se encuentra bajo presencia de una falla y por medio de éste puede ser detectada.

Con estos resultados podemos decir que el modelo, hasta ahora desarrollado, se comporta de forma correcta, por lo cual podemos esperar buenos resultados del simulador.

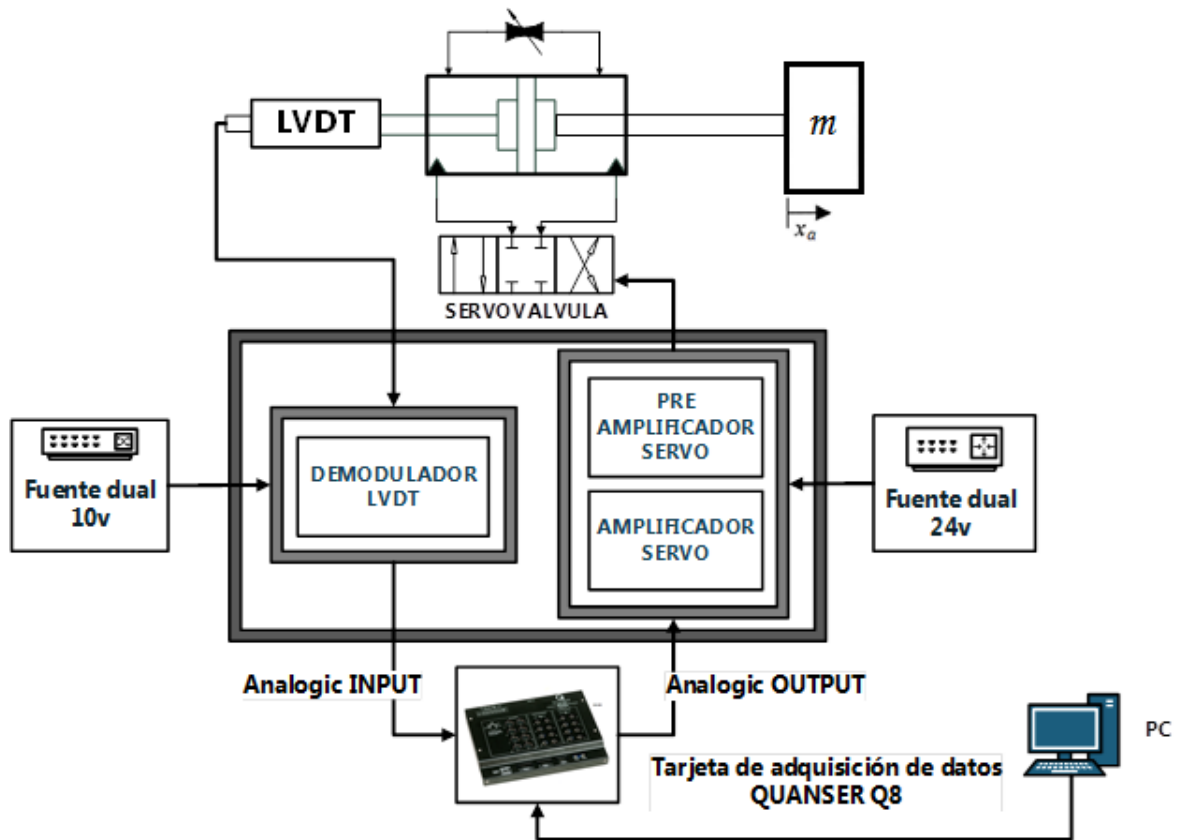
5. VALIDACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL PROPUESTO

El desarrollo de modelos dinámicos de sistemas mecánicos exige un punto de comparación, o referencia, para evaluar los resultados obtenidos y asegurar que el modelo cumple con su función principal y brinda una estimación precisa del comportamiento real del sistema desarrollado, para lo cual es necesario validar el modelo por medio de experimentos.

5.1. GENERACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS.

El banco y gran parte de sus componentes fueron proporcionados por el grupo de investigación DICBOT.

Figura 27. Esquema de las conexiones en el banco Mesa sísmica.



La figura anterior muestra los componentes del banco de trabajo y sus conexiones principales. En capítulos anteriores se habló acerca de estos componentes a excepción de la tarjeta de adquisición de datos Quanser Q8, proporcionada por el director de proyecto.

5.1.1. Tarjeta de adquisición de datos Quanser q8.

La revolucionaria tecnología de adquisición de datos USB de Quanser ofrece un rendimiento confiable en tiempo real a través de una interfaz USB. Q8-USB se combina con una placa de terminales para un acceso fácil y rápido a las señales.

Figura 28. Tarjeta de adquisición de datos Quanser Q8USB.



FUENTE: Catálogo de Quanser. 2017.

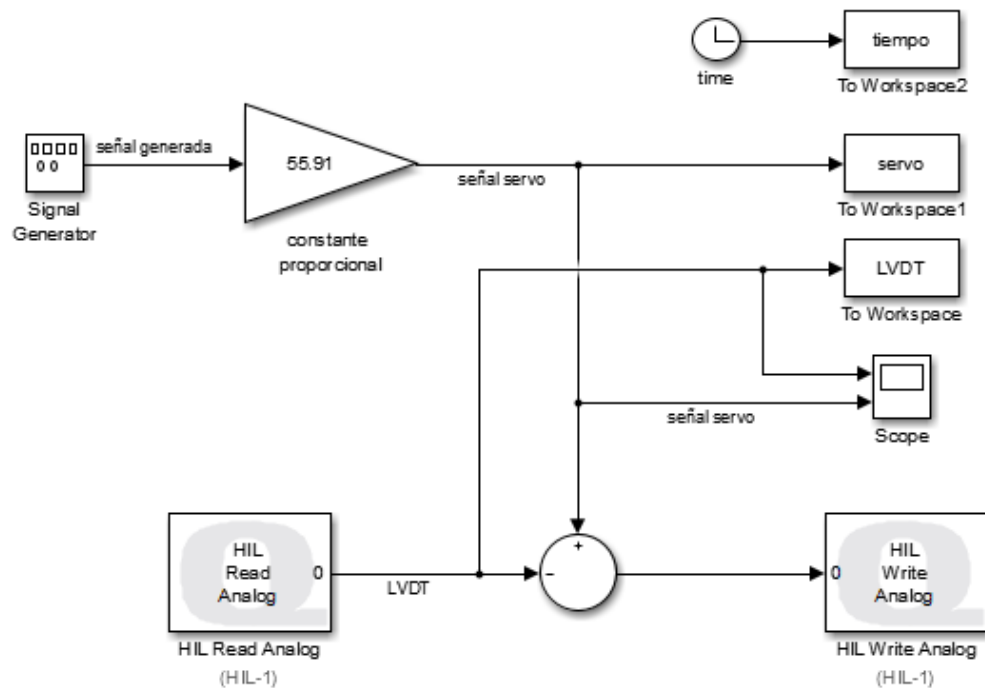
Incluye una amplia gama de características de hardware y capacidades de soporte de software y son compatibles tanto con MATLAB® como con LabVIEW™. Con bajos tiempos de conversión y fácil conectividad, el Q8-USB es ideal para enseñar conceptos de control, ya que el usuario puede lograr una tasa de control de bucle cerrado de hasta 2 kHz. Esta tasa de control es superior a cualquier otra tecnología USB-DAQ disponible comercialmente. Cuando se combina con el software de diseño de control QUARC®, el Q8-USB proporciona un entorno de desarrollo rápido

de creación de prototipos y Hardware-In-The-Loop (HIL). Con la amplia gama de entradas y salidas, puede conectar y controlar fácilmente una variedad de dispositivos equipados con sensores analógicos y digitales, incluidos codificadores, todo con una sola placa. Q2-USB y Q8-USB son compatibles con Quanser HIL SDK, que proporciona API para C, C ++, ActiveX, .NET, LabVIEW™ y MATLAB®.

5.1.2. Caracterización Ivdt. Con el banco, mesa sísmica, en funcionamiento procedemos a la caracterización del LVDT, la cual se hizo de forma manual aprovechando su característica linealidad y el fácil manejo de la tarjeta de adquisición de datos.

Para este procedimiento usamos un modelo en Simulink desde el cual introducimos una señal de entrada generada por un bloque de función, *signal generator*, y transmitida a la servo válvula por medio del bloque de función “*write*” de Quanser, luego, por medio de otro bloque de función, “*read*” de Quanser, son leídas las señales enviadas por el LVDT y guardadas en el workspace.

Figura 29. Modelo para toma de datos.



La señal de entrada se da en metros y la respuesta del LVDT en volts, por practicidad y con aras de disminuir los errores en la toma de datos se decidió tomar todas las salidas en función del LVDT. Como resultado obtuvimos una constante proporcional de valor 55.91 para éste modelo.

Los datos son cargados en el workspace de MatLab y posteriormente guardados en Excel para su análisis.

5.1.3. El banco de pruebas. El banco de pruebas, para hacerlo de la forma más organizada posible, consta de tres módulos. El primer módulo será el Módulo de potencia, conformado por la unidad de potencia MTS y su banco de acumuladores MTS (a la parte derecha de la foto siguiente). Está encargado de entregar la potencia hidráulica al banco para reproducir los movimientos deseados, para las pruebas realizadas se trabajó con el nivel más bajo de presión que ofrece la unidad de acumuladores, 1000 Psi.

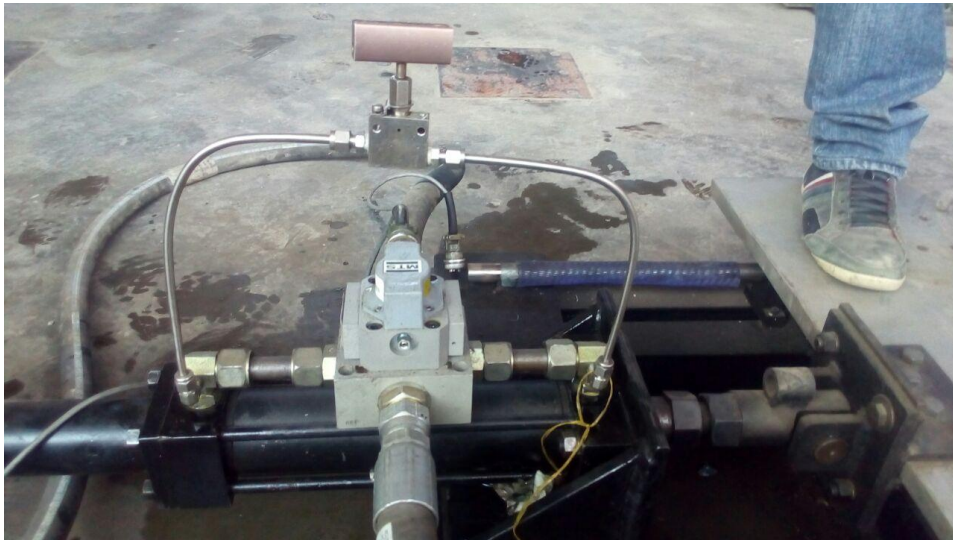
Figura 30. Banco de pruebas.



El segundo módulo es el Modulo Mesa sísmica, el cual, tiene que ver con todos los elementos que componen como tal el banco de pruebas, la mesa sísmica, la servo válvula, la válvula de bypass y el LVDT.

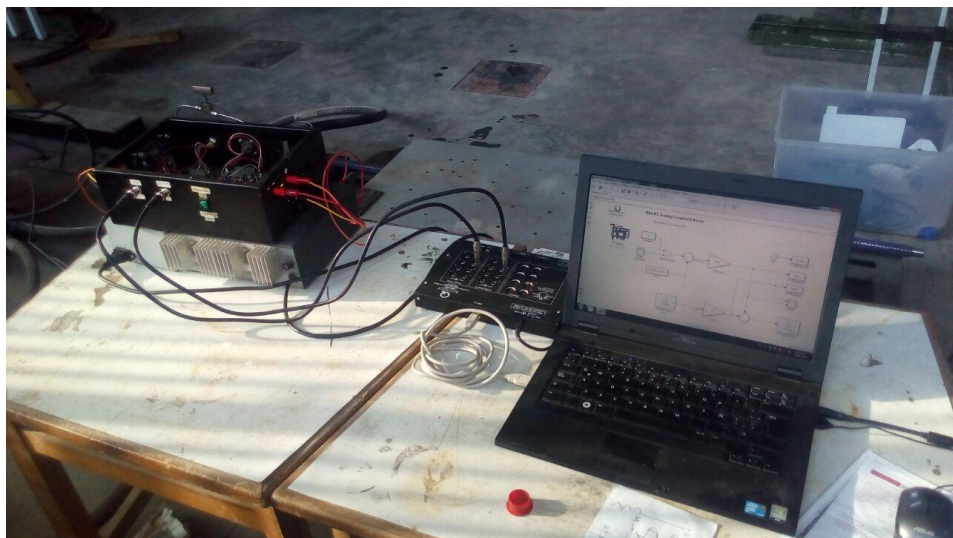
En la imagen siguiente se puede ver cómo se ha implementado el bypass en el cilindro hidráulico, la válvula de aguja conecta las dos cámaras del cilindro simulando así una fuga en el sello pistón. También puede verse la servo válvula (centro de la imagen) y el LVDT (a la izquierda).

Figura 31. Servo válvula y Válvula Bypass



El tercer módulo será el Módulo de control y es desde donde se controla el banco de pruebas, allí mandamos la señal de entrada al banco y recibimos su posición, en unidades de voltaje del LVDT, por medio de la tarjeta de adquisición de datos.

Figura 32. Conexión del hardware.



Está conformado por el pc, la tarjeta de adquisición de datos de Quanser, la “caja negra” y sus respectivas fuentes de voltaje. En la caja negra encontramos la tarjeta preamplificadora y amplificadora de la servo válvula, además el demodulador del LVDT y sus respectivas entradas y salidas de potencia y datos.

Figura 33. Caja negra y Tarjeta de adquisición de datos.



La caja va conectada a la tarjeta de adquisición de datos de Quanser por medio de sus entradas y salidas analógicas quienes reciben y envían las señales hacia y desde el pc.

Figura 34. Conexión de la tarjeta de adquisición de datos Quanser.



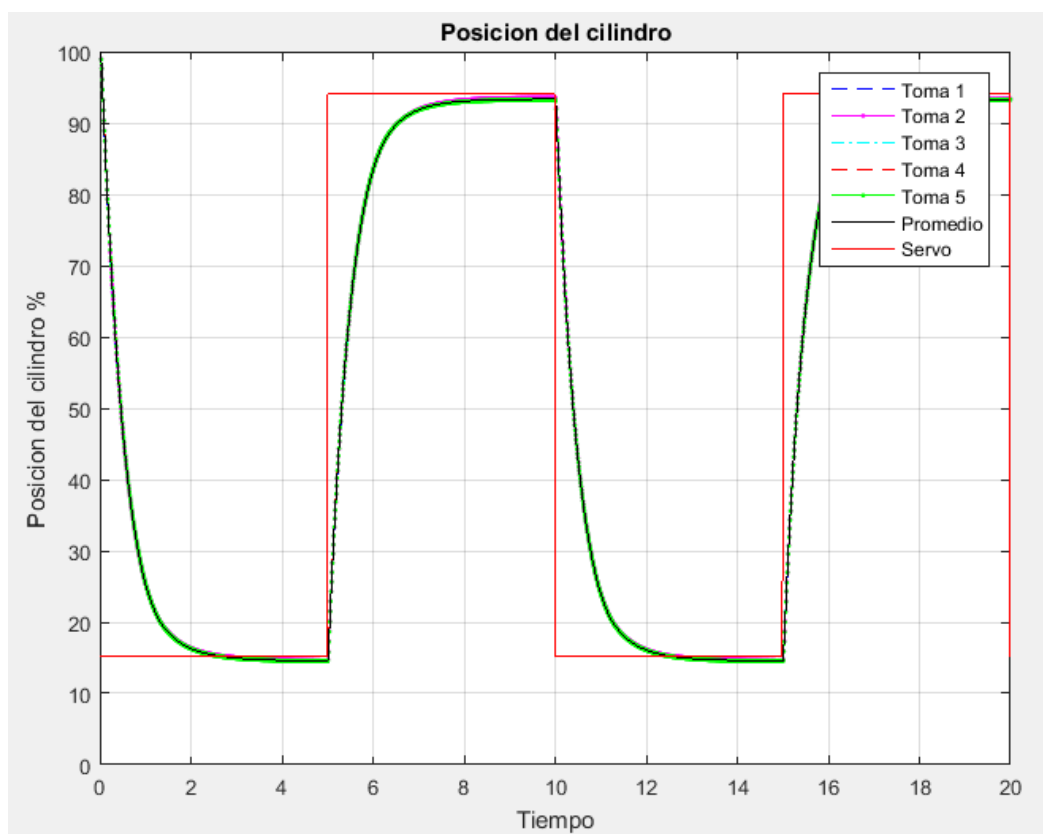
5.2. TOMA DE DATOS.

Los datos de posición como prueba para la validación fueron tomados en grupos de cinco vectores, para una amplitud de cuatro pulgadas y frecuencias de 0.1Hz, 1Hz y 10Hz para onda cuadrada y sinusoidal.

5.2.1. Datos para frecuencia 0,1 Hz. A continuación, se muestran de forma gráfica los datos tomados para la validación del modelo anteriormente desarrollado y la forma en que fueron tratados para su estudio. En las figuras siguientes, se puede observar cómo se comporta el banco de la mesas sísmica para las ondas cuadrada y sinusoidal en frecuencia de 0.1 Hz.

Para la onda cuadrada tenemos los siguientes datos plasmados en la gráfica.

Figura 35. Toma de datos y promedio, onda cuadrada con frecuencia 0,1 Hz.

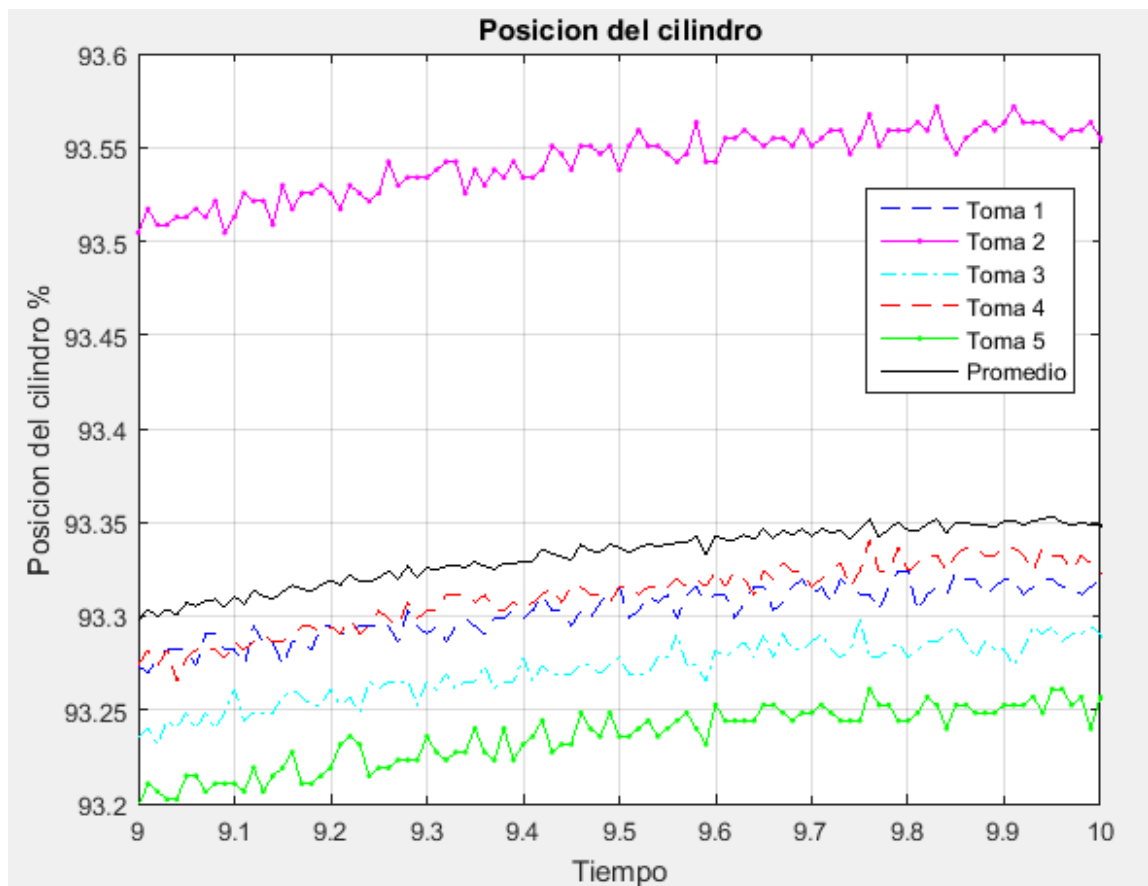


Es necesario destacar que el porcentaje de posición del cilindro corresponde a la totalidad del movimiento la mesa sísmica y es mayor a la amplitud con la cual se

está trabajando, se hizo así para asegurar que el cilindro nunca llegara a los puntos finales de su recorrido.

Los datos de posición estudiados son muy cercanos entre sí, y para facilitar los cálculos en general y obtener resultados más acertados, se decide trabajar con el promedio de ellos. La siguiente figura los muestra de forma más explícita.

Figura 36. Detalle de toma de datos y promedio, onda cuadrada y frecuencia 0,1 Hz.

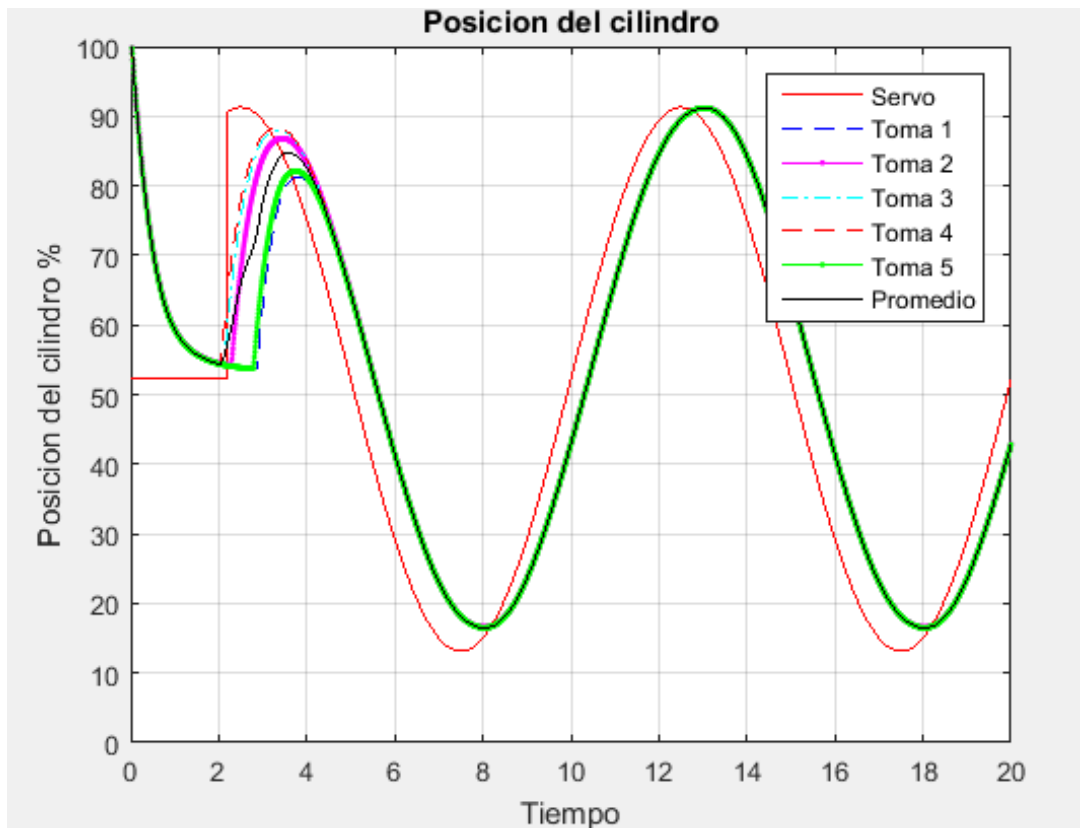


El acercamiento a la gráfica se hizo de forma aleatoria, de modo que para cualquier tiempo, en la gráfica, se encontrará que las muestras se comportan de forma casi idéntica a las mostradas anteriormente. Donde la línea negra corresponde al promedio de los datos tomados, graficados en diferentes colores. Cada una de esas líneas representa una prueba diferente con la misma señal de entrada y el mismo tiempo de trabajo, por eso la posición en cada tiempo es diferente pero sin alejarse

mucho de la posición indicada por la señal de entrada, el promedio es una buena representación de estas posiciones para cada instante de tiempo durante el tiempo que dura la prueba. De igual forma sucede con la onda sinusoidal y las frecuencias a estudiar, de 1Hz y 10Hz.

La figura siguiente, similar a la anterior, muestra cómo se comporta el banco para la onda seno y frecuencia de 0.1Hz.

Figura 37. Toma de datos y promedio, onda seno con frecuencia 0,1 Hz.



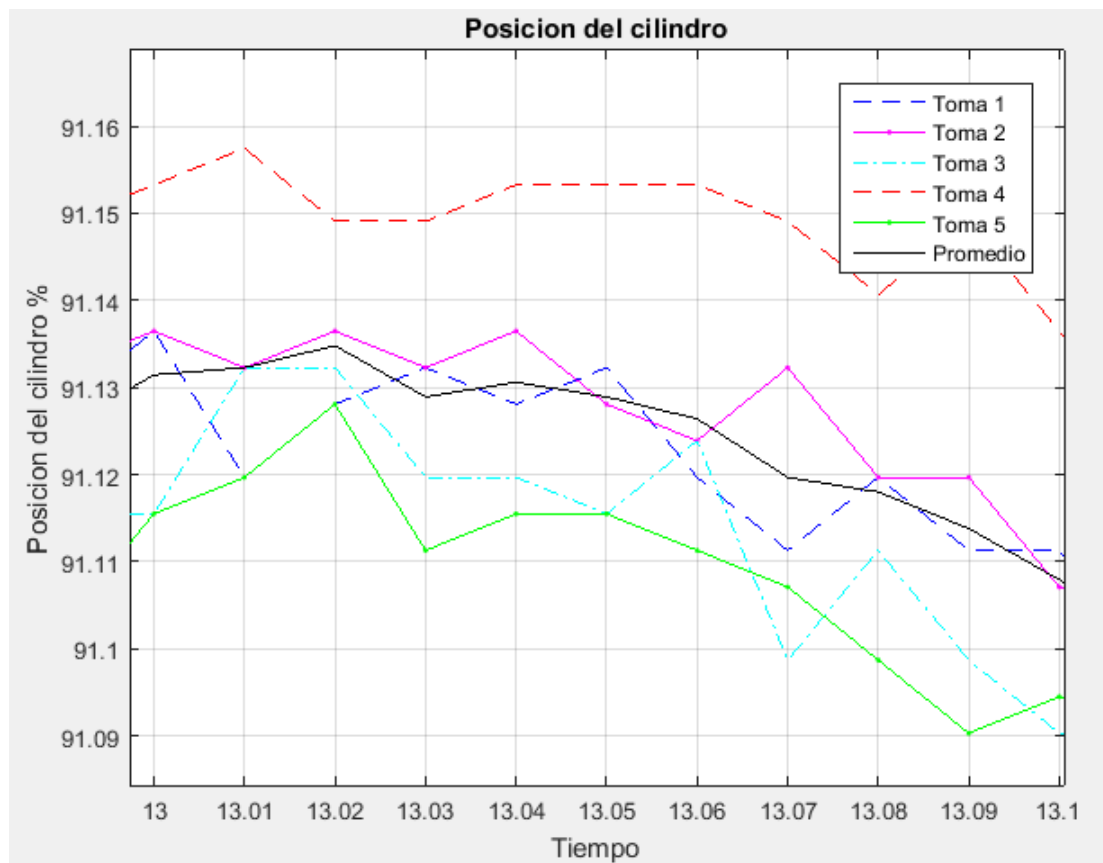
Los datos tomados para la onda seno se trataron de forma similar a los datos de onda cuadrada, se toma el promedio de las muestras para el proceso de validación.

