

Control lineal PID de un elevador de plataforma en voladizo accionado por dos motores
hidráulicos para el laboratorio de potencia fluida

Esneyder Mauricio Osma Abril, y Sergio Armando Porras Acosta

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Carlos Borrás Pinilla

Doctor en Ingeniería Mecánica

Codirector

Helio Sneyder Esteban Villegas

Magister en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mis amados padres Carlos Augusto Porras Usma y Sandra Patricia Acosta Cely, este logro es todo para ellos.

Sergio Armando Porras Acosta.

Esta carrera se la debo a mi madre Janed Abril quien estuvo en cada momento, apoyándome cuando más necesitaba.

A mi padre, Luis quien se siente orgulloso de este logro personal.

A mi prima, Dayana quien ya no está conmigo, pero estaría feliz viéndome culminar esta etapa académica.

A mi compañero de tesis, Sergio quien también hizo que todo esto se haga realidad.

Y a todas aquellas personas quienes influyeron en mi estadía por la universidad.

Esneyder Mauricio Osma Abril.

Agradecimientos

Agradecemos sinceramente a nuestro distinguido director, el Ingeniero CARLOS BORRAS PINILLA, por su profundo conocimiento, guía inestimable y colaboración ejemplar que han sido esenciales para la culminación exitosa de esta tesis.

Asimismo, expresamos nuestro más profundo agradecimiento a nuestro respetado codirector, el Ingeniero HELIO SNEYDER ESTEBAN VILLEGAS, cuya orientación experta, paciencia incansable y dedicación constante fueron fundamentales a lo largo de todo el proceso de esta investigación.

No podemos pasar por alto la importancia de la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería Mecánica en nuestra formación académica. Su compromiso con la excelencia académica y la búsqueda del conocimiento nos ha brindado una base sólida para nuestra carrera como Ingenieros Mecánicos.

Por último, deseamos expresar nuestra gratitud al personal administrativo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, en especial a FREDDY, cuyo servicio excepcional y colaboración incansable han facilitado el desarrollo fluido de esta tesis. Su apoyo logístico y administrativo ha sido invaluable en este proceso.

A todas estas personas e instituciones, nuestro más sincero agradecimiento por su contribución y apoyo inquebrantable en la realización de este trabajo de grado.

Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Planteamiento del problema.....	19
2. Objetivos	21
2.1 Objetivo general.....	21
2.2 Objetivos Específicos.....	21
3. Marco teórico	22
3.1 Antecedentes referenciados	22
3.1.1 Antecedentes locales	23
3.1.1.1 Diseño y construcción de un elevador de plataforma en voladizo accionado por dos motores hidráulicos para el laboratorio de potencia fluida. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga (2019).....	23
3.1.1.2 Diseño y construcción de un manifold de control para la plataforma en voladizo del laboratorio de sistemas oleoneumáticos (potencia fluida). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga (2010).....	25
3.1.2 Antecedentes nacionales	26
3.1.2.1 Diseño de un sistema de parqueo vertical tipo carrusel, para la fundación universidad de américa sede campus Los Cerros. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C. (2020).	27
3.1.2.2 Diseño de un sistema elevador de carga para el almacén “abastos la popa” y construcción de un modelo. Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar, Cartagena (2002).	29
3.1.3 Antecedentes internacionales.....	31

3.1.3.1 Control actualizado para ascensor basado en Arduino. Universidad Técnica Federico Santa María, Viña del Mar, Chile (2017).	31
3.1.3.2 Sistemas mecánicos móviles de elevación de carga para descongestionar el área de embarque y desembarque del mercado Mayorista de Ambato. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador (2016).....	33
3.2 Antecedentes conceptuales	34
3.2.1 Sistemas de potencia fluida.....	35
3.2.1.1 Componentes actuales del elevador hidráulico.....	35
3.2.1.1.1 Bomba Vickers.....	36
3.2.1.1.2 Válvula de frenado.....	39
3.2.1.1.3 Válvulas proporcionales.....	40
3.2.1.1.4 Dos motores hidráulicos.	43
3.2.1.1.5 Un actuador mecánico (pistón).....	46
3.2.1.1.6 Una válvula direccional CETOP 5 centro tándem de cuatro vías con tres posiciones. .	47
3.2.1.1.7 Una válvula direccional CETOP 3 centro punto flotante de cuatro vías con tres posiciones.....	49
3.2.1.1.8 Un conjunto de válvulas de seguridad con posibilidad de dos niveles de presión más uno de venteo.	49
3.2.2 Elevadores hidráulicos	50
3.2.3 Control automatizado.....	52
3.2.3.1 Linealización por series de Taylor.....	54
3.2.3.2 Perturbaciones.....	56
3.2.4 Softwares.....	58

3.2.4.1 Simulink.....	59
3.2.4.2 Control lineal PID.....	60
3.2.4.2 Control LQR.	62
3.2.5 Posibilidad.....	64
4. Metodología de trabajo	65
4.1 tipo De investigación	65
4.2 Población.....	66
4.3 Muestra y muestreo.....	66
4.4 Técnicas de recolección de datos	67
5. Desarrollo del control del elevador.....	67
5.1 Primeros bosquejos	68
5.1.1 Modelo matemático	68
5.1.1.1 Dinámica del elevador hidráulico.	68
5.1.1.1.1 Subsistema plataforma.....	69
5.1.1.1.2 Subsistema polipasto.....	71
5.1.1.1.3 Subsistema tambor	72
5.1.1.1.4 Subsistema bombas y motores	76
5.1.2 Modelo SolidWorks.....	77
5.1.2.1 Subsistemas.....	79
5.1.2.1.1 Subsistema de potencia hidráulica.	81
5.1.2.1.2 Subsistema de control.	81
5.1.2.1.3 Subsistema estructural.	83
5.1.2.1.4 Subsistema de válvulas.	84

5.1.2.1.5 Subsistema de bloqueo.....	84
5.2 Ensayos en bancos alternativos.....	85
5.2.1 Ensayo de válvula proporcional didáctica en el banco rexroth.....	87
5.2.2 Simulación de motores en serie y en paralelo.....	89
5.3 Selección de componentes	90
5.3.1 Válvula proporcional Vickers	91
5.3.2 Sensor de desplazamiento	94
5.3.3 Filtros	96
5.3.4 Conectores industriales	98
5.3.5 Controlador PLC arduino.....	98
5.3.6 Mantenimiento	99
5.4 Montaje preliminar.....	100
6. Resultados.....	104
6.1 Pruebas experimentales con el elevador hidraulico	104
6.2 Parámetros encontrados	107
6.3 Controlador lineal PID.....	108
6.4 Controlador LQR	111
7. Conclusiones.....	115
Referencias Bibliográficas	117
Apéndices.....	120

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Elevador hidráulico del laboratorio de Potencia fluida.	15
Figura 2. Válvula proporcional Vickers CETOP 5 KBFDG4V-5-2C50N-Z-M1-PE7-H7-12....	16
Figura 3. Potenciómetro de cuerda de 2000 mm.	18
Figura 4. PLC Arduino ARDBOX.....	19
Figura 5. Manifold instalado con conexiones eléctricas.....	25
Figura 6. Sistema de carrusel vertical.....	28
Figura 7. Modelo de cabina, bastidor y caja.	30
Figura 8. Arduino Mega 2560 r3	32
Figura 9. Esquema hidráulico del elevador del laboratorio de Potencia.....	36
Figura 10. Válvula de frenado reduce la velocidad de la carga al ser paulatinamente cerrada por una leva conectada a la carga.....	40
Figura 11. Válvula Proporcional Vickers CETOP 5.....	41
Figura 12. Diagrama de la válvula proporcional	42
Figura 13. Diagrama de Caudal vs Porcentaje de señal de entrada en la válvula.....	43
Figura 14. Motores hidráulicos.....	43
Figura 15. Actuador hidráulico estándar.....	47
Figura 16. Válvula direccional CETOP 5 centro tándem de cuatro vías con tres posiciones.....	48
Figura 17. Válvula direccional CETOP 3 centro punto flotante de cuatro vías con tres posiciones.	49
Figura 18. Conjunto de válvulas de seguridad.....	50

Figura 19. Esquema de principio de pascal.	51
Figura 20. Diagrama de bloques conceptual de automatización.....	53
Figura 21. Linealización por series de Taylor.	55
Figura 22. Matriz Jacobiana.....	56
Figura 23. Perturbación.....	57
Figura 24. Esquema de un modelo de balancín con hélice.....	60
Figura 25. Ecuación del controlador PID.	61
Figura 26. Sistema de control en lazo cerrado con control PID.	62
Figura 27. Ecuación matricial reducida de Ricatti.....	63
Figura 28. Sistema de control en lazo cerrado con control LQR.....	64
Figura 29. DCL de la plataforma.	69
Figura 30. Diagrama de cuerdas.	71
Figura 31. DCL del tambor.....	72
Figura 32. Subsistema de bombas y motores.....	76
Figura 33. Cotas principales.	77
Figura 34. Carrete del elevador.....	78
Figura 35. Autores tomando medidas.	79
Figura 36. Vistas Isométricas del elevador en SolidWorks.	79
Figura 37 Motores hidráulicos acoplados al tambor.....	81
Figura 38. Plano eléctrico de la tarjeta de conexión del encoder.....	82
Figura 39.. Esquema de la caja de control	83
Figura 40. Soporte estructural.....	84
Figura 41. Sistema de bloqueo.....	85

Figura 42. Montaje preliminar de caja de control.....	86
Figura 43. Simulación en el banco Rexroth.....	87
Figura 44. Válvula proporcional didáctica.....	88
Figura 45. Motor hidráulico didáctico.	90
Figura 46. Válvula proporcional Vickers.....	91
Figura 47. Presión VS caudal.....	92
Figura 48. Curva de apertura de la válvula respecto a la señal eléctrica.	93
Figura 49. Conexión industrial tipo Amphenol.	94
Figura 50. Pull rope displacement sensor.	95
Figura 51. Gráfica del sensor de posición.....	96
Figura 52. Filtro de aceite hidráulico.....	97
Figura 53. Filtro de alta precisión y su tabla característica.....	97
Figura 54. Conectores Industriales.	98
Figura 55. ARDBOX PLC 20 I/O Arduino.	99
Figura 56. Manómetro en falla, manguera en falla y muestra de aceite	100
Figura 57. Montaje preliminar del elevador.	101
Figura 58. Diagrama de flujo de señal experimental.	102
Figura 59. Primeros Ensayos.	103
Figura 60. Resultados experimentales con 10 milisegundos de señal.	104
Figura 61. Resultados experimentales con 15 milisegundos de señal.	105
Figura 62. Resultados experimentales a diferentes voltajes por 10 milisegundos.....	106
Figura 63. Resultados experimentales a diferentes voltajes por 15 milisegundos.....	106
Figura 64. Tabla de parámetros del PID y LQR.	107

Figura 65. Diagrama de flujo de control PID.	108
Figura 66. Comportamiento ideal vs comportamiento real	109
Figura 67. Simulación PID.	110
Figura 68. Resultados PID	111
Figura 69. Cálculo de las constantes LQR.....	112
Figura 70. Diagrama de flujo de control LQR	113
Figura 71. Simulación LQR.....	114
Figura 72. Resultados LQR.....	115

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Catálogo general Vickers.....	120
Apéndice B. Válvula proporcional vickers.....	123
Apéndice C. Catálogo de sensor de posición.....	132
Apéndice D. Catálogo conectores industriales	136
Apéndice E. Motor hidráulico Eaton serie 25m.....	138
Apéndice F. PLC Arduino Ardbox Analógico.	140
Apéndice G. Estimación de parámetros por caja gris.....	150
Apéndice H. Cálculo de las CONSTANTES LQR.....	151
Apéndice I. Modelo dinámico PID y LQR.	152

Resumen

Título: Control lineal PID de un elevador de plataforma en voladizo accionado por dos motores hidráulicos para el laboratorio de potencia fluida*

Autor: Esneyder Mauricio Osma Abril, y Sergio Armando Porras Acosta**

Palabras Clave: PID, LQR, Elevador, Motores, Laboratorio

Descripción

El proyecto se centra en el diseño y desarrollo de un control automatizado para el elevador hidráulico ubicado en el laboratorio de potencia fluida de la Universidad Industrial de Santander, se buscó lograr un sistema funcional y eficiente, capaz de controlar la elevación de una plataforma de manera segura y precisa. A través de este proyecto, se generó nuevo conocimiento en el área de estudio y se sentaron las bases para el desarrollo de un elevador hidráulico con aplicaciones prácticas en diferentes sectores.

Durante el desarrollo del proyecto, se llevaron a cabo diversas fases que fueron fundamentales para alcanzar los objetivos establecidos. En la primera fase, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica y se planificó el enfoque y la metodología a seguir. Esto sentó las bases teóricas necesarias para abordar el proyecto de manera efectiva. Además, se recopilaron y analizaron datos relevantes que proporcionaron información crucial para la toma de decisiones, se realizaron pruebas en un banco del laboratorio de potencia fluida para simular el funcionamiento del sistema hidráulico a menor escala.

Estas pruebas permitieron identificar posibles problemas, evaluar las limitaciones del sistema y mejorar la comprensión de este. Se llevaron a cabo mediciones experimentales y se caracterizaron los sensores utilizados, lo que contribuyó a validar su correcto funcionamiento y a asegurar la precisión de los resultados obtenidos. Estas etapas de simulación y prueba en el banco fueron esenciales para optimizar y ajustar el diseño antes de avanzar a la fase final del proyecto.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Mecánica Director: Carlos Borrás Pinilla Doctor en Ingeniería Mecánica Codirector: Helio Sneyder Esteban Villegas Magister en Ingeniería Mecánica

Abstract

Title: PID Linear Control of a Cantilever Platform Lift Driven by Two Hydraulic Motors for Fluid Power Laboratory *

Author: Esneyder Mauricio Osma Abril, y Sergio Armando Porras Acosta **

Keywords: PID, LQR, Elevator, Motors, Laboratory

Description

The project focuses on the design and development of an automated control system for the hydraulic elevator located in the Fluid Power Laboratory of the Industrial University of Santander. The objective was to obtain a functional and efficient system capable of controlling the elevation of a platform in a safe and precise manner. This project has generated new knowledge in the field of study, laying the foundations for the development of a hydraulic elevator with practical applications in various sectors.

During the project's development, several essential phases were carried out in order to achieve the objectives set. In the first phase, a comprehensive literature review was conducted and the approach and methodology to be followed were planned. This provided the necessary knowledge to effectively address the project. In addition, relevant data was collected and analyzed to provide crucial information for decision-making. Tests were performed on a bench in the Fluid Power Laboratory to simulate the operation of the hydraulic system on a smaller scale. These tests allowed for the identification of potential issues, an evaluation of the system's limitations, and an improved understanding of it. Experimental measurements were made and the sensors used were characterized, helping to validate their correct operation and ensuring the accuracy of the results obtained. These phases of simulation and bench testing were essential to optimize and adapt the design before proceeding to the final phase of the project.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Mecánica Director: Carlos Borrás Pinilla Doctor en Ingeniería Mecánica Codirector: Helio Sneyder Esteban Villegas Magister en Ingeniería Mecánica

Introducción

El laboratorio de potencia fluida cuenta con un elevador hidráulico industrial, el cual ha experimentado diversas modificaciones y mejoras a lo largo de los años. Sin embargo, en la actualidad se encuentra en un estado de leve descuido debido a que la construcción del elevador es un montaje de 2019 y pocas veces se le ha hecho labores de mantenimiento. Durante este proceso de construcción, se ha planteado la automatización del elevador de carga con una capacidad máxima de 1 000 Kg para anular ruido, y optimizar el sistema hidráulico a una velocidad conocida; velocidad de 0.4 m/s en serie y 0.19 m/s en paralelo, a través de un sistema de control lineal podemos gestionar los motores, monitoreando variables como el sentido de giro y velocidad, esto con fin académico para el apoyo a la asignatura de potencia fluida, donde los futuros estudiantes podrán tener una práctica de apoyo a la teoría vista y fortalecer habilidades en el mantenimiento y funcionamiento de los sistemas hidráulicos.

Figura 1.

Elevador hidráulico del laboratorio de Potencia fluida.



Se tomó la decisión de cambiar a una válvula hidráulica por una proporcional Vickers CETOP 5 que permite controlar mejor el flujo y la presión en el sistema, logrando movimientos controlados a velocidades específicas, una vez finalizada la construcción, se espera que el elevador hidráulico sea nuevamente repotenciado y puesto en funcionamiento para continuar con las actividades experimentales y de investigación en el campo de los servosistemas de potencia fluida.

Figura 2.

Válvula proporcional Vickers CETOP 5 KBFDG4V-5-2C50N-Z-M1-PE7-H7-12.



Nota. Tomado de: Sb industrial supply (s.f.) *Válvula proporcional Vickers CETOP 5 KBFDG4V-5-2C50N-Z-M1-PE7-H7-12.* <https://sbindustrialsupply.com/shop/new-eaton-kbfdg4v-5-2c50n-z-m1-pe7-h7-12-proportional-valve-kbfdg4v52c50nzm1pe7h/>

El control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es un algoritmo clásico de control ampliamente utilizado en sistemas industriales y de automatización. Este tipo de control combina tres acciones fundamentales: la proporcional, que responde al error actual entre la salida deseada y la real; la integral, que considera los errores acumulados en el tiempo; y la derivativa, que se basa en la tasa de cambio del error. Estas acciones se combinan de manera óptima para

proporcionar un control preciso y estable del sistema, permitiendo corregir desviaciones y mantener la salida en el valor deseado. El control PID ha demostrado ser eficiente y robusto en una amplia gama de aplicaciones, desde el control de temperatura hasta el posicionamiento de sistemas mecánicos y electrónicos.

El método de control LQR, que significa "Linear Quadratic Regulator" en inglés, es una técnica de control utilizada en ingeniería de control y control automático. Su objetivo principal es diseñar un controlador que optimice el comportamiento de un sistema dinámico lineal en tiempo continuo o discreto. El LQR busca minimizar una función de costo cuadrática que combina el error de seguimiento de referencia y el esfuerzo de control, todo ello sujeto a las restricciones del sistema.

El control de posición en los elevadores hidráulicos es crucial para garantizar un movimiento preciso y seguro. En este tipo de sistemas, se utiliza un controlador de posición para regular la altura del elevador y mantenerla en el nivel deseado. El control de posición se basa en la retroalimentación de la posición real del elevador y la comparación con la posición objetivo. Utilizando un potenciómetro de cuerda y técnicas de control, como el control PID y LQR, se generan señales en el sistema que ajustan la apertura de la válvula proporcional para regular el flujo de aceite y lograr una posición precisa del elevador. Este enfoque de control de posición permite un funcionamiento suave y controlado, brindando seguridad y comodidad a los usuarios del elevador hidráulico.

Figura 3.

Potenciómetro de cuerda de 2000 mm.



El uso de un PLC Arduino en elevadores hidráulicos ofrece numerosas ventajas para el control y monitoreo de estos sistemas. Un PLC (Controlador Lógico Programable) Arduino combina la versatilidad y flexibilidad del hardware Arduino con la potencia de un PLC, lo que lo convierte en una solución eficiente y económica para la automatización de elevadores hidráulicos. Este tipo de PLC permite la programación y configuración personalizada de la lógica de control, así como la integración con otros dispositivos y sensores. Al utilizar un PLC Arduino en elevadores hidráulicos, es posible controlar la apertura de la válvula proporcional, regular el flujo de aceite, monitorear la posición del elevador y aplicar técnicas de control, como el control PID, para lograr un movimiento preciso y seguro. Además, la interfaz de programación gráfica en Simulink y la amplia comunidad de usuarios y recursos disponibles hacen que el PLC Arduino sea una opción bastante viable para la automatización de elevadores hidráulicos en términos de eficiencia, funcionalidad y escalabilidad.

Figura 4.

PLC Arduino ARDBOX.



Nota. Tomado de: Industrial Shields (s.f.) *PLC Arduino ARDBOX.*
[https://www.industrialshields.com/es_ES/technical-features-industrial-plc-arduino-spartan-16da-
ios](https://www.industrialshields.com/es_ES/technical-features-industrial-plc-arduino-spartan-16da-
ios)

1. Planteamiento del problema

El elevador hidráulico presenta un desafío no lineal tanto desde el punto de vista hidráulico como mecánico, lo cual requiere la incorporación de elementos de precisión. En la industria, todas las máquinas comparten una característica común: su funcionamiento se basa en los grados de libertad, que hacen referencia a los movimientos que pueden realizar, como avanzar/retroceder, subir/bajar, moverse hacia la izquierda/derecha y rotar. Algunas máquinas pueden tener hasta seis grados de libertad. Sin embargo, en el caso del elevador, se requiere un único grado de libertad, que es la traslación en un eje vertical de arriba/abajo. Idealmente, se espera que el movimiento del

elevador se limite únicamente a la traslación vertical, despreciando las cargas axiales que no se encuentren en el eje de desplazamiento. Estas cargas, de alguna forma, afectan el sistema, generando vibraciones en el elevador y ocasionando pérdidas de energía, así como un deterioro en la vida útil de la máquina.

Se propone la automatización del elevador de carga, el cual tiene una capacidad máxima de 1,000 kg, con el objetivo de eliminar el ruido y optimizar el sistema hidráulico a velocidades específicas. Se pretende alcanzar una velocidad de 0.4 m/s en serie y de 0.19 m/s en paralelo. A través de la implementación de un sistema de control lineal, se busca gestionar los motores y supervisar variables clave como el sentido de giro y la velocidad.

La automatización del elevador permitirá mejorar su rendimiento y eficiencia, al mismo tiempo que brindará una experiencia de aprendizaje práctica para los estudiantes. Al controlar de manera precisa los motores y supervisar variables clave, se garantizará un funcionamiento suave y seguro del elevador de carga. Además, la automatización también puede contribuir a la reducción de errores humanos y a la optimización del consumo de energía. De esta manera, los futuros estudiantes podrán realizar prácticas que complementen la teoría aprendida en clase y fortalezcan sus habilidades en el mantenimiento y funcionamiento de sistemas hidráulicos.

Por lo tanto, la pregunta de investigación planteada es: "¿Cómo implementar un control lineal a un elevador de plataforma en voladizo, impulsado por dos motores hidráulicos para el laboratorio de potencia fluida?"

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Controlar un elevador de plataforma en voladizo accionado por dos motores hidráulicos conectados en serie y en paralelo, implementando estrategias lineales para el laboratorio de potencia fluida.

2.2 Objetivos Específicos

Adecuar el elevador existente ubicado en el laboratorio de potencia fluida para ser utilizado como banco de control de posición.

Modelar matemáticamente el elevador usando ecuaciones de potencia fluida y dinámica.

Implementar dos estrategias de control lineal para el modelado del sistema de elevación de plataforma.

Elaborar un instructivo que permita el manejo y uso del banco de elevación de carga como herramienta educativa.

3. Marco teórico

3.1 Antecedentes referenciados

A continuación, se presentan temas de investigación relevantes relacionados con elevadores hidráulicos, *Hydraulic Manifold* y sistemas de control para diferentes desplazamientos. Estos temas están respaldados por referencias a nivel local, nacional e internacional, lo cual proporciona un sólido respaldo teórico y justifica la importancia de las variables críticas que sirven como aportes estructurales al proyecto de investigación realizado. Basándonos en los antecedentes investigados, se puede generar un valor agregado significativo para la continuidad y optimización del tema de sustentación. Estos temas de investigación no solo brindan una base sólida para el proyecto actual, sino que también contribuyen al avance y la mejora continua en el campo de los elevadores hidráulicos y los sistemas de control, tanto a nivel local como a escala internacional.

Los temas de investigación seleccionados no solo tienen un impacto directo en el proyecto en curso, sino que también ofrecen la posibilidad de contribuir al avance general y a la mejora continua en el ámbito de los elevadores hidráulicos y los sistemas de control. Al examinar las referencias a nivel local, nacional e internacional, se puede apreciar cómo estos temas han sido abordados y desarrollados en diversos contextos y entornos. Esto proporciona una perspectiva amplia y enriquecedora que trasciende las fronteras geográficas y permite identificar mejores prácticas, enfoques innovadores y soluciones exitosas implementadas en diferentes partes del mundo.

3.1.1 Antecedentes locales

El uso de elevadores hidráulicos en Bucaramanga es ampliamente común y se extiende por todo el campo de acción del ingeniero mecánico. Estos sistemas son de vital importancia en diferentes sectores, como la industria, la construcción y el transporte, donde se requiere el desplazamiento vertical eficiente de cargas pesadas. En el contexto específico del laboratorio de potencia fluida, los elevadores hidráulicos se convierten en una herramienta imprescindible para la formación profesional de la comunidad universitaria perteneciente al programa de ingeniería mecánica. Estos laboratorios proporcionan un entorno controlado y seguro para que los estudiantes adquieran habilidades prácticas en el diseño, control y mantenimiento de sistemas hidráulicos, incluyendo el funcionamiento y la optimización de los elevadores hidráulicos. A través de la experimentación práctica y la realización de proyectos relacionados, los estudiantes obtienen una comprensión profunda de los principios y la tecnología asociada con los elevadores hidráulicos, lo que les permite desarrollar las habilidades necesarias para enfrentar los desafíos del mundo real en su futuro profesional como ingenieros mecánicos.

3.1.1.1 Diseño y construcción de un elevador de plataforma en voladizo accionado por dos motores hidráulicos para el laboratorio de potencia fluida. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga (2019). Anteriormente, cuando la construcción estaba en sus primeras etapas y aún no se había tomado en cuenta la oportunidad de automatizar el elevador hidráulico, algunos estudiantes de la Universidad Industrial de Santander concibieron la posibilidad de realizar un proyecto ambicioso. Este proyecto requería un esfuerzo considerable y una inversión significativa, pero también representaba una oportunidad única para fomentar el desarrollo de

competencias clave en los estudiantes ofreciendo a sus compañeros una experiencia de aprendizaje enriquecedora.

Se plantearon varias alternativas de diseño para cada uno de los subsistemas del elevador, las cuales se evaluaron tomando en consideración varios aspectos relacionados a ciertos criterios de selección, valorados según su relevancia en el diseño del banco de laboratorio, estos criterios fueron, resistencia, costo, peso, mantenibilidad, área ocupada y estética, mencionados en orden decreciente para cada uno de los subsistemas según su trascendencia en el proyecto. (Osbert et. al., 2019)

Se realizó un trabajo por subsistemas, priorizando los elementos de selección más relevantes en términos de funcionalidad, dejando en un segundo plano los aspectos estéticos. Dado que se trata de un proyecto académico, el enfoque principal se centró en garantizar la operatividad eficiente del elevador hidráulico. Sin embargo, esto no implica que se descuidara por completo su aspecto visual. Si bien su apariencia puede ser más robusta, esto se debe a que su diseño está orientado a proporcionar un soporte óptimo para los estudiantes que cursan materias relacionadas con el laboratorio de potencia fluida.

Considerando que el banco de laboratorio será usado con fines académicos, la capacidad de carga propuesta para el mismo (1000 Kg) es baja con respecto a un elevador o montacargas industrial, además de usarse intermitentemente, por lo cual no es completamente necesario un perfil altamente robusto. (Osbert, et. al. 2019)

Es importante reconocer que, al tratarse de un proyecto finalizado, la estructura y configuración del elevador hidráulico ya están establecidas y pueden presentar ciertas limitaciones en términos de su adaptación a un sistema de control automatizado. Esto puede deberse a factores como la compatibilidad de los componentes existentes con los sistemas de control, la

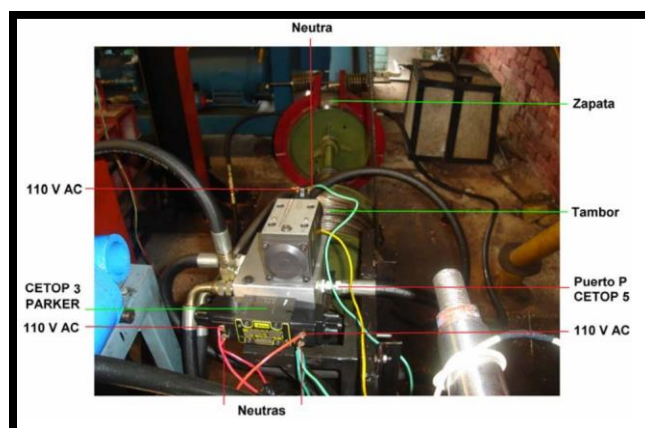
disponibilidad de interfaces adecuadas o las restricciones de espacio físico para la instalación de nuevos dispositivos.

Considerando los parámetros de diseño y los elementos utilizados, así como los catálogos correspondientes, se logra comprender la construcción del elevador. Esto proporciona una visión clara de las limitaciones asociadas con la implementación de un control automatizado en este proyecto ya finalizado.

3.1.1.2 Diseño y construcción de un manifold de control para la plataforma en voladizo del laboratorio de sistemas oleoneumáticos (potencia fluida). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga (2010). En este proyecto se llevó a cabo el desarrollo de un *Hydraulic Manifold*, el cual cumple la función de servir como una terminal para cartuchos y válvulas direccionales, regulando el flujo de aceite hidráulico entre las bombas y los actuadores.

Figura 5.

Manifold instalado con conexiones eléctricas.



Nota. Tomado de: Universidad Industrial de Santander (2010)

Para el montaje del manifold, hacemos un estudio de la aplicación, pasando por las etapas de diseño preliminar, simulación, diseño detallado, construcción y pruebas. Cada una de estas etapas debe ser retroalimentada con las demás para alcanzar los objetivos planteados mediante posibles correcciones que deban hacerse. (Moreno y Díaz, 2010)

En este punto, se presentan algunas de las válvulas utilizadas en el elevador hidráulico del laboratorio. Sin embargo, es importante tener en cuenta que algunos de estos elementos ya han estado en uso durante un período considerable. Por lo tanto, será relevante buscar proveedores locales, nacionales e internacionales para obtener los elementos necesarios del sistema y evaluar las condiciones de las válvulas, asegurando así su adecuado funcionamiento.

3.1.2 Antecedentes nacionales

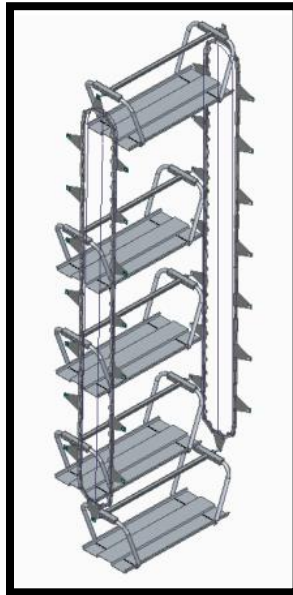
A nivel nacional, diversas empresas, incluyendo centros de distribución de alimentos e insumos, buscan la colaboración de ingenieros independientes para la construcción "artesanal" de máquinas necesarias para optimizar el transporte y carga de alimentos en grandes cantidades. Estas empresas recurren a este enfoque debido a su capacidad de personalización, autonomía y economía. Optan por este método debido a que algunas empresas dedicadas a la fabricación y distribución de elevadores hidráulicos ofrecen catálogos con precios elevados en función de la funcionalidad, operación y estética de los equipos.

3.1.2.1 Diseño de un sistema de parqueo vertical tipo carrusel, para la fundación universidad de américa sede campus Los Cerros. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C. (2020). En Bogotá, se emprendió un proyecto para la implementación de un innovador sistema de parqueadero tipo carrusel vertical controlado. El objetivo principal de este proyecto fue facilitar el acceso y almacenamiento de vehículos particulares en la sede campus Los Cerros de la Fundación Universidad de América. La comunidad universitaria expresaba su preocupación por la creciente congestión vehicular en el área, lo que dificultaba la movilidad y generaba frustración entre estudiantes, profesores y personal administrativo.

