



DISEÑO DE CONTROL DE UN COMANDO DE POTENCIA PARA EL BANCO DE PRUEBAS DEL MOTOR PT6

**DAVID CAMILO BULLA ÁVILA
ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA**

Universidad ECCI

Escuela Colombiana de Carreras Industriales

Ingeniería, Mecatrónica

Bogotá, Colombia

2023

DISEÑO DE CONTROL DE UN COMANDO DE POTENCIA PARA EL BANCO DE PRUEBAS DEL MOTOR PT6

**DAVID CAMILO BULLA ÁVILA
ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Ingeniero Mecatrónico

Directores:

Jorge Eduardo Cote Ballesteros

Luis Efrén Barrero Páez

Jhon Edisson Rodríguez Castellanos

David Sebastián Pérez Gordillo

Universidad ECCI

Escuela Colombiana de Carreras Industriales

Ingeniería, Mecatrónica

Bogotá, Colombia

2023

Agradecimientos.

Con este proyecto finaliza una de las etapas más importantes de nuestras vidas, en la cual se vivieron altos y bajos los cuales, repercutieron en nuestra formación personal y profesional.

Queremos aprovechar este espacio para agradecer a todas las personas, que apoyaron nuestra trayectoria a lo largo de nuestra formación académica, las mismas que nos brindaron un soporte en las etapas más difíciles y nos alentaron a seguir adelante, haciendo frente a todas las adversidades que se presentaron en el camino.

Inicialmente queremos agradecer a nuestras familias, que nos brindaron un apoyo incondicional desde el inicio de nuestro proceso, inculcando en nosotros virtudes como la responsabilidad, honestidad y perseverancia. A ellos dedicamos todos los logros obtenidos que conlleva la finalización de este proyecto, que nos permite dar el paso de estudiantes a profesionales.

Queremos agradecer a los docentes Jorge Eduardo Cote Ballesteros, Jhon Edison Rodríguez Castellanos, Luis Efrén Barrero Páez y David Sebastián Pérez Gordillo, por su arduo esfuerzo y dedicación en nuestra formación académica, personal y profesional a lo largo de nuestro proceso. De la misma manera agradecemos toda la ayuda prestada por este grupo docente en el desarrollo del proyecto FAC, ya que, sin su guía, dedicación y paciencia, no se hubieran conseguido los resultados obtenidos que nos llevaron a convertirnos en profesionales.

Resumen

Este manuscrito se presenta con el diseño e implementación de un control mecatrónico para la palanca de potencia del comando de vuelo de un motor PT6-61A, con las condiciones de tener precisión angular y seguimiento a referencia en tiempo real de modo que el motor es operado en tierra desde el banco de pruebas que se encuentra en las instalaciones del Centro de Mantenimiento Aéreo (CAMAN). Para dicha implementación se debe realizar un algoritmo de control por medio de un conjunto driver – servomotor, de tal manera que cumpla con las condiciones previamente mencionadas referentes a la palanca. Además, se diseñó un sistema mecánico de ensamblaje, que tiene como función crear una conexión directa entre el control mecatrónico y el eje de la FCU (Fuel Control Unit). El mismo posee un movimiento solidario sin backlash por medio de un acople tipo fuelle y gracias a su diseño ranurado permite una tolerancia de movimiento en la cual el servomotor se puede ubicar en los diversos ejes coordenados.

Palabras clave: Control Mecatrónico, FCU, Palanca de Potencia, Base mecánica y Acople Mecánico Tipo Fuelle.

Abstract

This manuscript is presented with the design and implementation of a mechatronic control for the power lever of the flight command of a PT6-61A engine, with the conditions of having angular accuracy and real-time reference tracking so that the engine is operated on the ground from the test bench located in the facilities of the Air Maintenance Center (CAMAN). For such implementation, a control algorithm by means of a driver - servomotor assembly must be developed, in such a way that it complies with the previously mentioned conditions regarding the lever. In addition, a mechanical assembly system was designed to create a direct connection between the mechatronic control and the FCU (Fuel Control Unit). It has a solidary movement without backlash by means of a bellows type coupling and thanks to its slotted design it allows a movement tolerance in which the servomotor can be located in the different coordinate axes.

Keywords: Mechatronic Control, FCU, Power Lever, Mechanical Base and Bellows Type Mechanical Coupling.

Tabla de contenido

1. Planteamiento del Problema.....	1
2. Objetivos	2
2.1 Objetivo General	2
2.2 Objetivos Específicos	2
3. Justificación.....	2
4. Antecedentes	3
5. Marco Teórico	5
5.2 Motor PT6A.....	5
5.3 Mecánica.....	10
5.4 Control	13
6. Selección Servomotor – Driver	19
6.1 Siemens.....	19
6.2 SEW	20
6.3 Yaskawa	21
7. Sistema Mecánico	23
7.1 Diseño Conceptual.....	23
7.2 Diseño de Detalle.....	27
8. Algoritmo de Calibración Automático.....	59
8.1 Descripción del proceso de reglaje manual realizado por personal FAC.....	59
8.2 Implementación de la calibración automática del reglaje de la FCU.....	60
8.3 Secciones que componen el algoritmo de calibración.....	64
9. Control	68
9.1 Esquema de Control Driver MP2600iec	69
9.2 Identificación de la planta.....	70
9.3 Implementación (Esquemas de conexión).....	78
10. Parámetros del driver específicos.....	84
11. Resultados.....	91
11.1 Seguimiento a Referencias.....	91
11.2 Conexión MotionWorks - Matlab.....	93
11.3 Comparación de Controladores.....	98
12. Conclusiones	101
13. Referencias	102

14.	Anexos.....	A
A.	Bloques MotionWorks	A
B.	Código del Algoritmo de Control.....	H
C.	Planos del Sistema Mecánico	I

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Esquema de control de Potencia, (Quiroga & Barrios, 2020).	1
Ilustración 2. Mandos de control PT6,(Pratt & Whitney, 1999).	4
Ilustración 3. Motor PT6, (Pratt & Whitney, 2023)	5
Ilustración 4. Flujo de aire, (Pratt & Whitney, 2023)	6
Ilustración 5. Ignición motora PT6, (Pratt & Whitney, 1999)	6
Ilustración 6. Posiciones FCU-Hélice, (Pratt & Whitney, 1999)	7
Ilustración 7. Palancas de control Motor PT6, (Pratt & Whitney, 1999)	8
Ilustración 8. Acción de reversa en el motor PT6. (Pratt & Whitney, 1999)	10
Ilustración 9. Representación de Nodos en el FEM, (SolidWorks, 2022).....	11
Ilustración 10. Esquema del Control Cascada, (Mazzone & Centrífugo De Watt, 2002)...	13
Ilustración 11. Método del Escalón, (Ogata, 1998).....	14
Ilustración 12. Respuesta en frecuencia, (Aström & Hägglung, 2009).....	15
Ilustración 13. Comportamiento de un sistema integrante, (Cárdenas & Jiménez, 2018). 16	
Ilustración 14. Estructura del PID, (Aström & Hägglung, 2009).....	19
Ilustración 15. Potenciómetro palanca, fuente Propia.	23
Ilustración 16. Sistema Mecánico, Servomotor y Fusible Mecánico, fuente Propia.	24
Ilustración 17. Servomotor Yaskawa SGM7J-04A, fuente propia.	25
Ilustración 18. Diseño Mecánico, fuente propia.....	25
Ilustración 19. Acople Mecánico, fuente propia.	26
Ilustración 20. Sistema Anti-Vibratorio, (Mecanocaucho, 2023).	26
Ilustración 21. Recubrimiento de láminas, fuente propia.	27
Ilustración 22. Carga Aerodinámica, Castellanos D. 2022.	30
Ilustración 23. Distancia de uniones atornilladas, (Rodríguez, 2017)	33
Ilustración 24. Lamina conexión directa, elaboración propia.	34
Ilustración 25. Lámina en L, elaboración propia.	34
Ilustración 26. Lámina media, elaboración propia.	35
Ilustración 27. Lámina base, elaboración propia.	36
Ilustración 28. Tornillería crítica, elaboración propia.	37
Ilustración 29. Zonas Críticas, Fuente propia.....	37
Ilustración 30. Distribución de cargas, Fuente propia.....	38
Ilustración 31. Áreas de diseño, Fuente propia.	39
Ilustración 32. Distribución de cargas, elaboración propia.	43
Ilustración 33. Cortadura simple en unión atornillada,(Guardiola, 2012)	44
Ilustración 34. Distribución de carga lámina en L. Elaboración propia.....	45
Ilustración 35. Análisis de cargas lámina media, elaboración propia.....	46
Ilustración 36. Distribución de cargas lámina media, fuente propia.	47
Ilustración 37. Análisis de cargas lámina base, elaboración propia.....	48
Ilustración 38. Distribución de cargas lámina base, elaboración propia	49
Ilustración 39. Fuerza de aplastamiento.....	50
Ilustración 40. Detalle de malla. Elaboración propia.....	55
Ilustración 41. Cargas aplicadas al sistema mecánico. Elaboración propia.....	56
Ilustración 42. Von Mises sentido horario, elaboración propia.....	57
Ilustración 43. Desplazamiento máximo sentido horario, elaboración propia.	58

Ilustración 44. Von Mises sentido anti horario, elaboración propia.	58
Ilustración 45. Desplazamiento máximo sentido anti horario, elaboración propia.	59
Ilustración 46. Sección de Potencia, fuente propia.	64
Ilustración 47. Lectura de variables, fuente propia.	65
Ilustración 48. Estructurado MotionWorks, fuente propia.	65
Ilustración 49. Sección de Movimiento, fuente propia.	66
Ilustración 50. Seguimiento a referencias, fuente propia.	68
Ilustración 51. Arquitectura de Control Mecatrónico, fuente propia.	69
Ilustración 52. Esquema de control del servomotor, (Yaskawa, 2018)	69
Ilustración 53. Identificación de la Planta, fuente propia.	70
Ilustración 54. Prueba de controladores, fuente propia.	71
Ilustración 55. Prueba al escalón Ziegler & Nichols, fuente propia.	72
Ilustración 56. Prueba al escalón Coon, fuente propia.	72
Ilustración 57. Prueba al escalón Aström and Hägglund, fuente propia.	73
Ilustración 58. Prueba al escalón Hay, fuente propia.	74
Ilustración 59. Prueba al escalón Skogestad, fuente propia.	74
Ilustración 60. Prueba al escalón Visioli ISE, fuente propia.	75
Ilustración 61. Prueba al escalón Visioli ITSE, fuente propia.	76
Ilustración 62. Prueba de escalón Visioli ISTE, fuente propia.	77
Ilustración 63. Conexión del proyecto, fuente propia.	79
Ilustración 64. Conexión a detalle. fuente propia.	79
Ilustración 65. Esquema Unifilar de conexión, fuente propia.	80
Ilustración 66. Cable del servomotor, (Yaskawa, 2020).	80
Ilustración 67. Cable de conexión del encoder, (Yaskawa, 2020).	81
Ilustración 68. Cable puerto CN13, (Yaskawa, 2023).	81
Ilustración 69. Secuencia del algoritmo de control de potencia, fuente propia.	82
Ilustración 70. Algoritmo de Control, fuente propia.	82
Ilustración 71. Estructurado control de palanca, fuente propia.	84
Ilustración 72. Conexión mediante cable Ethernet, (YASKAWA, 2011).	85
Ilustración 73. Página de inicio SigmaWin+, (YASKAWA, 2011).	86
Ilustración 74. Autotuning AXIS1, (YASKAWA, 2011).	86
Ilustración 75. Parámetros de ganancia para el servomotor, (YASKAWA, 2011).	87
Ilustración 76. Prueba de filtro anti-resonancia, (YASKAWA, 2011).	87
Ilustración 77. Parámetros de modificación sobre el elemento rígido, (YASKAWA, 2011).	88
Ilustración 78. Ventana de autotuning, (YASKAWA, 2011).	89
Ilustración 79. Parámetros del bloque JOG, (YASKAWA, 2011).	89
Ilustración 80. Ventana de JOG para dar inicio, (YASKAWA, 2011).	90
Ilustración 81. Parámetros después del autotuning, (YASKAWA, 2011).	90
Ilustración 82. Referencia de Máximas, fuente propia.	91
Ilustración 83. Referencia de Reversibles, fuente propia.	92
Ilustración 84. Referencias de los tres puntos críticos, fuente propia.	92
Ilustración 85. Configuración Modbus MotionWorks, fuente propia.	93
Ilustración 86. Variables Modbus MotionWorks, fuente propia.	93

Ilustración 87. Sección de Potencia prueba de lazo abierto, fuente propia.....	94
Ilustración 88. Sección de potencia prueba lazo abierto, fuente propia.....	94
Ilustración 89. Modbus Explorer de Matlab, fuente propia.....	95
Ilustración 90. Creación de objeto Modbus, fuente propia.....	95
Ilustración 91. Declaración de variables, fuente propia.	95
Ilustración 92. Lectura de variables, fuente propia.	96
Ilustración 93. Envío de variables, fuente propia.....	96
Ilustración 94. Conexión PI en MotionWorks, fuente propia.	97
Ilustración 95. Declaración de variables PD en Matlab, fuente propia.....	97
Ilustración 96. Prueba de Controladores respuesta al escalón, fuente propia.	98
Ilustración 97. Comparativo seguimiento a referencias, fuente propia.	99
Ilustración 98. Estructura para la prueba de rechazo a perturbaciones, fuente propia. ..	100
Ilustración 99. Respuesta a perturbaciones, fuente propia.....	100
Ilustración 100. Bloque MC_Power, (Yaskawa, 2022).....	A
Ilustración 101. Bloque MC_SetPosition, (Yaskawa, 2022).....	B
Ilustración 102. Bloque TON, (Yaskawa, 2022).....	B
Ilustración 103. Bloque MC_ReadActualPosition, (Yaskawa, 2022).....	C
Ilustración 104. Bloque MC_ReadActualTorque, (Yaskawa, 2022)	C
Ilustración 105. Bloque MC_ReadActualVelocity, (Yaskawa, 2022).....	D
Ilustración 107. Bloque CTU, (Yaskawa, 2022).....	E
Ilustración 108. Bloque Escalizar, fuente propia.....	E
Ilustración 109. Componentes del bloque Escalizar, fuente propia.	F
Ilustración 110. Bloque Blink, (Yaskawa, 2022).	F

Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros PI por procesos integrantes, (Aidan O & Dwyer, 2009).....	17
Tabla 2. parámetros PD por procesos integrantes, (Visioli, 2001).....	17
Tabla 3. Características Servomotor Siemens, (SIEMENS, 2016).....	20
Tabla 4. Características Driver Siemens, (SIEMENS, 2023).....	20
Tabla 5. Características servomotor SEW, (SEW, 2009).....	21
Tabla 6. Características Driver SEW, (SEW, 2010).....	21
Tabla 7. Características servomotor Yaskawa, (Yaskawa, 2020).....	22
Tabla 8. Propiedades Driver MP2600iec, (Yaskawa, 2023).....	22
Tabla 9. Criterio de selección del servomotor, (Geremiareductores, 2023).....	28
Tabla 10. Selección servomotor, mediante software SIGMA.....	29
Tabla 11. Características mecánicas del servomotor, (Yaskawa, 2020).....	30
Tabla 12. Peso del sistema mecánico, fuente propia.....	32
Tabla 13. Uniones atornilladas sistema mecánico, elaboración propia.....	36
Tabla 14. Área de diseño zona 1, elaboración propia.....	40
Tabla 15. Área de diseño zona 2, elaboración propia.....	40
Tabla 16. Área de diseño Zona 3, elaboración propia.....	41
Tabla 17. Área de diseño Zona 4, elaboración propia.....	41
Tabla 18. Área de diseño Zona 5, elaboración propia.....	41
Tabla 19. Área de diseño Zona 6, elaboración propia.....	42
Tabla 20. Peso total Wt, elaboración propia.....	43
Tabla 21. Comprobación a cortante lámina en L, elaboración propia.....	46
Tabla 22. Comprobación a cortante lámina media, elaboración propia.....	48
Tabla 23. Comprobación a cortante lámina base, elaboración propia.....	50
Tabla 24. Comprobación de aplastamiento lámina en L, elaboración propia.....	51
Tabla 25. Comprobación de aplastamiento lámina media, elaboración propia.....	52
Tabla 26. Comprobación de aplastamiento lámina base, elaboración propia.....	52
Tabla 27. Comprobación al deslizamiento lámina en L, elaboración propia.....	54
Tabla 28. Comprobación al deslizamiento lámina base, elaboración propia.....	54
Tabla 29. Características acero A36, elaboración propia.....	56
Tabla 30. Parámetros del bloque JOG, elaboración propia.....	67
Tabla 31. Parámetros torque y temporizadores, fuente propia.....	67
Tabla 32. Parámetros de Ziegler & Nichols, fuente propia.....	72
Tabla 33. Parámetros de Coon, fuente propia.....	73
Tabla 34. Parámetros de Aström and Hägglund, fuente propia.....	73
Tabla 35. Parámetros de Hay, fuente propia.....	74
Tabla 36. Parámetros de Skogestad, fuente propia.....	75
Tabla 37. Criterios de desempeño, fuente propia.....	75
Tabla 38. Parámetros de Visioli ISE, fuente propia.....	76
Tabla 39. Parámetros de Visioli ITSE, fuente propia.....	76
Tabla 40. Parámetros de Visioli ISTE, fuente propia.....	77
Tabla 41. Parámetros del bloque MC_Move_Absolute, fuente propia.....	83
Tabla 42. Parámetros del driver MP2600iec, (Yaskawa, 2023).....	85
Tabla 43. Comparativa de parámetros de respuesta al escalón, fuente propia.....	99

Tabla 44. Características del MC_Power, (Yaskawa, 2022).....	A
Tabla 45. Característica bloque MC_SetPosition, (Yaskawa, 2022).....	B
Tabla 46. Características del Bloque TON, (Yaskawa, 2022).....	B
Tabla 47. Características del bloque MC_ReadActualPosition, (Yaskawa, 2022).	C
Tabla 48. Características del bloque MC_ReadActualTorque, (Yaskawa, 2022).....	D
Tabla 49. Características Bloque MC_ReadActualVelocity (Yaskawa, 2022).....	D
Tabla 50. Características del bloque CTU.....	E
Tabla 51. Características del bloque Blink, (Yaskawa, 2022).....	G

1. Planteamiento del Problema

Este proyecto tiene como objetivo modernizar el comando de potencia, del banco de pruebas de biocombustibles de motores PT6, ubicado en la sede CAMAN de la Fuerza Aérea Colombiana (Madrid, Cundinamarca). Actualmente cuenta con un sistema gradual de paso de combustible de la Unidad de control de Combustible (FCU) por medio de un cableado mecánico denominado Teleflex, el cual tiene recorrido desde el banco de pruebas hasta el motor PT6, Ilustración 1.

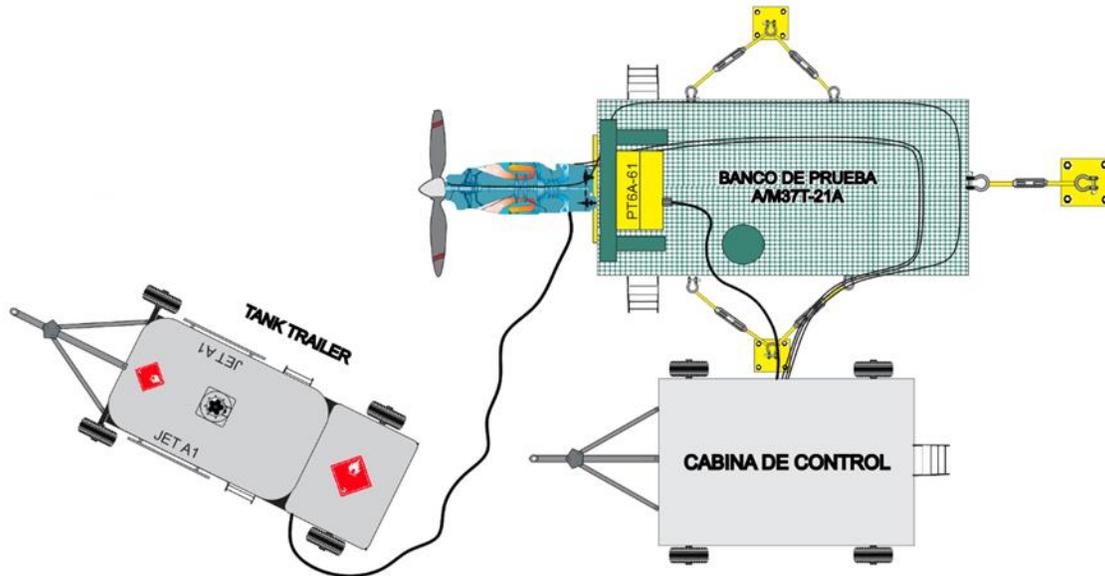


Ilustración 1. Esquema de control de Potencia, (Quiroga & Barrios, 2020).

El paso de combustible se realiza por medio del comando de potencia (Palanca) la cual transfiere el movimiento del sistema Teleflex hacia la FCU, la problemática radica en que dicho sistema presenta deficiencias inherentes a su composición entre las que se destacan:

- ❖ Zonas Muertas: El Teleflex es un sistema mecánico que está constituido principalmente por guayas y rotulas, que por factores de diseño del mismo presentan zonas, en las cuales no se aprecia el cambio movimiento demandado desde la cabina de pruebas en la FCU, de la misma manera presenta errores de medida en relación al movimiento de la FCU en torno a (5° y 10°) en relación a la potencia y el combustible respectivamente (Quiroga & Barrios, 2020).
- ❖ Reversibles: Esta problemática se presenta en el sistema Teleflex, ya que no es posible llegar a la posición de reversibles por el ruteo de este sistema.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

- ❖ Proponer un control mecatrónico que permita el movimiento del comando de potencia, en los rangos de mínimas, máximas y reversibles utilizando para ello estrategias de control.

2.2 Objetivos Específicos

- ❖ Diseñar un algoritmo de control que permita una calibración automática para Máximas, Mínimas y Reversibles.
- ❖ Diseñar un sistema de control a partir de un servomotor para el comando de potencia de un motor PT6.
- ❖ Diseñar un sistema mecánico que permita la transferencia de movimiento solidario entre el eje del servomotor y el eje de la FCU.

3. Justificación

Con el propósito de eliminar las problemáticas mencionadas en la sección 1, se implementó un sistema de control mecatrónico constituido principalmente por un controlador y un servomotor. Dicho sistema tiene como propósito generar un movimiento solidario de alta precisión entre la palanca de control de potencia y la FCU. Para la conexión del control mecatrónico y el motor PT6, se diseñó un soporte mecánico que permite la conexión directa con relación 1:1 entre los ejes del servomotor y la FCU, por medio de un acople tipo fuelle.

Con la inclusión de este sistema, se busca dar solución a las problemáticas presentadas en el varillaje del Teleflex, respecto al backlash (zonas muertas), que no permiten repetibilidad en las pruebas aplicadas a biocombustibles, ya que los niveles de aceleración con el comando de potencia son inciertos. Además, se busca implementar la posición de reversibles, ya que el sistema Teleflex no permite el movimiento del comando de potencia en esta posición.

4. Antecedentes

En busca de tener una sociedad sostenible se está explorando nuevas alternativas a los combustibles tradicionales fósiles, cuyos combustibles sean amigables con el medio ambiente, como lo son los Biocombustibles, por dicha razón la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), cuenta con dos proyectos en los cuales se están probando Biocombustibles en sus aeronaves. Uno de ellos es el motor J69, en el cual se realiza pruebas mezclando Biodiesel con combustible JET A1, en distintas proporciones y se observa el comportamiento interno del motor luego de realizar dichas pruebas. Por otra parte, se encuentra el Motor PT6A-61A, para el cual se construyó un Banco de Pruebas A/M37T-21A estación de trabajo, en el que se instalaron los comandos mecánicos de vuelo que controlan el encendido y la operación del motor (Quiroga & Barrios, 2020), es decir los mandos de potencia, de hélice y de velocidad.

Actualmente la FAC, tiene un equipo con el que pueden realizar pruebas a los motores T53 y PT6; este proyecto se realiza con base a la primera etapa efectuada en el banco de pruebas de PT6 en CAMAN, en el cual se diseñó un sistema de control mecánico que por medio de cableado Teleflex cumplía el objetivo de mejorar la precisión de los comandos de combustible, potencia y posición angular para el motor PT6 61A (Quiroga & Barrios, 2020).

Por lo anterior es imperativo entender y analizar el comportamiento de una turbina PT6, ya que es el eje central para la implementación de un control en el comando de potencia, por ello se tomó como base un estudio realizado por la universidad Javeriana en la cual prueban inyectores de las turbinas PT6 con el propósito de aumentar la eficiencia del proceso de inyección y al mismo tiempo reducir los costos en el mismo, por lo que implementaron nuevas tecnologías, con la inclusión de un sistema de control comandado por una HMI y un sistema SCADA para la adquisición de datos, además de la incorporación de servomotores para la regulación de la posición de los aspersores, lo que provee una aproximación en la implementación de servomotores, en un lazo de control optimizando diversas variables tales como la temperatura, combustión y potencia en los motores garantizado así la seguridad del vuelo (Sierra, 2011).

Un ejemplo claro de la implementación de un controlador en un motor PT6 lo brinda (Villareal, 2009), para regular el combustible con una mezcla de hidrógeno en una turbina PT6A-20, con la inclusión de un sistema análogo de mando y la adquisición de datos por medio del software LabVIEW, los controladores fueron diseñados por el método de Ziegler & Nichols obteniendo resultados de seguimiento de referencia en función de la presión del sistema. El análisis de este documento proporciona características que pueden ser implementadas en el diseño del controlador y la adquisición de datos del sistema. Una vez obtenidos datos para el sistema de control es necesario comprender el funcionamiento de una turbina en un entorno mecánico, lo establecido por (Morris et al., 2003) refleja por medio de las series de educación AIAA (Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica), definen las características de vuelo en relación con la estática y la dinámica básica del sistema aerodinámico de la aeronave, además de la inclusión de pruebas del sistema de control de vuelo. Este documento aporta de manera general los aspectos básicos a

considerar en la implementación de la dinámica de una aeronave lo que permite analizar de manera concreta el comportamiento del sistema.

Con el propósito de entender el comportamiento de las diferentes entradas y salidas que posee el sistema (Motor PT6), es necesario conocer los conceptos básicos de una turbina, por lo tanto (Vallbona, 2011) presenta de una forma clara los componentes principales que contiene una turbina por escape de gas, así como las variables que intervienen en el proceso, para efectos prácticos del proyecto se toman como referencia los aspectos relacionados en el arranque, ignición, sistema de combustible ya que estos conocimientos se reflejan en las pruebas técnicas que se deben realizar en la cabina de comando una vez implementado el acople mecánico y el sistema de control del motor PT6.

Dentro de la cabina se encuentra una parte primordial en las pruebas del motor PT6A-61A, que es la palanca de potencia utilizada para controlar la velocidad del compresor (N_g) y para controlar el paso de la hélice en reversa. La palanca está conectada a una caja de levas ubicada en la caja de cambios de accesorios. La caja de levas transmite el movimiento de la palanca de potencia a la unidad de control de combustible (FCU), que controla el flujo de combustible al motor a la vez que actúa directamente sobre N_g . En el modo de operación de avance, la palanca de potencia controla solo la velocidad N_g y no tiene ningún efecto sobre la válvula beta (la cual no permite la inversión inadvertida de la hélice en vuelo). Desde la posición de ralentí hasta la de marcha atrás total, la palanca de potencia aumenta N_g y también mueve la válvula beta para cambiar el ángulo de la pala de la hélice a paso inverso. Este rango de operación se conoce como modo beta. El rodaje de la aeronave se realiza de este modo, (Morris et al., 2003)

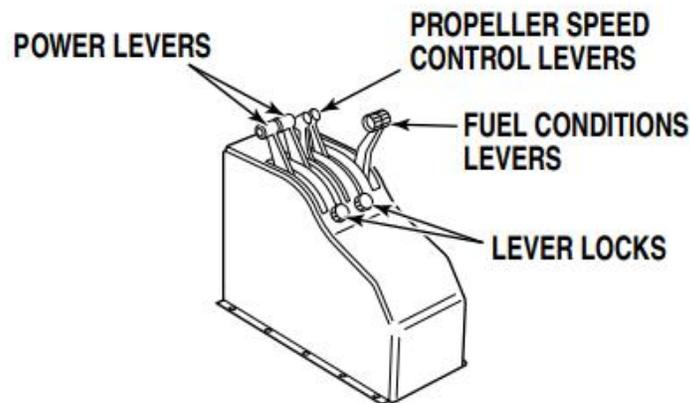


Ilustración 2. Mandos de control PT6, (Pratt & Whitney, 1999).

Una de las secciones del motor más relevante es la salida de la FCU, la cual tiene un control mecánico por medio de palancas y cables tipo Teleflex (Quiroga & Barrios, 2020). En la que el operador de tierra tiene el control del motor en las instalaciones del Centro de Mantenimiento Aéreo (CAMAN), en la que se establecieron valores importantes sobre el

comportamiento del motor referentes al uso de la palanca en las pruebas realizadas durante la etapa 1 del proyecto realizado por FAC y la Universidad ECCI.

5.Marco Teórico

5.2 Motor PT6A

El motor PT6A fue diseñado por la compañía Pratt & Whitney Canadá, de tal manera que garantiza fiabilidad, rendimiento y versatilidad. Constituido por un motor ligero de turbina libre, que proporciona un flujo inverso en la trayectoria de combustión, lo cual permite la propulsión de aeronaves de gran potencia (Pratt & Whitney, 2023), un ejemplo de ello es la inclusión del mismo en los aviones Piper Cheyenne del modelo PA-42-720 (Quiroga & Barrios, 2020).

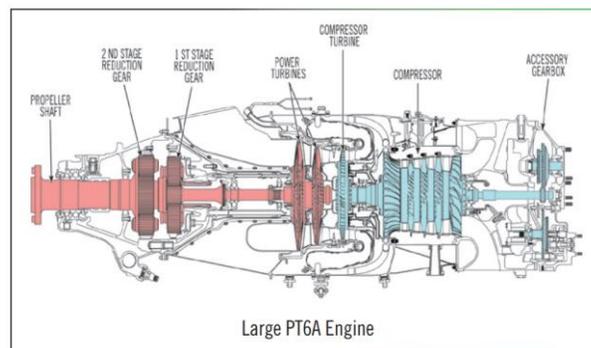


Ilustración 3. Motor PT6, (Pratt & Whitney, 2023)

Principios de Operación

El motor PT6A está constituido por dos secciones principales denominadas, el **conjunto generador de gas** que tiene la función de comprimir y enviar el aire a la cámara de combustión, donde el mismo se mezcla con el combustible y genera el proceso de ignición. Este proceso genera gases resultantes de altas temperaturas, que hacen girar la turbina del compresor generando la energía necesaria para el funcionamiento del mismo y la caja de cambio de accesorios ubicada en la parte trasera del motor(Pratt & Whitney, 2023).

Los gases a elevadas temperaturas siguen su recorrido hasta el **conjunto generador de potencia**, que está constituido por las turbinas de potencia (turbina del compresor y turbina libre), generando la extracción de la energía restante que permite el movimiento de la caja reductora y por consiguiente el movimiento de la hélice del motor PT6 (Pratt & Whitney, 2023).

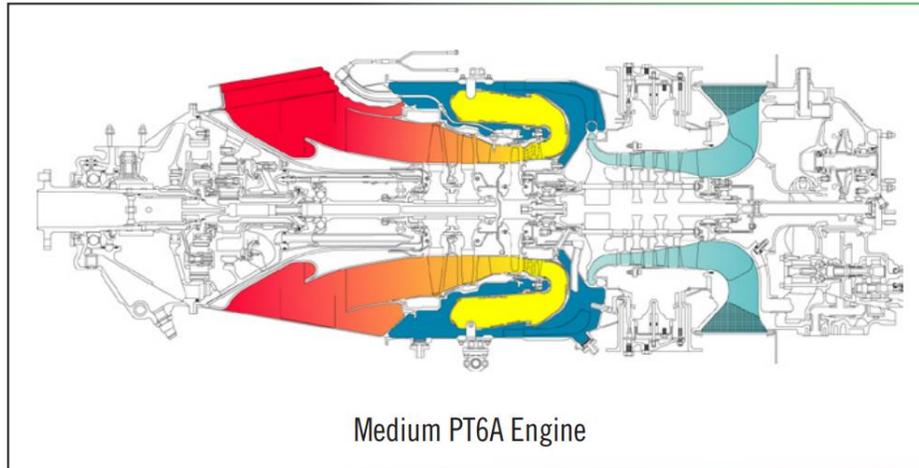


Ilustración 4. Flujo de aire, (Pratt & Whitney, 2023)

Overflow

En la Ilustración 4 se evidencia el recorrido del flujo de aire a través del motor PT6, generado inicialmente por el compresor véase Ilustración 3, por medio de sus tres etapas axiales y una centrífuga, las mismas tienen como función direccionar el aire hacia el compresor para aumentar la presión del mismo, el aire comprimido es enviado a la cámara de combustión por medio de difusores, ubicados específicamente en un ángulo de 90° con el propósito de reducir su velocidad (Pratt & Whitney, 2023).

En la cámara de combustión se realiza la mezcla del aire comprimido y el combustible; dos bujías son las encargadas de crear la ignición de la mezcla para arrancar el motor véase Ilustración 5, las mismas no son necesarias para mantener el proceso de combustión y se apagan una vez el motor haya alcanzado la velocidad de relentí. Una vez se alcance dicha velocidad los gases en expansión ingresan al **conjunto generador de potencia**, inicialmente por la turbina del compresor, seguido de la turbina de potencia para generar el movimiento de la caja reductora y la hélice del motor (Pratt & Whitney, 2023). Finalmente, los gases de la mezcla a elevadas temperaturas son evacuados por medio de los escapes ubicados en cada uno de los lados del motor, véase Ilustración 4.

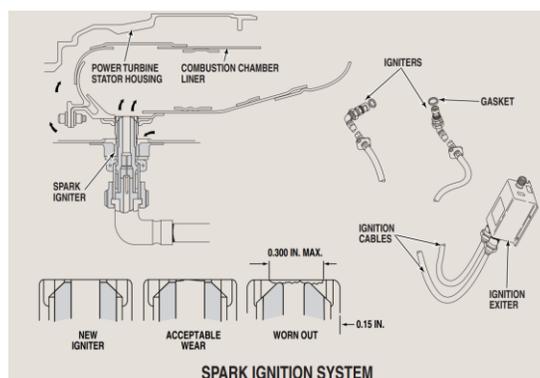


Ilustración 5. Ignición motora PT6, (Pratt & Whitney, 1999)

Sistema de Combustible

Está diseñado para entregar al motor el combustible limpio, con la presión y flujo necesarios para cada una de las condiciones de funcionamiento del motor PT6. El sistema de combustible está constituido por:

- Unidad de control de combustible (FCU).
- Gobernador de la hélice.
- Control de arranque (SFC).

La **FCU** es un sistema hidroneumático o hidromecánico, que dosifica y suministra la cantidad exacta de combustible necesaria al motor, para mantener la velocidad del generador de gas seleccionada, por el piloto a través de la palanca de control de potencia. La FCU también controla el flujo de combustible durante las etapas de arranque, aceleración y desaceleración del motor, el mismo está aprobado para operar con los todos los combustibles comerciales aeronáuticos JP-4, JP-5 por un máximo de 150 horas de operación (Pratt & Whitney, 2023). En el banco de pruebas de la FAC se están realizando pruebas de biocombustibles con diversas mezclas de Biodisel (combustible biológico) y Jet A1 (combustible aeronáutico tradicional) (Quiroga & Barrios, 2020).

El **SFC** opera como válvula de presurización, válvula de corte de combustible y como divisor de flujo; con el objeto de enviar el combustible a los inyectores del motor ya sea el primario, secundario o ambos (UNITED TURBINE, 2023a).

El control de la hélice durante las operaciones normales de movimiento (mínimas, máximas y reversibles), se proveen por medio del gobernador de la misma (CSU) y el gobernador de potencia (Nf), de la misma manera se genera una apertura angular, dependiendo del movimiento generado en el comando de potencia de la turbina, véase Ilustración 6. El gobernador **Nf** tiene como función proteger a la turbina de velocidades superiores a las definidas en operaciones normales. Es importante resaltar que durante reversibles el comando de la hélice no genera acción alguna sobre la misma y el control de potencia de la turbina es efectuado por (Nf) (UNITED TURBINE, 2023a).

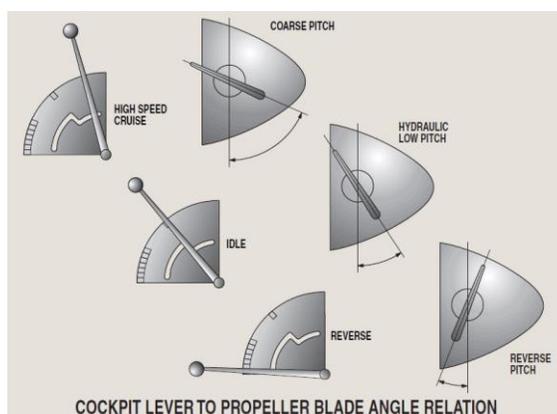


Ilustración 6. Posiciones FCU-Hélice, (Pratt & Whitney, 1999)

Instrumentación Típica del Motor PT6

Existen dos parámetros principales que deben ser suministrados al piloto con una alta precisión, para determinar el buen funcionamiento del motor, la medición del torque y el ITT (temperatura entre turbinas).

La presión de torque es censada a través de un transductor de presión de torque, ubicado en la caja de reducción de engranajes, con el propósito de obtener el par que desarrolla el motor en cualquier momento de operación, este parámetro es utilizado principalmente para ajustar la potencia para el despegue o el modo crucero, definidas en velocidades específicas de la hélice.

La medición del ITT garantiza que no se superen los límites de temperatura de los diversos gases generados en la combustión del motor, para este propósito existen dos tacómetros que regulan la velocidad de la hélice (N_p) y la velocidad del generador de gas (N_g), además los indicadores de presión y temperatura monitorean el sistema de aceite (Pratt & Whitney, 2023).

“Controles del Motor PT6”

Las diversas funciones del motor son comandadas desde la cabina de pruebas, por medio de tres palancas de control y las mismas están conectadas por medio de cableado push-pull, dependiendo del requerimiento o de la prueba se pueden implementar sistemas simplificados utilizando dos o incluso una palanca de control. Es importante resaltar que la cabina de pruebas de CAMAN cuenta con el sistema Teleflex para la transferencia de movimiento de las diversas palancas de control del motor PT6; las mismas están establecidas de la siguiente manera (Quiroga & Barrios, 2020).

- Mando de Inyección de combustible.
- Mando de control de la hélice.
- Mando de control de potencia.

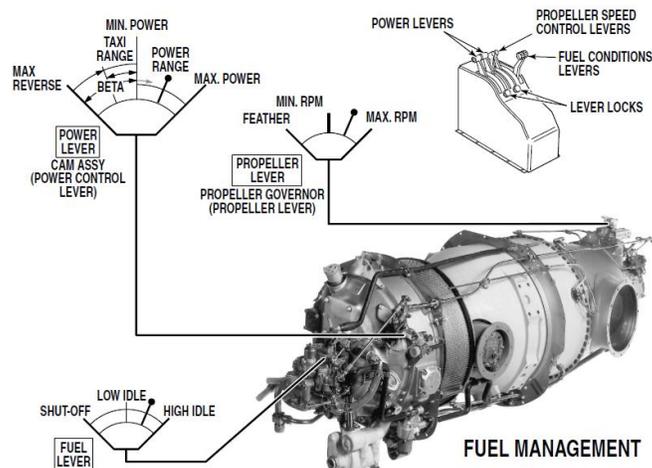


Ilustración 7. Palancas de control Motor PT6, (Pratt & Whitney, 1999)

El gobernador de la turbina de potencia (Nf), funciona por medio de la presión emitida por la FCU (Py) a través de una red neumática externa; al momento de presentarse sobre velocidad en la turbina de potencia, inicia un proceso de sangrado de (Py) a la atmosfera por medio de un sistema de contrapesas centrífugas, con el objetivo de reducir el paso de combustible en la válvula de inyección y de esa manera reducir Ng y Nf (UNITED TURBINE, 2023a).

La liberación de (Py) al ambiente se define por la posición del comando de potencia de la FCU, por lo que en la posición de máximas el orificio generado por las contrapesas centrífugas se abre un 6% por encima de la velocidad definida. En la posición de mínimas se abre un 4% por debajo de la velocidad definida. En contraparte en la posición de reversibles se reajusta el sangrado de (Py), por debajo del gobernador de la hélice, por lo que la misma es limitada por el gobernador Nf con el objetivo de reducir la velocidad de la hélice aproximadamente un 5% por debajo de la velocidad establecida (UNITED TURBINE, 2023a).

La unidad de control de arranque (SFC) está conformada por un pistón deslizante, ubicado en una carcasa con diversos agujeros y pasadizos. Por medio de un sistema dentado tipo cremallera se produce el movimiento del mismo. La palanca de control de potencia cuenta con puntos de posición de arranques definidos en 45 ° y 75 ° (posición RUN) véase Ilustración 6; en la entrada de la SFC se encuentra la válvula de presurización que se encarga mantener la presión ideal en el sistema (75 a 80 psi) con el propósito de realizar un proceso de inyección de combustible apropiado (UNITED TURBINE, 2023b).

Cuando la palanca de control de potencia se encuentra en posición de RUN el pistón abre el paso de combustible e inicia la combustión en la línea primaria de inyectores. Una vez alcanzada una presión de (18 a 20 psi), se abre la línea secundaria de inyectores para completar el ciclo y que el motor PT6 acelere a una velocidad normalmente de IDLE (mínimas), véase Ilustración 6. Cuando se lleva la palanca de control de potencia a CUT-OFF (reversibles), véase Ilustración 7, el combustible retorna a la entrada de la bomba de la FCU para evitar que el mismo se quede en los inyectores y se calcinen por las altas temperaturas de operación (UNITED TURBINE, 2023b).

Funcionamiento del comando de control de potencia

Como se evidencia en la Ilustración 6 e Ilustración 7, el control de la FCU está definido por las posiciones de (mínimas, máximas y reversibles); por consecuente el recorrido entre las mismas determina la aceleración y desaceleración del motor PT6 de la siguiente manera.

Aceleración: Al momento generar avance desde la posición de IDLE a HIGH IDLE en el comando de control, el sistema interno de levas cierra gradualmente la válvula que permite el sangrado de Py, generando un aumento de presión que vence el sistema de contrapesas mencionado anteriormente. Al aumentar la presión en el sistema la válvula de inyección aumenta el paso de combustible, lo que permite que la turbina del compresor acelere por lo que Ng y Nf aumentan proporcionalmente, finalmente el gobernador de la hélice aumenta

el paso de la misma con el objeto de alcanzar las revoluciones necesarias para que el motor genere el empuje deseado (UNITED TURBINE, 2023b).

Desaceleración: Cuando el comando de control retrocede su posición con el objetivo de llegar a IDLE, se reduce la tensión del muelle del gobernador y la válvula de purga P_y se abre con el objeto de reducir la presión interna del sistema. La caída de presión retorna la válvula de inyección de combustible a su posición inicial, sin embargo, existe un Stop de flujo de combustible mínimo, el cual garantiza que el motor no se apague en el proceso de desaceleración, hasta que se consiga el balance entre el sistema de contrapesas y el muelle del gobernador (UNITED TURBINE, 2023b).

Operación de Reversa: Cuando la palanca de control se ubica en la posición de REVERSE THRUST, véase Ilustración 6, el control del ángulo de la hélice y el control de la FCU se integran. Al ubicar la palanca de control en la posición FULL REVERSE aumenta N_g y el ángulo en reversa de las palas de la hélice, el sistema entra a un estado de baja velocidad, en el cual se regula constantemente el flujo de combustible que proporciona el inyector, por medio del sistema de purga P_y , véase Ilustración 8.