También se debe resaltar que el desfase visto en los primeros segundos de operación son producidos porque el cambio del tipo de entrada se hizo de forma manual, es decir, al inicio de la prueba la señal era puntual y cercana al centro de la mesa, entre los segundos 2 a 4 se hace el cambio a onda seno, de esta forma se

estabiliza de forma más rápida la prueba, lo que se evidencia de mejor forma con el aumento de frecuencia de trabajo.

A continuación se muestra una gráfica con el acercamiento en detalle a un punto aleatorio de la gráfica con el interés de confirmar la cercanía de los datos entre sí y justificar el uso del promedio entre ellos.

Figura 38. Detalle de toma de datos y promedio, onda seno y frecuencia 0,1 Hz.



Donde la línea negra corresponde al promedio de los datos tomados, graficados en diferentes colores.

5.2.3. Datos para frecuencia 1 Hz. A continuación se muestra el comportamiento de la mesa sísmica ante las entradas de forma cuadrada y sinusoidal respectivamente con frecuencia de 1 Hz.

Para la onda cuadrada tenemos los siguientes datos plasmados en la gráfica.

Figura 39. Toma de datos y promedio, onda cuadrada con frecuencia 1 Hz.

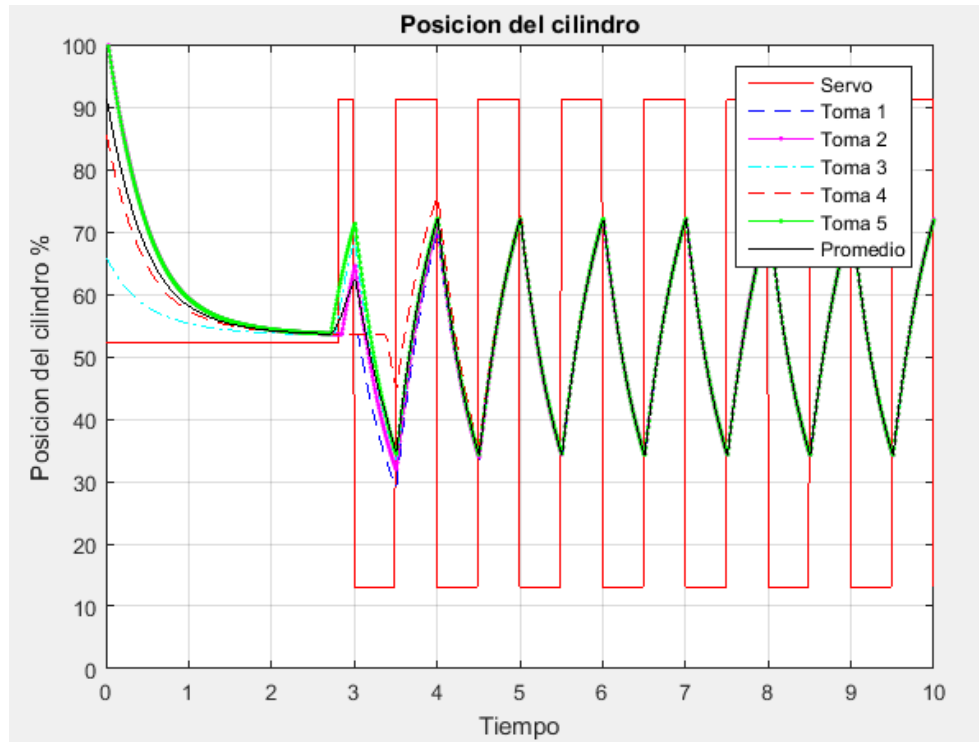
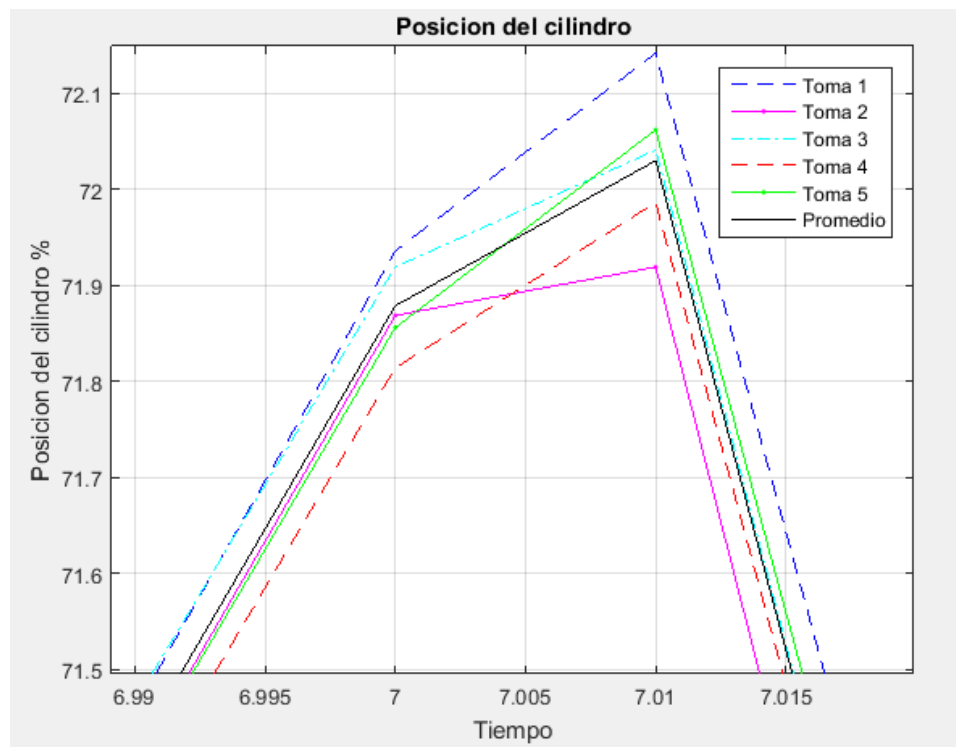


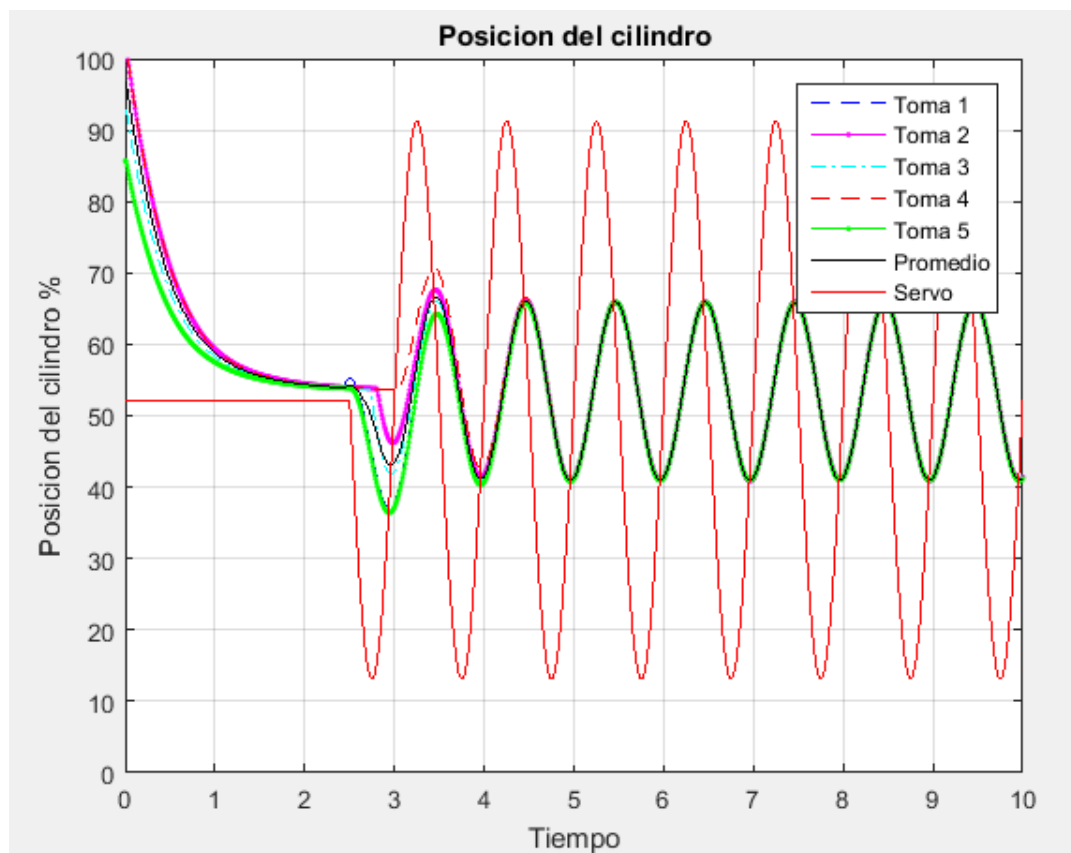
Figura 40. Detalle de toma de datos y promedio, onda cuadrada y frecuencia 1 Hz.



En ésta prueba se hace visible, en la primera figura, que la respuesta en posición de la mesa sísmica se ve afectada por la frecuencia de trabajo de la señal de entrada, y también se evidencia la alta respuesta dinámica de la válvula; y en la figura siguiente puede apreciarse cómo el promedio reúne gran parte de la información adquirida durante las diferentes pruebas.

Para la onda sinusoidal tenemos los siguientes datos plasmados en las gráficas.

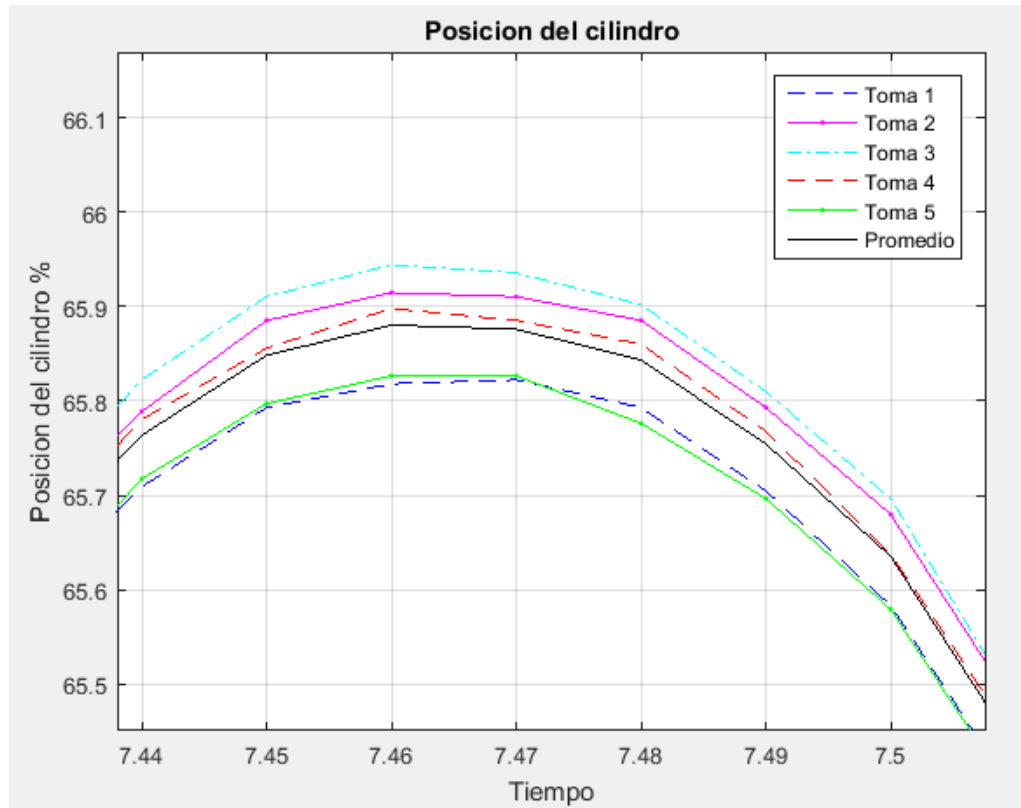
Figura 41. Toma de datos y promedio, onda seno con frecuencia 1 Hz.



En ésta prueba también puede verse el efecto de la frecuencia de operación sobre la carrera del cilindro. Además debe destacarse que sus movimientos son mucho más suaves que los de la señal cuadrada y en el cambio de sentido es menos drástico.

La siguiente figura muestra el detalle del promedio para esta toma de datos, quien reúne gran parte de la información adquirida durante las diferentes pruebas.

Figura 42. Detalle de toma de datos y promedio, onda seno y frecuencia 1 Hz.



5.2.3. Datos para frecuencia 10 Hz. A continuación se muestra el comportamiento de la mesa sísmica ante las entradas de onda cuadrada y sinusoidal respectivamente para frecuencia de 10 Hz.

Durante estas pruebas la frecuencia de operación es bastante alta haciendo que el recorrido sea mucho menor al inicial, con frecuencia de 0.1 Hz, donde se deseaba observar toda la amplitud de la onda. Además se redujo su tiempo de operación a diez segundos debido a la subida en la frecuencia de operación, además el estudio de estas señales se hará entre los cinco y los ocho segundos de operación, en cinco segundos la mesa ya ha estabilizado su recorrido y tres segundos más son suficientes repeticiones para comprobar si el modelo predice satisfactoriamente su recorrido o no.

Para la onda cuadrada tenemos los siguientes datos plasmados en la gráfica y su respectivo detalle.

Figura 43. Toma de datos y promedio, onda cuadrada con frecuencia 10 Hz.

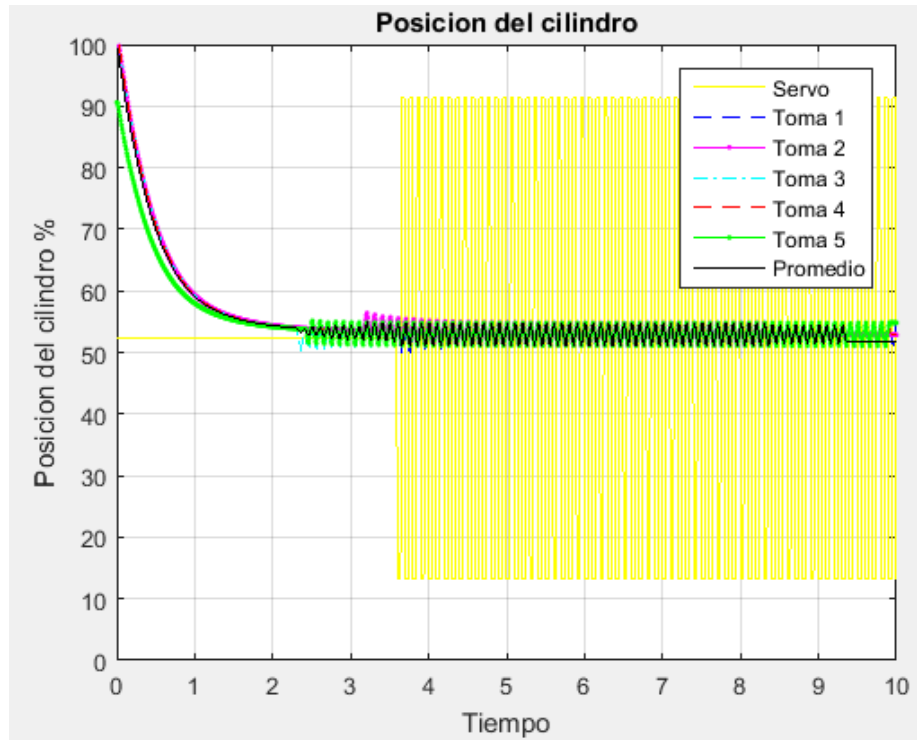
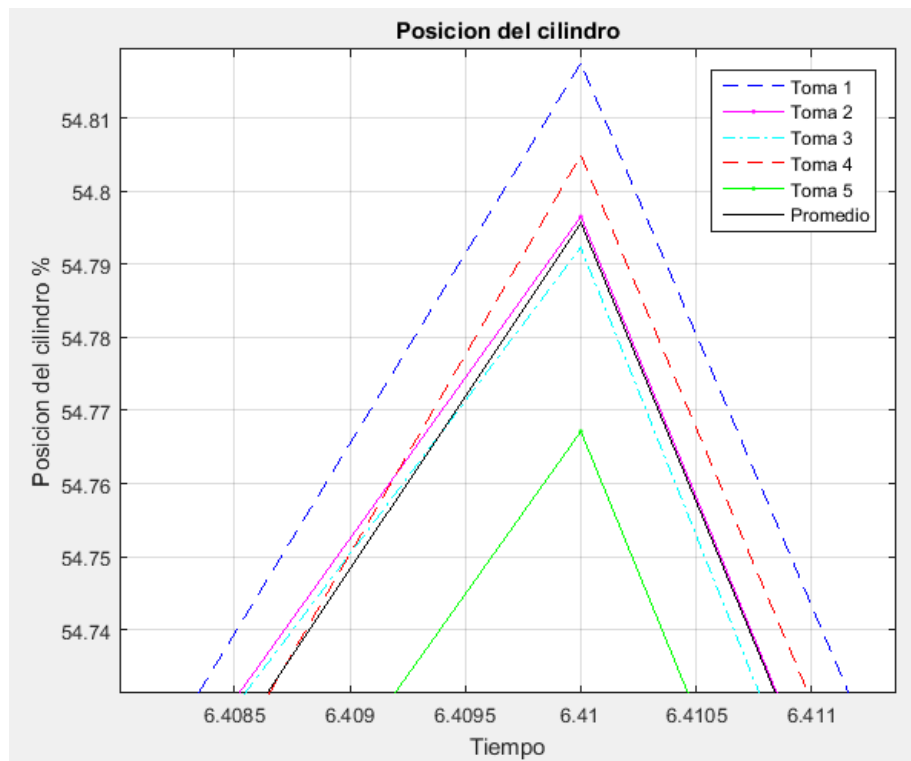


Figura 44. Detalle de toma de datos y promedio, onda cuadrada y frecuencia 10 Hz.



Para la onda sinusoidal tenemos los siguientes datos, plasmados en la gráfica y su respectivo detalle.

Figura 45. Toma de datos y promedio, onda seno con frecuencia 10 Hz.

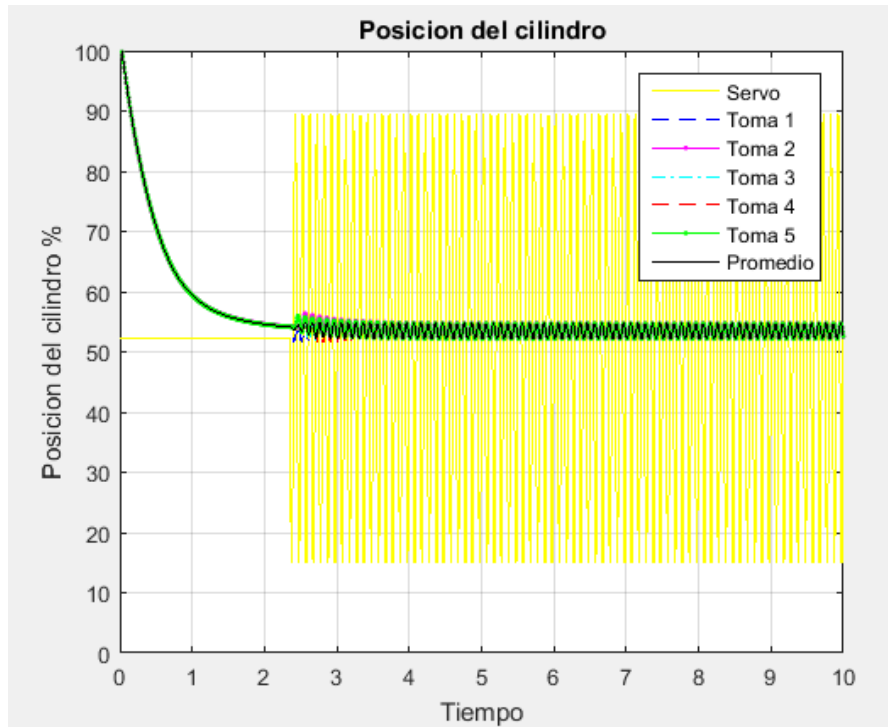
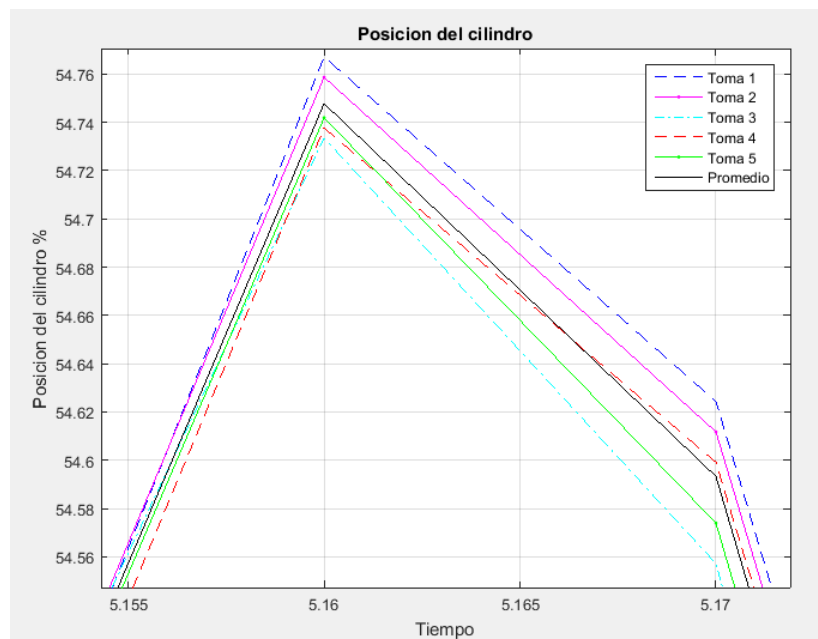


Figura 46. Detalle de toma de datos y promedio, onda seno y frecuencia 10 Hz.



Al igual que en las pruebas anteriores, la señal de seno presenta movimientos un poco más suaves que la onda cuadrada, aunque a frecuencias altas se hace cada vez menor la diferencia entre los tipos de ondas. En el detalle del promedio se confirma que el promedio reúne gran parte de la información adquirida durante las diferentes pruebas.

5.3. CALIBRACIÓN Y AJUSTE DEL MODELO.

Con los datos obtenidos y la simulación anteriormente explicada, pudimos observar que el modelo desarrollado durante este trabajo de grado se comporta de manera similar a como debería comportarse en comparación con la mesa sísmica. Es decir, la respuesta generada por el modelo se parece al movimiento de la mesa.

Una vez identificado el modelo y observando que la respuesta es de la misma forma que las salidas con las que se va a comparar, se procede a la aplicación del modelo al problema concreto que se quiere simular. Para esto necesitamos encontrar los parámetros reales para las entradas del modelo.

Para el caso específico de éste trabajo la señal de entrada para el modelo y el sistema es la misma, es decir, si el generador de señales para la toma de datos usó una onda cuadrada con amplitud (x) y frecuencia (z), el modelo debe usar los mismos parámetros, entonces sólo queda por encontrar los valores para las componentes físicas del sistema. La siguiente tabla muestra las variables que usa el modelo, basadas en mediciones realizadas directamente en el banco de pruebas.

Tabla 3. Variables físicas del modelo.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Masa	M	85	kg
Longitud cilindro	Cc	0,1524	m
Área activa del cilindro	Aa	1,62E-03	m ²
Volúmen total del cilindro	Vt	Aa*Cc	m ³
Presión de suministro	Ps	6,20E+06	psi

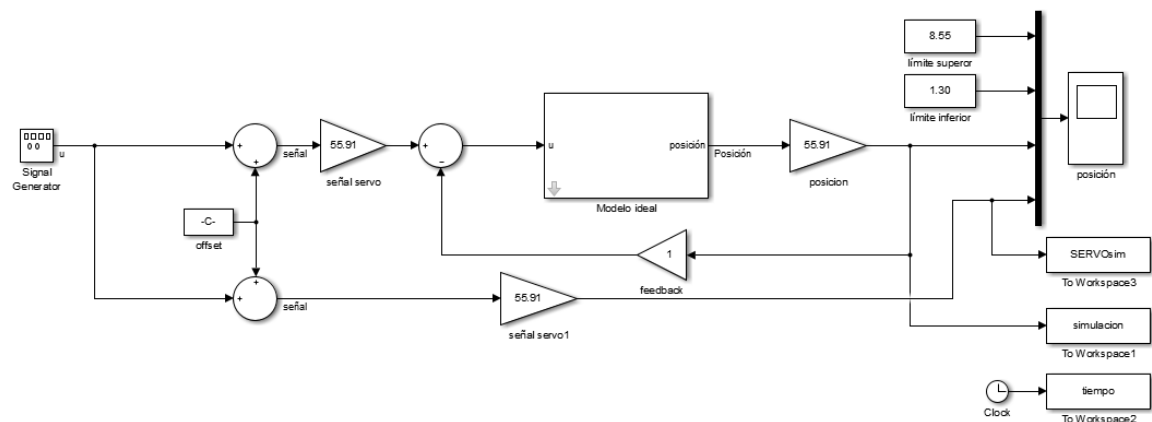
Luego queda comparar las respuestas del modelo y el banco de pruebas, realizar ajustes y comparar de nuevo, así funciona uno de los métodos más utilizados y usualmente recomendados, **el método de prueba y error**, que implica un ajuste manual de los parámetros basado en el criterio del investigador, es un proceso lento y con un valor de aprendizaje alto.

También existen **métodos de ajuste automático**, los cuales optimizan los valores de los parámetros utilizando técnicas numéricas haciéndolo más rápido y objetivo, sin embargo, numéricamente son mucho más complejos y suelen presentar problemas con la compensación de errores y en la captura de valores mínimos locales. Por ejemplo, técnicas de escalamiento, algoritmos genéticos, reconocido simulado, etc. Durante el desarrollo de este trabajo se hizo uso del primer método recomendado dado su importantísimo valor de aprendizaje.

5.4. VALIDACIÓN.

El modelo con el cual se hizo la comparación es el siguiente.

Figura 47. Modelo final de simulación del sistema.



Éste modelo usa la misma señal de entrada que la mesa sísmica en la cual se basó, y las salidas las arroja en las mismas unidades de voltaje que la LVDT, para obtener

la respuesta en función del porcentaje de posición es necesario hacer un cálculo sencillo, el cual se ejecuta internamente con el resto de funciones.