El diseño estructural cumple con la normativa establecida por el Reglamento Colombiano Sismo Resistente NSR10; ya que el título F de esta norma, es la guía principal para el diseño y fabricación de estructuras metálicas en Colombia. Por otra parte, el diseño de detalle del sistema motriz se realizó en base a la patente estadounidense PCTKR2006 004841, donde se explica a detalle el funcionamiento del subsistema de transmisión de potencia, explicando las ventajas que este tiene frente a los demás diseños existentes. (Estupiñán y Puentes, 2020)

Figura 6.

Sistema de carrusel vertical.



Nota. Tomado de: Fundación Universidad de América (2020).

Se tomó en cuenta la relevancia de utilizar normas certificadas para garantizar la seguridad en el uso particular del elevador. En este caso, el alcance del proyecto no se limitaba solo a operaciones internas, sino que estaba destinado a ser utilizado por personas en su uso cotidiano. Por lo tanto, resultaba crucial que el elevador que sería controlado cumpliera con ciertas normas establecidas en términos de funcionamiento y seguridad operativa. Estas normas asegurarían que el elevador cumpliera con los estándares necesarios para garantizar la protección y el bienestar de los usuarios, y proporcionarían un entorno confiable y seguro en todas las operaciones.

La puesta en marcha de este proyecto representó un importante avance en la búsqueda de soluciones innovadoras para mejorar la movilidad urbana y el uso eficiente del espacio en entornos universitarios. El sistema de parqueadero tipo carrusel vertical controlado brindó una solución adaptada a las necesidades específicas de la comunidad universitaria en la sede campus Los Cerros,

contribuyendo a reducir la congestión vehicular, optimizar el uso del espacio disponible y mejorar la experiencia de todos los usuarios involucrados.

3.1.2.2 Diseño de un sistema elevador de carga para el almacén “abastos la popa” y construcción de un modelo. Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar, Cartagena (2002). "ABASTOS LA POPA" es una compañía especializada en la comercialización de productos alimenticios y de abarrotes. Consciente de la importancia de brindar un servicio eficiente a sus clientes particulares, la empresa ha buscado constantemente alternativas innovadoras que faciliten el transporte de alimentos, insumos y, en ocasiones, incluso del personal o trabajadores.

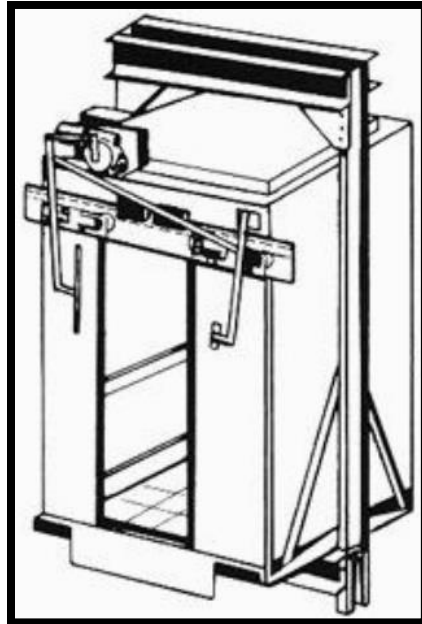
Para lograrlo, la empresa ha explorado soluciones innovadoras que les permitan agilizar el transporte de víveres e insumos diversos. Esto implica la adopción de estrategias y tecnologías que mejoren la eficiencia de sus operaciones, como la implementación de sistemas de logística optimizados, la utilización de vehículos especializados en la entrega de productos perecederos y la adopción de herramientas que agilicen la carga y descarga de mercancías.

En Colombia, las empresas dedicadas a la construcción y mantenimiento de ascensores y elevadores de carga, tales como ascensores OTIS, HIDSAN LTDA, ascensores SCHINDLER de Colombia S.A., ascensores y equipos MITSUBISHI etc. prestan sus servicios a precios que resultan prohibitivos para muchas empresas, por esta razón algunas de ellas se ven en la obligación de construir elevadores de carga sencillos e inseguros, sin las necesarias requisitos de seguridad reglamentados por el instituto Colombiano de normas técnicas ICONTEC y con poco o ninguna clase de mantenimiento, constituyendo un verdadero riesgo para los operarios y trabajadores, sin contar la irresponsabilidad por parte

de los constructores y propietarios de los aparatos quienes se arriesgan a ser demandados por exponer la salud de sus trabajadores. (Contreras y Pineda, 2002)

Figura 7.

Modelo de cabina, bastidor y caja.



Nota. Tomado de: Universitaria Tecnológica de Bolívar (2002).

Garantizar un entorno seguro y saludable es un requisito fundamental para el correcto funcionamiento del sistema de control automático. Esto implica tomar medidas preventivas y establecer protocolos adecuados para minimizar los riesgos y proteger la integridad de todas las personas involucradas en el proceso. La seguridad y protección de los estudiantes, el personal del laboratorio y la comunidad en general son aspectos de suma importancia en la operación del sistema de control automático. En este sentido, se reconoce la necesidad de cumplir con los estándares y normativas establecidos por ICONTEC (ISO 45001:2018) con relación a la seguridad y salud ocupacional.

3.1.3 Antecedentes internacionales

A nivel internacional, el uso de máquinas hidráulicas para carga y transporte ha alcanzado un nivel avanzado y sofisticado. En muchas ocasiones, esto se debe a la disponibilidad de capital y a la capacidad de inversión de grandes empresas o países desarrollados. Estas empresas reconocen la importancia de contar con equipos de alta calidad y confiabilidad que les permitan maximizar el tiempo de producción y reducir las interrupciones en sus operaciones. Además de su funcionalidad, estas máquinas hidráulicas internacionales también se destacan por su estética y diseño atractivos. Se busca que los equipos no solo sean eficientes desde el punto de vista técnico, sino que también sean visualmente agradables y se integren armoniosamente en el entorno de trabajo.

3.1.3.1 Control actualizado para ascensor basado en Arduino. Universidad Técnica Federico Santa María, Viña del Mar, Chile (2017). En el caso del elevador hidráulico en cuestión, se sabe que cuenta con una configuración de bombas en serie y en paralelo. Para lograr un control efectivo de la plataforma del sistema, se requerirá la implementación de un microprocesador que pueda gestionar las funciones y comandos necesarios. Este microprocesador actuará como el cerebro del sistema, coordinando las acciones de las válvulas proporcionales y otros subsistemas que se incorporarán para garantizar el funcionamiento normal y seguro del elevador hidráulico de acuerdo con las necesidades del usuario.

Figura 8.*Arduino Mega 2560 r3*

Nota. Tomado de: Universidad Técnica Federico Santa María (2017).

El componente central del proyecto es el microcontrolador, que para este caso corresponde a una placa Arduino, la cual posee un chip de la serie ATmega de Atmel. Para la primera parte del proyecto se utilizó una placa Arduino Uno r3, ya que esta era la que se tenía a mano para comenzar con el trabajo y, con el número de variables que se controlaban en un principio, la cantidad de entradas y salidas era suficiente. A medida que se avanza con el programa se hace necesario ampliar la cantidad de pines de conexión, debido del aumento de variables a medir, motivo por el cual se opta por adquirir un Arduino Mega 2560, mostrado en la figura 2-5, el cual comparte varias de las especificaciones técnicas con la placa utilizada anteriormente, pero que se diferencia principalmente por la cantidad de entradas y salidas que posee. (Baigorria y Levicán, 2017)

Aquí se menciona que una opción recomendada para el control de un sistema de elevador es utilizar una placa Arduino con un chip ATmega 2560 o superior. Esta elección se basa en varios factores que favorecen la eficiencia y compatibilidad del sistema.

En primer lugar, el uso de una placa Arduino con un chip ATmega 2560 o superior proporciona una excelente compatibilidad con software como Simulink, que ofrece una amplia

gama de librerías y herramientas para el diseño y control de sistemas. La compatibilidad entre Arduino y Simulink permite una integración más fluida y sencilla entre el hardware y el software, facilitando el desarrollo y la implementación de algoritmos de control para el sistema de elevador. Además, los microprocesadores ATmega ofrecen una operatividad eficiente frente a perturbaciones y cambios en las condiciones del sistema. Estos chips están diseñados para manejar tareas complejas de control en tiempo real, lo que los hace ideales para aplicaciones como el control de elevadores. Su capacidad de procesamiento y respuesta rápida permiten una actuación precisa y confiable ante diferentes situaciones y requerimientos del elevador.

3.1.3.2 Sistemas mecánicos móviles de elevación de carga para descongestionar el área de embarque y desembarque del mercado Mayorista de Ambato. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador (2016). El presupuesto es indudablemente un factor clave a considerar en cualquier proyecto de diseño, construcción o remodelación, incluyendo el control de un sistema de elevador. Es importante tener en cuenta que la elección de los componentes y materiales óptimos puede implicar un costo más elevado, lo cual puede afectar el presupuesto total del proyecto. Es importante tener en cuenta que el presupuesto disponible influirá en la toma de decisiones a lo largo del proyecto. Es posible que se deban realizar compromisos y ajustes para garantizar que el proyecto se ajuste a las limitaciones financieras establecidas. Esto puede implicar la selección de componentes que cumplan con los requisitos básicos del sistema de control del elevador, pero que no sean necesariamente los de más alta gama.

El costo es un parámetro que juega un papel muy importante a la hora de seleccionar un equipo de elevación de carga, ya que es primordial conocerlo porque no solo será el costo inicial de fabricación de la máquina el que debemos considerar, a más de éste también

debemos considerar el costo de funcionamiento y el de mantenimiento, ya que no sería nada apropiado diseñar una máquina que tenga un alto costo y su eficiencia pudiese ser igualada por otra máquina de menor costo. (Robayo, 2016)

Como parte de un plan piloto, se llevará a cabo un trabajo en uno de los bancos Rexroth existentes en el laboratorio de PLC. El objetivo de este plan piloto es emular el sistema deseado utilizando componentes más sencillos y económicos. Esta estrategia permitirá evaluar la viabilidad y eficacia del proyecto antes de implementarlo con los componentes exactos.

Al realizar pruebas y experimentos en el banco Rexroth con componentes más sencillos y económicos, se podrán identificar posibles desafíos técnicos y evaluar la factibilidad del proyecto en términos de funcionalidad, rendimiento y seguridad. Además, esta etapa piloto permitirá obtener datos y resultados que respalden la toma de decisiones informadas en cuanto a la implementación final del sistema de control del elevador.

3.2 Antecedentes conceptuales

Aquí se expone todo el soporte teórico de los conceptos más importantes que explican matemática, física y esquemáticamente la formulación del problema y también a los objetivos específicos. se presenta un sólido soporte teórico que respalda los conceptos más importantes relacionados con el problema planteado. Esto incluye principios matemáticos, físicos y esquemáticos, así como leyes físicas, equipos y software utilizados en el proyecto. Esta base teórica proporciona las herramientas necesarias para comprender y abordar eficientemente el diseño y control del elevador hidráulico, cumpliendo con los objetivos específicos establecidos.

A continuación, se presentan los conceptos teóricos, leyes físicas, equipos y softwares por los que se rige el proyecto.

3.2.1 Sistemas de potencia fluida

La potencia de fluida es una disciplina que se basa en la utilización de aceites hidráulicos o aire comprimido (neumática) a alta presión para generar, controlar y transmitir energía. Este enfoque se aprovecha de los diferenciales de presión generados por una bomba hidráulica, lo que permite realizar una amplia gama de tareas en diferentes industrias.

El uso de la potencia de fluidos se extiende a numerosos sectores industriales en todo el mundo. En la industria manufacturera, por ejemplo, se emplea en la operación de maquinaria y equipos, como prensas, robots industriales, máquinas de moldeo por inyección y equipos de manipulación de materiales. También se utiliza en la industria de la construcción para accionar grúas, excavadoras y equipos de elevación.

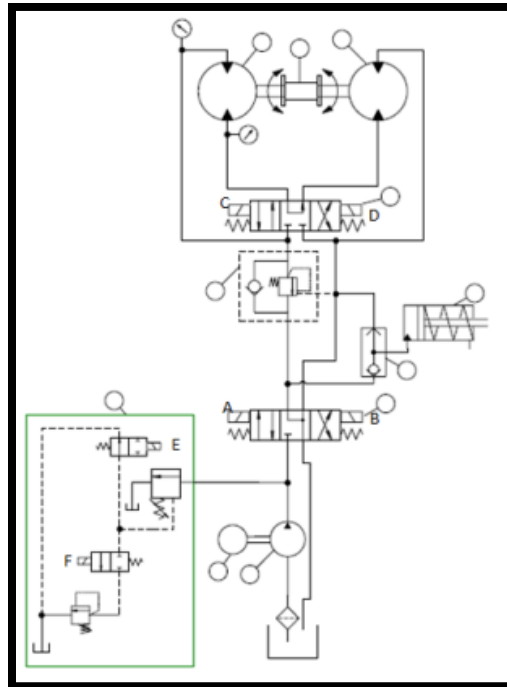
La ventaja de utilizar la potencia de fluidos radica en su capacidad para transmitir grandes cantidades de energía de manera eficiente y controlada. Además, los sistemas hidráulicos y neumáticos son compactos, pueden operar en entornos hostiles y ofrecen un alto grado de flexibilidad en términos de diseño y configuración.

3.2.1.1 Componentes actuales del elevador hidráulico. En un sistema hidráulico básico, se encuentran los elementos fundamentales: una bomba, válvulas y un cilindro hidráulico. La energía hidráulica se origina a partir de la energía mecánica generada por la bomba. La regulación

del flujo de aceite hidráulico se realiza mediante una válvula. Por último, esta energía hidráulica se transforma en potencia mecánica gracias al cilindro hidráulico.

Figura 9.

Esquema hidráulico del elevador del laboratorio de Potencia.



Nota. Tomado de: Universidad Industrial de Santander (2019).

3.2.1.1.1 Bomba Vickers. La bomba hidráulica es un componente encargado de convertir la energía mecánica proveniente del motor en energía hidráulica, en forma de caudal de fluido. Esta transformación permite que el fluido hidráulico sea impulsado a través del sistema, generando presión y permitiendo el funcionamiento de otros componentes, como válvulas, cilindros y motores hidráulicos. De esta manera, la bomba hidráulica desempeña un papel crucial en la transmisión y control de la potencia en los sistemas hidráulicos.

Cuando una bomba está en funcionamiento, desempeña dos funciones principales. En primer lugar, a través de su acción mecánica, crea un vacío en la succión, lo que permite que la presión atmosférica empuje el líquido desde el tanque o reservorio hacia la entrada de la bomba. En segundo lugar, la bomba expulsa el líquido a través de su salida y lo impulsa hacia el circuito hidráulico. Es importante destacar que una bomba no genera presión directamente, sino que produce el movimiento del líquido, es decir, el caudal necesario para desarrollar la presión en el sistema. La presión resulta de la resistencia al flujo encontrada en el sistema hidráulico. Por lo tanto, la bomba proporciona el caudal necesario para superar dicha resistencia y generar la presión requerida en el sistema.

Todas las bombas pueden clasificarse en dos categorías principales: de desplazamiento positivo y de desplazamiento negativo (rotodinámicas). Las bombas de desplazamiento positivo generan un flujo constante y volumen fijo de líquido en cada ciclo. Estas bombas son capaces de sellar de manera positiva el fluido y ofrecen una relación constante entre el caudal y la velocidad de la bomba. Por otro lado, las bombas de desplazamiento negativo, como las bombas centrífugas y de hélice, no tienen un mecanismo interno de sellado positivo que impida el deslizamiento del fluido. Esto hace que su caudal de salida varíe significativamente con los cambios de presión en el sistema.

La potencia que se está usando en una bomba hidráulica depende del caudal de la bomba y de la presión que se ejerce en el sistema.

Ecuación 1.

Potencia de la bomba

$$P_{otB} = \frac{Q_B * \Delta P_B}{K};$$

Donde K igual a 1714 en sistema ingles

P_{otB} : Potencia de la bomba

Q_B : Caudal de la bomba

ΔP_B : Presión en la bomba

Así mismo cada bomba cuenta con una eficiencia mecánica, volumétrica y global.

Ecuación 2.

Eficiencia mecánica de la bomba

$$\eta_{mb} = \frac{Q_{RB} - Q_B}{C_b * N_B};$$

η_{mb} : Eficiencia mecánica de la bomba

Q_{RB} : Caudal real de la bomba

Q_B : Caudal que entrega la bomba

C_b : Capacidad volumétrica de la bomba

N_B : Revoluciones por minuto de la bomba

Ecuación 3.

Eficiencia volumétrica de la bomba

$$\eta_{vb} = \frac{C_b * \Delta P_B}{T_{RB} - T_B};$$

T_{RB} : Torque real de la bomba

T_B : Torque que entrega la bomba

η_{vb} : Eficiencia volumétrica de la bomba

Ecuación 4.

Eficiencia total de la bomba

$$\eta_b = \eta_{mb} * \eta_{vb}$$

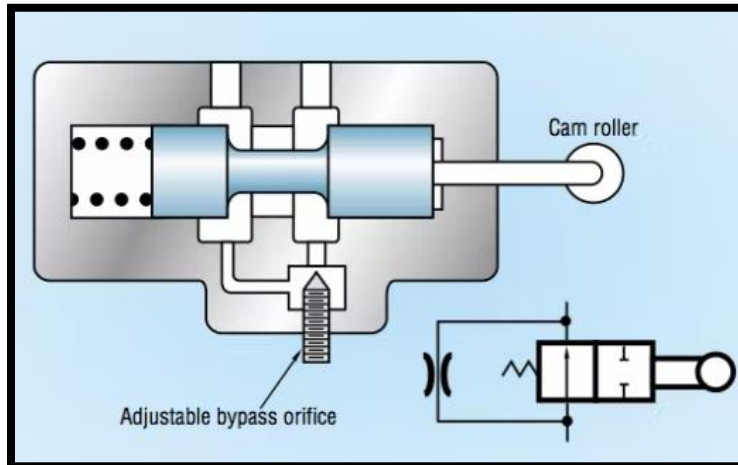
3.2.1.1.2 Válvula de frenado. Las válvulas de control de flujo desempeñan un papel fundamental en los sistemas hidráulicos al regular la velocidad del actuador. Estos dispositivos permiten controlar el caudal de fluido que fluye hacia el actuador, lo cual a su vez determina la velocidad de movimiento. La velocidad es un factor crucial, ya que está directamente relacionada con la transferencia de energía en el sistema hidráulico.

Tanto la fuerza ejercida por el actuador como la distancia a la que se desplaza (carrera) son factores que contribuyen al trabajo realizado sobre la carga. La energía transferida en el sistema debe ser igual al trabajo realizado sobre la carga, y la velocidad del actuador es un factor determinante en la tasa de transferencia de energía (o potencia). En este sentido, la velocidad del actuador es directamente proporcional al caudal de fluido controlado por las válvulas de control de flujo.

Una válvula de frenado es una modificación de una válvula de dos vías que se posiciona fuera de centro mediante un resorte. Su función principal es regular el frenado gradual de un cilindro hidráulico. Conectada a una leva, la válvula se cierra gradualmente, actuando como un orificio variable que aumenta la contrapresión en el cilindro. Algunas válvulas de frenado también son compensadas en presión, lo que les permite adaptarse automáticamente a las variaciones de presión en el sistema hidráulico. Esto asegura un frenado preciso y consistente, incluso en condiciones cambiantes de carga y presión.

Figura 10.

Válvula de frenado reduce la velocidad de la carga al ser paulatinamente cerrada por una leva conectada a la carga.



Nota. Tomado de: Power & Motion (2017).

3.2.1.1.3 Válvulas proporcionales. Una válvula proporcional, también conocida como válvula de control proporcional, es un dispositivo utilizado en sistemas de control y automatización para regular con precisión el flujo de fluidos en una máquina o sistema. A diferencia de las válvulas convencionales, las válvulas proporcionales no funcionan simplemente en los estados de "abierto" o "cerrado". En su lugar, pueden variar su apertura o posición para ajustar la cantidad de flujo que permiten pasar en función de una señal de control específica.

Figura 11.

Válvula Proporcional Vickers CETOP 5.

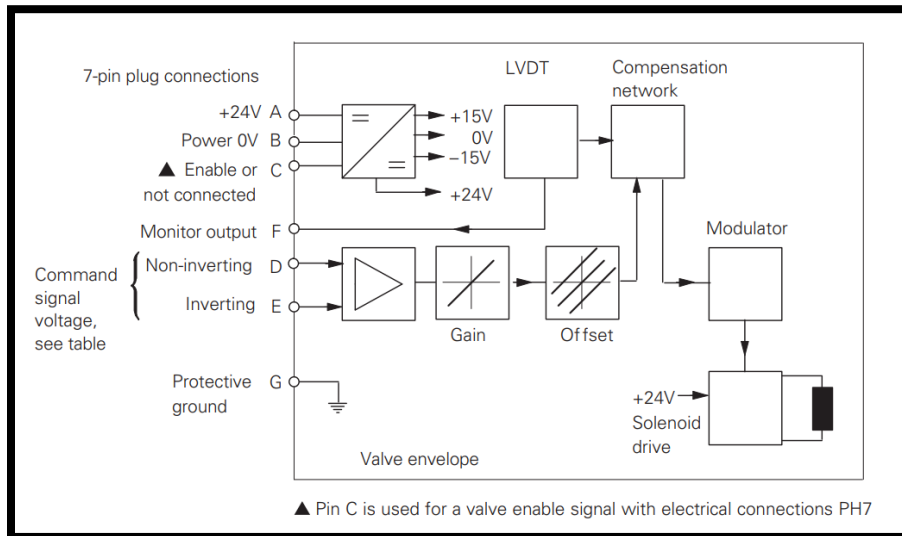


Nota. Tomado de: Industrial Supply.

En la Figura 12, se proporciona el esquema del sistema de control digital en lazo cerrado para la válvula proporcional. Este sistema consta de un transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT), una red de compensación, un modulador, un solenoide, las entradas de la señal eléctrica, una ganancia, un Offset, entre otros componentes.

Figura 12.

Diagrama de la válvula proporcional

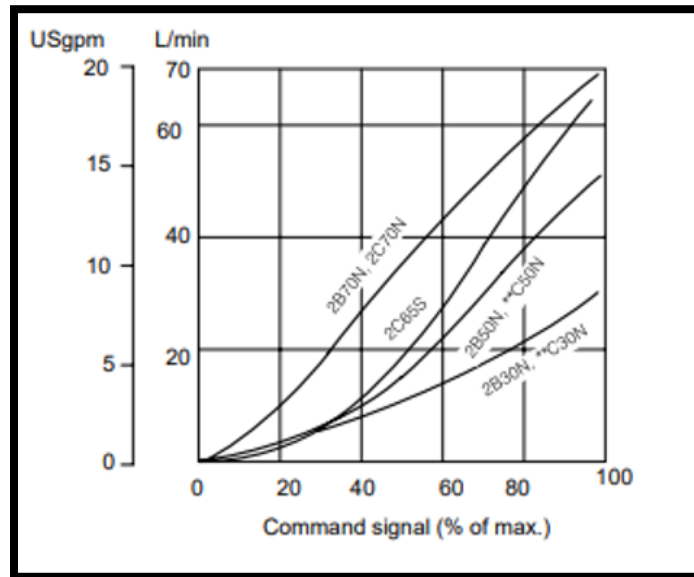


Nota. Tomado de: Eaton Proportional Valves.

A continuación, en la Figura 13 se demuestra el funcionamiento de la válvula en relación con el porcentaje de señal eléctrica transmitida, es decir, la relación entre el caudal suministrado y la señal de voltaje aplicada a la válvula.

Figura 13.

Diagrama de Caudal vs Porcentaje de señal de entrada en la válvula.

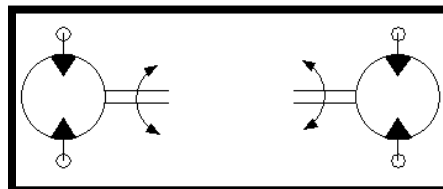


Nota. Tomado de: Eaton Proportional Valves.

3.2.1.1.4 Dos motores hidráulicos.

Figura 14.

Motores hidráulicos



Los motores hidráulicos son dispositivos que convierten la energía cinética del fluido hidráulico en energía mecánica rotativa. Este tipo de motor aprovecha la presión y el caudal del fluido para generar movimiento y aplicarlo a una carga a través de un eje. Al recibir el flujo de

fluido a alta presión, el motor hidráulico utiliza su diseño interno para transformar esta energía en un movimiento rotativo, lo que permite realizar tareas mecánicas en diferentes aplicaciones industriales y sistemas hidráulicos.

Los motores hidráulicos comparten características de diseño comunes que los hacen funcionar de manera similar. Estas características incluyen una superficie de accionamiento expuesta a una presión diferencial, un mecanismo para dirigir el fluido a presión hacia la superficie de accionamiento para lograr una rotación continua, y una conexión mecánica entre la superficie de accionamiento y el eje del motor. Estos elementos trabajan en conjunto para convertir la energía del fluido hidráulico en movimiento rotativo, permitiendo así que el motor realice diversas tareas y aplicaciones en sistemas hidráulicos.

La capacidad de la superficie de presión para resistir fuerzas, las propiedades de fuga interna específicas de cada tipo de motor y la eficiencia de la conexión entre la superficie de presión y el eje son factores clave que determinan el rendimiento máximo de un motor hidráulico. Estos aspectos influyen en la presión de trabajo, el caudal, el torque de salida, la velocidad, así como en las eficiencias mecánica y volumétrica del motor. Además, también afectan la vida útil del motor y su configuración física. Es importante considerar estos elementos al seleccionar y utilizar un motor hidráulico, ya que influirán en su desempeño y capacidad para cumplir con los requisitos de una aplicación específica.

La potencia que se está usando en un motor hidráulico depende del torque del motor y de las revoluciones del motor.

Ecuación 5.

Potencia de motor hidráulico.

$$P_{otm} = T_m * N_m;$$

P_{otm} : Potencia del motor

N_m : Revoluciones por minuto del motor

T_m : Torque del motor

Ecuación 6.

Caudal de motor hidráulico.

$$Q_m = \frac{C_m * N_m}{\eta_{vm}};$$

Q_m : Caudal que entrega el motor

C_m : Capacidad volumétrica del motor

η_{vm} : Eficicencia volumétrica del motor

Ecuación 7.

Torque de motor hidráulico

$$T_m = C_m * \Delta P_m * \eta_{mm};$$

η_{mm} : Eficicencia mecánica del motor

ΔP_m : Presión en el motor

Los motores hidráulicos también cuentan con una eficiencia mecánica, volumétrica y global.

Ecuación 8.

Eficiencia volumétrica de motor hidráulico.

$$\eta_{vm} = \frac{Q_{Rm} - Q_m}{C_m * N_m};$$

Q_{Rm} : Caudal que entra al motor

η_{vm} : Eficiencia volumetrica del motor

Ecuación 9.

Eficiencia mecánica de motor hidráulico.

$$\eta_{mm} = \frac{2 * \pi * T_m}{C_m * \Delta P_m}$$

Ecuación 10.

Eficiencia total de motor hidráulico.

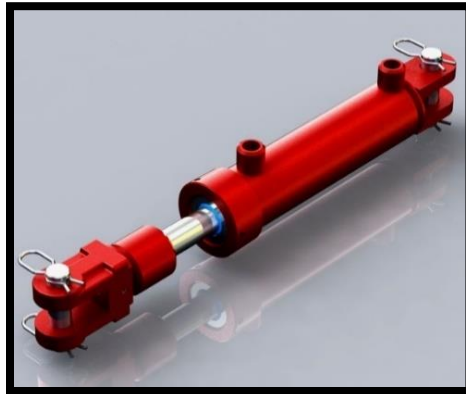
$$\eta_m = \eta_{mm} * \eta_{vm}$$

3.2.1.1.5 Un actuador mecánico (pistón). Los actuadores hidráulicos son mecanismos automáticos que operan mediante la utilización de aceite o agua como medio de trabajo. Estos actuadores se encuentran disponibles en diferentes versiones para adaptarse a diferentes rangos de presión, como baja presión (250-500 psi) y alta presión (600-5000 psi). Se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo la automatización de válvulas de compuerta, bola, macho, mariposa o dampers.

Estos actuadores pueden funcionar con agua proveniente de plantas de tratamiento, aceite hidráulico industrial o incluso aceite biodegradable, dependiendo de los requisitos y consideraciones medioambientales de cada aplicación. Su uso permite la automatización de procesos y el control preciso de los dispositivos mencionados, mejorando la eficiencia y la seguridad en diferentes industrias y aplicaciones.

Figura 15.

Actuador hidráulico estándar.



Nota. Tomado de: Grabcad (s.f.) *Actuador hidráulico estándar*
<https://grabcad.com/library/actuador-hidraulico-estandar-2-x8-1>

3.2.1.1.6 Una válvula direccional CETOP 5 centro tándem de cuatro vías con tres posiciones. Las válvulas CETOP son componentes esenciales en los sistemas hidráulicos que permiten controlar el flujo de fluido, ya sea para iniciar, detener o cambiar su dirección. Estas válvulas se utilizan en aplicaciones donde se requiere controlar altas presiones.

Figura 16.

Válvula direccional CETOP 5 centro tándem de cuatro vías con tres posiciones.



Nota. Tomado de: Nelco (s.f.) *Valvula hidraulica centro tándem*
<http://www.nelco.mx/product/electrovalvula-hidraulica-centro-tandem-4-3-tamano-10-cetop-5/>

Los distribuidores CETOP son un tipo específico de válvula que se utiliza para controlar el flujo de fluido en sistemas hidráulicos. Estos distribuidores pueden ser operados mediante diferentes métodos, como palancas, solenoides o accionamientos del sistema, proporcionando un control preciso y confiable sobre el flujo hidráulico. Gracias a su diseño y funcionalidad, las válvulas CETOP y los distribuidores son ampliamente utilizados en diversas industrias para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente de los sistemas hidráulicos.

Las válvulas CETOP se caracterizan por su diseño robusto y confiable, lo que las hace ideales para aplicaciones industriales y comerciales donde se requiere un control preciso del flujo hidráulico. Estas válvulas están diseñadas para soportar altas presiones y ofrecen opciones de configuración flexibles para adaptarse a las necesidades específicas del sistema. Además, su fácil instalación y mantenimiento las convierten en una opción conveniente para los ingenieros y técnicos encargados de la operación y el mantenimiento de los sistemas hidráulicos.

3.2.1.1.7 Una válvula direccional CETOP 3 centro punto flotante de cuatro vías con tres posiciones. Esta válvula cuenta con tres posiciones de funcionamiento que permiten dirigir el flujo hacia diferentes actuadores o circuitos hidráulicos. Su diseño de centro punto flotante significa que, en posición neutral, todas las conexiones están bloqueadas, evitando el flujo de fluido en cualquier dirección. Al activar la válvula mediante palancas, solenoides u otros mecanismos, se establece la conexión entre las diferentes vías y se permite el flujo del fluido según la posición seleccionada.

Figura 17.

Válvula direccional CETOP 3 centro punto flotante de cuatro vías con tres posiciones.