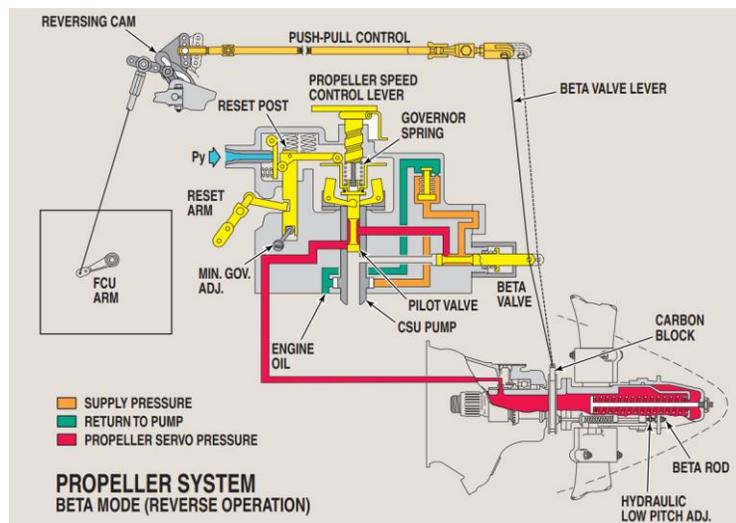


Ilustración 8. Acción de reversa en el motor PT6. (Pratt & Whitney, 1999)

5.3 Mecánica

Esta sección define los diversos parámetros matemáticos y físicos, implementados en el diseño del sistema de acoplamiento del servomotor Yaskawa SGM7J-04A y la FCU del motor PT6A, con el objeto de reemplazar el sistema Teleflex implementado en la primera etapa del proyecto de biocombustibles Universidad ECCI - FAC.

5.3.1 Criterio de la Máxima Energía de Distorsión

El criterio de Von Mises, se basa en la teoría de la distorsión máxima del matemático germano-estadounidense Richard Von Mises (1883-1953), (Beer et al., 2017; Mora, 2022; SolidWorks, 2022). La misma determina que “un componente estructural dado es seguro

siempre que el valor máximo de la energía de distorsión por unidad de volumen en ese material permanezca más pequeño que la energía de distorsión por unidad de volumen requerida para hacer ceder una probeta del mismo material sometida a tensión” (Beer et al., 2017). Von Mises es determinante al momento de seleccionar el material de fabricación del sistema de acoplamiento del servomotor, puesto que es necesario garantizar que el mismo, soporte las diversas cargas a las que se someten en las pruebas realizadas en el banco de pruebas de motores PT6. Para evaluar el desempeño de diversos materiales se utilizó el software SolidWorks en su versión (2022) con el propósito de ejecutar una simulación que refleje la fiabilidad del sistema mecánico implementado en el proyecto, en el transcurso del documento se especifican las diferentes condiciones de carga a las cuales está sometido el mismo.

5.3.2 Simulación de Elementos Finitos

Como se mencionó anteriormente, las simulaciones respectivas al sistema mecánico se efectuaron a través de SolidWorks, el mismo utiliza el método de elemento finito (FEM) que se define como “un método de aproximación de problemas continuos” (Frias, 2004), en los cuales dicho continuo se representa en el proyecto como el material de fabricación del sistema mecánico.

La representación del método (FEM) se establece de la siguiente manera:

El material de estudio se divide en un número finito de partes que se denominan “elementos”, que se interconectan entre sí con base al comportamiento de un número finito de parámetros asociados denominados nodos (Frias, 2004), véase Ilustración 9.

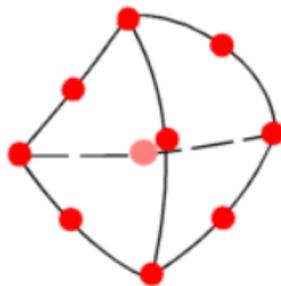


Ilustración 9. Representación de Nodos en el FEM, (SolidWorks, 2022).

La FEM en general es una discretización de un cuerpo de naturaleza continua; para el desarrollo de este documento se realizó una simulación FEM en el sistema mecánico de acople con la FCU. Obteniendo como resultado un modelo aproximado discretizado que se obtiene con base a la interpolación de los nodos del material de fabricación (Frias, 2004). El análisis FEM de SolidWorks divide el modelo diseñado en múltiples elementos con el propósito de interpolar un problema complejo a un conjunto de problemas simples que el software resuelve simultáneamente (“Dassault Systems”) (SolidWorks, 2022).

Es importante resaltar que el sistema mecánico este compuesto por diversos elementos, que en su conjunto permiten un acople solidario entre el servomotor SGM7-04A y el eje de

la FCU, con un movimiento ajustable en los ejes coordenados (X, Y, Z); de la tal manera que el sistema mecánico se compone por:

- Láminas de unión ranuradas.
- Sistemas Anti vibratorios.
- Tornillería de ajuste.
- Acople tipo fuelle.

El diseño mecánico está sometido a un análisis estático, puesto que el mismo no presenta cambio de posición en el transcurso de las pruebas realizadas en el motor PT6, por lo cual se pueden representar de forma aproximada las diversas cargas a las que el diseño mecánico está sometido en el banco de pruebas, además se garantiza que todos los elementos que lo conforman, cumplan satisfactoriamente con los objetivos del proyecto.

5.3.3 Uniones Atornilladas

La normativa básica en edificación NBE AE-95 (España. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. et al., 2003), establece los parámetros y cálculos necesarios que debe cumplir el material de fabricación y la tornillería del sistema mecánico. Para cumplir satisfactoriamente con los requisitos del proyecto.

Los parámetros establecidos en la normativa y aplicados al proyecto son:

- Uniones roblonadas y atornilladas: Las uniones implementadas en el desarrollo del proyecto se definen como uniones de atado, puesto que las mismas tienen la misión de mantener unidas entre sí las láminas del sistema mecánico por medio de tornillería (España. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. et al., 2003)“Normativa AE-95”.

La sección 3.6 de la normativa AE-95 establece los parámetros necesarios al momento de realizar una unión atornillada, los factores principales que se tuvieron en consideración son:

- Distancia a los bordes del sistema mecánico.
- Distancia entre centros del sistema mecánico.
- Distancia entre bordes y centros del sistema mecánico.
- Distancia entre dobleces, bordes y centros del sistema mecánico.
- Tornillería: Se establece a partir de la sección 2.5 de la normativa AE-95, las diversas clases de tornillos a considerar en la inclusión del sistema mecánico a la vez que parámetros de relevancia como lo son.
 - Tipo de rosca para tornillos ordinarios y calibrados.
 - Tornillos ordinarios (dimensiones, longitudes, tolerancias).
 - Tornillos calibrados (dimensiones, longitudes, tolerancias).
 - Tuercas y arandelas.
 - Características de los materiales de fabricación de los tornillos.
 - Cálculos de resistencia a cortante.
 - Cálculos de resistencia al aplastamiento.

- Cálculos de resistencia al deslizamiento.

Resumiendo, se realizó el cálculo de los tornillos a implementar en el sistema mecánico con base a las características del material de fabricación del mismo, gracias a los diversos ensayos de resistencia documentados en la normativa AE-95 y a los requisitos de diseño del proyecto.

Es relevante mencionar un factor fundamental al momento de seleccionar la tornillería, es el torque generado por el servomotor GSM7-04A, puesto que el mismo repercute directamente en los cálculos de resistencia mencionados anteriormente. Por este motivo se realizó un análisis de cargas que permite evidenciar de manera sencilla el proceso de selección de la tornillería, en secciones posteriores se evidencia el proceso de la selección de la tornillería implementada en el sistema mecánico.

5.4 Control

5.4.1 Control Cascada

El control en cascada es un método ampliamente utilizado en la industria automatizada, tiene como objeto mejorar el desempeño de aquellos sistemas que cuentan con múltiples entradas y una salida (Mazzone & Centrifugo De Watt, 2002). Su estructura véase Ilustración 10, permite el rechazo de perturbaciones que pueden afectar a la variable principal del proceso $Y(s)$.

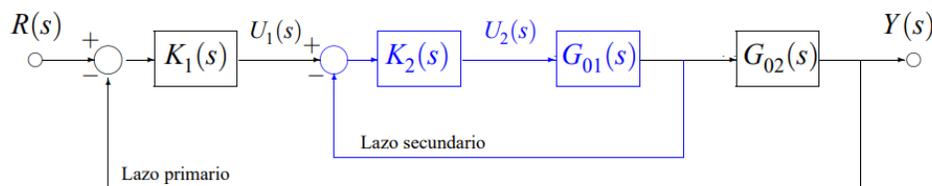


Ilustración 10. Esquema del Control Cascada, (Mazzone & Centrifugo De Watt, 2002).

El control en cascada presenta las siguientes características:

- El control en cascada se implementa cuando el proceso tiene más de una etapa a controlar (G_{01}, G_{02}), véase Ilustración 10.
- Los controladores implementados en el control cascada están interconectados entre sí, por lo cual K_2 está implícito en el proceso de G_{02} , véase Ilustración 10. Esto establece que la salida de K_1 ($U_1(s)$) es el punto de referencia o set point de K_2 (Cordero et al., 2014).
- El lazo interno (secundario), véase Ilustración 10, debe ser más rápido que el lazo externo (primario), puesto que si G_{01} es más lento que G_{02} , no se verán reflejados los cambios implementados por los controladores K_1, K_2 . Por lo que es ineficiente aplicar esta técnica de control a los sistemas con dichas características.
- El controlador secundario K_2 , se diseña principalmente con el propósito de atenuar las perturbaciones que se puedan presentar en el sistema, antes de que las mismas afecten significativamente la salida del sistema $Y(s)$ (Mazzone & Centrifugo De Watt, 2002), véase Ilustración 10.

La inclusión del control en cascada en el proyecto radica en que el controlador del servomotor SGM7J-04A, funciona con base a esta estructura de control por medio de la retroalimentación de los siguientes lazos:

- Posición.
- Velocidad.
- Torque.

En la en la sección 9.1 Esquema de Control Driver MP2600iec, se explica a detalle el funcionamiento de la estructura de control proporcionada por el fabricante en el controlador MP2600iec.

5.4.2 Identificación de Sistemas

Existen diversas metodologías para obtener el modelo aproximado de una planta, es necesario conocer el comportamiento de la misma, al momento de establecer los parámetros adecuados para el diseño del cualquier controlador. Entre las diversas metodologías de identificación de sistemas se encuentran:

- *Modelado Matemático*: Es un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema que se está evaluando, depende de la perspectiva un sistema eléctrico, mecánico, térmico, biológico, entre otros, puede representarse de múltiples maneras. Se implementan por medio de ecuaciones diferenciales y su uso en la industria es limitada puesto que representar un sistema por medio de un modelo matemático se traduce en tiempo y recursos (Ogata, 1998).
- *Método de reacción al escalón*: Es uno de los métodos más tradicionales presentado por Ziegler y Nichols, en el cual se debe aplicar un escalón a la entrada del sistema y obtener los datos que presenta la salida del mismo en lazo abierto (Aström & Hägglung, 2009), véase Ilustración 11.

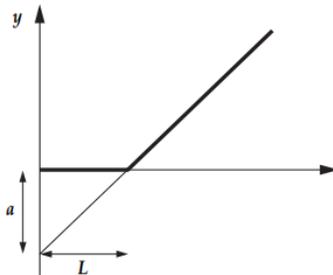


Ilustración 11. Método del Escalón, (Ogata, 1998).

La implementación de este método permite la obtención de la constante del tiempo de ejecución del proceso y del tiempo muerto del sistema, por medio de la respuesta temporal de la salida, generando un modelo aproximado de primer orden más tiempo muerto, como se evidencia en la ecuación (1).

$$G(s) = \frac{K e^{-tms}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

Donde K representa la constante estática del sistema, tm es el tiempo muerto y τ representa la constante de tiempo del sistema. De este método se derivan múltiples, entre los cuales se destacan la identificación por recta tangente y la identificación por 2 puntos.

- *Método de la respuesta en frecuencia:* La identificación se realiza por medio de una caracterización simple de la dinámica del proceso, con base a la respuesta del sistema a señales de tipo sinusoidales. Propuesta por el matemático francés Fourier, el método establece que “si la señal de entrada a un sistema es sinusoidal, entonces la señal de salida será también sinusoidal después de un cierto transitorio” (Aström & Hägglung, 2009).

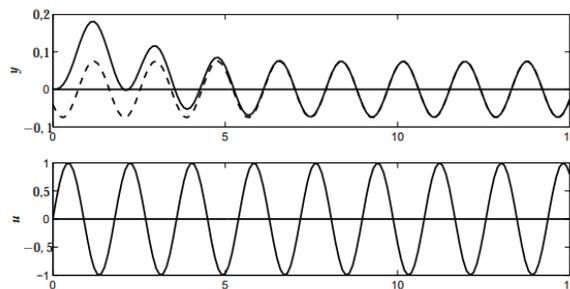


Ilustración 12. Respuesta en frecuencia, (Aström & Hägglung, 2009).

Como se visualiza en la Ilustración 12, la entrada al sistema u y la respuesta en la salida y son señales sinusoidales, ambas cuentan con la misma frecuencia, pero la fase y la amplitud de la señal son distintas. La respuesta en frecuencia se representa por medio de la ecuación (2) de tal manera que si la señal de entrada es:

$$u(t) = u_0 \sin wt \quad (2)$$

Entonces la salida en estado estacionario se representa por medio de la ecuación (3).

$$y(t) = a(w)u_0 \sin(wt + \varphi(w)) \quad (3)$$

5.4.2.1 Identificación por Sistemas Integrantes

El proceso de identificación del proceso es indispensable para conocer la dinámica y el comportamiento del servomotor, además permite realizar comparaciones con diversos controladores externos al fabricante YASKAWA, la obtención del mismo se realizó de la siguiente manera.

Identificación del Sistema: Por medio de una prueba de lazo abierto realizada al servomotor, se identificó que posee un comportamiento integrante, por lo cual al momento de modificar la variable de control (escalón), la variable del proceso (posición) cambia proporcionalmente al tiempo creando una pendiente (Peacock, 2017).

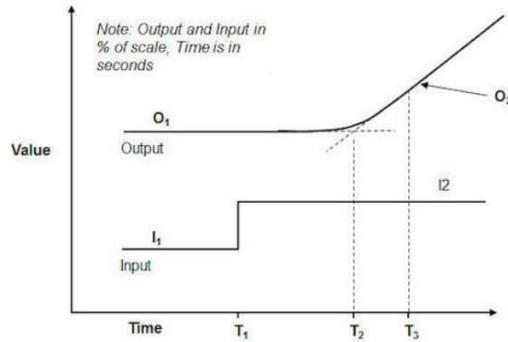


Ilustración 13. Comportamiento de un sistema integrante, (Cárdenas & Jiménez, 2018).

Como se visualiza en la Ilustración 13 el sistema integrante está compuesto por tiempo muerto y una ganancia que aumenta proporcionalmente, este comportamiento se puede evidenciar en los procesos de nivel y en servomecanismos (Cárdenas & Jiménez, 2018), de tal manera que se realiza un modelo aproximado de la planta por medio de la siguiente ecuación (4).

$$G_m(s) = \frac{k_m * e^{-stm}}{s} \quad (4)$$

Donde k_m corresponde a la ganancia del sistema y se puede hallar a partir de la siguiente ecuación (5) (Cárdenas & Jiménez, 2018).

$$k_m = \frac{O_2 - O_1}{(I_2 - I_1) * (T_3 - T_2)} \quad (5)$$

El cálculo del tiempo muerto t_m se realiza a partir de la siguiente ecuación (6).

$$t_m = T_2 - T_1 \quad (6)$$

Sintonización de Controladores: Corresponde al ajuste de los parámetros que definen al controlador PID sea el proporcional, integral o derivativo (K_p, T_i, T_d), con el propósito de dar cumplimiento a los diversos criterios de desempeño establecidos que definen el comportamiento del sistema (Cárdenas & Jiménez, 2018).

El controlador implementado para el control del servomotor, fue un proporcional-integral (PI) y un proporcional-derivativo (PD), los mismos fueron sintonizados con base a los parámetros definidos en la Tabla 1 y la Tabla 2.

Ítem	Método	K_p	T_i
1	Ziegler & Nichols	$\frac{0.9}{k_m \tau_m}$	$3.33\tau_m$
2	Coon	$\frac{1.0}{k_m \tau_m}$	0
3	Aström and Hägglund	$\frac{0.63}{k_m \tau_m}$	$3.2\tau_m$
4	Hay	$\frac{0.42}{k_m \tau_m}$	$5.8\tau_m$
5	Skogestad	$\frac{0.404}{k_m \tau_m}$	$7\tau_m$

Tabla 1. Parámetros PI por procesos integrantes, (Aidan O & Dwyer, 2009).

Sintonización de procesos Integrantes			
Ítem	Método	K_p	T_d
1	Visioli ISE	$\frac{1.03}{k_m \tau_m}$	$0.49\tau_m$
2	Visioli ITSE	$\frac{0.96}{k_m \tau_m}$	$0.45\tau_m$
3	Visioli ISTE	$\frac{0.9}{k_m \tau_m}$	$0.45\tau_m$

Tabla 2. parámetros PD por procesos integrantes, (Visioli, 2001).

En la sección 9.2 del documento se realiza el proceso de identificación del servomotor SGM7J-04A, la sintonización del mismo por medio de sistemas integrantes y posterior a ello en la sección 11, se proporciona una comparativa entre el controlador PI , PD diseñados por procesos integrantes y el proporcionado por YASKAWA en su controlador MP2600iec.

5.4.3 Controladores PID

Este controlador es el algoritmo de control más común implementado en sistemas industriales actualmente (Aström & Hägglung, 2009), el mismo se puede utilizar de diversas maneras como controlador principal, como parte de un paquete de diversos controladores en un sistema de control digital, como lo puede ser el control en cascada. El controlador PID está conformado por la combinación de los controladores proporcional, integral y derivativo, el mismo se representa a partir de la siguiente ecuación (7).

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (7)$$

- *Acción Proporcional al Error:* Corresponde a la constante proporcional multiplicada por el error, lo cual provoca que el sistema tenga una respuesta de crecimiento alta, si el valor de constante proporcional es muy alto puede generar sobre impulsos en la salida (Aström & Hägglung, 2009). La acción proporcional al error está definida por la siguiente ecuación (8).

$$u(t) = Ke(t) \quad (8)$$

Donde $u(t)$ corresponde a la señal de control, K es la constante de proporcional y $e(t)$ corresponde al error.

- *Acción Integral al Error:* Tiene como objetivo principal disminuir el error de estado estacionario, generado por la acción de control efectuada en la acción proporcional, por lo tanto, la acción integral tiende a llevar el error de estado estacionario ya sea positivo o negativo a cero (Aström & Hägglung, 2009). La acción integral al error está definida por la siguiente ecuación (9).

$$u(t) = K_i \int e(t) dt \quad (9)$$

Donde K_i corresponde a la constante proporcional integral.

- *Acción Derivativa al Error:* El propósito general de la acción derivativa es mejorar la estabilidad del sistema en el lazo cerrado, oponiéndose a los cambios repentinos en el error, como resultado de su inclusión se resta velocidad al levantamiento y al tiempo de establecimiento del sistema (Aström & Hägglung, 2009). La acción derivativa al error está definida por la ecuación (10).

$$e(t) = K_d \frac{det}{dt} \quad (10)$$

Donde K_d corresponde a la constante proporcional derivativa.

Los controladores PID a través de la historia han modificado su estructura de implementación, inicialmente los primeros controladores fueron diseñados con base a relés neumáticos, fuelles y opresiones de válvulas de aguja (Aström & Hägglung, 2009), con una estructura interactuante (serie), con el auge tecnológico y la entrada de los microprocesadores es más común la inclusión de la arquitectura no interactuante (paralela), véase Ilustración 14.

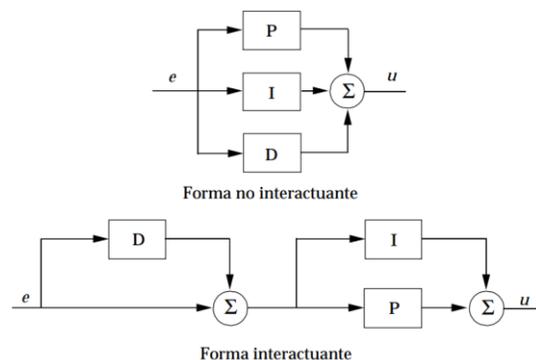


Ilustración 14. Estructura del PID, (Aström & Hägglung, 2009).

6. Selección Servomotor – Driver

Para la selección del control mecatrónico se examinaron en conjunto con personal experto de la FAC, los diversos parámetros operativos a los cuales estará expuesto el servomotor en las pruebas en el motor PT6, entre las cuales se destacan cantidad de arranques, paradas y tiempo de funcionamiento durante las pruebas.

De la misma manera existen factores que condicionan la selección del control mecatrónico y se presentan a continuación:

- Torque requerido 1,13 N.m (Dato otorgado por personal experto de la FAC).
- El diseño mecánico debe ser compacto y de fácil ensamblaje.
- El sistema debe soportar altas temperaturas (mayor a 200 °C).
- El sistema debe contar con certificación anti fluidos.
- El sistema debe soportar las condiciones climáticas a la intemperie del banco de pruebas.
- El servomotor debe contar con una alta precisión de movimiento.

Considerando lo anterior, también se evaluaron por medio de una comparativa de proveedores parámetros de mercado tales como: disponibilidad, especificaciones técnicas y servicio post venta, entre los cuales se destacó.

6.1 Siemens

Por parte del proveedor alemán estuvo en consideración el conjunto driver 6SL3210-5FB10-4UA1 y el servomotor 1FL6034-2AF21-1AA1 de la familia SINAMICS V90 (SIEMENS, 2016). En la Tabla 3 y la Tabla 4 se evidencian sus principales características.

Servomotor 1FL6034-2AF21-1AA1				
Ítem	Característica	Detalle	Unidades	Observaciones
1	Alimentación	200	VAC	Alimentación trifásica VAC.
2	Potencia	400	W	No Aplica.
3	Encoder	13	Bits	resolución del encoder incremental.

4	Torque Nominal	1,27	Nm	Torque de trabajo de operación normal configurable por software.
5	Torque Máximo	3,82	Nm	Torque máximo instantáneo ofrecido por el servomotor.
6	Consumo Nominal	2,6	A	Consumo en corriente de operación normal.
7	Consumo Máximo	7,8	A	Consumo en corriente máximo que soporta el servomotor.
8	Velocidad Nominal	3000	RPM	Velocidad configurable por software.
9	Velocidad Máxima	5000	RPM	Velocidad configurable por software.

Tabla 3. Características Servomotor Siemens, (SIEMENS, 2016)

Driver 6SL3210-5FB10-4UF1					
Ítem	Característica	Detalle	Unidades	Cantidad	Observaciones
1	Alimentación.	200	VAC	1	Alimentación trifásica VAC.
2	Potencia.	400	W	1	No Aplica.
3	Entradas Digitales.	24	VDC	4	No Aplica.
4	Salidas Digitales.	24	VDC	2	No Aplica.
5	Entradas Análogas.	N/A	N/A	0	No Aplica.
6	Salidas Análogas.	N/A	N/A	0	No Aplica.

Tabla 4. Características Driver Siemens, (SIEMENS, 2023)

La mayor problemática encontrada con la solución proporcionada por Siemens, es que el conjunto no cuenta con una entrada analógica, la misma es indispensable para la lectura del voltaje suministrado por el comando de control de potencia. Además, considerando la cantidad de entradas y salidas digitales que posee el driver, existe una limitante al momento de diseñar la solución a la problemática del proyecto, invalidando la posibilidad de una ampliación del mismo a futuro.

6.2 SEW

Por parte del proveedor alemán estuvo en consideración el conjunto driver MDX61B0015-2A3-4-0 y el servomotor CMP50M/PK/AK1H/KK de la familia CMP (SEW, 2009, 2010). En la Tabla 5 y la Tabla 6 se evidencian sus principales características.

Servomotor CMP50M				
Ítem	Característica	Detalle	Unidades	Observaciones
1	Alimentación	200	VAC	Alimentación trifásica VAC.
3	Encoder	15	Bits	resolución del encoder incremental.
4	Torque Nominal	2,4	Nm	Torque de trabajo de operación normal configurable por software.
5	Torque Máximo	15,4	Nm	Torque máximo instantáneo ofrecido por el servomotor.
6	Consumo Nominal	1,68	A	Consumo en corriente de operación normal.
7	Consumo Máximo	17,1	A	Consumo en corriente máximo que soporta el servomotor.

8	Velocidad Nominal	3000	RPM	Velocidad configurable por software.
9	Velocidad Máxima	6000	RPM	Velocidad configurable por software.

Tabla 5. Características servomotor SEW, (SEW, 2009).

Driver MDX61B0015-2A3-4-0					
Ítem	Característica	Detalle	Unidades	Cantidad	Observaciones
1	Alimentación.	200	V	1	Alimentación trifásica VAC.
2	Potencia.	2,7	VA	1	No Aplica.
3	Entradas Digitales.	24	V	8	Alimentación DC.
4	Salidas Digitales.	24	V	4	Alimentación DC.
5	Entradas Análogas.	±10	V	2	Corriente máxima 20 mA.
6	Salidas Análogas.	N/A	N/A	0	No Aplica.

Tabla 6. Características Driver SEW, (SEW, 2010).

La problemática encontrada con la propuesta ofrecida por SEW se divide principalmente en dos factores, inicialmente el equipo se encuentra sobredimensionado en cuanto a torque con respecto a lo solicitado en el proyecto. Finalmente, el driver de SEW no cuenta con un puerto analógico, que permita la recepción de datos para el comando de control de potencia al igual que Siemens.

6.3 Yaskawa

El proveedor japonés presenta el sistema mecatrónico adecuado para el proyecto, el conjunto driver servomotor pertenece a la serie SIGMA 7, específicamente el driver MP2600iec y el servomotor SGMJ-04A (Yaskawa, 2020, 2023), a continuación, se presentan sus características.

- **Especificaciones Técnicas conjunto Driver – Servomotor**

Servomotor SGMJ-04A

Este dispositivo pertenece a la serie J de sistemas de control de movimiento del ecosistema SIGMA 7, se emplea principalmente en sistemas donde se requiera alta precisión y una alta velocidad de respuesta (Yaskawa, 2020), las características más relevantes del mismo se presentan en la Tabla 7.

Servomotor SGM7J-04A					
Ítem	Característica	Detalle	Unidades	Observaciones	
1	Alimentación	200	V	Alimentación trifásica VAC.	
2	Potencia	400	W	No Aplica.	
3	Encoder	24	Bits	resolución del encoder absoluto.	
4	Torque Nominal	1,27	Nm	Torque de trabajo de operación normal configurable por software.	
5	Torque Máximo	4,46	Nm	Torque máximo instantáneo ofrecido por el servomotor.	
6	Consumo Nominal	2,5	A	Consumo en corriente de operación normal.	

7	Consumo Máximo	9,3	A	Consumo en corriente máximo que soporta el servomotor.
8	Velocidad Nominal	3000	RPM	Velocidad configurable por software.
9	Velocidad Máxima	6000	RPM	Velocidad configurable por software.

Tabla 7. Características servomotor Yaskawa, (Yaskawa, 2020).

El servomotor SGM7J-04A cuenta con un encoder de 24 bits, lo cual se traduce en mejorar la resolución a fracciones de grado por el movimiento del comando de potencia. La mayoría de los parámetros del mismo son configurables mediante software, lo que permite adaptar las características del servomotor al proyecto.

Driver MP2600iec

“Este driver es un conjunto controlador SGVD2R8 con una tarjeta análoga adicional conectada a un servoamplificador, pertenece al ecosistema SIGMA compatible con sus versiones 5 y 7” (Yaskawa, 2023), este sistema es ensamblado en conjunto permite reducir el espacio de instalación del mismo sin perder prestaciones, las características más relevantes se presentan en la Tabla 8:

- Control de movimiento por medio del protocolo PLCopen que incluye monitoreo de variables y la capacidad de modificar los diversos parámetros del servomotor.
- Inclusión de diversos sistemas como el auto tuning, anti resonancia por medio de filtros, que se pueden modificar mediante los diversos parámetros de control del servomotor.
- Soporta protocolos EtherNet/IP y Modbus TCP.

Sistema de entradas y salidas E/S del controlador conformado por:

Driver MP2600iec					
Ítem	Característica	Detalle	Unidades	Cantidad	Observaciones
1	Alimentación.	200	V	1	Alimentación trifásica VAC.
2	Potencia.	400	W	1	No Aplica.
3	Entradas Digitales.	24	V	15	Corriente máxima 5 mA.
4	Salidas Digitales.	24	V	11	Corriente máxima 50 mA.
5	Entradas Analógicas.	±10	V	1	No Aplica.
6	Salidas Analógicas.	±10	V	1	Corriente máxima ±5 mA.
9	Batería de litio.	3,6	V	1	Retiene datos SRAM.

Tabla 8. Propiedades Driver MP2600iec, (Yaskawa, 2023).

Como se evidencia en comparación con SEW y Siemens, la solución ofrecida por Yaskawa permite el desarrollo del proyecto, añadiendo la posibilidad de ampliar la línea de servomotores para futuros trabajos, sin la necesidad de adquirir drivers adicionales.

Es importante recordar que el comando de potencia suministrado por la FAC está acoplado a un potenciómetro de 500 Ω de tres pines, véase Ilustración 15, que tiene como función

variar el voltaje de entrada. La sensibilidad de la palanca se calcula por medio de la ecuación (11), donde se relaciona la posición de la palanca con el voltaje de entrada.

Es importante tener en cuenta que la sensibilidad, es una medida de variación de la posición de la palanca, en respuesta a un cambio en el voltaje de entrada del potenciómetro. Un valor alto de sensibilidad indica que la posición de la palanca cambiará significativamente, en respuesta a un pequeño cambio en el voltaje de entrada, mientras que un valor bajo indica que la posición de la palanca cambiará poco en respuesta a un cambio en el voltaje de entrada.

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta O} \quad (11)$$
$$S = \frac{4.29 \text{ V} - 0.22 \text{ V}}{180^\circ - 0^\circ}$$
$$S = 0.022 \text{ V}/\%$$

Donde, S es la sensibilidad del sistema, ΔI representa el diferencial del voltaje suministrado al comando de potencia, ΔO representa el diferencial de posición angular definido en el comando de potencia.



Ilustración 15. Potenciómetro palanca, fuente Propia.

7. Sistema Mecánico

7.1 Diseño Conceptual

El objetivo principal del sistema mecánico es reemplazar el sistema Teleflex implementado en el banco de pruebas de motores PT6, de tal manera que junto al esquema de control se eliminen las problemáticas mencionadas en la sección 1.

Criterios de Diseño Conceptual

El soporte mecánico está definido por los siguientes criterios de diseño.

- El sistema mecánico debe transferir solidariamente el movimiento entre el servomotor y el eje de la FCU.
- El sistema mecánico debe permitir el movimiento en los tres ejes coordinados.
- El sistema mecánico debe ser de ensamble y desmonte sencillo.
- El sistema mecánico debe soportar altas temperaturas y condiciones de intemperie.
- El sistema mecánico debe mitigar la transferencia de vibraciones desde el motor PT6 al servomotor.

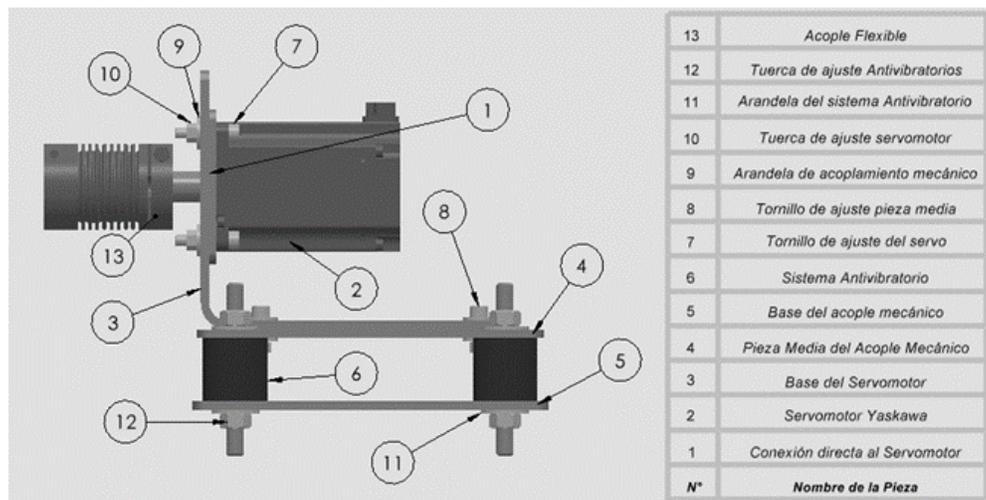


Ilustración 16. Sistema Mecánico, Servomotor y Fusible Mecánico, fuente Propia.

Para dar cumplimiento a los criterios de diseño, el desarrollo del sistema mecánico se enfocó principalmente en el servomotor, el diseño de las láminas estructurales que lo componen, la selección del acople mecánico tipo fuelle, el sistema anti vibratorio y finalmente en el recubrimiento de las láminas, véase Ilustración 16.

Servomotor: El sistema mecánico cuenta con un servomotor YaskawaSGM7J-04A con certificación IP67, véase Ilustración 17, que tiene como función generar el movimiento que será transferido de manera solidaria al eje de la FCU. El mismo está regulado por la palanca de potencia ubicada en la cabina de pruebas.



Ilustración 17. Servomotor Yaskawa SGM7J-04A, fuente propia.

Como se visualiza en la Ilustración 17, el servomotor posee un tamaño compacto de fácil ensamblaje en el sistema mecánico, además resiste temperaturas hasta de 250 °C y su certificación IP garantiza su resistencia a las condiciones climáticas presentadas en el banco de pruebas de motores PT6 (Yaskawa, 2020).

Láminas Estructurales: El sistema mecánico está constituido, por cuatro láminas ranuradas, véase Ilustración 18, que están conectadas entre sí por medio de tornillería, que permiten el movimiento del servomotor en los tres ejes coordenados.

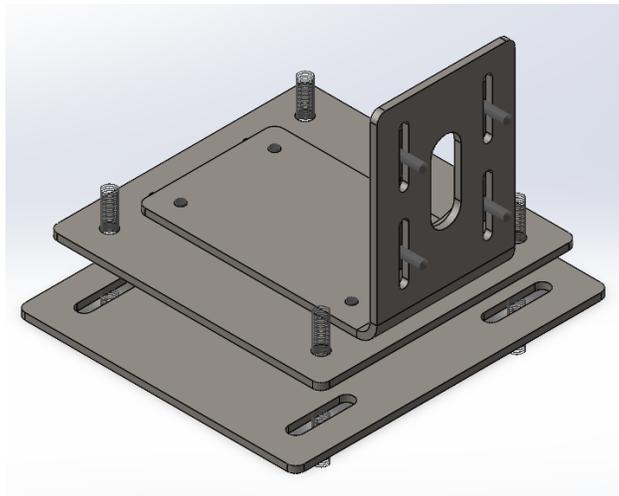


Ilustración 18. Diseño Mecánico, fuente propia.

Como se evidencia en la Ilustración 18, esta configuración de diseño garantiza el cumplimiento de los siguientes criterios de diseño, el desplazamiento relativo entre láminas, permite el movimiento del servomotor en los tres ejes coordenados (3 cm para cada uno de ellos), la tornillería implementada a través de sistemas de ajuste por tuercas y arandelas, facilita el armado y desarmado de la estructura.

Acople tipo Fuelle: El sistema mecánico cuenta con un acople tipo fuelle MK2 – 100, que permite la conexión del eje del servomotor y el eje de la FCU, como se evidencia en la Ilustración 19.



Ilustración 19. Acople Mecánico, fuente propia.

La inclusión del MK2-100 permite una transferencia de movimiento solidario, un fácil montaje y desmonte del mismo, además mitiga las vibraciones generadas desde el eje de la FCU al servomotor (R+W, 2023).

Sistema Anti vibratorio: El sistema mecánico cuenta con 4 soportes anti vibratorios cilíndricos, véase Ilustración 20, fabricados en caucho que tienen como función suprimir las vibraciones generadas desde la estructura que soporta el sistema mecánico hacia el servomotor.



Ilustración 20. Sistema Anti-Vibratorio, (Mecanocaucho, 2023).

Además de la función de supresor de vibraciones, la inclusión de los mismos permite el movimiento estructural en los ejes coordinados y un fácil ensamble o desmonte del sistema mecánico (Mecanocaucho, 2023).

Recubrimiento Láminas: El sistema de láminas ranuradas están recubiertas, por pintura anticorrosiva RUST OLEUM como se aprecia en la Ilustración 21, la misma tiene como objetivo proteger el material de las láminas, de las diversas condiciones climáticas a las que está expuesto el banco de pruebas de motores PT6.

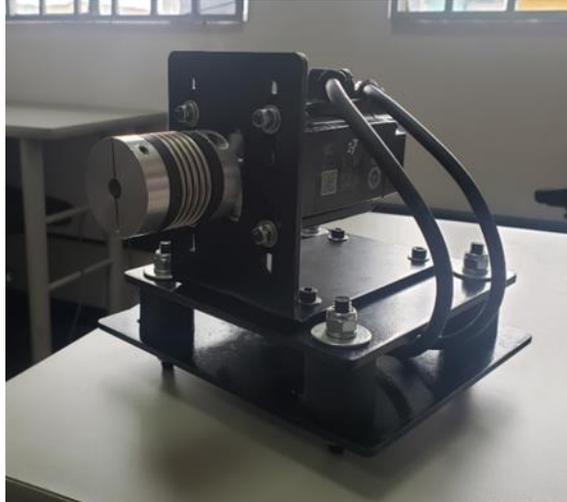


Ilustración 21. Recubrimiento de láminas, fuente propia.

El recubrimiento de las láminas evita que el sistema mecánico se oxide por la humedad, además de soportar temperaturas de hasta 650 °C.

7.2 Diseño de Detalle

Con el propósito de evaluar las diversas propiedades físicas, que se presentan en el sistema mecánico se realizaron los cálculos necesarios, para establecer los componentes del mismo y garantizar que no se presentarán fallas al momento de realizar las pruebas en el motor PT6.

Dimensionamiento del Servomotor

- ***Factor de Servicio***

Para seleccionar el servomotor que está implementado en el sistema mecánico, inicialmente se determinó un factor de servicio, véase la Tabla 9, con base, a la cantidad de arranques y paradas del motor PT6 que se presentan durante el periodo de ejecución, de las pruebas de biocombustibles.

TIPO DE MÁQUINA	CARGA		
	UNIFORME	MODERADA	PESADA
Máquinas de vinos			
Embotelladoras	•		
Etiquetadoras	•		
Agitadores y mezcladores			
Líquidos y semilíquidos	•		
Con duración variada		•	
Con suspensión sólida		•	
Máquinas para materiales plásticos			
Extrusoras		•	
Refinadoras			•
Mezcladores centrífugos			•
Máquinas para madera			
Afiladores		•	
Transportadoras de madera			•
Bombas			
Dosificadores		•	
Alternadores		•	
Centrífugas de densidad variable		•	
Transportadores para carga pesada			
Cintas		•	
Grúas		•	

TABLA 2

TIPO DE CARGA	COEFICIENTE Cd				
	Horas diarias de trabajo				
	2	4	8	16	24
Uniforme	0,75	0,9	1	1,25	1,5
Moderada	1	1,12	1,25	1,5	1,75
Pesada	1,25	1,5	1,75	2	2,5

TABLA 3

TIPO DE CARGA	COEFICIENTE Cf					
	Número de arranques horarios					
	10	20	30	60	120	240
Uniforme	1,1	1,15	1,20	1,25	1,3	1,4
Moderada	1,15	1,20	1,25	1,3	1,4	1,5
Pesada	1,2	1,25	1,3	1,35	1,45	1,55

Tabla 9. Criterio de selección del servomotor, (Geremiareductores, 2023)

Se determinó de acuerdo a información suministrada por personal experto FAC, que una prueba de biocombustibles en el motor PT6, presenta una duración de 4 horas en las cuales se realizan 80 arranques con una relación de $(20^{\text{arranques}}/\text{hora})$, con base a la información de la Tabla 9, se determinó que el tipo de carga es uniforme, con estos datos se pueden establecer los coeficientes (Cd) y (Cf) . Una vez establecidos los parámetros de operación del servomotor se procede a calcular el factor de servicio (fsu) cómo se evidencia en la ecuación (12).

$$fsu = Cd * Cf \tag{12}$$

$$fsu = 0.9 * 1.15 = 1.035$$

Una vez definido (fsu) , es necesario calcular el torque nominal (Tn) que debe manejar el servomotor, el mismo se calcula con base al torque requerido $(Treq)$ en la sección 6, como se evidencia en la ecuación (13).

$$Tn = Treq * fsu \tag{13}$$

$$Tn = 1.13 \text{ N.m} * 1.035$$

$$Tn = 1.169 \text{ N.m}$$

- **Selección servomotor Yaskawa SGM7J-04A.**

La selección de la referencia SGM7J-04A, se realizó con base al software SIGMA ofrecida por el proveedor Yaskawa, en la misma se establece que la inercia es un factor fundamental

para la selección del servomecanismo. El personal experto FAC suministró una pieza que simula las características del eje de la FCU, por lo cual la inercia de la misma se puede calcular por medio de la siguiente ecuación (14).

$$I = \frac{1}{3} * m * L^2 \tag{14}$$

Donde (I) representa el momento de inercia de la pieza, (m) es la masa de la pieza que equivale a (0.15 kg), (L) es la longitud de la pieza (80.5 mm); por lo cual se puede obtener el valor de inercia del eje de la FCU.

$$I = \frac{1}{3} * 0.15 \text{ kg} * \left(80.5 \text{ mm} * \frac{1\text{m}}{1000 \text{ mm}} \right)^2$$

$$I = 3.240 * 10^{-4} \text{ kg. m}^2$$

Como se menciona en la sección 3, el sistema mecánico posee una conexión solidaria con el eje de la FCU con relación 1:1, por lo cual es necesario calcular la inercia total (I_t) que corresponde a doble de (I).

$$I_t = I * 2$$

$$I_t = 6.480 * 10^{-4} \text{ kg. m}^2$$

Una vez definido el valor de (I_t), se procede a dimensionar el servomotor por medio del software SIGMA teniendo en consideración (T_n), como se puede evidenciar en la Tabla 10.

Part No.	Rated Torque (Nm)	Factor of Safety	Required Rated Torque (Nm)	Peak Torque (Nm)	Factor of Safety	Required Peak Torque (Nm)	Rated S _i (RPM)
SGM7P-04A*A	1,27	1,12	1,13	3,82	3,38	1,13	3000
SGMAV-04A*A	1,27	1,12	1,13	3,82	3,38	1,13	3000
SGM7J-04A*A	1,27	1,12	1,13	4,46	3,95	1,13	3000
SGM7A-04A*A	1,27	1,12	1,13	4,46	3,95	1,13	3000
SGMJV-04A*A	1,27	1,12	1,13	4,46	3,95	1,13	3000
S7P01A-VL05...	1,59	1,34	1,19	4,78	4,01	1,19	600

Tabla 10. Selección servomotor, mediante software SIGMA.

Una vez seleccionado el servomotor por medio del software SIGMA, en la Tabla 11 se presentan las características principales del SGM7J-04A.

Servomotor SGM7J-04A				
Ítem	Característica	Detalle	Unidades	Observaciones
1	Torque Nominal	1,27	Nm	Torque de trabajo de operación normal configurable por software.
2	Torque Máximo	4,46	Nm	Torque máximo instantáneo ofrecido por el servomotor.
3	Velocidad Nominal	3000	RPM	Velocidad configurable por software.