La validación del modelo, inicialmente, se hizo de forma visual/gráfica, y se fue ajustando basado en los resultados obtenidos del tratamiento de los residuos generados a partir de la diferencia entre las mediciones de posición del cilindro y el simulador. Las secciones siguientes muestran el resultado final del ajuste del modelo desarrollado.

5.4.1. Métodos de validación utilizados. Existen métodos para verificar la validez de un modelo de simulación, **el coeficiente de determinación (ρ^2)** es uno de ellos, con el cual un modelo estadístico se construye para explicar una variable aleatoria dependiente a través de otras variables aleatorias a las que llamaremos factores. Dado que podemos predecir una variable aleatoria mediante su media y que, en este caso, el error cuadrático medio es su varianza, el máximo error cuadrático medio que podemos aceptar en un modelo para una variable aleatoria que posea los dos primeros momentos es la varianza. Para estimar el modelo se hacen varias observaciones de la variable a predecir. A la diferencia entre el valor observado de la variable y el valor predicho por el modelo la llamaremos residuo. La media cuadrática de los residuos es la varianza residual.

De forma general tendremos:

$$\rho^2 = 1 - \frac{\sigma_{res}}{\sigma_{dep}}$$

Donde σ_{res} es la varianza del residuo y σ_{dep} es la varianza de la variable dependiente, en este caso los datos tomados del banco de pruebas.

El **Coeficiente de correlación (R)**, es una medida que pretende cuantificar el grado de relación y variación conjunta entre dos variables. Por tanto, es una medida estadística que cuantifica la dependencia lineal entre dos variables, es decir, si se

representan en un diagrama de dispersión los valores que toman dos variables, el coeficiente de correlación lineal señalará lo bien o lo mal que el conjunto de puntos representados se aproxima a una recta. El número que mide el grado de intensidad y el sentido de la relación entre dos variables.

$$R = \frac{Cov(obs, mod)}{Std(obs) * Std(mod)}$$

Donde, $Cov (obs, mod)$ es la covarianza entre los valores observados y los entregados por el modelo, $Std (obs)$ es la desviación estándar de los valores observados y $Std (mod)$ es la desviación estándar de los valores calculados por el modelo.

Por último, usaremos **el Coeficiente de Correlación de Concordancia (CCC)**, desarrollado a partir de la corrección de las limitaciones en otros métodos, y arroja un grado de reproductividad entre los datos medidos en el banco de pruebas y las salidas generadas por el modelo. Un valor cercano a 1 (o 100% en este caso) indica una reproductividad perfecta y el 0 (0%) un completo error en la estimación.

$$CCC = \frac{A^2 + B^2 - C^2}{A^2 + B^2 + D^2}$$

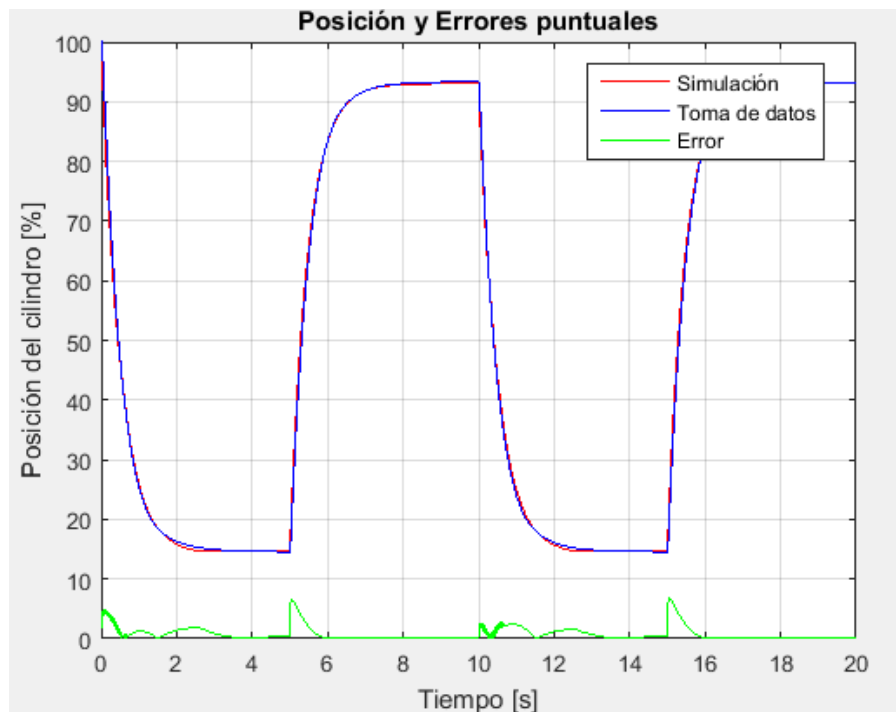
Dónde A y B, son las varianzas de la simulación y los datos medidos, C es la varianza del residuo y D la diferencia promedio entre medidas.

Este coeficiente califica la fuerza del acuerdo de una forma más exigente, para variables continuas la valora como casi perfecta para valores mayores a 0,99; sustancial de 0,95 a 0,99; moderada de 0,90 a 0,95 y pobre cuando está por debajo de 0,90.

Además de estos métodos de verificación también es posible extraer más información de los residuos de otras funciones estadísticas, como la media, RMS, kurtosis, oblicuidad y la desviación estándar.

5.4.2. Validación onda cuadrada, frecuencia 0,1 Hz. Con los datos de posición tomados de las pruebas en la mesa sísmica y los valores entregados por el modelo para una señal de entrada idéntica, procedemos al tratamiento de los residuos generados entre los dos y su respectivo análisis.

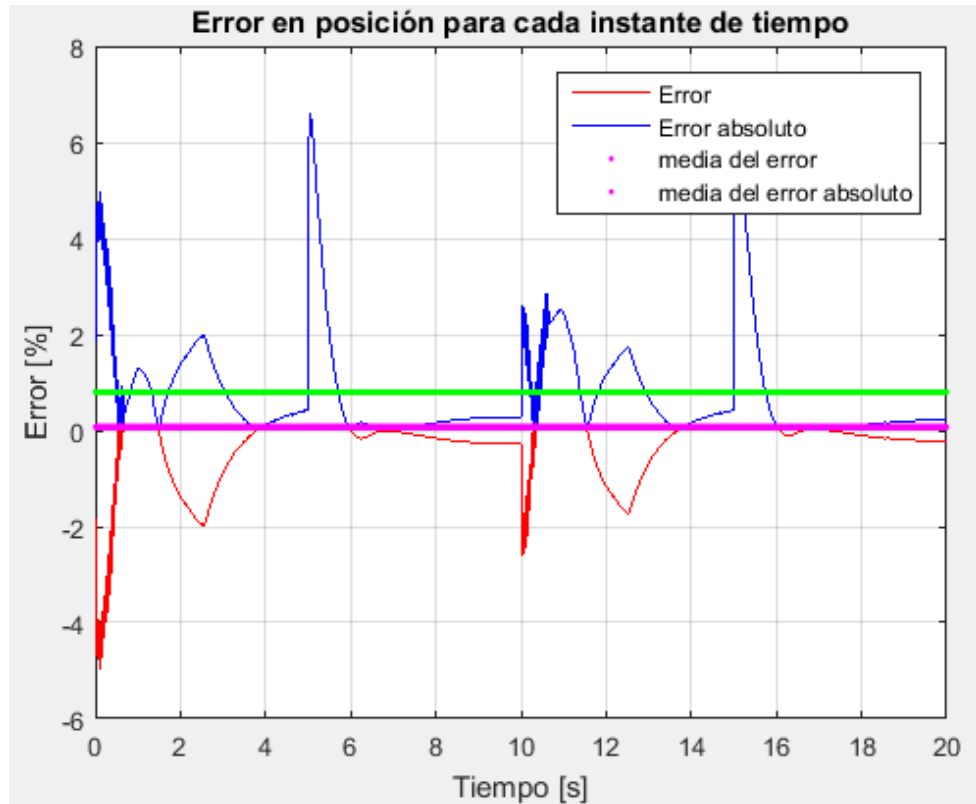
Figura 48. Posición del cilindro y error en cada instante de tiempo. Onda cuadrada, Frecuencia 0,1 Hz.



En la figura se puede apreciar que el movimiento predicho por el modelo no se aleja mucho del recorrido de la mesa sísmica capturado en datos. Además, el error en posición para cada instante de tiempo no supera el 8% y su pico máximo se da durante el cambio de dirección en el movimiento, éste pico de error es provocado por la inercia de la mesa sísmica.

La figura muestra únicamente el error, el error absoluto y la media de cada uno de ellos. La media del **error** para toda la prueba es de **0,0754%** y para el **error absoluto** es de **0,845%**.

Figura 41. Error y Error absoluto para cada instante de tiempo. Onda cuadrada, Frecuencia 0,1 Hz.



Con estos resultados, generados a partir del cálculo del error en el residuo de posición, se puede notar que el modelo se comporta de forma correcta y sus salidas son muy cercanas a las reales.

Además, el coeficiente de determinación para ésta prueba es:

$$\text{Coeficiente de determinación } (\rho^2) = 99.94\%$$

Un valor muy alto, indica que el modelo predice casi a la perfección el movimiento de la mesa.

El coeficiente de correlación fue:

$$\text{Coeficiente de correlación } (R) = 99.97\%$$

Y, el coeficiente de correlación de concordancia fue:

Coeficiente de Correlación de Concordancia (CCC)=99.96%

Los resultados se muestran en el workspace de la siguiente forma.

Figura 50. Resultados en workspace de coeficientes de correlación. Onda Cuadrada, Frecuencia 0,1 Hz.

```
>> validacion  
  
Coeficiente_de_determinacion =  
  
    99.9405  
  
Coeficiente_de_correlacion =  
  
    99.9708  
  
coeficiente_de_correlacion_y_concordancia =  
  
    99.9646
```

También se obtuvieron los siguientes resultados de ésta simulación y su comparación:

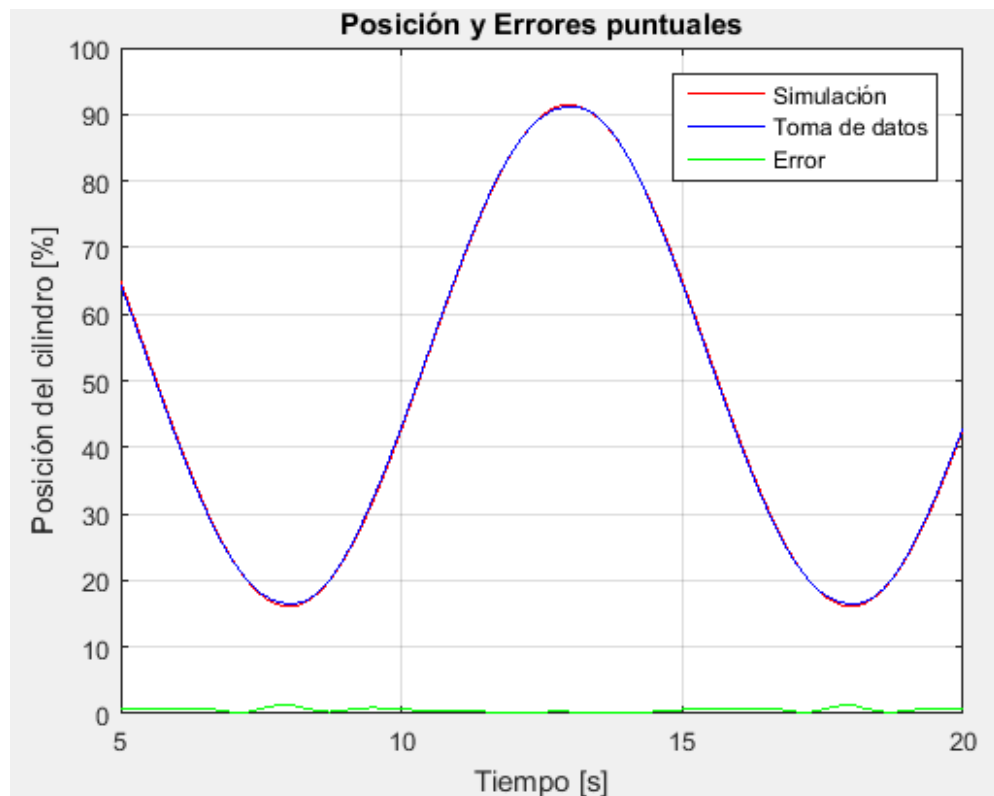
Tabla 4. Resultados para otros indicadores de verificación. Onda Cuadrada, Frecuencia 0,1 Hz.

Característica	Valor
Media M	0,0328
Sesgo (Kurtosis) Kur	14,0207
Raíz media cuadrática RMS	0,0627
Oblicuidad (Skewness) Skw	-0,5336
Desviación estandar Std	0,0135

Con estos resultados podemos asumir que el modelo de simulación desarrollado para este caso específico con onda cuadrada de amplitud 4 pulgadas y frecuencia de 0,1Hz describe satisfactoriamente el movimiento de la mesa sísmica.

5.4.3. Validación onda sinusoidal, frecuencia 0,1 Hz. El proceso de validación para la onda seno se hace de forma similar al utilizado para la onda cuadrada, pero se inicia a partir de los cinco segundos de operación, que es donde la onda ya se ha estabilizado en el punto de operación. Para ésta prueba se obtuvieron los siguientes datos de posición de la mesa sísmica y el modelo.

Figura 51. Posición del cilindro y error en cada instante de tiempo. Onda Seno, Frecuencia 0,1 Hz.



La media del **error** para toda la prueba es de **-0,1047%** y para el **error absoluto** es de **0,5500%**, a diferencia del resultado para onda cuadrada, ésta señal seno no muestra picos muy altos de error en el cambio de dirección ya que sus movimientos son más suaves incluso cuando cambia de sentido.

El error en posición puede verse en forma explícita en la siguiente figura.

Figura 52. Error y Error absoluto para cada instante de tiempo. Onda Seno, Frecuencia 0,1 Hz.



Los resultados de cálculo de error son muy favorables, auguran altos porcentajes de correlación y concordancia entre los datos comparados, datos tomados de la prueba en la mesa sísmica y los datos de simulación.

El coeficiente de determinación para ésta prueba es:

Coeficiente de determinación (ρ^2)= 99.98%

El coeficiente de correlación fue:

Coeficiente de correlación (R)= 99.99%

Y, el coeficiente de correlación de concordancia fue:

Coeficiente de Correlación de Concordancia (CCC)=99.99%

Un valor muy alto, indica que el modelo predice casi a la perfección el movimiento de la mesa.

El programa muestra estos resultados en el workspace de la siguiente forma.

Figura 53. Resultados en workspace de coeficientes de correlación. Onda Seno, Frecuencia 0,1 Hz.

```
>> validacion  
  
Coeficiente_de_determinacion =  
  
99.9834  
  
Coeficiente_de_correlacion =  
  
99.9925  
  
coeficiente_de_correlacion_y_concordancia =  
  
99.9987
```

Las otras características arrojaron los siguientes resultados.

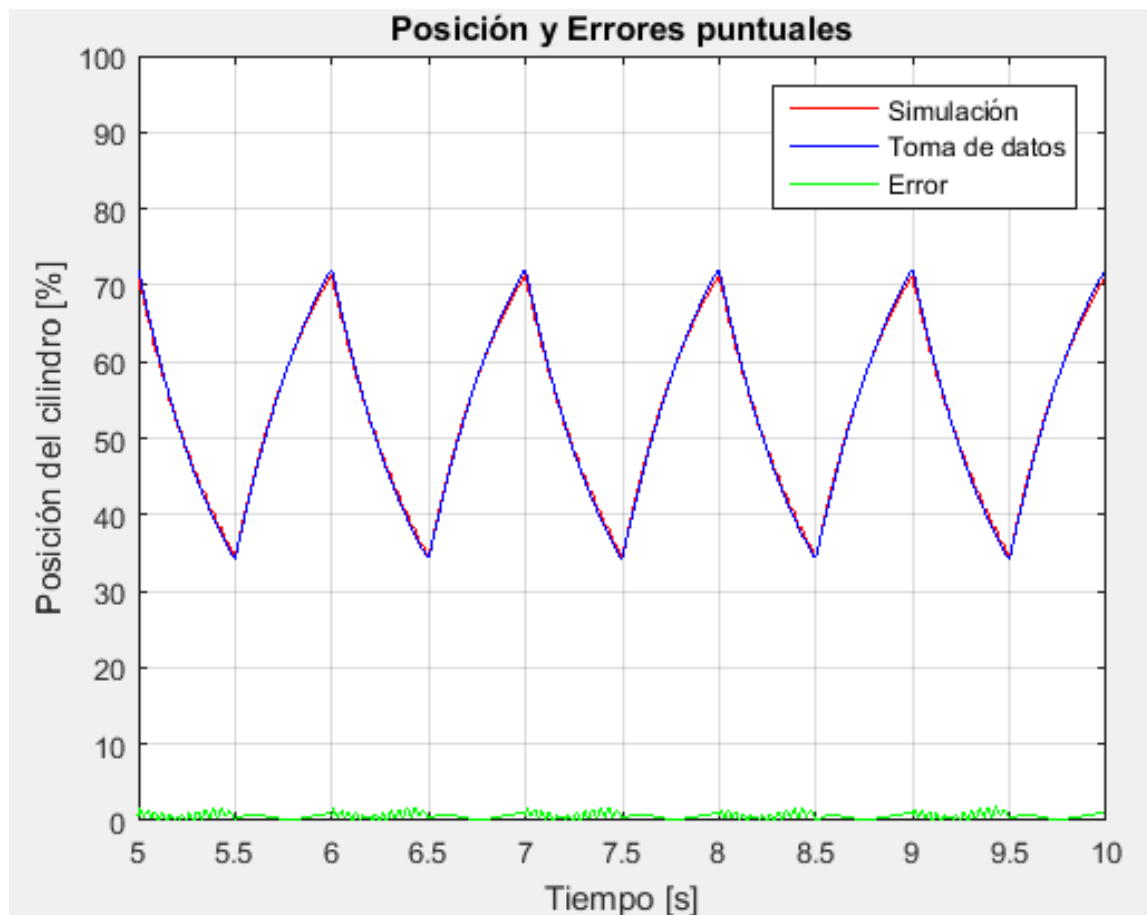
Tabla 5. Resultados para otros indicadores de verificación. Onda Seno, Frecuencia 0,1 Hz.

Característica	Valor
Media M	0,0215
Sesgo (Kurtosis) Kur	2,6484
Raíz media cuadrática RMS	0,0269
Oblicuidad (Skewness) Skw	0,1395
Desviación estandar Std	0,0162

Con estos resultados podemos asumir que el modelo de simulación desarrollado para este caso específico con onda sinusoidal de amplitud 4 pulgadas y frecuencia de 0,1Hz describe satisfactoriamente el movimiento de la mesa sísmica.

5.4.4. Validación onda cuadrada, frecuencia 1 Hz. El proceso de validación se hace de forma similar a la validación de los experimentos con frecuencia de 0,1 Hz. Igualmente, el proceso de validación inicia a los cinco segundos de operación, en un punto donde ya se ha estabilizado el movimiento de la mesa. Para ésta prueba se obtuvieron los siguientes datos de posición de la mesa sísmica y el modelo.

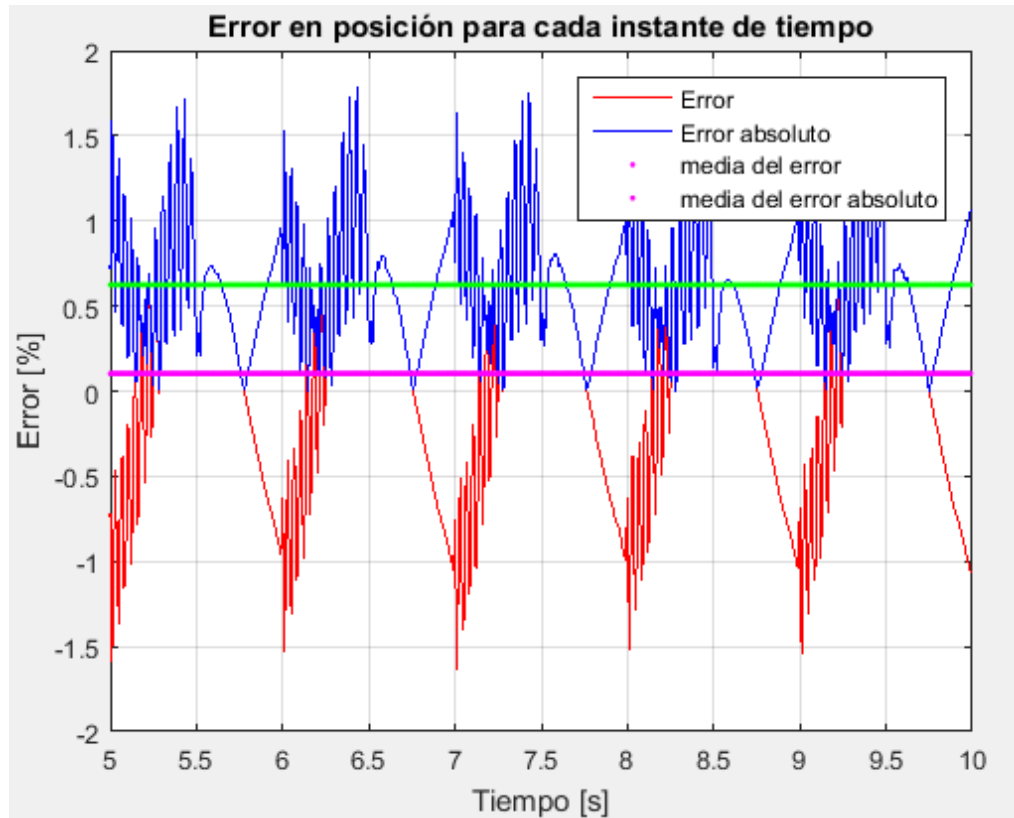
Figura 54. Posición del cilindro y error en cada instante de tiempo. Onda cuadrada, Frecuencia 1 Hz.



El **error** de posición para ésta prueba con señal sinusoidal es de **0,1031%**, y el **error absoluto** es de **0,6247%**

El error en posición puede verse en forma explícita en la siguiente figura.

Figura 55. Error y Error absoluto para cada instante de tiempo. Onda cuadrada, Frecuencia 1 Hz.



Los resultados de cálculo de error son muy favorables, se esperan altos porcentajes de correlación y concordancia entre los datos comparados, datos tomados de la prueba en la mesa sísmica y los datos de simulación.

El coeficiente de determinación para ésta prueba es:

Coeficiente de determinación (ρ^2)= 99.80%

El coeficiente de correlación fue:

Coeficiente de correlación (R)= 99.97%

Y, el coeficiente de correlación de concordancia fue:

Coeficiente de Correlación de Concordancia (CCC)=99.90%

Los resultados son favorables nuevamente, los valores son suficientemente altos para considerar que el modelo describe en gran medida el movimiento de la mesa sísmica y permite una buena predicción de su comportamiento.

El programa muestra estos resultados en el workspace de la siguiente forma.

Figura 56. Resultados en workspace de coeficientes de correlación. Onda Cuadrada, Frecuencia 1 Hz.

```
>> validacion

Coeficiente_de_determinacion =

    99.8026

Coeficiente_de_correlacion =

    99.9706

coeficiente_de_correlacion_y_concordancia =

    99.9009
```

Las otras características arrojaron los siguientes resultados.

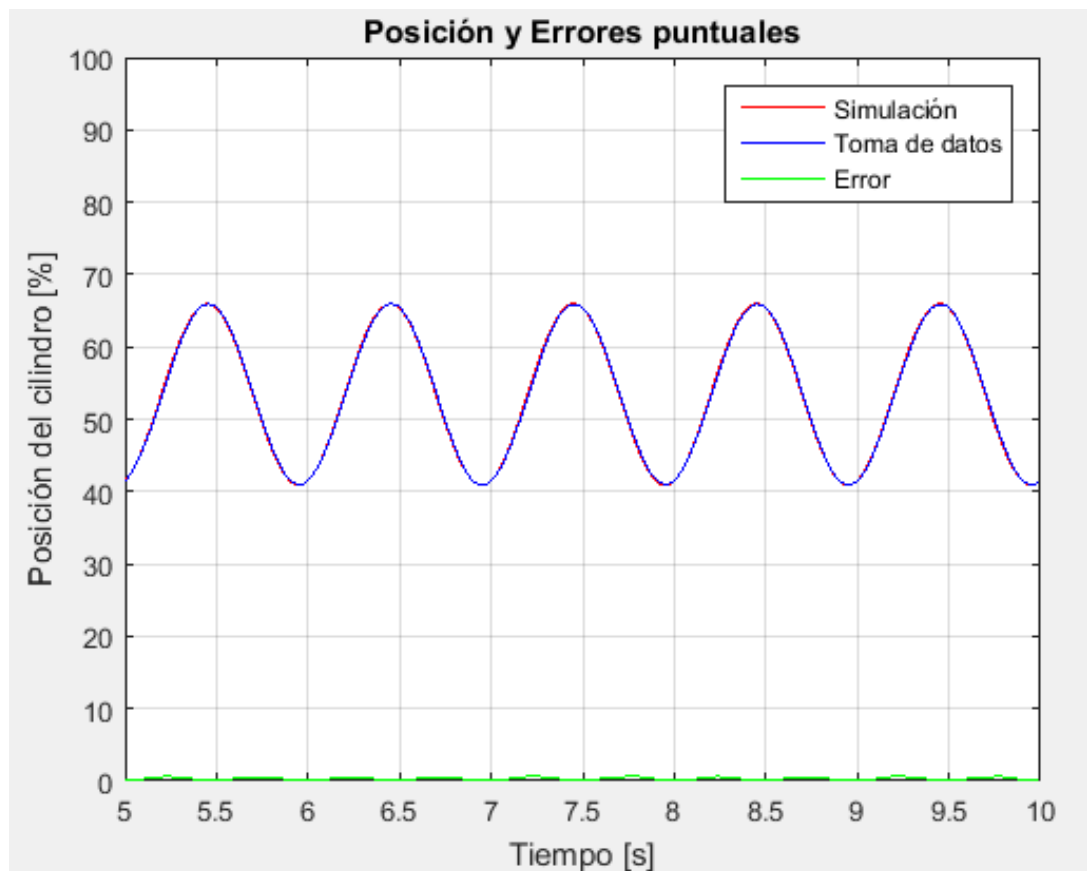
Tabla 6. Resultados para otros indicadores de verificación. Onda Cuadrada, Frecuencia 1 Hz.

Característica	Valor
Media M	0,0203
Sesgo (Kurtosis) Kur	2,7641
Raíz media cuadrática RMS	0,0242
Oblicuidad (Skewness) Skw	-0,6316
Desviación estandar Std	0,0132

Con estos resultados podemos asumir que el modelo de simulación desarrollado para este caso específico con onda cuadrada de amplitud 4 pulgadas y frecuencia de 1 Hz describe satisfactoriamente el movimiento de la mesa sísmica.

5.4.5. Validación onda sinusoidal, frecuencia 1 Hz. El proceso de validación se hace de forma similar a la validación de los experimentos con frecuencia de 0,1 Hz. Igualmente, el proceso de validación inicia a los cinco segundos de operación, en un punto donde ya se ha estabilizado el movimiento de la mesa. Para ésta prueba se obtuvieron los siguientes datos de posición de la mesa sísmica y el modelo.