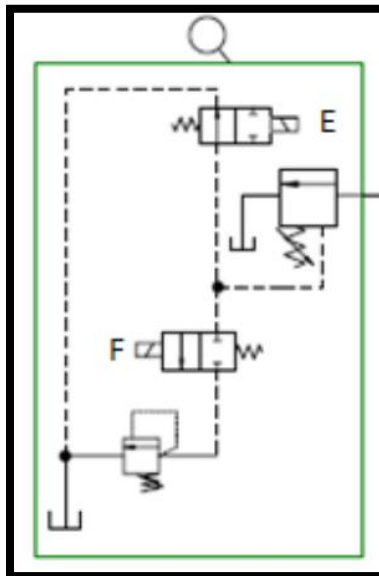
Nota. Tomado de: Nelco (s.f.) *Valvula hidráulica centro y flotante*
<http://www.nelco.mx/product/electrovalvula-hidraulica-centro-y-flotante-4-3-tamano-6-cetop-3/>

3.2.1.1.8 Un conjunto de válvulas de seguridad con posibilidad de dos niveles de presión más uno de venteo. Son componentes diseñados para proteger los actuadores y el sistema hidráulico en general al liberar la sobrepresión generada en el interior de los actuadores y aliviar la presión de vacío en el tanque. Estas válvulas son especialmente importantes para controlar la

presión del sistema cuando se producen cambios térmicos o cuando el producto se desplaza dentro del actuador hidráulico. Su función es abrirse y cerrarse de manera controlada para permitir la entrada y salida de aceite hidráulico necesario, manteniendo así la presión del sistema dentro de límites seguros y evitando daños al tanque. Las válvulas de seguridad son esenciales para garantizar un funcionamiento seguro y confiable del sistema hidráulico.

Figura 18.

Conjunto de válvulas de seguridad.



Nota. Tomado de: Universidad Industrial de Santander (2019).

3.2.2 Elevadores hidráulicos

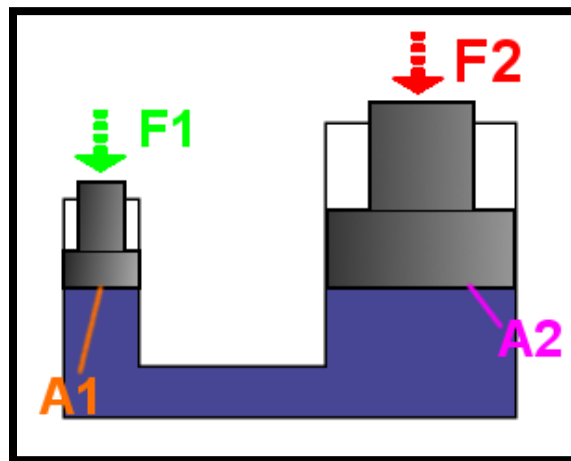
Los elevadores hidráulicos son una herramienta mecánica que ofrece una solución segura y conveniente para levantar cargas, desde objetos livianos hasta vehículos pesados como autobuses de transporte. Estos elevadores no solo facilitan trabajos de inspección, mejoras o mantenimiento

en los vehículos, sino que también permiten llevar a cabo las actividades de manera más segura y eficiente. Con su funcionamiento hidráulico, brindan una elevación estable y controlada, garantizando la protección tanto de las cargas como de las personas que trabajan con ellas.

El funcionamiento de un elevador hidráulico se sustenta en el principio físico de Pascal, el cual establece que la presión aplicada en un fluido confinado se transmite de manera uniforme en todas las direcciones. En términos sencillos, esto significa que, al aplicar presión a través de un fluido, como el aceite hidráulico, se logra una transmisión de energía que permite elevar vehículos en función de la altura y peso requeridos. De esta manera, el sistema hidráulico del elevador garantiza una elevación segura y controlada.

Figura 19.

Esquema de principio de pascal.



Nota. Tomado de: Wikimedia (s.f.) *Esquema de principio de pascal.*

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Hydraulic_Force%2C_language_neutral.](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Hydraulic_Force%2C_language_neutral.png)

png

Ecuación 11.

Principio de Pascal.

$$\frac{F1}{A1} = \frac{F2}{A2}$$

3.2.3 Control automatizado

Un sistema de control automático implica la sustitución de la intervención humana por un componente denominado controlador. En el ámbito de la ingeniería de sistemas, un sistema de control se refiere a un conjunto de dispositivos que se encargan de administrar, coordinar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el propósito de minimizar las posibilidades de falla y alcanzar los resultados deseados. En este contexto, el controlador asume la responsabilidad de tomar decisiones y aplicar acciones de manera automatizada, asegurando un funcionamiento óptimo y confiable del sistema en cuestión.

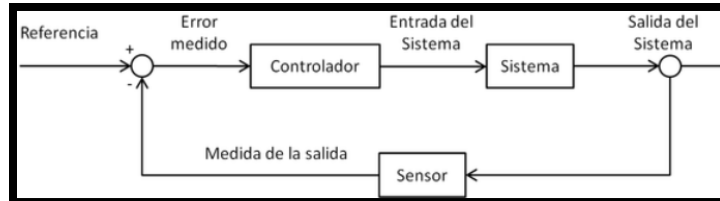
La función del controlador será a partir de datos, decidir qué acción de control será necesaria y realizar la regulación para mantener el sistema en determinados valores. La automatización implica la liberación del hombre en ciertas tareas elementales de control (de carácter operativo).

La automatización se inicia con la entrada de una materia prima u otro tipo de entrada en un sistema, y avanza hasta generar una salida, como un producto terminado, sin necesidad de intervención humana directa. Este proceso simplifica el trabajo humano, aumenta la producción, ahorra recursos materiales y energéticos, controla y protege las instalaciones y maquinaria, y elimina tareas complejas, peligrosas, pesadas o indeseables al ser realizadas por máquinas. La

automatización permite optimizar los procesos, mejorar la eficiencia y la calidad, y liberar a los trabajadores para enfocarse en tareas más especializadas y estratégicas.

Figura 20.

Diagrama de bloques conceptual de automatización.



Nota. Tomado de: Tecnología de control UIS (2016).

El control avanzado se refiere al diseño de una infraestructura de sistemas de ingeniería que combina elementos de diversas disciplinas, como ingeniería de control, procesamiento de señales, estadísticas, teorías de decisión, ingeniería de software y técnicas de inteligencia artificial. Esta integración de conocimientos y técnicas tiene como objetivo desarrollar sistemas más sofisticados y eficientes, capaces de tomar decisiones y realizar acciones de manera autónoma y óptima. El control avanzado utiliza enfoques avanzados de modelado, análisis y diseño para lograr un control más preciso, adaptativo y robusto en una amplia gama de aplicaciones, desde procesos industriales hasta sistemas de transporte y energía.

En lo general, se usan sistemas de control industriales para los procesos de producción industriales para controlar equipos o máquinas.

Los sistemas de control deben conseguir los siguientes objetivos:

- Ser estables y robustos frente a perturbaciones y errores en los modelos.

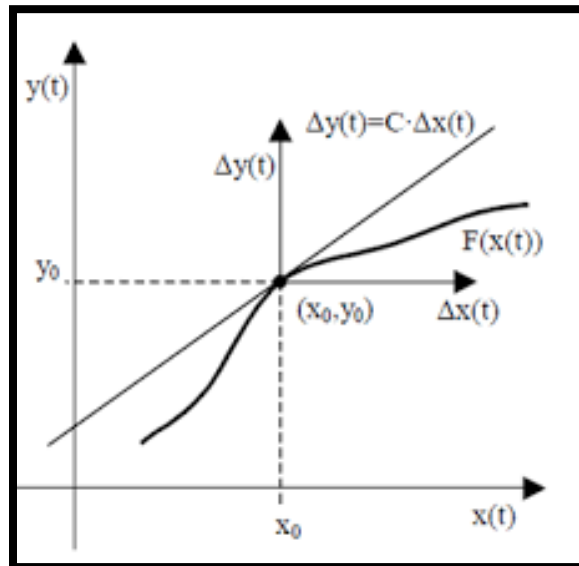
- Ser eficiente según un criterio preestablecido evitando comportamientos bruscos e irreales.

Al diseñar sistemas de control, es importante considerar las posibles perturbaciones que pueden afectar el sistema. Estas perturbaciones pueden ser variaciones en la carga, fluctuaciones ambientales, ruido eléctrico, entre otros factores. Para evaluar la respuesta del sistema ante estas perturbaciones y garantizar un control robusto, a menudo se realizan pruebas que incluyen la introducción intencional de perturbaciones. Una prueba comúnmente utilizada es la aplicación de una señal escalón, que consiste en un cambio repentino en la entrada del sistema. Observando cómo responde el sistema a esta perturbación, se puede evaluar su comportamiento y ajustar los parámetros del controlador para obtener una respuesta óptima. Estas pruebas permiten mejorar la estabilidad, la precisión y la capacidad de rechazo a perturbaciones del sistema de control.

3.2.3.1 Linealización por series de Taylor. La linealización por series de Taylor es un método matemático utilizado para aproximar una función no lineal mediante una función lineal más simple en un punto específico. Esta técnica se usa ampliamente en matemáticas, física, ingeniería y otras disciplinas para analizar y simplificar sistemas no lineales, especialmente en el estudio de sistemas en torno a un punto de equilibrio o de operación deseado.

Figura 21.

Linealización por series de Taylor.



Nota. Tomado de: Ogata, K. (2010).

El cálculo de la matriz jacobiana es un paso importante en el análisis de sistemas dinámicos, especialmente en el contexto de la linealización de sistemas no lineales utilizando la expansión de series de Taylor. La matriz jacobiana es una herramienta fundamental para describir cómo las tasas de cambio de múltiples variables afectan a otras variables en un sistema.

Figura 22.*Matriz Jacobiana.*

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = (f_1, f_2, \dots, f_m)$$

$$J_f = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

Nota. Tomado de: Ogata, K. (2010).

3.2.3.2 Perturbaciones. En el diseño de sistemas de control, es importante considerar las perturbaciones, que son señales que pueden afectar la salida de un sistema. Estas perturbaciones pueden ser internas, generadas dentro del sistema, o externas, originadas fuera de él. Las perturbaciones internas pueden ser causadas por variaciones en los parámetros o errores en la medición, mientras que las externas provienen de factores ambientales o interferencias externas. El objetivo del control es mitigar los efectos de estas perturbaciones y mantener el sistema en un estado deseado. Para lograrlo, se ajusta el controlador para compensar los efectos de las perturbaciones y garantizar un comportamiento estable y preciso del sistema controlado.

En un sistema en lazo cerrado, si $G(s)H(s) \gg 1$ se puede considerar la función de transferencia como:

Ecuación 12.

Función de transferencia.

$$Y(s) = \frac{1}{H(s)} R(s)$$

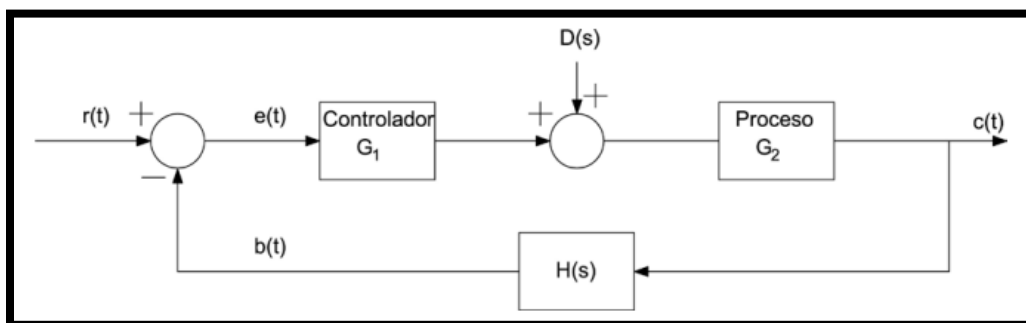
Por lo que la salida solo se ve afectada por $H(s)$, que puede ser constante. Sin embargo, el hecho de que $G(s)H(s) \gg 1$ puede provocar que el sistema sea inestable.

A la hora de diseñar los sistemas de control es conveniente tener en cuenta las perturbaciones que pueden aparecer. En ocasiones se realizan pruebas incluyendo perturbaciones para determinar la respuesta del sistema ante estas y poder implementar un control más robusto. Cuando un sistema está sujeto a múltiples perturbaciones, la respuesta a una señal escalón puede ser una prueba adecuada.

Las perturbaciones externas pueden presentarse en diferentes puntos del proceso de control, tanto en los sensores, los actuadores, el propio proceso, etc. Consideremos un proceso en el que se produce una perturbación

Figura 23.

Perturbación.



Nota. Tomado de: Tecnología de control UIS (2016).

Cuando el valor de la perturbación es cero, el proceso se comporta como:

Ecuación 13.

Función de transferencia con perturbación igual cero.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}$$

Cuando $R(s) = 0$ el proceso se reajusta de la siguiente forma:

Ecuación 14.

Función de transferencia cuando $R(s) = 0$.

$$\frac{C(s)}{D(s)} = \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}$$

Los errores en los sistemas de control son atribuibles a múltiples factores. Las variaciones en la entrada de referencia provocan desviaciones inevitables durante los periodos transitorios e, incluso, en estado estable. Las imperfecciones de los componentes, el desgaste de los elementos del sistema (sensores y actuadores), la fricción entre componentes mecánicos, el bamboleo, la deriva térmica de los componentes electrónicos, el envejecimiento, etc., provocan que el sistema pueda desviarse de los resultados esperados. En parte, algunos de estos defectos pueden ser corregidos por los sistemas realimentados, pero otros requieren, al menos, de una calibración.

3.2.4 Softwares

Todos los dispositivos tecnológicos como computadores o teléfonos inteligentes están compuestos por hardware y software. El hardware es la parte física del sistema electrónico que puedes ver y tocar. Es decir, todos los componentes de su estructura física como pantallas y teclados. Mientras que el software son los programas informáticos que hacen posible la ejecución

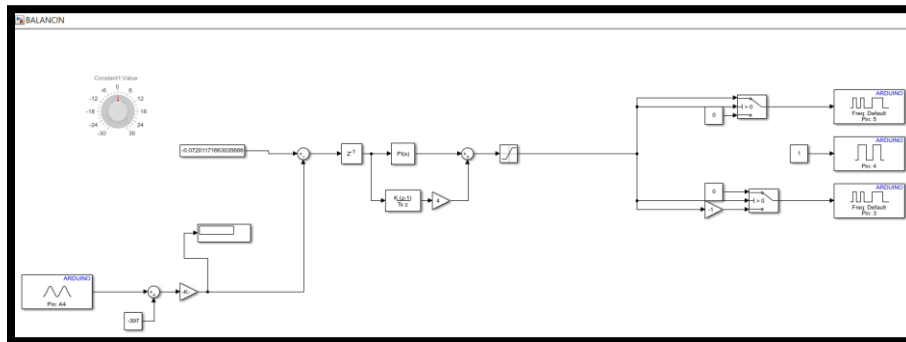
de tareas específicas dentro de un computador. Por ejemplo, los sistemas operativos, aplicaciones, navegadores web, juegos o programas.

Estas características siempre trabajan de la mano. Mientras el software proporciona las instrucciones y algoritmos necesarios para realizar diversas operaciones y procesamientos de datos. Estas operaciones se ejecutan en el hardware, que actúa como el medio físico a través del cual se llevan a cabo las funciones del software. El hardware proporciona la capacidad de procesamiento, almacenamiento, comunicación y visualización necesaria para que el software funcione correctamente. Es la combinación de ambos lo que permite que los dispositivos tecnológicos sean capaces de realizar tareas complejas y brindar diversas funcionalidades a los usuarios.

3.2.4.1 Simulink. Simulink es una poderosa herramienta de modelado y análisis de sistemas dinámicos que utiliza diagramas de bloques para representar y simular el comportamiento de estos sistemas. Está estrechamente vinculada a MATLAB, ya que se integra como una extensión de este software de programación numérica. Simulink ofrece una amplia gama de librerías y bloques de funciones predefinidos que facilitan la construcción de modelos complejos de sistemas, incluyendo aquellos que utilizan microcontroladores. Esto permite a los ingenieros diseñar y probar algoritmos de control, sistemas de comunicación, redes de sensores y muchos otros sistemas en un entorno virtual antes de implementarlos en hardware físico. La compatibilidad con diversos microcontroladores populares facilita la implementación de los modelos en dispositivos reales, lo que hace de Simulink una herramienta muy versátil en el campo de la ingeniería y el desarrollo de sistemas.

Figura 24.

Esquema de un modelo de balancín con hélice.



Simulink tiene dos fases de uso: la definición del modelo y el análisis del modelo. La definición del modelo significa construir el modelo a partir de elementos básicos construidos previamente, tal como, integradores, bloques de ganancia o servomotores. El análisis del modelo significa realizar la simulación, linealización y determinar el punto de equilibrio de un modelo previamente definido.

Para simplificar la definición del modelo Simulink usa diferentes clases de ventanas llamadas ventanas de diagramas de bloques. En estas ventanas se puede crear y editar un modelo gráficamente usando el *mouse*. Simulink usa un ambiente gráfico lo que hace sencillo la creación de los modelos de sistemas.

Después de definir un modelo Simulink puede simular cualquier sistema que pueda ser definido por ecuaciones diferenciales continuas y ecuaciones diferenciales discretas. Esto significa que se puede modelar sistemas continuos en el tiempo, discretos en el tiempo o sistemas híbridos.

3.2.4.2 Control lineal PID. Un control PID (Proporcional, Integral, Derivativo) en lazo cerrado es un tipo de controlador utilizado en sistemas de control automático para regular una

variable de interés y mantenerla en un valor deseado (setpoint) al minimizar el error entre el valor medido y el valor de referencia. Este controlador ajusta una variable de control, como una señal de entrada a un sistema, de acuerdo con tres componentes principales:

Figura 25.

Ecuación del controlador PID.

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

Nota. Tomado de: Ogata, K. (2010).

La **acción proporcional** es la parte principal del controlador PID. Proporciona una corrección al valor de control proporcional al error presente en ese momento. Cuanto mayor sea el error, mayor será la corrección aplicada. La acción proporcional ayuda a reducir el error actual.

La **acción integral** toma en cuenta la acumulación del error con el tiempo. Corrige el error acumulado durante un período prolongado y se suma a la acción proporcional. Esto es útil para eliminar errores residuales que no se corrigen con la acción proporcional.

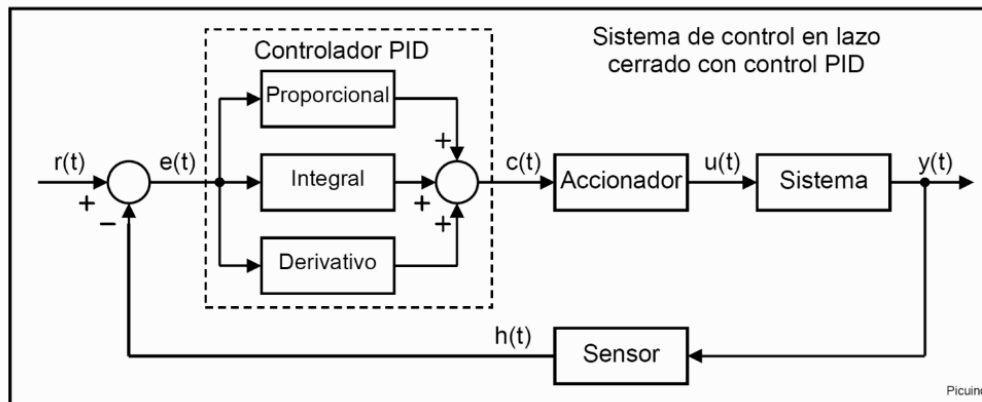
La **acción derivativa** anticipa la tendencia del error al medir su velocidad de cambio. Si el error cambia rápidamente, se aplica una corrección que ayuda a reducir la velocidad del cambio. Esto es útil para prevenir oscilaciones excesivas.

El control PID en lazo cerrado se basa en el principio de retroalimentación. La variable de proceso (la variable controlada) se mide continuamente, se compara con el valor de referencia y

se calcula el error actual. El controlador PID ajusta la variable de control en consecuencia para minimizar este error y mantener la variable de proceso lo más cerca posible del valor deseado.

Figura 26.

Sistema de control en lazo cerrado con control PID.



Nota. Tomado de: Ogata, K. (2010).

El uso de las tres componentes (proporcional, integral y derivativa) permite que el control PID sea efectivo en una amplia gama de sistemas y aplicaciones. Al ajustar los parámetros (ganancias) del controlador PID, es posible optimizar el rendimiento para satisfacer las necesidades específicas del sistema, como la velocidad de respuesta, la estabilidad y la capacidad de rechazar perturbaciones.

3.2.4.2 Control LQR. El control LQR (Linear Quadratic Regulator) es un método de control óptimo utilizado en sistemas de control lineal en la teoría de control automático. Su objetivo es diseñar un controlador que minimice una función de costo cuadrática. El control LQR

es especialmente eficaz para sistemas lineales, aunque en algunos casos se utiliza en sistemas no lineales mediante linealización.

El diseño del control LQR implica el cálculo de una matriz de retroalimentación de estados que define cómo se deben ajustar las señales de control en función de las mediciones actuales y el error con respecto al estado deseado. La matriz de retroalimentación se calcula de manera que minimice la función de costo cuadrática.

Figura 27.

Ecuación matricial reducida de Ricatti.

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^* \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^* \mathbf{R} \mathbf{u}) dt$$

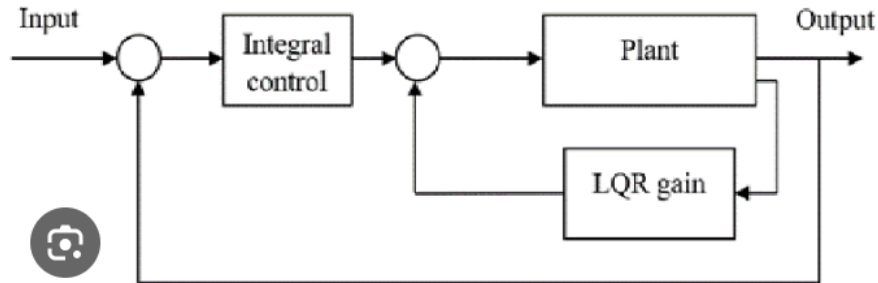
$$\mathbf{A}^* \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^* \mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0}$$

Nota. Tomado de: Ogata, K. (2010).

El control LQR es ampliamente utilizado en aplicaciones de ingeniería y se ha aplicado en campos como el control de sistemas de aeronaves, el control de procesos industriales, el control de sistemas de navegación, el control de robots y muchas otras áreas donde la regulación de sistemas lineales es esencial. El uso de esta técnica permite diseñar sistemas de control eficientes que cumplen con ciertos objetivos de rendimiento.

Figura 28.

Sistema de control en lazo cerrado con control LQR.



Nota. Tomado de: Ogata, K. (2010).

3.2.5 Posibilidad

Como hemos observado Las herramientas y técnicas aplicables permiten lograr el objetivo principal del proyecto y de esta manera garantizar que este sea técnicamente factible, económicamente justificable y, por supuesto, legal. En pocas palabras, saber si la inversión que se va a realizar va a ser o no rentable. Teniendo en cuenta la acogida de la región o población donde se desea realizar o implementar dicho proyecto, pues es necesario que se cumplan las metas en temas sociales, económicos y ambientales.

Los principales beneficios de hacer un análisis de la posibilidad de un proyecto pueden ser cercar las alternativas de negocio, lograr identificar una razón válida para desarrollar el proyecto, conseguir mejores resultados mediante la evaluación de distintos parámetros y conseguir una claridad de gestión que dé lugar a una mayor rentabilidad de la inversión.

4. Metodología de trabajo

El trabajo de investigación se llevará a cabo en el laboratorio de potencia fluida de la Universidad Industrial de Santander. Este enfoque se basará en investigaciones previas y se centrará en la caracterización de variables relevantes para abordar el problema en cuestión. Tendremos la oportunidad de manipular e intervenir en el control del sistema hidráulico durante el desarrollo experimental. Esto permitirá obtener datos y resultados concretos que contribuyan a la solución del problema planteado. El laboratorio proporcionará el entorno adecuado y los recursos necesarios para llevar a cabo los experimentos y recopilar la información requerida.

4.1 tipo De investigación

Según Caballero (2014), las investigaciones cuantitativas se centran en el manejo estadístico matemático de datos y consideran que todos los informantes tienen igual valor. Estos estudios buscan verificar o comprobar de manera deductiva las proposiciones planteadas, a través de la construcción de hipótesis y la medición de variables para confirmar o refutar dichas hipótesis.

Teniendo en cuenta lo anterior, el tema de investigación se centra en la aplicación de un control PID a un equipo mecánico que requiere intervención manual. El enfoque de investigación es de naturaleza cuantitativa, como se mencionó anteriormente, ya que se basa en la observación y simulación de fenómenos específicos. En este caso, el estudio se enfoca en controlar variables como la velocidad de rotación del motor, que está asociado al ascenso y descenso de una carga determinada. Es importante destacar que la experimentación desempeñará un papel fundamental

en esta investigación, permitiendo recopilar datos y obtener resultados empíricos para evaluar la efectividad del control PID en el equipo mecánico. El uso de técnicas cuantitativas y la experimentación contribuirán a obtener conclusiones sólidas y fundamentadas en el estudio.

4.2 Población

Según Pineda et al. (1994:108), la población se refiere al conjunto de personas u objetos sobre los cuales se desea obtener información en una investigación. En el caso de esta investigación, la población se define como el estudio de las diferentes formas de control PID desarrolladas en los últimos años. Dado que existen numerosas propuestas para abordar el problema planteado, es necesario realizar un muestreo de las posibles estrategias de control que involucren variables clave como velocidad, torque, fuerza, entre otras, para su análisis.

4.3 Muestra y muestreo

La muestra es una porción representativa de la población, seleccionada con el objetivo de reducir el tiempo y esfuerzo requerido para el estudio. Al trabajar con una muestra más pequeña, se busca obtener información que sea indicativa del comportamiento general de la población. En el caso de esta investigación, se busca determinar la estrategia más adecuada para abordar la tesis propuesta, considerando opciones como el control EQR, EQG y PID.

“El muestreo es un método utilizado para seleccionar a los componentes de la muestra del total de la población. "Consiste en un conjunto de reglas, procedimientos y criterios mediante los cuales se selecciona un conjunto de elementos de una población que representan lo que sucede en

toda esa población”” (MATA et al, 1997:19), El método utilizado para seleccionar las estrategias de control en el trabajo de investigación es el enfoque no probabilista. A diferencia de la selección al azar basada en probabilidades, este método se basa en criterios específicos y considera la facilidad y conveniencia de las estrategias para abordar el problema planteado. En lugar de depender de la aleatoriedad, se realiza una selección más concreta y deliberada de las estrategias que se consideran más apropiadas.

4.4 Técnicas de recolección de datos

La Universidad de la Concordia, en un artículo ilustrativo, destaca que las técnicas de investigación se refieren a un conjunto de métodos sistemáticos y metodológicos que se utilizan para asegurar la efectividad del proceso de investigación. Su objetivo principal es obtener una amplia cantidad de información y conocimiento para responder preguntas y resolver problemas. En este sentido, las clasificaciones más adecuadas para este estudio son la experimentación y la observación, ya que permiten un contacto directo y completo con el problema en cuestión.

5. Desarrollo del control del elevador

Durante la ejecución del proyecto, se llevó a cabo una serie de etapas fundamentales que abarcaron desde la revisión exhaustiva de la literatura existente hasta la planificación detallada del

estudio. Además, se recopilaron y analizaron los datos pertinentes, lo que permitió obtener resultados significativos que fueron discutidos en profundidad.

5.1 Primeros bosquejos

En primer lugar, se realizó una exhaustiva revisión de la literatura disponible relacionada con el tema de investigación. Se llevó a cabo una recopilación minuciosa de diversas fuentes bibliográficas y científicas, las cuales fueron analizadas con el fin de obtener un sólido conocimiento en el área de estudio y establecer las fundamentaciones teóricas requeridas. A continuación, se procedió a la planificación y diseño del estudio, donde se establecieron objetivos específicos y se definió la metodología a seguir para llevar a cabo la investigación.

5.1.1 Modelo matemático

El sistema fue trasladado a un modelo matemático en la cual se formularon las ecuaciones de dinámica y potencia fluida correspondientes. A través de este proceso, se logró representar el sistema de manera teórica y describir su comportamiento en términos de las variables relevantes. Estas ecuaciones proporcionaron la base para el análisis y la comprensión más profunda de las características y propiedades del sistema en estudio.

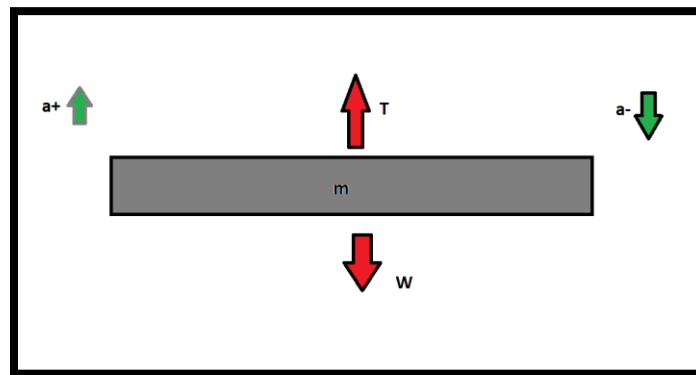
5.1.1.1 Dinámica del elevador hidráulico. Las características dinámicas de la plataforma se presentan mediante la representación de los diagramas de cuerpo libre correspondientes, junto con las ecuaciones que describen su comportamiento. Estos diagramas y ecuaciones son

herramientas fundamentales para comprender y analizar el movimiento y las fuerzas que actúan en la plataforma, permitiendo así obtener una visión más completa de su dinámica.

5.1.1.1.1 Subsistema plataforma

Figura 29.

DCL de la plataforma.



f_y: Fuerzas en la componente vertical .

m: Masa.

a: Aceleración .

W: Peso.

T: Tensión en cada cuerda.

g: Gravedad.

Ecuación 15.

Sumatoria de fuerzas

$$\sum f_y = m * a$$

Ecuación 16.

Sumatoria de fuerzas durante el ascenso.

$$8T - W = m * a$$

Ecuación 17.

Tensión en cada cuerda durante el ascenso.

$$T = \frac{W}{8} \left(1 + \frac{a}{g} \right)$$

Ecuación 18.

Sumatoria de fuerzas durante el descenso.

$$8T - W = -m * a$$

Ecuación 19.

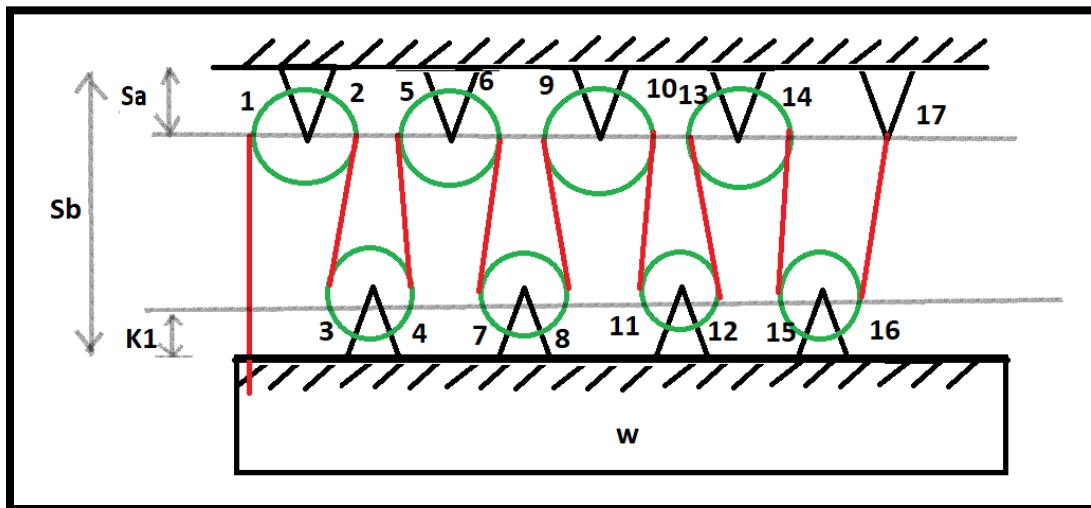
Tensión en cada cuerda durante el descenso.

$$T = \frac{W}{8} \left(1 - \frac{a}{g} \right)$$

5.1.1.1.2 Subsistema polipasto.

Figura 30.