4	Velocidad Máxima	6000	RPM	Velocidad configurable por software.
---	------------------	------	-----	--------------------------------------

Tabla 11. Características mecánicas del servomotor, (Yaskawa, 2020).

Condiciones de Carga del Sistema Mecánico

Una vez seleccionado el servomotor, se realizaron los cálculos pertinentes al sistema mecánico en general, es importante resaltar que los mismos se ejecutaron con base a las peores condiciones de carga posible, entre las cuales se destaca:

- **Momento Máximo del Servomotor.**

Para los cálculos a realizar, se consideró el torque máximo ofrecido por el servomotor (4.6 N.m) (Yaskawa, 2020), ya que repercute directamente en la selección del grosor de las láminas (importante al momento de considerar la resistencia del material); la selección del acople tipo fuelle y la selección de la tornillería.

- **Carga Aerodinámica de la Hélice.**

Uno de los factores más relevantes a tener en consideración, es el empuje que produce la hélice del motor PT6 cuando se encuentra operando a máximas revoluciones, ya que es necesario obtener la presión distribuida que ejerce la misma sobre el sistema mecánico. Dicho empuje se obtiene en las condiciones de altitud de Madrid, Cundinamarca (Castellanos D. 2022) véase Ilustración 22.

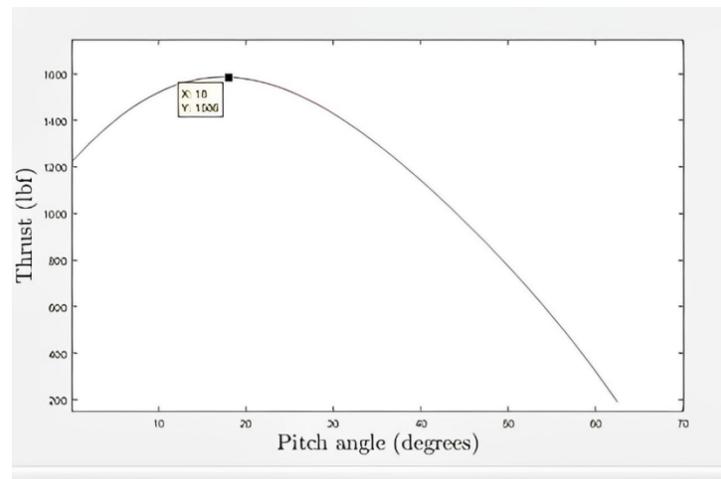


Ilustración 22. Carga Aerodinámica, Castellanos D. 2022.

La presión distribuida (P_{dis}), se calcula con base a la fuerza de empuje (F_{emp}) que tiene un valor de (1586 Lbf) véase Ilustración 22, y el radio de la hélice (R_{hel}) con un valor de (1.19 m) (Castellanos D. 2022); como se evidencia en la ecuación (15).

$$P_{dis} = \frac{F_{emp}}{A_{hel}} \quad (15)$$

Inicialmente se calcula el área de la hélice A_{hel} por medio de la siguiente ecuación (16).

$$A_{hel} = \pi * (R_{hel})^2 \quad (16)$$

$$A_{hel} = \pi * (1.19 \text{ m})^2$$

$$A_{hel} = 4.449 \text{ m}^2$$

Una vez obtenida el área de la hélice A_{hel} se procede a calcular la presión distribuida.

$$P_{dis} = \frac{1586 \text{ Lbf} * \left(\frac{4,4482 \text{ N}}{1 \text{ Lbf}}\right)}{4.449 \text{ m}^2}$$

$$P_{dis} = 1585.716 \text{ N/m}^2$$

La presión distribuida al igual que el momento máximo del servomotor, determina factores claves como el grosor y material de las láminas, además de la tornillería implementada en el sistema mecánico.

- **Pesos del Sistema Mecánico**

En el desarrollo aritmético del proyecto, se tomó en consideración los diferentes pesos de cada uno de los componentes del sistema mecánico, con el propósito de evaluar el comportamiento del mismo en los siguientes aspectos:

- Selección de la tornillería implementada en el sistema mecánico.
- Verificación de resistencia del material de fabricación de las láminas estructurales.
- Selección del grosor de las láminas estructurales.

En la Tabla 12, se evidencia los pesos utilizados en los cálculos del sistema mecánico, es importante resaltar que las diversas condiciones de carga mencionadas en esta sección se establecieron por medio de una simulación de elementos finitos que se tratará más adelante.

DISEÑO MECÁNICO SERVOMOTOR					
ITEM	DESCRIPCIÓN	MASA [g]	CANTIDAD	MASA TOTAL [kg]	Peso [N]
1	Servomotor Yaskawa SGM7J-04A.	1700	1	1,7	16,66
2	Fusible mecánico MK2-100.	130	1	0,13	1,274
3	Lamina 3mm de encaje al servomotor.	71,41	1	0,07141	0,699818
4	Lamina en L 4mm.	595,67	1	0,59567	5,837566
5	Lamina media 4mm.	734,38	1	0,73438	7,196924
6	Lamina base 4mm.	921,25	1	0,92125	9,02825
7	Sistema anti vibratorio.	70,3	4	0,2812	2,75576
8	Arandelas 5mm.	2,067	12	0,024804	0,2430792
9	Arandela 5/16.	6,1	8	0,0488	0,47824
10	Tornillos M5 de ajuste al servomotor.	5,721	4	0,022884	0,2242632
11	Tornillos M5 de ajuste a la lámina.	4,95	4	0,0198	0,19404

12	Tuerca M5 de seguridad.	1,74	8	0,01392	0,136416
13	Tuerca 5/16 de seguridad.	5,808	8	0,046464	0,4553472
SUMATORIA		4249,396	54	4,610582	45,183704

Tabla 12. Peso del sistema mecánico, fuente propia.

Factor de Seguridad

Es importante en la ejecución del proyecto considerar un factor de seguridad, puesto que, en el desarrollo del sistema mecánico, no se tuvieron en consideración todas las condiciones al que está expuesto el mismo, como lo son algunas cargas de flujo o la vibración que genera el motor, en la ejecución de pruebas de biocombustibles. El factor de seguridad del sistema mecánico se determina a partir de los siguientes factores.

- Cargas estáticas en estructuras metálicas N_{cee} con un valor de 3.
- Cargas de esfuerzo de fluencia N_{cef} con un valor de (1,15).
- Cargas de esfuerzo último N_{ceu} con un valor de (1,5).
- Cargas por fatiga N_{cf} con un valor de 2.

De tal manera se define el factor de seguridad $F_{S_{Nt}}$ como la multiplicación de los diversos factores, como se evidencia en la ecuación (17).

$$F_{S_{Nt}} = N_{cee} * N_{cef} * N_{ceu} * N_{cf} \quad (17)$$

$$F_{S_{Nt}} = 3 * 1,15 * 1,5 * 2$$

$$F_{S_{Nt}} = 10,35 \approx 11$$

Es importante resaltar que el factor de seguridad, fue implementado en los cálculos posteriores para dar cumplimiento a los criterios de diseño de detalle, multiplicando el mismo con las condiciones de carga iniciales.

Criterios para el Diseño de Detalle

Una vez consideradas las condiciones de carga, que se aplican sobre el sistema mecánico, es necesario establecer los diversos criterios de diseño de detalle, que se deben garantizar para el correcto funcionamiento y fiabilidad del mismo.

- El dimensionamiento general de las láminas debe cumplir con la normativa de Uniones Roblonadas y Atornilladas EA-95.
- La tornillería es seleccionada con base al Documento Básico de Seguridad Estructural Acero (DB-SE-A), para definir la resistencia a cortante, aplastamiento y deslizamiento.
- El sistema mecánico debe garantizar el cumplimiento del criterio de Von Mises (criterio de la máxima energía de distorsión).
- El sistema mecánico debe garantizar que no exista un desplazamiento máximo, que supere la tolerancia de desalineación (0.2 [mm]), del acople tipo fuelle MK2-100 (R+W, 2023).

Distancias entre Uniones Atornilladas

Las uniones atornilladas tienen como objetivo, aliviar y soportar los esfuerzos aplicados a una estructura; la distribución de esfuerzos en las uniones atornilladas, evita que exista acumulación de los mismos, en puntos específicos que pueden generar fallas o daño en el material (Guardiola, 2012; Rodríguez, 2017; Rodríguez, 2023).

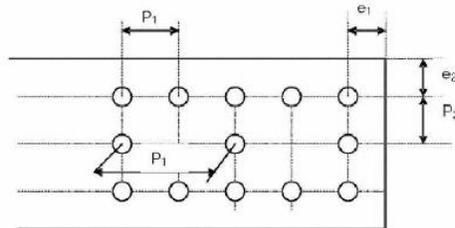


Ilustración 23. Distancia de uniones atornilladas, (Rodríguez, 2017)

- **Distancias a los bordes:** la distancia desde el centro del agujero (e_1), respecto al extremo de la lámina en relación con la transmisión de la carga, debe ser al menos 1,2 veces el diámetro del agujero (d_0) (Guardiola, 2012; Rodríguez, 2017; Rodríguez, 2023), ecuación (18). De la misma manera la distancia desde el centro del agujero (e_2), al borde lateral de la lámina medida normalmente a la dirección de la carga, será al menos 1,5 veces (d_0), ecuación (19), cómo se evidencia en la Ilustración 23.

$$e_1 \geq 1,2 * d_0 \quad (18)$$

$$e_2 \geq 1,5 * d_0 \quad (19)$$

- **Distancia entre Agujeros:** La distancia entre centros de dos agujeros (P_1), ambos en la misma dirección de la transmisión de la carga deben ser mínimo de 2,2 veces el diámetro del agujero (d_0), ecuación (20), véase Ilustración 23. Distancia de uniones atornilladas, (Rodríguez, 2017); de la misma manera la distancia entre centros de dos agujeros (P_2) medidos perpendicularmente a la dirección de la transmisión de la carga debe ser mínimo de 3 veces el diámetro del agujero (d_0) (Guardiola, 2012; Rodríguez, 2017; Rodríguez, 2023), según la ecuación (21).

$$P_1 \geq 2,2 * d_0 \quad (20)$$

$$P_2 \geq 3,0 * d_0 \quad (21)$$

Como se ha mencionado a través de la sección 7, el sistema mecánico está constituido principalmente por cuatro láminas, las mismas cumplen con la siguiente característica ($e_1 = e_2$) y ($P_1 = P_2$), cómo se especifica a continuación.

➤ *Lámina de conexión al servomotor*

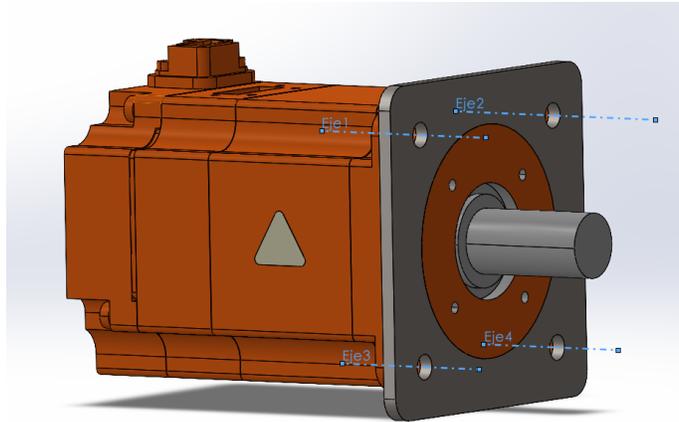


Ilustración 24. Lámina conexión directa, elaboración propia.

Esta lámina está conectada directamente al servomotor, por lo cual está limitada por la distribución de las perforaciones de anclaje del mismo, que tienen un diámetro de (5.5 [mm]), véase Ilustración 24. Los factores (e_1, e_2) tienen un distanciamiento de 2 veces el diámetro del agujero; los factores (P_1, P_2) tienen un distanciamiento de 3 veces el diámetro del agujero, como se evidencia a continuación.

$$e_1 \geq 1,2 * 5.5 \text{ mm} \rightarrow e_1 \geq 2 * 5.5 \text{ mm}$$

$$P_1 \geq 2,2 * 5.5 \text{ mm} \rightarrow P_1 \geq 3 * 5.5 \text{ mm}$$

$$e_1 \geq 11 \text{ mm}$$

$$P_1 \geq 16.5 \text{ mm}$$

➤ *Lámina en forma de L*

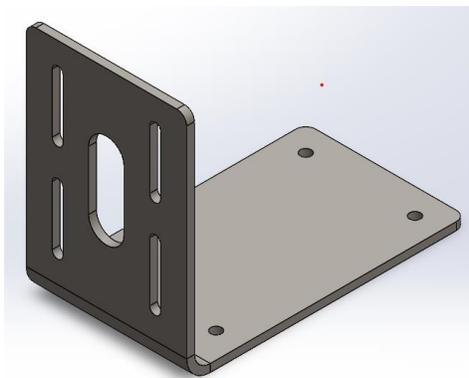


Ilustración 25. Lámina en L, elaboración propia.

Esta lámina permite el movimiento del servomotor en el eje coordenado Z, al igual que la anterior está limitada por el dimensionamiento del servomotor por lo cual también comparte el diámetro de sus perforaciones (5.5 [mm]), véase Ilustración 25. Los factores (e_1, e_2) tienen un distanciamiento de 2 veces el diámetro del agujero;

los factores (P_1, P_2) tienen un distanciamiento de 3 veces el diámetro del agujero por lo cual.

$$e_1 \geq 1,2 * 5.5 \text{ mm} \rightarrow e_1 \geq 2 * 5.5 \text{ mm}$$

$$P_1 \geq 2,2 * 5.5 \text{ mm} \rightarrow P_1 \geq 3 * 5.5 \text{ mm}$$

$$e_1 \geq 11 \text{ mm}$$

$$P_1 \geq 16.5 \text{ mm}$$

➤ *Lámina Media*

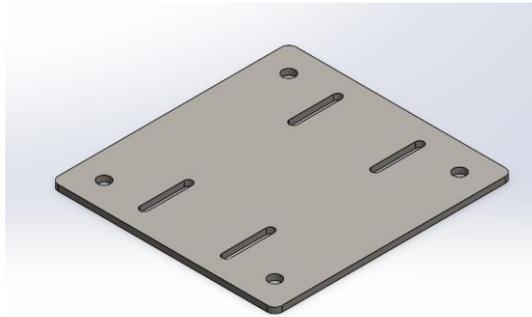


Ilustración 26. Lámina media, elaboración propia.

Esta lámina permite el movimiento del servomotor en el eje coordenado X, la misma cuenta con perforaciones de diámetro (5.5 [mm]), para la conexión con la lámina en L y posee perforaciones de diámetro (6.35 [mm]) definidas por el sistema anti vibratorio, véase Ilustración 26. Los factores (e_1, e_2) para ambas perforaciones tienen un distanciamiento de 2 veces el diámetro del agujero, Los factores (P_1, P_2) para ambas perforaciones tienen un distanciamiento de 3 veces el diámetro del agujero.

$$e_1 \geq 1,2 * 6.35 \text{ mm} \rightarrow e_1 \geq 2 * 6.35 \text{ mm}$$

$$P_1 \geq 2,2 * 6.35 \text{ mm} \rightarrow P_1 \geq 3 * 6.35 \text{ mm}$$

$$e_1 \geq 12.7 \text{ mm}$$

$$P_1 \geq 19.05 \text{ mm}$$

➤ *Lámina Base*

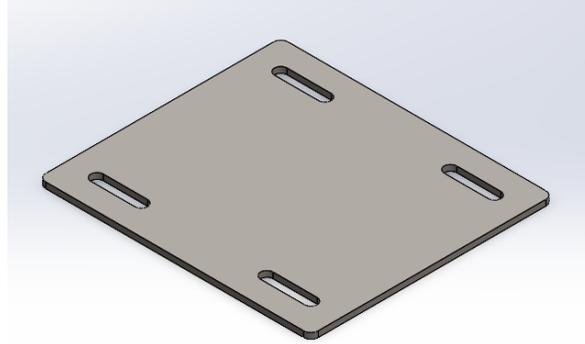


Ilustración 27. Lámina base, elaboración propia.

Esta lámina permite el movimiento del servomotor en el eje coordinado Y, la misma cuenta con perforaciones de diámetro (6.35 [mm]), definidas por el sistema anti vibratorio, véase Ilustración 27. Los factores (e_1, e_2) tienen un distanciamiento de 2 veces el diámetro del agujero; los factores (P_1, P_2) tienen un distanciamiento de 3 veces el diámetro del agujero.

$$e_1 \geq 1,2 * 6.35 \text{ mm} \rightarrow e_1 \geq 2 * 6.35 \text{ mm}$$

$$P_1 \geq 2,2 * 6.35 \text{ mm} \rightarrow P_1 \geq 3 * 6.35 \text{ mm}$$

$$e_1 \geq 12.7 \text{ mm}$$

$$P_1 \geq 19.05 \text{ mm}$$

En el desarrollo del diseño mecánico se garantizó, que la distancia entre agujeros y bordes, agujeros y ranuras a bordes, agujeros y ranuras a dobleces cumplieran todos los criterios de diseño, estipulados en la normativa de Uniones Roblonadas y Atornilladas EA-95 (España. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. et al., 2003), como se evidencia en la Tabla 13. Es importante mencionar que los cálculos realizados, se efectuaron con base a las distancias más pequeñas en el sistema mecánico, entre agujeros y bordes, agujeros y ranuras a bordes, agujeros y ranuras a dobleces.

<i>Distancia entre uniones Atornilladas [mm]</i>				
Descripción	Factor e_1	Factor e_2	Factor P_1	Factor P_2
Conexión directa al servomotor.	11	11	49,5	49,5
Lámina en L conexión al servomotor.	16	29	24,75	24,75
Lámina en L conexión a la pieza media.	13	16	55,5	101
Lámina media.	18	18	30	125
Lámina base.	15,75	20	115,5	125

Tabla 13. Uniones atornilladas sistema mecánico, elaboración propia.

Cálculo de la Tornillería

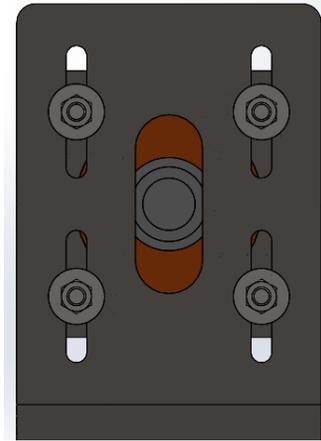


Ilustración 28. Tornillería crítica, elaboración propia.

Inicialmente se realizó el cálculo sobre los tornillos más críticos del sistema mecánico, que se encuentran en la conexión del servomotor con la lámina en L, véase Ilustración 28. La misma se seleccionó por los siguientes factores.

- Esta zona de conexión soporta la mayor concentración de esfuerzos, debido al peso del servomotor y el peso del acople mecánico tipo fuelle.
- La restricción del diámetro de la tornillería (5 [mm]), debido al diseño del sistema de anclaje del servomotor.
- En esta zona se aplica el momento máximo del servomotor en ambos sentidos de giro.
- Esta zona permite la conexión directa con el eje de la FCU, por lo cual la fuerza aerodinámica generada por la hélice, repercute más en la concentración de esfuerzos en el sistema mecánico.

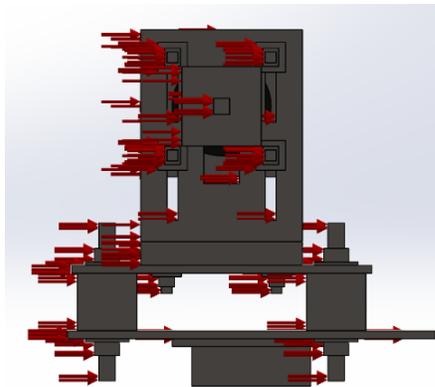


Ilustración 29. Zonas Críticas, Fuente propia.

Inicialmente se realizó un plano con la distribución de todas las cargas, que afectan directamente a los tornillos de anclaje del servomotor, véase Ilustración 29. Donde F es la fuerza aplicada en cada tornillo a causa del momento del servomotor, F_{AH} es la fuerza aerodinámica ejercida por la hélice del motor PT6, w_T es el peso que soporta cada tornillo

a causa de la unión atornillada y M_{max} representa el momento máximo del servomotor que será utilizado en ambos sentidos de giro. Es importante resaltar que, para garantizar la fiabilidad del sistema mecánico, todas las cargas involucradas en el mismo se multiplicaron por el factor de seguridad ($F_{S_{Nt}}$).

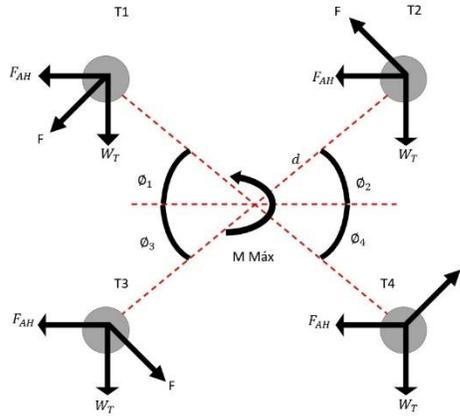


Ilustración 30. Distribución de cargas, Fuente propia.

- **Cálculo de la Fuerza F**

Inicialmente se transformó el momento máximo generado por el servomotor en dos pares iguales, puesto que la ubicación del eje del servomotor está en el centro de la tornillería véase Ilustración 30, por lo cual la distancia (d) entre el tornillo 1 (t_1) y el tornillo 4 (t_4) es igual a la distancia entre el tornillo 2 (t_2) y el tornillo 3 (t_3). Al distribuir la fuerza (F) perpendicular a la distancia (d) en cada uno de los tornillos, se puede estructurar el momento de acuerdo a la ecuación (22).

$$M = F * d \tag{22}$$

Donde (M) es el momento, (F) es la fuerza y (d) es la distancia. Al transformar la ecuación para establecer el momento en pares iguales se obtiene, véase ecuación (23).

$$M_{max} = (F * d) + (F * d) \tag{23}$$

$$M_{max} = 2(F * d)$$

$$F = \frac{M_{max} * F_{S_{Nt}}}{2d}$$

M_{max} tiene un valor de (4,46 N.m), d tiene un valor de (70 mm) (Yaskawa, 2020); por lo cual se puede hallar F reemplazando los valores del momento y la distancia.

$$F = \frac{(4,46 \text{ N.m}) * 11}{2 * \left(70 \text{ mm} * \frac{1\text{m}}{1000 \text{ mm}}\right)}$$

$$F = 350,428 \text{ N} \approx 350,43 \text{ N}$$

- **Cálculo de la Fuerza Aerodinámica**

Para el cálculo de la fuerza aerodinámica (F_{AH}) generada por la hélice del motor PT6, se debe tener en consideración la presión distribuida de la misma (P_{dis}) y el área de diseño del sistema mecánico (A_{DM}). De tal manera que se emplea la siguiente ecuación (24).

$$F_{AH} = P_{dis} * A_{DM} * FS_{Nt} \quad (24)$$

➤ **Área del diseño Mecánico**

Para calcular A_{DM} se debe realizar la sumatoria de todas las áreas, de los elementos que componen el sistema mecánico. Se utilizó una vista lateral del mismo en la posición más crítica en los diversos ejes coordenados, para determinar las zonas en las cuales se presenta oposición a la (P_{dis}), véase Ilustración 31.

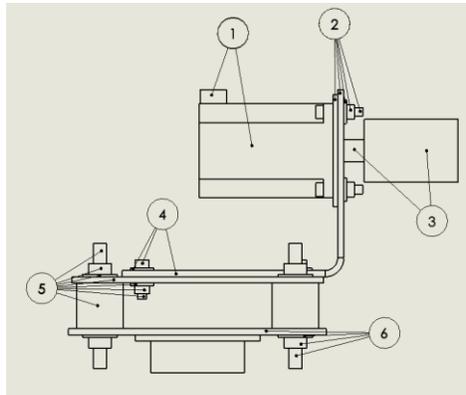


Ilustración 31. Áreas de diseño, Fuente propia.

Como se evidencia en la Ilustración 31, se definieron 6 zonas del diseño mecánico ($A_S, A_{LT}, A_{EA}, A_{BT}, A_{LMTA}, A_{BA}$) para el cálculo de A_{DM} , se implementó una geometría rectangular de los componentes del mismo, principalmente como un factor de seguridad adicional que permite calcular de manera mucho más sencilla el área de diseño y a la vez define zonas adicionales en las que actúa la presión distribuida (P_{dis}), añadiendo una mayor rigurosidad al momento de seleccionar la tornillería. A_{DM} se determinó con base a la siguiente ecuación (25).

$$A_{DM} = A_S + A_{LT} + A_{EA} + A_{BT} + A_{LMTA} + A_{BA} \quad (25)$$

Las dimensiones de las zonas de diseño del sistema mecánico, se obtuvieron de los diversos manuales del servomotor Yaskawa GSM7J-04A (Yaskawa, 2020), proveedores de tornillería, sistemas anti vibratorios, fusible mecánico además del software de diseño Solid

Works. Se calcula el valor de las diversas áreas de diseño del sistema mecánico de tal manera que.

❖ **Zona 1 (Servomotor):**

La misma comprende el área dimensional del servomotor Yaskawa, se divide en 2 áreas principales como se evidencia en la Tabla 14. Es importante resaltar que el cálculo del área del servomotor se implementó la siguiente ecuación (26).

$$A_s = A_1 + A_2 \tag{26}$$

ÁREA DE DISEÑO SERVOMOTOR [m2]			
Detalle	Área del servomotor		Total
	A1	A2	
As	5,130E-03	1,496E-04	5,2796E-03

Tabla 14. Área de diseño zona 1, elaboración propia.

❖ **Zona 2 (Lámina de conexión L y Tornillería):**

La misma comprende el área dimensional de conexión, entre el servomotor y la lámina en L como se evidencia en la Tabla 15. Es relevante mencionar que se tuvo en consideración, las caras del sistema ranurado de las láminas que tienen contacto directo con la (P_{dis}), de tal manera que el área de la zona 2 se determinó con la siguiente ecuación (27).

$$A_{LT} = A_{L1} + A_{L2} + (A_T * 4) + (A_{R1} * 4) + A_{R2} \tag{27}$$

ÁREA DE DISEÑO ZONA 2 [m2]			
Detalle	Valor	Cantidad	Total
Área de las láminas (AL1, AL2)	6,9050E-04	1	6,9050E-04
Área de la tornillería (5 mm)	1,4420E-04	4	5,7680E-04
Área Ranurada (AR1)	1,2000E-04	4	4,8000E-04
Área Ranurada (AR2)	1,3600E-04	1	1,3600E-04
Alt			1,8833E-03

Tabla 15. Área de diseño zona 2, elaboración propia.

❖ **Zona 3 (Eje del servomotor y Fusible mecánico):**

La misma comprende el área dimensional de conexión, entre el eje servomotor y el acople mecánico como se evidencia en la Tabla 16. El cálculo de la zona 3 se determinó con la siguiente ecuación (28).

$$A_{EA} = A_E + A_F \quad (28)$$

ÁREA DE DISEÑO ZONA 3 [m2]			
Detalle	Área Eje servo	Área Acople	Total
	A1	A2	
Aea	1,260E-04	2,400E-03	2,5260E-03

Tabla 16. Área de diseño Zona 3, elaboración propia.

❖ **Zona 4 (Base en L y Tornillería):**

La misma comprende el área dimensional de conexión, entre la lámina en L y la tornillería que conecta la misma con la lámina media, como se evidencia en la Tabla 17; el cálculo de la zona 4 se determinó con la siguiente ecuación (29).

$$A_{BT} = A_L + (A_T * 4) \quad (29)$$

ÁREA DE DISEÑO ZONA 4 [m2]			
Detalle	Valor	Cantidad	Total
Área de la lámina (AL1)	5,5200E-04	1	5,5200E-04
Área de la tornillería (5 mm)	6,8750E-05	4	2,7500E-04
Abt			8,2700E-04

Tabla 17. Área de diseño Zona 4, elaboración propia.

❖ **Zona 5 (Lamina media y tornillería):**

La misma comprende el área dimensional de conexión, entre la lámina media, la tornillería de la misma y el sistema anti vibratorio, como se evidencia en la Tabla 18; el cálculo de la zona 5 se determinó con la siguiente ecuación (30).

$$A_{LMTA} = A_L + (A_T * 4) + (A_{AV} * 4) + (A_{R1} * 4) \quad (30)$$

ÁREA DE DISEÑO ZONA 5 [m2]			
Detalle	Valor	Cantidad	Total
Área de la lámina (AL)	6,4400E-04	1	6,4400E-04
Área de la tornillería (5 mm)	7,4490E-05	4	2,9796E-04
Área Anti vibratorio (Aav)	1,11627E-03	4	4,4651E-03
Área Ranurada (AR1)	1,2000E-04	4	4,8000E-04

Tabla 18. Área de diseño Zona 5, elaboración propia.

❖ **Zona 6 (Lámina Base y Anti vibratorio):**

La misma comprende el área dimensional de conexión, entre la lámina base y el sistema anti vibratorio, como se evidencia en la Tabla 19; el cálculo de la zona 6 se determinó con la siguiente ecuación (31).

$$A_{BA} = A_L + (A_{AV} * 4) + (A_{R1} * 4) \quad (31)$$

ÁREA DE DISEÑO ZONA 6 [m2]			
Detalle	Valor	Cantidad	Total
Área de la lámina (AL)	6,6000E-04	1	6,6000E-04
Área Anti vibratorio (Aav)	2,46270E-04	4	9,8508E-04
Área Ranurada (AR1)	3,4000E-05	4	1,3600E-04

Tabla 19. Área de diseño Zona 6, elaboración propia.

Una vez definidas las áreas de diseño se calcula A_{DM} , por medio de la ecuación (25).

$$A_{DM} = 0.0182 \text{ m}^2$$

Calculado A_{DM} se puede obtener el valor de la fuerza aerodinámica F_{AH} , es importante resaltar que la misma se debe distribuir equitativamente en cada uno de los tornillos de anclaje del servomotor (F_{AHT}). F_{AH} se obtiene por medio de la ecuación (32).

$$F_{AH} = P_{dis} * A_{DM} * F_{S_{Nt}} \quad (32)$$

$$F_{AH} = \left(1585.716 \text{ N/m}^2 \right) * (0.0182 \text{ m}^2) * 11$$

$$F_{AH} = 317.4603 \text{ N}$$

$$F_{AHT} = \frac{317.4603 \text{ N}}{4}$$

$$F_{AHT} = 79.365 \text{ N}$$

- **Cálculo de la fuerza generada por el peso w_T**

El cálculo del peso que soporta cada tornillo a causa de la unión atornillada (w_T), véase Ilustración 30, se determinó teniendo en consideración los pesos de los siguientes componentes del sistema mecánico.

- Peso del servomotor Yaskawa SGM7J-04A (w_s).
- Peso de la lámina de conexión directa al servomotor (w_L).
- Peso del acople tipo fuele MK2-100 (w_{FM}).

(w_T) se define como la sumatoria los componentes (w_s , w_L , w_{FM}); al igual que la fuerza aerodinámica, (w_T) se multiplica por el factor de seguridad ($F_{S_{Nt}}$), como se evidencia en la ecuación (33). En la Tabla 20 se definen los pesos que componen (w_T).

$$w_T = (w_s + w_L + w_{FM}) * F_{S_{Nt}} \tag{33}$$

Cálculo del Peso Total Wt			
Detalle	Masa [kg]	Gravedad [m/s^2]	Peso [N]
Peso del servomotor	1,7	9,8	16,66
Peso lámina conexión directa	0,0714	9,8	0,700
Peso MK2-100	0,103	9,8	1,01
Total			18,3691

Tabla 20. Peso total Wt, elaboración propia.

Es importante resaltar que (w_s), se obtuvo del datasheet del SGM7J-04A (Yaskawa, 2020), (w_L) se obtuvo por medio del software Solid Works y (w_{FM}) se obtuvo del datasheet del MK2-100 (R+W, 2023). Reemplazando en la ecuación (33) se obtiene el valor de (w_T).

$$w_T = 18.36912 \text{ N} * 11$$

$$w_T = 202.06032 \text{ N}$$

Una vez definido el peso (w_T), el mismo se distribuye equitativamente en cada uno de los tornillos de anclaje del servomotor (w_{TT}).

$$w_{TT} = \frac{w_T}{4}$$

$$w_{TT} = 50.515 \text{ N} \approx 50.52 \text{ N}$$

CÁLCULO DE TORNILLERÍA

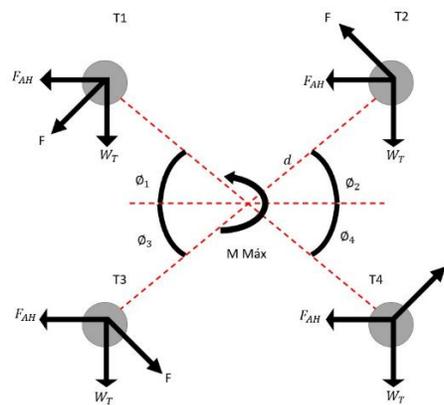


Ilustración 32. Distribución de cargas, elaboración propia.

- **Cálculo de resistencia a Cortante**

Se considera como el esfuerzo que soporta un tornillo, cuando se aplican dos fuerzas de la misma magnitud en sentido opuesto, perpendicular al eje longitudinal del mismo (Beer et

al., 2017). Es importante que la fuerza que se aplica al tornillo (F_{vEd}), sea menor o igual a la fuerza que resiste el tornillo (F_{vRd}) (Guardiola, 2012); de la misma manera la distribución realizada en el diseño mecánico, establece que todas las uniones atornilladas se someten a un solo plano de corte, véase Ilustración 33.

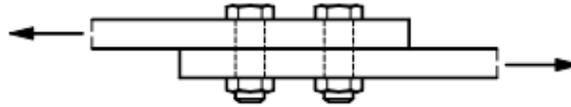


Figura 1. Simple cortadura

Ilustración 33. Cortadura simple en unión atornillada, (Guardiola, 2012)

Lámina en Forma de L del Sistema Mecánico:

Cálculo de (F_{vRd}): Para calcular la fuerza que resiste la tornillería en el sistema mecánico, se utilizó la siguiente ecuación (34) (Guardiola, 2012; Rodríguez, 2023).

$$F_{vRd} = n * 0.5 * f_{ub} * \frac{A}{\gamma_{M2}} \quad (34)$$

Donde n es el número de planos de corte, el mismo tiene un valor de (1), f_{ub} es la tensión última del acero de los tornillos, la misma tiene un valor de (400 N/mm^2) puesto que, para los diversos cálculos de tornillería se utilizaron las propiedades del acero 4.6. El área resistente del tornillo (A) tiene un valor de (14.18 mm^2) , definido por el diámetro de los tornillos de conexión al servomotor M5 (Valvias, 2013). Finalmente, el coeficiente de minoración del acero estructural para uniones atornilladas (γ_{M2}), tiene un valor constante de (1.25). Reemplazando en la ecuación se obtiene el valor de (F_{vRd}).

$$F_{vRd} = 1 * 0.5 * (400 \text{ N/mm}^2) * \frac{(14.18 \text{ mm}^2)}{1.25}$$

$$F_{vRd} = 2268.8 \text{ N}$$

Cálculo de (F_{vEd}): Para calcular la fuerza que se aplica a la tornillería en el sistema mecánico, se debe realizar un análisis de cargas, véase Ilustración 34, por medio de un diagrama de cuerpo libre, para cada uno de los tornillos de anclaje del servomotor en ambos sentidos de giro, véase Ilustración 32; por lo cual (F_{vEd}) se define por medio de la siguiente ecuación (35) (Guardiola, 2012; Rodríguez, 2023).

$$\overrightarrow{F_{vEd}} = \vec{F} + \overrightarrow{F_{AH}} + \overrightarrow{w_t} \quad (35)$$

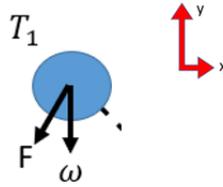


Ilustración 34. Distribución de carga lámina en L. Elaboración propia

Inicialmente se realiza la sumatoria de todas las fuerzas en el eje X, para determinar el valor de la componente (F_{vEdx}); es relevante mencionar que la fuerza w_t siempre es perpendicular a la fuerza F_{AH} creando un ángulo entre ambos de (90°) y de la misma manera los pares de momento F son perpendiculares a la distancia d , véase Ilustración 32, por lo cual los mismos siempre crean un ángulo θ de (45°) con respecto a (F_{AH} y w_T). El valor de (F_{vEdx}) se determinó de la ecuación (36).

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{vEdx} = (-F_{AH}) + (-F * \cos \theta) \quad (36)$$

$$F_{vEdx} = (-79.365 \text{ N}) + (-350,43 \text{ N} * \cos 45)$$

$$F_{vEdx} = -327.156 \text{ N}$$

Posterior se realiza la sumatoria de todas las fuerzas en el eje Y, para determinar el valor de la componente (F_{vEdy}), ecuación (37).

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{vEdy} = (-w_t) + (-F * \sin \theta) \quad (37)$$

$$F_{vEdy} = (-50.52 \text{ N}) + (-350,43 \text{ N} * \cos 45)$$

$$F_{vEdy} = -298.311 \text{ N}$$

Finalmente se realiza el cálculo de la magnitud del vector (F_{vEd}), por medio de la siguiente ecuación (38).

$$F_{vEd} = \sqrt{(F_{vEdx})^2 + (F_{vEdy})^2} \quad (38)$$

$$F_{vEd} = \sqrt{(-327.156 \text{ N})^2 + (-298.311 \text{ N})^2}$$

$$F_{vEd} = 442.742 \text{ N}$$

Para realizar la verificación de la tornillería a resistencia cortante, se debe garantizar que ($F_{vEd} \leq F_{vRd}$) para cada uno de los tornillos; el procedimiento de cálculo mostrado anteriormente se realizó para el primer tornillo T_1 , por lo cual el mismo procedimiento se

realiza para (T_2 , T_3 , T_4). En la Tabla 21 se visualiza la resistencia a cortante, de la tornillería implementada en la lámina en L del sistema mecánico, en la cual se garantiza el cumplimiento del criterio a detalle estipulado por la norma (DB-SE-A).

Comprobación Tornillería a Cortante (Lámina L)				
N°	F_{vEd}	Unidades	F_{vRd}	Unidades
Tornillo 1	442,742	N	2268,8	N
Tornillo 2	381,659	N	2268,8	N
Tornillo 3	343,201	N	2268,8	N
Tornillo 4	258,837	N	2268,8	N

Tabla 21. Comprobación a cortante lámina en L, elaboración propia.

Lámina Media del Sistema Mecánico:

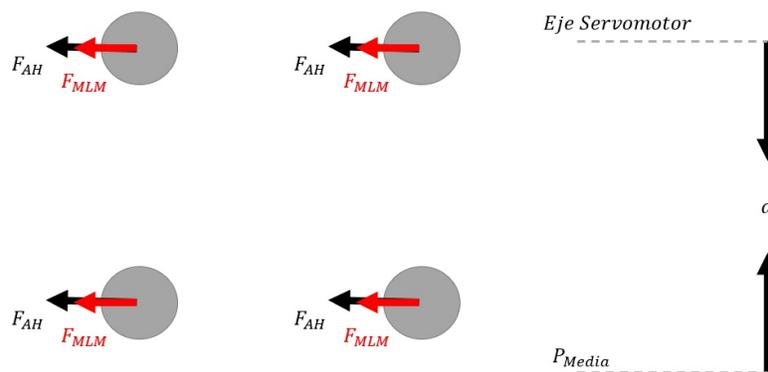


Ilustración 35. Análisis de cargas lámina media, elaboración propia

Para el cálculo que resiste la tornillería en la pieza media del sistema mecánico, inicialmente se debe determinar la fuerza ejercida en la misma (F_{MLM}), a causa del momento máximo del servomotor, véase Ilustración 35. Dicha fuerza se calcula con la ecuación (39).

$$F_{MLM} = \frac{M_{max} * F_{SNt}}{d} \tag{39}$$

La única variante con la ecuación de conversión de momento en pares, es que la distancia (d) tiene un valor de (81.25 mm), puesto que la misma se toma desde el centro del eje del servomotor hasta la lámina media del sistema mecánico, véase Ilustración 35. Reemplazando en la ecuación se obtiene F_{MLM} .

$$F_{MLM} = \frac{(4,46 \text{ N.m}) * 11}{\left(81.25 \text{ mm} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}\right)}$$

$$F_{MLM} = 603.82 \text{ N}$$

Como se mencionó al inicio de la sección 7, se debe distribuir equitativamente la fuerza F_{MLM} entre la tornillería implicada en el cálculo, como se hizo con la fuerza aerodinámica ejercida por la hélice (F_{AH}).

$$F_{MLM} = \frac{603.82 \text{ N}}{4}$$

$$F_{MLM} = 150.954 \text{ N}$$

Cálculo de (F_{vRd}): Para determinar la fuerza que resiste la tornillería en la pieza media del sistema mecánico, se implementó al igual que en la lámina en L tornillería M5 por lo cual no existe variación en la fuerza (F_{vRd}).

$$F_{vRd} = 2268.8 \text{ N}$$

Cálculo de (F_{vEd}): Para calcular la fuerza que se aplica a la tornillería en la lámina media del sistema mecánico, se debe realizar un análisis de cargas, véase Ilustración 36, por medio de un diagrama de cuerpo libre para cada uno de los tornillos de anclaje entre láminas, por lo cual (F_{vEd}) se define por medio de la siguiente ecuación (40).

$$\vec{F}_{vEd} = \vec{F}_{AH} + \vec{F}_{MLM} \quad (40)$$

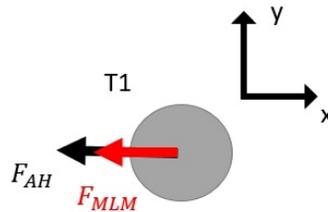


Ilustración 36. Distribución de cargas lámina media, fuente propia.

Inicialmente se realiza la sumatoria de todas las fuerzas en el eje coordenado X, para determinar el valor de la componente (F_{vEdx}). Como se evidencia en la Ilustración 36, no hay fuerzas implicadas en el eje coordenado Y en la lámina media, por lo cual ($F_{vEdy} = 0$).

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{vEdx} = (-F_{AH}) + (-F_{MLM})$$

$$F_{vEdx} = (-79.365 \text{ N}) + (-150.954 \text{ N})$$

$$F_{vEdx} = -230.32 \text{ N}$$

Seguido se realiza el cálculo de la magnitud del vector (F_{vEd}), por medio de la ecuación (38).

$$F_{vEd} = \sqrt{(-230.32 \text{ N})^2 + (0)^2}$$

$$F_{vEd} = 230.32 \text{ N}$$

Para realizar la verificación de la tornillería a resistencia cortante, se debe garantizar que ($F_{vEd} \leq F_{vRd}$) para cada uno de los tornillos. En la Tabla 22 se visualiza la resistencia a cortante, de la tornillería implementada en la lámina media del sistema mecánico, en la cual se garantiza el cumplimiento del criterio a detalle estipulado por la norma (DB-SE-A) (España. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. et al., 2003).

<i>Comprobación Tornillería a Cortante (Lámina Media)</i>				
<i>N°</i>	<i>F_{vEd}</i>	<i>Unidades</i>	<i>F_{vRd}</i>	<i>Unidades</i>
Tornillo 1	230,320	N	2268,8	N
Tornillo 2	230,320	N	2268,8	N
Tornillo 3	230,320	N	2268,8	N
Tornillo 4	230,320	N	2268,8	N

Tabla 22. Comprobación a cortante lámina media, elaboración propia.