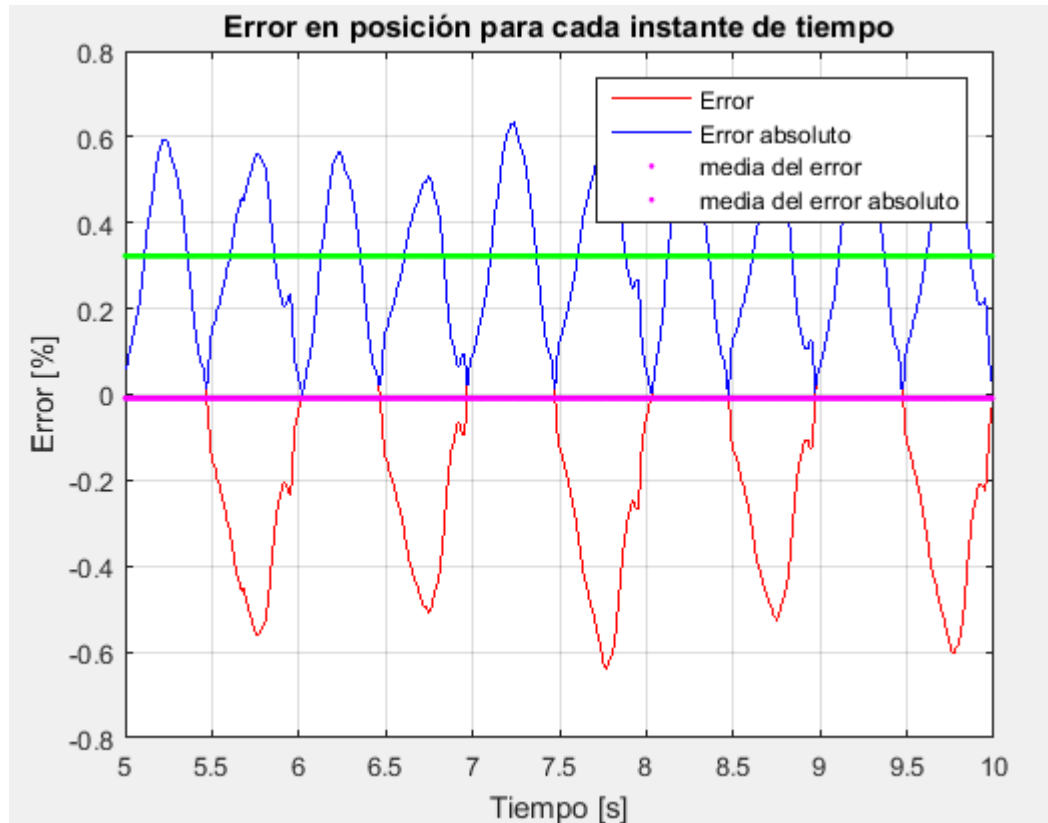
Figura 57. Posición del cilindro y error en cada instante de tiempo. Onda sinusoidal, Frecuencia 1 Hz.



El **error** de posición para ésta prueba con señal sinusoidal es de **-0,0086%**, y el **error absoluto** es de **0,0163%**

El error en posición puede verse en forma explícita en la siguiente figura.

Figura 58. Error y Error absoluto para cada instante de tiempo. Onda sinusoidal, Frecuencia 1 Hz.



Los resultados de cálculo de error son muy favorables, auguran altos porcentajes de correlación y concordancia entre los datos comparados, datos tomados de la prueba en la mesa sísmica y los datos de simulación.

El coeficiente de determinación para ésta prueba es:

Coefficiente de determinación (ρ^2)= 99.91%

El coeficiente de correlación fue:

Coefficiente de correlación (R)= 99.96%

Y, el coeficiente de correlación de concordancia fue:

Coefficiente de Correlación de Concordancia (CCC)=99.96%

Los resultados son favorables nuevamente, los valores son suficientemente altos para considerar que el modelo describe en gran medida el movimiento de la mesa sísmica y permite una buena predicción de su comportamiento.

El programa muestra estos resultados en el workspace de la siguiente forma.

Figura 59. Resultados en workspace de coeficientes de correlación. Onda Seno, Frecuencia 1 Hz.

```
>> validacion

Coeficiente_de_determinacion =

    99.9142

Coeficiente_de_correlacion =

    99.9590

coeficiente_de_correlacion_y_concordancia =

    99.9550
```

Las otras características arrojaron los siguientes resultados.

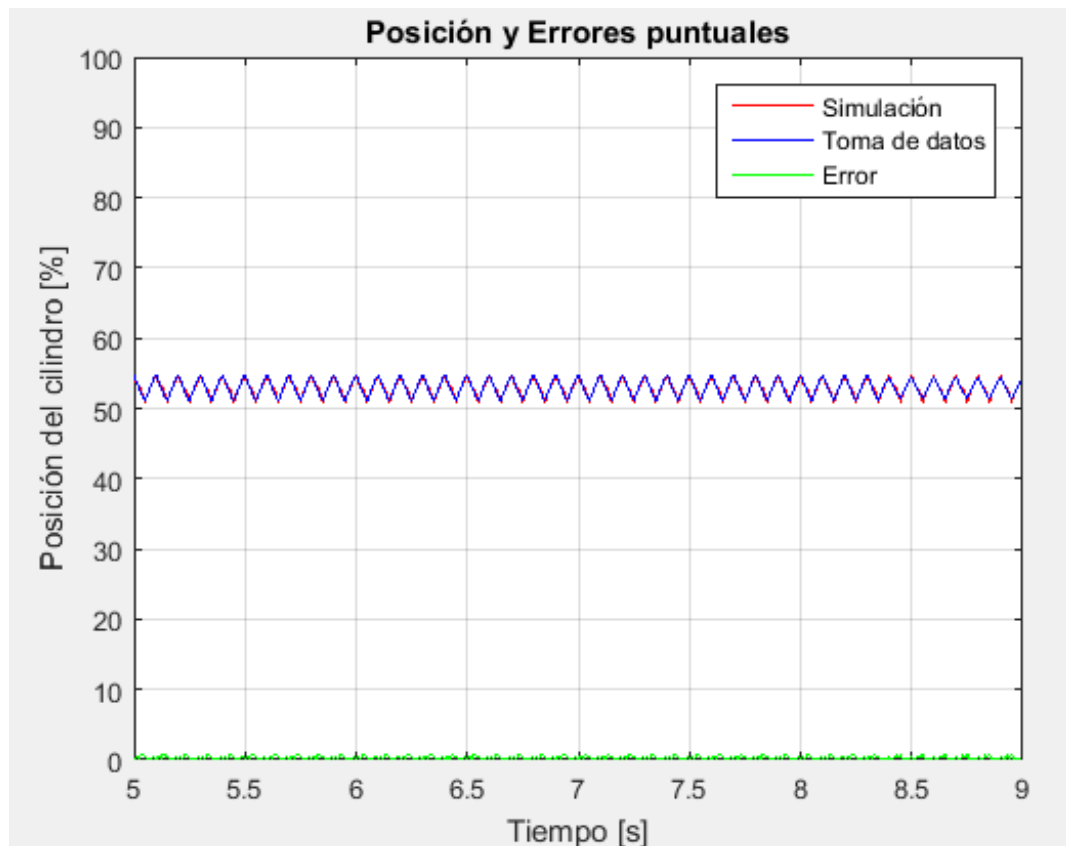
Tabla 7. Resultados para otros indicadores de verificación. Onda Sinusoidal, Frecuencia 1 Hz.

Característica	Valor
Media M	0,0359
Sesgo (Kurtosis) Kur	1,7616
Raíz media cuadrática RMS	0,0408
Oblicuidad (Skewness) Skw	0,0717
Desviación estandar Std	0,0195

Con estos resultados podemos asumir que el modelo de simulación desarrollado para este caso específico con onda sinusoidal de amplitud 4 pulgadas y frecuencia de 1 Hz describe satisfactoriamente el movimiento de la mesa sísmica.

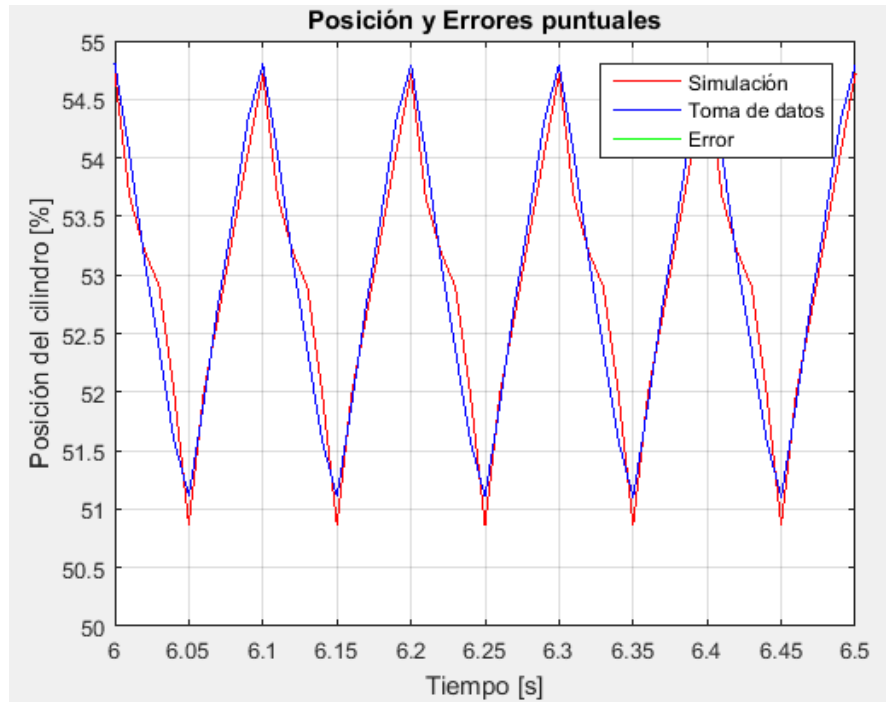
5.4.6. Validación onda cuadrada, frecuencia 10 Hz. El proceso de validación se hace de forma similar a la validación de los experimentos anteriores, con frecuencias de 0,1 Hz y 1 Hz, respectivamente. De forma parecida, el proceso de validación inicia a los cinco segundos de operación, en un punto donde ya se ha estabilizado el movimiento de la mesa. Para ésta prueba se obtuvieron los siguientes datos de posición de la mesa sísmica y el modelo.

Figura 60. Posición del cilindro y error en cada instante de tiempo. Onda cuadrada, Frecuencia 10 Hz.



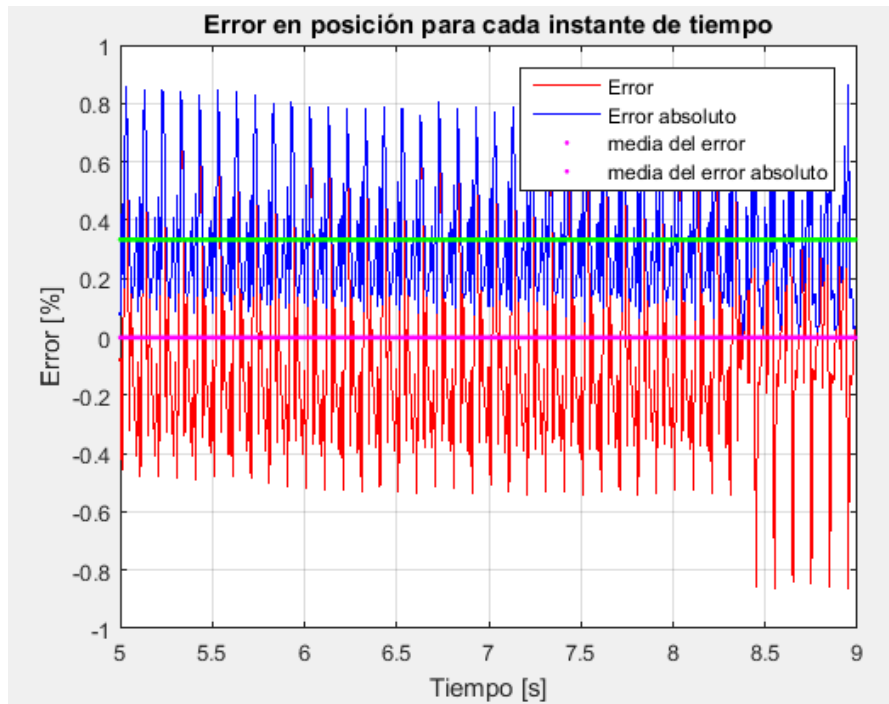
Al aumentar la frecuencia de operación el recorrido disminuye considerablemente, a continuación se muestra en detalle una parte de la gráfica para un mayor entendimiento y observación de la validación.

Figura 61. Detalle onda cuadrada con frecuencia 10 Hz.



El error en posición puede verse en forma explícita en la siguiente figura.

Figura 62. Error y Error absoluto para cada instante de tiempo. Onda cuadrada, Frecuencia 10 Hz.



El **error** de posición para ésta prueba con señal sinusoidal es de **-0,0025%**, y el **error absoluto** es de **0,3334%**

Los resultados de cálculo de error son muy favorables, auguran altos porcentajes de correlación y concordancia entre los datos comparados, datos tomados de la prueba en la mesa sísmica y los datos de simulación.

El coeficiente de determinación para ésta prueba es:

Coeficiente de determinación (ρ^2)= 93.93%

El coeficiente de correlación fue:

Coeficiente de correlación (R)= 96.97%

Y, el coeficiente de correlación de concordancia fue:

Coeficiente de Correlación de Concordancia (CCC)=98.66%

El programa muestra estos resultados en el workspace de la siguiente forma.

Figura 63. Resultados en workspace de coeficientes de correlación. Onda Cuadrada, Frecuencia 10 Hz.

```
>> validacion

Coeficiente_de_determinacion =

    93.9310

Coeficiente_de_correlacion =

    96.9657

coeficiente_de_correlacion_y_concordancia =

    98.6614
```

Los resultados son favorables nuevamente, los valores son suficientemente altos para considerar que el modelo describe en gran medida el movimiento de la mesa sísmica y permite una buena predicción de su comportamiento.

Las otras características arrojaron los siguientes resultados.

Tabla 8. Resultados para otros indicadores de verificación. Onda Cuadrada, Frecuencia 10 Hz.

Característica	Valor
Media M	0,012
Sesgo (Kurtosis) Kur	2,4529
Raíz media cuadrática RMS	0,0173
Oblicuidad (Skewness) Skw	0,3858
Desviación estandar Std	0,0124

Con estos resultados podemos asumir que el modelo de simulación desarrollado para este caso específico con onda cuadrada de amplitud 4 pulgadas y frecuencia de 10 Hz describe satisfactoriamente el movimiento de la mesa sísmica.

5.4.6. Validación onda sinusoidal, frecuencia 10 Hz. El proceso de validación se hace de forma similar a la validación de los experimentos anteriores, con frecuencias de 0,1 Hz y 1 Hz, respectivamente. Similar al proceso de validación para la onda cuadrada en la misma frecuencia, ésta validación inicia a los cinco segundos de operación, en un punto donde ya se ha estabilizado el movimiento de la mesa.

Para ésta prueba se obtuvieron los siguientes datos de posición de la mesa sísmica y el modelo.

Figura 64. Posición del cilindro y error en cada instante de tiempo. Onda sinusoidal, Frecuencia 10 Hz.

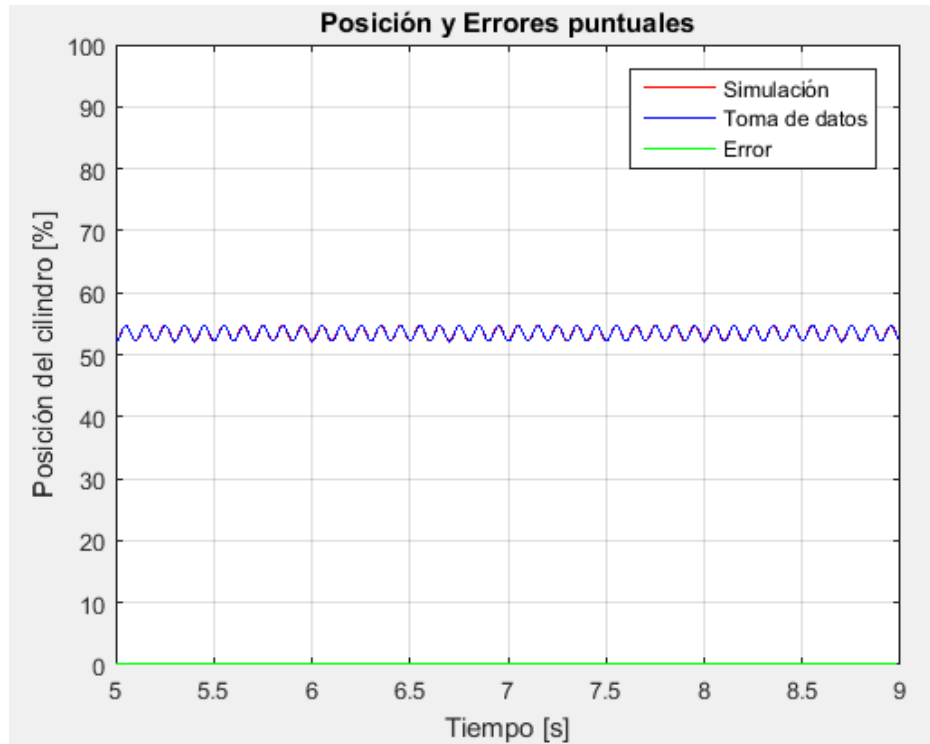
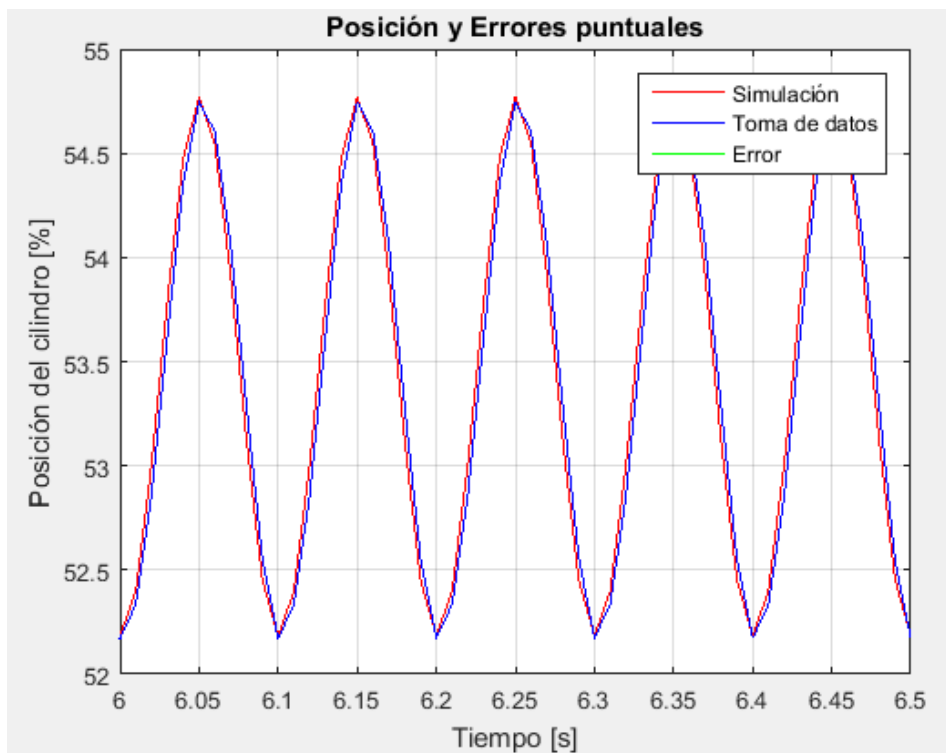


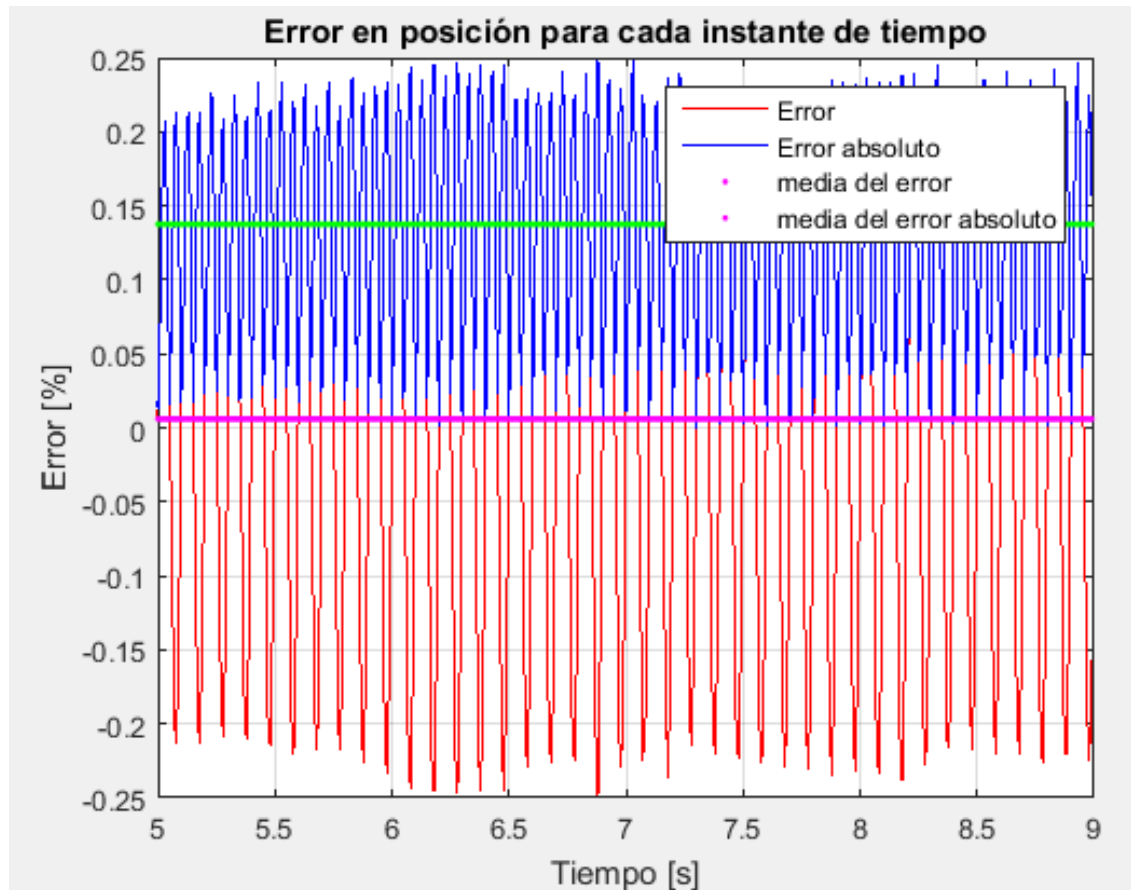
Figura 65. Detalle onda sinusoidal con frecuencia 10 Hz.



Al aumentar la frecuencia de operación el recorrido disminuye considerablemente, la figura anterior muestra, en detalle, una parte de la gráfica para un mayor entendimiento.

El error en posición puede verse en forma explícita en la siguiente figura.

Figura 66. Error y Error absoluto para cada instante de tiempo. Onda sinusoidal, Frecuencia 1 Hz.



El **error** de posición para ésta prueba con señal sinusoidal es de **0,006%**, y el **error absoluto** es de **0,1373%**

Los resultados de cálculo de error son muy favorables, auguran altos porcentajes de correlación y concordancia entre los datos comparados, datos tomados de la prueba en la mesa sísmica y los datos de simulación.

El coeficiente de determinación para ésta prueba es:

Coefficiente de determinación (ρ^2)= 98.53%

El coeficiente de correlación fue:

Coefficiente de correlación (R)= 99.27%

Y, el coeficiente de correlación de concordancia fue:

Coefficiente de Correlación de Concordancia (CCC)=95,95%

El programa muestra estos resultados en el workspace de la siguiente forma.

Figura 67. Resultados en workspace de coeficientes de correlación. Onda Seno, Frecuencia 10 Hz.

```
>> validacion
```

```
Coefficiente_de_determinacion =
```

```
98.5337
```

```
Coefficiente_de_correlacion =
```

```
99.2740
```

```
coeficiente_de_correlacion_y_concordancia =
```

```
95.9547
```

Los resultados son favorables nuevamente, los valores son suficientemente altos para considerar que el modelo describe en gran medida el movimiento de la mesa sísmica y permite una buena predicción de su comportamiento.

Con estos resultados podemos asumir que el modelo de simulación desarrollado para este caso específico con onda sinusoidal de amplitud 4 pulgadas y frecuencia de 10 Hz describe satisfactoriamente el movimiento de la mesa sísmica.

Las otras características muestran los siguientes valores.

Tabla 9. Resultados para otros indicadores de verificación. Onda Sinusoidal, Frecuencia 10 Hz.

Característica	Valor
Media M	0,0119
Sesgo (Kurtosis) Kur	1,6615
Raíz media cuadrática RMS	0,0137
Oblicuidad (Skewness) Skw	-0,0431
Desviación estandar Std	0,0067

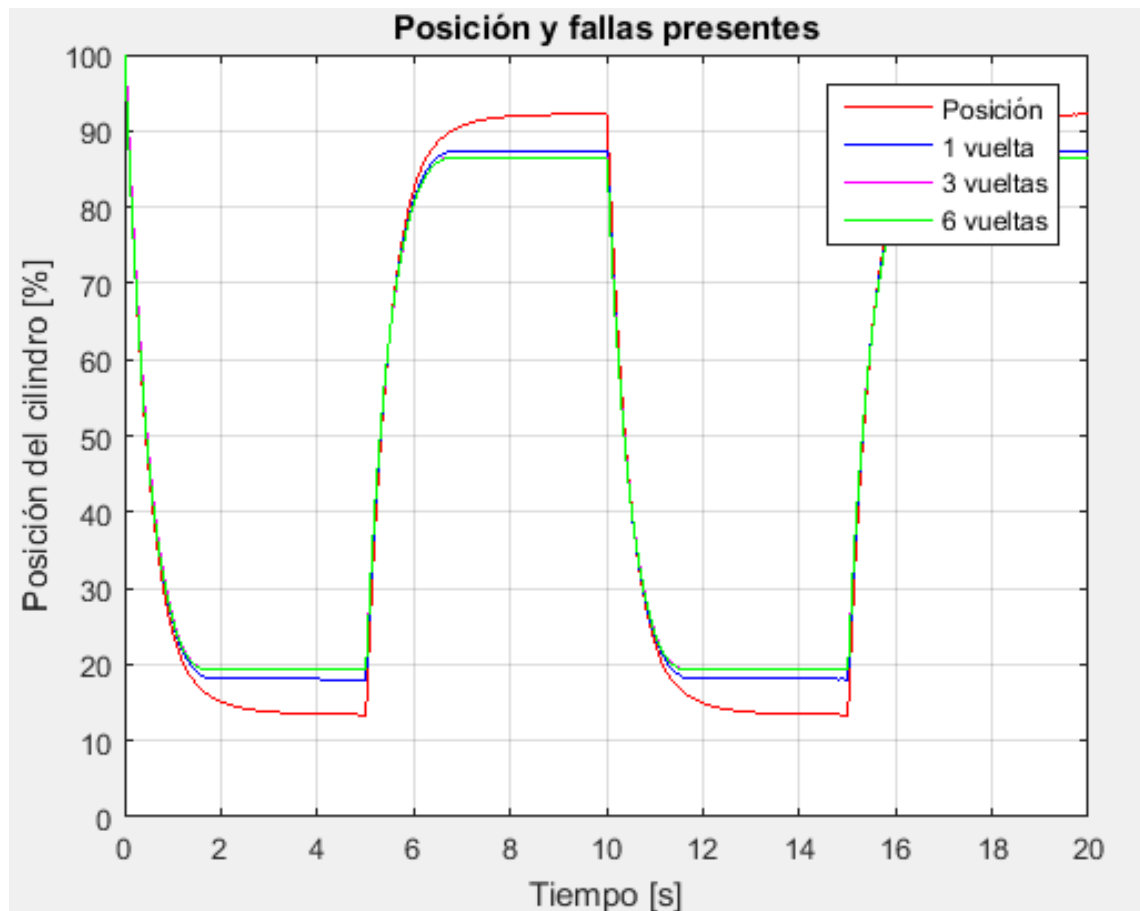
6. CLASIFICACIÓN DE LA FALLA Y RESULTADOS

6.1. MUESTRA A CLASIFICAR.

De igual forma que los datos de validación, las muestras a clasificar según la magnitud del fallo presente, se tomaron en grupos de cinco vectores de posición y el vector resultante del promedio entre ellos será quien contiene los datos que serán evaluados.