Diagrama de cuerdas.



L: Longitud de la cuerda.

Sb: Desplazamiento de la plataforma.

Sa: Desplazamiento de la cuerda.

K: Constante de arco de la cuerda.

Ecuación 20.

Ecuación de la cuerda.

$$L = 8 * (Sb - Sa - K1) + 8K + (Sb - k2) ; L = K$$

Igualando $L = K$ y posteriormente derivando.

Vb: Velocidad de desplazamiento de la plataforma.

Va: Velocidad de desplazamiento de la cuerda.

$$K = \frac{8}{7} * Sa - \frac{9}{7} * Sb$$

$$0 = \frac{8}{7} * -Va - \frac{9}{7} * Vb$$

Ecuación 21.

Velocidad de a respecto a b.

$$Va = \frac{9}{8} * Vb$$

Ecuación 22.

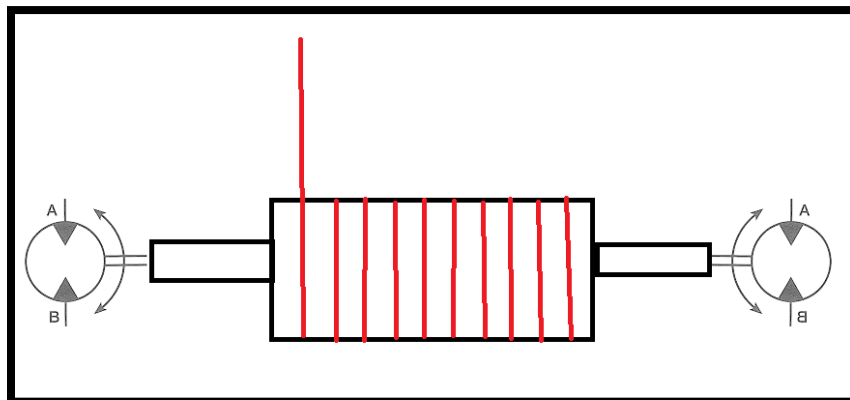
Velocidad nominal.

$$Vf = Vo - 2 * a * h$$

5.1.1.1.3 Subsistema tambor

Figura 31.

DCL del tambor



Tor_{tambor}: Torque en el tambor.

RPM: Revoluciones por minuto.

V_{tambor} : Velocidad tangencial del tambor.

R_{tambor} : Radio del tambor.

Pot_{tambor} : Potencia en el tambor.

ω_{tambor} : Velocidad angular en el tambor.

Pot_{motor} : Potencia del motor.

Ecuación 23.

Torque del tambor.

$$\omega_{tambor} = 2 * \pi * RPM$$

Ecuación 24.

Torque del tambor.

$$V_{tambor} = R_{tambor} * \omega_{tambor}$$

Ecuación 25.

Torque del tambor.

$$Tor_{tambor} = 8 * T * R_{tambor}$$

Ecuación 26.

Potencia en el tambor.

$$Pot_{tambor} = Tor_{tambor} * \omega_{tambor}$$

Ecuación 27.

Potencia en los motores hidráulicos.

$$Pot_{tambor} = 2 * Pot_{motor} * \eta_m$$

Por último, al abordar el modelo dinámico en Simulink, las ecuaciones se presentaron de la siguiente forma.

Ecuación 28.*Sistema dinámico.*

$$m\ddot{x} = -m * g - bx + \frac{Cm\Delta P}{r}R$$

Ecuación 29.*Caudal de motor hidráulico.*

$$Q_m = \frac{Cm}{r}R\dot{x} + \frac{V_t}{4\beta}\dot{P}_L$$

*r: Radio del tambor.**R: Reductor.* *ΔP : Presión del motor.**b: Constante.***Ecuación 30.***Caudal del motor a partir de la válvula direccional.*

$$Q_m = Cd W Xv * \sqrt{\frac{P_L - P_s}{\rho \left(\frac{1}{\eta_{vm}^2} + 1 \right)}}$$

 ρ : Densidad del fluido hidráulico. *η_{vm} : Eficiencia Volumétrica del motor.**Cd: Coeficiente de descarga a través del orificio.**W: Área gradiente del orificio.**Xv: Desplazamiento del spool.*

Ecuación 31.

Potencia en los motores hidráulicos.

$$u = \frac{1}{k_v} \left(\frac{1}{\omega_v^2} \ddot{x}_v + \frac{2\zeta_v}{\omega_v} \dot{x}_v + x_v \right)$$

u: Voltaje de la servovalvula.

Kv: Ganancia de la servovalvula.

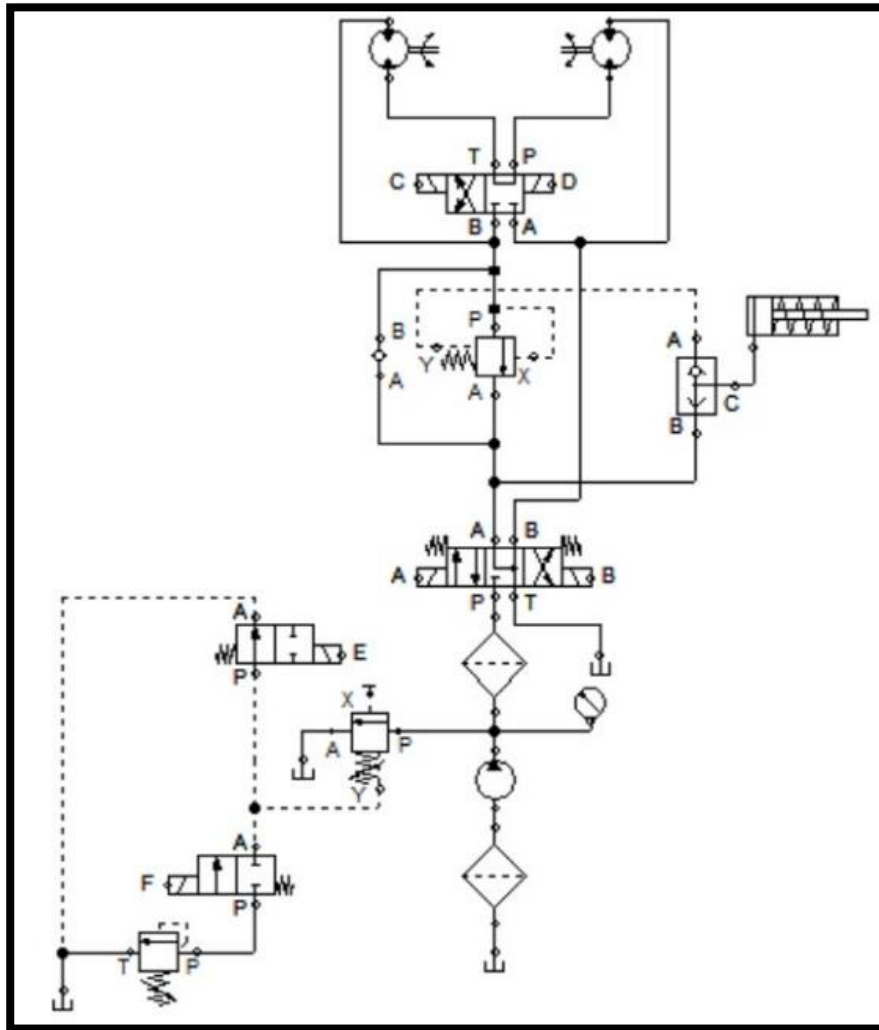
ζ_v : Coeficiente de amortiguamiento.

ω_v : Frecuencia natural de la servovalvula.

5.1.1.1.4 Subsistema bombas y motores

Figura 32.

Subsistema de bombas y motores.



Cm del motor hidraulico igual a $97 \frac{\text{cm}^3}{\text{rev}}$; $5.9 \frac{\text{In}^3}{\text{rev}}$

Qb caudal de la bomba hidraulica igual a **6.5 GPM** ; $\Delta P_B = 1800 \text{ PSI}$

Ecuación 30.

Eficiencia total de la bomba hidráulica.

$$\eta_B = \frac{Pot_{tambor}}{\Delta P_B}$$

5.1.2 Modelo SolidWorks

Para llevar a cabo una caracterización exhaustiva del elevador hidráulico, se realizaron meticulosas mediciones de todos los aspectos relevantes del sistema. Se tuvieron en cuenta parámetros obtenidos de proyectos de grado previos.

Figura 33.

Cotas principales.



Figura 34.

Carrete del elevador.



Estos datos recopilados, junto con la información proporcionada por los equipos y componentes utilizados, fueron clave para modelar en tres dimensiones el elevador hidráulico mediante el software de diseño SolidWorks. Esta representación tridimensional permitió visualizar de manera precisa y detallada todos los elementos que componen el elevador, brindando una visión integral de su estructura y configuración.

Figura 35.

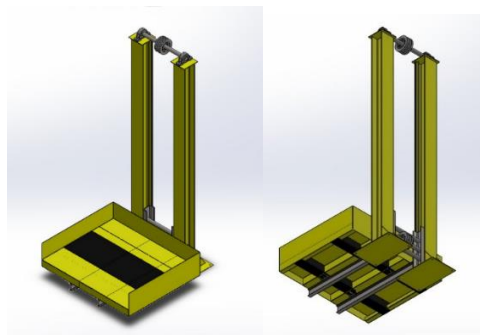
Autores tomando medidas.



El modelado 3D es una valiosa herramienta para comprender mejor el funcionamiento del sistema para el instructivo de uso del laboratorio, identificar posibles mejoras y realizar simulaciones virtuales que contribuyeron al desarrollo del proyecto de grado.

Figura 36.

Vistas Isométricas del elevador en SolidWorks.



5.1.2.1 Subsistemas. En el proceso de caracterización de los elementos necesarios para el proyecto, nos enfocamos en identificar las necesidades clave, con un enfoque particular en el componente principal, que es la válvula proporcional. Comenzando por la fuente de alimentación,

determinamos que una fuente de 24 voltios y 5 amperios era esencial. Esto se basó en el hecho de que la servoválvula requería un consumo de corriente de 3 amperios para su funcionamiento, y después de realizar estimaciones para otros componentes, llegamos a un promedio de 2 amperios adicionales. Por lo tanto, la fuente de alimentación se eligió con estas especificaciones para garantizar un suministro de energía adecuado.

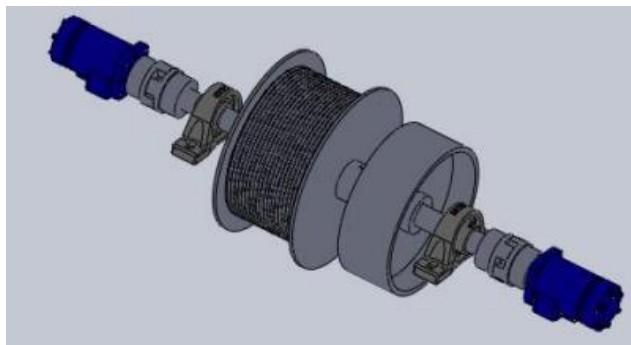
Otro aspecto crítico se centró en los conectores Amphenol de 7 pines, que eran un requisito para la conexión a la válvula. Para el control del sistema, se identificó la necesidad de un controlador y un sensor, junto con los cables de instrumentación correspondientes. Además, considerando las características del sistema hidráulico, se incluyeron elementos esenciales como un filtro de alta precisión. Esto se debió a la susceptibilidad de la válvula a fallas debido a la obstrucción, ya que no tolera partículas contaminantes en su flujo. Para mantener el sistema en condiciones óptimas, se incluyeron otros elementos como mangueras, manómetros, racores y más componentes hidráulicos necesarios.

El elevador hidráulico está compuesto por varios subsistemas interrelacionados que trabajan en conjunto para su funcionamiento eficiente. Estos subsistemas incluyen la unidad de potencia hidráulica, que proporciona la energía necesaria para el movimiento del elevador; el sistema de control, que regula y monitorea el proceso de elevación; el sistema estructural, que aporta la rigidez necesaria al sistema para que no colapse; el sistema de válvulas, que controla el flujo de fluido y dirige el movimiento; y el sistema de seguridad, que garantiza la protección del operador y previene accidentes. Cada uno de estos subsistemas desempeña un papel crucial en el funcionamiento global del elevador hidráulico, asegurando su correcto desempeño y cumplimiento de los requisitos de seguridad. A continuación, se presentan los diferentes subsistemas que componen al elevador hidráulico.

5.1.2.1.1 Subsistema de potencia hidráulica. La transferencia de potencia se logra mediante la conexión de dos motores hidráulicos a un eje sólido de acero utilizando acoples en forma de araña. Estos acoples se colocan en ambos extremos del eje y proporcionan la sujeción necesaria para los demás componentes del sistema de transmisión de potencia. Los elementos que se encuentran en el eje están asegurados con cuñas para evitar su rotación alrededor del eje. De esta manera, se garantiza una transmisión eficiente y segura de la potencia a través del sistema.

Figura 37

Motores hidráulicos acoplados al tambor.

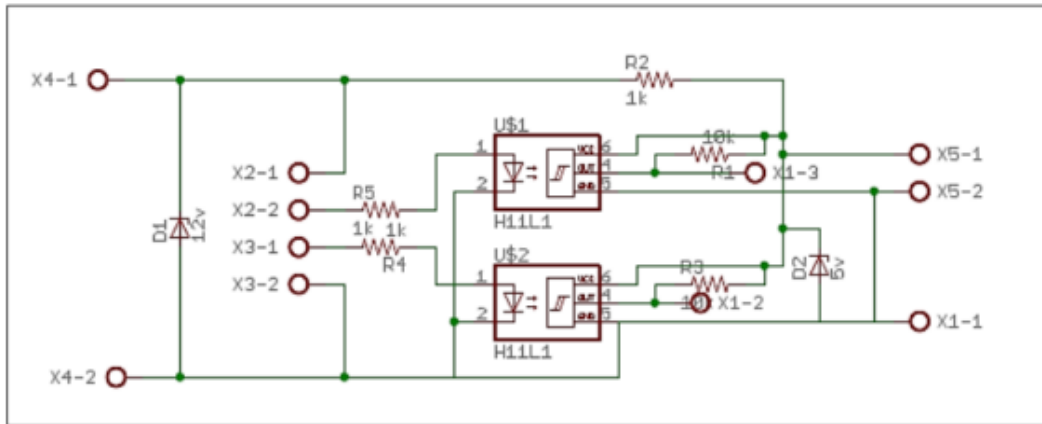


Nota. Tomado de: Universidad Industrial de Santander (2019).

5.1.2.1.2 Subsistema de control. El subsistema de control es el núcleo del sistema, ya que engloba todas las operaciones y funcionalidades del elevador hidráulico. En este subsistema se encuentran los componentes encargados de monitorear y regular el funcionamiento del elevador, garantizando un control preciso y seguro.

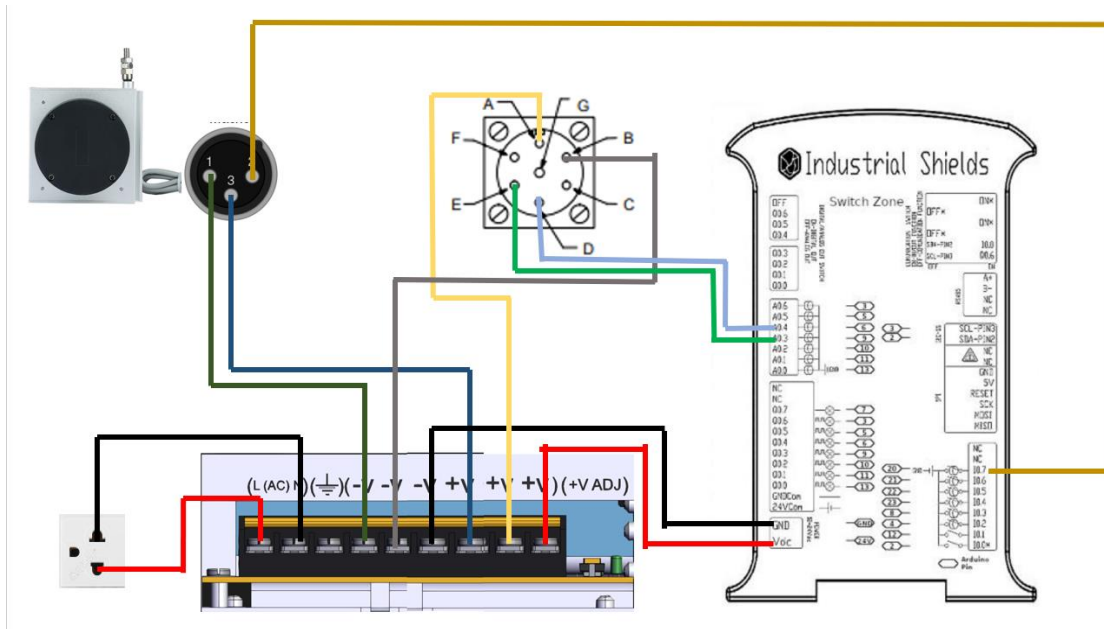
Figura 38.

Plano eléctrico de la tarjeta de conexión del encoder



Nota. Tomado de: Universidad Industrial de Santander (2019).

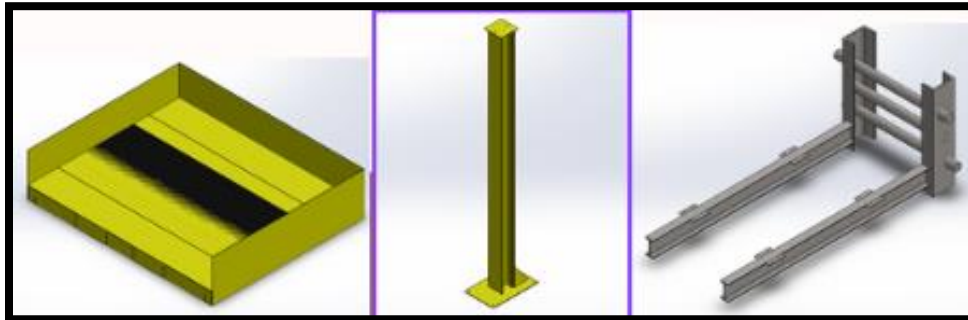
Se fabricó una caja de control que incorpora conectores industriales, una fuente de alimentación de 24 voltios con capacidad de 5 amperios y el controlador industrial, que en su núcleo opera como un Arduino Leonardo.

Figura 39..*Esquema de la caja de control*

5.1.2.1.3 Subsistema estructural. El subsistema de soporte y estructura del elevador hidráulico consta de varios componentes esenciales. Estos incluyen las dos vigas verticales HEA 160, que proporcionan la estructura principal y resistencia necesaria. La plataforma del elevador también forma parte de este subsistema, brindando el espacio necesario para el transporte de la carga.

Figura 40.

Soporte estructural.



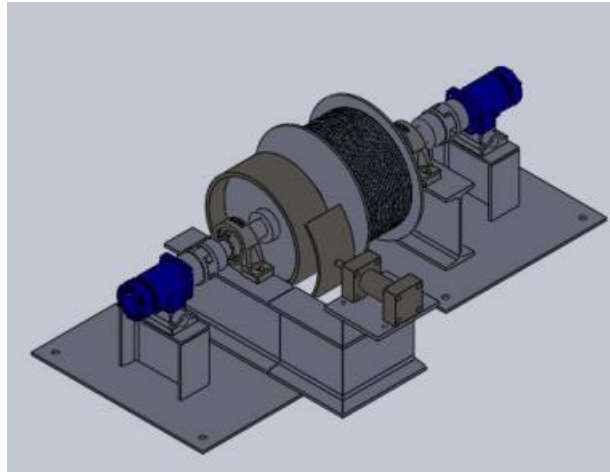
La importancia de este subsistema radica en su capacidad para garantizar la estabilidad y rigidez de toda la máquina. Debe ser capaz de soportar los esfuerzos generados por la carga y el movimiento del elevador, evitando deformaciones y asegurando un funcionamiento seguro y confiable.

5.1.2.1.4 Subsistema de válvulas. El paquete de potencia impulsor del elevador hidráulico comprende varios componentes esenciales. Entre ellos se encuentra una bomba Vickers, encargada de generar el flujo de fluido hidráulico necesario para el funcionamiento del sistema. También se incluye una válvula de frenado, que permite controlar el frenado y la velocidad de descenso de la plataforma.

5.1.2.1.5 Subsistema de bloqueo. Para garantizar la seguridad del sistema, se implementa un sistema mecánico que actúa como un mecanismo de bloqueo en caso de fallos hidráulicos. Este sistema se compone de varios elementos clave.

Figura 41.

Sistema de bloqueo.



Nota. Tomado de:: Universidad Industrial de Santander (2019).

El resorte desempeña un papel crucial en el sistema de bloqueo del pistón hidráulico. Su función principal es mantener el vástago del pistón extendido cuando no hay presión hidráulica presente en el sistema. Esta posición del vástago permite que la lámina doblada, que está unida al caucho, ejerza presión sobre la superficie del tubo unido al tambor. Debido a esta presión generada por la lámina y el caucho, se crea una fricción significativa entre la superficie del tubo y la superficie de caucho adherida a la lámina. Esta fricción es lo que proporciona el bloqueo necesario para mantener el eje transmisor de potencia en su lugar.

5.2 Ensayos en bancos alternativos

En la segunda fase del desarrollo, se llevó a cabo la realización de pruebas en el banco de pruebas, el cual constituía un sistema más simple y controlado en comparación con el proyecto

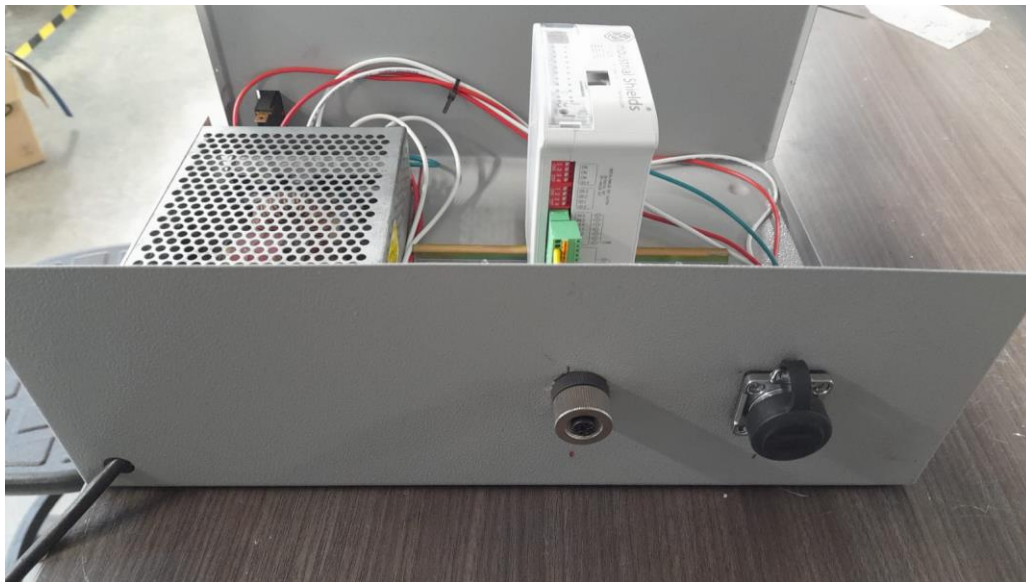
final del elevador hidráulico. El objetivo principal de esta etapa de pruebas era validar y evaluar el funcionamiento de los componentes y subsistemas antes de su implementación definitiva.

El banco de pruebas proporcionó un entorno controlado donde se pudieron simular las condiciones y cargas específicas que el elevador hidráulico debía enfrentar en su funcionamiento real. Esto permitió identificar posibles fallas, optimizar el rendimiento de los componentes y ajustar los parámetros de control para lograr un funcionamiento óptimo del sistema.

A continuación, se presenta la disposición preliminar de la caja de control, que ha sido instalada provisionalmente para permitir la realización de pruebas en las instalaciones de los bancos Rexroth alternativos.

Figura 42.

Montaje preliminar de caja de control.

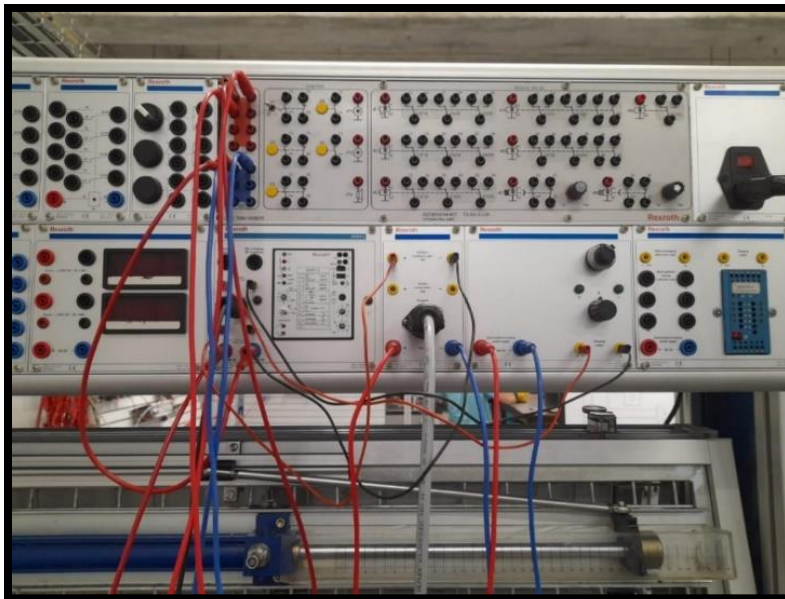


5.2.1 Ensayo de válvula proporcional didáctica en el banco rexroth

En el banco de pruebas Rexroth, se llevó a cabo una simulación del funcionamiento del sistema hidráulico utilizando pistones y una válvula proporcional didáctica. El objetivo principal de esta simulación fue comprender la secuencia lógica eléctrica a una escala reducida de los motores hidráulicos en serie y en paralelo. Esto permitió analizar posibles problemas, verificar limitaciones y mejorar la comprensión del sistema en su conjunto.

Figura 43.

Simulación en el banco Rexroth.

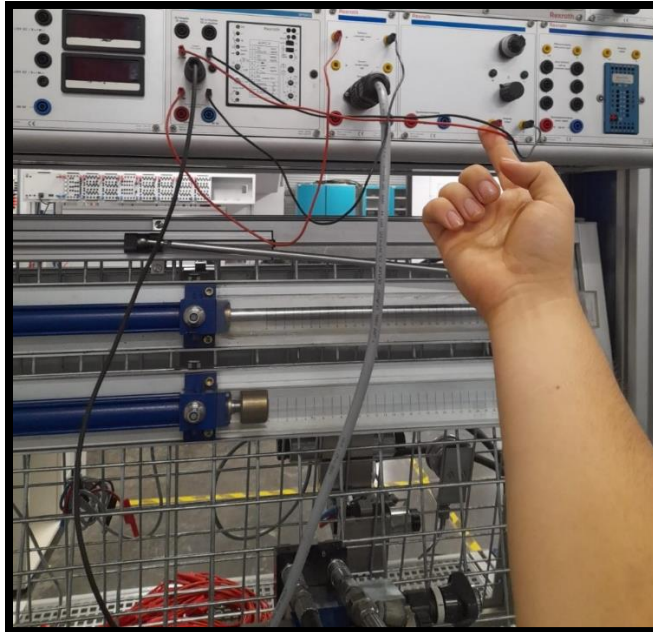


La utilización de pistones y una válvula proporcional en el banco de pruebas Rexroth proporcionó una representación más pequeña y controlada del sistema hidráulico real del elevador. A través de esta simulación, se pudo estudiar la secuencia de operación de los motores hidráulicos,

identificar posibles desafíos técnicos y evaluar las limitaciones del sistema en diferentes configuraciones.

Figura 44.

Válvula proporcional didáctica.



La simulación en el banco de pruebas Rexroth con pistones y una válvula proporcional didáctica proporcionó una oportunidad para comprender la secuencia lógica eléctrica de los motores hidráulicos en serie y en paralelo a una escala reducida. Esta etapa fue fundamental para evaluar problemas potenciales, verificar limitaciones y fortalecer el conocimiento del sistema antes de su implementación en el proyecto final.

5.2.2 Simulación de motores en serie y en paralelo

En el banco de pruebas Rexroth, se realizó una simulación del funcionamiento de motores hidráulicos en serie y en paralelo utilizando un enfoque similar. En este caso, en lugar de utilizar control eléctrico, se empleó un sistema de mangueras hidráulicas. Se utilizaron motores hidráulicos didácticos, comúnmente utilizados en el laboratorio de potencia fluida para ilustrar su funcionamiento.

La simulación se enfocó en comprender las características y el rendimiento del sistema hidráulico en serie y en paralelo. En el sistema en paralelo se observó una menor velocidad, pero una mayor ventaja mecánica. Esta simulación en el banco de pruebas Rexroth proporcionó una valiosa información para la toma de decisiones en el proyecto final del elevador hidráulico. Los resultados obtenidos permitieron evaluar las ventajas y limitaciones de los sistemas en serie y en paralelo, y así seleccionar la configuración más adecuada para el proyecto, considerando los requisitos de fuerza, velocidad y eficiencia.

Figura 45.

Motor hidráulico didáctico.



5.3 Selección de componentes

Durante este proceso, se tomaron medidas para seleccionar y garantizar la precisión y rigurosidad en la recopilación de los datos. Se llevaron a cabo registros detallados y se aplicaron técnicas adecuadas para asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos. Todo esto se realizó con el objetivo de obtener la información necesaria para avanzar en el proyecto de manera sólida y respaldar las conclusiones posteriores. Se eligieron las metodologías y herramientas más apropiadas para recopilar los datos necesarios, teniendo en cuenta las limitaciones y los recursos disponibles. Esto incluyó la realización de experimentos específicos y el análisis de datos previamente existentes.

5.3.1 Válvula proporcional Vickers

Se optó por utilizar una válvula proporcional Vickers de la referencia "KBFDG4V-5-2C70N-Z-M1-PE7-H7-12 Vickers "CETOP 5"", la cual se encontraba previamente almacenada en el laboratorio de potencia fluida.

Figura 46.

Válvula proporcional Vickers.



Esta válvula estaba equipada con su propia tarjeta de control y solo requería la adquisición de conectores industriales de 7 pines tipo Amphenol para su adecuada conexión. La gran ventaja de esta elección radicaba en la compatibilidad de la válvula con el manifold existente en el elevador hidráulico, al pertenecer al estándar CETOP 5. Este enfoque permitió un ahorro significativo en tiempo, trabajo y costos, al evitar la necesidad de adquirir una válvula adicional y adaptarla al sistema.

La válvula elegida tiene una capacidad máxima de presión de 4500 PSI y puede manejar un caudal de hasta 70 L/min cuando está completamente abierta. Se dispone de las curvas que representan la relación entre la presión y el caudal, así como entre el caudal y la señal eléctrica enviada por el controlador. Estas curvas son útiles para comprender el comportamiento de la válvula en diferentes situaciones operativas.