Lámina Base del Sistema Mecánico:

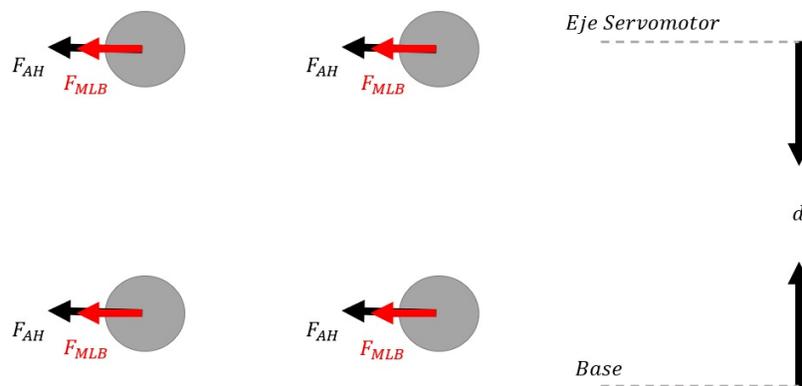


Ilustración 37. Análisis de cargas lámina base, elaboración propia

Para el cálculo que resiste la tornillería en la pieza base del sistema mecánico, inicialmente se debe determinar la fuerza ejercida en la misma (F_{MLB}), a causa del momento máximo del servomotor, véase Ilustración 37. Dicha fuerza se calcula con la ecuación (41).

$$F_{MLB} = \frac{M_{max} * F_{Snt}}{d} \tag{41}$$

La única variante con la ecuación de conversión de momento en pares, es que la distancia (d) tiene un valor de (114.25 mm), puesto que la misma se toma desde el centro del eje del servomotor hasta la lámina base del sistema mecánico, véase Ilustración 37. Reemplazando en la ecuación se obtiene (F_{MLB}).

$$F_{MLB} = \frac{(4,46 \text{ N.m}) * 11}{\left(114.25 \text{ mm} * \frac{1\text{m}}{1000 \text{ mm}}\right)}$$

$$F_{MLB} = 429.41 \text{ N}$$

Como se mencionó al inicio de la sección 7, se debe distribuir equitativamente la fuerza F_{MLB} entre la tornillería implicada en el cálculo, como se hizo con la fuerza aerodinámica ejercida por la hélice (F_{AH}).

$$F_{MLM} = \frac{429.41 \text{ N}}{4}$$

$$F_{MLM} = 107.352 \text{ N}$$

Cálculo de (F_{vRd}): Para calcular la fuerza que resiste la tornillería en la base del sistema mecánico, se utilizó la siguiente ecuación (34).

Donde n es el número de planos de corte, el mismo tiene un valor de 1, f_{ub} es la tensión última del acero de los tornillos, la misma tiene un valor de (400 N/mm^2) puesto que, para los diversos cálculos de tornillería se utilizaron las propiedades del acero 4,6. El área resistente del tornillo (A) tiene un valor de (36.638 mm^2) , definido por el diámetro de los tornillos del sistema anti vibratorio $(\frac{5}{16} \text{ in})$ (Mecanocaucho, 2023). Finalmente, el coeficiente de minoración del acero estructural para uniones atornilladas (γ_{M2}), tiene un valor constante de (1.25). Reemplazando en la ecuación (34) se obtiene el valor de F_{vRd} .

$$F_{vRd} = 1 * 0.5 * (400 \text{ N/mm}^2) * \frac{(36.638 \text{ mm}^2)}{1.25}$$

$$F_{vRd} = 5862.08 \text{ N}$$

Cálculo de (F_{vEd}): Para calcular la fuerza que se aplica a la tornillería en la lámina base del sistema mecánico, se debe realizar un análisis de cargas, véase Ilustración 38, por medio de un diagrama de cuerpo libre para cada uno de los tornillos de anclaje entre láminas, por lo cual (F_{vEd}) se define por medio de la siguiente ecuación (42).

$$\vec{F}_{vEd} = \vec{F}_{AH} + \vec{F}_{MLB} \quad (42)$$

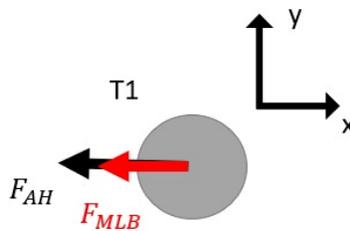


Ilustración 38. Distribución de cargas lámina base, elaboración propia

Inicialmente se realiza la sumatoria de todas las fuerzas en el eje coordenado X, para determinar el valor de la componente (F_{vEdx}). Como se evidencia en la Ilustración 38, no hay fuerzas implicadas en el eje coordenado Y en la lámina media, por lo cual ($F_{vEdy} = 0$).

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{vEdx} = (-F_{AH}) + (-F_{MLB})$$

$$F_{vEdx} = (-79.365 \text{ N}) + (-107.352 \text{ N})$$

$$F_{vEdx} = -186.72 \text{ N}$$

Seguido se realiza el cálculo de la magnitud del vector (F_{vEd}), por medio de la siguiente ecuación (38).

$$F_{vEd} = \sqrt{(-186.72 \text{ N})^2 + (0)^2}$$

$$F_{vEd} = 186.72 \text{ N}$$

Para realizar la verificación de la tornillería a resistencia cortante, se debe garantizar que ($F_{vEd} \leq F_{vRd}$) para cada uno de los tornillos. En la Tabla 23 se visualiza la resistencia a cortante, de la tornillería implementada en la lámina base del sistema mecánico, en la cual se garantiza el cumplimiento del criterio a detalle estipulado por la norma (DB-SE-A).

<i>Comprobación Tornillería a Cortante (Lámina Base)</i>				
<i>N°</i>	<i>F_{vEd}</i>	<i>Unidades</i>	<i>F_{vRd}</i>	<i>Unidades</i>
Tornillo 1	186,720	N	5862,08	N
Tornillo 2	186,720	N	5862,08	N
Tornillo 3	186,720	N	5862,08	N
Tornillo 4	186,720	N	5862,08	N

Tabla 23. Comprobación a cortante lámina base, elaboración propia

• **Cálculo de resistencia al Aplastamiento**

Establece la resistencia del vástago de las láminas, al momento de realizar presión sobre el vástago del tornillo o viceversa (Guardiola, 2012) véase Ilustración 39, al igual que el parámetro de resistencia a cortante la fuerza que se aplica al tornillo (F_{vEd}) debe ser menor o igual, a la fuerza que resiste el tornillo al aplastamiento (F_{bRd}).



Figura 3. Aplastamiento de las chapas

Ilustración 39. Fuerza de aplastamiento

Lámina en Forma de L del Sistema Mecánico:

Cálculo de (F_{bRd}): Para calcular la fuerza que resiste la tornillería en el sistema mecánico, se utilizó la siguiente ecuación (43).

$$F_{bRd} = \frac{2,5 * \alpha * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} \quad (43)$$

Donde α es el menor de $\left\{ \frac{e_1}{3*d_0}; \frac{p_1}{3*d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right\}$, visualizar a través de la sección 7.2 Diseño de Detalle α tiene un valor de (0.67); f_u es la tensión última del material de fabricación de las láminas (Acero estructural A36), la misma tiene un valor de (400 N/mm^2) ; d corresponde al diámetro de del tornillo, posee un valor de (5 mm); t es el espesor mínimo de las láminas que se someten a aplastamiento, la misma posee un valor de (3 mm) dicho valor esta determinado por la lamina de conexión directa del servomotor, véase Ilustración 24; γ_{M2} es el coeficiente de minoración del acero estructural para uniones atornilladas y posee un valor de (1.25). Reemplazando en la ecuación (43) se obtiene el valor de F_{bRd} .

$$F_{bRd} = \frac{2,5 * 0.67 * (400 \text{ N/mm}^2) * 5 \text{ mm} * 3 \text{ mm}}{1.25}$$

$$F_{bRd} = 8040 \text{ N}$$

Para realizar la verificación de la tornillería a resistencia al aplastamiento, se debe garantizar que $(F_{vEd} \leq F_{bRd})$ para cada uno de los tornillos; el valor de F_{vEd} se obtuvo en la sección 7.2 Diseño de Detalle. En la Tabla 24 se visualiza la resistencia al aplastamiento, de la tornillería implementada en la lámina en L del sistema mecánico, en la cual se garantiza el cumplimiento del criterio a detalle estipulado por la norma (DB-SE-A).

Comprobación Tornillería al Aplastamiento (Lámina L)				
N°	F_{vEd}	Unidades	F_{bRd}	Unidades
Tornillo 1	442,742	N	8040	N
Tornillo 2	381,659	N	8040	N
Tornillo 3	343,201	N	8040	N
Tornillo 4	258,837	N	8040	N

Tabla 24. Comprobación de aplastamiento lámina en L, elaboración propia

Lámina Media del Sistema Mecánico:

Cálculo de (F_{bRd}) : Para calcular la fuerza que resiste la tornillería la pieza media del sistema mecánico se utilizó la ecuación (43). A diferencia del cálculo realizado en la lámina en L, el valor de la constante α es (0.909) y el espesor de la lámina t posee un valor de (4 mm), la misma definida puesto que el espesor de las láminas (*lámina en L* y *lámina media*) es el mismo. Reemplazando en la ecuación (43) se obtiene el valor de (F_{bRd}) .

$$F_{bRd} = \frac{2,5 * 0.909 * (400 \text{ N/mm}^2) * 5 \text{ mm} * 4 \text{ mm}}{1.25}$$

$$F_{bRd} = 14544 \text{ N}$$

En la Tabla 25, se visualiza la resistencia al aplastamiento, de la tornillería implementada en la lámina media del sistema mecánico, en la cual se garantiza el cumplimiento del criterio a detalle estipulado por la norma (DB-SE-A).

<i>Comprobación Tornillería al Aplastamiento (Lámina Media)</i>				
<i>N°</i>	<i>F_{vEd}</i>	<i>Unidades</i>	<i>F_{bRd}</i>	<i>Unidades</i>
Tornillo 1	230,320	N	14544	N
Tornillo 2	230,320	N	14544	N
Tornillo 3	230,320	N	14544	N
Tornillo 4	230,320	N	14544	N

Tabla 25. Comprobación de aplastamiento lámina media, elaboración propia.

Lámina Base del Sistema Mecánico:

Cálculo de (F_{bRd}): Para calcular la fuerza que resiste la tornillería la pieza base del sistema mecánico se utilizó la ecuación (43). A diferencia del cálculo realizado en las láminas anteriores, el valor de la constante α es (0.784) y el diámetro del tornillo d posee un valor de (7.9 mm), el mismo se define con base a la tornillería intrínseca del sistema anti vibratorio. Reemplazando en la ecuación (43) se obtiene el valor de (F_{bRd}).

$$F_{bRd} = \frac{2.5 * 0.784 * (400 \text{ N/mm}^2) * 7.9 \text{ mm} * 4 \text{ mm}}{1.25}$$

$$F_{bRd} = 19819.52 \text{ N}$$

En la Tabla 26, se visualiza la resistencia al aplastamiento, de la tornillería implementada en la lámina base del sistema mecánico, en la cual se garantiza el cumplimiento del criterio a detalle estipulado por la norma (DB-SE-A).

<i>Comprobación Tornillería al Aplastamiento (Lámina Base)</i>				
<i>N°</i>	<i>F_{vEd}</i>	<i>Unidades</i>	<i>F_{bRd}</i>	<i>Unidades</i>
Tornillo 1	186,720	N	19819,52	N
Tornillo 2	186,720	N	19819,52	N
Tornillo 3	186,720	N	19819,52	N
Tornillo 4	186,720	N	19819,52	N

Tabla 26. Comprobación de aplastamiento lámina base, elaboración propia.

- **Cálculo de Resistencia al deslizamiento**

Determina la resistencia que posee un tornillo, cuando se aplica una fuerza distribuida perpendicular al eje del vástago del mismo. En el desarrollo del sistema mecánico dicha resistencia, se aplica en la componente (Y) de la fuerza que se aplica al tornillo (F_{vEdy}) a partir del peso del servomotor y del acople mecánico tipo fuelle. Se debe garantizar que la fuerza aplicada (F_{vEdy}) sea menor o igual al esfuerzo de pretensado (F_{sRd}) (Rodríguez, 2023).

Es importante mencionar que el análisis estructural efectuado en el sistema mecánico estableció, que en la lámina media no existe carga, que genere resistencia al deslizamiento en la tornillería que la compone, por lo cual no existe cálculo referente a la misma en esta sección del sistema mecánico.

Lámina en Forma de L del Sistema Mecánico:

Cálculo de (F_{SRd}): Para calcular la fuerza que resiste la tornillería al deslizamiento, en la lámina en L del sistema mecánico, se utilizó la siguiente ecuación (44).

$$F_{SRd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{Mb}} * F_{pCd} \quad (44)$$

Donde (k_s) representa una constante aplicada por el sistema ranurado de la lámina, la misma posee un valor (0.7), (n) es el número de superficies de contacto entre las láminas, posee un valor de 1. (μ) corresponde al coeficiente de rozamiento, para el mismo se tomó un valor de (0.2) puesto que el material no fue tratado, (γ_{Mb}) es una constante que toma el valor de (1.4) ya que como se mencionó al inicio de la sección, los cálculos se efectuaron con base a las peores condiciones de carga.

(F_{pCd}) corresponde al esfuerzo de pretensado y se define con base a la siguiente ecuación (45).

$$F_{pCd} = 0.7 * f_{ub} * A_s \quad (45)$$

Donde (f_{ub}), es la tensión última del acero de los tornillos, la misma tiene un valor de (400 N/mm^2), (A_s) corresponde al área resistente a tracción del tornillo y tiene un valor de (14.18 mm^2). Reemplazando en la ecuación (45), se obtiene el valor de (F_{pCd}).

$$F_{pCd} = 0.7 * (400 \text{ N/mm}^2) * (14.18 \text{ mm}^2)$$

$$F_{pCd} = 3970.4 \text{ N}$$

Finalmente se reemplaza en la ecuación (44), para obtener el valor de la fuerza que resiste el tornillo a deslizamiento (F_{SRd})

$$F_{SRd} = \frac{0.7 * 1 * 0.2}{1.4} * 3970.4 \text{ N}$$

$$F_{SRd} = 397.04 \text{ N}$$

Para realizar la verificación de la tornillería a resistencia al deslizamiento, se debe garantizar que ($F_{vEdy} \leq F_{SRd}$) para cada uno de los tornillos; el valor de F_{vEdy} se obtuvo en la sección del cálculo de resistencia a cortante. En la Tabla 27 se visualiza la resistencia al deslizamiento, de la tornillería implementada en la lámina en L del sistema mecánico, en la cual se garantiza el cumplimiento del criterio a detalle estipulado por la norma (DB-SE-A).

<i>Comprobación Tornillería al Aplastamiento (Lámina L)</i>				
<i>N°</i>	<i>F_{vEdy}</i>	<i>Unidades</i>	<i>F_{sRd}</i>	<i>Unidades</i>
Tornillo 1	196,547	N	397,04	N
Tornillo 2	299,033	N	397,04	N
Tornillo 3	196,547	N	397,04	N
Tornillo 4	299,033	N	397,04	N

Tabla 27. Comprobación al deslizamiento lámina en L, elaboración propia.

Lámina Base del Sistema Mecánico:

Cálculo de (F_{sRd}): Para el cálculo de la resistencia al deslizamiento, en la lámina base del sistema mecánico se implementó la misma ecuación (44), implementada en el cálculo de la lámina en L, exceptuando el área resistente a tracción del tornillo (A_s), puesto que la misma se determinó con base a la tornillería intrínseca en los sistemas anti vibratorios, por lo tanto (A_s) tiene un valor de (36.638 mm^2). Reemplazando en la ecuación (45), se obtiene el valor de (F_{pCd}).

$$F_{pCd} = 0.7 * \left(400 \text{ N/mm}^2 \right) * (36.638 \text{ mm}^2)$$

$$F_{pCd} = 10258.64 \text{ N}$$

Finalmente se calcula (F_{sRd}) reemplazando en la ecuación (44).

$$F_{sRd} = \frac{0.7 * 1 * 0.2}{1.4} * 10258.64 \text{ N}$$

$$F_{sRd} = 1025.864 \text{ N}$$

Para realizar la verificación de la tornillería a resistencia al deslizamiento, se debe garantizar que ($F_{vEdy} \leq F_{sRd}$) para cada uno de los tornillos. En la Tabla 28 se visualiza la resistencia al deslizamiento, de la tornillería implementada en la lámina en L del sistema mecánico, en la cual se garantiza el cumplimiento del criterio a detalle estipulado por la norma (DB-SE-A).

<i>Comprobación Tornillería al Aplastamiento (Lámina Base)</i>				
<i>N°</i>	<i>F_{vEdy}</i>	<i>Unidades</i>	<i>F_{sRd}</i>	<i>Unidades</i>
Tornillo 1	186,720	N	1025,864	N
Tornillo 2	186,720	N	1025,864	N
Tornillo 3	186,720	N	1025,864	N
Tornillo 4	186,720	N	1025,864	N

Tabla 28. Comprobación al deslizamiento lámina base, elaboración propia.

Simulación de Elementos Finitos

Es importante aclarar la importancia de realizar un análisis de convergencia para representar los límites del cualquier proceso que se esté desarrollando, pero el mismo se encuentra fuera de los límites del proyecto. Por lo tanto, para suplir significativamente esta ausencia y garantizar el funcionamiento del sistema mecánico se definió el trazado de malla como se evidencia en la Ilustración 40.

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1* (-Predeterminado-)
Detalles Tipo de malla	Malla mixta
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 puntos
Verificación jacobiana para el vaciado	Activar
Tamaño máx. de elemento	9,10027 mm
Tamaño mín. de elemento	1,14805 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	23729
Número total de elementos	12216
Mallar de nuevo las piezas fallidas de forma independiente	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:28

Ilustración 40. Detalle de malla. Elaboración propia

Esta simulación se realizó con el propósito de evaluar la resistencia de los diferentes componentes del sistema mecánico, al momento de aplicar las diversas cargas mencionadas en la sección 7. Por medio de la misma se determinó el material de fabricación y el grosor de las láminas del sistema mecánico; la simulación se realizó por medio del software SolidWorks y las cargas implementadas son.

- Peso de los componentes del sistema mecánico, véase Tabla 12.
- Momento máximo del servomotor Yaskawa GSM7J-04A, (M_{max}).
- Presión distribuida generada por la hélice del motor PT6, (P_{dis}).
- Especificaciones de movimiento máximo del fusible mecánico MK2-100.

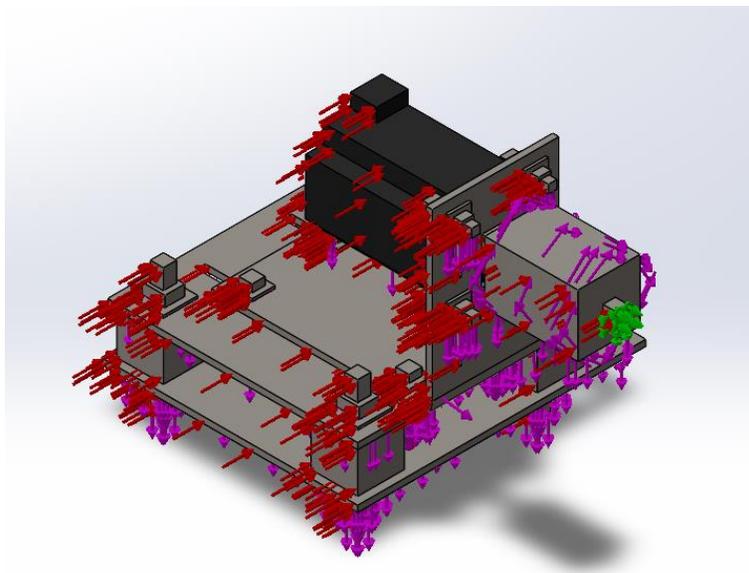


Ilustración 41. Cargas aplicadas al sistema mecánico. Elaboración propia.

Como se visualiza en la Ilustración 41, la distribución de los componentes del sistema mecánico, se efectuó de tal manera que se ejerce sobre el mismo las peores condiciones de carga, de la misma manera se implementó la geometría rectangular mencionada en la sección de áreas de diseño, con el propósito de realizar una simulación mucho más rigurosa, que refleje las condiciones de operación del sistema mecánico en las pruebas de biocombustibles en el motor PT6.

La simulación de elementos finitos, debe cumplir con los criterios de diseño de detalle, en relación a la resistencia máxima del material, con base al criterio de Von Mises y al desplazamiento máximo permitido por el MK2-100 (R+W, 2023).

El material de las láminas del sistema mecánico implementado en la simulación es el acero estructural (A36), el mismo se seleccionó por sus propiedades de resistencia estructural, véase Tabla 29, su alta empleabilidad en la industria, su fácil adquisición y su bajo costo.

Acero Estructural A36			
Ítem	Propiedades	Valor	Unidades
1	Módulo elástico.	2,00E+11	N/m ²
2	Coeficiente de Poisson.	0,26	N/D
3	Módulo cortante.	7,93E+10	N/m ²
4	Densidad de masa.	7850	kg/m ³
5	Límite de tracción.	4,00E+08	N/m ²
6	Límite elástico.	2,50E+08	N/m ²

Tabla 29. Características acero A36, elaboración propia.

Simulación con giro horario del Servomotor

- **Simulación de Tensiones (Von Mises)**

Como se evidencia en la Ilustración 42, el acero estructural A36 cumple con el criterio de diseño de detalle, referente al esfuerzo último del material aplicando las peores condiciones de carga al sistema mecánico, generando un esfuerzo máximo aproximado de $(2.100 * 10^8 \text{ N/m}^2)$ en la pieza en L que sostiene el servomotor, de la misma manera se evidencia que en el eje de la FCU y en el acople tipo fuelle no se presentan fallas en el criterio de Von Mises, lo que implica que la carga que puede ejercer el motor PT6 sobre el sistema mecánico no deforma el material de fabricación de las láminas, que lo componen puesto que su límite elástico es de $(2.500 * 10^8 \text{ N/m}^2)$. Es importante aclarar que el valor máximo presentado en la prueba de Von Mises corresponde a un anclaje fijo que corresponde al motor PT6A por lo cual no se tienen consideración en este análisis.

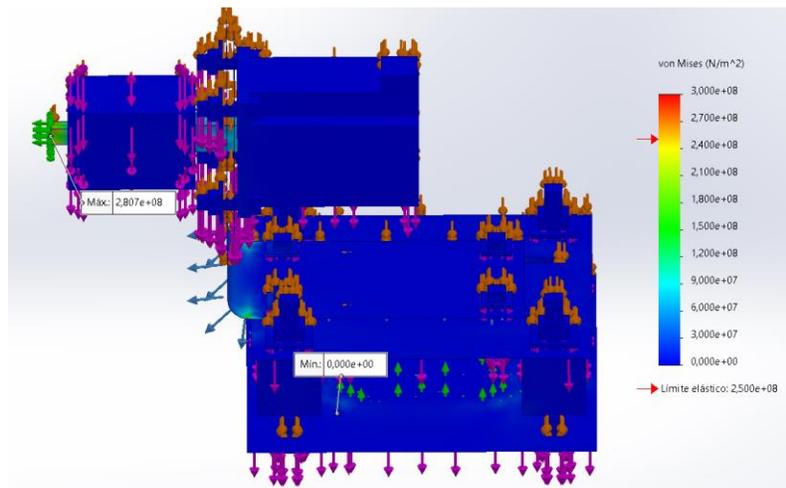


Ilustración 42. Von Mises sentido horario, elaboración propia.

- **Simulación de desplazamientos (URES)**

Como se evidencia en la Ilustración 43, el acero estructural A36 cumple con el criterio de diseño de detalle, referente al desplazamiento máximo permitido en el fusible MK2-100 bajo las peores condiciones de carga en el sistema mecánico, generando un desplazamiento máximo aproximado $(0.065 \text{ a } 0.1302) \text{ mm}$. El valor de desplazamiento máximo (0.217 mm) se presenta en uno de los extremos del servomotor, lo que implica que la carga que puede ejercer el motor PT6 sobre el sistema mecánico no permite un desplazamiento que supere las especificaciones del fabricante del fusible mecánico (R+W, 2023).

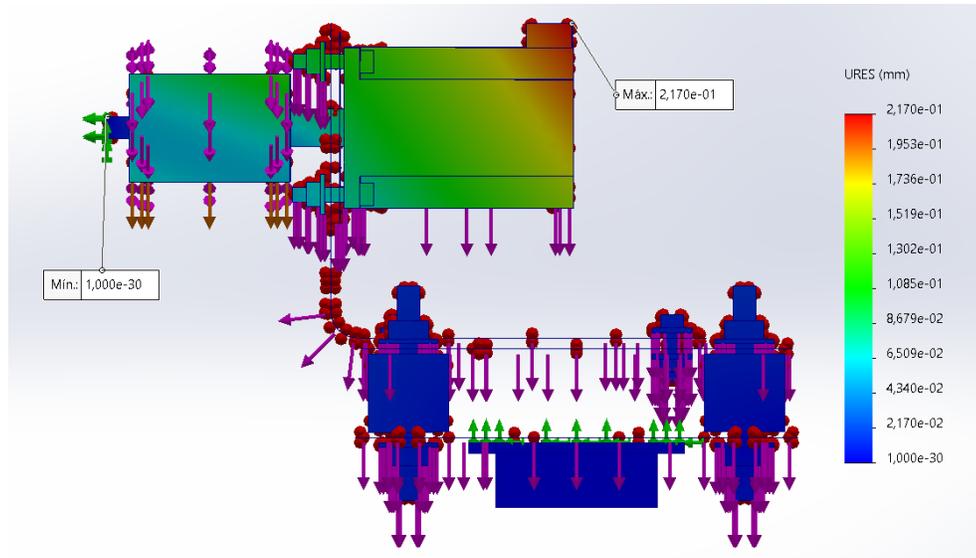


Ilustración 43. Desplazamiento máximo sentido horario, elaboración propia.

Simulación con giro anti horario del Servomotor

- **Simulación de Tensiones (Von Mises)**

Como se evidencia en la Ilustración 44, el acero estructural A36 cumple con el criterio de diseño de detalle, referente al esfuerzo último del material aplicando las peores condiciones de carga al sistema mecánico, generando un esfuerzo máximo de $(1.950 \times 10^8 \text{ N/m}^2)$ en la pieza que simula el eje de la FCU, lo que implica que la carga que puede ejercer el motor PT6 sobre el sistema mecánico, no deforma el material de fabricación de las láminas que lo componen, puesto que su límite elástico es de $(2.500 \times 10^8 \text{ N/m}^2)$.

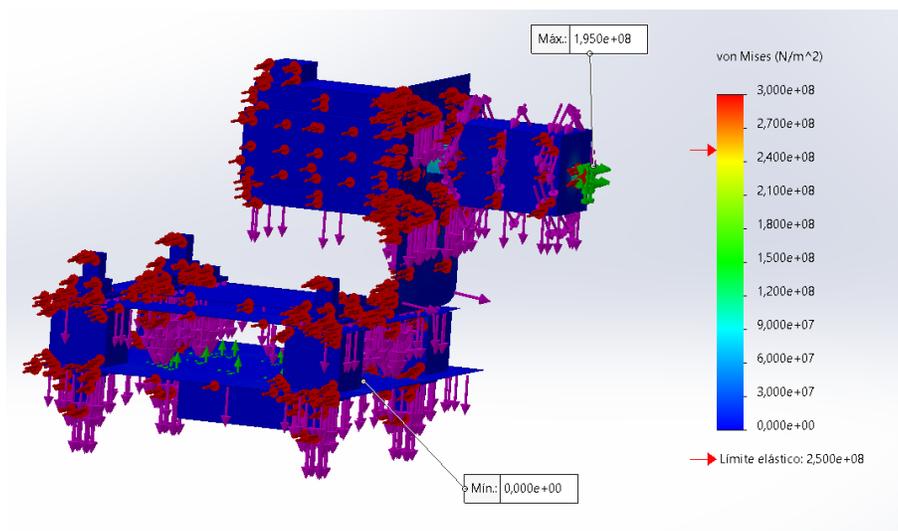


Ilustración 44. Von Mises sentido anti horario, elaboración propia.

- **Simulación de desplazamientos (URES)**

Como se evidencia en la Ilustración 45, el acero estructural A36 cumple con el criterio de diseño de detalle, referente al desplazamiento máximo permitido en el fusible MK2-100, bajo las peores condiciones de carga en el sistema mecánico, generando un desplazamiento máximo de (0.0681 mm) en uno de los extremos del MK2-100, lo que implica que la carga que puede ejercer el motor PT6 sobre el sistema mecánico no permite un desplazamiento que supere las especificaciones del fabricante del acople mecánico tipo fuelle (R+W, 2023).

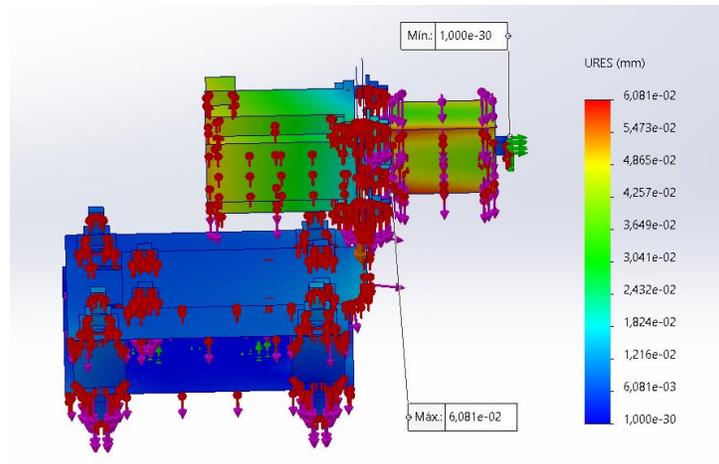


Ilustración 45. Desplazamiento máximo sentido anti horario, elaboración propia.

En conclusión, el sistema mecánico cumple con los diversos criterios de diseño de detalle en relación al dimensionamiento de las uniones atornilladas, resistencia de la tornillería a cortante, aplastamiento y deslizamiento, resistencia de materiales con base al criterio de Von Mises y finalmente la limitación al desplazamiento a causa de la tolerancia de desalineación del fusible mecánico. Por lo tanto, el sistema mecánico cumple los requerimientos del proyecto FAC.

8. Algoritmo de Calibración Automático

8.1 Descripción del proceso de reglaje manual realizado por personal FAC.

Antes del algoritmo se hace un proceso de calibración manual Diagrama de flujo 1 de la palanca y la FCU por personal experto FAC, el cual consta de los siguientes puntos.

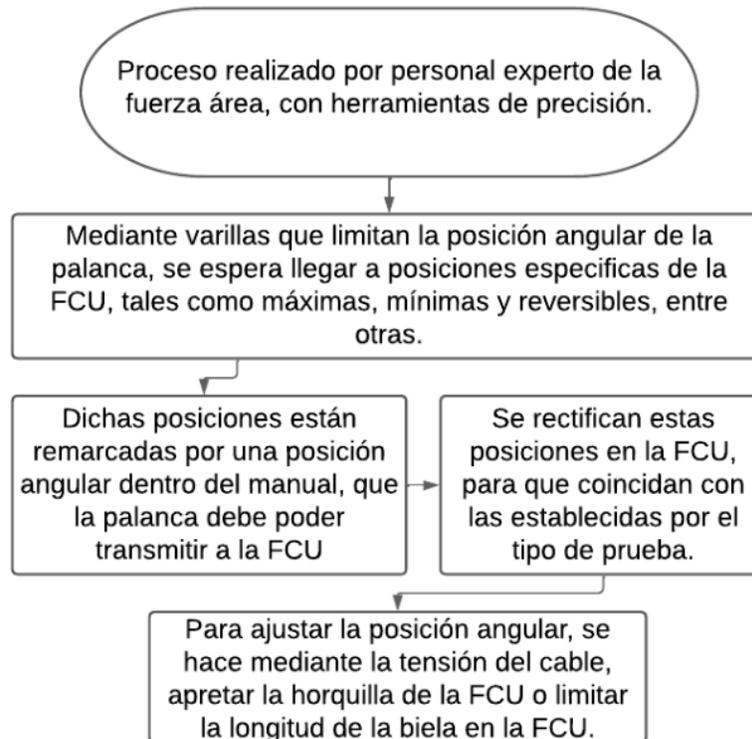


Diagrama de flujo 1. Proceso de calibración manual, fuente propia.

Este proceso se debe realizar antes de iniciar cualquier prueba en el banco de pruebas, el mismo requiere una alta precisión puesto que son ajustes mecánicos que deben realizados y supervisados por personal experto de la FAC.

8.2 Implementación de la calibración automática del reglaje de la FCU.

¿Por qué se implementó?

El propósito general del algoritmo de ajuste, es adaptar el servomotor SGM7J-04A al reglaje implementado por personal experto FAC, a la palanca de control de paso de combustible de la FCU. Con el objetivo de mejorar con precisión la adquisición de las posiciones de mínimas, máximas y reversibles de manera automática, además debe permitir el movimiento solidario de la palanca de potencia y la FCU en cualquier rango de posición de las mismas.

Alcances y limitaciones del algoritmo.

El algoritmo de calibración automático está limitado por las siguientes condiciones.

- Se debe garantizar una velocidad y aceleración baja, para evitar daños en la FCU.

- No se debe superar el porcentaje de torque programado para la adquisición de mínimas, máximas y reversibles, ya que se pueden generar daños en las piezas de recorrido que componen la FCU.
- Se debe definir el reglaje de prueba por personal de experto FAC, antes de iniciar el algoritmo de ajuste, de no ser así se pueden presentar rangos de movimiento erróneos, que pueden afectar a las piezas de la FCU y al acople tipo fuelle.

Para dar cumplimiento con el propósito general establecido, se definió el siguiente pseudocódigo al algoritmo de calibración automático.

Modelo paso a paso del Algoritmo de Calibración.

- 1) Se debe garantizar que el motor PT6 se encuentre apagado, seguido el personal experto FAC debe ubicar el eje de la FCU en la posición de mínimas.
- 2) En la cabina de pruebas de motores PT6, el personal encargado de la prueba debe ubicar la palanca de control de potencia en la posición de mínimas.
- 3) Se debe garantizar que el controlador MP2600iec y el servomotor SGM7J-04A, se encuentre energizados por medio del software de control de movimiento MotionWorks.
- 4) Se inicia la conversión análogo-digital por medio del puerto analógico del MP2600iec, con el propósito de almacenar el valor del voltaje aplicado a la palanca de potencia.
- 5) El encargado de la prueba debe accionar el pulsador ubicado en la cabina de pruebas que permite la ejecución del algoritmo de ajuste.
- 6) Por medio de programación se inicializan todas las variables en cero, posterior se inicia la lectura de posición, velocidad y aceleración por medio de bloques Read en MotionWorks.
- 7) Por medio de MotionWorks se calcula la sensibilidad de la palanca de potencia, con base al voltaje y al recorrido angular de la misma en tiempo real.
- 8) Automáticamente el servomotor iniciara con una serie de movimientos programados por medio del bloque JOG, el primero de ellos será un giro anti horario a una velocidad de (0.1 rev/s) y aceleración de (0.1 rev/s^2) , el mismo se detendrá cuando encuentre oposición al movimiento y por consiguiente aumentará el torque. Una vez se supere el torque programado se almacenará la posición de mínimas en la variable global.
- 9) El algoritmo compara el torque de operación del servomotor y detiene el mismo una vez se detecta una oposición al movimiento, que supera el torque programado. Cuando esta comparación se cumple el algoritmo almacena la posición y se define como mínimas.

- 10) Una vez obtenida la posición de mínimas, el algoritmo genera un tiempo de espera de 1,5 segundos, posterior iniciará un movimiento con sentido horario con velocidad (0.1 rev/s) y aceleración (0.1 rev/s^2) .
- 11) Se realiza el mismo procedimiento visto en el paso 9. Cuando el condicional de torque se cumple el algoritmo almacena la posición y se define como máximas.
- 12) Una vez almacenada la posición de máximas el algoritmo genera un tiempo de espera de 1,5 segundos, posterior a ello el servomotor volverá a la posición de mínimas a una velocidad de (0.1 rev/s) y aceleración de (0.1 rev/s^2) .
- 13) Una vez almacenadas las posiciones de mínimas y máximas, el algoritmo determina el rango de movimiento no utilizado con base a la sensibilidad de la palanca y la misma la almacena como reversibles.
- 14) Finalmente, una vez establecidas las posiciones mínimas, máximas y reversibles, el personal experto FAC puede realizar las pruebas de biocombustibles en el motor PT6.

Como se evidencia el algoritmo de ajuste permite al personal experto FAC de manera sencilla definir con alta precisión y de manera automática la posición de mínimas, máximas y reversibles. Las mismas conforman el reglaje implementado en las pruebas de biocombustibles en motores PT6.

En el Diagrama de flujo 2, se define de manera sencilla, el funcionamiento del algoritmo de calibración automático implementado por medio del controlador MP2600iec de YASKAWA.

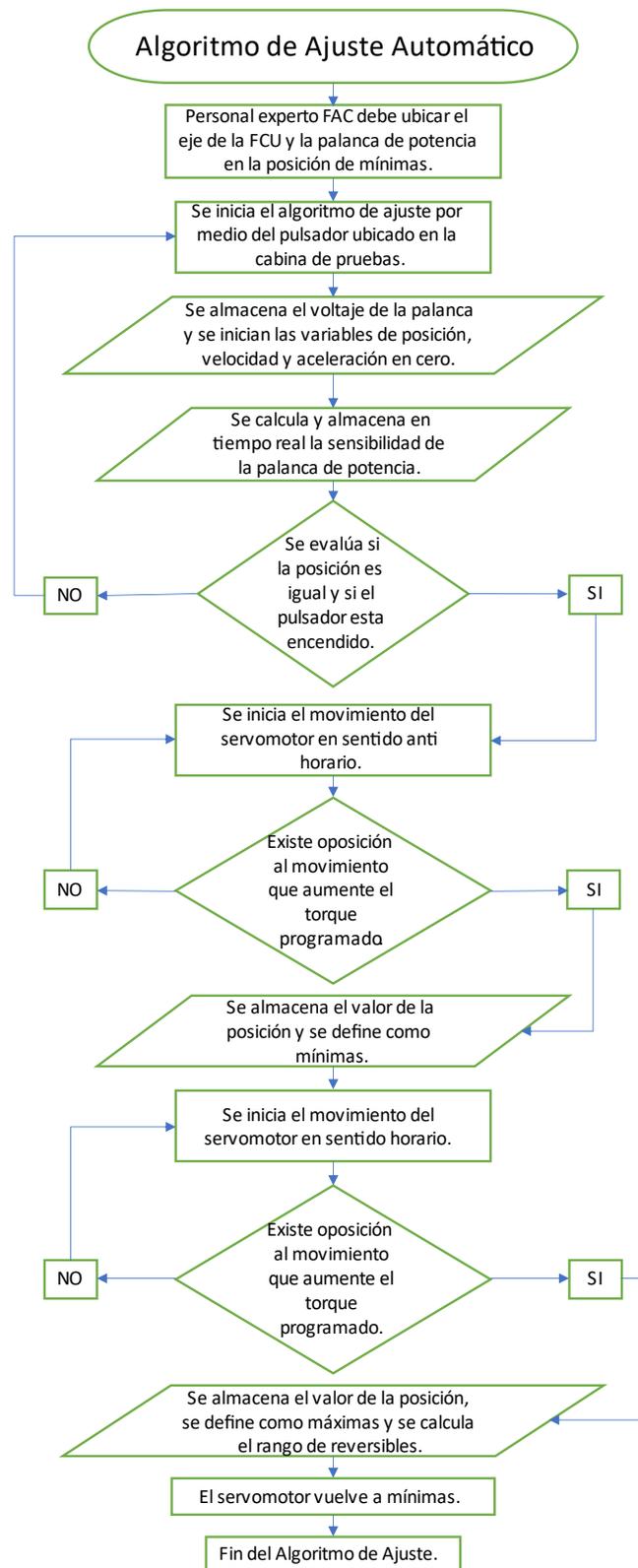


Diagrama de flujo 2. Algoritmo de calibración automático, fuente propia.

8.3 Secciones que componen el algoritmo de calibración

- **Sección de potencia:**

Esta sección esta fomentada a energizar de manera segura el sistema de control mecatrónico, de tal manera que para alimentar el servomotor e iniciar la secuencia del algoritmo de calibración automático, es necesario activar el pulsador que se ubicará en la cabina de pruebas del motor PT6. Como se evidencia en la Ilustración 46, la sección de potencia cuenta con un enclavamiento en lenguaje Ladder, que permite almacenar en memoria la señal enviada por el pulsador a través del del pin digital del controlador MP2600iec (Yaskawa, 2023).

Una vez se retiene la señal del pulsador, la misma activa por medio de un flanco de subida el bloque (MC_Power_1) que es el encargado de alimentar el servomotor; de manera simultánea se activa el bloque (MC_SetPosition_1), el cual permite establecer la posición inicial que tiene el servomotor de tal forma, que cada vez que se inicie la secuencia del algoritmo de calibración, la posición del servomotor en el software equivale a cero. Finalmente se inicializa un temporizador por medio del bloque (TON_1), el cual permite el inicio del algoritmo de calibración automático por medio del bloque (JOG) (Yaskawa, 2022).

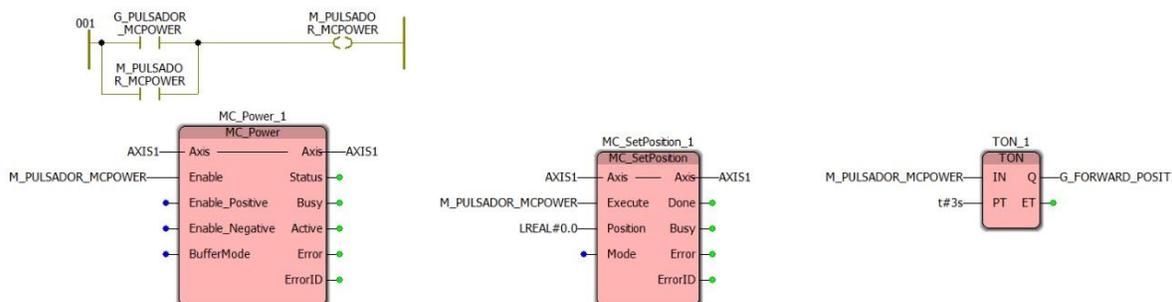


Ilustración 46. Sección de Potencia, fuente propia.

- **Sección de lectura de variables**

Esta sección permite la visualización en tiempo real de las variables más relevantes véase Ilustración 47, que están implícitas en el algoritmo de calibración, la lectura de las mismas se realiza por medio de los bloques (MC_ReadActualPosition_1), el cual se encarga de tomar la posición del eje del servomotor, con base al encoder del servomotor y se almacena en la variable (position). Esta variable toma relevancia al momento de establecer las posiciones de mínimas, máximas y el rango de operación de reversibles.

El bloque (MC_ReadActualTorque_1), se encarga de enviar el torque ejercido por el servomotor cada vez que el mismo presente un movimiento y lo almacena en la variable

(Torque). La relevancia de la misma radica al momento de definir los límites máximos de torque que se implementan en el algoritmo de calibración véase sección 8.

El bloque (MC_ReadActualVelocity_1), tiene la función de enviar la velocidad utilizada por el servomotor, al momento de ejecutar cualquier movimiento y almacenarla en la variable (Velocity). La misma se utiliza como sistema de monitoreo, con el propósito de rectificar que el servomotor en ninguna de las etapas del algoritmo de calibración supere la velocidad, aceleración y desaceleración programadas.