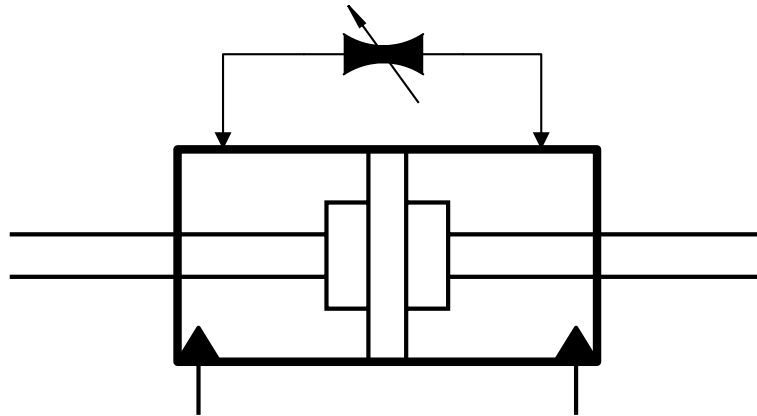
La siguiente figura muestra la gráfica de posición de la onda cuadrada a 0,1 Hz para cada una de las muestras en falla y la posición que debería tener, o sea, la misma posición con la cual se realizó la validación.

Figura 68. Muestra a clasificar.



Como era de esperarse, la imagen anterior muestra que la respuesta del sistema varía según el nivel de apertura de la válvula de aguja que, en éste caso específico, está simulando un fallo de fuga interna en el pistón.

Figura 69. Esquema de la válvula simulando la fuga del sello pistón.

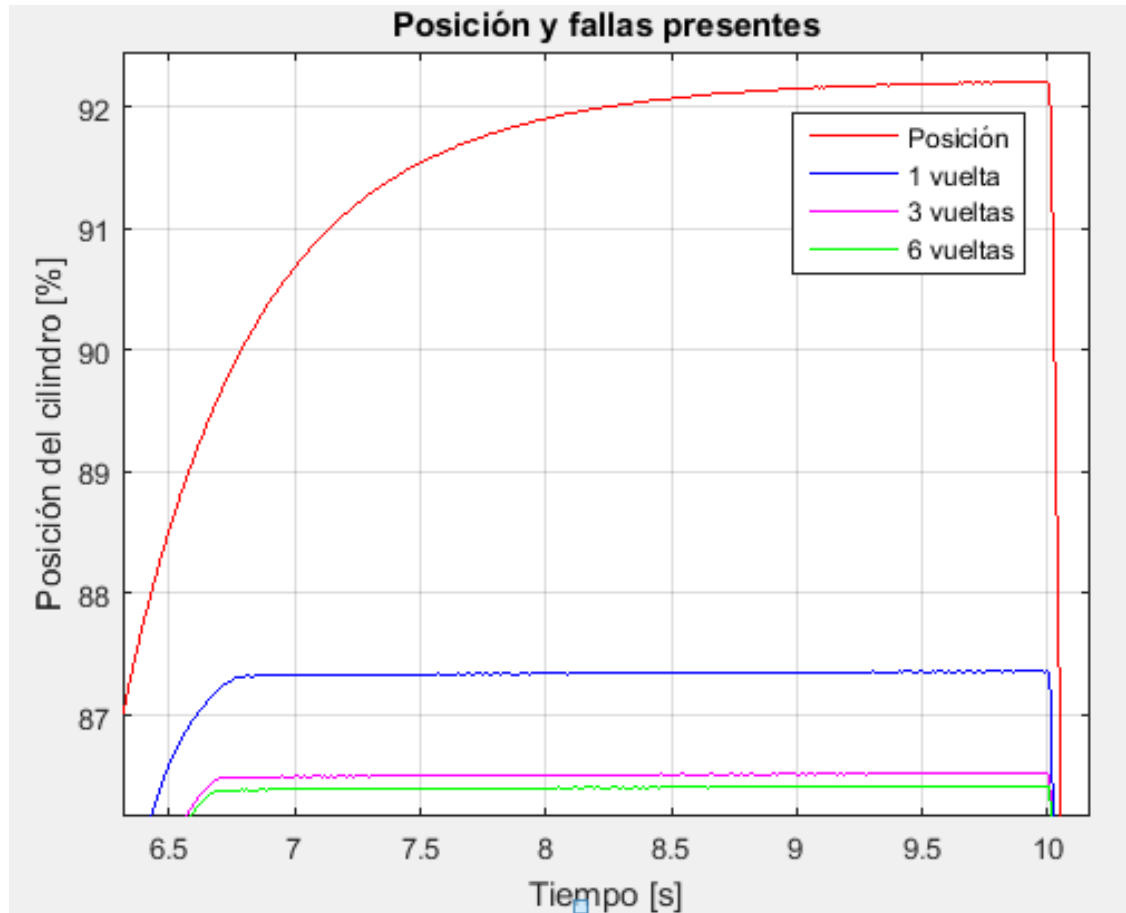


La figura anterior muestra esquemáticamente cómo está conectada la válvula de aguja que conecta las cámaras de alta presión y baja presión en el cilindro hidráulico. Por medio del accionamiento de esta válvula permitimos el flujo de aceite a través de las cámaras del cilindro hidráulico evitando que parte de la energía se transmita al cilindro hidráulico.

La toma de datos de posición del cilindro bajo influencia de la falla se hizo regulando el flujo a través de la válvula y se cuantificó en “número de vueltas” de la válvula. No está de más decir que valor dado en “número de vueltas” es sólo una subjetividad y se usa para diferenciar, de cierta forma, una muestra de la otra.

La siguiente imagen muestra de forma más clara la forma en que responde el banco ante la perturbación causada por la apertura de X número de vueltas de la válvula, donde se hace evidente que no es necesario un porcentaje de apertura muy alto para generar una respuesta bastante lejana a la deseada y posibles problemas graves. Además, muestra claramente por qué se descartaron las muestras de 2, 4 y 5 vueltas de apertura de la válvula.

Figura 70. Detalle de la posición final de la mesa bajo efecto de falla.



La variación provocada en la posición del cilindro se hace muy pequeña en las últimas vueltas de la válvula, el porcentaje de apertura total por vuelta de la válvula disminuye a medida que se va abriendo y es menos drástico el cambio de presión generado por la misma, en últimas, cada vez aumenta en menor cantidad el porcentaje de caudal perdido, es por este motivo que el total de las muestras no será clasificado y sólo se hará para tres de las seis muestras de falla. Las fallas analizadas serán las ocasionadas por una vuelta (línea azul), tres vueltas (línea magenta) y seis vueltas o apertura total de la válvula (línea verde).

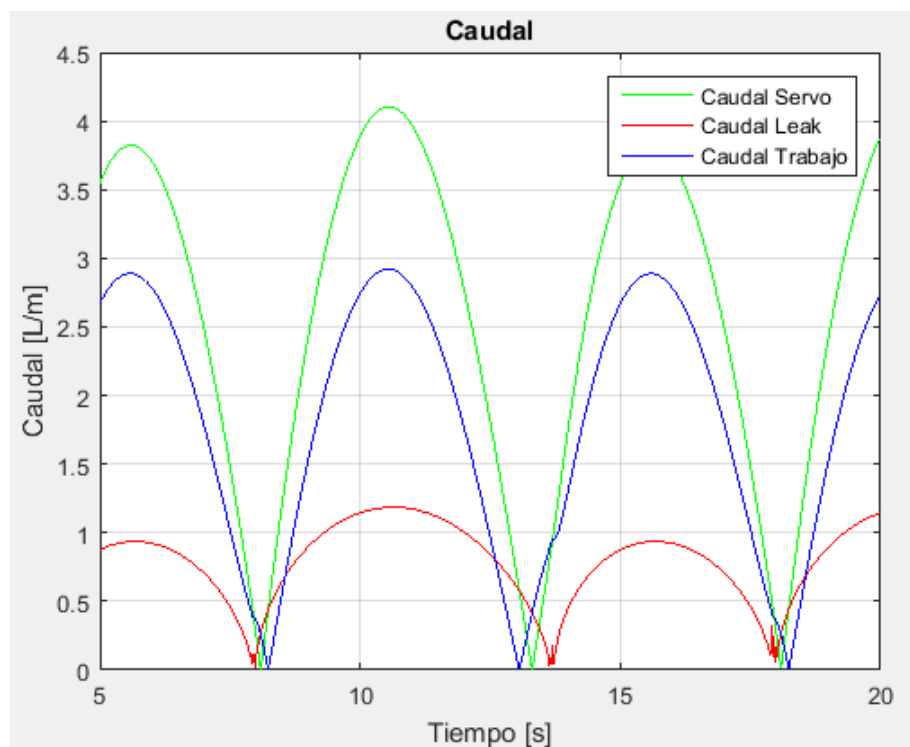
De igual forma sucede con la muestra de onda sinusoidal a 0.1 Hz. También sucede para las otras muestras a clasificar de 1 Hz y 10 Hz para los dos tipos de onda manejados, onda sinusoidal y onda cuadrada.

6.2. GENERACIÓN DE RANGOS DE CLASIFICACIÓN.

Según Watton y Pham⁸, una falla severa en el sello del pistón de un cilindro hidráulico puede dejar pasar más del 30% del caudal destinado por la servo válvula para el trabajo. Por lo tanto, éste se convertirá en el punto de referencia para generar los rangos de clasificación de la falla.

Usando la simulación anteriormente validada con la muestra tomada, se ubicó manualmente el porcentaje de apertura de la válvula de aguja simulada para que dejara pasar el 30% del caudal de trabajo tal y como lo sugiere Watton. Además se buscaron los puntos donde se pierden el 20% y 10% del caudal respectivamente para acotar el nivel de la alarma que se mostrará.

Figura 71. Caudales durante parte del avance del cilindro.



⁸ Le, T. T., Watton, J., and Pham, D. T., 1997, "An Artificial Neural Network based Approach to Fault diagnosis and Classification of Fluid Power Systems," Proceedings of The Institute of Mechanical Engineers, Part I, journal of Systems and Control Engineering, **211**, pp. 307–317.

En la figura pasada, se muestran los caudales involucrados en el cálculo del movimiento de la mesa sísmica, donde la línea verde representa el caudal enviado por la servo válvula para el movimiento asignado, la línea azul muestra el caudal utilizado por el actuador hidráulico y la línea roja es el caudal de pérdidas para esa configuración. Se ha seleccionado esta gráfica de caudales porque es donde se hace más evidente la pérdida del caudal, aquí es fácilmente observable que el caudal de la servo válvula (línea verde) no es usado en su totalidad por el cilindro (línea azul), en realidad estaría recibiendo alrededor del 70% de ese caudal, tal y como fue planteado anteriormente.

Repitiendo este procedimiento para las distintas configuraciones se encontraron los siguientes niveles de falla.

Tabla 10. Nivel de falla según el porcentaje de caudal perdido.

... COEFICIENTES DE FUGA PARA CADA CASO DE ESTUDIO ...							
caractér falla	Qleak	0,1Hz cuadrada	0,1Hz sinusoidal	1Hz cuadrada	1Hz sinusoidal	10Hz cuadrada	10Hz sinusoidal
NORMAL	0	0,1	0,015	0,001	0,001	0,001	0,001
BAJA	10%	0,25	0,15	0,35	0,3	0,25	0,12
MEDIA	20%	0,5	0,35	0,8	0,6	0,7	0,23
CRITICA	30%	0,85	0,6	1,2	0,9	0,85	0,35
SUPER CRITICA	50%	1,4	1,35	2,5	1,9	1,3	0,65

En la tabla Qleak es el porcentaje de caudal perdido y Cleak la constante de apertura de la válvula en el simulador.

6.3. CLASIFICACIÓN DE LA FALLA.

La clasificación de la falla se realizará comparando los coeficientes que relacionan las salidas de los sistemas. Como consecuencia de evidente pérdida de eficiencia en el trabajo la media, la desviación estándar, kurtosis, skewness y la raíz media cuadrática se ven afectados en comparación con los valores encontrados durante la validación.

Los valores que se encuentran en nivel de falla denominado como *NORMAL* corresponden a los mismos resultados encontrados durante la validación del experimento, los siguientes niveles contienen datos que fueron hallados desde el modelo de simulación y su comparación con el modelo de simulación con falla con el fin de limitar y poder clasificar el comportamiento de la mesa sísmica bajo condiciones de falla.

La clasificación de la falla se hará por medio de los valores tomados por las características principales de los residuos, éstas a diferencia de las otras mantienen intervalos de tamaño considerable, una tendencia clara y se mantienen sobre el mismo cuadrante. Las características escogidas son: la media absoluta (*Media abs*), la raíz media cuadrática (RMS) y la desviación estándar de los residuos (*Std abs*).

El valor de la *Media*, que se encuentra como cero, corresponden a la media del residuo entre el modelo de simulación y los datos de validación para el nivel normal, para los otros niveles corresponde a la media del residuo entre el modelo de simulación y el modelo de simulación bajo influencia de la falla. El valor de esta media es muy cercano al cero ya que se usó como parámetro de ajuste del modelo de validación, al reducir éste valor aseguramos que las dos gráficas estuvieran centradas entre sí y, por decirlo de otra forma, arrancaran desde el mismo punto para tener una mejor apreciación de la falla sobre el comportamiento normal de la mesa. La *Media abs*, como su nombre lo indica, es la media del valor absoluto del residuo. La *Std abs*, es la desviación estándar del valor absoluto del residuo, es un valor que en éste caso se encuentra bastante útil, ya que al hacer que la media del residuo sea muy cercana al cero el valor de la desviación estándar del mismo tiende a coincidir con el valor de la raíz media cuadrática (RMS) y no tendría sentido hacer una clasificación con dos valores idénticos, además muestra como aumenta la desviación de valores conforme aumenta el grado de falla.

6.3.1. Límites para frecuencia baja, 0.1 Hz. Las siguientes gráficas y tablas muestran los límites con los cuales se realizó el código para la clasificación de la falla para la onda cuadrada y la señal sinusoidal.

Figura 72. Límites por pérdida de caudal, Onda cuadrada 0,1 Hz.

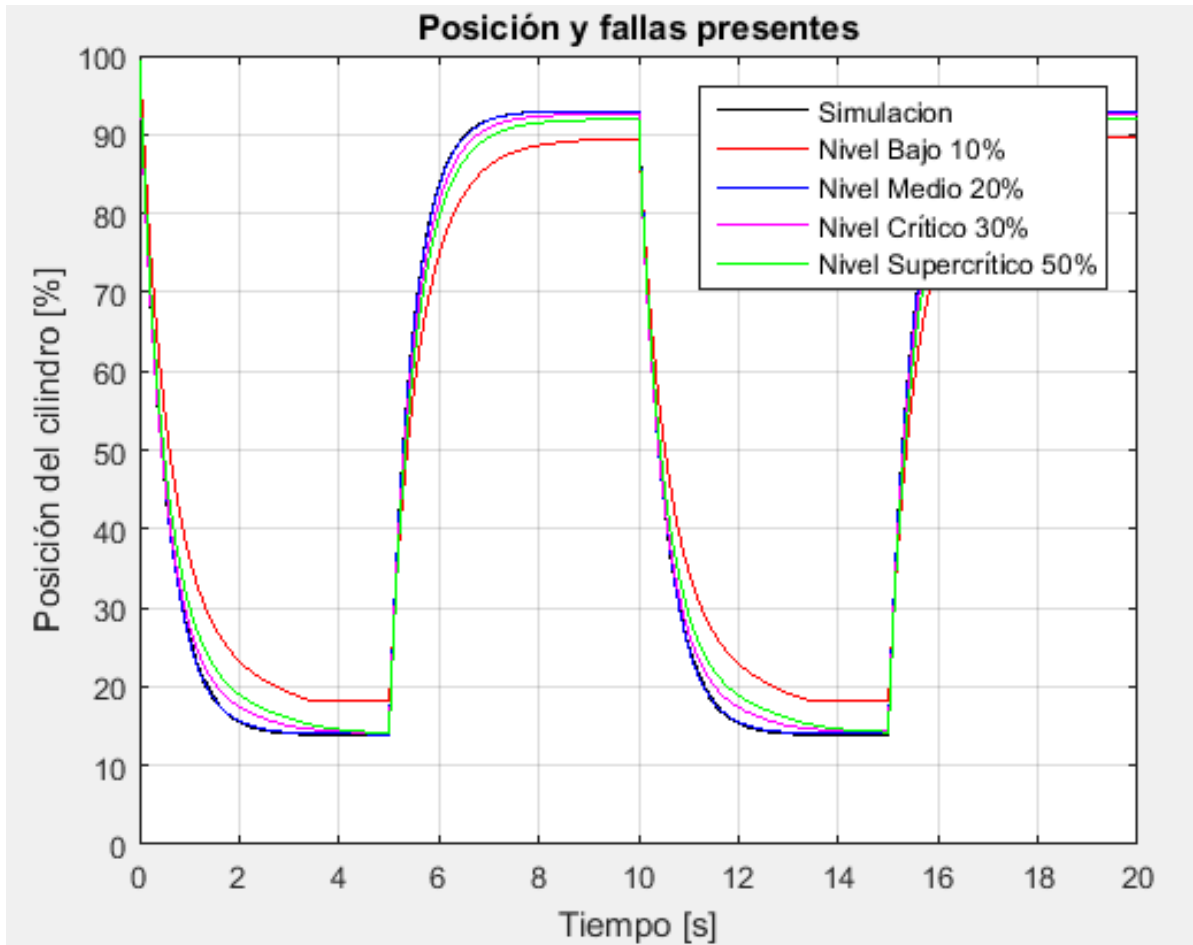


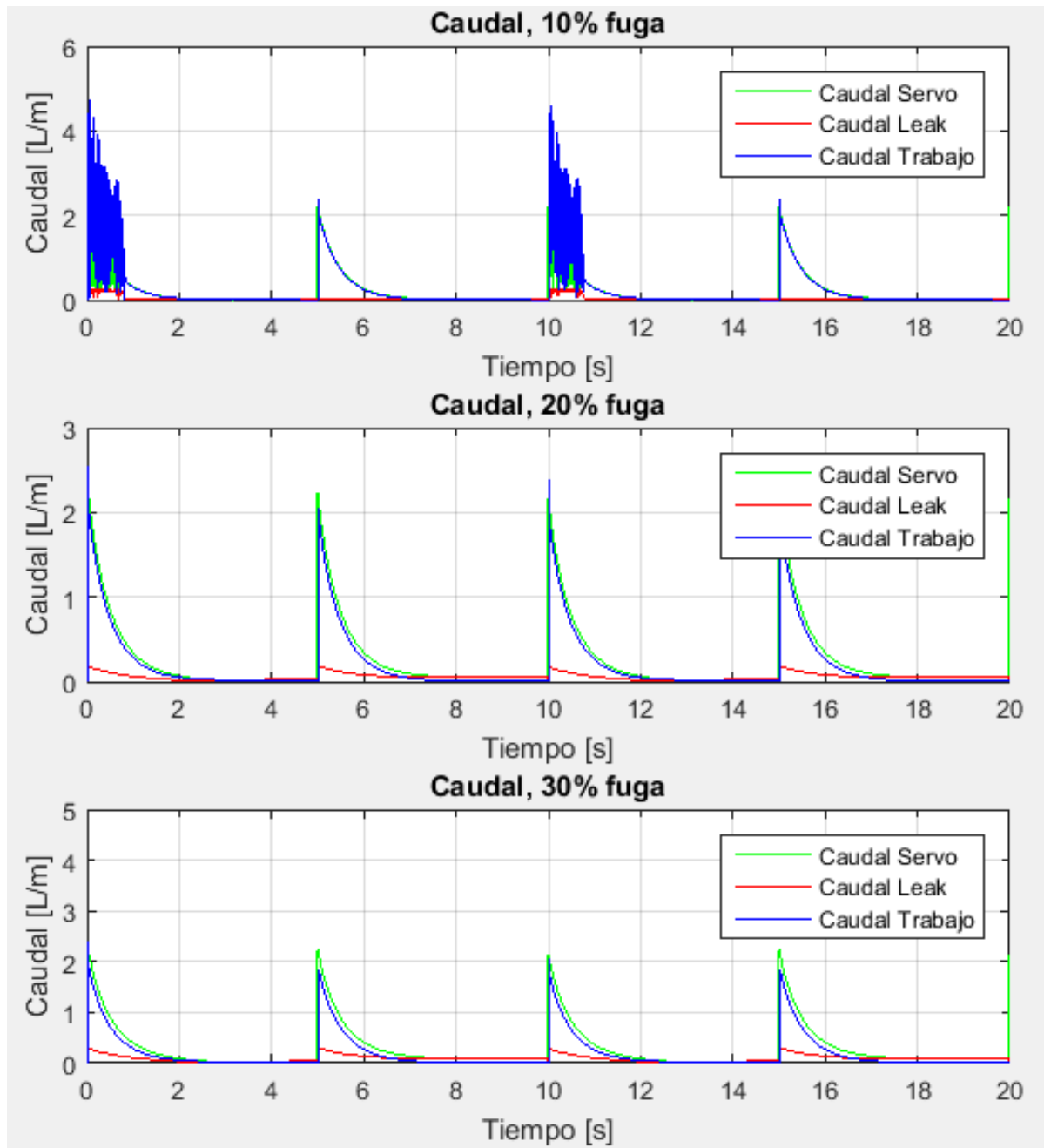
Tabla 11. Límites para clasificación de falla, Onda cuadrada 0,1 Hz.

... AMPLITUD 4 PULGADAS ... FRECUENCIA= 0,1 Hz ... ONDA CUADRADA ... Qw=1,95 L/m ...						
carácter	Cleak	Qservo [L/m]	Qleak [L/m]	Media abs	RMS	Std abs
falla						
NORMAL	0	2,0787	0,053	0,0114	0,0159	0,011
BAJA	0,08	2,1359	0,2406	0,0496	0,0713	0,0412
MEDIA	0,43	2,5394	0,5278	0,0758	0,0916	0,0514
CRITICA	0,73	2,88	0,8791	0,1575	0,1843	0,0957
SUPER CRITICA	1,5	3,77	1,8484	0,4186	0,4476	0,1586

La siguiente gráfica muestra cómo se comportan los caudales, según la simulación, durante la prueba, puede verse cómo el caudal enviado por la servo válvula debe

ser cada vez mayor para compensar la pérdida, pero igualmente el caudal de trabajo se va reduciendo con el aumento del caudal de pérdidas.

Figura 73. Caudales involucrados en la simulación. Onda Cuadrada 0,1 Hz.



También puede verse cómo se escogieron los puntos para la clasificación de la falla. Con la onda sinusoidal es un poco más fácil de ver en gráfica.

La gráfica de posición para la onda sinusoidal muestra hasta dónde se ve influenciado el recorrido del cilindro bajo la presencia de una falla que ocasione una pérdida de caudal en el pistón, desde valores menores al 10% hasta el 30%.

Figura 74. Límites por pérdida de caudal, Onda sinusoidal 0,1 Hz.