Figura 47.

Presión VS caudal.

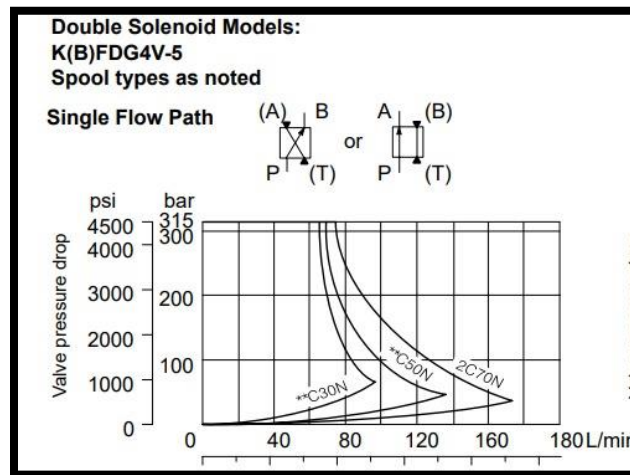
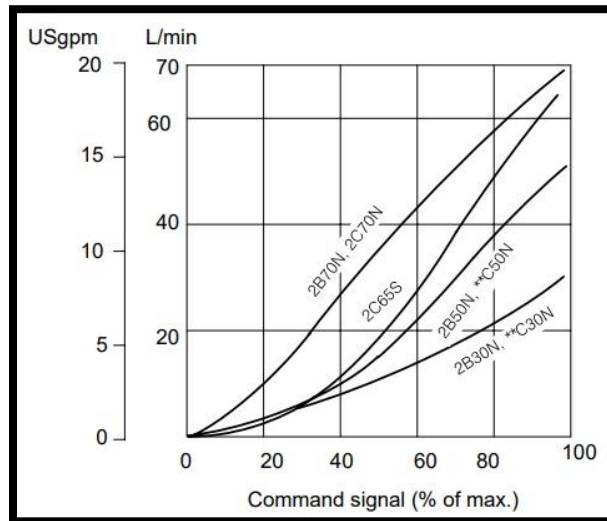


Figura 48.

Curva de apertura de la válvula respecto a la señal eléctrica.

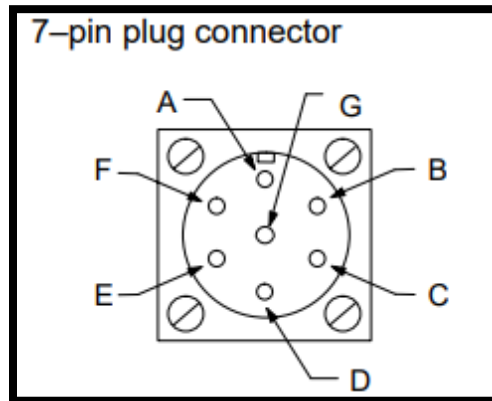


Nota. Tomado de: Eaton Proportional Valves.

Además, se cuenta con gráficas que muestran las dimensiones de los conectores industriales Amphenol utilizados, así como las dimensiones físicas de la propia válvula en milímetros. Estas gráficas son valiosas para garantizar una integración adecuada de la válvula en el sistema y facilitar el diseño y montaje de los componentes correspondientes.

Figura 49.

Conexión industrial tipo Amphenol.



Nota. Tomado de: Eaton Proportional Valves.

5.3.2 Sensor de desplazamiento

Uno de los equipos seleccionados fue el sensor de desplazamiento de cuerda de tracción (*pull rope displacement sensor*), que permitió medir con precisión el desplazamiento de la cuerda de tracción. Además, se utilizó un codificador de cuerda de tracción (*pull rope encoder*) para obtener datos digitales del movimiento de la cuerda. Se adquirió una regla de cuerda de tracción con alta precisión y un sensor de posición rotatoria tipo potenciómetro para complementar la medición del desplazamiento de la cuerda.

El propósito del sensor de desplazamiento de cuerda de tracción es proporcionar información precisa sobre la posición de la plataforma en relación con su punto de origen. Este componente permite al controlador del sistema conocer en todo momento la altura a la que se encuentra la plataforma. El sensor está diseñado para medir un desplazamiento máximo de 2 metros, lo que garantiza que se pueda cubrir un amplio rango de alturas en el funcionamiento del

elevador hidráulico. Con esta información, el controlador puede tomar decisiones y realizar ajustes precisos en el sistema para mantener la plataforma en la posición deseada.

Figura 50.

Pull rope displacement sensor.



Nota. Tomado de: <https://acortar.link/jQELMf>

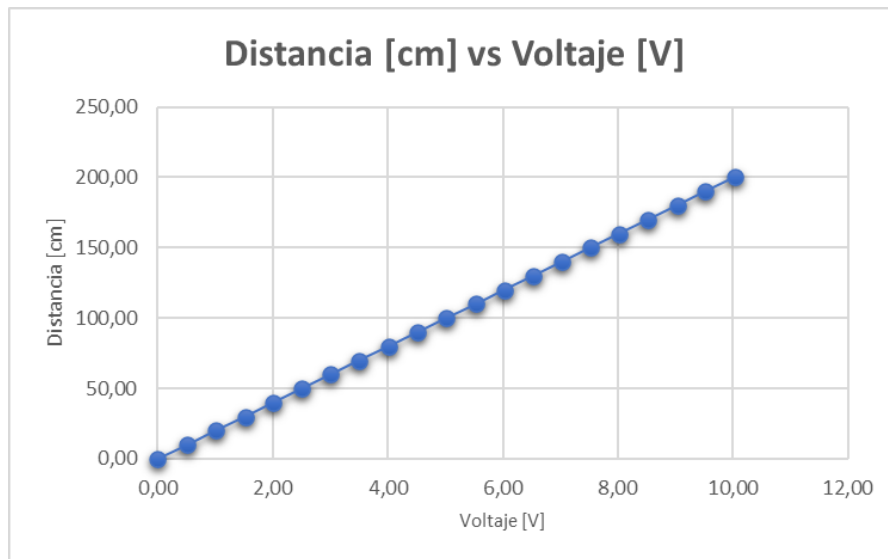
El sensor de desplazamiento de cuerda de tracción seleccionado para el proyecto tiene una vida útil estimada de 5 a 10 millones de usos. Puede operar en un amplio rango de temperaturas, desde -25°C hasta 80°C , lo que lo hace adecuado para diversas condiciones ambientales. La guaya de tracción tiene un grosor de 1 mm y el sensor está protegido con una clasificación IP65, lo que garantiza su resistencia al polvo y al agua. En términos de alimentación, el sensor funciona con un rango de voltaje de -12 a $+12$ voltios, lo que equivale a un total de 24 V, permitiendo su integración en el sistema eléctrico del proyecto.

También se realizó una caracterización experimental del sensor mediante la aplicación de una fuente de alimentación eléctrica y la medición de los voltajes correspondientes a diferentes posiciones, tomando muestras cada 10 centímetros hasta alcanzar los 2 metros. Esta prueba

experimental permitió obtener datos precisos sobre la respuesta del sensor en relación con la distancia de desplazamiento, lo cual resulta fundamental para garantizar su correcto funcionamiento en el proyecto.

Figura 51.

Gráfica del sensor de posición.



5.3.3 Filtros

Se optó por seleccionar un filtro de aceite hidráulico Baldwin B236 para reemplazar al filtro previamente utilizado en el elevador hidráulico, el B299. El motivo de esta elección radica en que el filtro B236 ofrece una mayor capacidad de micronaje, lo que significa que es más eficiente para retener partículas de menor tamaño en comparación con el filtro anterior. Esta decisión se tomó con el objetivo de evitar posibles obstrucciones en la válvula y garantizar un

funcionamiento óptimo del sistema. Adicionalmente, se instaló un filtro de 5 micrones en la línea de presión directo a la direccional garantizando la vida útil de la válvula direccional.

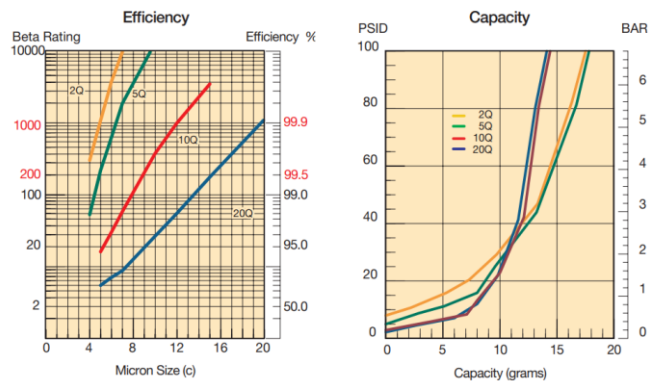
Figura 52.

Filtro de aceite hidráulico.



Figura 53.

Filtro de alta precisión y su tabla característica.



Results typical from Multi-pass tests run per test standard ISO 16889 @ 15 gpm to 100 psid terminal - 10 mg/L BUGL. Refer to Appendix on pages 264-265 for relationship to test standard ISO 4572.

Nota. Tomado de: Parker.(2016).Hydraulic and Lube filtration Products.

5.3.4 Conectores industriales

Se eligieron varios juegos de conectores tipo Amphenol, tanto macho como hembra, para asegurar la compatibilidad entre el control de la válvula y el controlador utilizado en el proyecto. Estos conectores son de calibre industrial, diseñados específicamente para entornos robustos y exigentes. Su elección se realizó con el objetivo de garantizar una conexión segura y confiable entre los dispositivos, evitando posibles problemas de conexión o desconexión durante el funcionamiento del sistema.

Figura 54.

Conectores Industriales.



5.3.5 Controlador PLC arduino

El PLC seleccionado para el proyecto fue el Ardbox PLC 20 I/O Arduino HF con Relays, un dispositivo versátil y potente. Este PLC, diseñado específicamente para aplicaciones industriales, ofrece 20 entradas/salidas digitales que brindan amplia capacidad de control y

monitoreo de los componentes del sistema. Además, cuenta con relés integrados, lo que facilita el control de cargas eléctricas de potencia. La elección de este PLC se basó en su compatibilidad con el entorno Arduino, lo que permite aprovechar las ventajas de la plataforma Arduino en términos de flexibilidad y programación. Su robustez y confiabilidad hacen de este PLC una opción ideal para garantizar un funcionamiento eficiente y preciso del sistema en el proyecto de grado.

Figura 55.

ARDBOX PLC 20 I/O Arduino.



Nota. Tomado de: Industrial Shields (s.f.) *ARDBOX PLC 20 I/O Arduino*
https://www.industrialshields.com/es_ES/technical-features-industrial-plc-arduino-spartan-16da-ios

5.3.6 Mantenimiento

En el primer encuentro con el banco de pruebas, se realizó un diagnóstico exhaustivo de todos los elementos físicos del banco. Durante esta inspección, se identificaron dos problemas activos, que se manifestaban como un mal funcionamiento de un manómetro y una fuga en una manguera. Como hipótesis inicial, se consideró que estas fallas podrían deberse a una sobrepresión

en la línea de indicadores del sistema hidráulico. Para abordar estos problemas de manera inmediata, se procedió a reemplazar los componentes defectuosos. Además, se tomó una muestra del aceite hidráulico para evaluar su estado.

Figura 56.

Manómetro en falla, manguera en falla y muestra de aceite



5.4 Montaje preliminar

En esta fase del proyecto, se llevó a cabo una etapa crucial que consistió en realizar una simulación exhaustiva con todos los componentes adquiridos. Esta simulación tuvo como objetivo principal verificar el correcto funcionamiento de cada uno de los elementos y su interacción en conjunto, antes de proceder a la fase final de pruebas. Para ello, se realizó un montaje preliminar donde se adecuaron todos los equipos comprados, asegurando su correcta instalación y conexión. Se siguieron rigurosamente las especificaciones y recomendaciones del fabricante para garantizar un ensamblaje óptimo. Durante este proceso, se prestó especial atención a los detalles técnicos, asegurándose de que todos los componentes estuvieran correctamente fijados y ajustados, y que no hubiera interferencias o malas conexiones.

Figura 57.

Montaje preliminar del elevador.



En el proceso de montaje preliminar, se llevó a cabo la programación de un código utilizando el entorno Arduino IDE. Este código fue diseñado para tener la capacidad de controlar y ajustar el voltaje suministrado a la servoválvula. El objetivo principal de esta programación era lograr una posición específica deseada para la servoválvula, lo que es fundamental en el control y regulación del sistema en desarrollo.

Una vez que todos los componentes habían sido ensamblados, calibrados y sometidos a pruebas previas, se procedió a llevar a cabo las pruebas con el elevador hidráulico. Estas pruebas representaron una etapa crucial en el desarrollo del proyecto, ya que permitieron evaluar el rendimiento y la funcionalidad del elevador en condiciones reales. Durante esta fase, se realizaron una serie de ensayos y mediciones para verificar que el sistema hidráulico funcionara de acuerdo con los parámetros y requerimientos establecidos previamente.

Figura 58.

Diagrama de flujo de señal experimental.

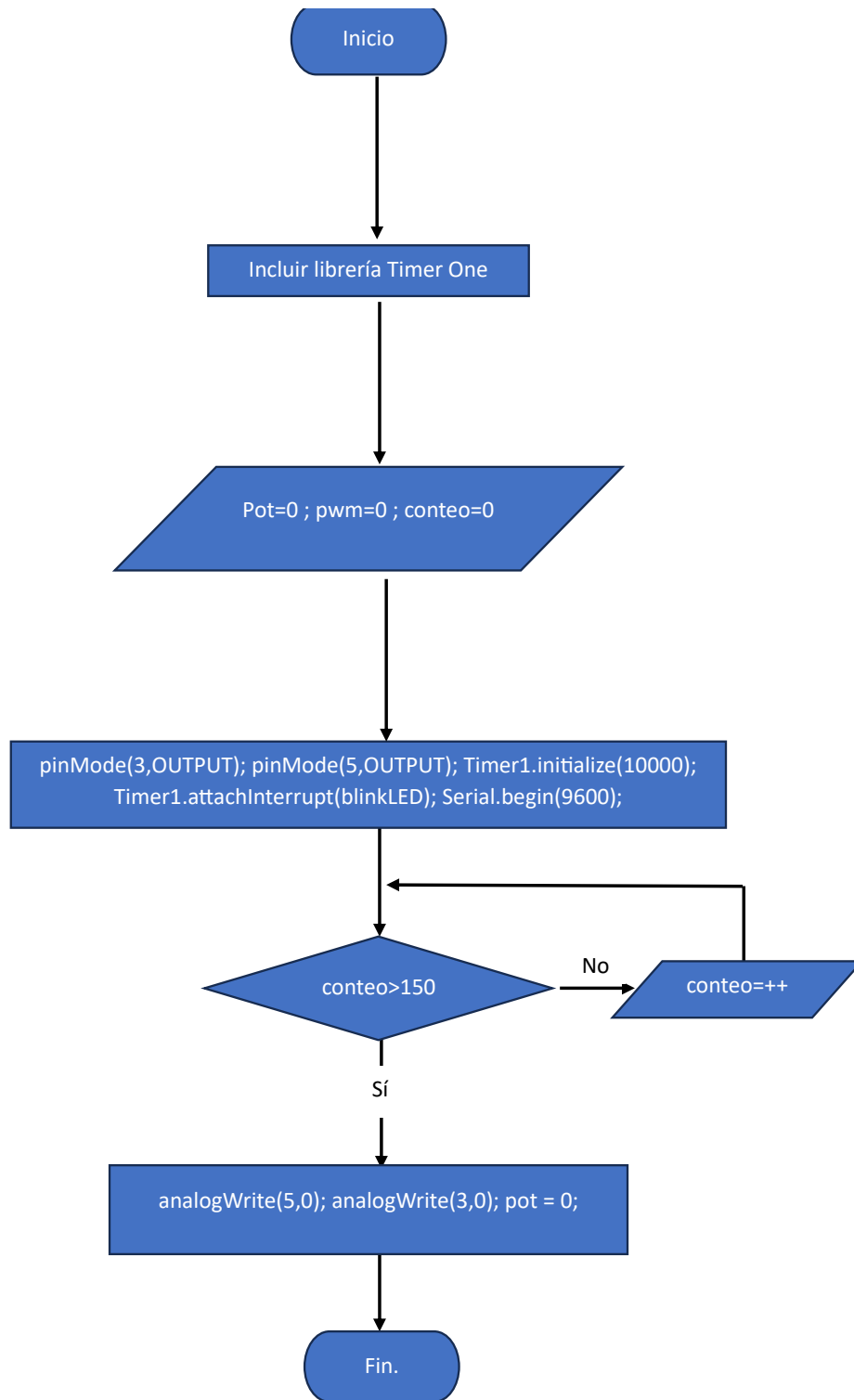


Figura 59.

Primeros Ensayos.



6. Resultados

6.1 Pruebas experimentales con el elevador hidraulico

Después de realizar múltiples pruebas experimentales, se obtuvieron los siguientes resultados.

Figura 60.

Resultados experimentales con 10 milisegundos de señal.

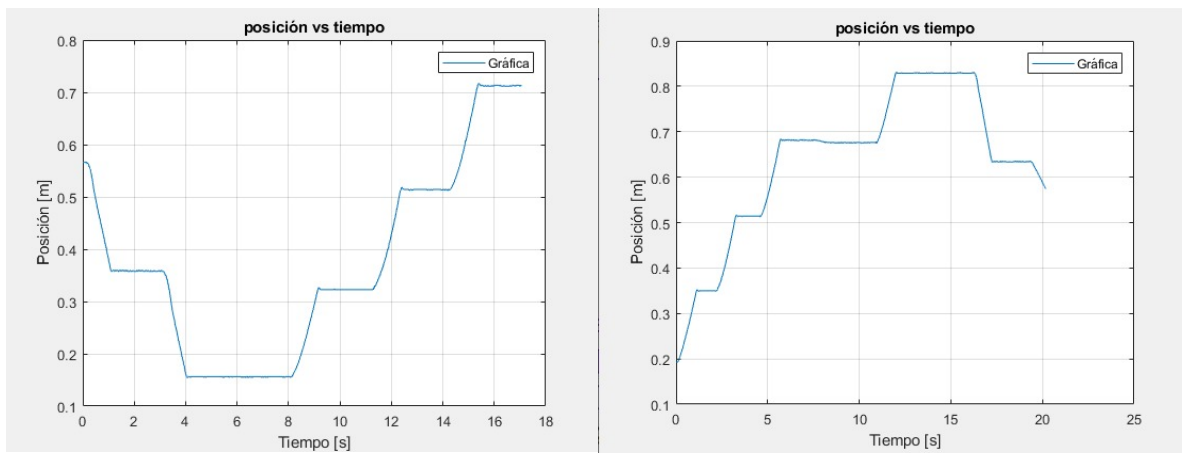
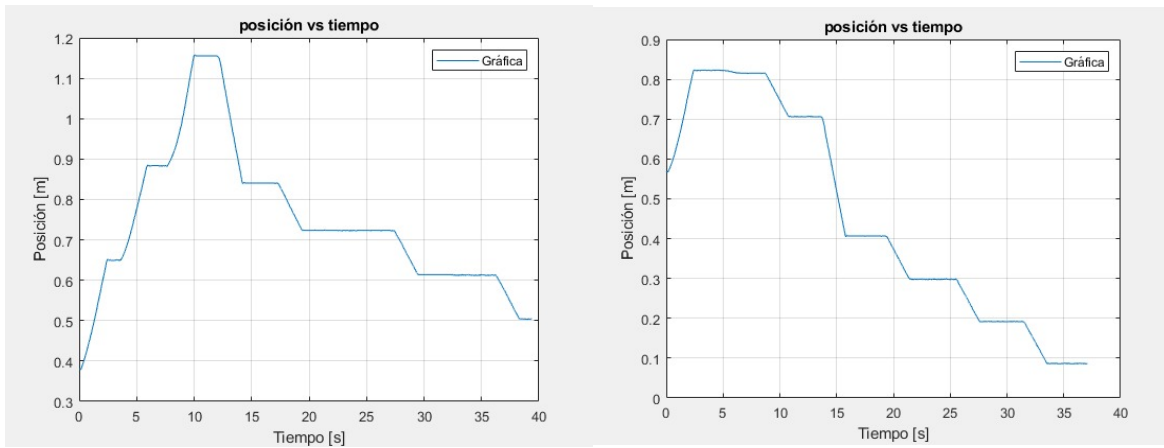


Figura 61.

Resultados experimentales con 15 milisegundos de señal.

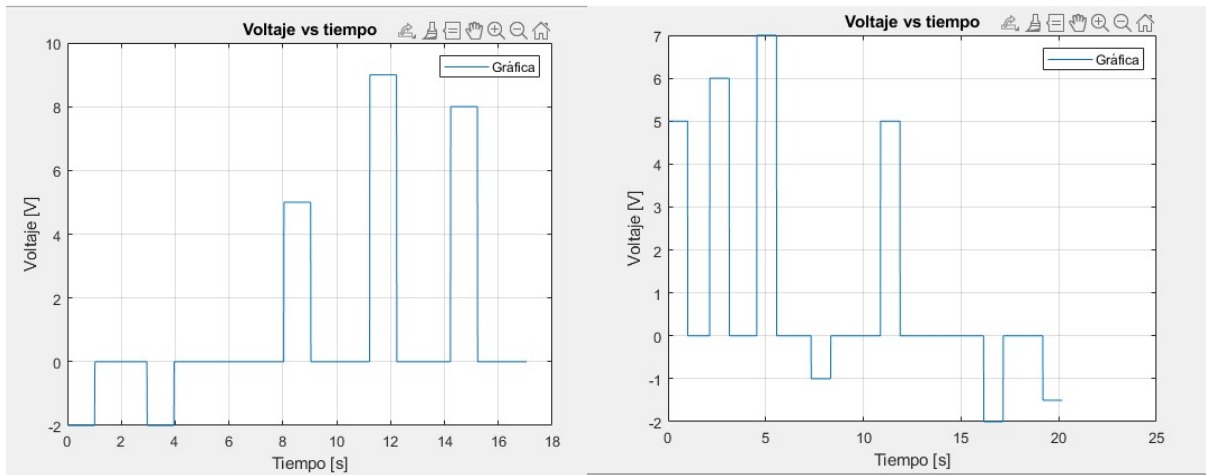


La tabla 2 y 3 presenta el tiempo requerido para que el elevador alcance una posición específica utilizando señales de voltaje predefinidas, se observa que cuanto más tiempo se deja la señal más fuerte es la respuesta del elevador, y que la señal de bajada es más fuerte que en subida en 15 milisegundos mientras que en 10 milisegundos la bajada es más controlada.

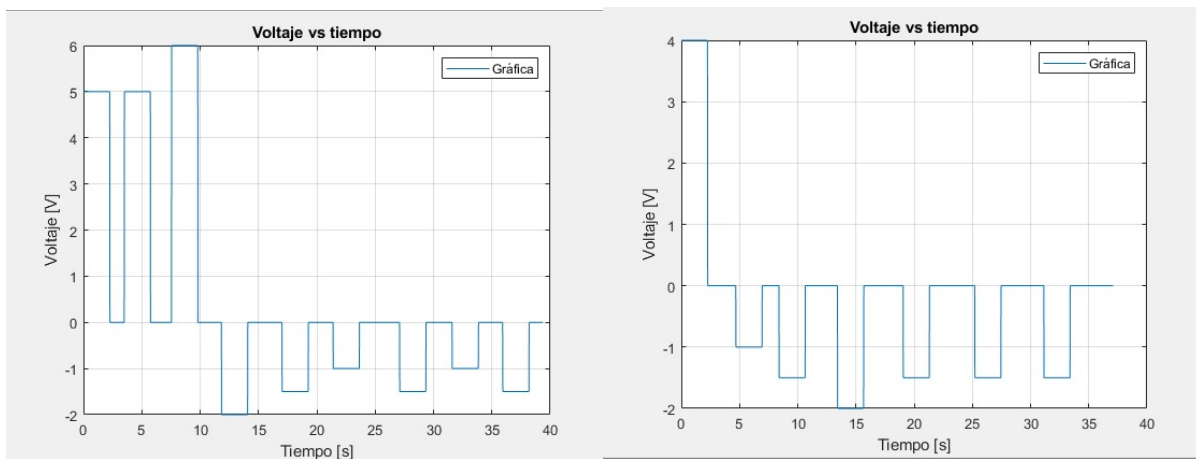
A continuación, se presentan los resultados cuando se le suministran diferentes señales de voltaje a la servoválvula.

Figura 62.

Resultados experimentales a diferentes voltajes por 10 milisegundos.

**Figura 63.**

Resultados experimentales a diferentes voltajes por 15 milisegundos.



Estos resultados indican un funcionamiento adecuado de la servoválvula, ya que no muestra sobre picos ni movimientos inconsistentes. La respuesta es uniforme y estable, tanto en la fase de ascenso como en la de descenso, así como en el estado estacionario; lo que corresponde con lo que se ve en las Tablas 2 y 3.

6.2 Parámetros encontrados

Debido a limitaciones con el uso del laboratorio de potencia fluida los últimos modelos se realizaron en Simulink, donde en la posición de origen se le ordena posicionarse a 2 metros de altura (altura máxima), lo resultados fueron los siguientes:

A partir de los resultados experimentales, se presentan los resultados obtenidos en la simulación PID realizada en Simulink, y se aproximaron los siguientes parámetros mediante la metodología de caja gris.

Figura 64.

Tabla de parámetros del PID y LQR.

Nombre	simbolo	valor
Ganancia de la servovalvula	K_v	0,1 [m/V]
Frecuencia natural	ω_v	150 [Hz]
Coficiente de amortiguamiento	ζ_v	0,7
Presión de suministro	P_s	20700000 [Pa]
Densidad	ρ	882 [Kg/m ³]
Coficiente de descarga	C_d	0,6
Gradiente de area	w	1
Modulo de Bulk	β	689000000 [Pa]
Volumen total	V_t	0,000434 [m ³]
Masa del sistema	m	85,3 [Kg]
Coficiente de amortiguación viscosa	b	0,02075
volumen por revolución	C_m	0,000097 [m ³ /rev]
Diferencial de presion (servovalvula)	δp	20 Pa
radio del tambor	y	0,3 [m]
Reductor	R	1,125
eficiencia volumetrica del motor	η_{vm}	0,92

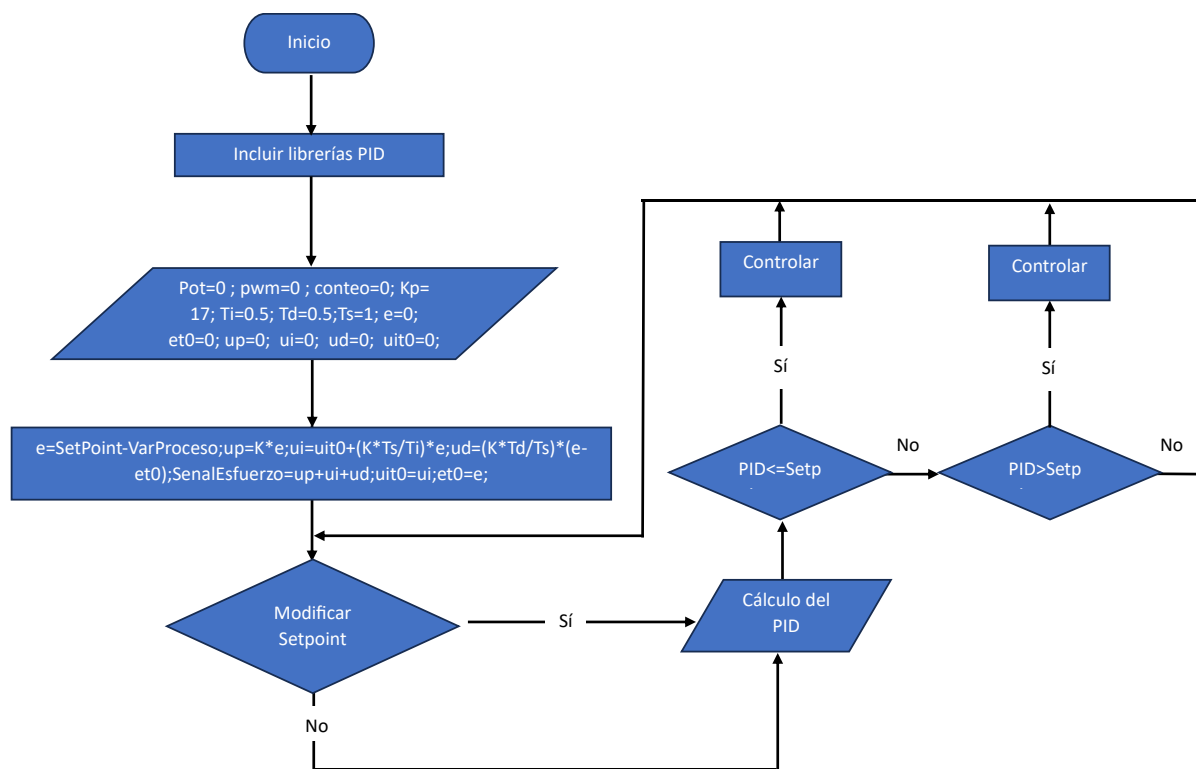
6.3 Controlador lineal PID

El controlador de posición se sintonizó empíricamente mediante la estrategia de Ziegler-Nichols en Simulink teniendo como resultado las siguientes ganancias.

$$K_{proporcional} = 17, K_{integral} = 0.5, K_{derivativa} = 0.5$$

Figura 65.

Diagrama de flujo de control PID.



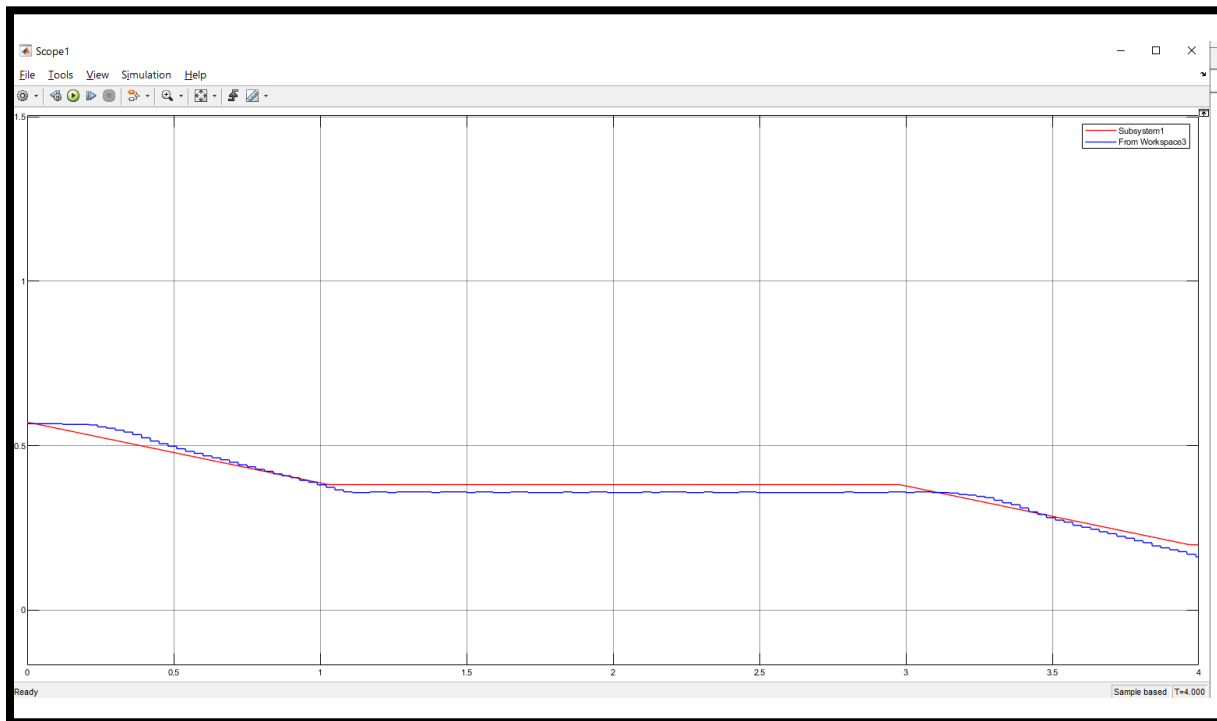
La decisión final fue implementar el controlador PID en la configuración en paralelo. Esta elección se basó en varios factores clave. En primer lugar, el sistema con el control PID demostró un rendimiento superior en las simulaciones en comparación con el control LQR. Además, durante

las pruebas en el sistema en serie se observaron algunas sobrepresiones, lo que generó preocupaciones sobre su estabilidad y seguridad. Por lo tanto, se consideró que el controlador PID en la configuración en paralelo era la opción más adecuada para lograr el funcionamiento deseado y evitar problemas de sobrepresión en el sistema hidráulico.