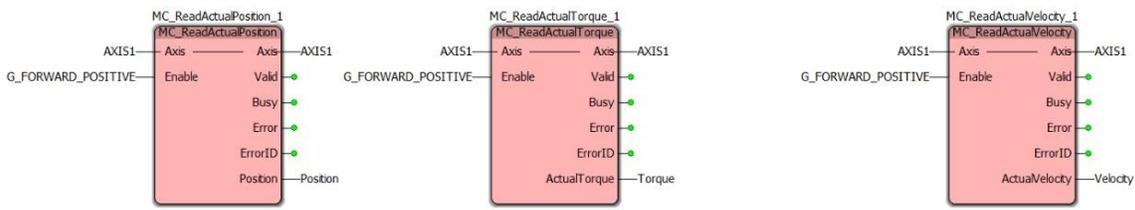


Ilustración 47. Lectura de variables, fuente propia.

- **Sección de adquisición y manejo de datos**

Esta sección se diseñó con base al lenguaje estructurado el software MotionWorks véase Ilustración 48, en la misma se definen todas las características del algoritmo de control implementado en el proyecto, entre las cuales se destacan la lectura del voltaje de la palanca de potencia, rutinas de mínimas, máximas y reversibles, el sistema de seguridad con base al torque y se definen los parámetros de velocidad, aceleración y desaceleración que permiten el movimiento solidario del servomotor SGM7J-04A y el eje de la FCU.

```

1  (*.....Rutina de Máximas.....*)
2
3  IF (G_Calibracion_Done = INT#0)
4      THEN
5      Pos_inicial: = LREAL_TO_INT(Position);
6      G_Voltage_Final: = LREAL#4.27;
7
8  (*...Captura de Voltaje y posición inicial...*)
9
10 IF (M_FORWARD = FALSE AND Pos_Inicial = INT#0)
11     THEN
12     G_Voltage_Inicial: = MO1_AI_01;
13     G_Posicion_Inicial: = INT_TO_LREAL(Pos_inicial);
14 END_IF

```

Ilustración 48. Estructurado MotionWorks, fuente propia

En la rutina de máximas inicialmente se evalúa si la variable (G_Calibracion_Done) es igual a cero, de ser así la variable (Pos_inicial) toma el valor entero de la variable (Position) y la

variable (G_Voltage_Final) toma el valor de 4.27 que representa el voltaje máximo obtenido del puerto analógico del controlador.

En la sección de captura de voltaje y posición inicial se evalúa si la variable booleana (M_FORWARD) es falsa y además si la variable (Pos_Inicial) es igual a cero, al cumplirse ambas condiciones la variable (G_Voltage_Inicial) toma el valor de la entrada analógica (MO1_AI_01) del controlador y la variable (G_Pos_Inicial) toma el valor real de la variable (Pos_inicial).

- **Sección de movimiento del algoritmo de calibración**

Esta sección determina el movimiento del algoritmo de calibración automático, generado por medio del bloque (JOG), véase Ilustración 49. Por medio del lenguaje Ladder se definió el movimiento horario del servomotor, gracias a un sistema de enclavamiento con memoria que envía una señal booleana al bloque JOG a través de la variable (M_FORWARD). De igual manera se realiza el mismo proceso de enclavamiento ahora para el giro del servomotor en sentido anti horario, por medio de la variable (M_REVERSE).

El bloque (JOG) está configurado de tal manera que permita un movimiento a una velocidad, aceleración y desaceleración baja, con el propósito de evitar fallas en la adquisición de las posiciones de máximas, mínimas y reversibles. Por medio del bloque contador (CTU_1), se define el cambio de giro del servomotor enviando un dato booleano (JOG_Status) a la sección de adquisición y manejo de datos. Finalmente se implementa un temporizador por medio del bloque (TON_2) que define el tiempo de espera necesario para ejecutar el cambio de flanco en el bloque JOG y pasar a la sección del movimiento de reglaje final.

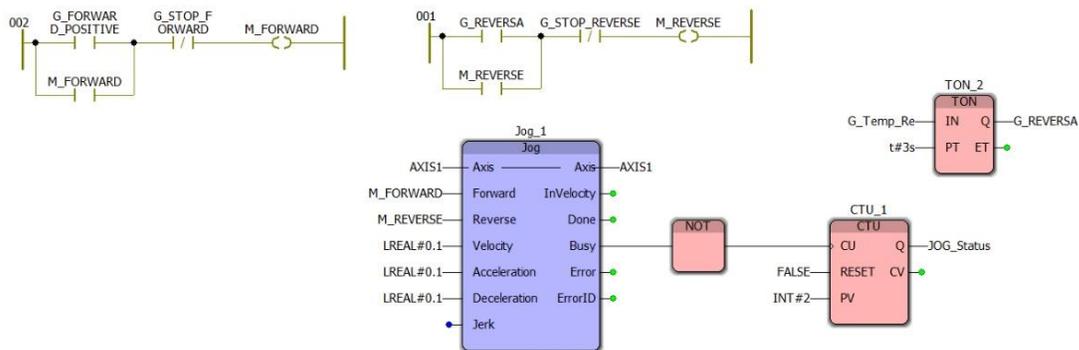


Ilustración 49. Sección de Movimiento, fuente propia.

- **Resultados del sistema de Calibración Automática**

Los parámetros estipulados en el algoritmo de calibración automática y ejecutada por medio del bloque JOG se evidencian en la Tabla 30.

Bloque JOG					
Ítem	Entrada	Valor	Tipo	Unidades	Detalle

1	Forward	0 ó 1	Bool	N/A	Permite el movimiento del servomotor en sentido horario.
2	Reverse	0 ó 1	Bool	N/A	Permite el movimiento del servomotor en sentido anti horario.
3	Velocity	0.1	Real	rev/s	Define la velocidad de movimiento del eje del servomotor en cualquier sentido de giro.
4	Acceleration.	0.1	Real	rev/s ²	Define la aceleración de movimiento del eje del servomotor en cualquier sentido de giro.
5	Deceleration.	0.1	Real	rev/s ²	Define la desaceleración de movimiento del eje del servomotor en cualquier sentido de giro.
6	Busy	0 ó 1	Bool	N/A	Este determina el estado del bloque JOG, si está en movimiento establece un flanco de subida y una vez finaliza el movimiento cambia el estado a flanco de bajada.

Tabla 30. Parámetros del bloque JOG, elaboración propia.

Una vez definidos los parámetros del bloque JOG (Yaskawa, 2022), se realizan pruebas de funcionamiento del algoritmo de reglaje automático con base a los siguientes parámetros, véase Tabla 31.

Prueba del Algoritmo de Control					
Ítem	Entrada	Valor	Tipo	Unidades	Detalle
1	Timers	3	TIME	s	Se establece el tiempo de espera entre los diversos movimientos del algoritmo de control en segundos.
2	Torque mínimo	-7	REAL	%Torque Máx	Define el torque requerido para la adquisición de la posición de mínimas.
3	Torque máximo	7	REAL	%Torque Máx	Define el torque requerido para la adquisición de la posición de máximas.
4	Torque de seguridad	(-20 a 20)	REAL	%Torque Máx	Establece un rango de seguridad en el cual permite, que el servomotor no supere el torque programado para evitar daños en el mismo y en la FCU
5	Torque de alarma.	(-100 ó 100)	Real	%Torque Máx	Si se alcanza este valor de torque, se genera una alarma que apaga el servomotor.

Tabla 31. Parámetros torque y temporizadores, fuente propia.

A continuación, se visualizan los resultados de las pruebas realizadas con los parámetros mencionados anteriormente véase Ilustración 50, en los mismos se visualiza el correcto funcionamiento del algoritmo de calibración automática, cumpliendo con los siguientes criterios de diseño, establecer las posiciones de mínimas y máximas de manera automática, definir las variables de posición con base al torque programado y generar de manera automática el rango de operación de reversibles.

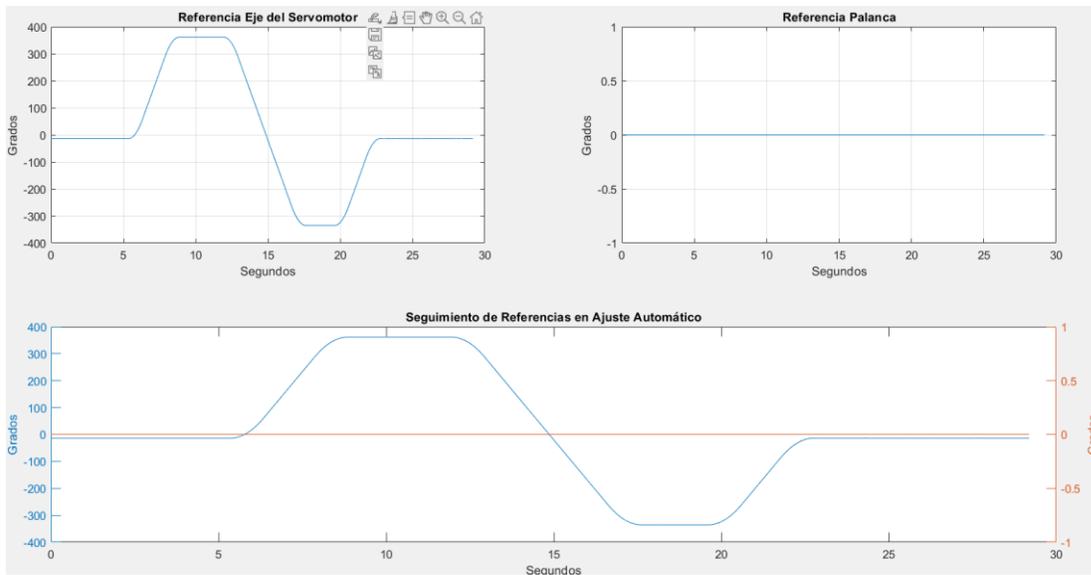


Ilustración 50. Seguimiento a referencias, fuente propia.

En la Ilustración 50, la línea azul representa la posición del eje del servomotor, mientras que la línea naranja corresponde a la posición de la palanca. Durante el proceso de prueba, se espera un período de 3 segundos antes de comenzar a identificar los límites de posición correspondientes. Una vez encontrados los límites, el servomotor vuelve automáticamente a su posición de mínimas.

Como se mencionó anteriormente en la sección 8.1 Descripción del proceso de reglaje manual realizado por personal FAC., se realizan ajustes en los límites de posición del eje del servomotor, los cuales no deben ser inferiores a -60° ni superiores a 60° (Es importante destacar que los límites establecidos para esta prueba son solo un ejemplo y pueden variar dependiendo de los objetivos y criterios de evaluación específicos de cada situación. Los límites de posición se pueden ajustar para adaptarse a diferentes requisitos y condiciones, lo que permite una mayor flexibilidad y versatilidad en la regulación del servomotor). Este proceso se realiza de manera automática para garantizar la eficiencia y precisión en la regulación de la posición del servomotor.

9. Control

Se propone de manera general una arquitectura de control sobre la cual, se encuentran todos los elementos relacionados en la implementación, un controlador mecatrónico y también el banco de pruebas de motores PT6. La arquitectura propuesta se visualiza en la Ilustración 51.

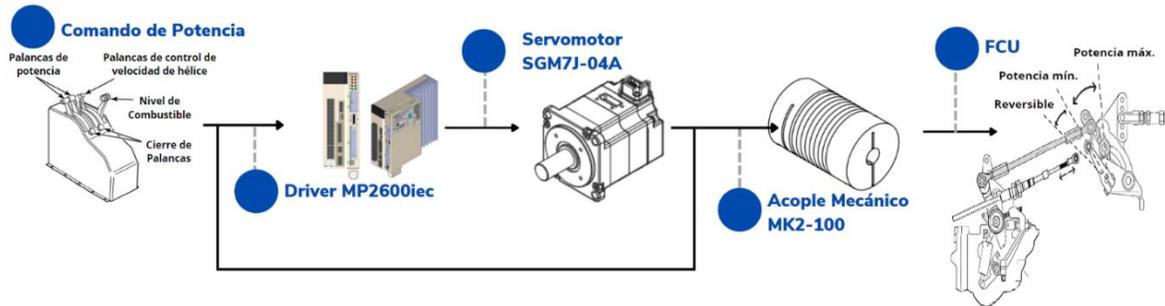


Ilustración 51. Arquitectura de Control Mecatrónica, fuente propia.

La arquitectura propuesta, refleja una retroalimentación entre la salida del servomotor y la entrada del controlador MP2600iec, de tal manera se garantiza una disminución del error de estado estacionario y se mejora la precisión del sistema, al mismo tiempo se protege el acople mecánico tipo fuelle y los componentes de la FCU del motor PT6.

9.1 Esquema de Control Driver MP2600iec

El conjunto Servomotor – Driver de YASKAWA tiene una arquitectura de un controlador en cascada, que se compone de la siguiente manera, véase Ilustración 52.

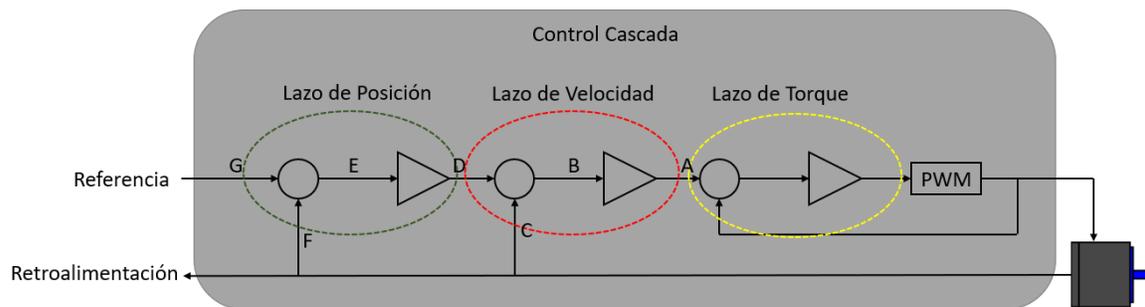


Ilustración 52. Esquema de control del servomotor, (Yaskawa, 2018)

Se distribuye principalmente en tres lazos, los mismos tienen como función garantizar un movimiento suave y estable sin dejar de seguir con precisión el perfil de movimiento de la referencia. Este procedimiento se realiza gracias al ajuste de las ganancias y parámetros que permiten los diversos lazos de control, que responden al error en el menor tiempo posible. Las características de estos son:

- Lazo de posición: Es alimentado por la referencia (palanca de potencia) y corregir el error del lazo de posición con el propósito de regular el sistema.
- Lazo de Velocidad: Analiza la velocidad retroalimentada y la compara con la salida del lazo, la cual es de posición como se observa en la Ilustración 52, la diferencia entre ambas va al lazo de torque.
- Lazo de Torque: Controla la cantidad de corriente en el servomotor, como se puede evidenciar en la Ilustración 52, del cual, recibe un comando de torque que depende

del lazo de velocidad, que se transmite al servomotor independientemente de la posición del mismo.

Para estos lazos previamente mencionados, se consideró que para poder abrir deben depender de las variables que lo componen, por lo que al probar un lazo como es posición se debe definir una velocidad y torque constante para la prueba.

9.2 Identificación de la planta

El software MotionWorks ofrece la posibilidad de realizar pruebas en lazo abierto con un bloque conocido como (Y_Direct). Es importante mencionar que esta función no se encuentra disponible en las versiones más recientes del programa, por lo que es necesario hacer un downgrade a una versión anterior si se desea utilizarla.

Para la prueba en lazo de posición véase Ilustración 53, se modificó únicamente la velocidad, ya que los parámetros de torque se mantuvieron al máximo, debido a que no repercute ningún cambio en las pruebas realizadas.

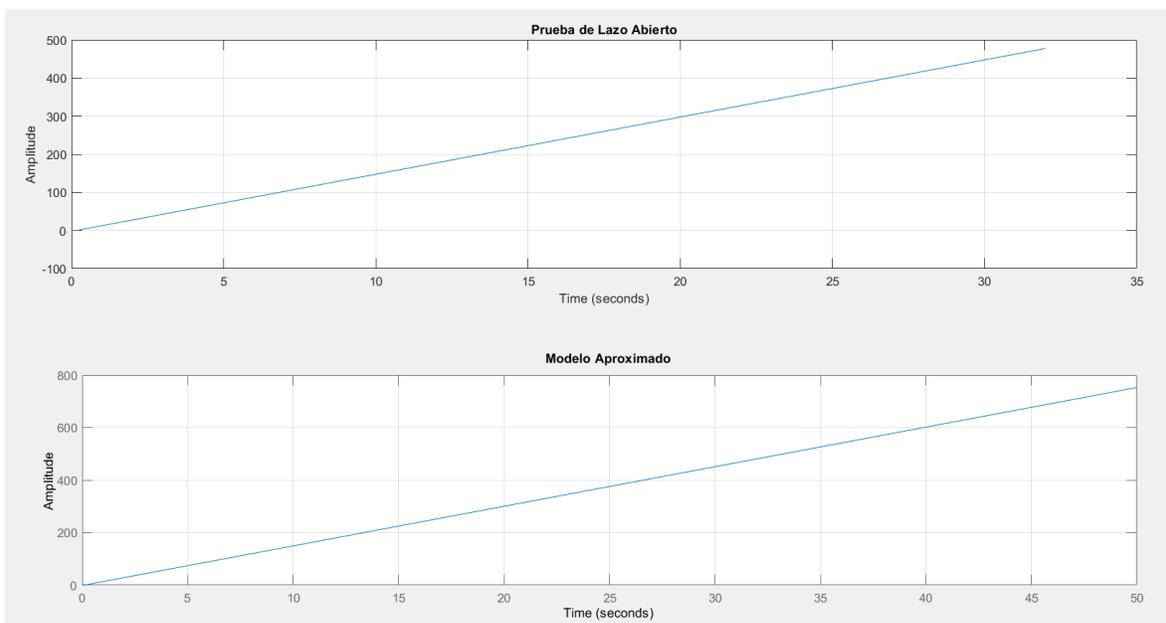


Ilustración 53. Identificación de la Planta, fuente propia.

Con la gráfica de posición, véase Ilustración 53, se aplicó el método de caracterización por Integrantes sección 5.4, para obtener un modelo aproximado de la planta, con base a los siguientes criterios:

- **Ganancia de Integración**

Los valores correspondientes a la ecuación (5).

$$Km = \frac{236.804 - 0}{(15 - 0) * (15.797 - 0.089)}$$

$$Km = 1.005$$

- **Tiempo Muerto**

Para el tiempo muerto sus variables correspondientes a la ecuación (6).

$$t_m = 0.089 - 0$$

$$t_m = 0.089$$

- **Función de transferencia en lazo abierto por Sistemas Integrantes**

Los valores que corresponde a la ecuación (4).

$$G_m(s) = \frac{1.005e^{-0.089s}}{s}$$

De acuerdo a la sección 5.4, se realizaron pruebas de sintonización de los diversos métodos propuestos en la Tabla 1 y la Tabla 2, por medio de la herramienta simulink del software Matlab, véase Ilustración 54.

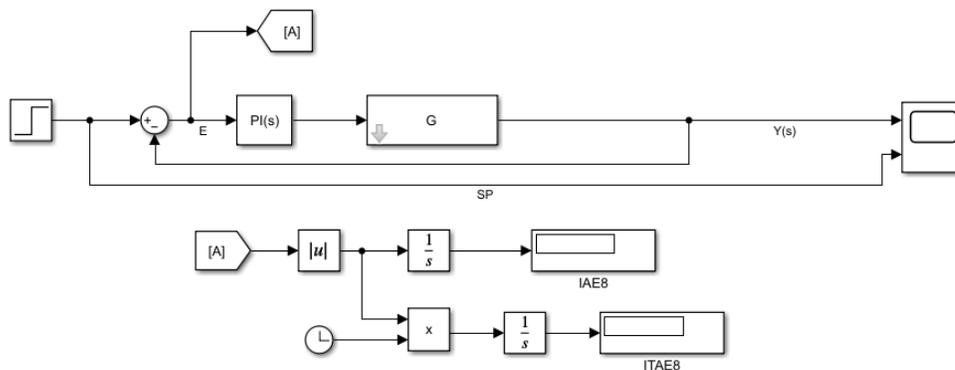


Ilustración 54. Prueba de controladores, fuente propia.

En la Ilustración 54, se visualiza la implementación del controlador PI en el modelo aproximado de la planta, con el propósito de evaluar en simulación el control sobre la señal de salida. Cabe resaltar que la estructura de prueba fue realizada en los diversos controladores que se presentan a continuación.

Controladores PI

➤ Ziegler & Nichols

En la prueba realizada al controlador PI por la prueba de escalón, véase Ilustración 55, se determinaron los parámetros de tiempo de subida (Tr), el tiempo pico (Tp), sobre impulso (Mp) y el tiempo de establecimiento (Ts), a partir de los datos obtenidos en la simulación en la herramienta simulink, véase Tabla 32.

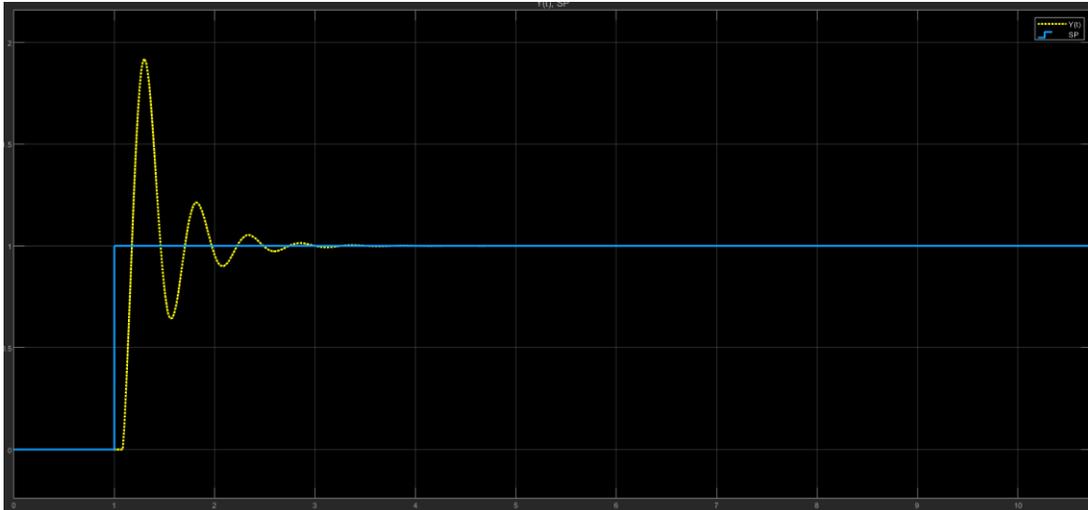


Ilustración 55. Prueba al escalón Ziegler & Nichols, fuente propia.

Parámetros de Respuesta				
Método de sintonización	Tr (seg)	Tp (seg)	Mp	Ts (seg)
Ziegler & Nichols	0,0953	0,218112	99,08%	1,578

Tabla 32. Parámetros de Ziegler & Nichols, fuente propia.

➤ Coon

En la prueba realizada al controlador PI por la prueba de escalón, véase Ilustración 56, se determinaron los parámetros de tiempo de subida (Tr), el tiempo pico (Tp), sobre impulso (Mp) y el tiempo de establecimiento (Ts), a partir de los datos obtenidos en la simulación en la herramienta simulink, véase Tabla 33.



Ilustración 56. Prueba al escalón Coon, fuente propia.

Parámetros de Respuesta				
Método de sintonización	Tr (seg)	Tp (seg)	Mp	Ts (seg)

Coon	0,097512	0,187513	51,25%	1,171
------	----------	----------	--------	-------

Tabla 33. Parámetros de Coon, fuente propia.

➤ Aström and Hägglund

En la prueba realizada al controlador PI por la prueba de escalón, véase Ilustración 57, se determinaron los parámetros de tiempo de subida (Tr), el tiempo pico (Tp), sobre impulso (Mp) y el tiempo de establecimiento (Ts), a partir de los datos obtenidos en la simulación en la herramienta simulink, véase Tabla 34.



Ilustración 57. Prueba al escalón Aström and Hägglund, fuente propia.

Parámetros de Respuesta				
Método de sintonización	Tr (seg)	Tp (seg)	Mp%	Ts (seg)
Aström and Hägglund	0,1296	0,2759	68,43%	1,206

Tabla 34. Parámetros de Aström and Hägglund, fuente propia.

➤ Hay

En la prueba realizada al controlador PI por la prueba de escalón, véase Ilustración 58, se determinaron los parámetros de tiempo de subida (Tr), el tiempo pico (Tp), sobre impulso (Mp) y el tiempo de establecimiento (Ts), a partir de los datos obtenidos en la simulación en la herramienta simulink, véase Tabla 35.

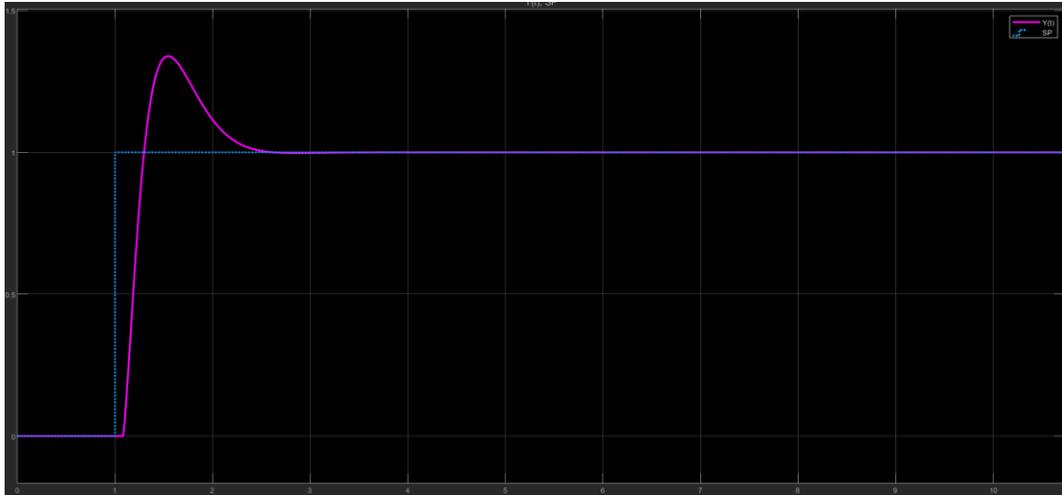


Ilustración 58. Prueba al escalón Hay, fuente propia.

Parámetros de Respuesta				
Método de sintonización	Tr (seg)	Tp (seg)	Mp%	Ts (seg)
Hay	0,217	0,4416	34,15%	1,274

Tabla 35. Parámetros de Hay, fuente propia.

➤ Skogestad

En la prueba realizada al controlador PI por la prueba de escalón, véase Ilustración 59, se determinaron los parámetros de tiempo de subida (T_r), el tiempo pico (T_p), sobre impulso (M_p) y el tiempo de establecimiento (T_s), a partir de los datos obtenidos en la simulación en la herramienta simulink, véase Tabla 36.

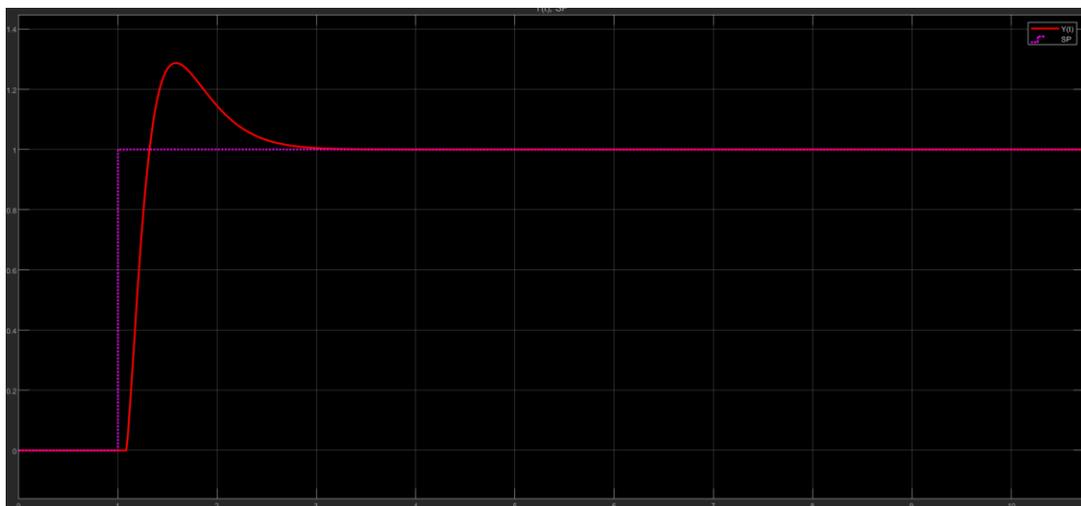


Ilustración 59. Prueba al escalón Skogestad, fuente propia.

Parámetros de Respuesta				
-------------------------	--	--	--	--

Método de sintonización	Tr (seg)	Tp (seg)	Mp%	Ts (seg)
Skogestad	0,2369	0,499188	29,00%	1,581

Tabla 36. Parámetros de Skogestad, fuente propia.

En la Tabla 37 se visualizan los criterios de desempeño del error absoluto integral (*IAE*) y el índice de error absoluto integral al cuadrado (*ITAE*), de los controladores a los cuales se les realizó la prueba de escalón en simulación, determinando que el controlador PI con el método de Coon presenta el mejor desempeño y por el contrario el controlador PI de Ziegler & Nichols presenta el peor desempeño.

Criterios de Desempeño		
Método de sintonización	IAE	ITAE
Ziegler & Nichols	0,4216	0,5882
Coon	0,2576	0,3241
Aström and Hägglund	0,3511	0,4577
Hay	0,3791	0,5327
Skogestad	0,3898	0,569

Tabla 37. Criterios de desempeño, fuente propia.

Controladores PD

➤ Visioli ISE

En la prueba realizada al controlador PD por la prueba de escalón, véase Ilustración 60, se determinaron los parámetros de tiempo de subida (*Tr*), el tiempo pico (*Tp*), sobre impulso (*Mp*) y el tiempo de establecimiento (*Ts*), a partir de los datos obtenidos en la simulación en la herramienta simulink, véase Tabla 38.

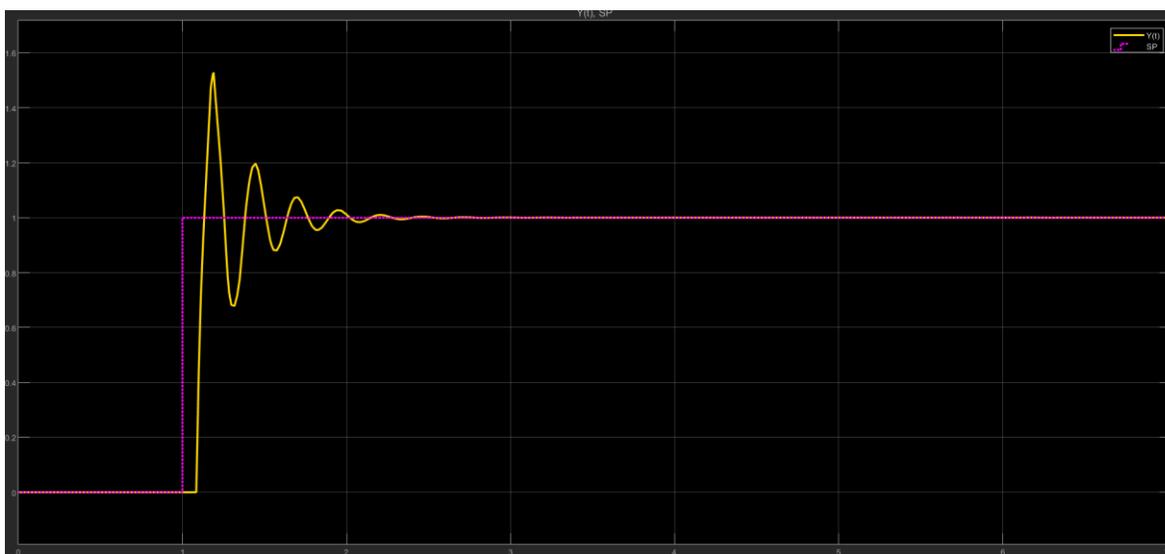


Ilustración 60. Prueba al escalón Visioli ISE, fuente propia.

Parámetros de Respuesta						
Método	Tr (seg)	Tp (seg)	Mp	Ts (seg)	IAE	ITAE

Visioli ISE	1,1325	1,1896	52,86%	1,9951	0,21	0,2582
-------------	--------	--------	--------	--------	------	--------

Tabla 38. Parámetros de Visioli ISE, fuente propia.

➤ Visioli ITSE

En la prueba realizada al controlador PD por la prueba de escalón, véase Ilustración 61, se determinaron los parámetros de tiempo de subida (Tr), el tiempo pico (Tp), sobre impulso (Mp) y el tiempo de establecimiento (Ts), a partir de los datos obtenidos en la simulación en la herramienta simulink, véase Tabla 39.

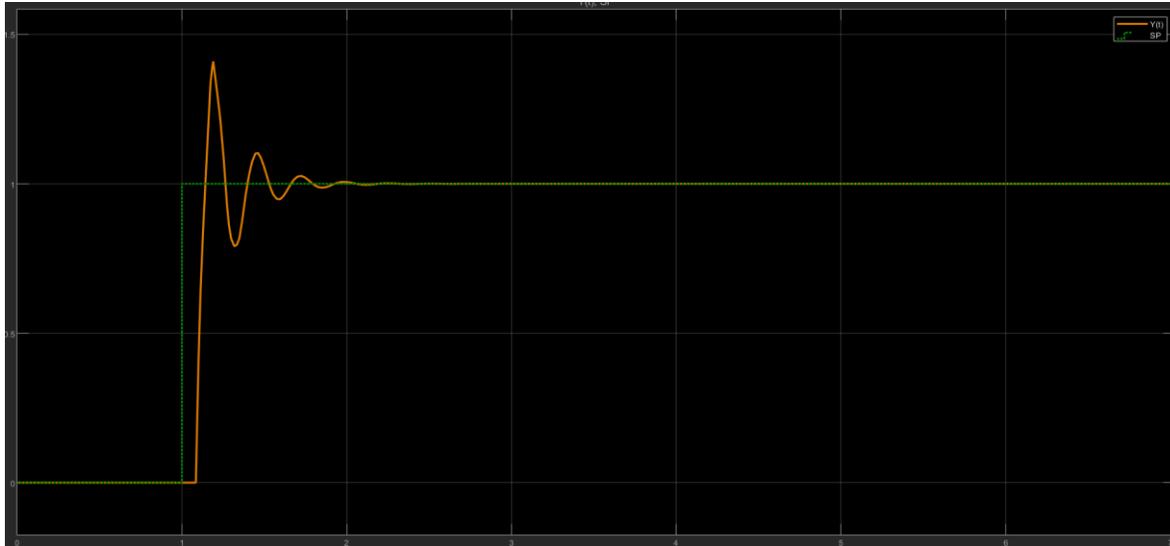


Ilustración 61. Prueba al escalón Visioli ITSE, fuente propia.

Parámetros de Respuesta						
Método	Tr (seg)	Tp (seg)	Mp	Ts (seg)	IAE	ITAE
Visioli ITSE	1,1419	1,1896	40,95%	1,765	0,1728	0,2007

Tabla 39. Parámetros de Visioli ITSE, fuente propia.

➤ Visioli ISTE

En la prueba realizada al controlador PD por la prueba de escalón, véase Ilustración 62, se determinaron los parámetros de tiempo de subida (Tr), el tiempo pico (Tp), sobre impulso (Mp) y el tiempo de establecimiento (Ts), a partir de los datos obtenidos en la simulación en la herramienta simulink, véase

Parámetros de Respuesta						
Método	Tr (seg)	Tp (seg)	Mp%	Ts (seg)	IAE	ITAE
Visioli ISTE	0,068	0,109612	32,77%	0,553184	0,1577	0,179

Tabla 40.

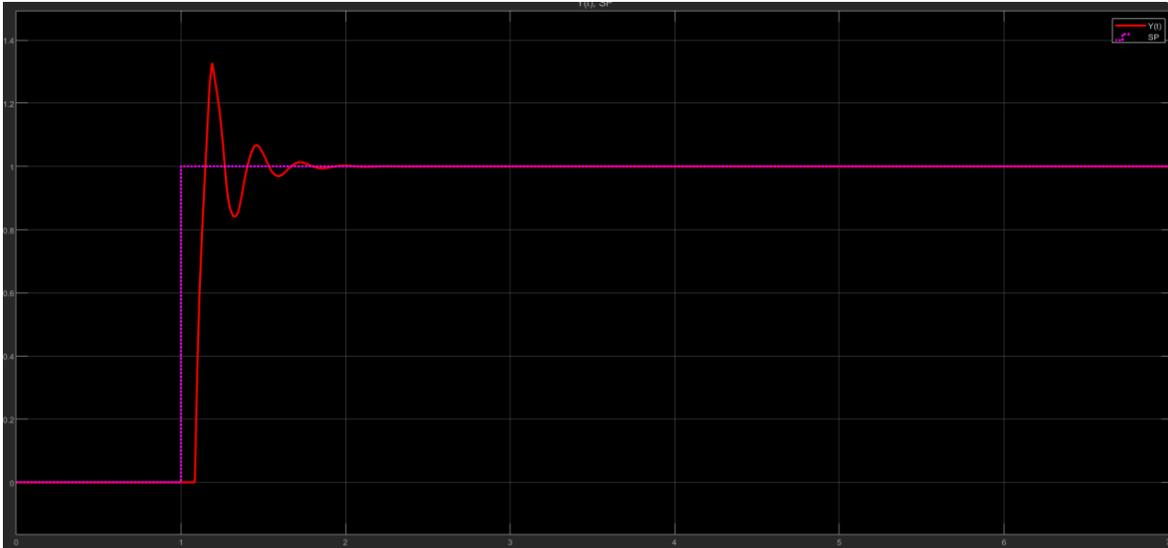


Ilustración 62. Prueba de escalón Visioli ISTE, fuente propia.

Parámetros de Respuesta						
Método	Tr (seg)	Tp (seg)	Mp%	Ts (seg)	IAE	ITAE
Visioli ISTE	0,068	0,109612	32,77%	0,553184	0,1577	0,179

Tabla 40. Parámetros de Visioli ISTE, fuente propia.

Las pruebas se ejecutaron con el propósito de evaluar, cuál de los controladores presenta el mejor comportamiento y desempeño respecto al modelo aproximado de la planta del servomotor Yaskawa SGM7J-04A y a los requisitos que limitan el proyecto, véanse las secciones 6 y 7.

Los controladores seleccionados para la comparativa en la sección 11, son el controlador (*PI*) sintonizado por el método de Skogestad y el controlador (*PD*) sintonizado por el método ITSE, por los siguientes motivos:

- El controlador de Skogestad presenta el menor sobre impulso (Mp) respecto a los otros controladores con arquitectura (*PI*), este factor es de vital importancia puesto que es importante garantizar, que el acople tipo fuelle o la FCU no presente daños causados por el momento generado por el servomotor. Por otra parte, comparando los diversos factores de desempeño y parámetros de respuesta, el controlador de Skogestad presenta valores promedio con respecto a los otros controladores (*PI*).
- El controlador de Visioli ISTE presenta los mejores criterios y parámetros de desempeño en comparación a los otros controladores con arquitectura (*PD*). Presenta el menor sobre impulso (Mp), lo cual garantiza el mejor comportamiento para objetivo de proyecto, además presente el menor tiempo de establecimiento de la salida (Ts) y presenta diferencias irrelevantes en comparación con los otros controladores en cuanto al tiempo de subida (Tr).

Los parámetros del controlador (*PI*) sintonizado por el método de Skogestad, véase Tabla 1, se muestran a continuación:

$$Kp = \frac{0.404}{1.005 * 0.089}$$

$$Kp = 4.51674$$

Donde Kp , es la ganancia proporcional del controlador.

$$Ti = 7 * 0.089$$

$$Ti = 0.623$$

Donde Ti , es el tiempo integral del controlador.

Los parámetros del controlador (*PD*) sintonizado por el método de Visioli ISTE, véase Tabla 2, se muestran a continuación:

$$Kp = \frac{0.9}{1.005 * 0.089}$$

$$Kp = 10.0618$$

Donde Kp , es la ganancia proporcional del controlador.

$$Td = 0.45 * 0.089$$

$$Td = 0.0401$$

Donde Td , es el tiempo derivativo del controlador.

9.3 Implementación (Esquemas de conexión)

Una vez establecido el sistema de control implementado en el proyecto, véase sección 9.1 Esquema de Control Driver MP2600iec, es importante detallar la conexión realizada entre el controlador y la palanca de potencia.

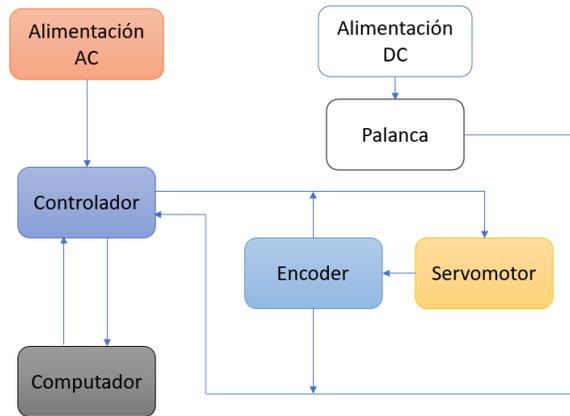


Ilustración 63. Conexión del proyecto, fuente propia.

Como se evidencia en la Ilustración 63, el control mecatrónico del comando de potencia tiene una comunicación bidireccional, que permite el envío y recepción de datos de manera simultánea. Es importante mencionar que la lectura y escritura de variables en el algoritmo, tienen un tiempo de ejecución que operan en un rango de (8 a 24 ms), esto resulta en que el movimiento solidario del eje del servomotor con el eje de la FCU, se ejecuta con una alta velocidad y precisión, con base a la posición de la palanca de potencia. La conexión a detalle del sistema de control mecatrónico se presenta en la Ilustración 64.

Esquema a Detalle

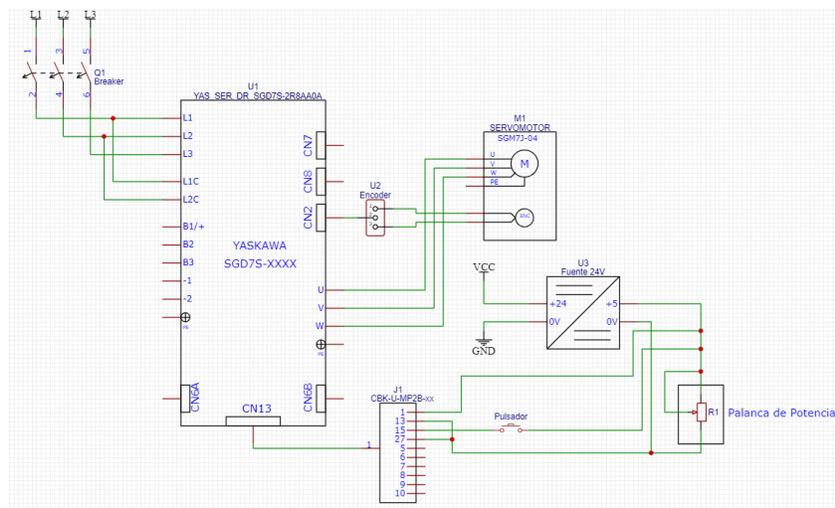


Ilustración 64. Conexión a detalle. fuente propia

Esquema Unifilar

La conexión física del sistema de control de potencia es relativamente sencilla, se constituye principalmente de la alimentación del controlador, conexión del encoder, palanca de potencia, computador y del servomotor, como se evidencia en la Ilustración 65.