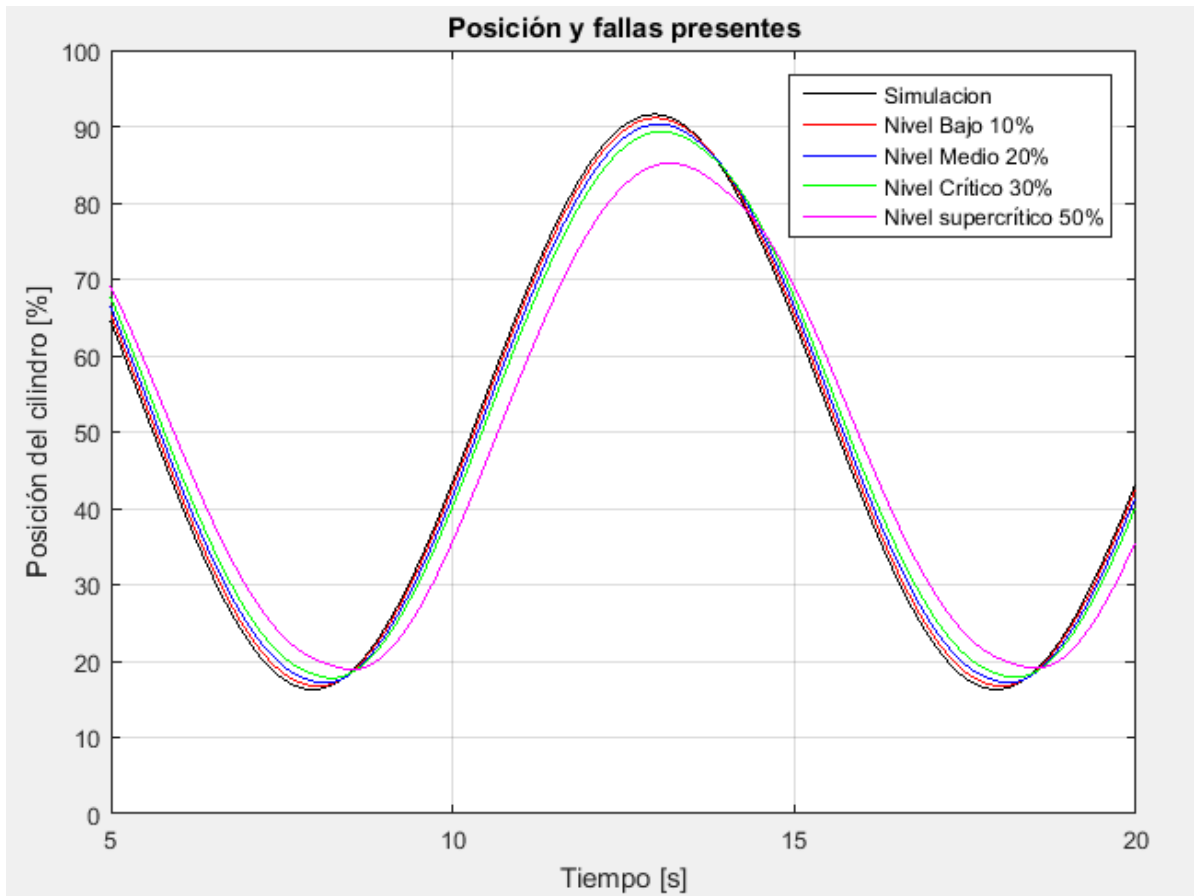
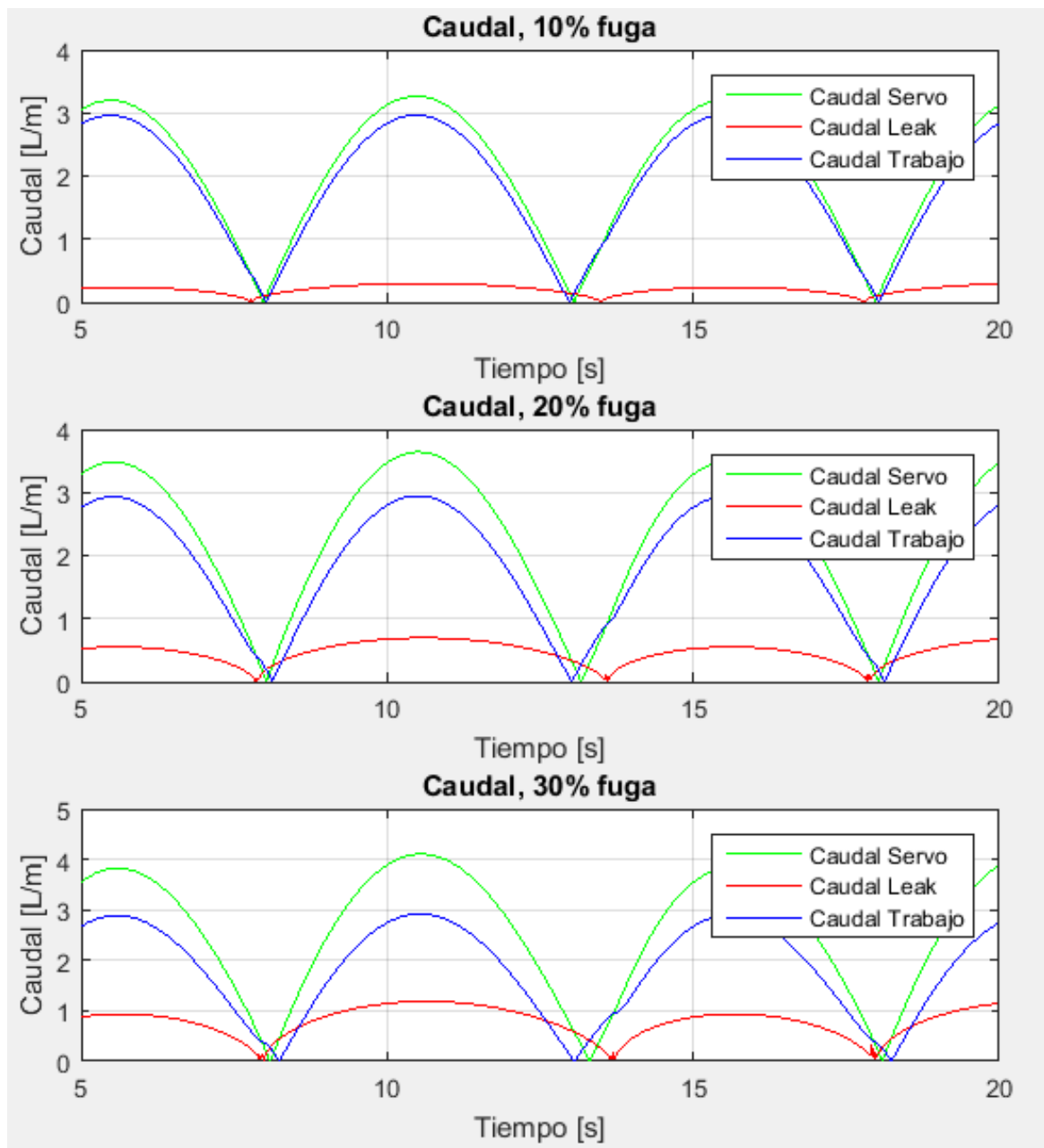


Tabla 12. Límites para clasificación de falla, Onda sinusoidal 0,1 Hz.

... AMPLITUD 4 PULGADAS ... FRECUENCIA= 0,1 Hz ... SINUSOIDAL ... $Q_w=1,89$ L/m ...						
carácter falla	Cleak	Qservo [L/m]	Qleak [L/m]	Media abs	RMS	Std abs
NORMAL	0,015	1,9148	0,0018	0,0215	0,0269	0,0162
BAJA	0,15	2,0887	0,2044	0,0508	0,0554	0,022
MEDIA	0,35	2,3151	0,4709	0,1171	0,1263	0,0472
CRITICA	0,6	2,5884	0,7797	0,2015	0,2163	0,0788
SUPER CRITICA	1,35	3,319	1,6704	0,4186	0,4525	0,172

La siguiente gráfica muestra cómo se comportan los caudales, según la simulación, durante la prueba, puede verse cómo el caudal enviado por la servo válvula debe ser cada vez mayor para compensar la pérdida, pero igualmente el caudal de trabajo se va reduciendo con el aumento del caudal de pérdidas.

Figura 75. Caudales involucrados en la simulación. Onda Sinusoidal 0,1 Hz.



También puede verse cómo se escogieron los puntos para la clasificación de la falla.

6.3.2. Límites para frecuencia media, 1 Hz. Las siguientes gráficas y tablas muestran los límites con los cuales se realizó el código para la clasificación de la falla para la onda cuadrada y la señal sinusoidal.

Figura 76. Límites por pérdida de caudal, Onda cuadrada 1 Hz.

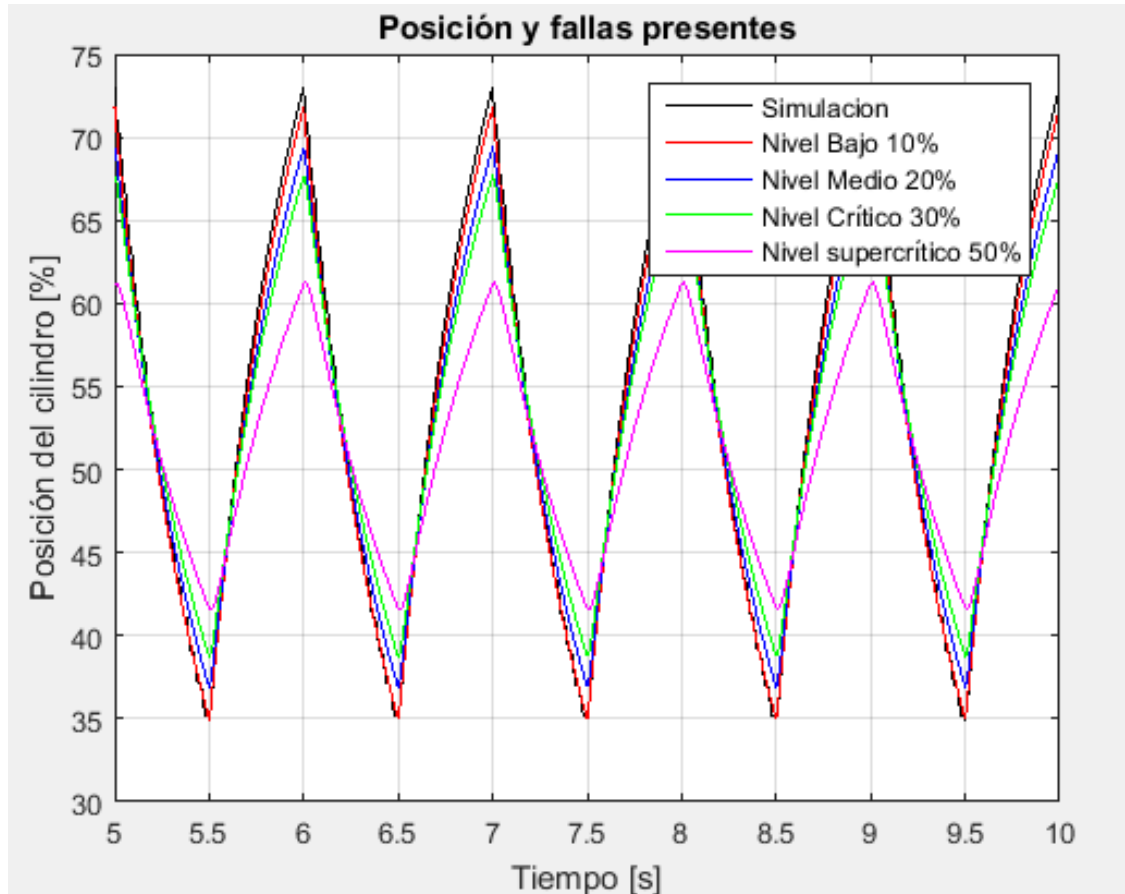
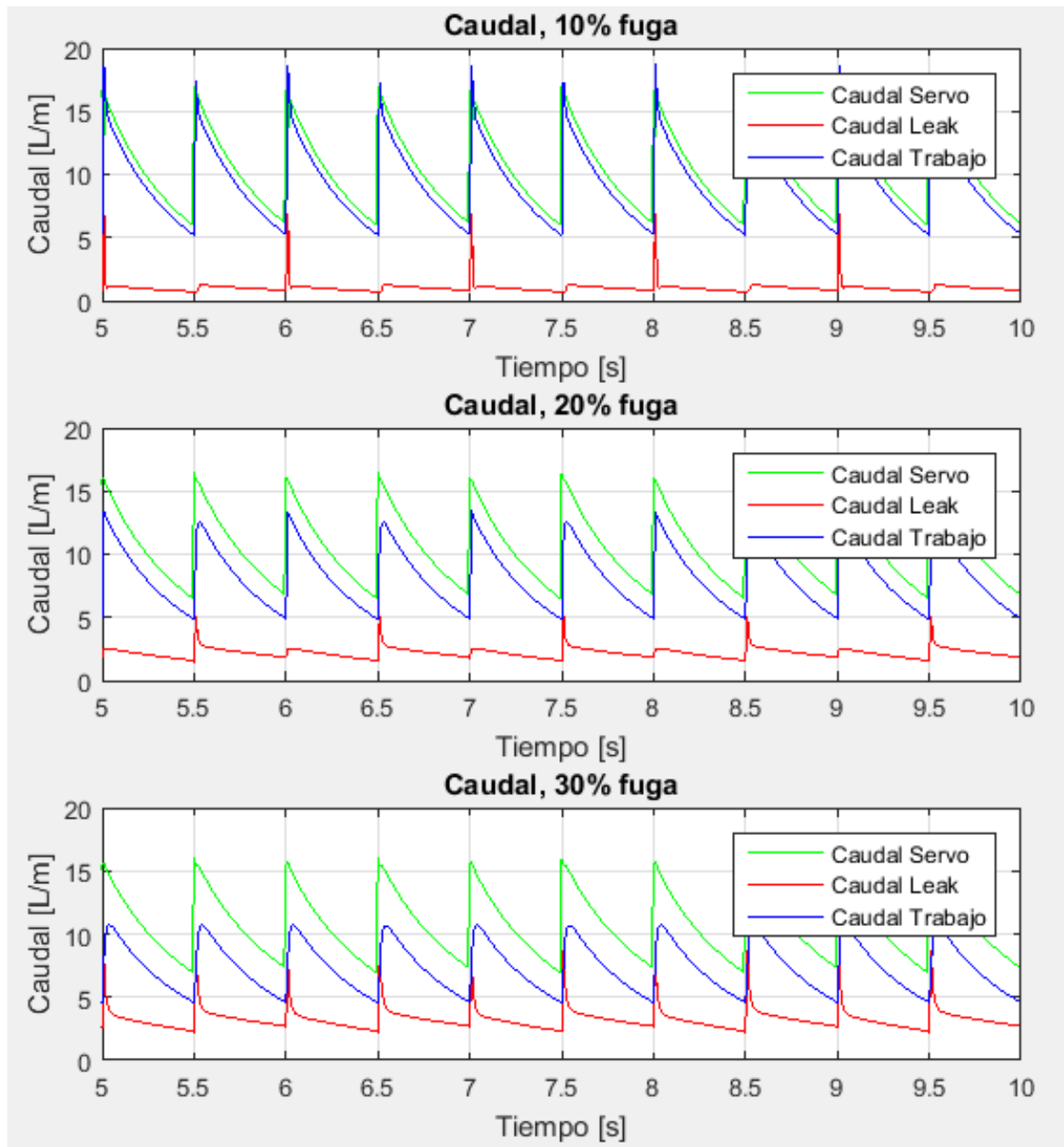


Tabla 13. Límites para clasificación de falla, Onda cuadrada 1 Hz.

... AMPLITUD 4 PULGADAS ... FRECUENCIA= 1 Hz ... CUADRADA ... Qw= 9,6 [L/m]...						
carácter falla	Cleak	Qservo [L/m]	Qleak [L/m]	Media abs	RMS	Std abs
NORMAL	0,001	9,8002	0,0014	0,0203	0,0242	0,0132
BAJA	0,35	10,3667	1,0331	0,0305	0,0364	0,0199
MEDIA	0,8	10,5969	2,1893	0,1121	0,1287	0,0633
CRITICA	1,2	10,7646	3,2566	0,1818	0,2081	0,1012
SUPER CRITICA	2,5	11,14	6,0446	0,3666	0,4187	0,2023

La siguiente gráfica muestra cómo se comportan los caudales, según la simulación, durante la prueba, puede verse cómo el caudal enviado por la servo válvula debe ser cada vez mayor para compensar la pérdida, pero igualmente el caudal de trabajo se va reduciendo con el aumento del caudal de pérdidas.

Figura 77. Caudales involucrados en la simulación. Onda Cuadrada 1 Hz.



También puede verse cómo se escogieron los puntos para la clasificación de la falla.

La gráfica de posición para la onda sinusoidal muestra hasta dónde se ve influenciado el recorrido del cilindro bajo la presencia de una falla que ocasione una pérdida de caudal en el pistón, desde valores menores al 10% hasta el 30%.

Figura 78. Límites por pérdida de caudal, Onda sinusoidal 1 Hz.

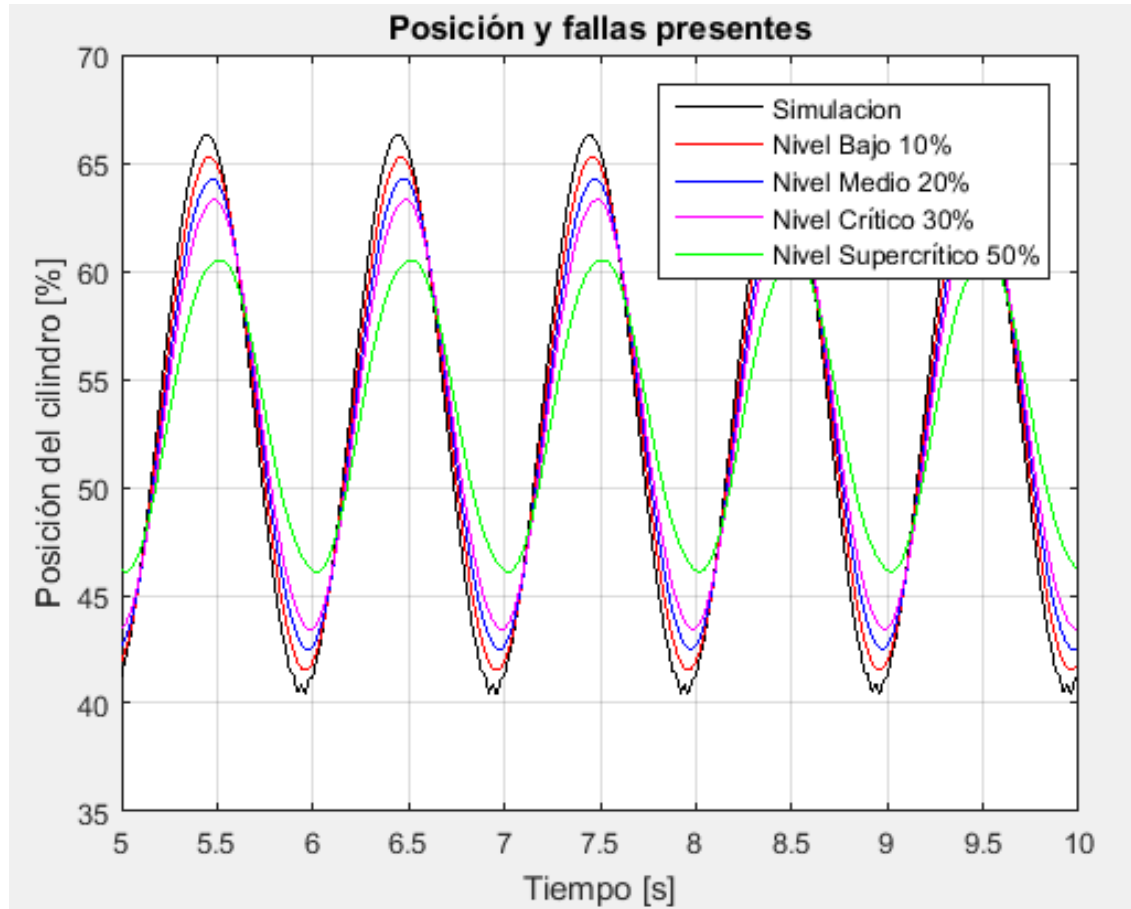
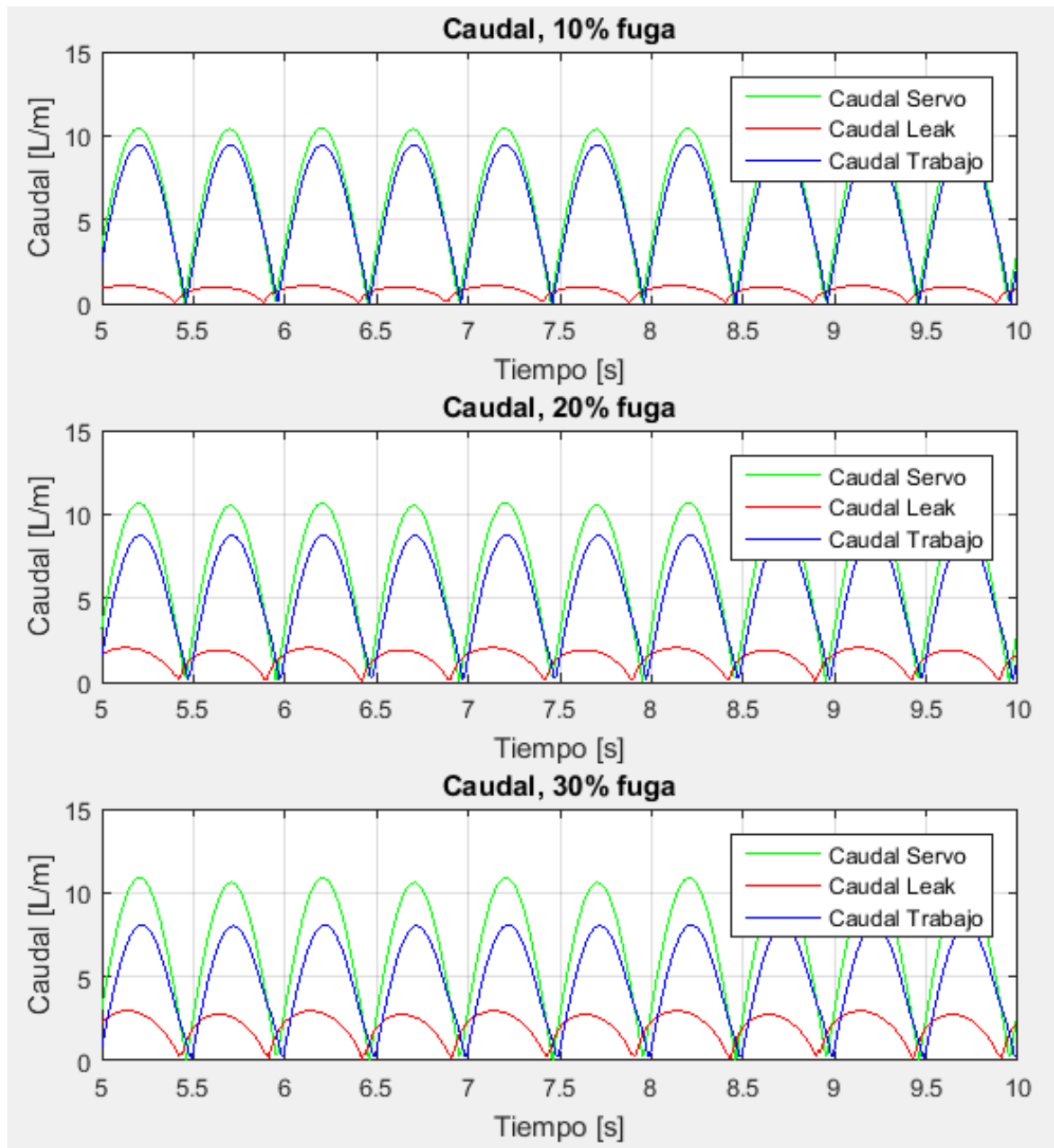


Tabla 14. Límites para clasificación de falla, Onda sinusoidal 1 Hz.

... AMPLITUD 4 PULGADAS ... FRECUENCIA= 1 Hz ... SINUSOIDAL ... Qw= 6,3 [L/m] ...						
carácter falla	Cleak	Qservo [L/m]	Qleak [L/m]	Media abs	RMS	Std abs
NORMAL	0,001	6,4608	0	0,0359	0,0408	0,0195
BAJA	0,3	6,6308	0,7676	0,0616	0,0691	0,0315
MEDIA	0,6	6,7594	1,4517	0,1181	0,1321	0,0592
CRITICA	0,9	6,8566	2,0646	0,1693	0,189	0,084
SUPER CRITICA	1,9	7,0321	3,6227	0,3047	0,3387	0,1481

La siguiente gráfica muestra cómo se comportan los caudales, según la simulación, durante la prueba, puede verse cómo el caudal enviado por la servo válvula debe ser cada vez mayor para compensar la pérdida, pero igualmente el caudal de trabajo se va reduciendo con el aumento del caudal de pérdidas.

Figura 79. Caudales involucrados en la simulación. Onda Sinusoidal 1 Hz.



También puede verse cómo se escogieron los puntos para la clasificación de la falla.

6.3.3. Límites para frecuencia alta, 10 Hz. Las siguientes gráficas y tablas muestran los límites con los cuales se realizó el código para la clasificación de la falla para la onda cuadrada y la señal sinusoidal.

Figura 80. Límites por pérdida de caudal, Onda cuadrada 10 Hz.

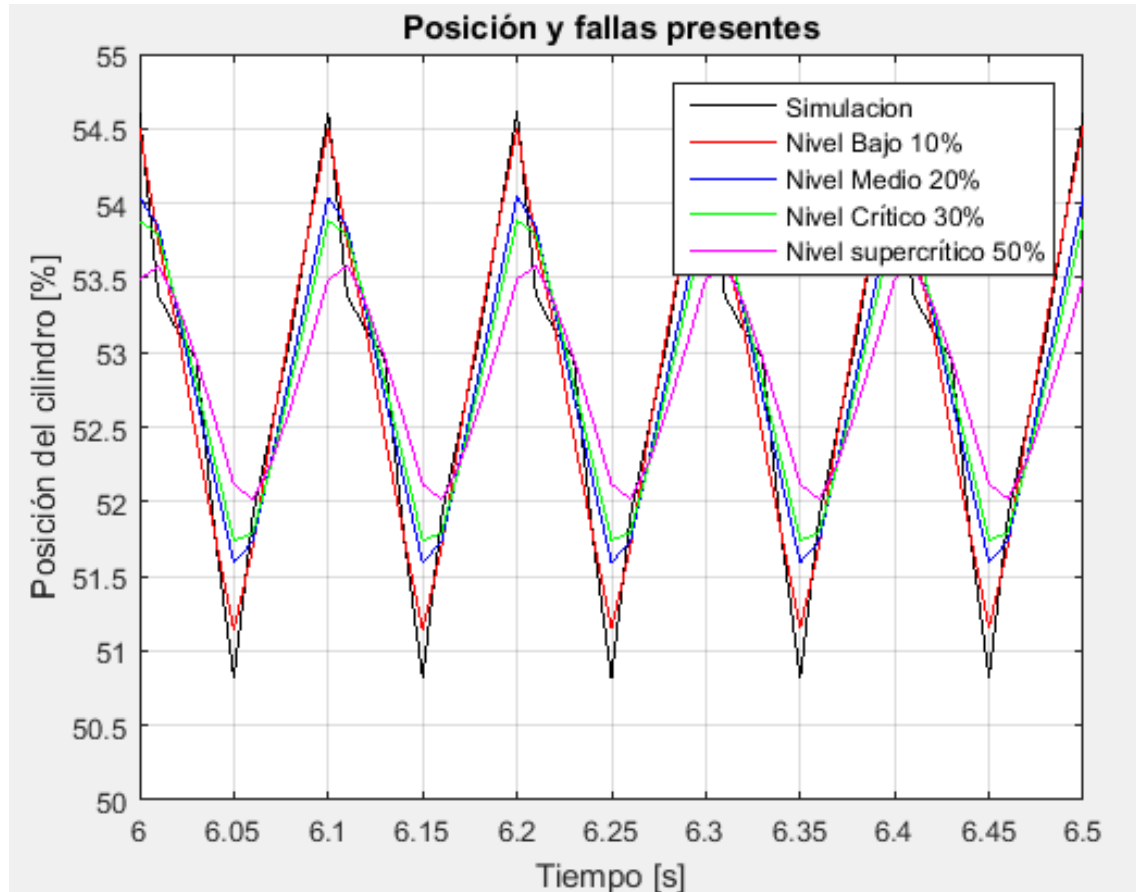
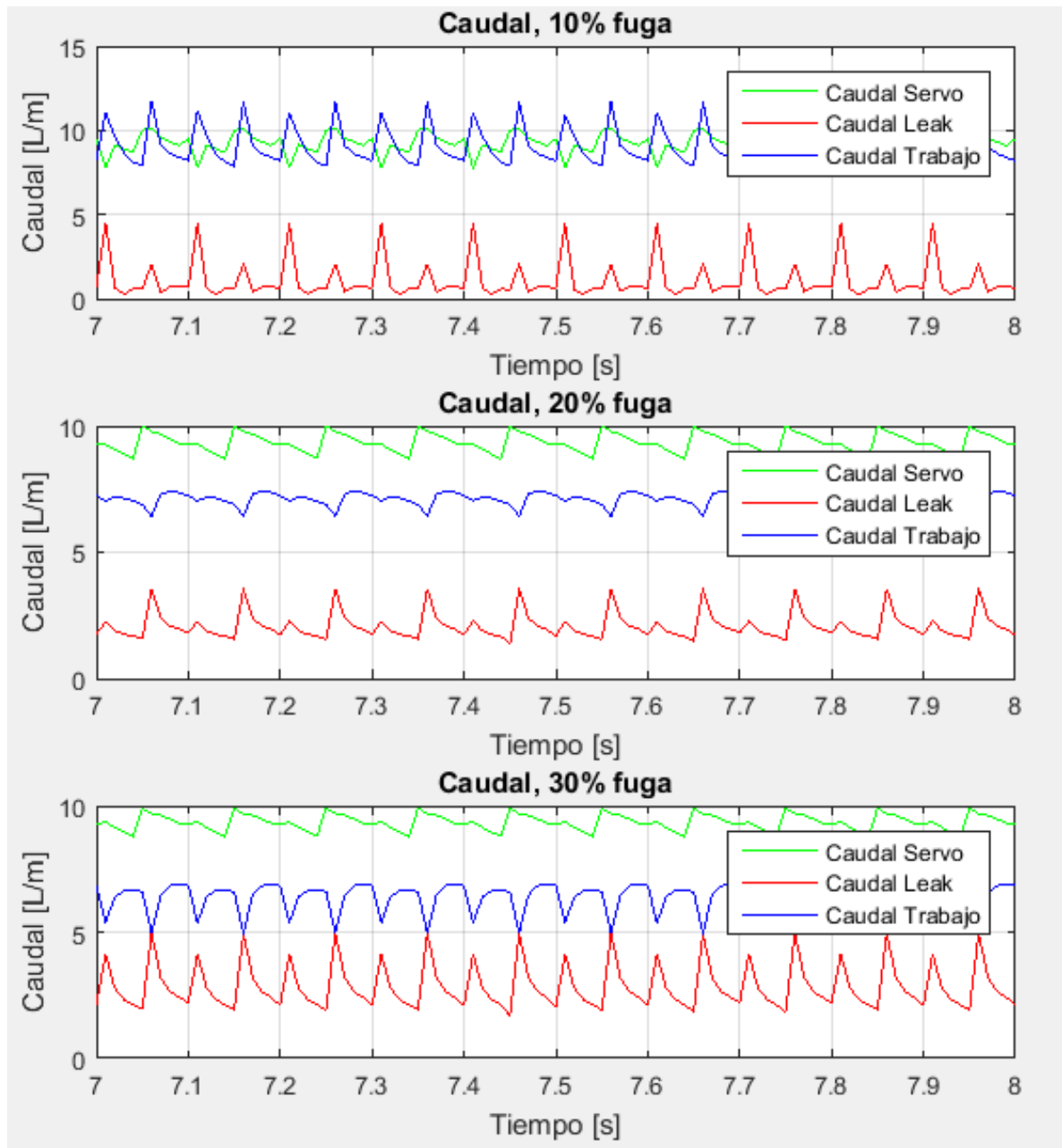


Tabla 15. Límites para clasificación de falla, Onda cuadrada 10 Hz.