Después de configurar las ganancias del controlador PID y los parámetros del modelo dinámico, se procedió a simular en Simulink y nos arrojó los siguientes resultados.

Figura 66.

Comportamiento ideal vs comportamiento real



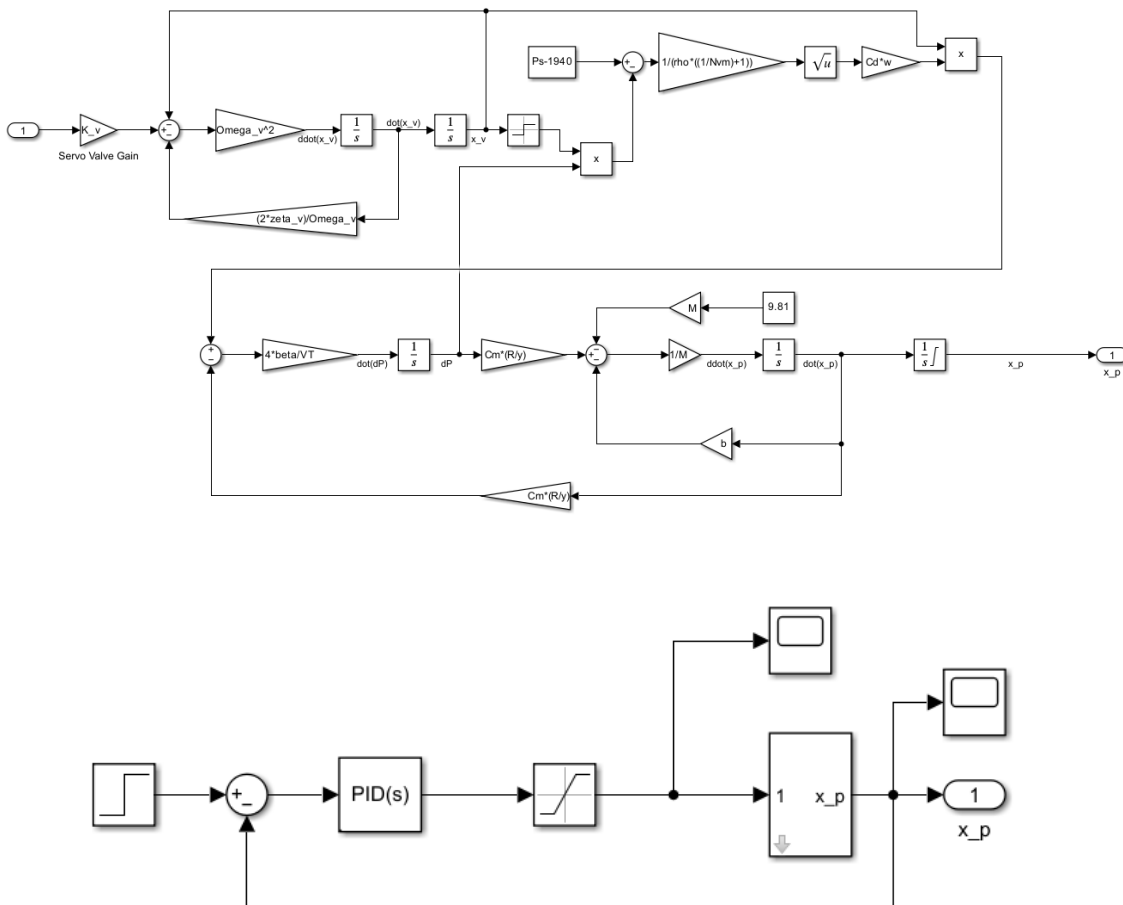
En la comparación entre el comportamiento ideal y el comportamiento real en la Ilustración 32, se puede apreciar que el control del elevador fue efectivo, ya que la diferencia o error observado no es sustancialmente grande en relación con el comportamiento real del elevador.

La línea roja indica el comportamiento ideal del control de posición y la línea azul indica el comportamiento real de la simulación, esta simulación se hizo en un tiempo de 4 segundos para evitar acumular el error.

A continuación, se presenta el modelo dinámico en Simulink del elevador hidráulico y el sistema en lazo cerrado con el controlador PID implementado.

Figura 67.

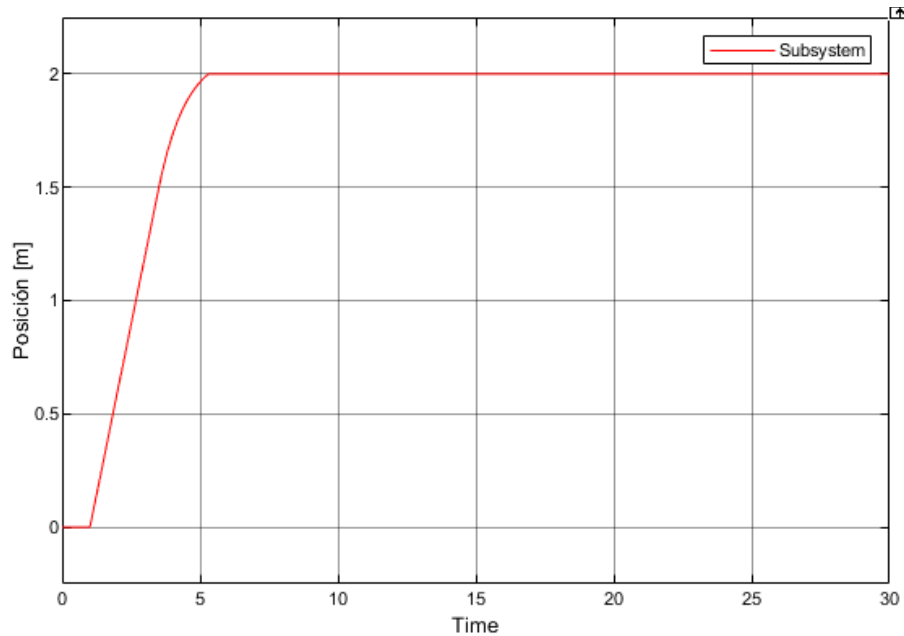
Simulación PID.



Los resultados de la simulación PID alcanzan los objetivos planteados, se estabiliza en un tiempo medio de 7 segundos.

Figura 68.

Resultados PID



6.4 Controlador LQR

Para configurar el controlador LQR, es necesario inicialmente establecer las matrices del sistema a través del proceso de linealización mediante series de Taylor. Luego, estas matrices se utilizan en la ecuación matricial reducida de Ricatti para determinar los vectores de polos del sistema. Finalmente, se calculan las constantes necesarias para implementar el control LQR de acuerdo con los polos calculados.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la simulación LQR realizada en Simulink. Para el controlador LQR hace falta cumplir una función en Matlab para obtener las ganancias (KLQR), estas se obtienen a partir de unas matrices definidas específicas del sistema.

Figura 69.

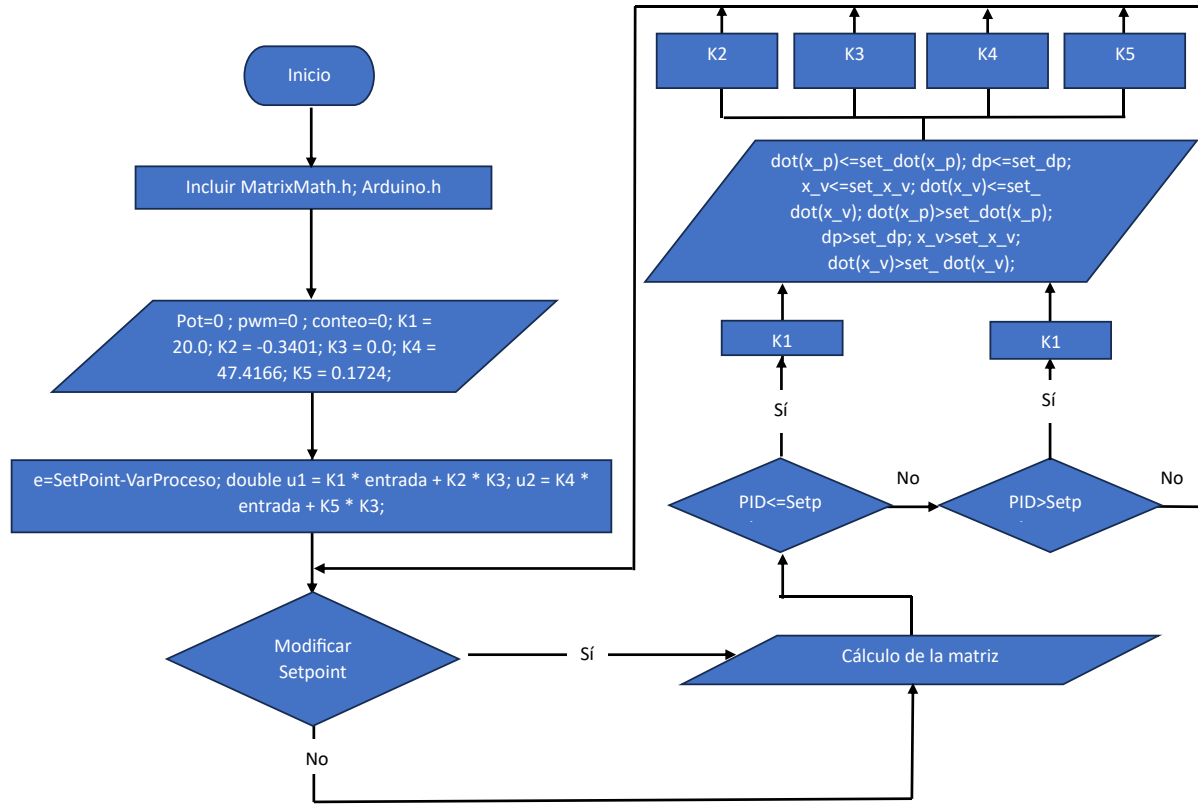
Cálculo de las constantes LQR.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001 & 0.012 & 0 & 0 \\ 0 & -6.35 \times 10^{12} & 2.34 \times 10^{-15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -22500 & -210 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.9135 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.34 \times 10^{-15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R = 0.0025$$

Figura 70.

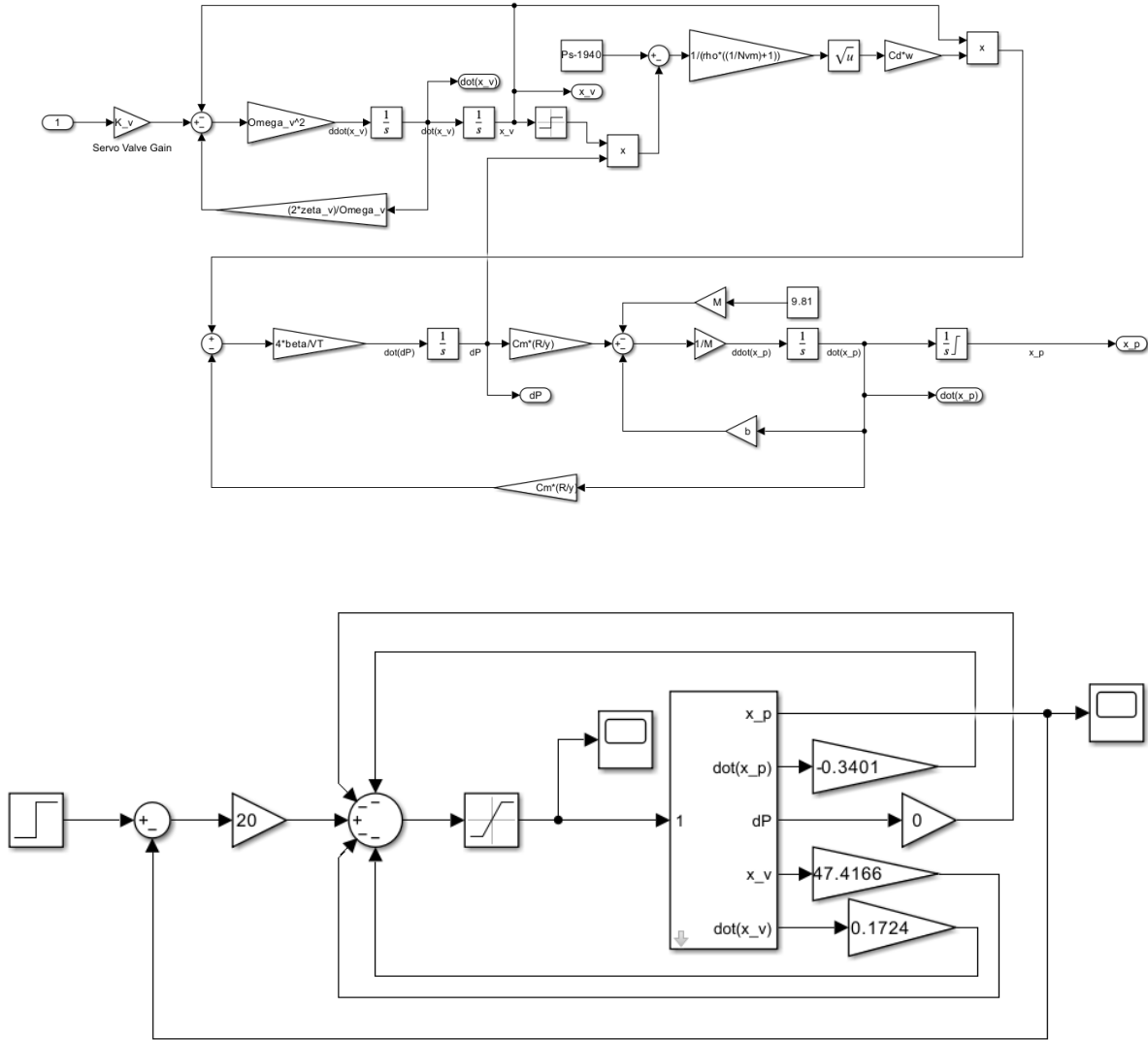
Diagrama de flujo de ccontrol LQR



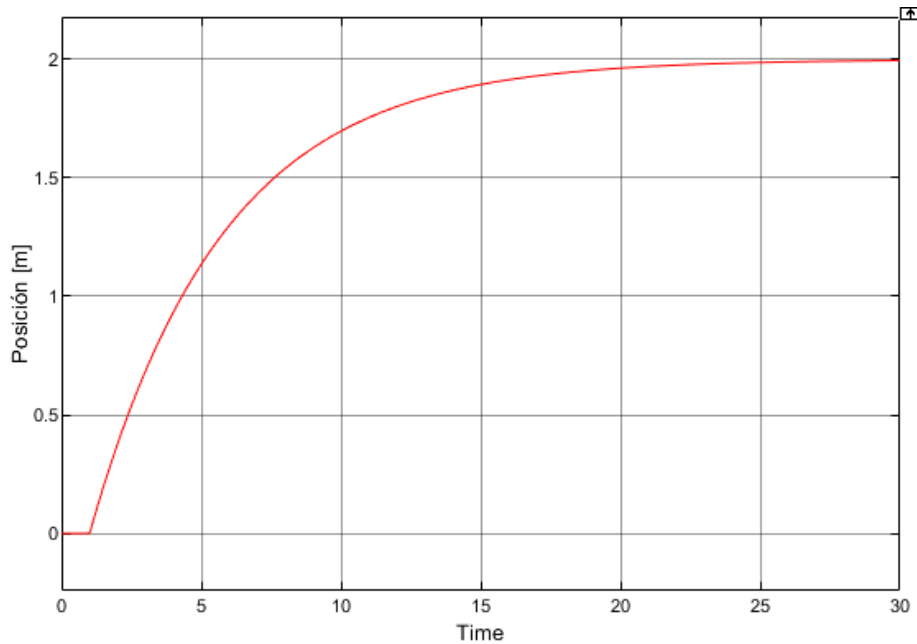
Luego de identificar las constantes para el control LQR se planteó el modelo dinámico en Simulink de la siguiente manera.

Figura 71.

Simulación LQR.



Los resultados de la simulación LQR alcanzan los objetivos planteados, se estabiliza en un tiempo medio de 25 segundos.

Figura 72.*Resultados LQR.*

7. Conclusiones

Se logró una exitosa regulación del elevador hidráulico mediante la utilización de la servoválvula, cumpliendo así con el objetivo general 3.1” Controlar un elevador de plataforma en voladizo accionado por dos motores hidráulicos conectados en serie y en paralelo, implementando estrategias lineales para el laboratorio de potencia fluida.”. En subida se comportó bien en las pruebas, como se puede ver en la tabla 2 y 3, sin embargo, en bajada los resultados fueron más variados, pues mientras que en los ensayos a 10 milisegundos el comportamiento fue muy leve, en

los resultados a 15 milisegundos se ve que fue más fuerte el movimiento. No obstante, se aconseja no implementar el sistema en serie debido a la generación de sobrepresiones.

Se ha conseguido proponer un banco desmontable como se ve en la Ilustración 30, que permite a los estudiantes elegir entre el uso de la servoválvula, que ofrece ventajas mecánicas de control y precisión además de ser económicas en términos de consumo, que la convierte en lo más atractivo para las grandes industrias, o la simplicidad de una válvula direccional ON/OFF según su criterio, cumpliendo así con el objetivo específico 3.2.1.

Se ha logrado la formulación matemática del modelo del elevador, basada en ecuaciones de potencia fluida y dinámica como se ve en las ecuaciones 28, 29, 30 y 31, así como sus respectivos modelos dinámicos en Simulink como se ve en las Ilustraciones 33 y 37, cumpliendo satisfactoriamente con el objetivo específico 3.2.2 “Modelar matemáticamente el elevador usando ecuaciones de potencia fluida y dinámica.”.

Se implementaron con éxito dos estrategias de control como se planteó en el objetivo específico 3.2.3 para la elevación de la plataforma como se ve en las Ilustraciones 34 y 38: Las técnicas PID que se sintonizaron con unas ganancias $K_p=17$, $K_i=0.5$ y $K_d=0.5$. También se utilizó la técnica LQR que mediante unas matrices se obtuvieron sus K_{LQR} $K_1=20$, $K_2=-0.3401$, $K_3=0$, $K_4=47.4166$ y $K_5=0.1724$, que son necesarias para su modelamiento como se ve en la Ilustración 36. Todos los modelos fueron basados en técnicas lineales y resultaron ser bastante precisas. No obstante, se aconseja utilizar el control PID que resultó ser más efectivo que el LQR en cuanto a la estabilización en los resultados como se ve en la Ilustración 32, 34 y 38.

Se logró desarrollar una herramienta educativa beneficiosa para la comunidad universitaria, cumpliendo con el objetivo específico 3.2.4 “Elaborar un instructivo que permita el manejo y uso del banco de elevación de carga como herramienta educativa.”.

Referencias Bibliográficas

- Concordia., R. d. (2020). *Revista de la Universidad la Concordia.* . Obtenido de Técnicas de la investigación. Revista de la Universidad la Concordia. 2020.: <https://universidadlaconcordia.edu.mx/blog/index.php/tecnicas-de-investigacion/#:~:text=Las%20t%C3%A9cnicas%20de%20investigaci%C3%B3n%20son,conocimiento%20para%20resolver%20nuestras%20preguntas.>
- GASKETS. (Febrero de 2017). *Potencia de fluidos.* LAYGO® GASKETS. Barcelona, España. Obtenido de Potencia de fluidos. LAYGO® : <https://laygo.es/aplicaciones/potencia-fluidos/#:~:text=La%20potencia%20de%20fluido%20es,los%20sistemas%20hidr%C3%A1ulicos%20se%20sobrecalienten>
- Martínez Camargo D. M, R. A. (Julio 1, 2001.). CONTROL DE POSICIÓN DE UN SISTEMA HIDRÁULICO MEDIANTE UN CONTROLADOR PID DIGITAL: Metodología Teórico Experimental. . *CONTROL DE POSICIÓN DE UN SISTEMA HIDRÁULICO MEDIANTE UN CONTROLADOR PID DIGITAL.*:
- MATA, M. C., & MACASSI, S. (1997). Cómo elaborar muestras para los sondeos de audiencias. . En M. C. MATA, & S. MACASSI, *Cómo elaborar muestras para los sondeos de audiencias.* (1ª ed.). Quito: Editorial Aler.
- MathWorks. (2023). *Diseño e implementación de controladores PID.* Obtenido de https://la.mathworks.com/discovery/pid-control.html?s_tid=srchtitle_PID_5

- NEIL, D., & CORTEZ, L. (2018). Procesos y fundamentos de la investigación científica. En D. NEIL, & L. CORTEZ, *Procesos y fundamentos de la investigación científica (1ª ed.)*. Machala: Editorial UTMACH.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid (España): PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- PARKER. (2022). Tecnología oleohidráulica industrial. En PARKER, *Tecnología oleohidráulica industrial. (1ª ed.)*. Orlando, Florida.: Editorial Motion & Control.
- PINEDA, B., DE ALVARADO, E. L., & DE CANALES, F. (1994). Metodología de la investigación, manual para el desarrollo de personal de salud. En B. PINEDA, E. L. DE ALVARADO, & F. DE CANALES, *Metodología de la investigación, manual para el desarrollo de personal de salud. (2ª ed.)*. Washington. : Editorial Organización Panamericana de la Salud.
- Pinilla., C. B. (2018). *DYNAMIC MODEL AND CONTROL DESIGN FOR A NONLINEAR HYDRAULIC*. Pittsburgh, PA, USA: International Mechanical Engineering Congress and Exposition.
- S., N. N. (2006). Sistemas de control para ingeniería. (3ª ed.) . En N. N. S., *Sistemas de control para ingeniería. (3ª ed.)*. México: Editorial Continental.
- sites., G. (2016). *Sistema de control manual y automático. Tecnología de control*. Obtenido de Sistema de control manual y automático. Tecnología de control Google sites. : <https://sites.google.com/site/tecnologiadecontrol2016/control-manual>
- Solorzano, R. (5 de Junio de 2016). *Principios Ingenieriles Básicos - Bombas Hidráulicas*. Obtenido de Power & Motion: <https://www.powermotiontech.com/hp-en-espanol/article/21886594/principios-ingenieriles-bsicos-bombas-hidrulicas>

- Solorzano, R. (30 de Junio de 2017). *Principios Ingenieriles Básicos: Válvulas de Control de Flujo*. Obtenido de Principios Ingenieriles Básicos: Válvulas de Control de Flujo. Power & Motion, Ricardo Solorzano. : <https://www.powermotiontech.com/hydraulics/hydraulic-valves/article/21887396/principios-ingenieriles-bsicos-ylvulas-de-control-de-flujo>
- Solorzano., R. (21 de Junio de 2019). *Principios Ingenieriles Básicos: Motores Hidráulicos*. Obtenido de Principios Ingenieriles Básicos: Motores Hidráulicos. Power & Motion, Ricardo Solorzano. : <https://www.powermotiontech.com/hp-en-espanol/article/21886595/principios-ingenieriles-bsicos-motores-hidrulicos>
- Vickers. (1999). Manual de oleohidráulica industrial. En Vickers, *Manual de oleohidráulica industrial*. Eden Prairie, Minnesota: Editorial Eaton Hydraulics Training.
- Zarraga., J. J. (Julio 30, 2022.). II SIMPOSIO DE ELECTRÓNICA APLICADA A LA INDUSTRIA 2021-UTS – ingeniería de control. . *ELECTRÓNICA APLICADA A LA INDUSTRIA*. Bucaramanga, Colombia.

Apéndices

Apéndice A. Catálogo general Vickers

Vickers®

Proportional Valves

**Proportional Directional and Throttle Valves – Solenoid Operated**

KDG4V-3S and KTG4V-3S standard performance series
K(A)DG4V-3 and K(A)TG4V-3 high performance series
ISO 4401-03 (NFFA D03) – Pressures to 350 bar (5075 psi)

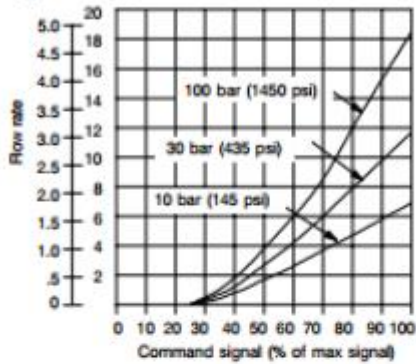


KDG4V-3S Flow Gain Curves

At the stated valve pressure drops, the percentage command signals are applicable to whichever solenoid is energized.

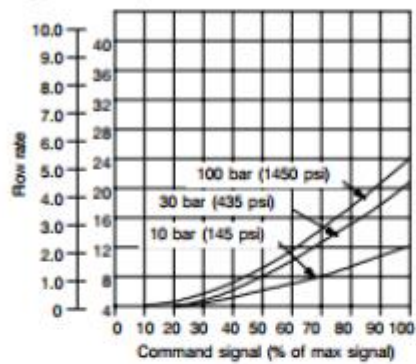
Looped Flow Path

USgpm l/min Spool "2C08S" P=A or B plus B or A=T

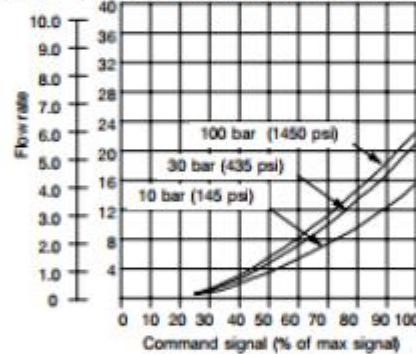


Looped Flow Path

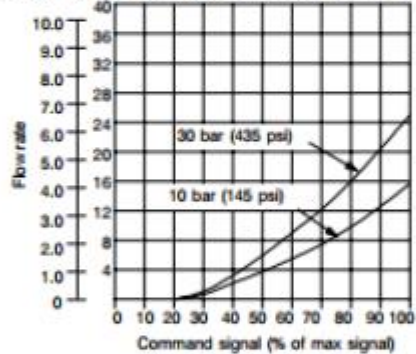
USgpm l/min Spool "2C08N" P=A or B, or A or B=T



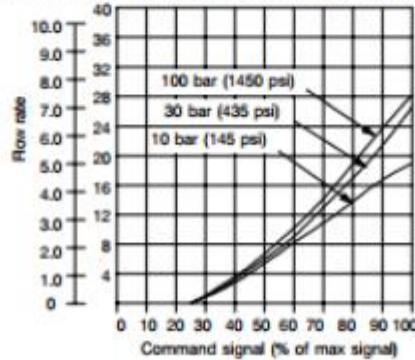
USgpm l/min Spool "2C16S" P=A or B plus B or A=T



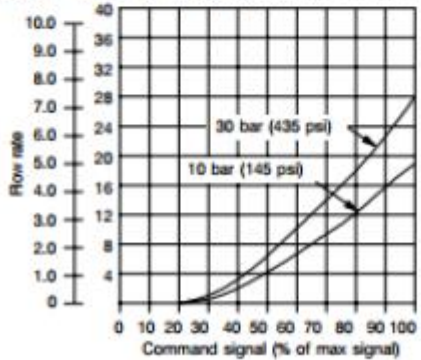
USgpm l/min Spool "2C16N" P=A or B, or A or B=T



USgpm l/min Spool "2C19S" P=A or B plus B or A=T



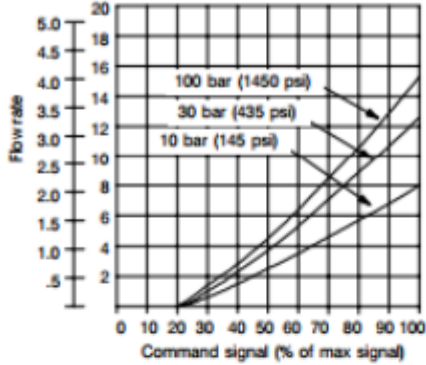
USgpm l/min Spool "2C19N" P=A or B, or A or B=T



At the stated valve pressure drops, the percentage command signals are applicable to whichever solenoid is energized.

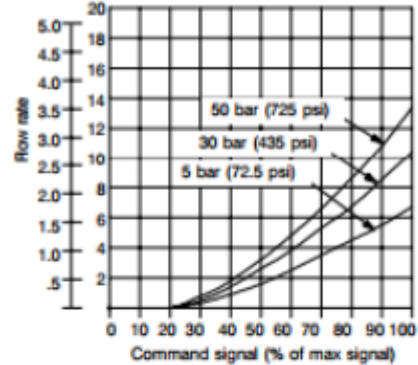
Looped Flow Path

USgpm /lmin Spool "33C08A" P=A or B plus B or A=T

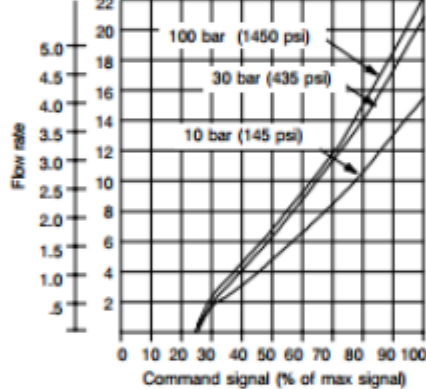


Single Flow Path

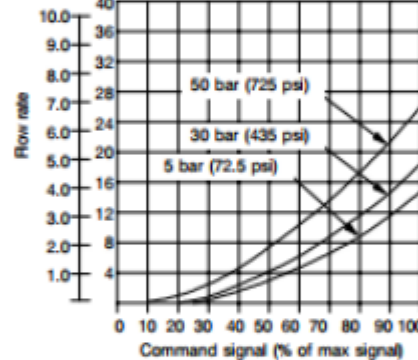
USgpm /lmin Spool "2C08N" P=B or A=T



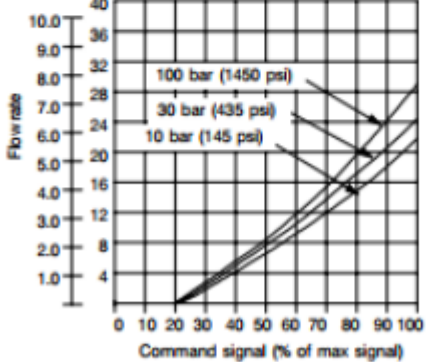
USgpm /lmin Spool "33C15A" P=A or B plus B or A=T



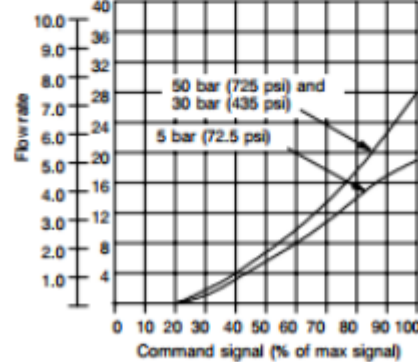
USgpm /lmin Spool "2C15N" P=B or A=T



USgpm /lmin Spool "33C22A" P=A or B plus B or A=T



USgpm /lmin Spool "2C19N" P=B or A=T



Apéndice B. Válvula proporcional vickers.