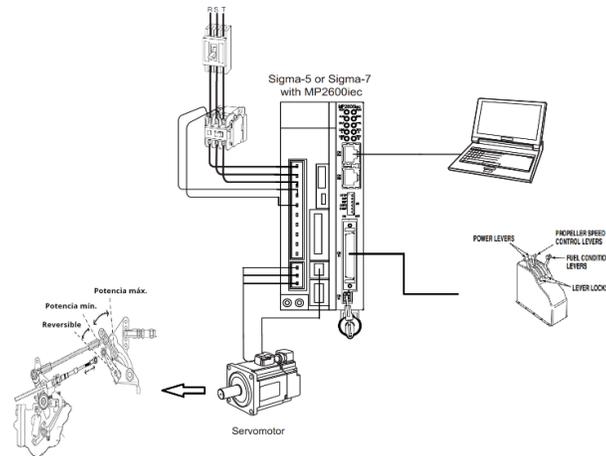


Ilustración 65. Esquema Unifilar de conexión, fuente propia.

La conexión del sistema de control mecatrónico se define a partir de las siguientes secciones.

- Sección de Potencia:** La alimentación del driver MP2600iec se realiza a través de una red trifásica a 220V por medio de las terminales *L1*, *L2* y *L3*, y un breaker de seguridad que protege al controlador en caso de un aumento de consumo de corriente, es importante resaltar que el MP2600iec posee una potencia máxima de 400 W (Yaskawa, 2023).

El servomotor SGM7J-04A se alimenta por medio de las terminales *U*, *V* y *W* del controlador, con el cable JZSP-C7M20G-10-E véase Ilustración 66, el mismo cuenta con 4 hilos de los cuales 3 son para una alimentación trifásica a 220V y la conexión a tierra (Yaskawa, 2020).

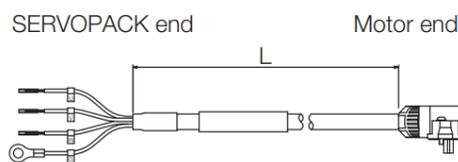


Ilustración 66. Cable del servomotor,(Yaskawa, 2020).

- Sección del Encoder:** El servomotor SGM7J-04A cuenta con un encoder absoluto de 24 bits de resolución, el mismo representa una parte fundamental del algoritmo de control de potencia, puesto que del determina cada una de las posiciones que componen el reglaje (mínimas, máximas y reversibles). El encoder cuenta con el cable JZSP-C7PI2E-10-E véase Ilustración 67, que posee terminales especiales en cada uno de sus extremos diseñados por la casa fabricante, el mismo se conecta a la terminal CN2 del controlador MP2600iec (Yaskawa, 2023).

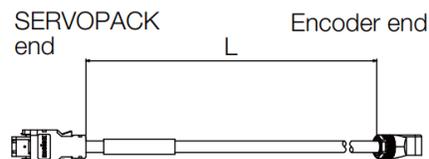


Ilustración 67. Cable de conexión del encoder, (Yaskawa, 2020).

- **Sección de Control de Potencia:** Esta se define principalmente por las conexiones realizadas a la palanca de control de potencia, con el propósito de obtener la sensibilidad de la misma y trasmitirla a un entorno de programación que define el algoritmo de control. Esta sección se conforma por:
 - *Alimentación de la palanca:* La misma se realizó por medio de una fuente de 24V y un regulador que transforma el voltaje de la fuente en 5V, véase Ilustración 64. El movimiento de la palanca determina el rango voltaje para calcular la sensibilidad de la misma en el algoritmo.
 - *Pulsador:* Tiene como función principal activar la alimentación al servomotor por medio del bloque (MC_Power_1). El pulsador está conectado a la entrada digital DI_02 del controlador véase Ilustración 64, una vez se activa el mismo genera un flanco de subida que permite la ejecución del algoritmo de ajuste automático.
 - *Puerto CN_13:* Este puerto contiene las diferentes entradas y salidas del controlador MP2600iec, está conectado por medio del cable CFC-U-MP2B-xx y cuenta con 50 pines, véase Ilustración 68. La adquisición del voltaje aplicado a la palanca se realiza por el pin 2 que corresponde a la entrada analógica (AI) del controlador. También se realizan las conexiones correspondientes a la unificación de negativos por medio de los pines 13 DICOM (Digital input common) y el pin 27 AI_GND (Analog input ground), véase Ilustración 64.

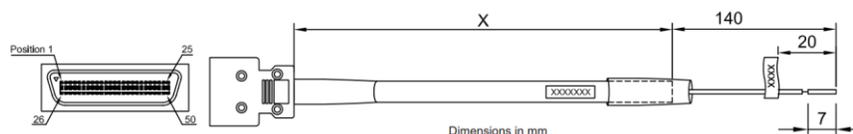


Ilustración 68. Cable puerto CN13, (Yaskawa, 2023).

Conexiones de Control

Esta sección se enfoca en la conexión de cada una de las etapas del algoritmo de control de potencia, su escalonamiento y funcionamiento en el software MotionWorks. El algoritmo que permite el movimiento solidario entre la palanca de potencia y la FCU está conformado por las siguientes etapas, véase Ilustración 69.

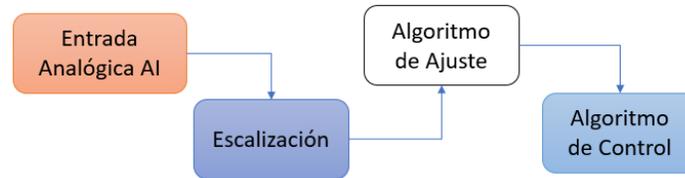


Ilustración 69. Secuencia del algoritmo de control de potencia, fuente propia.

En la sección 6, se explica más a detalle la escalación utilizada para obtener la sensibilidad de la palanca, con base a la conversión análogo-digital realizada por el controlador y en la sección 8, se explica a detalle el algoritmo de calibración automática y los diversos bloques que lo componen.

Algoritmo de Control

Una vez finalizada la etapa de adquisición de las posiciones de mínimas, máximas y reversibles por medio del algoritmo de calibración automática, inicia una secuencia de espera de 3 segundos por medio del temporizador (TON_1) como se evidencia en la Ilustración 70.

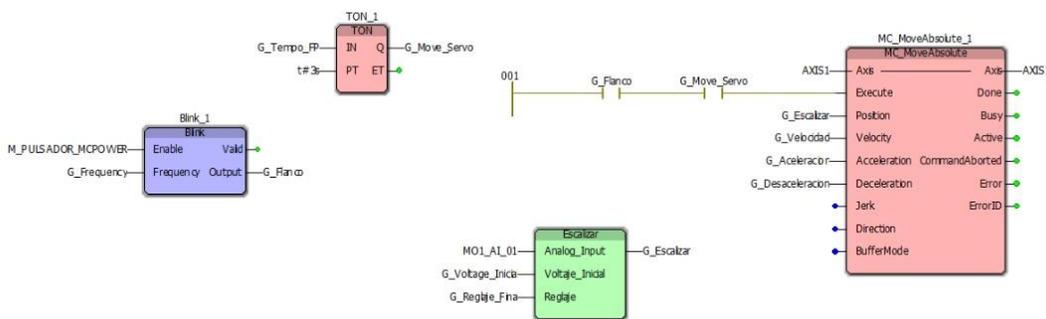


Ilustración 70. Algoritmo de Control, fuente propia.

El algoritmo de control se ejecuta por medio del bloque de control de movimiento (MC_MoveAbsolute_1), el mismo permite el movimiento del servomotor con base a la lectura de posición del encoder de manera absoluta, lo que evita que exista errores de posición por acumulaciones de la misma. La activación del bloque se realiza por medio de lenguaje Ladder y cuenta con factor adicional de seguridad para su activación, se requiere la activación de las variables (G_Flanco) y (G_Move_Servo).

(G_Flanco) es una señal booleana generada por el bloque (Blink_1), este bloque se caracteriza por generar una señal booleana continua dependiendo de una frecuencia y un flanco de subida que lo active. Como se evidencia en la Ilustración 70, el bloque (Blink_1) entra en operación cuando se activa el pulsador ubicado en la cabina de pruebas del motor PT6.

(G_Move_Servo) es una señal booleana que se ejecuta una vez finaliza el tiempo de espera programado para el temporizador (TON_1). Una vez se cumplen las condiciones de las variables (G_Flanco) y (G_Move_Servo) se activa el bloque (MC_MoveAbsolute_1), permitiendo el movimiento de la palanca de potencia en los rangos de movimiento de mínimas, máximas y reversibles.

A diferencia del algoritmo de calibración para esta etapa, se requiere que la velocidad y la aceleración del servomotor permitan un movimiento solidario con la FCU, en respuesta al movimiento generado por personal experto FAC sobre la palanca de potencia, con esto en mente se definen los parámetros del bloque (MC_MoveAbsolute_1) en la Tabla 41.

Bloque MC_MoveAbsolute					
Ítem	Entrada	Valor	Tipo	Unidades	Detalle
1	Execute	0 ó 1	Bool	N/A	Permite la activación del bloque por medio de un flanco de subida.
2	Position	Escalizar	Real	Rev	Define la posición a la que debe ir el servomotor, depende de la señal escalizada de la palanca de potencia.
3	Velocity	100	Real	rev/s	Define la velocidad de movimiento del eje del servomotor en cualquier sentido de giro.
4	Acceleration.	200	Real	rev/s^2	Define la aceleración de movimiento del eje del servomotor en cualquier sentido de giro.
5	Deceleration.	200	Real	rev/s^2	Define la desaceleración de movimiento del eje del servomotor en cualquier sentido de giro.

Tabla 41. Parámetros del bloque MC_Move_Absolute, fuente propia.

Para definir los parámetros de velocidad y torque implementados en el algoritmo de control, se utilizó un condicional conformado por tres restricciones que se deben cumplir véase Ilustración 71.

- 1) La palanca de potencia debe encontrarse en la posición inicial (mínimas), puesto que al ser definida por personal experto FAC la misma tiene un valor de cero, la variable que almacena este valor es (Pos_Move).
- 2) La variable (G_Move_Servo) debe ser verdadera, la misma cumple esta condición una vez finaliza el tiempo de espera del temporizador (TON_1).
- 3) La variable (G_Calibracion_Done) debe tener un valor de 1, esta condición se cumple únicamente cuando finaliza el algoritmo de calibración automático.

```

1  (*.....Control Palanca.....*)
2
3  IF (Pos_move = INT#0 AND G_Move_Servo = TRUE AND G_Calibracion_Done = INT#0)
4      THEN
5      G_Velocidad: = LREAL#100.0;

```

```

6   G_Aceleracion: = LREAL#200.0;
7   G_Desaceleracion: = LREAL#200.0;
8   G_Calibracion_Done: = G_Calibracion_Done + INT#1;
9   END_IF

```

Ilustración 71. Estructurado control de palanca, fuente propia.

Finalmente, se aumenta la variable (G_Calibracion_Done) con el propósito de ejecutar esta sección solo una vez y permitir el movimiento de la palanca de potencia en las pruebas de biocombustibles en el motor PT6. Es importante resaltar que se deben realizar configuraciones a diversos parámetros de fábrica del controlador MP2600iec, con el propósito de ejecutar correctamente el algoritmo de control de potencia, los mismos se presentan a continuación.

10. Parámetros del driver específicos.

- **Parámetros programables mediante software**

El controlador y el servomotor de MotionWorks pueden trabajar en una amplia gama de parámetros físicos, brindando un factor de adaptabilidad al momento de diseñar soluciones para problemas específicos.

MotionWorks cuenta con la ventana Launch Hardware Configuration que permite modificar diversos parámetros de operación del controlador y servomotor. Los cuales se pueden ajustar tanto en modo online, mientras el driver y el servomotor están operativos, como en modo offline que requiere reiniciar el controlador (Yaskawa, 2018).

En MotionWorks, los parámetros se dividen principalmente en Pn y se identifican con números y letras para diferenciarlos claramente. Cada Pn tiene un rango de valores permitidos para los elementos de salida del controlador, lo que determina el uso del servomotor y puede afectar características como el torque, la velocidad máxima, la frecuencia de vibración, los filtros de anti-resonancia, el error de posición permitido, las alarmas, los límites, etc, (Yaskawa, 2018).

Los parámetros mencionados anteriormente se presentan en la Tabla 42.

#Parámetro	Parámetro	Valor Actual	Unidad	Mínimo	Máximo	Valor Defecto	Detalle
Pn402	Límite de torque positivo	10	%Motor	0	800	800	Parámetro que permite definir el máximo torque positivo permitido.
Pn403	Límite de torque Negativo	10	%Motor	0	800	800	Parámetro que permite definir el máximo torque negativo permitido.
Pn404	Torque externo positivo / Límite de torque	10	%Motor	0	800	100	Parámetro que permite definir el torque externo máximo positivo.
Pn405	Torque externo negativo / Límite de torque	10	%Motor	0	800	100	Parámetro que permite definir el torque externo máximo negativo.
Pn50A.3	Limitador Positivo	8-Set Signal OFF				1- OFF When Terminal CN1-7 is ON	Parámetro que permite sobrepasar un margen de error de posición positivo.

Pn50B.0	Limitador Negativo	8-Set Signal OFF				1- OFF When Terminal CN1-8 is ON	Parámetro que permite sobrepasar un margen de error de posición negativo.
Pn520	Nivel de alarma de error de posición excesivo	9000000	ref unit	1	1073741823	52428880	Parámetro que permite alarmar por error de posición.

Tabla 42. Parámetros del driver MP2600iec, (Yaskawa, 2023)

- **Filtro Anti – Resonancia**

El filtro anti-resonancia en MotionWorks y SigmaWin7 cuenta con ganancias ajustables. La principal función del filtro es reducir el ruido mecánico producido por el eje, entre el elemento y el servomotor para evitar vibraciones, que afecten el proceso al cual dichos implementos están conectados (Yaskawa, 2018). En el desarrollo del proyecto es importante considerar las vibraciones generadas por el servomotor, ya que existe la limitación al desplazamiento en la conexión directa del servomotor y el eje de la FCU. De no cumplirse las condiciones requeridas pueden existir daños en el acople tipo fuelle o en los elementos que componen la FCU.

Para realizar el ajuste fino del filtro anti-resonancia con carga en el eje, se realiza una comunicación entre computador y el controlador por medio del software SigmaWin+ del fabricante Yaskawa, véase Ilustración 72.

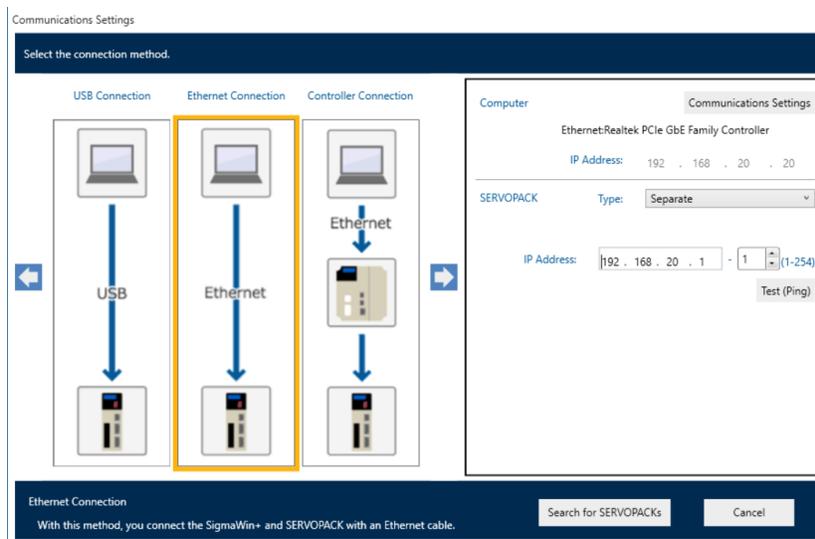


Ilustración 72. Conexión mediante cable Ethernet, (YASKAWA, 2011).

Una vez realizada la conexión, el software automáticamente detecta los elementos tipo axis conectados al driver MP2600iec, véase Ilustración 73.

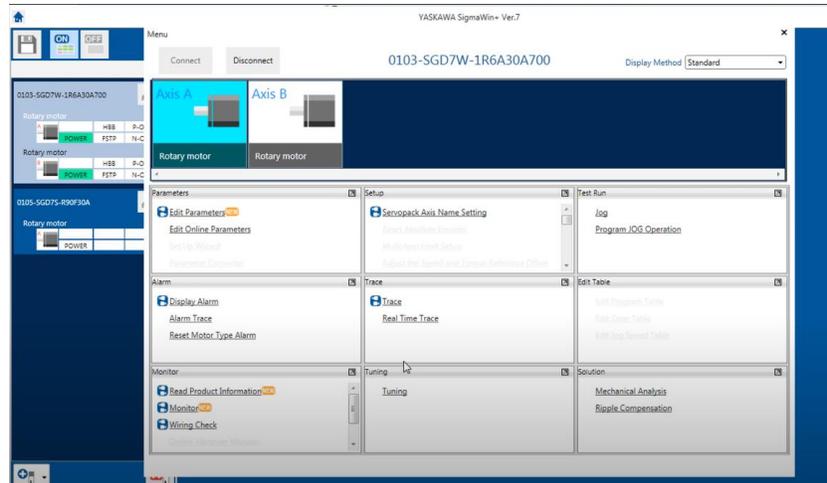


Ilustración 73. Página de inicio SigmaWin+, (YASKAWA, 2011).

En el ecosistema ofrecido por Yaskawa, cada axis o servomotor es independiente, de tal forma que se debe configurar el filtro anti resonancia para cada uno de ellos, para iniciar el proceso de sintonización se debe ejecutar la herramienta Tuning del software SigamWing+ (YASKAWA, 2011), véase Ilustración 74.

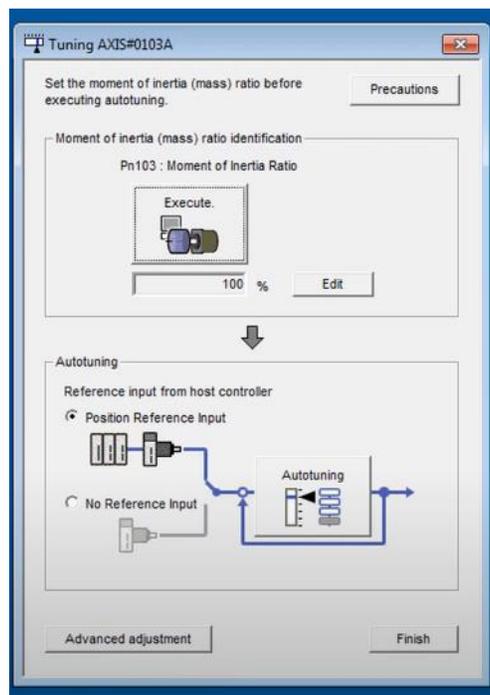


Ilustración 74. Autotuning AXIS1, (YASKAWA, 2011).

En la ventana "Execute", se puede realizar una prueba con los parámetros y condiciones iniciales, como la velocidad, aceleración y distancia, para detectar posibles ruidos y vibraciones del eje con el elemento conectado. Los valores de velocidad y aceleración deben ser elevados para que sea más evidente el ruido y la vibración, véase Ilustración 75.

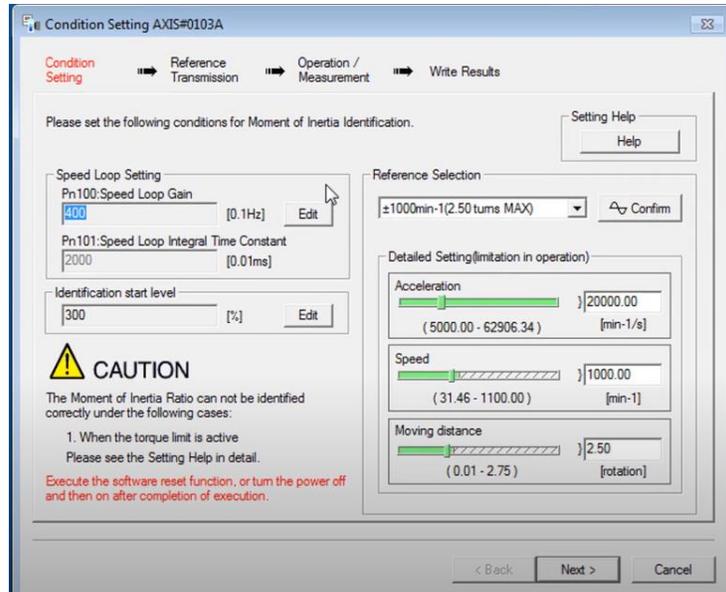


Ilustración 75. Parámetros de ganancia para el servomotor, (YASKAWA, 2011).

Una vez detectado el momento de inercia, el software SigmaWin+ realiza un análisis y se muestra un gráfico con la resonancia que se encuentra en el servomotor y en el elemento que se encuentra acoplado a él, a partir de este análisis se pueden realizar ajustes en los parámetros del filtro anti-resonancia hasta lograr un nivel de resonancia óptimo para la ejecución del proyecto, véase Ilustración 76. Es importante tener en cuenta que este proceso de ajuste debe ser repetido cada vez que se realice un cambio en el sistema para garantizar su correcto funcionamiento.

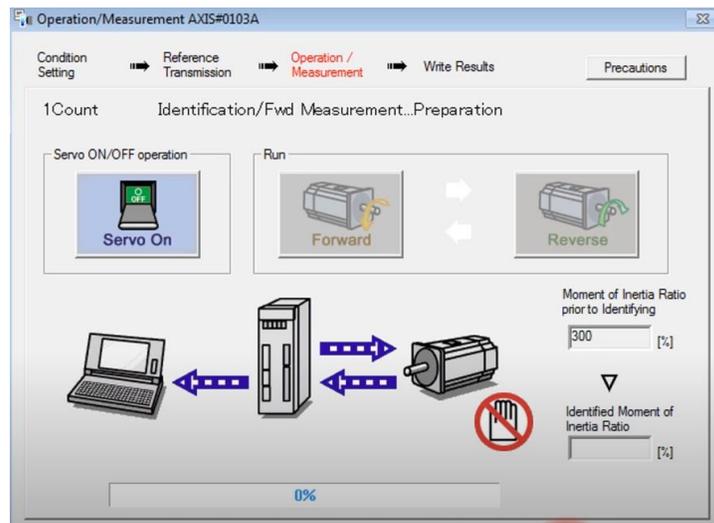


Ilustración 76. Prueba de filtro anti-resonancia, (YASKAWA, 2011)

Después de comprobar el valor de inercia, el siguiente paso es ir a la segunda ventana de autotuning, véase Ilustración 77, mencionada previamente. En esta sección, el programa utilizará el valor de inercia obtenido anteriormente, para realizar el ajuste del filtro anti-resonancia y optimizar el funcionamiento del servomotor. Este proceso es automático y

permite ajustar la frecuencia de resonancia y las ganancias del filtro para reducir la vibración y el ruido producidos por el servomotor. Finalmente, se pueden guardar los ajustes realizados para que sean usados en futuros usos del servomotor.

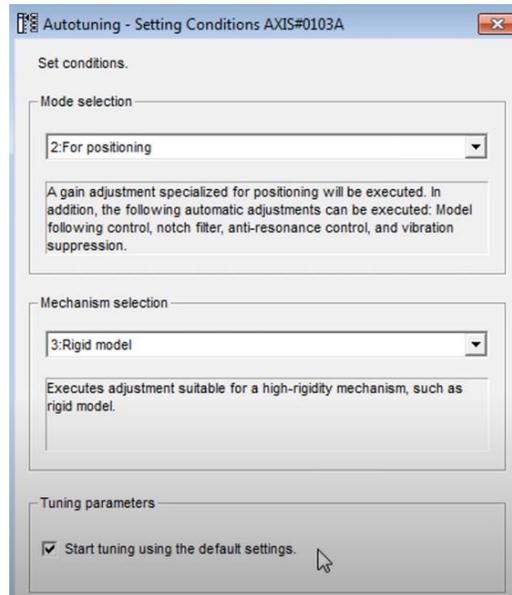


Ilustración 77. Parámetros de modificación sobre el elemento rígido, (YASKAWA, 2011).

En resumen, para ajustar el filtro anti-resonancia en un servomotor SGM7J-04A mediante el software SigmaWin+, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Establecer la comunicación entre el driver, servomotor y computador.
2. Detectar la resonancia actual del servomotor mediante el enlace de Tuning.
3. Realizar una prueba inicial de velocidad, aceleración y distancia para determinar los parámetros necesarios.
4. Detectar el momento de inercia del servomotor con giros en ambos sentidos.
5. Utilizar el último valor de inercia obtenido en la prueba para el autotuning.
6. Dar clic en la sección "Start tuning using the default settings", véase Ilustración 77, y especificar los parámetros adicionales necesarios de acuerdo al caso específico, como el control para posición y el mecanismo rígido.

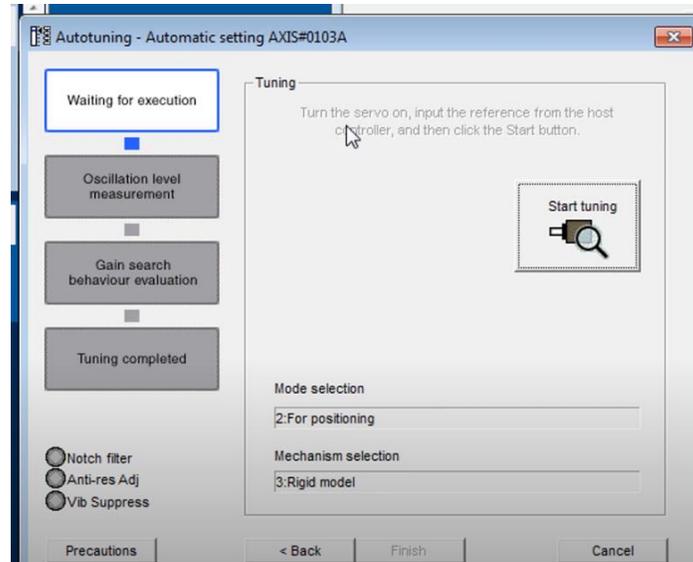


Ilustración 78. Ventana de autotuning, (YASKAWA, 2011).

Una vez seleccionado el bloque Jog, se debe ajustar los siguientes parámetros: velocidad, aceleración y distancia. Estos valores se deben ajustar para que se realice una prueba completa del servomotor y se logren detectar las resonancias presentes en el sistema, véase Ilustración 79. Además, es importante tener en cuenta que estos valores deben ser específicos para el tipo de motor que se está utilizando, por lo que es necesario conocer las características del servomotor en cuestión antes de ajustar los parámetros. Una vez ajustados estos valores, se inicia una secuencia automática de movimiento en la cual el servomotor gira en ambos sentidos para detectar la resonancia presente y lograr ajustar los filtros necesarios (YASKAWA, 2011).

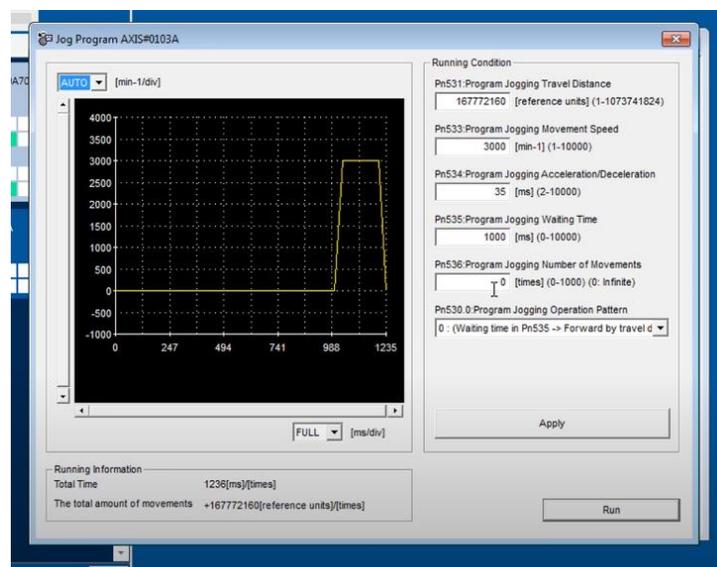


Ilustración 79. Parámetros del bloque JOG, (YASKAWA, 2011).

Una vez configurados los parámetros del autotuning, es importante realizar varias pruebas para garantizar el correcto dimensionamiento de la carga sometida en el servomotor. Es necesario encender el bloque Jog para llevar a cabo la prueba de autotuning véase Ilustración 80.

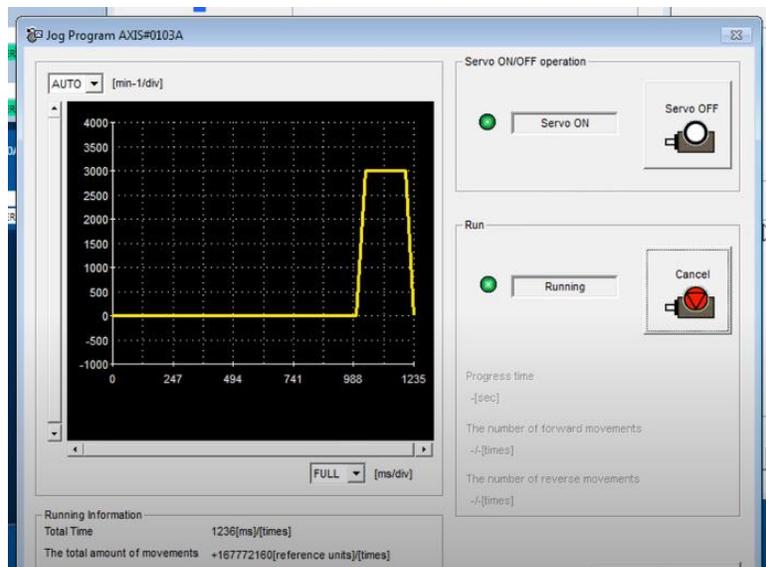


Ilustración 80. Ventana de JOG para dar inicio, (YASKAWA, 2011).

En la Ilustración 81, se puede ver el resultado de la prueba de autotuning y verificar si el controlador del servomotor es capaz de seguir la referencia y rechazar las perturbaciones. Esto se hace mediante gráficos que muestran la respuesta del sistema a las variaciones en la entrada y el resultado final en la posición del motor. Esta información es útil para determinar si los filtros ajustados durante la prueba de autotuning están funcionando correctamente con base a los requisitos de posición y velocidad definidos en el servomotor (YASKAWA, 2011).

No.	Name	Unit	Default Setting	Value
Pn100	Speed Loop Gain	0.1Hz	400	1212
Pn101	Speed Loop Integral Time Constant	0.01ms	2000	525
Pn102	Position Loop Gain	0.1/s	400	1818
Pn103	Moment of Inertia Ratio	%	100	1593
Pn109	Feedforward	%	0	100
Pn123	Friction Compensation Coefficient	%	0	85
Pn140.0	Model Following Control Selection	-	0 : Do not use mod	1 : Use model fo...
Pn141	Model Following Control Gain	0.1/s	500	6092
Pn170.0	Tuning-less Selection	-	1 : Enable tuning-le	0 : Disable tunin...

Ilustración 81. Parámetros después del autotuning, (YASKAWA, 2011).

11. Resultados

La evaluación de la versatilidad del código del programa MotionWorks se realiza a través de un gráfico en tiempo real que proporciona una visualización clara y precisa de las variables seleccionadas por el programador, véase Ilustración 82. Este gráfico permite identificar fácilmente las variables relevantes y compararlas entre sí, lo que facilita la detección de posibles errores o desviaciones.

Además, MotionWorks permite exportar los datos en formato CSV al equipo, lo que amplía las posibilidades de análisis y visualización por medio de otros programas como lo es Matlab.

11.1 Seguimiento a Referencias.

En la Ilustración 82, se puede apreciar cómo el eje del servomotor sigue el movimiento de la palanca en tiempo real, lo que garantiza una respuesta ágil y precisa a los cambios en la posición de la palanca. Esto se logra gracias a la capacidad del controlador de monitorear continuamente la posición de la palanca y acoplarla de manera sincronizada con el eje del servomotor, lo que resulta en un movimiento suave y sin interrupciones.

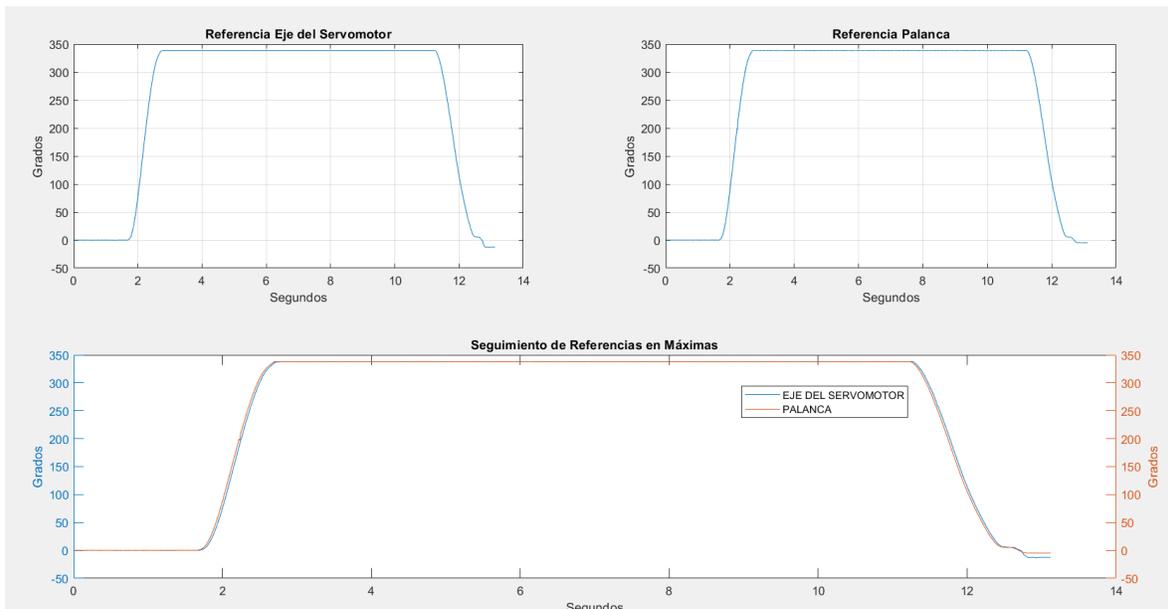


Ilustración 82. Referencia de Máximas, fuente propia.

En la Ilustración 84, es posible identificar tres momentos críticos en el seguimiento de referencias, los cuales son las posiciones mínimas, máximas y reversibles. En la posición máximas, el eje del servomotor alcanza su posición más alto, lo que indica que la posición de la palanca también ha alcanzado su punto más alto, véase Ilustración 82.

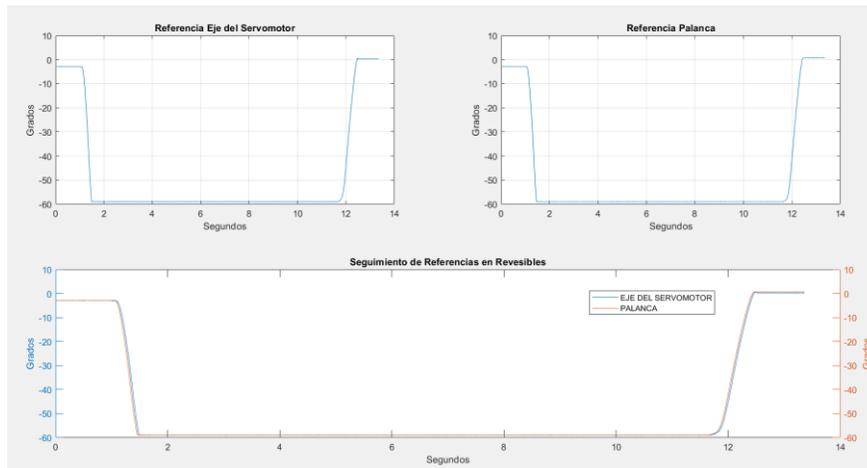


Ilustración 83. Referencia de Reversibles, fuente propia.

En las posiciones reversibles el eje del servomotor cambia en el rango de movimiento de máximas a mínimas y sigue el movimiento inverso de la palanca, una vez la palanca sobrepasa mínimas, el algoritmo de ajuste entra a la posición de reversibles, se puede identificar fácilmente gracias a los rangos de posición negativos que se visualizan en la Ilustración 83.

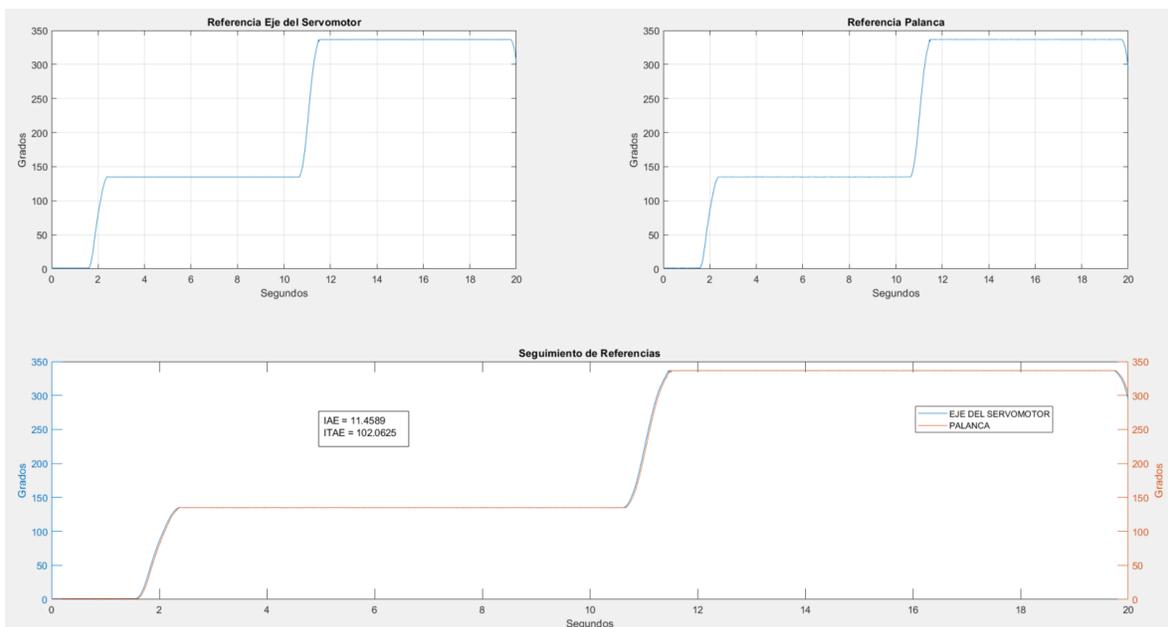


Ilustración 84. Referencias de los tres puntos críticos, fuente propia.

En la Ilustración 84, se visualiza el seguimiento a referencia en posición del servomotor y la palanca, inicialmente se evidencia la posición de mínimas 0°, seguido de un movimiento

tipo escalón que abarca aproximadamente un 30% del rango de movimiento entre mínimas y máximas, finalmente se visualiza un nuevo escalón que abarca la posición de máximas.

Como se mencionó en la sección 9.2, es necesario realizar una comparativa entre los controladores (*PI*) y (*PD*), con respecto al funcionamiento del algoritmo de control diseñado en el MP2600iec, por lo cual se realizó una comunicación entre el software Matlab y MotionWorks, a continuación, se explica detalladamente la misma.

11.2 Conexión MotionWorks - Matlab.

Para realizar la comunicación entre el MP2600iec y el software Matlab, inicialmente se realizó la configuración del *Hardware Configuration* en MotionWorks, véase Ilustración 85, con el propósito de convertir el controlador en un Maestro-Esclavo que permita enviar datos de forma bidireccional, por medio del protocolo de comunicación Modbus.

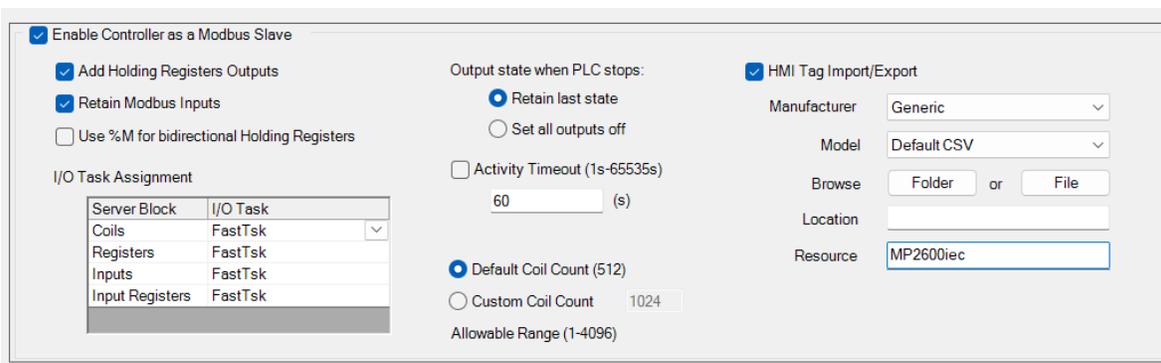


Ilustración 85. Configuración Modbus MotionWorks, fuente propia.

Una vez se configura el *Hardware Configuration*, es necesario direccionar por medio de etiquetas las diversas variables que se van a enviar a Matlab, véase Ilustración 86, por lo tanto, para la prueba de controladores se envían desde MotionWorks la posición del eje del servomotor y el voltaje suministrado por el comando de control de potencia.

[-] Modbus FC#04 Qty: 10000 Input Registers, Address Range: %QB73792 - %QB93791 (* Modify Variable Names, Not Group Name)					
Pos	INT	VAR_GL...		%QW73792	342
Palanca	INT	VAR_GL...		%QW73794	856
[-] Modbus FC#06,16 Qty: 1024 Registers, Address Range: %IB28672 - %IB30719 (* Modify Variable Names, Not Group Name. *)					
Gain	INT	VAR_GL...		%IW28672	
Error	INT	VAR_GL...		%IW28674	
[-] Modbus FC#03 Qty: 1024 Registers, Address Range: %QB24576 - %QB26623 (* Modify Variable Names, Not Group Name. *)					

Ilustración 86. Variables Modbus MotionWorks, fuente propia.

Al igual que el algoritmo de calibración, véase sección 8.3 Secciones que componen el algoritmo de calibración, la comunicación vía Modbus está compuesta por las siguientes etapas.

- **Sección de Potencia:** Funciona como sistema de enclavamiento de alimentación del servomotor, a diferencia del algoritmo de control véase sección 8.3 Secciones que componen el algoritmo de calibración, esta sección solo presenta un

enclavamiento con memoria en lenguaje Ladder y una vez activa el bloque (MC_Power_1), véase Ilustración 87, se realiza una transición a la sección de control.

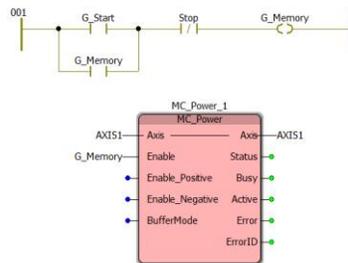


Ilustración 87. Sección de Potencia prueba de lazo abierto, fuente propia.

- Sección de Control:** Permite la ejecución del movimiento del servomotor por medio del bloque (Y_DirectControl_1), luego de un tiempo de espera de tres segundos establecidos por un temporizador, que se activa una vez finaliza la sección de potencia, véase Ilustración 88. Al mismo tiempo que finaliza el tiempo de espera se realiza un set de posición del servomotor a cero con el bloque (MC_SetPosition_1), se hace la lectura de la posición, velocidad y torque por medio de los bloques (MC_Read) y se envían a la sección de variables.