... AMPLITUD 4 PULGADAS ... FRECUENCIA= 10 Hz ... CUADRADA ... Qw=9 L/m ...						
carácter	Cleak	Qservo [L/m]	Qleak [L/m]	Media abs	RMS	Std abs
falla						
NORMAL	0,001	8,2144	0,0185	0,012	0,0173	0,0124
BAJA	0,25	9,2140	1,1014	0,0207	0,025	0,0134
MEDIA	0,7	9,3477	2,088	0,0257	0,0294	0,0142
CRITICA	0,85	9,3522	2,853	0,0295	0,0347	0,0184
SUPER CRITICA	1,3	9,3480	4,8568	0,038	0,0491	0,0311

La siguiente gráfica muestra cómo se comportan los caudales, según la simulación, durante la prueba, puede verse cómo el caudal enviado por la servo válvula debe ser cada vez mayor para compensar la pérdida, pero igualmente el caudal de trabajo se va reduciendo con el aumento del caudal de pérdidas.

Figura 81. Caudales involucrados en la simulación. Onda Cuadrada 10 Hz.



También puede verse cómo se escogieron los puntos para la clasificación de la falla.

La gráfica de posición muestra hasta dónde se ve influenciado el recorrido del cilindro bajo la presencia de una falla que ocasione una pérdida de caudal en el pistón, desde valores menores al 10% hasta el 30%.

Figura 82. Límites por pérdida de caudal, Onda sinusoidal 10 Hz.

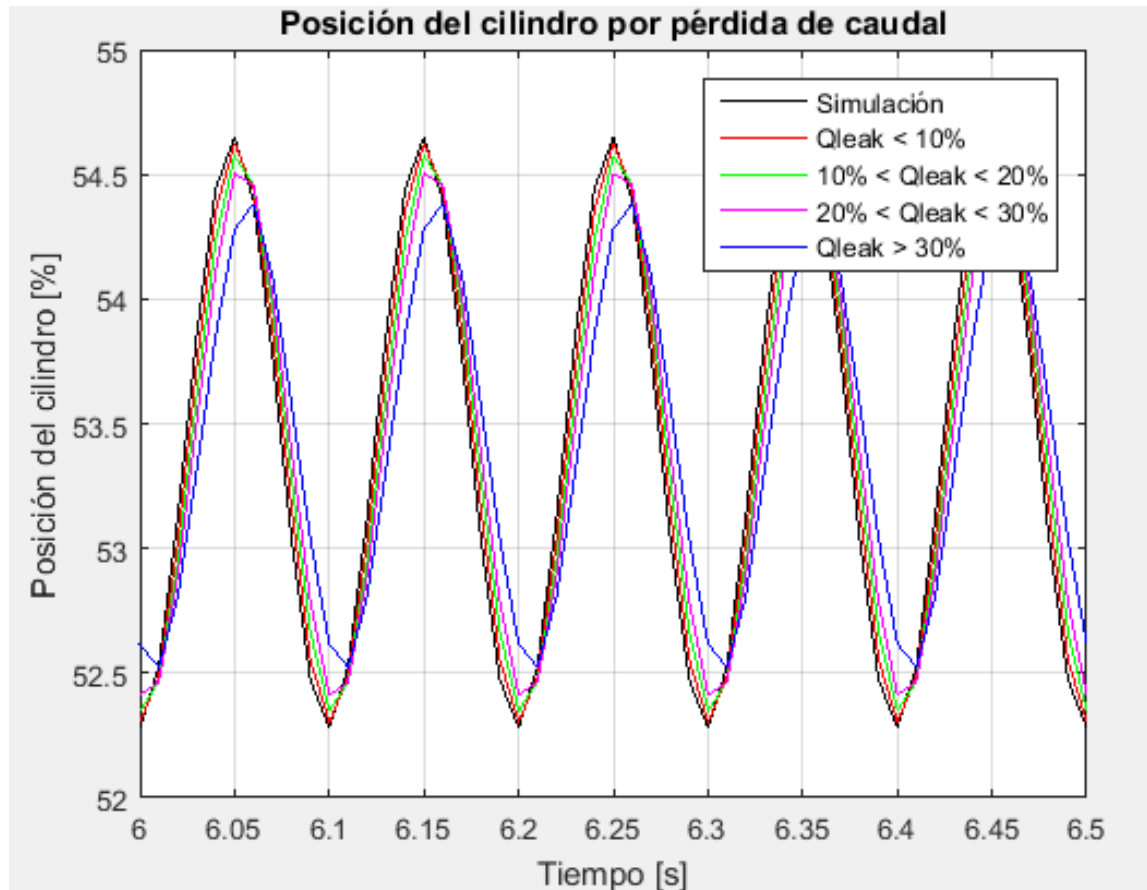
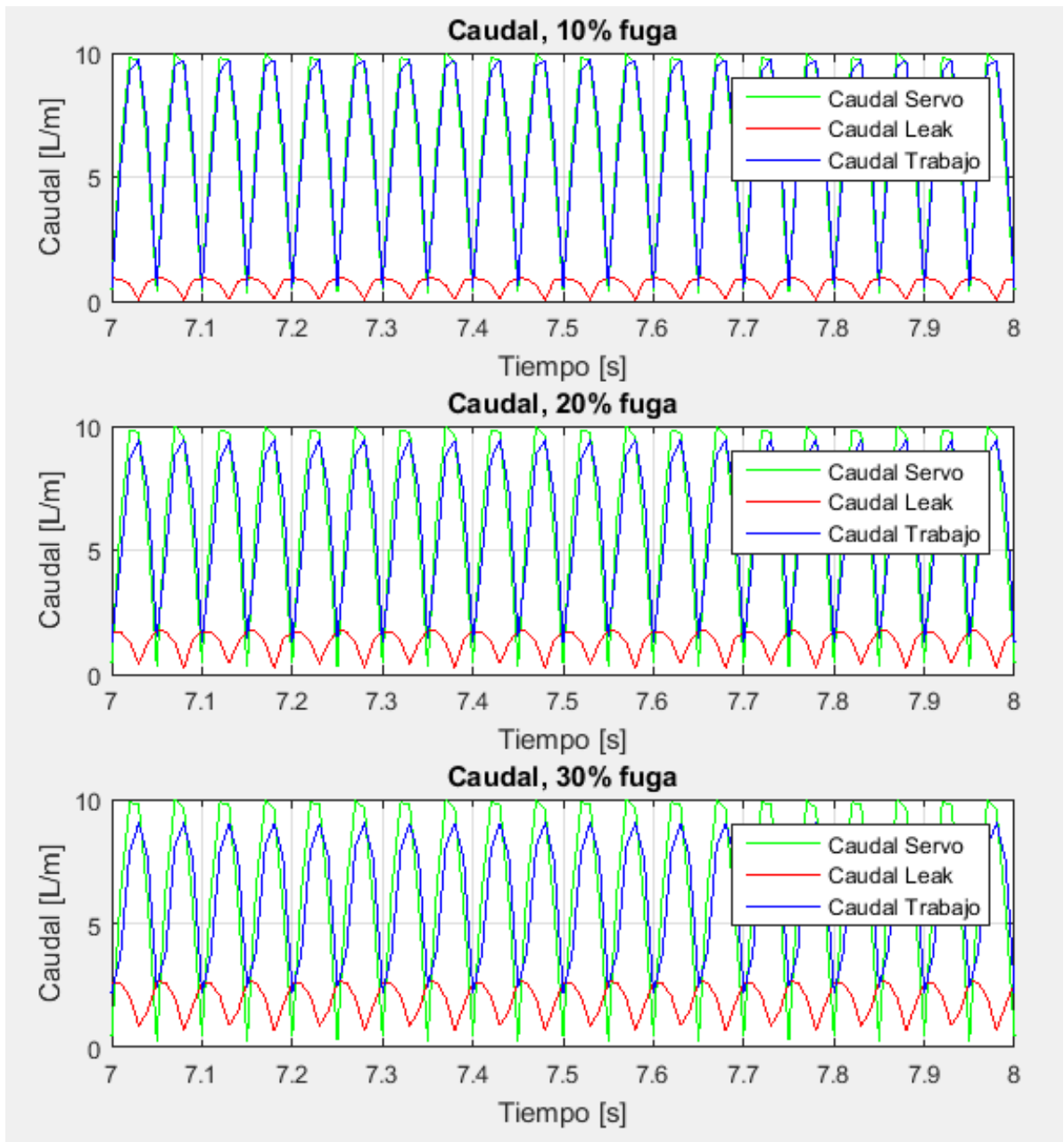


Tabla 16. Límites para clasificación de falla, Onda sinusoidal 10 Hz.

... AMPLITUD 4 PULGADAS ... FRECUENCIA= 10 Hz ... SINUSOIDAL ... Qw=6,5 L/m						
carácter	Cleak	Qservo [L/m]	Qleak [L/m]	Media abs	RMS	Std abs
falla						
NORMAL	0,001	6,3751	0,0061	0,0119	0,0137	0,0067
BAJA	0,12	6,3967	0,6676	0,0125	0,0148	0,0069
MEDIA	0,23	6,4115	1,2884	0,0149	0,0167	0,0073
CRITICA	0,35	6,4256	1,9278	0,0162	0,018	0,0078
SUPER CRITICA	0,65	6,4437	3,2332	0,0261	0,03	0,0148

La siguiente gráfica muestra cómo se comportan los caudales, según la simulación, durante la prueba, puede verse cómo el caudal enviado por la servo válvula debe ser cada vez mayor para compensar la pérdida, pero igualmente el caudal de trabajo se va reduciendo con el aumento del caudal de pérdidas.

Figura 83. Caudales involucrados en la simulación. Onda Sinusoidal 10 Hz.



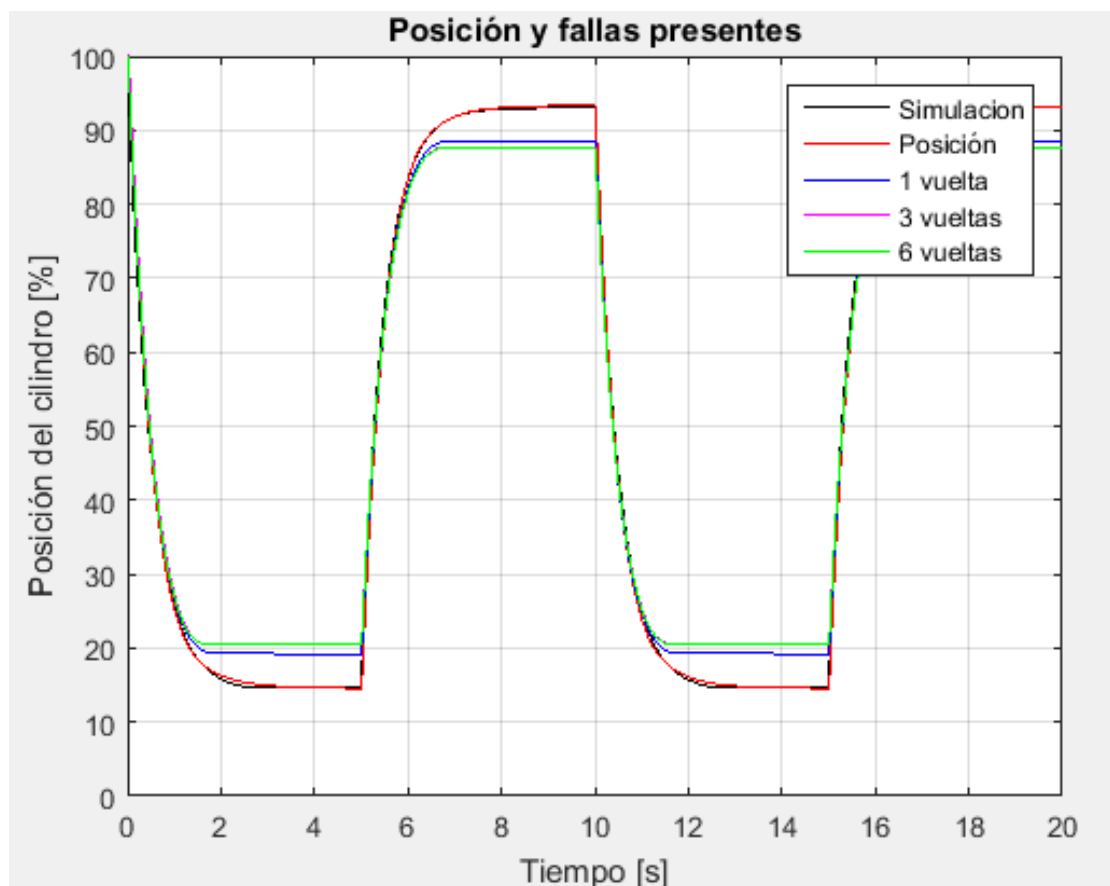
También puede verse cómo se escogieron los puntos para la clasificación de la falla

6.4. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN DE LA MUESTRAS.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la clasificación de las fallas escogidas anteriormente, una, tres y seis vueltas en frecuencias de 0.1Hz, 1Hz, y 10Hz respectivamente.

6.4.1. Resultados para frecuencia baja, onda cuadrada, 0.1 Hz. En la gráfica siguiente se muestra la posición del cilindro en trabajo normal y bajo influencia de la falla provocada por el grado de apertura de la válvula indicado en número de vueltas.

Figura 84. Posición y fallas. Onda cuadrada 0,1Hz.



Al ejecutar el código de MatLab, el programa calcula los datos mostrados anteriormente y los compara para dar una clasificación.

Se inicia con la clasificación de la falla cuando la válvula está completamente cerrada, este caso es idéntico al de la validación que al clasificarse debería entregar una falla de nivel normal.

Figura 85. Resultado para CERO vueltas de apertura. Onda cuadrada, 0.1Hz

```
>> clasificaciondelasfallas

Media =

    0.0114

Rms =

    0.0159

Std =

    0.0110

Falla de nivel NORMAL, pueden existir fugas muy
pequeñas en el cilindro hidráulico.
```

Para una vuelta de apertura tenemos la siguiente respuesta.

Figura 86. Resultado para UNA vuelta de apertura. Onda cuadrada, 0.1Hz.

```
>> clasificaciondelasfallas

Media =

    0.0496

Rms =

    0.0713

Std =

    0.0512

Falla de nivel BAJO, el cilindro pierde hasta 0,24 L/m,
menos del 10% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para tres vueltas de apertura el resultado es el siguiente.

Figura 87. Resultado para DOS vueltas de apertura. Onda cuadrada, 0.1Hz.

```
>> clasificaciondelasfallas
```

```
Media =
```

```
0.3233
```

```
Rms =
```

```
0.3527
```

```
Std =|
```

```
0.1411
```

```
Falla de nivel CRÍTICO, el cilindro pierde hasta 0,88 L/m,  
entre el 20% y el 30% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para seis vueltas de apertura en la válvula tenemos.

Figura 88. Resultado para SEIS vueltas de apertura. Onda cuadrada, 0.1Hz.

```
>> clasificaciondelasfallas
```

```
Media =
```

```
0.3213
```

```
Rms =
```

```
0.3517
```

```
Std =
```

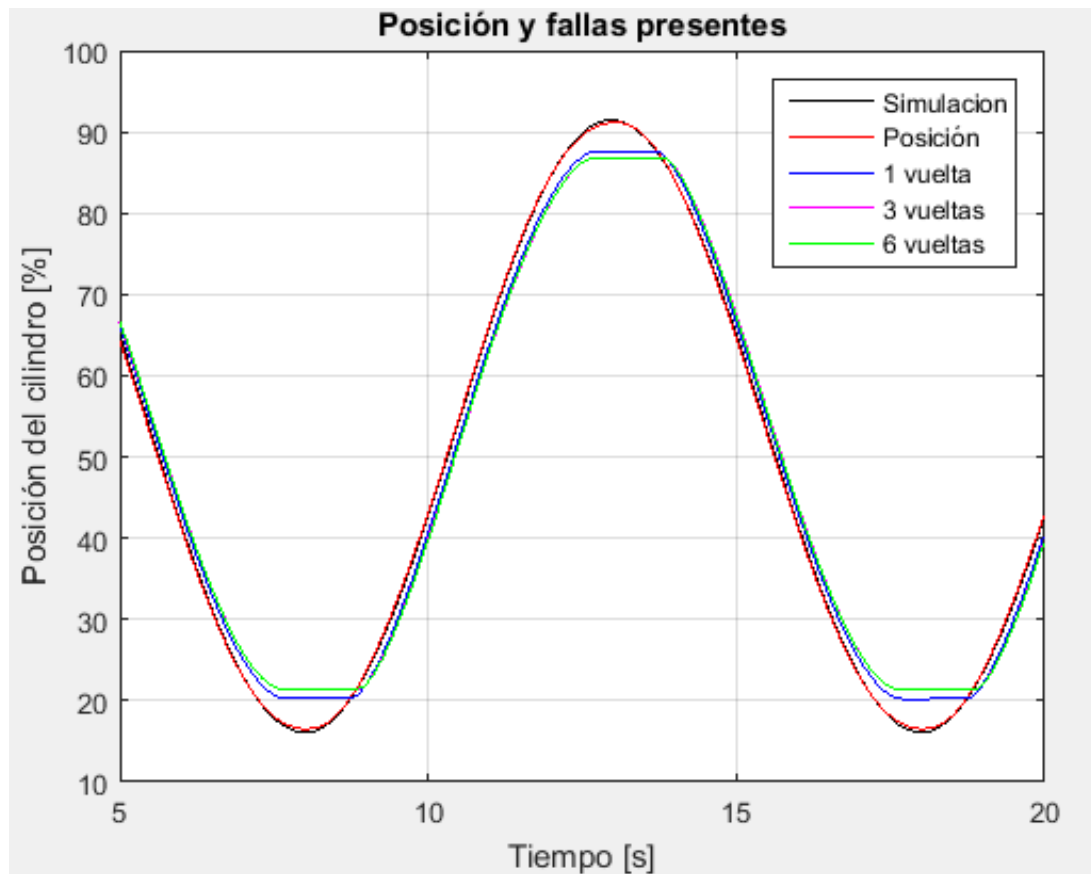
```
0.1431
```

```
Falla de nivel CRÍTICO, el cilindro pierde hasta 0,88 L/m,  
entre el 20% y el 30% del caudal destinado para el trabajo.
```

Durante esta prueba el nivel de falla cambia entre la primera prueba y las dos últimas, esto se debe a la poca diferencia que existe entre las posiciones para tres y seis vueltas de apertura. El resultado de la clasificación de la primera falla toma un valor de nivel bajo, dando un valor aproximado de pérdida de caudal de 0,24 L/m, las otras dos pruebas entran en nivel crítico y dan una pérdida máxima de 0,88 L/m.

6.4.2. Resultados para frecuencia baja, onda sinusoidal, 0.1 Hz. En la gráfica siguiente se muestra la posición del cilindro en trabajo normal y bajo influencia de la falla provocada por el grado de apertura de la válvula indicado en número de vueltas, el caudal de trabajo calculado a partir de la prueba es de 1,89[L/m].

Figura 89. Posición y fallas. Onda sinusoidal 0,1Hz.



Al ejecutar el código de MatLab, el programa calcula los datos mostrados anteriormente y los compara para dar una clasificación.

Se inicia con la clasificación de la falla cuando la válvula está completamente cerrada, este caso es idéntico al de la validación que al clasificarse debería entregar una falla de nivel normal.

Figura 90. Resultado para CERO vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 0.1Hz

```
>> clasificaciondelasfallasBAJAseno

Media =

    0.0177

Rms =

    0.0211

Std =

    0.0115

Falla de nivel NORMAL, pueden existir fugas muy
pequeñas en el cilindro hidráulico.
```

Para una vuelta de apertura tenemos la siguiente respuesta.

Figura 91. Resultado para UNA vuelta de apertura. Onda sinusoidal, 0.1Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasBAJAseno

Media =

    0.1784

Rms =

    0.1864

Std =

    0.0540

Falla de nivel MEDIO, el cilindro pierde hasta 0,47 L/m,
entre el 10% y el 20% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para tres vueltas de apertura el resultado es el siguiente.

Figura 92. Resultado para DOS vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 0.1Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasBAJAseno

Media =

    0.2333

Rms =

    0.2430

Std =

    0.0682

Falla de nivel CRÍTICO, el cilindro pierde hasta 0,77 L/m,
entre el 20% y el 30% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para seis vueltas de apertura en la válvula tenemos.

Figura 93. Resultado para SEIS vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 0.1Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasBAJAseno

Media =

    0.2317

Rms =

    0.2416

Std =

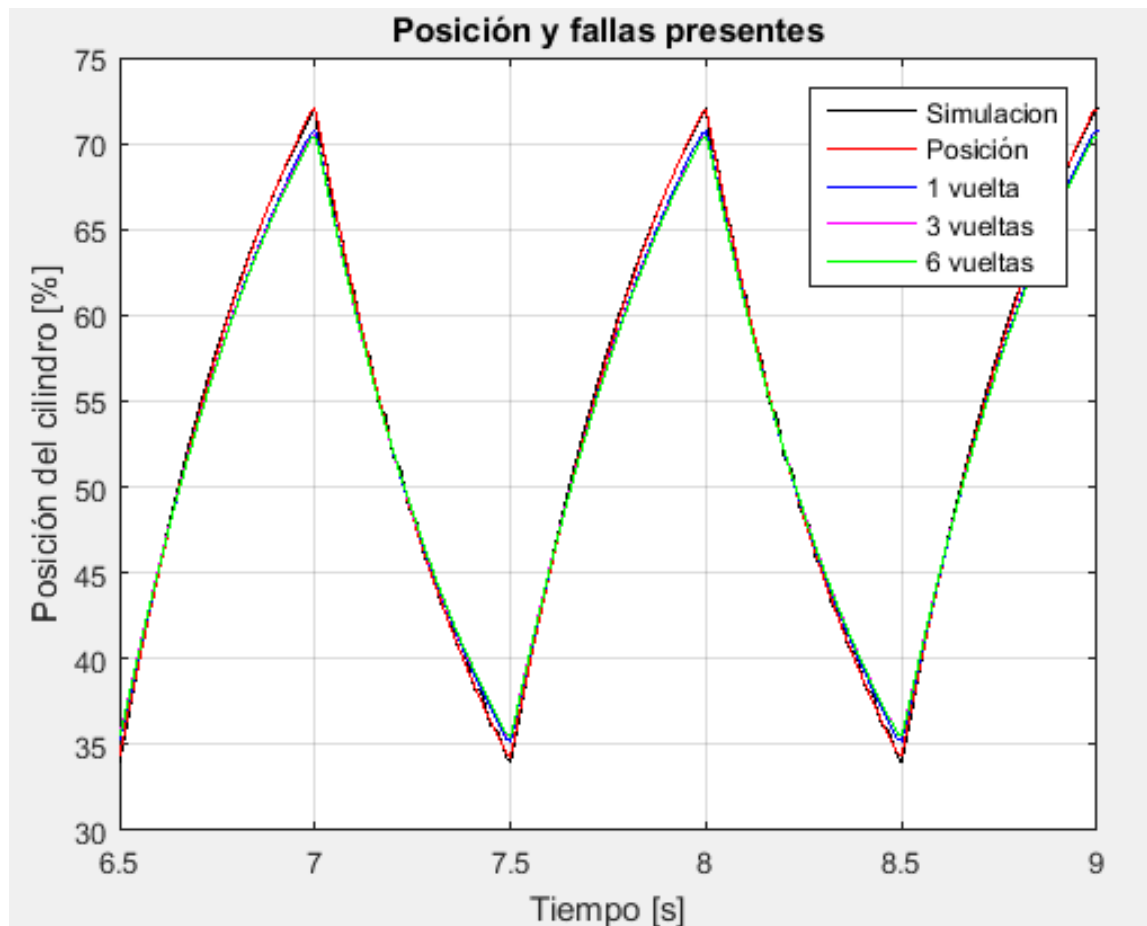
    0.0687

Falla de nivel CRÍTICO, el cilindro pierde hasta 0,77 L/m,
entre el 20% y el 30% del caudal destinado para el trabajo.
```

En esta prueba el nivel de falla cambia entre la primera prueba y las dos últimas, esto se debe a la poca diferencia que existe entre las posiciones para tres y seis vueltas de apertura. El resultado de la clasificación de la primera falla toma un valor de nivel medio, dando un valor aproximado de pérdida de caudal de 0,47 L/m, las otras dos pruebas entran en nivel crítico y dan una pérdida máxima de 0,77 L/m.

6.4.3. Resultados para frecuencia media, onda cuadrada, 1 Hz. En la gráfica siguiente se muestra la posición del cilindro en trabajo normal y bajo influencia de la falla provocada por el grado de apertura de la válvula indicado en número de vueltas.

Figura 94. Posición y fallas. Onda cuadrada 1Hz.



Al ejecutar el código de MatLab, el programa calcula los datos mostrados anteriormente y los compara para dar una clasificación.

Se inicia con la clasificación de la falla cuando la válvula está completamente cerrada, este caso es idéntico al de la validación que al clasificarse debería entregar una falla de nivel normal.

Figura 95. Resultado para CERO vueltas de apertura. Onda cuadrada, 1Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasMEDIACuadrada

Media =

    0.0203

Rms =

    0.0242

Std =

    0.0132

Falla de nivel NORMAL, pueden existir fugas muy
pequeñas en el cilindro hidráulico.
```

Para una vuelta de apertura tenemos la siguiente respuesta.