Vickers®

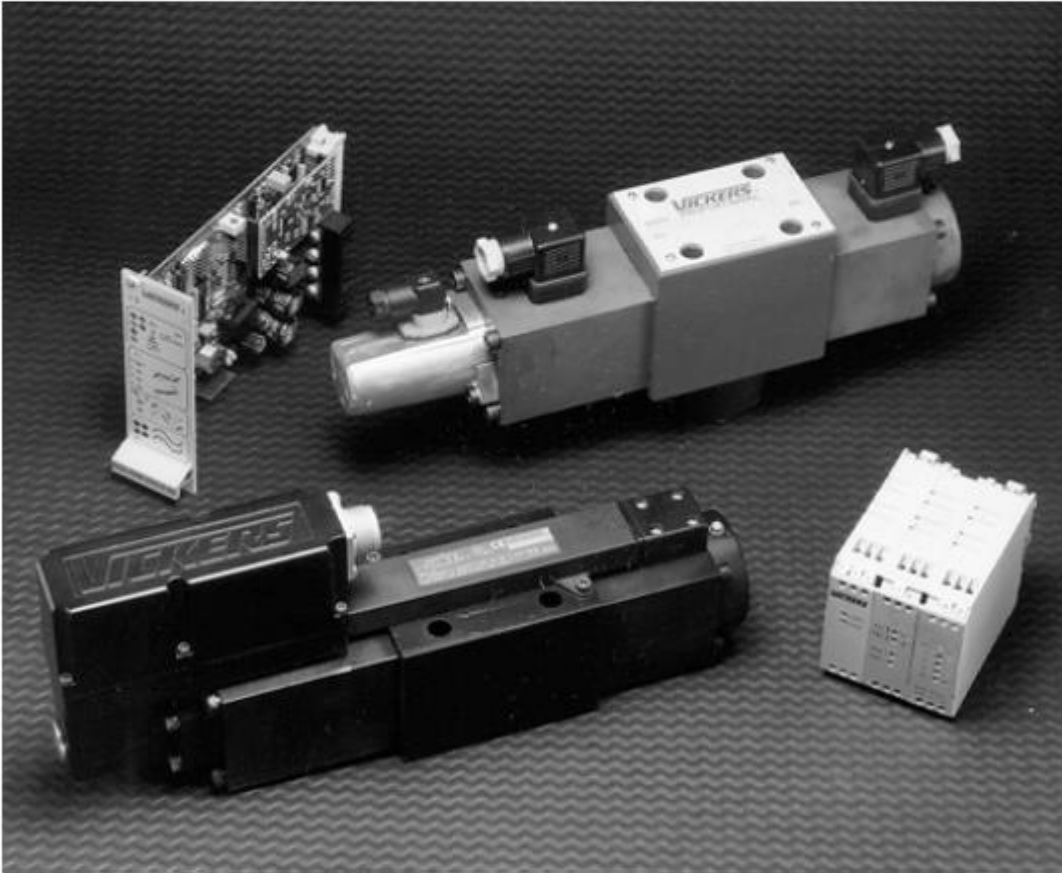
Proportional Valves

Eaton Vickers KFDG4V-5
Eaton Vickers KFTG4V-5
Eaton Vickers KBFDG4V-5
Eaton Vickers KBFTG4V-5

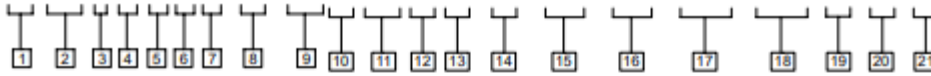
www: www.salushydraulics.pl
e-mail: pl@salushydraulics.pl
shop/sklep: www.sklep.salushydraulics.pl

EATON

Proportional Directional Valves with Feedback
K(B)FD/TG4V-5, 1*1/2* Series
Pressures to 315 bar (4500 psi)



K (B)F * G4 V - 5 - ** * ** * ** - Z - (V) - (M) - (U1) - (*) - H - * - ***



1 Valve type

K – Proportional valve

2 Integral amplifier

B – Integral amplifier "B" series
Omit for models *without* integral amplifier

3 Feedback arrangement

F – Spool position

4 Control type

D - Directional valve
T - Throttle valve

5 Mounting

G – Subplate mounted

6 Operation

4 – Solenoid operated

7 Pressure rating

V – 315 bar (4500 psi) on ports P,A, & B

8 Interface

5 – ISO 4401, size 05-04-0-94
ANSI/B93.7M-Size 05

9 Spool type (center condition) (see spool data, page 5)

2 – Closed center (all ports)
33 – P port closed, bleed A & B to T

10 Spool/spring arrangement

B – Spring centered single solenoid valve (solenoid "B" only) Solenoid "A" for "V" version
C – Spring centered, dual solenoid

11 Spool flow rating

$\Delta p = 5$ bar (75 psi) per metering flow path, e.g. B to T For actual maximum flow refer to power capacity envelope curves page 8).

30 – 30 L/min (7.9 USgpm) ▲
50 – 50 L/min (13.2 USgpm) ▲
65 – 65 L/min (17.2 USgpm) □
70 – 70 L/min (18.5 USgpm) ▲■
▲ Meter-in/meter-out
□ Meter-out only
▲■ Type-2 spool only

12 Spool metering type

N – Meter-in and meter-out
S – Meter-out only

13 Flow rating ("B" port flow for asymmetric spools) K(B)FDG valves only

25 – 25 L/min (6.6 USgpm)
(50N25 only)

Omit for symmetrical spool

14 Manual overrides

Z – No manual overrides

15 Solenoid energization identity

(non-integral amplifier types only, omit for valves with integral amplifier)

V – Solenoid "A" is at port "A" end and Solenoid "B" is at port "B" end independent of spool type
Blank US ANSI B93.9 standard (energize solenoid "A", flow symbol is (P→A))

16 LVDT plug

(omit for valves with integral amplifier)
M – Standard LVDT (mating plug supplied)

17 Solenoid connector

(omit for valves with integral amplifier)
U1 – ISO 4400/DIN 43650, non-integral amplifier type only (mating plug supplied)

18 Electrical connection (KBF valves only)

PC7 – 7 pin connector without plug
PE7 – 7 pin electrical plug with mating half
PH7 – As PE7 but with pin "C" used for enable signal
PR7 – As PC7 but with pin "C" used for enable signal

19 Coil rating

H – 24 VDC amplifier supply

20 Port T pressure limit code

6 – for 2C**S spools
7 – for all other spools

21 Design number

1* and 2* series. Subject to change

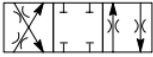


Warning
Valves with integral amplifiers are supplied with or without the metal 7-pin plug. The Vickers plug, part no. 934939, must be correctly fitted to ensure that the EMC rating and IP67 rating are achieved. The plug retaining nut must be tightened with a torque of 2-2,5 Nm (1.5-2.0 lbf ft) to effect a proper seal.

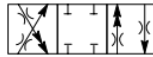
Spool Symbols

Available Spools for K(B)FDG4V-5

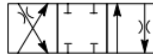
Spool type 2C**N, meter-in/meter-out



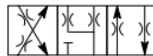
Spool type 2C50N25, assymetric flow



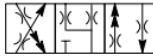
Spool Type 2C65S, meter-out only



Spool type 33C**N, meter-in/meter-out



Spool type 33C50N25, assymetric flow



Available Spools for K(B)FTG4V-5

Spool type 2B**N, meter-in/meter-out



Spool Types and Flow Ratings

Symmetric Spools

Base line starting at $\Delta p = 5$ bar (75 psi) per metering flow path, e.g. B to T. For actual maximum flow refer to power capacity envelope curves.

Spool code	Spool symbol	Flow rating
For K(B)FDG4V-5 valves:		
2C30N	2C	30 L/min (7.9 USgpm)
2C50N	2C	50 L/min (13.2 USgpm)
2C65S	2C	65 L/min (17.2 USgpm)
2C70N	2C	70 L/min (18.5 USgpm)
33C30N	33C	30 L/min (7.9 USgpm)
33C50N	33C	50 L/min (13.2 USgpm)
For K(B)FTG4V-5 valves:		
2B30N	2B	30 L/min (7.9 USgpm)
2B50N	2B	50 L/min (13.2 USgpm)
2B70N	2B	70 L/min (18.5 USgpm)

Asymmetric Spools

Figure preceding metering type designator, "N" (e.g. 2C***N) is flow rating P-A, or A-T ("A" port flow); figure after "N" (N***) is flow rating P-B, or B-T ("B" port flow).

Spool code	Spool symbol	Flow rating
For K(B)FDG4V-5 valves:		
2C50N25	2C	50 L/min (13.2 USgpm), "A" port flow 25 L/min (6.6 USgpm), "B" port flow
33C50N25	33C	50 L/min (13.2 USgpm), "A" port flow 25 L/min (6.6 USgpm), "B" port flow

Operating Data

Valves w/o integral amplifier

KFD/TG4V-5 Valves without integral amplifier (requires a Eurocard amplifier, refer to Supporting Products)

Data is typical with fluid at 36 cSt (168 SUS) and 50°C (122°F).

Max current, at 50° C (122° F) ambient	2,7 A
Coil resistance, at 20° C (68° F)	2,80Ω
Step response: Step size (% of max spool stroke): 0 to 100% 100% to 0 +90 to -90% (KFDG4V-5 only)	Time to reach 90% of required step: 31 ms 30 ms 45 ms
Type of protection, with electrical plugs fitted correctly	IEC 144, Class IP67
Electromagnetic compatibility (EMC) Emission (10V/m) Immunity (10V/m)	EN 50081-2 EN 50082-2
Maximum allowable ambient air temperature Maximum allowable oil temperature	60° C (140° F) 60° C (140° F)
Supporting products: Eurocard amplifiers EEA PAM 535 A/B/C/D/E/F	See catalog GB 2464

KFD/TG4V-5 and KBFD/TG4V-5 Valves (all valves)

Relative duty factor	Continuous rating (ED = 100%)
Hysteresis with flow through P-A-B-T	< 1% of max stroke (center-to-offset)
Mass: KFDG4V-5 KBFDG4V-5 KFTG4V-5 KBFTG4V-5	7,2 kg (15.86 lb) approx. 7,6 kg (16.76 lb) approx. 5,5 kg (12.10 lb) approx. 5,9 kg (13.00 lb) approx.
Portable test equipment EHA TEQ 700 A 20 EBA TEQ 706 A 10	See catalog GB 2462 See catalog GB 2315

Pressures and Flow Rates

Maximum pressures, bar (psi)

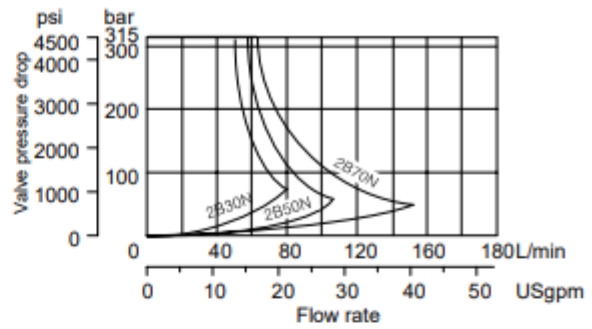
Model	Port L condition	Ports P, A, B	T	L
All models for normal usage (L port not connected)	Normally blocked by mounting surface	315 (4500)	160 (2300)	160 (2300)
For K(B)FDG4V-5-**C**N-Z models only, a higher "T" port pressure is allowed if the "L" port is connected directly to tank	Drained directly to tank	315 (4500)	210 (3000)	10 (150)

Power Capacity Envelopes

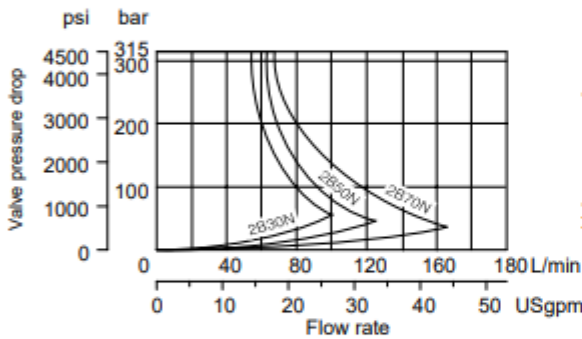
Single solenoid models:
K(B)FTG4V-5
 Spool types as noted

Subject to maximum pressure limitations according to model type.
 See "Maximum Pressures" on page 7.

Looped Flow Path

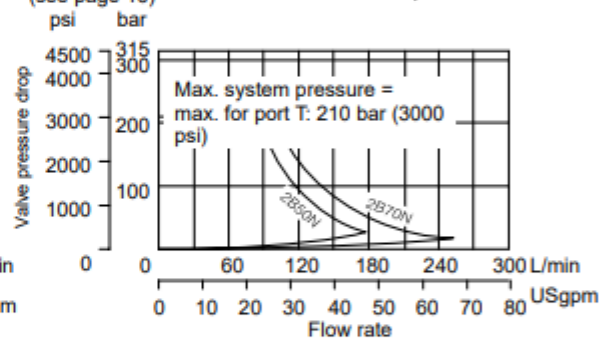
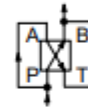


Single Flow Path



Parallel Flow Path use

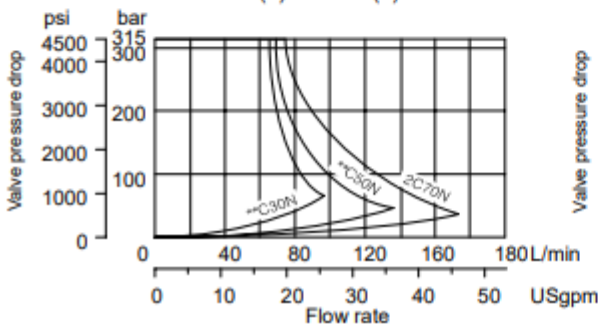
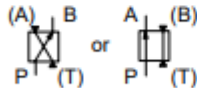
parallel flow path module:
 KDGMA-5-616877-10R or
 KDGMA-5-02-139150-10S
 (see page 16)



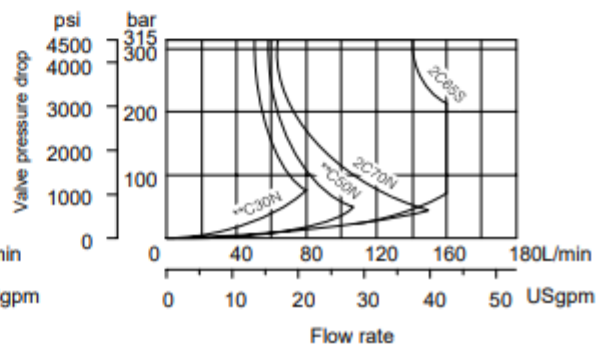
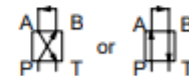
Double Solenoid Models:

K(B)FDG4V-5
 Spool types as noted

Single Flow Path



Looped Flow Path



Flow Gain

K(B)FD/TG4V-5

Spool types as noted

Single flowpath (e.g. P-A) pressure drop, $\Delta p = 5 \text{ bar (75 psi)}$.

When using the single solenoid throttle valve (K*FT), a dual flowpath module (page 16) can be used to approximately double the flow rate.

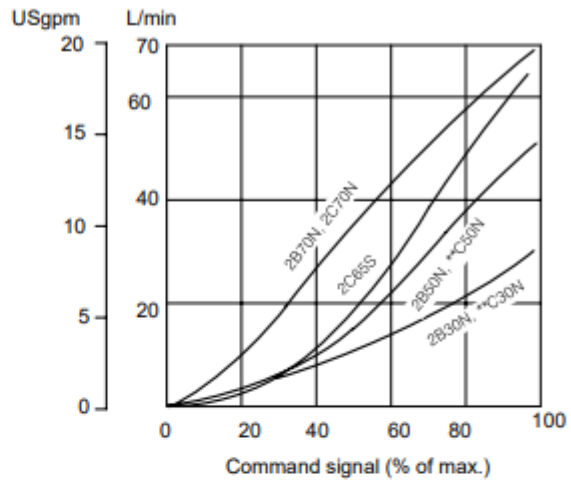
Curves shown include deadband compensation provided for the KF valve by the Vickers Eurocard Amplifier EEA-PAM-535*-32 (user adjustable).

KB valves are preset at the factory to compensate for the effect of spool overlap.

■ At other Δp values and within the power capacity envelopes, flow rates approximate to:

$$Q_x = Q_d \sqrt{\frac{\Delta p_x}{\Delta p_d}}$$

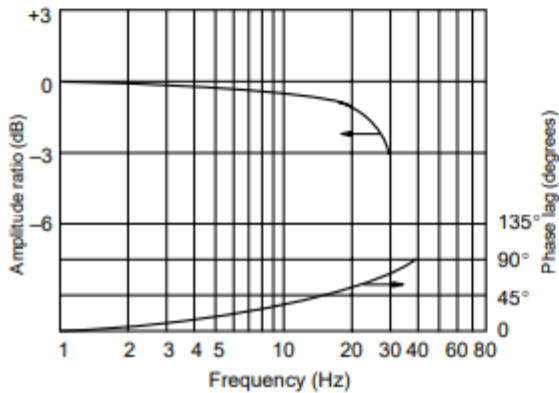
where Q_d = Datum flow rate
 Δp_d = Pressure drop at datum flow rate
 Δp_x = Required Δp



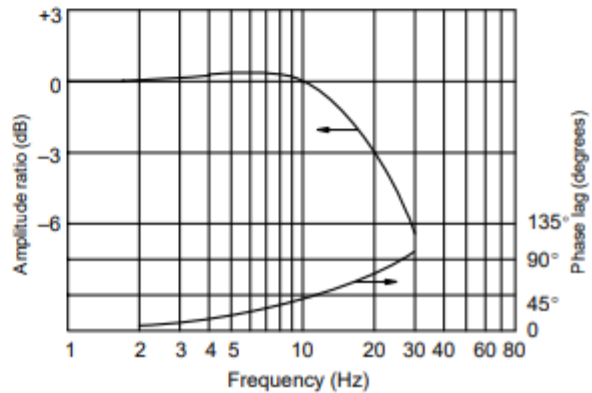
Frequency Response (Typical)

For an amplitude of $\pm 25\%$ max. stroke about the 50% position, at Δp (P-B) = 5 bar (75 psi)

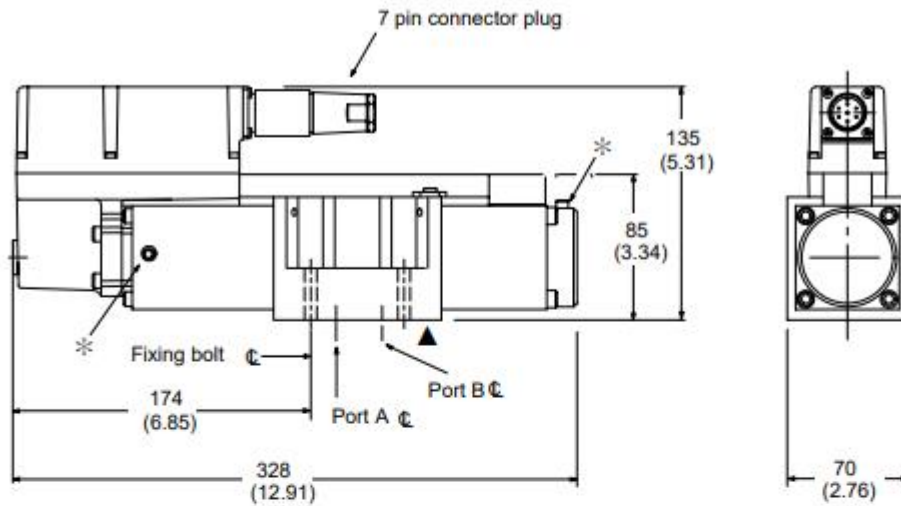
KBFD/TG4V-5



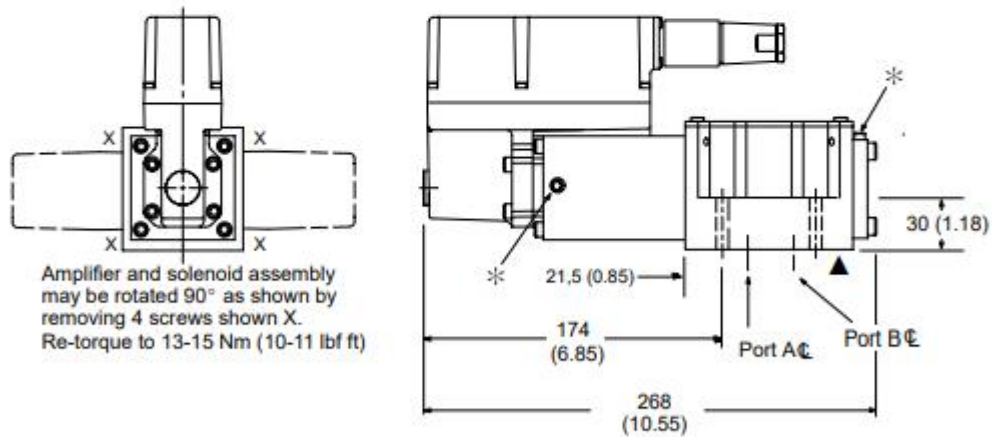
KFD/TG4V-5



KBFDG4V-5
mm (inch)



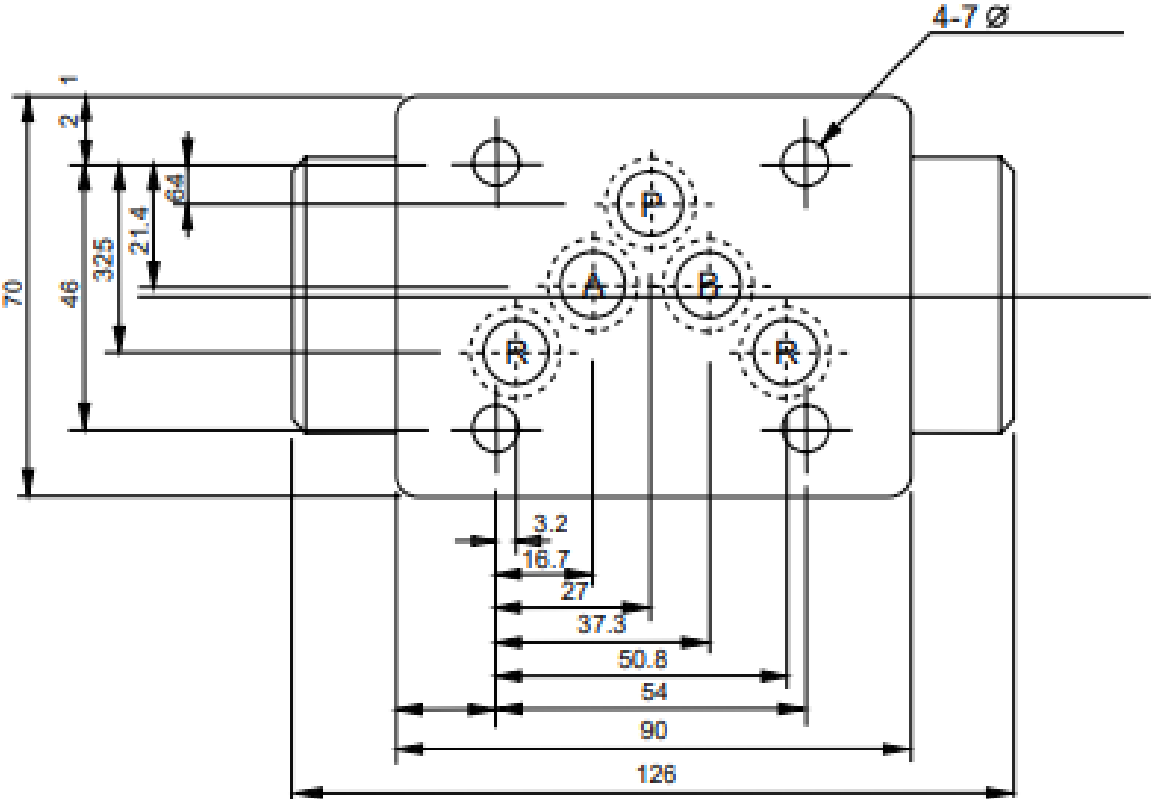
KBFTG4V-5



Warning
Valves with integral amplifiers are supplied with or without the metal 7-pin plug. The Vickers plug, part no. 934939, must be correctly fitted to ensure that the EMC rating and IP67 rating are achieved. The plug retaining nut must be tightened with a torque of 2,0-2,5 Nm (1.5-2.0 lbf ft) to effect a proper seal.

*Note: Bleed screw locations *Air bleed, Socket Head Cap Screw. Torque to 2,5-3,0 Nm (2.0-2.5 lbf ft)*

▲ Mounting surface seals supplied. For Mounting surface dimensions and sub-plate options see page 12, Subplates and mounting surfaces.



Apéndice C. Catálogo de sensor de posición.

JARED GEERT

Pull rope type Displacement sensor WPS-S

Reasonable design
High precision

Long life span

After-sales

WPS-S-1000mm-A2
Black 4-20mA
20221102AABB

深圳市鸿镁科技有限公司

CE

20220110090

警告
请勿带电用手接触及拆卸传感器
Jared Geert Technology Co., Ltd.

Product Parameters

QUALITY
ASSURANCE



Focus on injection molding machine parts for many years

Rate of differentiation: 0.01mm0.001mm (other)

Linear accuracy: 0.25%FS0.15%FS0.05%FS

Accuracy of repetition: 0.01MM

Maximum speed: 600MM/S5M/S10M/S

Life expectancy: 5 million to 10 million times

Operating temperature: Digital: -25-80°C Analog: -45-125°C

Steel wire rope: High flexible imported plastic coated steel wire rope (0.7mm/0.8mm/1.0mm)

Case material: Imported aluminum alloy, surface oxidation treatment, anti-static anti-interference! No electricity!

Outlet tension: 5N

Level of protection: IP54IP65

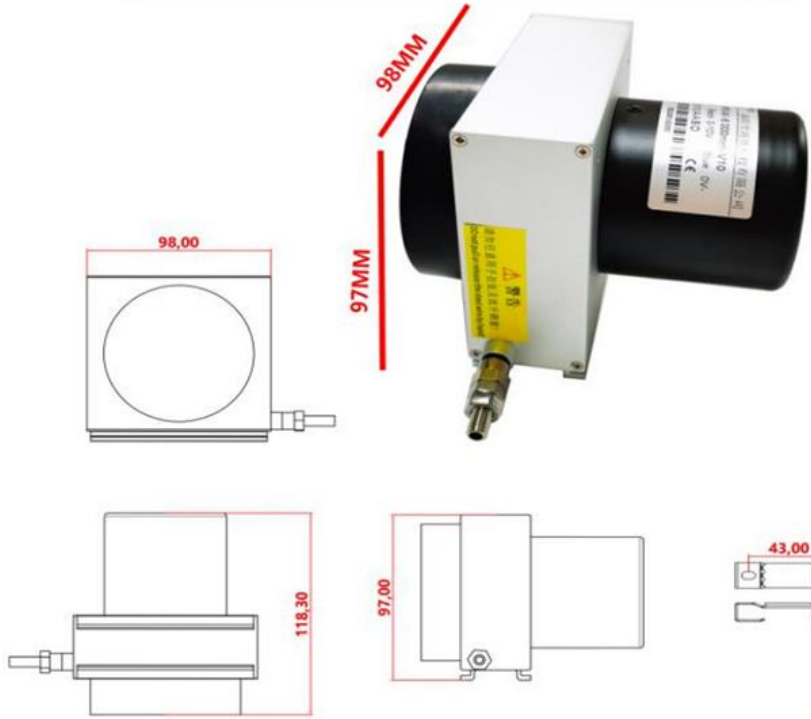
Operating voltage range: 5V 10V 8-12V 15-24V DC

1 Product cable electric color definition:

Resistance	Brown	/	Voltage	Brown	DC15-24V+
	Black	R+		Black	Output of signal
	Blue	R-		Blue	0V-
A2	Brown	DC15-24V+	A0	Brown	DC15-24V+
	Black	4-20mA output		Black	0-20mA output
	/	/		Blue	0V-
A3	Brown	DC15-24V+	A4	Brown	DC15-24V+
	Black	4-20mA output		Black	4-20mA+
	Blue	0V-		Blue	0V-
		Yellow		4-20mA-	
Pulse	Red	DC12-24V	RS232	Red	DC8-12V+
	Black	0V-		Black	0V-
	Green	A		Green	TXD
	White	B		White	RXD
	Yellow	Z		Yellow	GND
RS485	Brown	DC8-12V+			
	Black	A			
	Blue	0V-			
	Yellow	B			

* Note: Product properties for reference only, specific details can be consulted online!