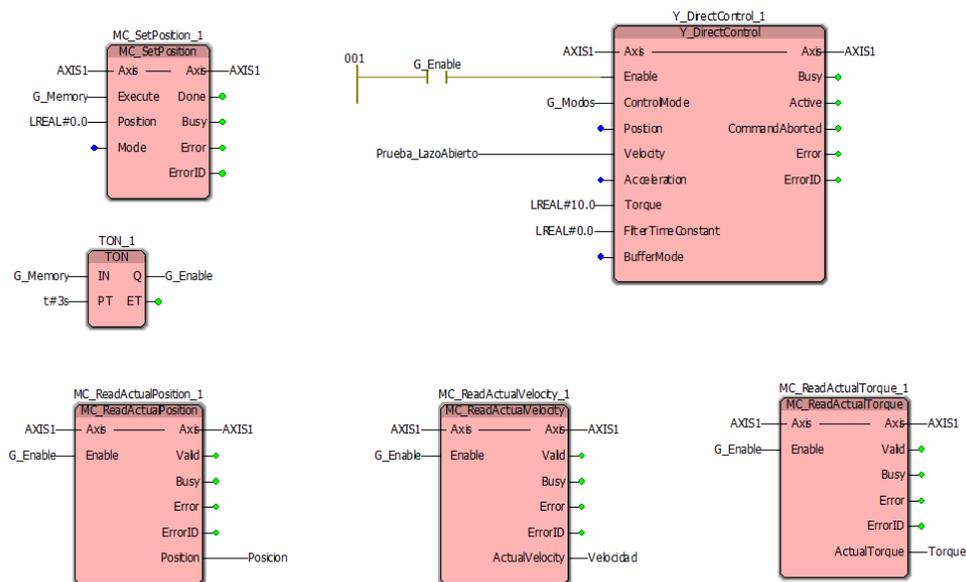


Ilustración 88. Sección de potencia prueba lazo abierto, fuente propia.

- Sección de Variables:** Esta sección está definida por lenguaje en texto estructurado y es donde se almacenan las variables de posición y voltaje para su posterior envío, de la misma manera esta sección almacena la variable de salida del controlador y la envía al bloque (Y_DirectControl_1) para cerrar el lazo de control y el envío bidireccional de datos.

Una vez enviados los valores de posición y voltaje, se procede a la recepción de los mismos en Matlab por medio de la herramienta *Modbus Explorer*, véase Ilustración 89, en su configuración de comunicación TCP/IP.

Diseño del Controlador PI

Posteriormente se diseña el controlador PI con el método de sintonización de Skogestad, de acuerdo a los siguientes pasos.

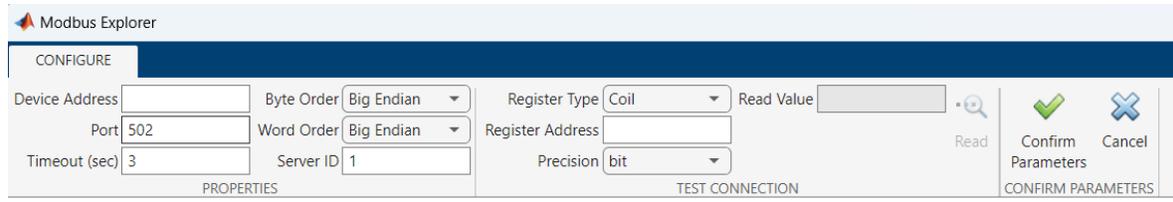


Ilustración 89. Modbus Explorer de Matlab, fuente propia.

- En el script de Matlab se crea el objeto Modbus que permite la comunicación con MotinWorks, véase Ilustración 90.

1	% Create a Modbus Object.
2	m = modbus('tcpip', '192.168.2.1');
3	m.Timeout = 3;
4	% Save the Server ID specified.
5	serverId = 1;

Ilustración 90. Creación de objeto Modbus, fuente propia.

- Se declaran como variables principales la ganancia (K_p) y el tiempo integral (T_i) obtenidos de los métodos propuestos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, de la misma manera se crean las condiciones iniciales para el error y la integral del error (i_k), véase Ilustración 91.

1	% Declaración de Variables
2	Kp = 4.5166;
3	error=0;
4	ik=0;
5	Ti = 0.6230;

Ilustración 91. Declaración de variables, fuente propia.

- Se realiza la lectura de los valores enteros de la posición de eje del servomotor y el voltaje del comando de control de potencia para calcular el error, véase Ilustración 92.

1	% Lectura Variables MotionWorks
2	data = read(m, 'inputregs', 1, 2, serverId, 'uint16');

3	data(1) %Posición Actual;
4	data(2) %Voltaje Actual;

Ilustración 92. Lectura de variables, fuente propia.

- Se calcula el integrador por medio de la ecuación (50) y se calcula la salida del controlador que se envía a MotionWorks por medio de la ecuación (47).

$$ik = \left(\frac{(T * error1) + (ik1 * Ti)}{Ti} \right) \quad (46)$$

Donde, T es el tiempo de muestreo del controlador con un valor de (8 ms), ($error1$) corresponde al error anterior de retroalimentación, ($ik1$) es la muestra anterior de K y (Ti) es el tiempo integral con un valor de (0,6230), véase Ilustración 91.

$$U = Kp * \left((error + ik) * \frac{1}{Ti} \right) \quad (47)$$

Donde (U) es la salida del controlador que se envía a Motionwoks, véase Ilustración 93, (Kp) corresponde a la ganancia estática obtenida del método de skogestad, la misma tiene un valor de (4,5166).

1	% Envío de Variables Matlab
2	write(m, 'holdingregs', 1, u, serverId, 'int16');
3	disp(sp)

Ilustración 93. Envío de variables, fuente propia.

- Una vez se obtiene la salida del controlador PI en MotionWorks, se almacena en la variable (G_Salida_Control) y se conecta al bloque (Y_DirectControl_1), véase Ilustración 94, para realizar las pruebas de tiempo de establecimiento y seguimiento a referencias.

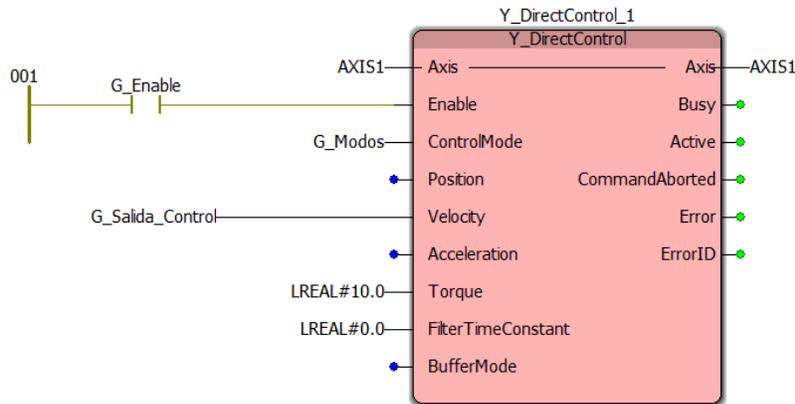


Ilustración 94. Conexión PI en MotionWorks, fuente propia.

Diseño del Controlador PD

Para el diseño del controlador (PD) propuesto por Visioli, se deben seguir los mismos pasos que definieron la creación del controlador (PI).

- Se crea el objeto Modbus, véase Ilustración 90.
- Se declaran como variables principales la ganancia (Kp) y el tiempo derivativo (Td) obtenidos de los métodos propuestos en la Tabla 2, de la misma manera se crean las condiciones iniciales para el error y la ganancia derivativa (dk), véase Ilustración 95.

1	% Declaración de Variables
2	Kp = 10.0618;
3	error=0;
4	dk=0;
5	Td = 0.0401;

Ilustración 95. Declaración de variables PD en Matlab, fuente propia.

- Se realiza la lectura de los valores enteros de la posición de eje del servomotor y el voltaje del comando de control de potencia para calcular el error, véase Ilustración 92.
- Se calcula el derivador por medio de la ecuación (48)(50) y se calcula la salida del controlador que se envía a MotionWorks por medio de la ecuación (49).

$$dk = \frac{(Td * (error - error1))}{T} \tag{48}$$

Donde, T es el tiempo de muestreo del controlador con un valor de (8 ms), ($error1$) corresponde al error anterior de retroalimentación y (Td) es el tiempo derivativo con un valor de (0,0401), véase Ilustración 95.

$$U = Kp * (error + (Td * dk)) \quad (49)$$

Donde (U) es la salida del controlador que se envía a Motionwoks, véase Ilustración 93, (Kp) corresponde a la ganancia estática obtenida del método ISTE de Visioli, la misma tiene un valor de (10,0618).

- Una vez se obtiene la salida del controlador PD en MotionWorks, se almacena en la variable ($G_Salida_Control$) y se conecta al bloque ($Y_DirectControl_1$), véase Ilustración 94, para realizar las pruebas de tiempo de establecimiento y seguimiento a referencias.

Una vez se confirma el envío y la recepción de datos de forma bidireccional en el software MotionWorks y Matlab, se realizan las pruebas de los controladores (PI) y (PD) en el servomotor Yaskawa SGM7J-04A, para realizar la comparativa de desempeño en relación al algoritmo de control programado en el MP2600iec.

11.3 Comparación de Controladores.

Los controladores previamente seleccionados en la sección 9.2, van a ser comparados con el algoritmo de control implícito en el MP2600iec bajo las siguientes pruebas.

- **Prueba de respuesta al Escalón:** En la misma se busca evaluar el desempeño de los controladores y el algoritmo de control, véase Tabla 43, con respecto a una entrada fija establecida, véase Ilustración 96, con el propósito de determinar cual de ellos posee los parámetros y factores de desempeño adecuados para cumplir con el objetivo del proyecto.

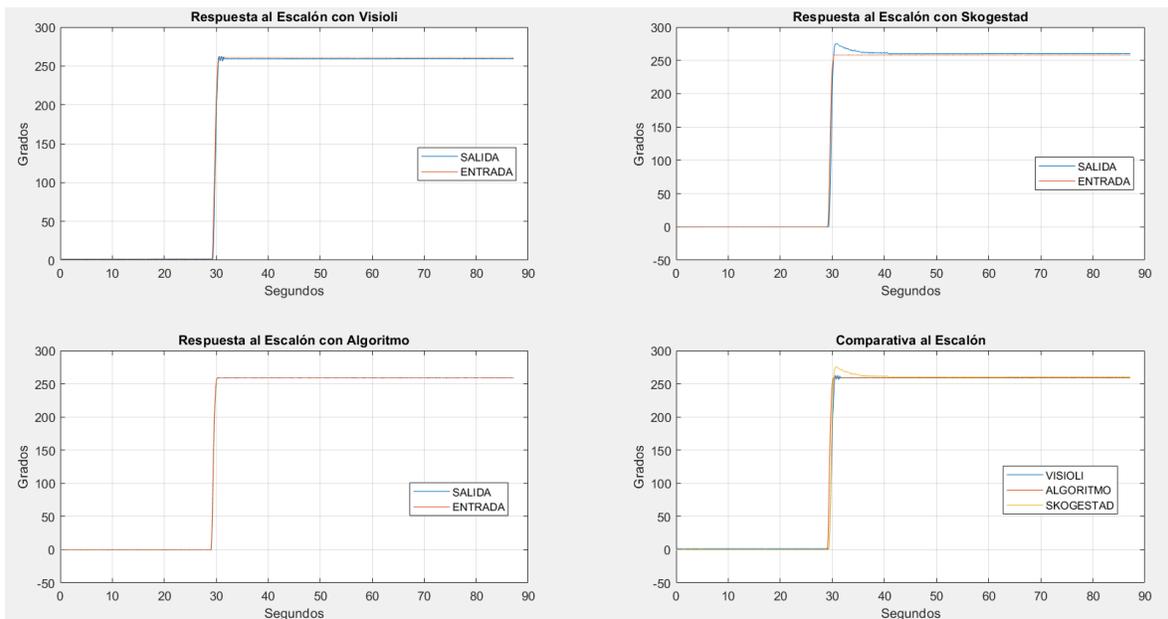


Ilustración 96. Prueba de Controladores respuesta al escalón, fuente propia.

Parámetros de Respuesta al Escalón (Prueba en el SGM7J-04A)

Controlador	Tr (seg)	Tp (seg)	Mp	Ts (seg)	IAE	ITAE
Algoritmo de Control	1,08	N/A	N/A	1,096	13,3623	534,1642
Skogestad (PI)	1,016	1,504	5,769%	5,176	206,7307	9520,7
Visioli (PD)	1,192	1,28	1,313%	1,31	124,2212	5705,6

Tabla 43. Comparativa de parámetros de respuesta al escalón, fuente propia.

- Prueba de Seguimiento a referencias:** En la misma se busca evaluar el comportamiento de los controladores, respecto a diversas entradas tipo escalón, véase Ilustración 97, con el proposito de evaluar la capacidad de los mismos en cuanto a (Tr, Tp, Mp y Ts) y la eliminación del error de estado estacionario.

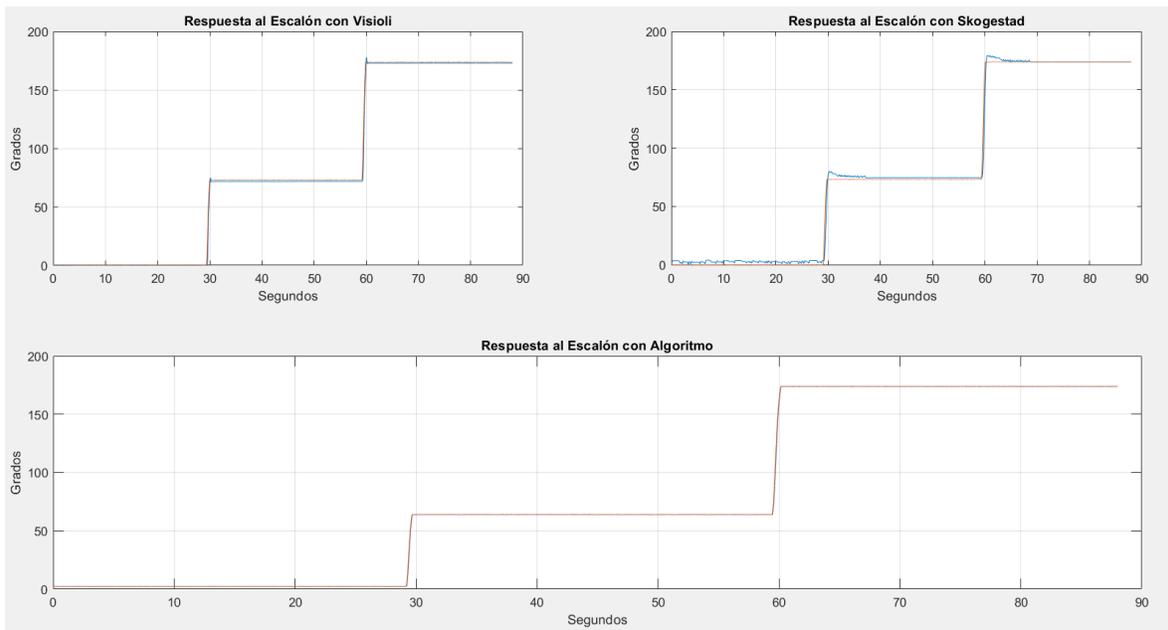


Ilustración 97. Comparativo seguimiento a referencias, fuente propia.

- Prueba de Rechazo a Perturbaciones:** Es la unica prueba que se realiza por medio de una simulación por medio de Simulink, véase Ilustración 98, puesto que en el algoritmo de control implementado en el MP2600iec, no se puede garantizar la repetibilidad en cuanto a la magnitud de la perturbación. Por lo cual esta prueba se realizó en el controlador (PI) de Skogestad y en el controlador (PD) de Visioli, véase Ilustración 99.

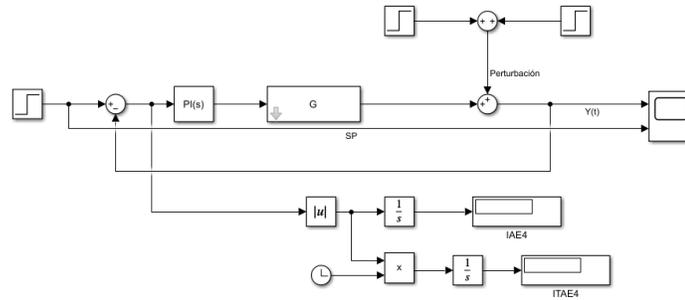


Ilustración 98. Estructura para la prueba de rechazo a perturbaciones, fuente propia.

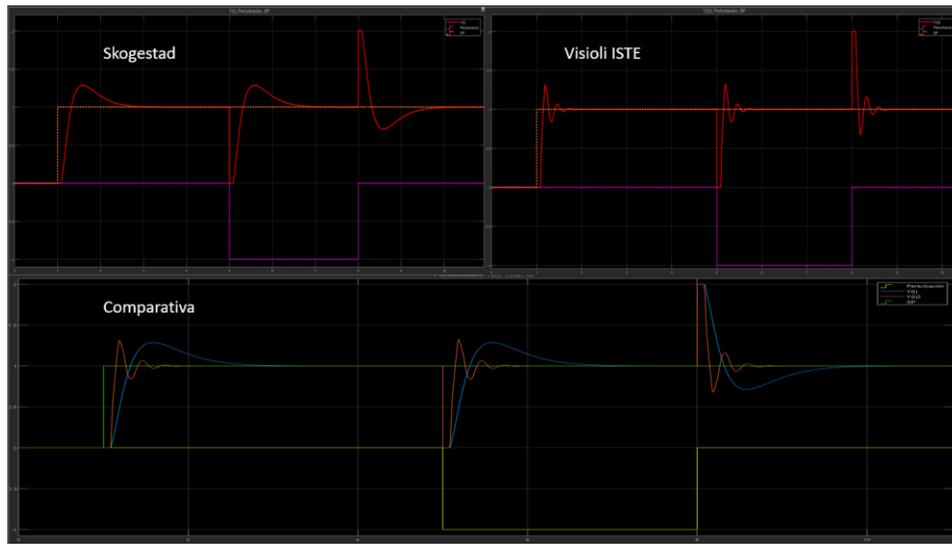


Ilustración 99. Respuesta a perturbaciones, fuente propia.

Como conclusión a las pruebas realizadas el algoritmo de control diseñado en el MP2600iec, presenta una mejor respuesta en todos los parámetros de desempeño en comparación con el controlador (PI) de Skogestad y en el controlador (PD) de Visioli, véase Tabla 43, por lo cual se evidencia que el algoritmo de control implementado cumple satisfactoriamente con los requerimientos del proyecto.

En cuanto el controlador (PI) de Skogestad y en el controlador (PD) de Visioli, se evidencia que controlan la planta, véase las ilustraciones (Ilustración 96, Ilustración 97, Ilustración 98, Ilustración 99), pero presentan falencias en cuanto a tiempo de establecimiento y sobre picos que pueden afectar al acople tipo fuelle y la FCU, como se evidencia en la Tabla 43 los parámetros de desempeño de estos controladores son muy parecidos entre sí, pero existe una amplia diferencia con los resultados obtenidos por el algoritmo de control.

12. Conclusiones

- El análisis estructural realizado en el desarrollo del proyecto, permitió definir los diferentes componentes del sistema mecánico, como lo es la tornillería con base a los cálculos de resistencias, material de fabricación, selección del acople tipo fuelle por medio de simulación de elementos finitos, criterio de Von Mises y gráfica de desplazamiento. Lo que define que el sistema mecánico cumple con los criterios de diseño establecidos en la sección 7.
- En el proyecto se puede utilizar el software recomendado por Yaskawa para programar y monitorear el servomotor. Sin embargo, es importante destacar que MotionWorks permite la programación y monitoreo de variables específicas, lo que permite programar en opciones como Ladder, estructurado, bloques, entre otras. Esto brinda una gran flexibilidad para trabajar con diferentes lenguajes de programación simultáneamente, lo que es especialmente útil en proyectos que requieren un alto grado de personalización. Por otro lado, SigmaWin7 se utiliza para realizar ajustes automáticos del controlador y del servomotor. Esta herramienta permite ajustar filtros, velocidades, torque, entre otras características, de acuerdo al entorno en el que se encuentra el equipo. De esta manera, se pueden detectar las cargas externas conectadas a la planta y desarrollar una serie de parámetros que garanticen un mejor desempeño del servomotor.
- El algoritmo de control propuesto en la sección 8 del proyecto ha sido evaluado exhaustivamente con pruebas de laboratorio y se ha comprobado que cumple satisfactoriamente con los criterios establecidos en el proyecto. Específicamente, se ha demostrado que el algoritmo permite un control de potencia eficiente en el rango de movimiento que abarca mínimas y máximas. Además, se ha evidenciado que el algoritmo proporciona una mejor respuesta en comparación con la que se obtiene actualmente en la FCU del banco de pruebas CAMAN. Otro punto importante a destacar es que el algoritmo de control también garantiza el rango de movimiento reversible en el comando de control de potencia, el cual no es funcional en el sistema tele Flex actual.
- El sistema en cascada incorporado en el controlador MP2600iec ha demostrado ser altamente efectivo, para proporcionar una respuesta al escalón y una estabilización rápida de la variable del proceso como se evidencia en la sección 11, específicamente en términos de posición. Los resultados obtenidos con este sistema en cuanto a parámetros de desempeño, son superiores en comparación con los obtenidos por medio del controlador (*PI*) de Skogestad y en el controlador (*PD*) de Visioli, véase Tabla 43, diseñado en Matlab por conexión Modbus. No obstante, es importante destacar que, durante las pruebas realizadas en laboratorio, los controladores (*PI*) y (*PD*) han cumplido con el propósito de controlar la variable del proceso, presentando un mayor tiempo de establecimiento y sobre impulsos.

- Con la obtención del modelo aproximado de la planta, es posible realizar a futuro diversas comparativas de eficiencia del servomotor, por medio de controladores como lo pueden ser P, PD, PI o PID en diferentes estructuras y diversos métodos de sintonización, de la misma manera se puede realizar comparativas con otras metodologías de control como lo puede ser el diseño de controladores por lógica difusa (Fuzzy).

13. Referencias

- Aidan O, & Dwyer. (2009). *PI AND PID CONTROLLER TUNING RULES* (3rd Edition).
- Aström, K. J., & Hägglung, T. (2009). *Control PID avanzado*.
- Beer, F. P., Johnston, E. R. (Elwood R., DeWolf, J. T., Mazurek, D. F., & Dorador, J. M. (2017). *Mecánica de materiales* (7th ed.).
- Cárdenas, A., & Jiménez, I. (2018). *Diseño e implementación de un sistema didáctico para el desarrollo de prácticas sobre control avanzado de procesos industriales*. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/15362>
- Cordero, G., Dzul, A., Santibáñez, V., & Ollervides, E. J. (2014). Sintonización de un controlador PID-PID encascada aplicado a un giroscopio de 2 g.d.l. *Memorias Del XVI Congreso Latinoamericanode Control Automático*. <https://amca.mx/memorias/amca2014/articulos/0168.pdf>
- España. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo., EA-95., & NBE-EA-95. (2003). *NBE-EA-95 : estructuras de acero en edificación*. <https://www.casadellibro.com.co/libro-nbe-ea-95-estructuras-de-acero-en-edificacion-real-decreto-1829-1995/9788493283476/945462>
- Frias, E. (2004). *Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Geremiaredutores. (2023). *SELECCIÓN DEL REDUCTOR*. www.geremiaredutores.com.br
- Guardiola, A. (2012). *Diseño y cálculo de uniones con tornillos no pretensados*.

- Mazzone, V., & Centrifugo De Watt, R. (2002). *Estructuras Prácticas de Control SISO*. <http://iaci.unq.edu.ar/caut1>
- Mecanocaucho. (2023). *SOPORTES CILÍNDRICOS MACHO | AMC*. <https://www.mecanocaucho.com/es/productos/soporte-antivibratorio/soportes-cil%C3%ADndricos-macho/#descargas>
- Mora, M. C. (2022, July 29). *Criterio de von Mises*. http://www.mecapedia.uji.es/pages/criterio_de_von_Mises.html
- Morris, S. L., Bossert, D. E., & Hallgren, W. F. (2003). *Introduction to Aircraft Flight Mechanics: Performance, Static Stability, Dynamic Stability, and Classical Feedback Control*.
- Ogata, K. (1998). *INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA* (Tercera edición).
- Peacock, F. (2017). *The PID Tuning Blueprint*. The ONE Thing That Separates the Men from the PID Tuning Boys. <https://www.pidtuning.net/article1-PID-Types.php>
- Pratt & Whitney. (1999). *PT6A-40 TRAINING COURSE*. <http://www.pwc.ca>
- Pratt & Whitney. (2023). *KEY NEW OWNER WISDOM YOUR PT&A TURBOPROP*.
- Quiroga, C. G., & Barrios, J. F. (2020). *DISEÑO DE UN CONTROLADOR DE COMANDOS TELEFLEX PARA EL BANCO DE PRUEBAS DE UN MOTOR PT6 OPERADO CON BIOCOMBUSTIBLES*. Universidad ECCI.
- R+W. (2023). *MK2 : R+W Kupplungen*. <https://www.rw-acoplamientos.lat/productos/acoples-de-precision/acoples-de-fuelle-miniatura/mk2/>
- Rodriguez, H. (2017). *UNIONES ATORNILLADAS SEGÚN EC3*. www.aratec-ingenieria.com
- Rodríguez, H. (2023). *Cálculo de Uniones Atornilladas*. <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn32.html>
- SEW. (2009). *Synchronous Servomotors CMP40/50/63/71/80/100*. <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/11659416.pdf>
- SEW. (2010). *MOVIDRIVE® MDX60B / 61B*. <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/16837703.pdf>
- SIEMENS. (2016). *SINAMICS V90, SIMOTICS S-1FL6*. <https://support.industry.siemens.com/cs/ww/en/ps>
- SIEMENS. (2023). *Data sheet for SINAMICS V90*. <https://docs.rs-online.com/1e1f/A700000007588202.pdf>

- Sierra, E. A. (2011). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS DE INYECTORES DE TURBINAS, EN EL COMANDO AÉREO DE MANTENIMIENTO DE LA FUERZA AÉREA COLOMBIANA*. Universidad Pontificia Javeriana.
- SolidWorks. (2022). *Conceptos básicos del análisis*.
https://help.solidworks.com/2022/spanish/SolidWorks/cworks/c_Basic_Concepts_of_Analysis.htm?verRedirect=1
- UNITED TURBINE. (2023a). *CURSO DESCRIPTIVO Y GUÍA DE CAZA FALLAS*.
- UNITED TURBINE. (2023b). *PT6 DESCRIPTIVE COURSE AND GUIDE TO TROUBLESHOOTING T*.
- Vallbona, E. (2011). *EL MOTOR DE TURBINA*.
- Valvias. (2013). *Dimensiones Rosca Métrica*. <https://www.valvias.com/prontuario-rosca-metrica-din-13.php?m=17>
- Villareal, D. C. (2009). *Digital Fuel Control for a Lean Premixed Hydrogen-Fueled Gas Turbine Engine*. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Visioli, A. (2001). Optimal tuning of PID controllers for integral and unstable processes. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 148(2), 180–184.
<https://doi.org/10.1049/ip-cta:20010197>
- Yaskawa. (2018). *Sigma-7 & SigmaWin+ Ver.7 Servo Tuning*. www.yaskawa.com
- Yaskawa. (2020). *Σ-7-Series AC Servo Drive Rotary Servomotor*.
https://www.yaskawa.com/downloads?p_p_id=yasdocumentdownload_WAR_yasdocumentdownloadportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_yasdocumentdownload_WAR_yasdocumentdownloadportlet_jspPage=%2Fhtml%2Fview.jsp&_yasdocumentdownload_WAR_yasdocumentdownloadportlet_tabSelected=tab1
- Yaskawa. (2022). *Toolbox Help Documentation*.
https://www.yaskawa.com/downloads?p_p_id=yasdocumentdownload_WAR_yasdocumentdownloadportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_yasdocumentdownload_WAR_yasdocumentdownloadportlet_jspPage=%2Fhtml%2Fview.jsp&_yasdocumentdownload_WAR_yasdocumentdownloadportlet_tabSelected=tab1
- Yaskawa. (2023). *MP2600iec Hardware Manual*.
https://www.yaskawa.com/downloads?p_p_id=yasdocumentdownload_WAR_yasdocumentdownloadportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_yasdocumentdownload_WAR_yasdocumentdownloadportlet_jspPage=%2Fhtml%2Fview.jsp&_yasdocumentdownload_WAR_yasdocumentdownloadportlet_tabSelected=tab1

1&p_p_col_count=1&_yasdocumentdownload_WAR_yasdocumentdownloadport
let_jspPage=%2Fhtml%2Fview.jsp&_yasdocumentdownload_WAR_yasdocume
ntdownloadportlet_tabSelected=tab1

YASKAWA, A. (2011, September 29). *Training: MP2600iec Quickstart*.
https://www.youtube.com/playlist?list=PLNAENlyEDCky37ya5T_Qf6Hhr_IQVZECe

14. Anexos

A. Bloques MotionWorks

En el desarrollo del algoritmo de calibración automática y el reglaje del comando de control de potencia, se utilizaron diversos bloques definidos por YASKAWA y en esta sección se explicarán las características de los mismos y como fueron utilizados en el proyecto. Es importante recordar que las características de los bloques fueron obtenidas de los manuales proporcionados por el proveedor (Yaskawa, 2022) y el asistente de ayuda del software MotionsWorks.

- **Bloque MC_Power:** Este bloque permite energizar los diversos AXIS (ejes) que se conectan al controlador MP2600iec, se utilizó principalmente para alimentar el servomotor SGM7J-04A, además de crear condicionales de activación por medio de su composición booleana.

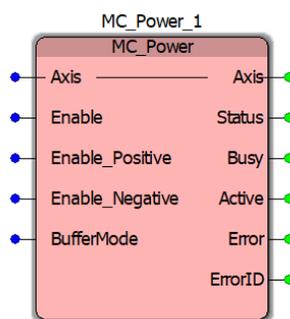


Ilustración 100. Bloque MC_Power, (Yaskawa, 2022)

Bloque MC_Power					
Ítem	Entrada	Valor	Tipo	Unidades	Detalle
1	Axis	N/A	Axis Ref	N/A	Eje logico de referencia, selecciona el servomotor que se controla.
2	Enable	0 ó 1	Booleano	N/A	Permite energizar el servomotor, envía una señal de escaneo constante siempre y cuando el flanco se mantenga en alto y no existan fallas.
3	Status	0 ó 1	Booleano	N/A	Establece el estado actual del axis, TRUE: habilitado, FALSE: Deshabilitado
4	Busy	0 ó 1	Booleano	N/A	Indica con un flanco en alto cuando el bloque se encuentra habilitado.

Tabla 44. Características del MC_Power, (Yaskawa, 2022)

- **Bloque MC_SetPosition:** La función principal es definir una posición fija al eje del servomotor, fue utilizado para establecer la posición cero del sistema por medio de un condicional, de tal manera que cuando se energice el bloque MC_Power se activa el bloque MC_SetPosition.

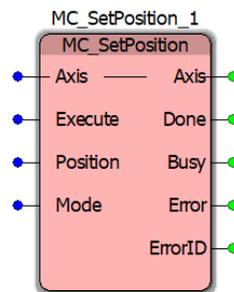


Ilustración 101. Bloque MC_SetPosition, (Yaskawa, 2022)

Bloque MC_SetPosition					
Ítem	Entrada	Valor	Tipo	Unidades	Detalle
1	Axis	N/A	Axis Ref	N/A	Eje lógico de referencia, selecciona el servomotor que se controla.
2	Execute	0 ó 1	Booleano	N/A	Activa el bloque y ejecuta el movimiento de posición por medio de un flanco de subida.
3	Position	0.0	Real	rev	Cualquier valor positivo o negativo dentro del sistema de coordenadas del usuario.
4	Done	0 ó 1	Booleano	N/A	Envía un flanco de subida una vez se ha ejecutado el movimiento en el servomotor.
5	Busy	0 ó 1	Booleano	N/A	Indica con un flanco en alto cuando el bloque se encuentra habilitado.

Tabla 45. Característica bloque MC_SetPosition, (Yaskawa, 2022)

- **Bloque TON:** Este bloque funciona como temporizador, fue implementado principalmente para otorgar un tiempo de espera, en la ejecución de las diversas etapas del algoritmo de calibración y de reglaje.

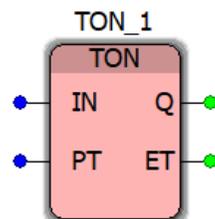


Ilustración 102. Bloque TON, (Yaskawa, 2022)

Bloque TON					
Ítem	Entrada	Valor	Tipo	Unidades	Detalle
1	IN	0 ó 1	Booleano	N/A	Cuando detecta un flanco de subida, inicia el tiempo definido en el temporizador.
2	PT	3	TIME	seg	Determina el intervalo de tiempo del delay.
3	Q	0 ó 1	Booleano	N/A	Es Verdadero si IN = TRUE y ET >= TP. Es Falso si IN = FALSE o ET < PT.
4	ET	0	TIME	seg	Intervalo de tiempo transcurrido.

Tabla 46. Características del Bloque TON, (Yaskawa, 2022)

- **Bloque MC_ReadActualPosition:** Como su nombre lo indica este bloque tiene la función de leer la posición actual del eje del servomotor en tiempo real, este dato es

fundamental a la hora de establecer las rutinas de máximas, mínimas, reversibles y la calibración automática.

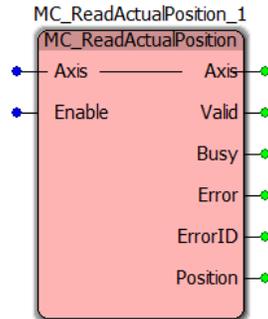


Ilustración 103. Bloque MC_ReadActualPosition, (Yaskawa, 2022).

Bloque MC_ReadActualPosition					
Ítem	Entrada	Valor	Tipo	Unidades	Detalle
1	Axis	Axis1	Axis Ref	N/A	Eje logico de referencia, selecciona el servomotor que se controla.
2	Enable	0 ó 1	Booleano	N/A	Permite activar el bloque, envía una señal de escaneo constante siempre y cuando el flanco se mantenga en alto y no existan fallas.
3	Error	0 ó 1	Booleano	N/A	Envía un flanco de subida si existe un error durante la ejecución en la función del bloque, una vez eliminada la falla se hace un reset de enable.
4	ErrorID	N/A	UINT	N/A	Corresponde a la lista de errores, una vez Error es TRUE, se genera un código correspondiente a la falla presentada.
5	Position	N/A	LREAL	rev	Indicador del valor de posición en el cual se encuentra el eje del servomotor.

Tabla 47. Características del bloque MC_ReadActualPosition, (Yaskawa, 2022).

- Bloque MC_ReadActualTorque:** Como su nombre lo indica este bloque tiene la función de leer el porcentaje de torque actual del eje del servomotor en tiempo real, este dato es fundamental a la hora de establecer las rutinas de máximas, mínimas, reversibles y la calibración automática, además que es un factor delimitante al momento de restringir el torque suministrado por el servomotor.

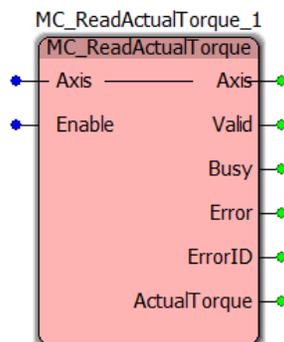


Ilustración 104. Bloque MC_ReadActualTorque, (Yaskawa, 2022)

Bloque MC_ReadActualTorque					
Ítem	Entrada	Valor	Tipo	Unidades	Detalle

1	Axis	Axis1	Axis Ref	N/A	Eje logico de referencia, selecciona el servomotor que se controla.
2	Enable	0 ó 1	Booleano	N/A	Permite activar el bloque, envía una señal de escaneo constante siempre y cuando el flanco se mantenga en alto y no existan fallas.
3	Error	0 ó 1	Booleano	N/A	Envía un flanco de subida si existe un error durante la ejecución en la función del bloque, una vez eliminada la falla se hace un reset de enable.
4	ErrorID	N/A	UINT	N/A	Corresponde a la lista de errores, una vez Error es TRUE, se genera un código correspondiente a la falla presentada.
5	ActualTorque	N/A	LREAL	%	Indicador del porcentaje de torque que está suministrando el servomotor del torque nominal.

Tabla 48. Características del bloque MC_ReadActualTorque, (Yaskawa, 2022).

- **Bloque MC_ReadActualVelocity:** Como su nombre lo indica este bloque tiene la función de leer la velocidad actual de movimiento del eje en tiempo real, este dato es fundamental a la hora de establecer las rutinas de máximas, mínimas, reversibles y la calibración automática, además que es un factor importante al momento de evaluar el desempeño del reglaje en la palanca de control de potencia.

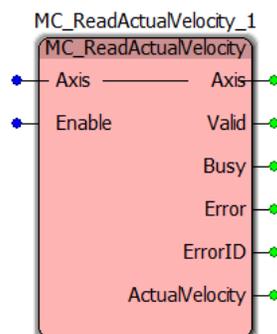


Ilustración 105. Bloque MC_ReadActualVelocity, (Yaskawa, 2022).

Bloque MC_ReadActualVelocity					
Ítem	Entrada	Valor	Tipo	Unidades	Detalle
1	Axis	Axis1	Axis Ref	N/A	Eje logico de referencia, selecciona el servomotor que se controla.
2	Enable	0 ó 1	Booleano	N/A	Permite activar el bloque, envía una señal de escaneo constante siempre y cuando el flanco se mantenga en alto y no existan fallas.
3	Error	0 ó 1	Booleano	N/A	Envía un flanco de subida si existe un error durante la ejecución en la función del bloque, una vez eliminada la falla se hace un reset de enable.
4	ErrorID	N/A	UINT	N/A	Corresponde a la lista de errores, una vez Error es TRUE, se genera un código correspondiente a la falla presentada.
5	ActualVelocity	N/A	LREAL	rev/s	Indica la velocidad a la que está girando el eje del servomotor.

Tabla 49. Características Bloque MC_ReadActualVelocity (Yaskawa, 2022).

- **Bloque CTU:** Este bloque funciona como contador, se utiliza principalmente para generar un condicional de entrada a la sección de reversibles en el algoritmo de reglaje, el mismo está conectado a la salida de la terminal *Busy* del bloque JOG.

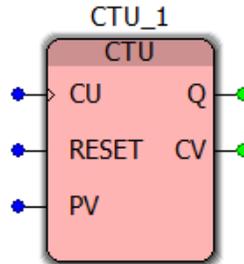


Ilustración 106. Bloque CTU, (Yaskawa, 2022).

Bloque CTU					
Ítem	Entrada	Valor	Tipo	Unidades	Detalle
1	CU	0 ó 1	Axis Ref	N/A	Si detecta un flanco de subida CV incrementa su valor en 1.
2	RESET	0 ó 1	Booleano	N/A	Si es TRUE, el contador es inicializado en cero. Si es FALSE el conteo es habilitado.
3	PV	2	INT	N/A	Valor prestablecido al que se desea que llegue el conteo.
4	Q	0 ó 1	UINT	N/A	Es una salida que envía un flanco de subida, si se cumple el condicional TRUE si CV = PV.
5	CV	Z	INT	N/A	Corresponde al resultado del contador.

Tabla 50. Características del bloque CTU

- **Bloque Escalizar:** MotionWorks permite la creación de bloques, dependiendo de las necesidades que se presenten al momento del desarrollo de un proyecto. Tomado lo anterior como primicia, se diseñó un bloque que permita realizar la escalización de la señal que se envía al comando de control de potencia.

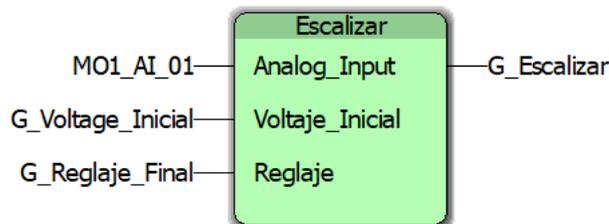


Ilustración 107. Bloque Escalizar, fuente propia.

El bloque está conformado por la relación que existe entre la entrada analógica (*MO1_AI_01*), se encarga de leer el voltaje suministrado del comando de control de potencia por medio del driver, el voltaje inicial (*G_Voltaje_Inicial*) que corresponde a una variable que almacena el valor de la entrada analógica, cuando se ubica la

palanca de control de potencia en la posición de mínimas, al momento de iniciar la etapa de calibración automática.

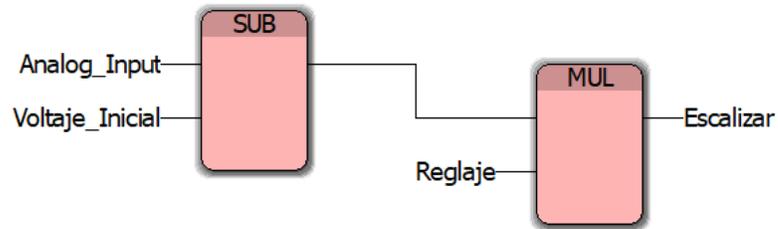


Ilustración 108. Componentes del bloque Escalizar, fuente propia.

La variable de entrada reglaje ($G_{Reglaje_Final}$), funciona mediante la relación dada entre la posición y el voltaje, véase ecuación (50), es importante tener en cuenta que el reglaje es diferente entre las posiciones de mínimas, máximas y reversibles. El reglaje final a utilizar se determina por medio de un condicional que evalúa si la palanca de control de potencia se encuentra en el espectro de posición de mínimas y máximas o en el espectro de posición de reversibles.

$$G_{Reglaje_Final} = \frac{\Delta Posición}{\Delta Voltaje} \tag{50}$$

Finalmente, la salida ($G_{Escalizar}$) determina la posición que debe tener el eje del servomotor en la etapa de reglaje del proyecto.

- **Bloque Blink:** Este bloque permite tener a la salida una señal en frecuencia definida en la entrada, este bloque nos permite generar flancos con una relación de 1Hz a 500 ms, véase ecuación. Este bloque se utiliza como reset del bloque MC_MoveAbsolute lo que permite el cambio de posición del eje del servomotor en la etapa de reglaje ya sea en el rango de mínimas a máximas o en el rango de reversibles.



Ilustración 109. Bloque Blink, (Yaskawa, 2022).

Bloque Blink					
Ítem	Entrada	Valor	Tipo	Unidades	Detalle
1	Enable	0 ó 1	Booleano	N/A	Permite activar el bloque, envía una señal de escaneo constante siempre y cuando el

					flanco se mantenga en alto y no existan fallas.
2	Frequency	10000	REAL	N/A	El valor suministrado equivale a la tasa de ciclo del bloque en Hz.
3	Valid	0 ó 1	Booleano	N/A	Indicador que define si el bloque está habilitado o no.
4	Output	0 ó 1	Booleano	N/A	Señal cuadrada definida a la frecuencia especificada en relación a la función del bloque.