Figura 96. Resultado para UNA vuelta de apertura. Onda cuadrada, 1Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasMEDIACuadrada

Media =

    0.0491

Rms =

    0.0562

Std = |

    0.0274

Falla de nivel BAJO, el cilindro pierde hasta 1 L/m,
menos del 10% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para tres vueltas de apertura el resultado es el siguiente.

Figura 97. Resultado para DOS vueltas de apertura. Onda cuadrada, 1Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasMEDIACuadrada

Media =

    0.0590

Rms =

    0.0676

Std =

    0.0331

Falla de nivel BAJO, el cilindro pierde hasta 1 L/m,
menos del 10% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para seis vueltas de apertura en la válvula tenemos.

Figura 98. Resultado para SEIS vueltas de apertura. Onda cuadrada, 1Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasMEDIACuadrada

Media =

    0.0593

Rms =

    0.0680

Std =

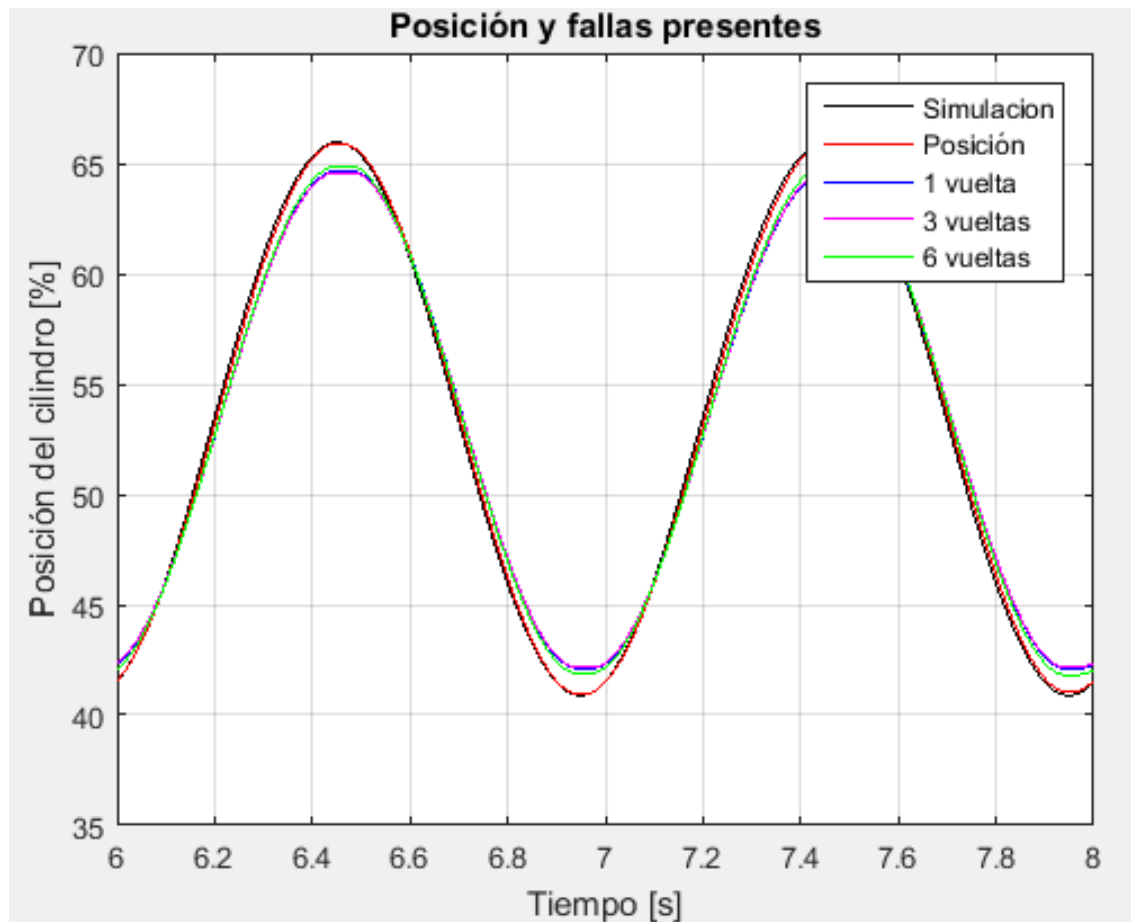
    0.0333

Falla de nivel BAJO, el cilindro pierde hasta 1 L/m,
menos del 10% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para éste caso el nivel de falla no cambia, permanece en nivel bajo para las pruebas bajo influencia de la falla, en la figura se puede apreciar claramente que entre las pruebas no existe mayor diferencia en la posición durante toda la prueba, sin embargo, se estima que la pérdida de caudal a través del sello del pistón es de alrededor de 1 L/m.

6.4.4. Resultados para frecuencia media, onda sinusoidal, 1 Hz. En la gráfica siguiente se muestra la posición del cilindro en trabajo normal y bajo influencia de la falla provocada por el grado de apertura de la válvula indicado en número de vueltas.

Figura 99. Posición y fallas. Onda Sinusoidal 1Hz.



Al ejecutar el código de MatLab, el programa calcula los datos mostrados anteriormente y los compara para dar una clasificación.

Se inicia con la clasificación de la falla cuando la válvula está completamente cerrada, este caso es idéntico al de la validación que al clasificarse debería entregar una falla de nivel normal.

Figura 100. Resultado para CERO vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 1Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasMEDIASeno

Media =

    0.0359

Rms =

    0.0408

Std =

    0.0195

Falla de nivel NORMAL, pueden existir fugas muy
pequeñas en el cilindro hidráulico.
```

Para una vuelta de apertura tenemos la siguiente respuesta.

Figura 101. Resultado para UNA vuelta de apertura. Onda sinusoidal, 1Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasMEDIASeno

Media =

    0.0741

Rms =

    0.0824

Std =

    0.0360

Falla de nivel BAJO, el cilindro pierde hasta 0,77 L/m,
menos del 10% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para tres vueltas de apertura el resultado es el siguiente.

Figura 102. Resultado para DOS vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 1Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasMEDIASeno

Media =

    0.0863

Rms =

    0.0956

Std =

    0.0412

Falla de nivel BAJO, el cilindro pierde hasta 0,77 L/m,
menos del 10% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para seis vueltas de apertura en la válvula tenemos.

Figura 103. Resultado para SEIS vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 1Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasMEDIASeno

Media =

    0.0849

Rms =

    0.0941

Std =

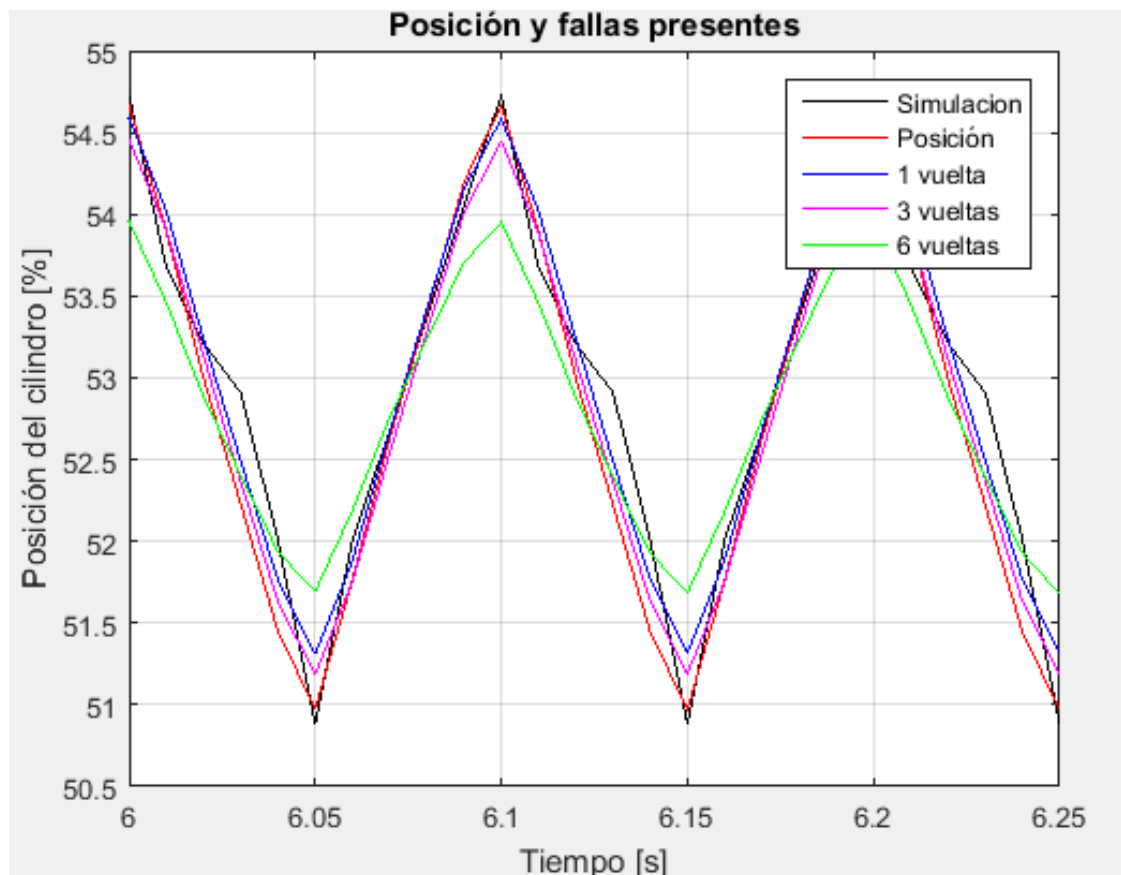
    0.0408

Falla de nivel BAJO, el cilindro pierde hasta 0,77 L/m,
menos del 10% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para éste caso específico el nivel de falla no cambia, permanece en nivel bajo para las tres pruebas bajo influencia de la fuga interna, la influencia de la falla es muy baja y no alcanza a diferenciarse muy claramente, pero si se hace el trabajo de comparar cada una de las características en la tabla correspondiente a este caso, mostrada anteriormente, se verificará que todos los valores se encuentran en su respectivo margen de clasificación.

6.4.5. Resultados para frecuencia alta, onda cuadrada, 10 Hz. En la gráfica siguiente se muestra la posición del cilindro en trabajo normal y bajo influencia de la falla provocada por el grado de apertura de la válvula indicado en número de vueltas.

Figura 104. Posición y fallas. Onda cuadrada 10Hz.



Al ejecutar el código de MatLab, el programa calcula los datos mostrados anteriormente y los compara para dar una clasificación.

Se inicia con la clasificación de la falla cuando la válvula está completamente cerrada, este caso es idéntico al de la validación que al clasificarse debería entregar una falla de nivel normal.

Figura 105. Resultado para CERO vueltas de apertura. Onda cuadrada, 10Hz

```
>> clasificaciondelasfallasALTAcuadrada

Media =

    0.0177

Rms =

    0.0221

Std =

    0.0133

Falla de nivel NORMAL, pueden existir fugas muy
pequeñas en el cilindro hidráulico.
```

Para una vuelta de apertura tenemos la siguiente respuesta.

Figura 106. Resultado para UNA vuelta de apertura. Onda cuadrada, 10Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasALTAcuadrada

Media =

    0.0174

Rms =

    0.0221

Std =

    0.0137

Falla de nivel BAJO, el cilindro pierde hasta 1,1 L/m,
menos del 10% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para tres vueltas de apertura el resultado es el siguiente.

Figura 107. Resultado para DOS vueltas de apertura. Onda cuadrada, 10Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasALTAcuadrada
```

```
Media =
```

```
0.0192
```

```
Rms =
```

```
0.0252
```

```
Std =
```

```
0.0163
```

```
Falla de nivel BAJO, el cilindro pierde hasta 1,1 L/m,  
menos del 10% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para seis vueltas de apertura en la válvula tenemos.

Figura 108. Resultado para SEIS vueltas de apertura. Onda cuadrada, 10Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasALTAcuadrada
```

```
Media =
```

```
0.0231
```

```
Rms =
```

```
0.0308
```

```
Std =
```

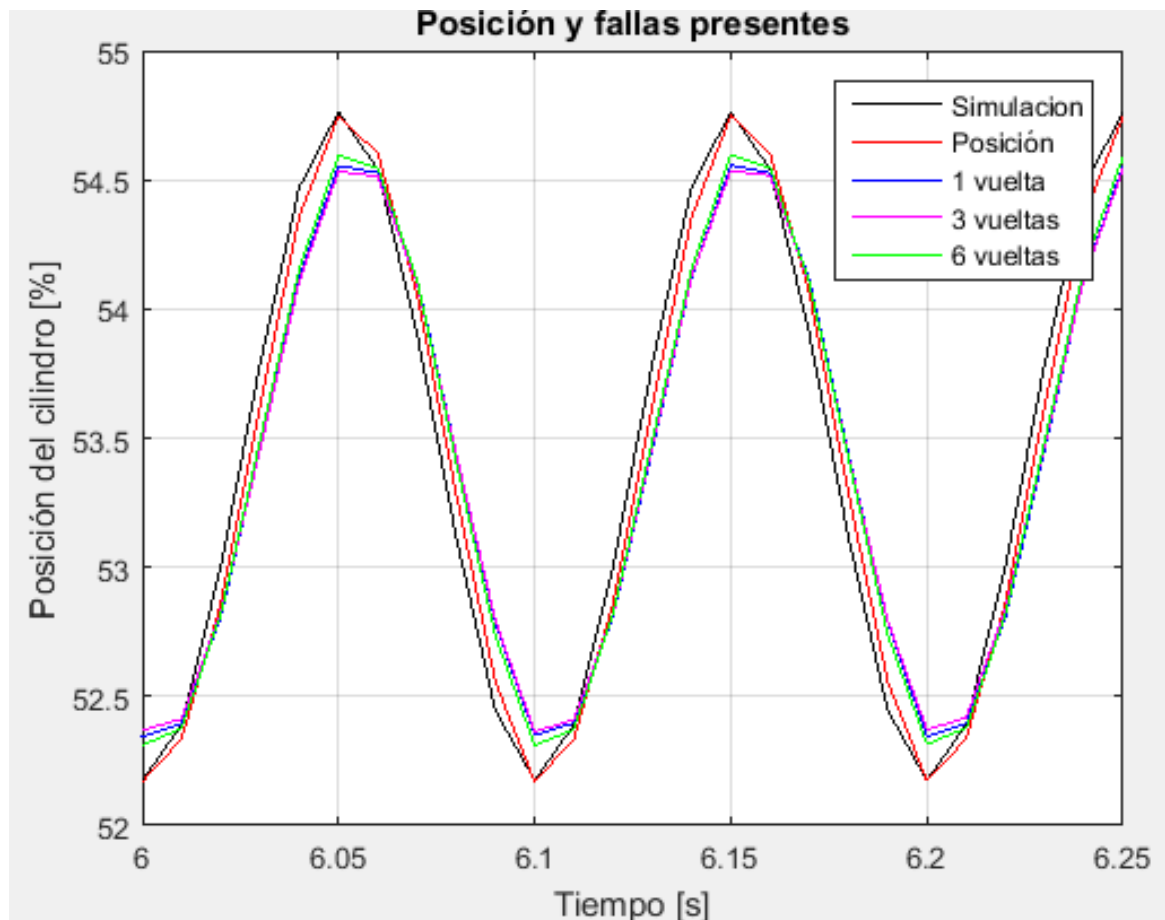
```
0.0203
```

```
Falla de nivel MEDIO, el cilindro pierde hasta 2,1 L/m,  
entre el 10% y el 20% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para éste caso el nivel de falla cambia, permanece en nivel bajo para las dos primeras pruebas bajo influencia de la fuga interna, y se hace mayor en el último caso, cuando la válvula está completamente abierta, en la figura se puede apreciar claramente que entre las primeras pruebas no existe mucha diferencia en comparación con la última.

6.4.6. Resultados para frecuencia alta, onda sinusoidal, 10 Hz. En la gráfica siguiente se muestra la posición del cilindro en trabajo normal y bajo influencia de la falla provocada por el grado de apertura de la válvula indicado en número de vueltas.

Figura 109. Posición y fallas. Onda Sinusoidal 10Hz.



Al ejecutar el código de MatLab, el programa calcula los datos mostrados anteriormente y los compara para dar una clasificación.

Se inicia con la clasificación de la falla cuando la válvula está completamente cerrada, este caso es idéntico al de la validación que al clasificarse debería entregar una falla de nivel normal.

Figura 110. Resultado para CERO vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 10Hz

```
>> clasificaciondelasfallasALTAseno

Media =

    0.0119

Rms =

    0.0137

Std =

    0.0067

Falla de nivel NORMAL, pueden existir fugas muy
pequeñas en el cilindro hidráulico.
```

Para una vuelta de apertura tenemos la siguiente respuesta.

Figura 111. Resultado para UNA vuelta de apertura. Onda sinusoidal, 10Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasALTAseno

Media =

    0.0189

Rms =

    0.0213

Std =

    0.0100

Falla de nivel CRÍTICO, el cilindro pierde hasta 1,9 L/m,
entre el 10% y el 20% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para tres vueltas de apertura el resultado es el siguiente.

Figura 112. Resultado para DOS vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 10Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasALTAseno

Media =

    0.0200

Rms =

    0.0229

Std =

    0.0111

Falla de nivel CRÍTICO, el cilindro pierde hasta 1,9 L/m,
entre el 10% y el 20% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para seis vueltas de apertura en la válvula tenemos.

Figura 113. Resultado para SEIS vueltas de apertura. Onda sinusoidal, 10Hz.

```
>> clasificaciondelasfallasALTAseno

Media =

    0.0201

Rms =

    0.0229

Std =

    0.0111

Falla de nivel CRÍTICO, el cilindro pierde hasta 1,9 L/m,
entre el 10% y el 20% del caudal destinado para el trabajo.
```

Para éste caso específico el nivel de falla no cambia, permanece en nivel crítico para las tres pruebas bajo influencia de la fuga interna, la cercanía entre los datos tomados evita que se alcance a diferenciar el nivel de pérdida, si se hace la comparación de cada una de las características en la tabla correspondiente a este caso, mostrada anteriormente, se verificará que todos los valores se encuentran en su respectivo margen de clasificación.

6.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

De forma general podemos decir que los resultados obtenidos anteriormente son satisfactorios.

- El modelo dinámico del sistema obtuvo muy buenos valores de validación para cada uno de los casos estudiados, lastimosamente no pudo validarse un modelo generalizado que pudiera representar todos los casos de estudio. En cambio, se validó un modelo dinámico independiente por cada opción, es decir, para la frecuencia de 1Hz se tienen dos modelos dinámicos válidos, pero independientes, que corresponden a cada tipo de onda, sinusoidal y cuadrada. En total se validaron seis modelos dinámicos y todos tuvieron resultados muy buenos e independientes al ser comparados con la muestra que le corresponde.
- La clasificación de la falla se realizó por medio de rangos, o umbrales, generados a partir del modelo dinámico anteriormente validado. Estos rangos se generaron a partir de las características principales de los residuos encontrados tras la comparación del modelo de validación y el modelo bajo influencia de la falla, como consecuencia, tenemos valores independientes para las características principales del residuo por cada porcentaje de fuga y, además, consecutivos con las demás fugas, por lo tanto cualquier conjunto de datos, o muestra real, que sea comparada con alguno de estos modelos tendrá que encontrarse clasificada dentro de algún rango previamente delimitado.

De la comparación de las muestras reales con los modelos delimitados por rangos obtuvimos 24 respuestas, por cada frecuencia tenemos ocho respuestas y por cada tipo de onda tuvimos cuatro respuestas, para las frecuencias de 0.1Hz, 1Hz y 10 Hz en onda cuadrada y onda sinusoidal.

Tabla 17. Tabla de resultados.

Frecuencia	Vueltas de apertura	Onda Cuadrada	Caudal perdido [L/min]	Onda Sinusoidal	Caudal perdido [L/min]
0,1Hz	cero	Normal	0	Normal	0
	una	Bajo	0,24	Medio	0,47
	tres	Crítico	0,88	Crítico	0,77
	seis	Crítico	0,88	Crítico	0,77
1Hz	cero	Normal	0	Normal	0
	una	Bajo	1	Bajo	0,77
	tres	Bajo	1	Bajo	0,77
	seis	Bajo	1	Bajo	0,77
10Hz	cero	Normal	0	Normal	0
	una	Bajo	1,1	Crítico	1,9
	tres	Bajo	1,1	Crítico	1,9
	seis	Medio	2,1	Crítico	1,9

En la tabla anterior podemos ver los resultados para cada una de las pruebas realizadas, donde vemos que la pérdida de caudal oscila, generalmente, el valor de un litro por minuto, lo cual, podía esperarse ya que las pruebas se realizan bajo los mismo parámetros de trabajo exceptuando la frecuencia que diferencia las pruebas, además, la pérdida se produce por medio de una válvula con porcentaje de apertura constantes y similares entre sí para los casos de estudio, es decir, una, tres y seis vueltas.

7. CONCLUSIONES

Se diseñó el modelo dinámico del funcionamiento de un servo actuador hidráulico con falla inducida en el sello pistón para el cilindro PARKER no diferencial ($D_p=2.5''$, $D_v=1.75''$ y Carrera=10") y su servo válvula MOOG de alta respuesta dinámica de serie 76-263 (10 GPM a 1000 Psi) montados en el banco de mesa sísmica a cargo del grupo de investigación DicBot de la escuela de ingeniería mecánica.

Se realizó la simulación del modelo dinámico del servo actuador hidráulico con falla inducida en el sello pistón en frecuencias de operación de 0.1Hz, 1Hz y 10Hz para onda cuadrada y sinusoidal por medio del programa Simulink de Matlab.

Se validó experimentalmente el modelo dinámico del servo actuador PARKER comparando las salidas del modelo con datos experimentales tomados del banco mesa sísmica del grupo de investigación DicBot. La validación se realizó para las frecuencias de operación de 0.1Hz, 1Hz y 10Hz para los tipos de onda cuadrada y sinusoidal, con muy buenos resultados de correlación entre las salidas del modelo y del banco de pruebas, superan el 96% de correlación en la mayoría de los casos y el error no es mayor al 1%, indicando que el modelo describe de forma muy acertada el movimiento de la mesa sísmica bajo esas condiciones.

Se detectaron y clasificaron las fallas presentes en las muestras de datos recogidos del accionamiento del servo actuador, las fallas en las muestras fueron inducidas a través de una válvula de aguja que conecta las dos cámaras de cilindro hidráulico simulando de esa forma una fuga en el sello pistón del actuador. La detección y clasificación de las fallas se realizó por medio de la extracción de características estadísticas de los residuos encontrados tras la comparación del modelo de simulación y los datos obtenidos del experimento bajo influencia de la falla obteniendo buenos resultados.

8. RECOMENDACIONES.

Configurar un sistema de control de posición para mejorar la toma y adquisición de datos en el banco de la mesa sísmica.

Implementar el sistema de detección de fallas de forma que trabaje en tiempo real para avanzar en investigaciones sobre los sistemas tolerantes a fallas.

BIBLIOGRAFÍA

ALCORTA GARCÍA, Efraín. DETECTANDO FALLAS MEDIANTE REDUNDANCIA ANALÍTICA. MÉXICO. INGENIERÍAS, Abril - Junio 2001. Vol IV, No 11.

BUENABAD ARIAS, Héctor. SOBRE LA DETECCIÓN DE FALLAS USANDO EL NÚCLEO HÍBRIDO DE TRANSICIÓN DE ESTADOS: APLICACIÓN A UN SISTEMA ELECTRONICO NO LINEAL. 2004. Centro nacional de desarrollo tecnológico. Cuernavaca, México.

CARREÑO MARTINEZ, Manuel. ALVAREZ TORRES, Luz. MEJÍA FAJARDO, Sergio. DUARTE ANAYA, Rubén. SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN EN MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN SISTEMAS COMPLEJOS. 2011. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.

HOSTTETER, G. SAVANT C. STEFANI, R. SISTEMAS DE CONTROL. Editorial Mc Graw-Hill Hispanoamericana de México, S.A. de C. V. México 1990.

ISERMANN, Rolf. FAULT DIAGNOSIS APLICATIONS. Editorial Springer.350 p.

ISERMANN, Rolf. BALLÉ. TRENDS IN THE APPLICATION OF MODEL-BASED FAULT DETECTION AND DIAGNOSIS OF TECHNICAL PROCESSES. 1997. Institute of Automatic Control, laboratory of Control Engineering and Process Automation, Darmstadt University of Technology, Darmstadt, Germany.

ISERMANN, Rolf. PROCESS FAULT DETECTION BASES ON MODELING AND STIMATION METHODS – A SURVEY. Automatica, 20:387.404. 1984

JIANYONG, Yao. GUICHAO, Yang, and DAWEI, Ma. INTERNAL LEAKAGE FAULT DETECTION AND TOLERANT CONTROL OF SINGLE-ROD HYDRAULIC

ACTUATORS. 2014. Research Article. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. 39.

LE, T. T., WATTON, J., and PHAM, D. T., 1997, "AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK BASED APPROACH TO FAULT DIAGNOSIS AND CLASSIFICATION OF FLUID POWER SYSTEMS," Proceedings of The Institute of Mechanical Engineers, Part I, journal of Systems and Control Engineering, 211, pp. 307–317.

MARIÑO, Carlos. CHAVARRO, Johan. MODELADO Y CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE UN SERVOACTUADOR HIDRÁULICO. 2010. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.

NIKSEFAT, David. SEPEHRI, Nariman. DESIGNING ROBUST FORCE CONTROL OF HYDRAULIC ACTUATORS. MANITOBA, CANADA. 2001. 77p. University of Manitoba. Department of Mechanical Engineering.

NISE, Norma S. CONTROL SYSTEMS ENGINEERING. Sixth Edition. Estados Unidos, John Wiley & Sons Inc, 2011, 1001 p.

OGATA, Katsuhiko. INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA. Quinta edición. Madrid, Pearson Educación S. A., 2010, 904 p.

ORTÍZ, Juan. SARMIENTO, José. DISEÑO DE LA PRÁCTICA DE SERVOS DE FUERZA EN EL BANCO REXROTH. 2016. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.

RUBIANO, Freddy. CEDIEL, Julián. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE EXPERIMENTACIÓN PARA UN SERVOSISTEMA HIDRÁULICO DE CONTROL DE POSICIÓN. 2011. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.

SEPEHRI, N. KARPENKO, M. ROBUST POSITION CONTROL OF AN ELECTROHYDRAULIC ACTUATOR WITH A FAULTY ACTUATOR PISTON SEAL. Journal of dynamic systems, measurement and control.125, September 2003. Pg. 415.

SHARMA, R. DEWAN, L. CHATTERJI, S. FAULT DIAGNOSIS METHODS IN DYNAMIC SYSTEMS: A REVIEW. 2015. International Journal of Electronics and Electrical Engineering Vol. 3.