Product installation size drawing and wiring diagram



Product detail drawing



Apéndice D. Catálogo conectores industriales

Industrial Connecting Solutions: Circular Connectors: MIL, DIN, Universal Connectors: Signal and Power (CA series): Cable plug and panel-mounted connector: CA 6 LS	
http://www.e-catalog.beldensolutions.com/link/57078-24228-256284-24359-24361-36077/en/conf/a1e1state	
Name	CA 6 LS
	
	Straight cable plug, integrated strain relief
Delivery informations	
Availability	available
Product description	
Description	Straight cable plug, integrated strain relief
Type	CA 6 LS
Order No.	934 126-100
Number of contacts	6 + PE
Cable gland	M 22x2
Cable diameter	6 mm to 12 mm
Conductor size	max. 0.75 mm ²
Housing Color	black
Technical data	
Pin dimensions	1.5 mm
Rated voltage	AC/DC 250 V
Rated current	10 A AC/DC
Contact resistance	<= 5 mΩ
Type of termination	solder, concave pins
Material	
Contact surface material	Ag
Contact bearer material	PA 66-GF 25
Housing material	PA 66-GF 25
O-Ring	NBR
Environmental conditions	
Protection class (IEC 60529)	IP 67
Pollution severity	3
Temperature range	-40 °C to +90 °C
Inflammability class	
Flammability, UL standard	94 V-0
Approvals	
UL	UL
VDE	VDE
Packaging unit	
Packaging unit	100 pieces
Scope of delivery and accessories	
Scope of delivery	1 cable plug, not assembled, assembly instructions
Accessories to order separately	can be plugged into CA 6 LD, CA 6 GD; cap CA 00 SD 1, order no. 831 530-400

Conectores confeccionables, universales

Cuadro general del producto

Función	Versión	Código del producto	Tecnología de conexión	Sección de cable [mm ²]	Grado de protección	Protocolo de bus/control	→ Página/Internet
Conector	Conector redondo M8						
	3 pines	NECU-S-M8G3-HX	Conector rápido – Harax®	0,1 ... 0,14 0,14 ... 0,34	IP65, IP67	–	4
	4 pines	NECU-S-M8G4-HX	Conector rápido – Harax®	0,14 ... 0,34	IP65, IP67	–	6
		NECU-S-M8G4-C2	Borne atornillado	0,14 ... 0,5	IP67	–	6
	Conector redondo M12, codificación A						
	3 pines	NECU-S-M12G3-HX	Conector rápido – Harax®	0,14 ... 0,34 0,34 ... 0,75	IP65, IP67	–	8
	4 pines	NECU-M-S-A12G4	Terminal muelle	0,14 ... 0,5	IP65, IP67	–	10
		NECU-S-M12G4-HX	Conector rápido – Harax®	0,14 ... 0,34 0,34 ... 0,75	IP65, IP67	–	10
		NECU-S-M12G4-...-IS	Borne atornillado	0,14 ... 0,5 0,75	IP65, IP67	–	10
	5 pines	FBS-M12-5GS	Borne atornillado	0,75	IP67	–	14
	Conector redondo M12, codificación B						
	5 pines	NECU-M-S-B12G5	Borne atornillado	0,14 ... 0,75	IP67	PROFIBUS	14
	Conector redondo M12, codificación D						
	4 pines	NECU-M-S-D12G4	Borne atornillado, apantallable	0,14 ... 0,75	IP67	Ethernet	10
	Conector de diseño rectangular						
	4 pines	NECU-S-ECG4	Conector IDC	0,14	IP40	–	16
	7 pines	NECU-L3G7-C1	Terminal muelle	0,2 ... 2,5	–	–	18
	8 pines	NECU-L3G8-C1	Terminal muelle	0,2 ... 2,5	–	–	19
		NECU-L3G8-C2	Borne atornillado	0,2 ... 2,5	–	–	19
	Conector Sub-D						
	9 pines	NECU-S1W9-C2-APB	Borne IDC	0,08 ... 0,5	IP20	PROFIBUS	21

Cuadro general del producto

Función	Versión	Código del producto	Tecnología de conexión	Sección de cable [mm ²]	Grado de protección	Protocolo de bus/control	→ Página/Internet
Zócalo	Conector redondo M12						
	4 pines	SIE FBSD	Borne atornillado	0,25 ... 0,75	IP67	–	23
		5 pines	NECU-M-B12G5 FBSD-GD-9-5POL	Borne atornillado	0,14 ... 0,75	IP67	–
	Conector redondo 7/8"						
	4 pines	NECU-G78G4	Borne atornillado	máximo 1,5	IP67	–	27
	5 pines	NECU-G78G5	Borne atornillado	máximo 1,5	IP67	–	29
	Conector push-pull						
	5 pines	NECU-M-PPG5PP	Terminal muelle	0,75 ... 2,5	IP65, IP67	PROFINET	31
	Conector Sub-D						
	9 pines	NECU-S1W9-C2-ACO	Borne atornillado, apantallable	0,14 ... 0,5	IP20	CANopen	33

Apéndice E. Motor hidráulico Eaton serie 25m

Operating Specifications

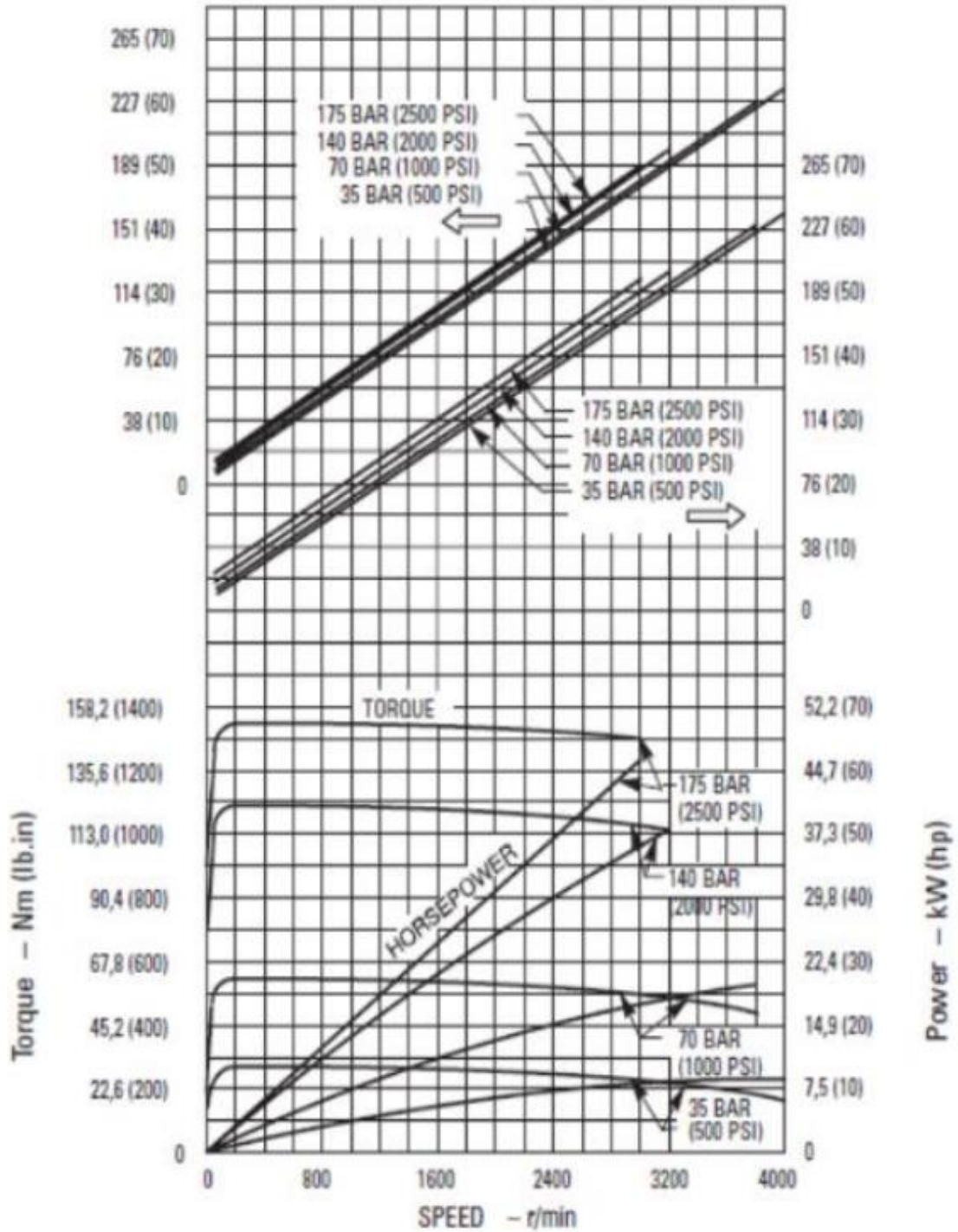
Model Series	Torque Nm/6,9 bar (lb. in./100 psi)	Displacement cm ³ /r (in ³ /r)	Flow Input @ 1200 r/min L/min (USgpm)	Max. Torque Nm (lb. in.) @ Max. Pressure	Maximum Speeds & Pressure	Approx. Weight kg (lb)
25M	4,7 (42)	43,9 (2.68)	52,7 (13.9)	115,8 (1025)	4000 r/min @ 34 bar (500 psi)	18 (40)
	6,2 (55)	57,7 (3.52)	69,4 (18.3)	151,4 (1340)		
	7,3 (65)	68,7 (4.19)	82,6 (21.8)	180,8 (1600)		
35M	9,0 (80)	83,6 (5.10)	100,4 (26.5)	221,5 (1960)	3000 r/min @ 172 bar (2500 psi)	29 (64)
	10,7 (95)	100,3 (6.12)	120,5 (31.8)	264,4 (2340)		
	13,0 (115)	121,9 (7.44)	146,3 (38.6)	320,9 (2840)		
45M	14,7 (130)	138,0 (8.42)	165,6 (43.7)	361,6 (3200)	3200 r/min @ 34 bar (500 psi) 2400 r/min @ 172 bar (2500 psi)•	39 (85)
	17,5 (155)	163,2 (9.96)	195,9 (51.7)	429,4 (3800)		
	20,9 (185)	193,2 (11.79)	232,3 (61.3)	502,9 (4450)		
50M	24,9 (220)	231,3 (14.11)	277,8 (73.3)	615,9 (5450)	3200 r/min @ 34 bar (500 psi) 2400 r/min @ 172 bar (2500 psi)•	73 (160)
	28,8 (255)	268,2 (16.36)	322,2 (85.0)	717,6 (6350)		
	33,9 (300)	317,2 (19.35)	380,7 (100.5)	844,1 (7470)		

• 114 suffix: 2500 psi, counterclockwise

2250 psi, clockwise

124 suffix: 2500 psi, bi-directional

55 LB. IN. MODEL



Apéndice F. PLC Arduino Ardbox Analógico.

Datasheet Spartan Arduino PLC 16DA



Industrial Shields®



Technical Features CONECTABLE PLC ARDUINO 24Vcc SPARTAN 16DA

MODEL TYPE	Spartan Arduino PLC 16DA
Input Voltage	12 to 24Vdc (Fuse protection (2.5A) Polarity protection)
Input rated voltage	24Vdc
Rated Power	30 W
I max.	15A
Size	100x45x115
Clock Speed	16MHz
Flash Memory	32KB of which 4KB used by bootloader
SRAM	256B
EEPROM	1KB
Communications	I2C, USB, RS485 (HD), SPI, TTL
USB consideration	Only for uploading or debugging, NOT connected as a serial. Cannot be working in a final application.

General Features

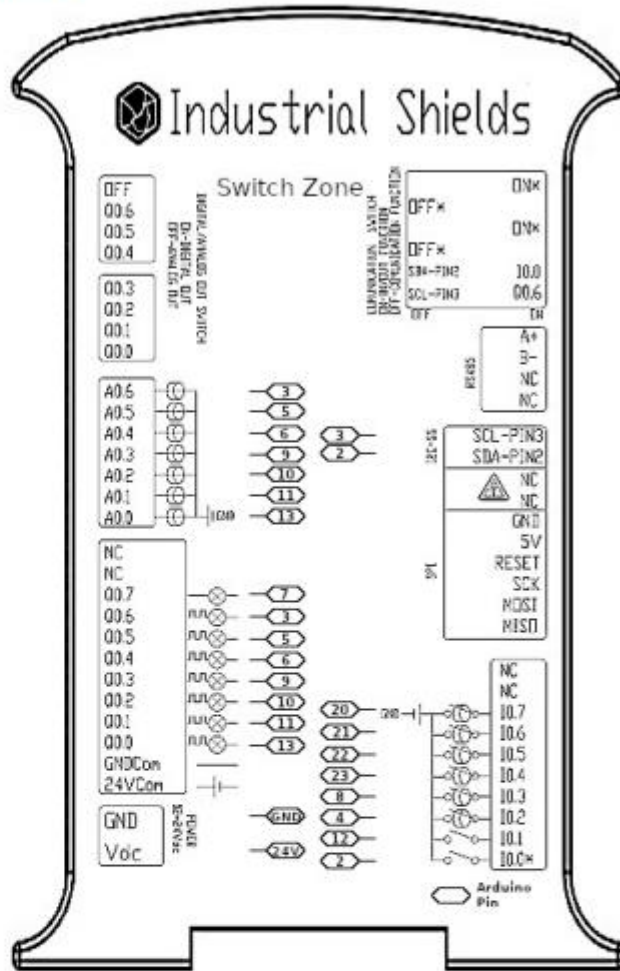
Power supply voltage	DC power supply	12 to 24Vdc
Operating voltage range	DC power supply	11.4 to 25.4Vdc
Power consumption	DC power supply	30 W MAX
External power supply	Power supply voltage	24Vdc
	Power supply current	700mA
Insulation resistance	20MΩ min at 500Vdc between the AC terminals and the protective earth terminal	
Dielectric strength	2300 VAC at 50/60 Hz for one minute with a leakage current of 10mA max. Between all the external AC terminals and the protective ground terminal	
Shock resistance	50 m/s ² in the X, Y and Z direction 2 times each	
Ambient temperature (operating)	0° to 50°C	
Ambient humidity (operating)	10% to 90% (no condensation)	
Ambient environment (operating)	With no corrosive gas	
Ambient temperature (storage)	-20° to 60°C	
Power supply holding time	2ms min	
Weight	350g max	

1 INPUTS (x8)

Ana/Dig Input 10bit (0-10Vcc) - (x6)	0 to 10Vdc Input Impedance: 39kΩ Separated PCB ground Rated Voltage: 10Vdc 5 to 24Vdc I min: 2 to 12 mA Galvanic Isolation Rated Voltage: 24 Vdc
Digital Input (24Vcc) - (x1)	5 to 24Vdc I min: 2 to 12 mA Galvanic Isolation Rated Voltage: 24 Vdc
Interrupt Input HS (24Vcc) - (x1)	5 to 24Vdc I min: 2 to 12 mA Galvanic Isolation Rated Voltage: 24 Vdc <small>- The Interrupt Input can also work as Digital Input</small>
Expandability	I2C - 127 elements - Serial Port RS485

1 OUTPUTS (x8)

Analog Output 8bit (0-10Vcc) - (x5)	0 to 10Vdc I max: 20 mA Separated PCB ground Rated Voltage: 10Vdc <small>- The Analog Output can also work as Digital Output</small>
Digital Isolated Output (24Vcc) - (x3)	5 to 24Vdc I max: 70 mA Galvanic Isolation Diode Protected for Relay Rated Voltage: 24Vdc
PWM Isolated Output 8bit (24Vcc) - (x7)	5 to 24Vdc I max: 70 mA Galvanic Isolation Diode Protected for Relay Rated Voltage: 24Vdc <small>- The PWM Output can also work as Digital Output</small>



HS*: Hardware Serial SS*: Software Serial



DataSource Rev. 20210412



Performance Specifications

Arduino Board	Arduino Leonardo
Control method	Stored program method
I/O control method	Combination of the cyclic scan and immediate refresh processing methods.
Programming language	Arduino IDE. Based on wiring (Wiring is an Open Source electronics platform composed of a programming language "similar to the C")
Microcontroller	ATmega32U4
	http://arduino.cc/en/Tutorial/HomePage

Install Arduino IDE and the Industrial Shields boards

The steps to follow to install our equipment's to Arduino IDE are:

- Open the Arduino IDE, version 1.8.0 or superior. If you don't have it yet, you can download here <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>.
- Press the "Preferences" option to "File" menu and open the preferences window.
- In the text box "Additional boards manager URLs", add the direction: http://apps.industrialshields.com/main/arduino/boards/package_index_industrialshields_index.json
- Close the preferences window with the "OK" button.
- Click on "Tools" menu, and open the "Boards" submenu, and click the "Boards Manager" option, to open the Boards Manager window.
- Search "industrialshields" to the search filter and select to the list and click "Install"
- Close the "Boards Manager". Once it is performed that steps, you are available to select each PLC that you wish to work on "Tools" -> "Boards": M-Duino...

To get more information:
<https://www.industrialshields.com/first-steps-with-the-industrial-arduino-based-plc-s-and-the-panel-pc-s-raspberry-pi-based#boards>



Warnings

Unused pins should not be connected. Ignoring the directive may damage the controller.

Before using this product, it is the responsibility of the user to read the product's User Guide and all accompanying documentation.

Industrial Shields PLCs must be powered between 12Vdc and 24Vdc. If a higher voltage is supplied to the equipment can suffer irreversible damage.

Maintenance must be performed by qualified personnel familiarized with the construction, operation, and hazards involved with the control.

Maintenance should be performed with the control out of operation and disconnected from all sources of power.

The Industrial Shields Family PLCs are Open Type Controllers. It is required that you install the M-Duino PLC in a housing, cabinet, or electric control room. Entry to the housing, cabinet, or electric control room should be limited to authorized personnel.

Inside the housing, cabinet or electric control room, the Industrial Shields PLC must be at a minimum distance from the rest of the components of a minimum of 25 cm, it can be severely damaged.

Failure to follow these installation requirements could result in severe personal injury and/or property damage. Always follow these requirements when installing M-Duino family PLCs.

In case of installation or maintenance of the M-Duino please follow the instructions marked in the Installation and Maintenance section on the User Guide.

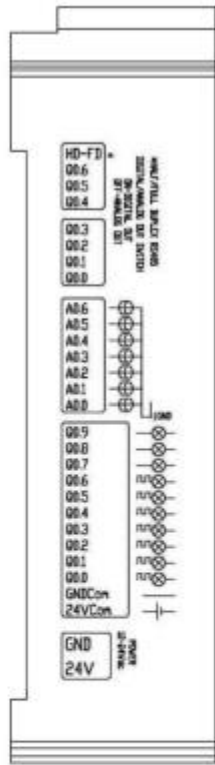
Do not disconnect equipment when a flammable or combustible atmosphere is present.
 Disconnection of equipment when a flammable or combustible atmosphere is present may cause a fire or explosion which could result in death, serious injury and/or property damage.

Symbology

	Indicates that the equipment is suitable for direct current only, to identify relevant terminals
	Indicates that the equipment is suitable for alternating current only, to identify relevant terminals
	To identify the control by which a pulse is started
	To identify an earth (ground) terminal in cases where neither the symbol 501.8 nor 501.9 is explicitly required.
	To identify the switch by means of which the signal lamp(s) is (are) switched on or off.
	CE marking indicates that a product complies with applicable European Union regulations
	Indicates a potentially hazardous situation which, if not avoided, could result in death or serious injury
	To indicate hazards arising from dangerous voltages

7.1 Zone Connections

LEFT ZONE		
Ardbox Connector	Arduino Pin	Function
A0.6 ¹	3	Analog Out
A0.5 ¹	5	Analog Out
A0.4 ¹	6	Analog Out
A0.3 ¹	9	Analog Out
A0.2 ¹	10	Analog Out
A0.1 ¹	11	Analog Out
A0.0 ¹	13	Analog Out
Q0.9 ²	1	Digital Output
Q0.8 ²	0	Digital Output
Q0.7	7	Digital Output
Q0.6 ¹	3	PWM/digital Output
Q0.5	5	PWM/digital Output
Q0.4	6	PWM/digital Output
Q0.3	9	PWM/digital Output
Q0.2	10	PWM/digital Output
Q0.1	11	PWM/digital Output
Q0.0	13	PWM/digital Output
GNDCOM	-	GND
24VCOM	-	Power Supply



RIGHT ZONE

Switch config*
 (see section 8 for Communications configuration. Enabling Communications disables some I/Os)

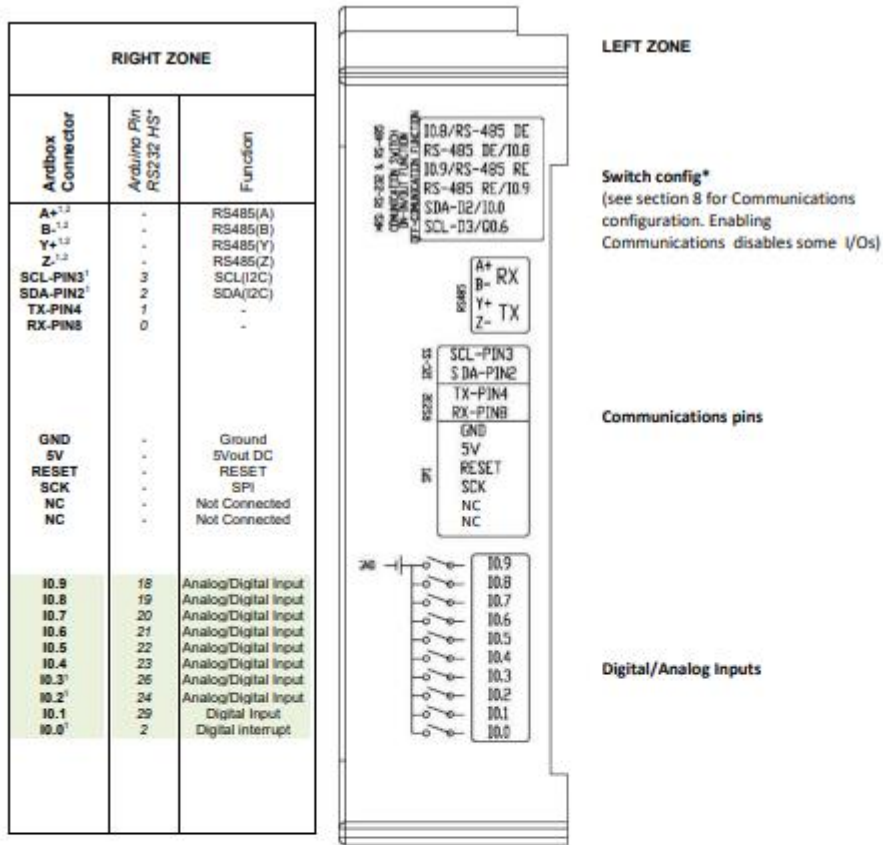
Analog Outputs pins

Digital Outputs pins

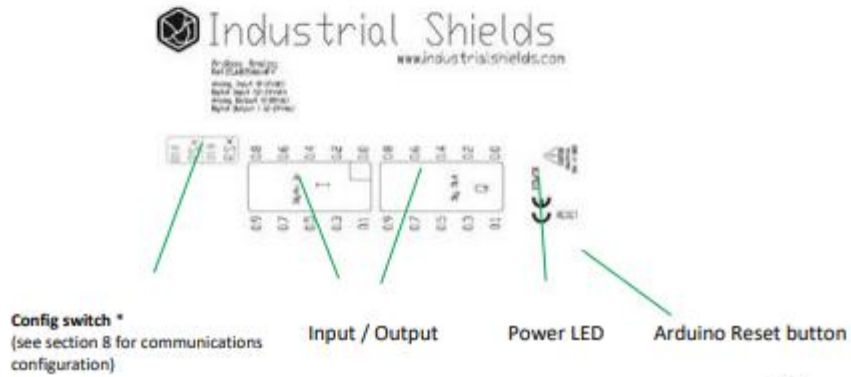
Power supply connectors (24Vdc – GND)

¹ See section 8 to enable these connections

² See section 9 to enable these connections



HS*: Hardware Serial
 SS*: Software Serial
¹ See section 8 to enable these connections
² See section 9 to enable these connections

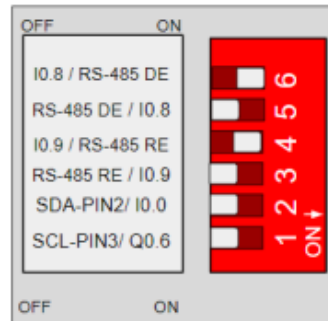


8.1 General Switches Configuration

LEFT ZONE SWITCH

Communications and inputs/outputs cannot work simultaneously.

LEFT ZONE		
SWITCH	OFF	ON
I0.8 / RS-485 DE	I0.8	RS-485 DE
RS-485 DE / I0.8	RS-485 DE	I0.8
I0.9 / RS-485 RE	I0.9	RS-485 RE
RS-485 RE / I0.9	RS-485 RE	I0.9
SDA-PIN2 / I0.0	SDA-D2	I0.0
SCL-PIN3 / Q0.6	SCL-D3	Q0.6



6. I0.8 / RS-485 DE – If this switch is ON the RS-485 DE is activated, otherwise the I0.8 will be activated.

5. RS-485 DE / I0.8– If this switch is ON the I0.8 is activated, otherwise the RS-485 DE will be activated.

Note To work with RS-485 DE, switch number 6 at ON and number 5 at OFF.*

4. I0.9 / RS-485 RE – If this switch is ON the RS-485 RE is activated, otherwise the I0.9 will be activated.

3. RS-485 RE / I0.9– If this switch is ON the I0.9 is activated, otherwise the RS-485 RE will be activated.

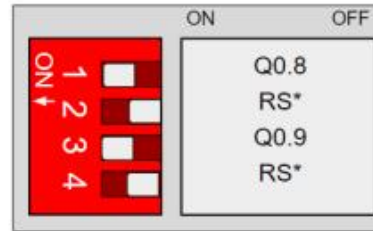
Note To work with RS-485 RE, switch number 4 at ON and number 3 at OFF.*

2. SDA-D2/I0.0 – If this switch is ON the I0.0 is activated, otherwise the (I2C) SDA-D2 will be activated.

1. SCL-D3/Q0.6 – If this switch is ON the (I2C) SCL-D3 is activated, otherwise the (I2C) SDA-D2 will be activated.

TOP ZONE SWITCH

TOP ZONE		
SWITCH	ON	OFF
RS* / Q0.8	RS*	Q0.8
Q0.8 / RS*	Q0.8	RS*
Q0.9 / RS*	RS*	Q0.9
RS* / Q0.9	Q0.9	RS*



1. Q0.8 / RS* - If this switch is ON the RS* is activated, otherwise the Q0.8 will be activated.
2. RS* / Q0.8 - If this switch is ON the Q0.8 is activated, otherwise the RS* will be activated.
3. Q0.9 / RS* - If this switch is ON the RS* is activated, otherwise the Q0.9 will be activated.
4. RS* / Q0.9 - If this switch is ON the Q0.9 is activated, otherwise the RS* will be activated.

Note RS * can be RS-485 or RS-232 depending on the jumper configuration you have chosen. To work with RS*, switches number 1 and 3 at ON and number 4 and 2 at OFF.*

RIGHT ZONE SWITCH

RIGHT ZONE		
SWITCH	ON	OFF
HD / FD	Half Duplex	Full Duplex
Q0.6	DIGITAL (Q0.6)	ANALOG (A0.6)
Q0.5	DIGITAL (Q0.5)	ANALOG (A0.5)
Q0.4	DIGITAL (Q0.4)	ANALOG (A0.4)
Q0.3	DIGITAL (Q0.3)	ANALOG (A0.3)
Q0.2	DIGITAL (Q0.2)	ANALOG (A0.2)
Q0.1	DIGITAL (Q0.1)	ANALOG (A0.1)
Q0.0	DIGITAL (Q0.0)	ANALOG (A0.0)



RIGHT ZONE. The right zone configures the outputs. If the switch is set to "ON" the Q0.X will have the behaviour of a digital output. If it is set to "OFF" it will be analog. There is also a switch for switching between Half and Full Duplex. It is "ON" for Half Duplex and "OFF" for Full Duplex.

8.2 RS-485 Switch configuration

TOP ZONE	
SWITCH	MODE
RS* / Q0.8	ON
Q0.8 / RS*	OFF
Q0.9 / RS*	ON
RS* / Q0.9	OFF

RS-485 TOP ZONE: In order to enable the RS-485 protocol the TOP ZONE must be configured as it is shown in the table.

Having this setup, the I0.3 & I0.2 are disabled.

LEFT ZONE	
SWITCH	MODE
I0.8 / RS-485 DE	ON
RS-485 DE / I0.8	OFF
I0.9 / RS-485 RE	ON
RS-485 RE / I0.9	OFF
SDA-D2 / I0.0	-
SCL-D3 / Q0.6	-

RS-485 LEFT ZONE: In order to enable the RS-485 communication protocol it is necessary that the switches of the left zone are configured as it is showed in the table.

The ones marked with “-” mean that they don’t affect the RS-485 communication protocol.

8.3 RS-232 Switch configuration

TOP ZONE	
SWITCH	MODE
I0.2 / RS*	ON
RS* / I0.2	OFF
I0.3 / RS*	ON
RS* / I0.3	OFF

RS-232 TOP ZONE: In order to enable the RS-232 communication protocol it is necessary that the switches of the top zone are configured as it is shown in the table.

LEFT ZONE	
SWITCH	MODE
I0.8 / RS-485 DE	OFF
RS-485 DE / I0.8	ON
I0.9 / RS-485 RE	OFF
RS-485 RE / I0.9	ON
SDA-D2 / I0.0	-
SCL-D3 / Q0.6	-

RS-232 LEFT ZONE: In order to enable the RS-232 communication protocol it is necessary that the switches of the left zone is configured as it is showed in the table. None of them affects to the RS-232 communication but if you are using it you can use also use the inputs I0.8 and I0.9.

The ones marked with “-” mean that it does not affect the RS-232 communication protocol

8.4 I2C Switch configuration

TOP ZONE	
SWITCH	MODE
I0.2 / RS*	-
RS* / I0.2	-
I0.3 / RS*	-
RS* / I0.3	-

LEFT ZONE	
SWITCH	MODE
I0.8 / RS-485 DE	-
RS-485 DE / I0.8	-
I0.9 / RS-485 RE	-
RS-485 RE / I0.9	-
SDA-D2 / I0.0	OFF
SCL-D3 / Q0.6	OFF

I2C: Enable SCL and SDA connections (direct Arduino pins) with configuration switches. I0.0 and Q0.6 will not be available. In order to implement this communication a 4.7k Ω pull-up resistor ([IS.AC12C-4.7K](#)) is required.

9. Jumper Configuration

General Jumper Configuration

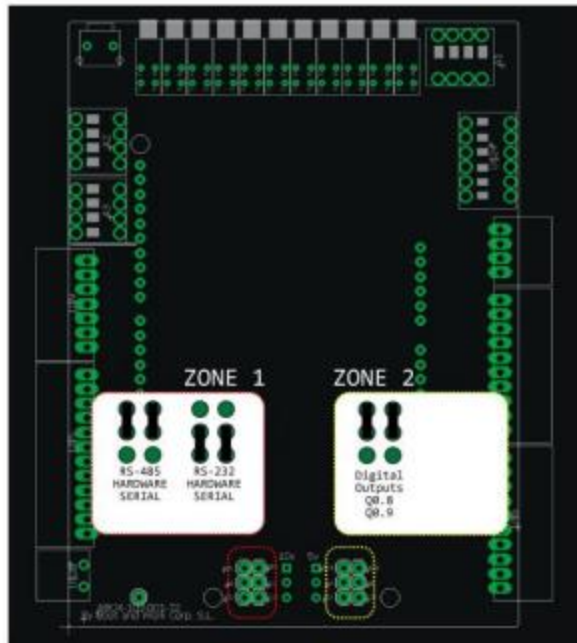
JUMPER ZONE 1	
LEFT	RIGHT
RS-485	RS-485
D0	D1
RS-232	RS-232

This jumper makes the choosing between connecting MAX232 to pins 0,1 of the Arduino Leonardo or with the MAX485. In order to use the RS-232 Hardware Serial protocol both RS-232 must be connected to the D1/D0. In order to use the RS-485 Hardware Serial protocol both RS-485 must be connected to the D1/D0.

JUMPER ZONE 2	
LEFT	RIGHT
Q0.9	Q0.8
D4	D8
RS-232 SS	RS-232 SS

This jumper zone makes the choosing between connecting the inputs Q0.9, Q0.8 to pins 4 and 8 of the Arduino Leonardo respectively, or connect the RS-232 ports to activate the Software Serial RS-232. In order to use the inputs Q0.9, Q0.8 the jumper must be connected to the pins 4 and 8. So Q0.9 must be connected with D4 and Q0.8 must be connected to D8.

**The jumpers that are not connected to the middle jumpers MUST NOT be Connected anywhere.*



Apéndice H. Cálculo de las CONSTANTES LQR.

$$A=[0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0; -(k/M) \ -(b/M) \ A_p/M \ 0 \ 0; 0 \ -(4*\beta*A_p)/VT \ -(4*\beta*K_p)/VT \ (4*\beta*K_f)/VT \ 0;$$

$$0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0 \ -(Omega_v)^2 \ -2*zeta_v*Omega_v];$$

$$B=[0; 0; 0; 0; K_v*(Omega_v)^2];$$

$$Q=[1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0.001 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 2.34*10^{(-15)} \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1];$$

$$R=0.0025;$$

$$K=lqr(A,B,Q,R);$$

$$K =$$

$$20.0000 \quad -0.3401 \quad -0.0000 \quad 47.4166 \quad 0.1724$$

Apéndice I. Modelo dinámico PID y LQR.