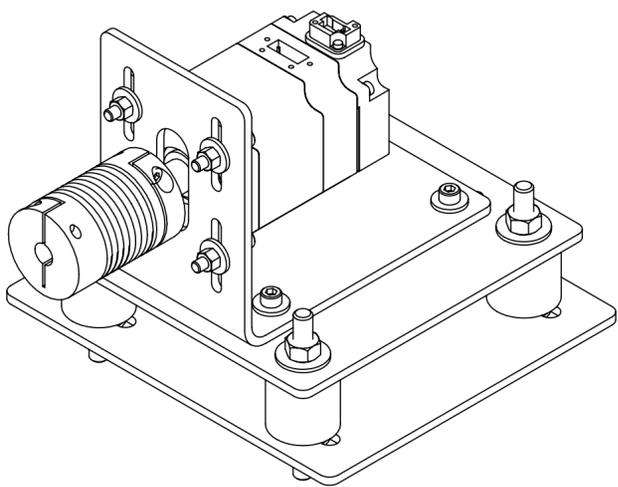
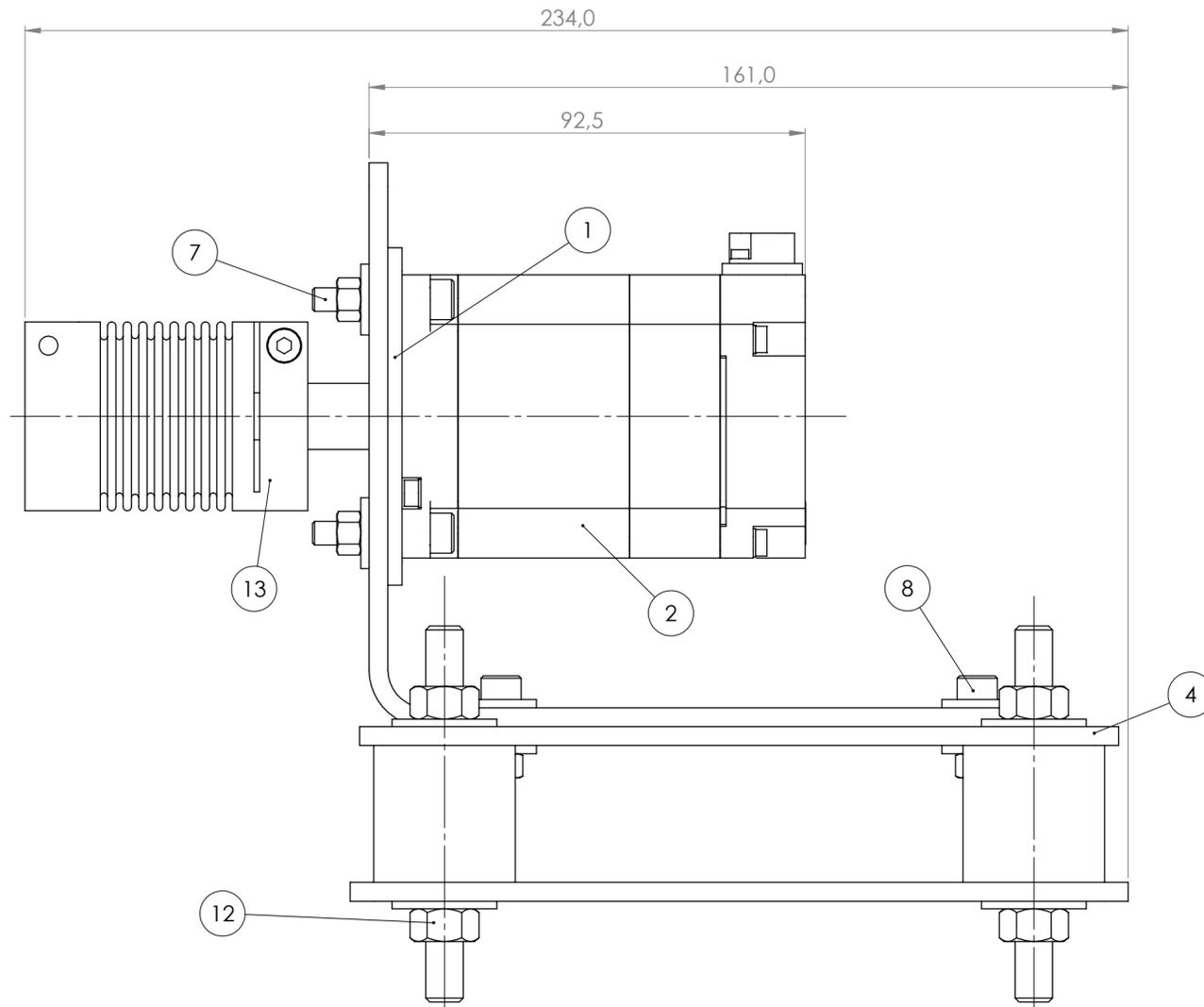
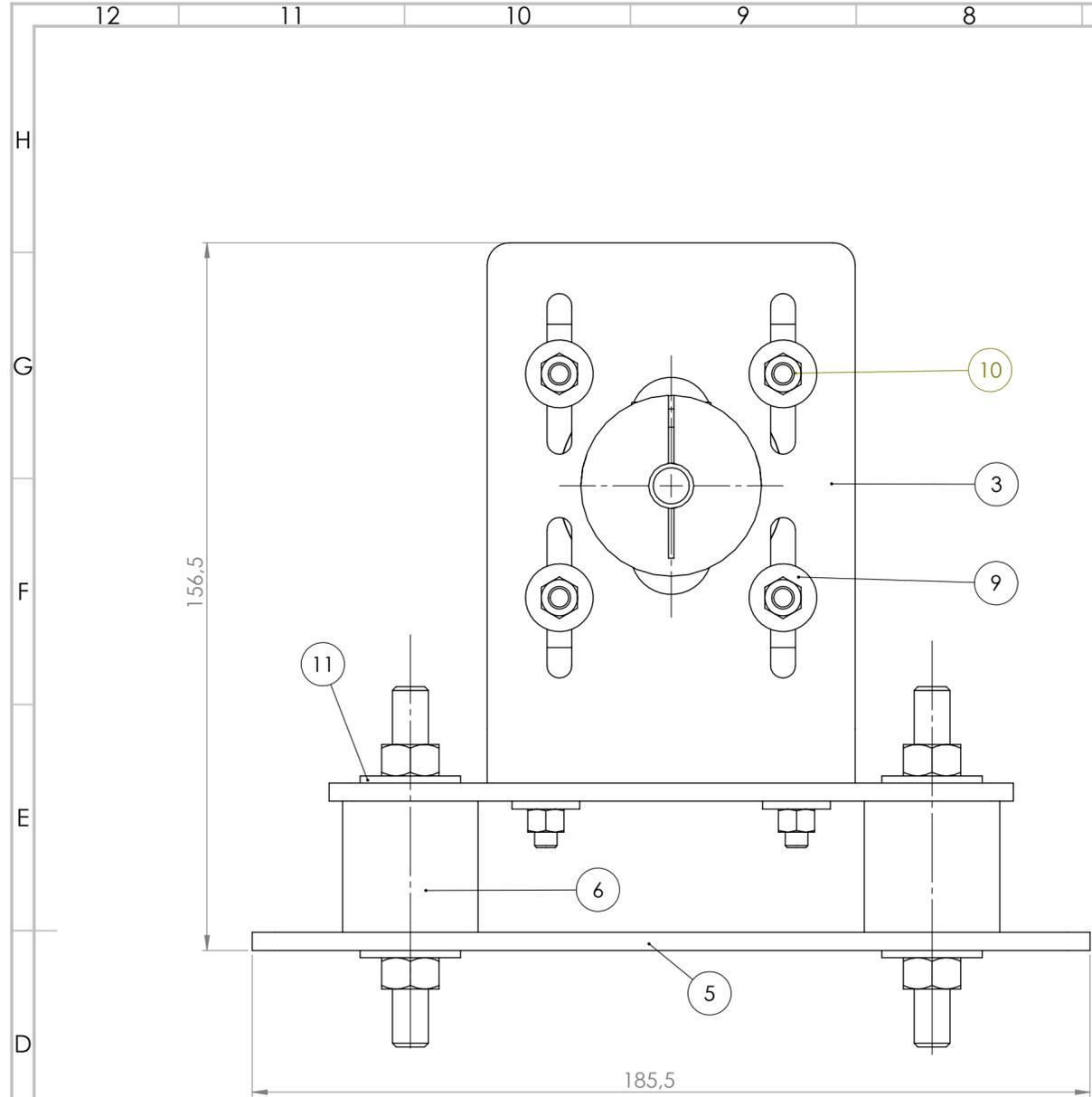
Tabla 51. Características del bloque Blink, (Yaskawa, 2022).

B. Código del Algoritmo de Control

Los diferentes archivos que componen el desarrollo y programación del algoritmo de calibración y reglaje se encuentran en el repositorio de la plataforma GitHub, el acceso a los mismos se realiza por medio del siguiente link.

- https://github.com/andresfepinosas/Algoritmo_FAC

C. Planos del Sistema Mecánico



13	Acople Flexible	1	Control de Movimiento R+W MK2-100	No aplica	15/16
12	Tuerca de ajuste Antivibratorios	8	Mundial de Tornillos 2390003	No Aplica	14/16
11	Arandela del sistema Antivibratorio	8	Mundial de Tornillos 460008	Hierro Galvanizado	13/16
10	Tuerca de ajuste servomotor	8	Mundial de Tornillos 2380006	No aplica	12/16
9	Arandela de acoplamiento mecánico	12	Mundial de Tornillos 430003	Hierro Irizado	11/16
8	Tornillo de ajuste pieza media	4	Mundial de Tornillos 820040	Acero clase 8.8	10/16
7	Tornillo de ajuste del servo	4	Mundial de Tornillos 820041	Acero clase 8.8	9/16
6	Sistema Antivibratorio	4	Mundial de Cauchos SIN 003	No aplica	8/16
5	Base del acople mecánico	1	No Aplica	Acero A36	7/16
4	Pieza Media del Acople Mecánico	1	No Aplica	Acero A36	6/16
3	Base del Servomotor	1	No Aplica	Acero A36	4-5/16
2	Servomotor Yaskawa	1	Control de Movimiento SGM7J-04A	No Aplica	3/16
1	Conexión directa al Servomotor	1	No Aplica	Acero A36	2/16
N°	Nombre de la Pieza	Cantidad	Referencia	Material	N° Plano
UNIVERSIDAD ECCI			FECHA: 2023-03-08	PROYECTO: PT6 FAC CMCP	
Ingeniería Mecatrónica			MATERIAL: NO APLICA	RECUBRIMIENTO: NO APLICA	
ESCALA: 1:1	TÍTULO: Plano general Acople Mecánico	CATALOGO Y REFERENCIA: NO APLICA		TOLERANCIA: NO APLICA	A2
DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA DAVID CAMILO BULLA AVILA		DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA DAVID CAMILO BULLA AVILA		REVISÓ: DAVID PEREZ	PLANO: 1/16

4

3

2

1

F

F

E

E

D

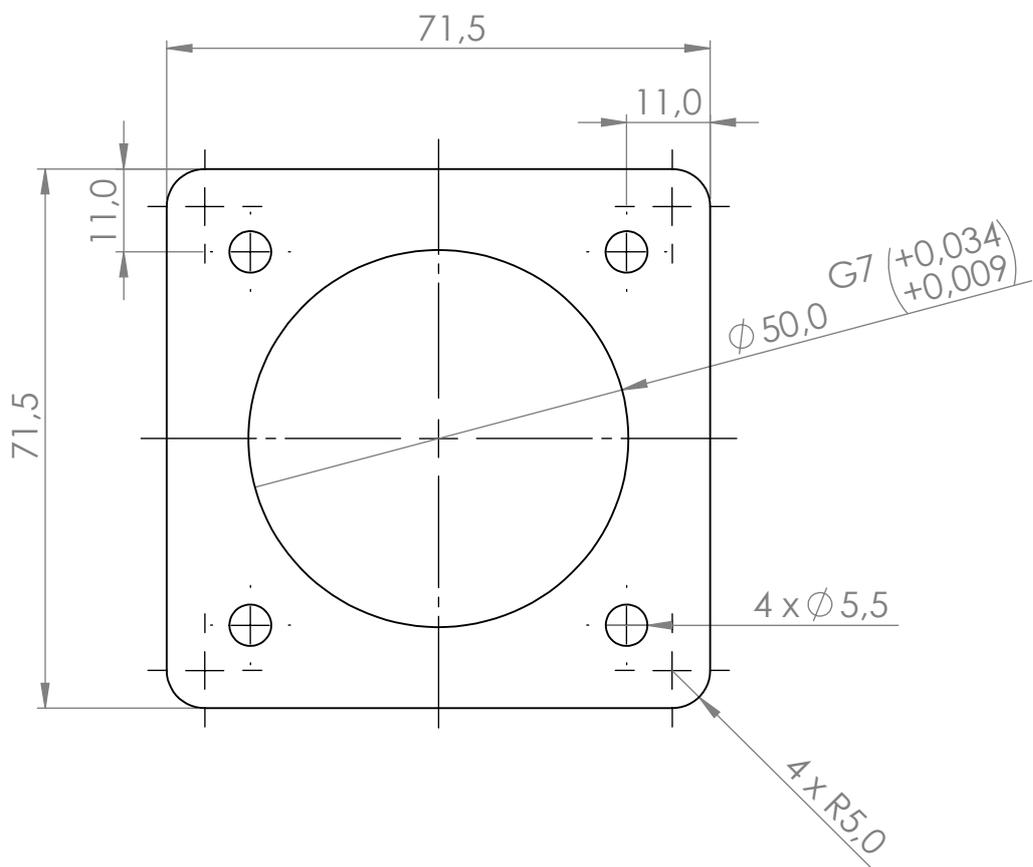
D

C

C

B

B



OBSERVACIONES:
ESPESOR DE LAMINA 3 mm

UNIVERSIDAD ECCI

FECHA: 2023-03-08

PROYECTO:
PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL:
ACERO ESTRUCTURAL A36

RECUBRIMIENTO:
PINTURA RUST OLEUM

ESCALA:
1:1

TÍTULO:
Conexión directa al servomotor

CATALOGO Y REFERENCIA:
NO APLICA

TOLERANCIA:
0,1 mm

A4



DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILA

DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILA

REVISÓ:
DAVID PEREZ

PLANO:
2/16

4

3

2

1

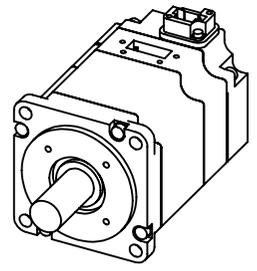
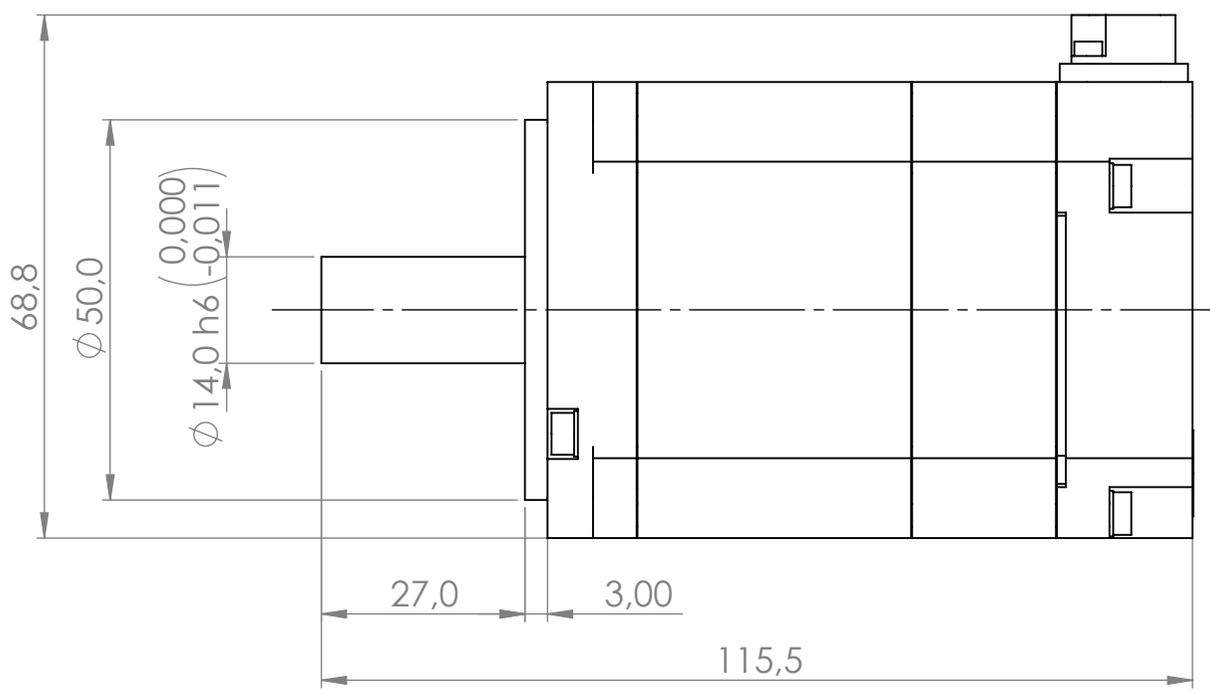
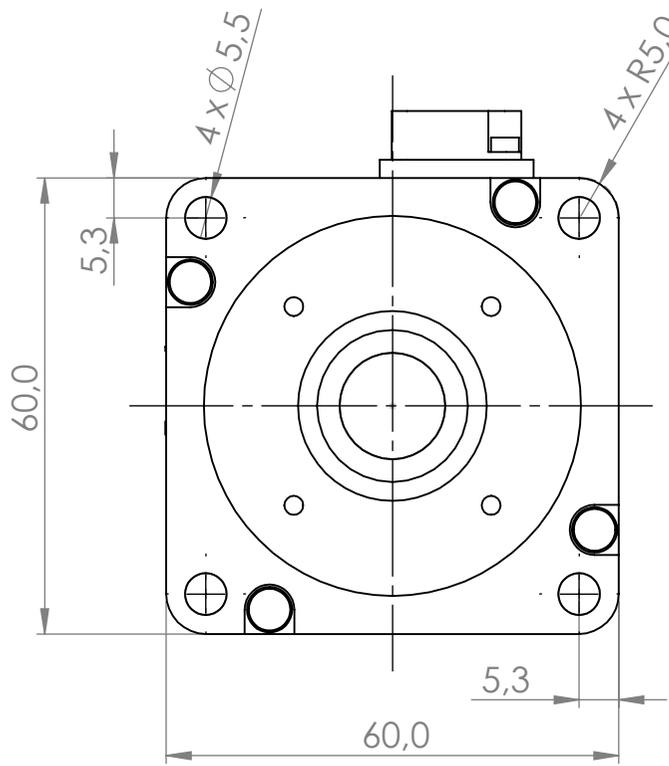
A

A

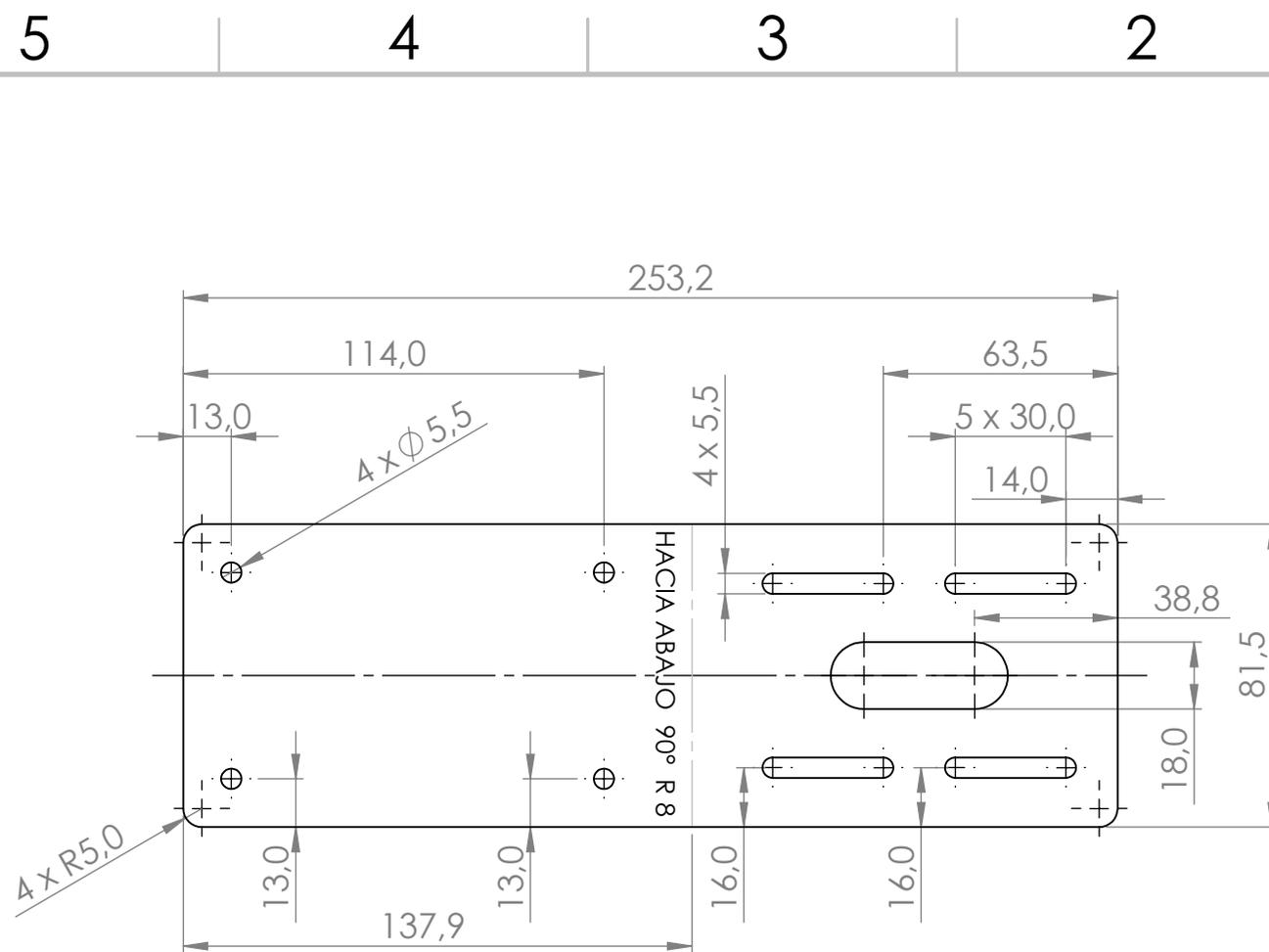
6 5 4 3 2 1

D
C
B
A

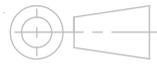
D
C
B
A



UNIVERSIDAD ECCI Ingeniería Mecatrónica		FECHA: 2023-03-08	PROYECTO: PT6 FAC CMCP	
		MATERIAL: NO APLICA	RECUBRIMIENTO: NO APLICA	
ESCALA: 1:1	TÍTULO: <i>Servomotor Yaskawa</i>	CATALOGO Y REFERENCIA: <i>Control de Movimiento SGM7J-04A</i>	TOLERANCIA: NO APLICA	A4
	DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA DAVID CAMILO BULLA AVILA	DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA DAVID CAMILO BULLA AVILA	REVISÓ: DAVID PEREZ	PLANO: 3/16



OBSERVACIONES:
 ESPESOR DE LAMINA 4 mm

UNIVERSIDAD ECCI		FECHA: 2023-03-08	PROYECTO: PT6 FAC CMCP	
Ingeniería Mecatrónica		MATERIAL: ACERO ESTRUCTURAL A36	RECUBRIMIENTO: NO APLICA	
ESCALA: 1:2	TÍTULO: <i>Base del Servomotor</i>	CATALOGO Y REFERENCIA: NO APLICA	TOLERANCIA: 0,1 mm	A4
	DISEÑÓ: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA DAVID CAMILO BULLA AVILA	DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA DAVID CAMILO BULLA AVILA	REVISÓ: DAVID PEREZ	PLANO: 4/16

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

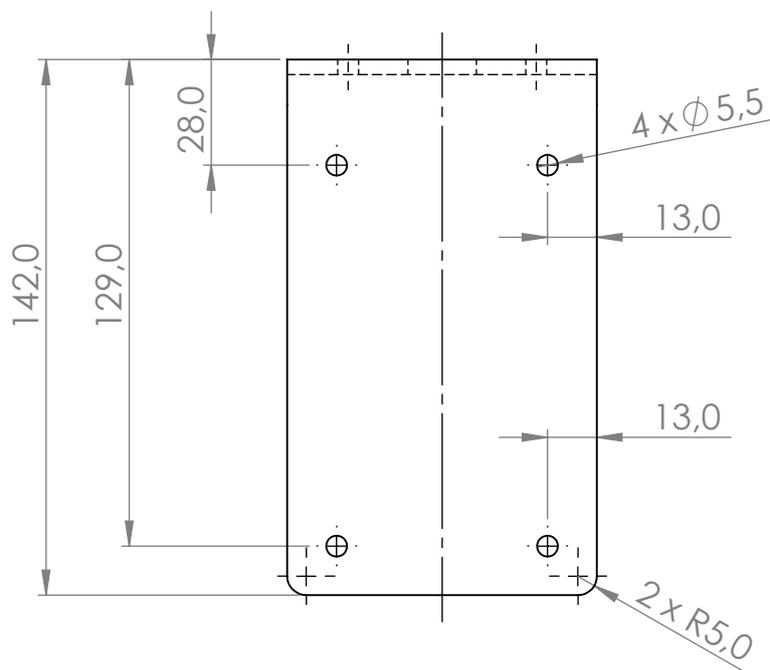
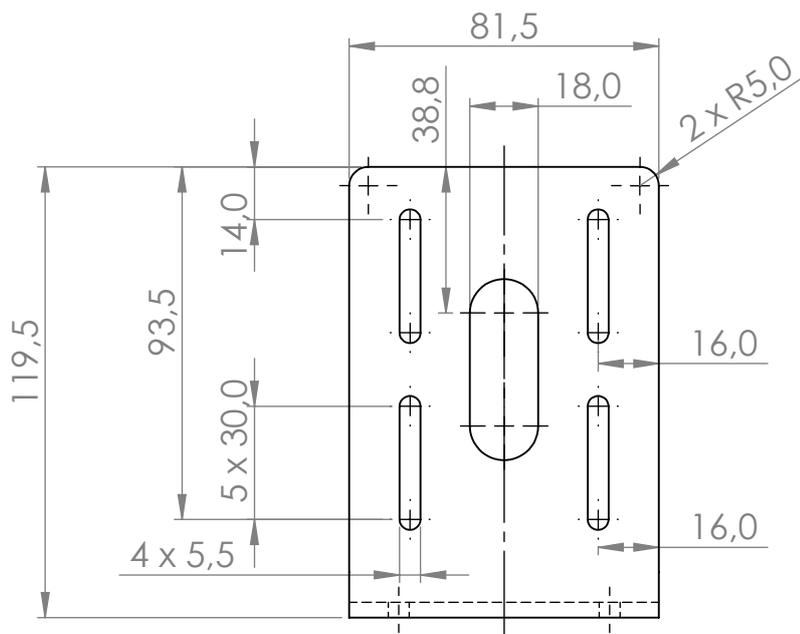
C

B

B

A

A



OBSERVACIONES:
ESPELOR DE LAMINA 4 mm

UNIVERSIDAD ECCI

FECHA: 2023-03-08

PROYECTO:
PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL:
ACERO ESTRUCTURAL A36

RECUBRIMIENTO:
PINTURA RUST OLEUM

ESCALA:
1:2

TÍTULO:
Base del Servomotor con doblez

CATALOGO Y REFERENCIA:
NO APLICA

TOLERANCIA:
0,1 mm

A4



DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILA

DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILA

REVISÓ:
DAVID PEREZ

PLANO:
5/16

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

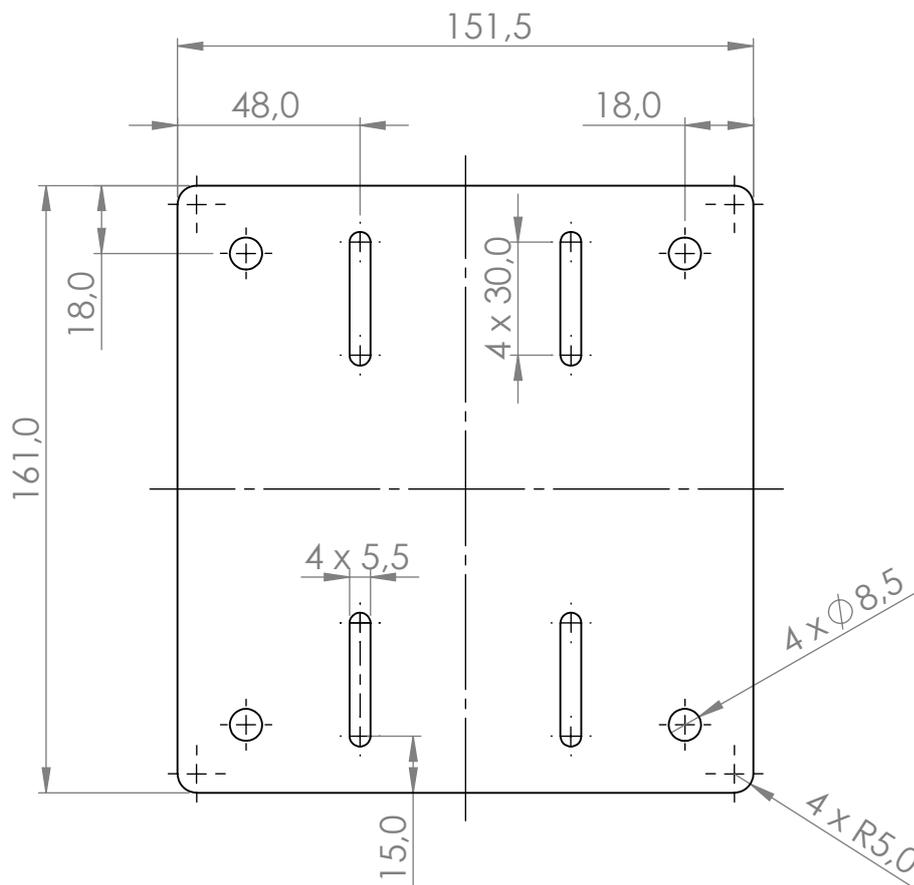
C

B

B

A

A



OBSERVACIONES:

ESPELOR DE LAMINA 4 mm

UNIVERSIDAD ECCI

FECHA:

2023-03-08

PROYECTO:

PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL:

ACERO ESTRUCTURAL A36

RECUBRIMIENTO:

PINTURA RUST OLEUM

ESCALA:

1:2

TÍTULO:

Pieza Media del Acople Mecánico

CATALOGO Y REFERENCIA:

NO APLICA

TOLERANCIA:

0,1 mm

A4



DISEÑO:

ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILA

DIBUJO:

ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILA

REVISÓ:

DAVID PEREZ

PLANO:

6/16

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

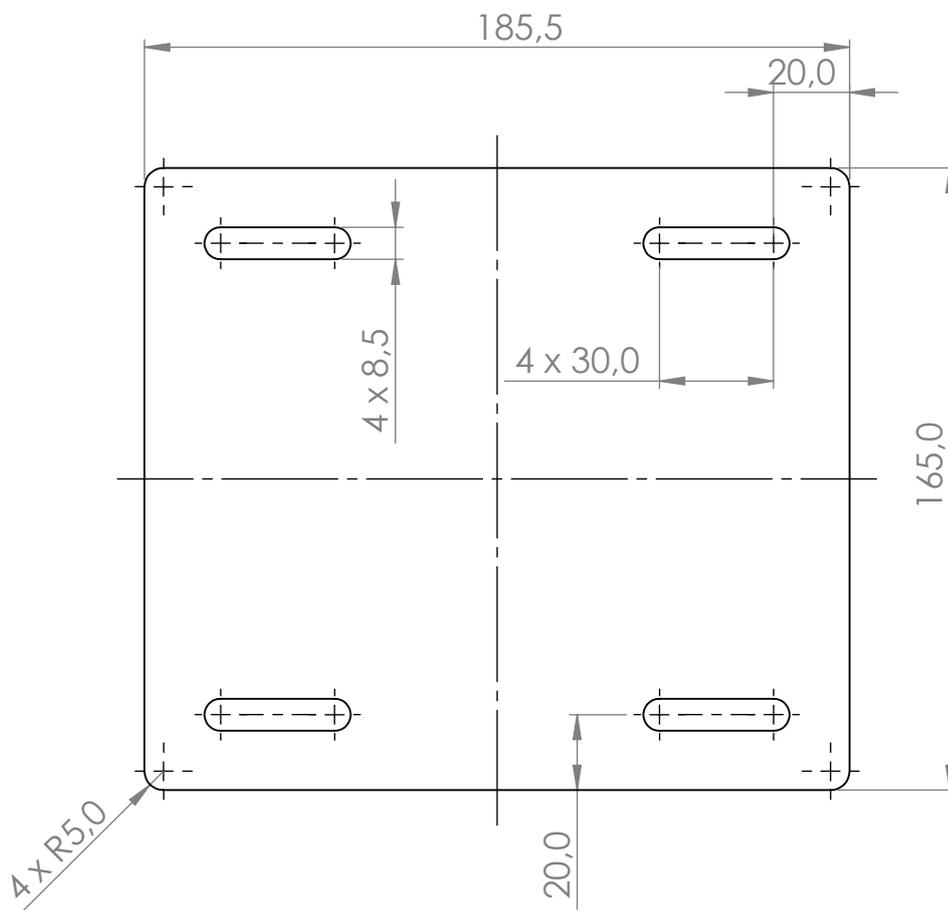
C

B

B

A

A



OBSERVACIONES:
ESPESOR DE LAMINA 4 mm

UNIVERSIDAD ECCI

FECHA: 2023-03-08

PROYECTO:
PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL:
ACERO ESTRUCTURAL A36

RECUBRIMIENTO:
PINTURA RUST OLEUM

ESCALA:
1:2

TÍTULO:
Base del Acople Mecánico

CATALOGO Y REFERENCIA:
NO APLICA

TOLERANCIA:
0,1 mm

A4



DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILA

DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILA

REVISÓ:
DAVID PEREZ

PLANO:
7/16

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

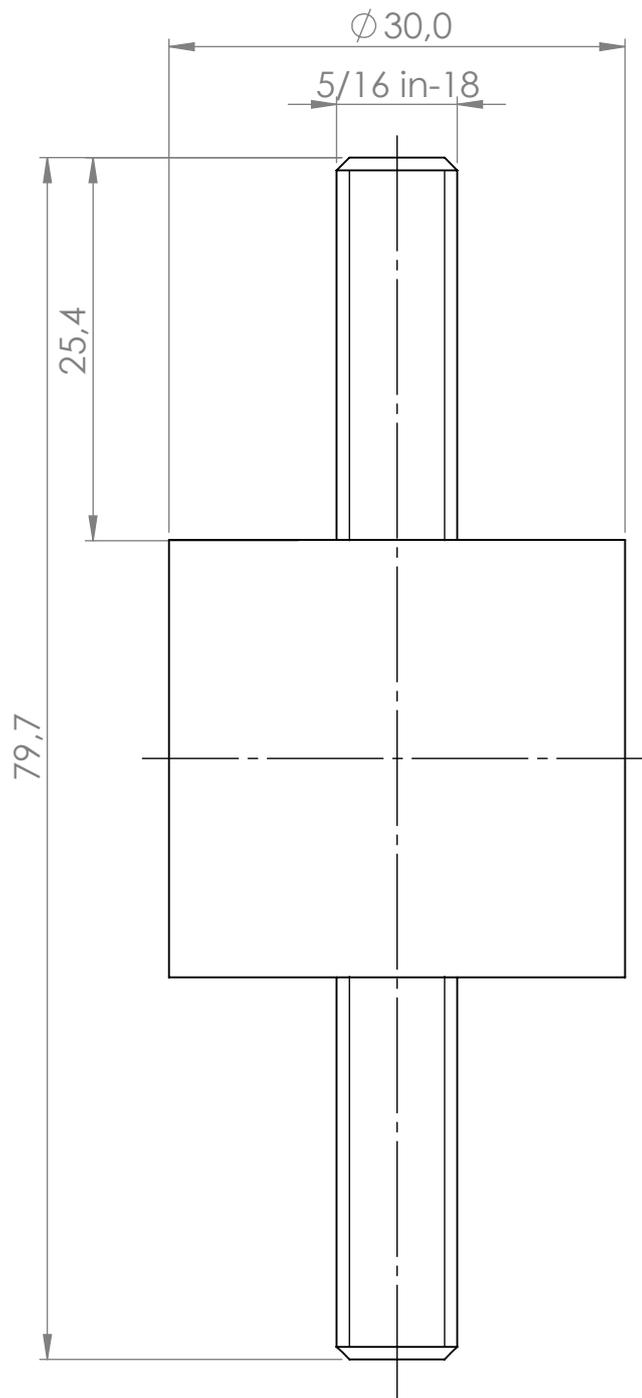
C

B

B

A

A



UNIVERSIDAD ECCI

FECHA: 2023-03-08

PROYECTO:
PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL:
NO APLICARECUBRIMIENTO:
NO APLICAESCALA:
2:1TÍTULO:
*Sistema Antivibratorio*CATALOGO Y REFERENCIA:
UNIVERSAL DE CAUCHOS SIN 003TOLERANCIA:
NO APLICA

A4

DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILADIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILAREVISÓ:
DAVID PEREZPLANO:
8/16

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

C

B

B

M5x0.8

30,0

25,0

24,2

0,5 x 45°

Ø 8,5

UNIVERSIDAD ECCI

FECHA: 2023-03-08

PROYECTO: PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL: ACERO CLASE 8.8

RECUBRIMIENTO: NO APLICA

ESCALA: 5:1

TÍTULO: Tornillo de ajuste del Servo

CATALOGO Y REFERENCIA: MUNDIAL DE TORNILLOS 820041

TOLERANCIA: NO APLICA A4



DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA DAVID CAMILO BULLA AVILA

DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA DAVID CAMILO BULLA AVILA

REVISÓ: DAVID PEREZ PLANO: 9/16

4

3

2

1

A

A

4

3

2

1

F

F

E

E

D

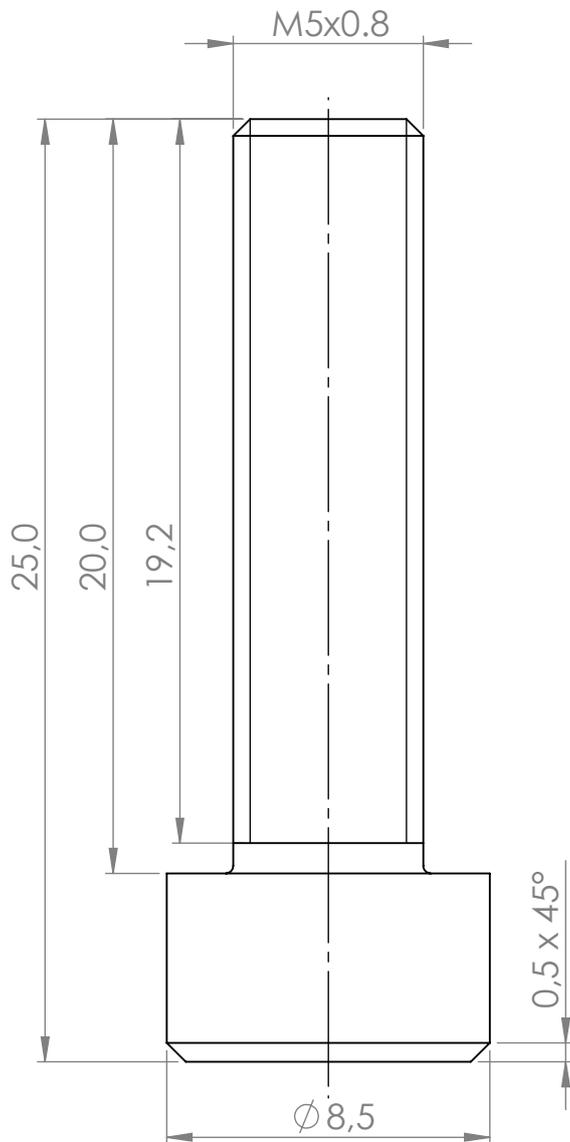
D

C

C

B

B



UNIVERSIDAD ECCI

FECHA: 2023-03-08

PROYECTO:
PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL:
ACERO CLASE 8.8RECUBRIMIENTO:
NO APLICAESCALA:
5:1TÍTULO:
*Tornillo de ajuste pieza media*CATALOGO Y REFERENCIA:
MUNDIAL DE TORNILLOS 820040TOLERANCIA:
NO APLICA A4DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILADIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILAREVISÓ:
DAVID PEREZPLANO:
10/16

4

3

2

1

A

A

4

3

2

1

F

F

E

E

D

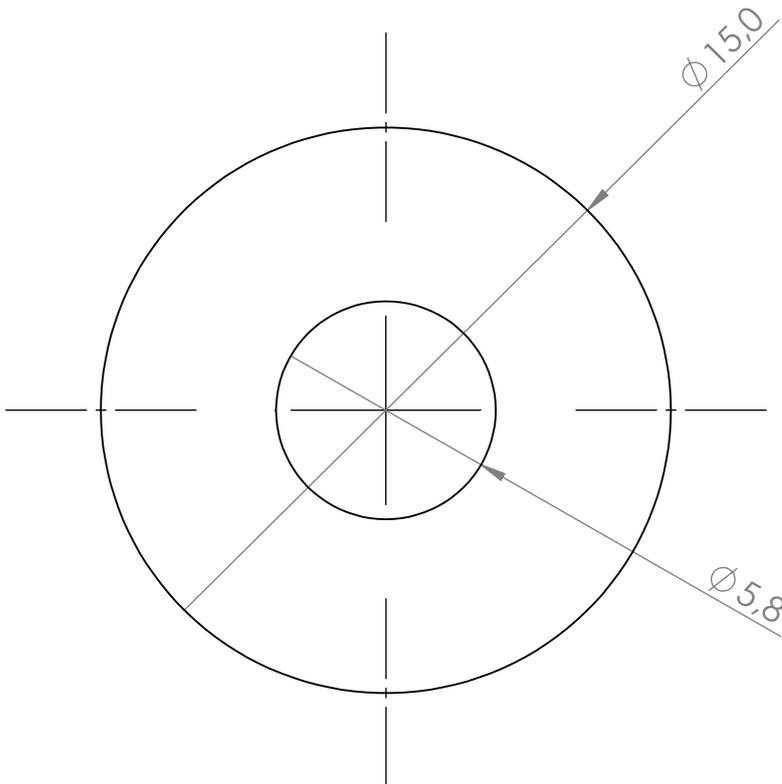
D

C

C

B

B



OBSERVACIONES:
 ESPESOR DE LAMINA 1.75 mm

UNIVERSIDAD ECCI

FECHA: 2023-03-08

PROYECTO:
 PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL:
 HIERRO IRIZADO

RECUBRIMIENTO:
 NO APLICA

ESCALA:
 5:1

TÍTULO:
Arandela de acoplamiento mecánico

CATALOGO Y REFERENCIA:
 MUNDIAL DE TORNILLOS 430003

TOLERANCIA:
 NO APLICA A4



DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
 DAVID CAMILO BULLA AVILA

DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
 DAVID CAMILO BULLA AVILA

REVISÓ: DAVID PEREZ PLANO:
 11/16

4

3

2

1

A

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

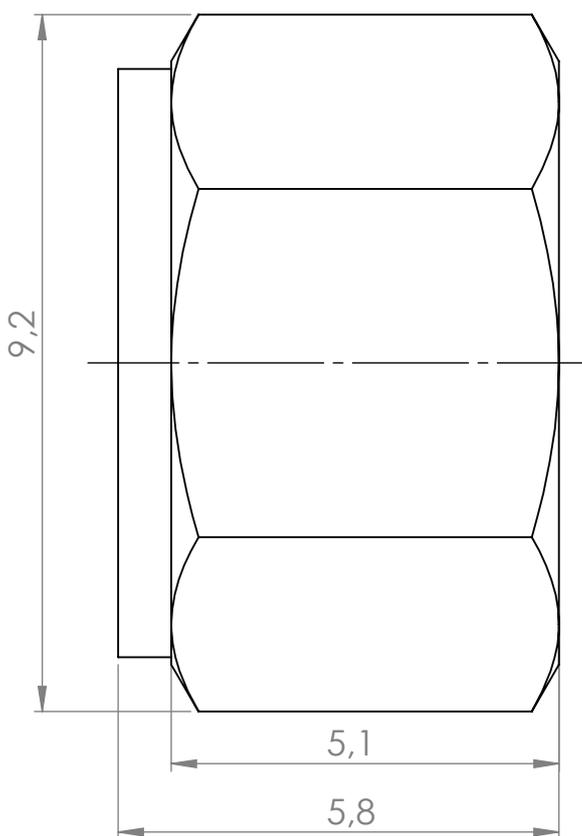
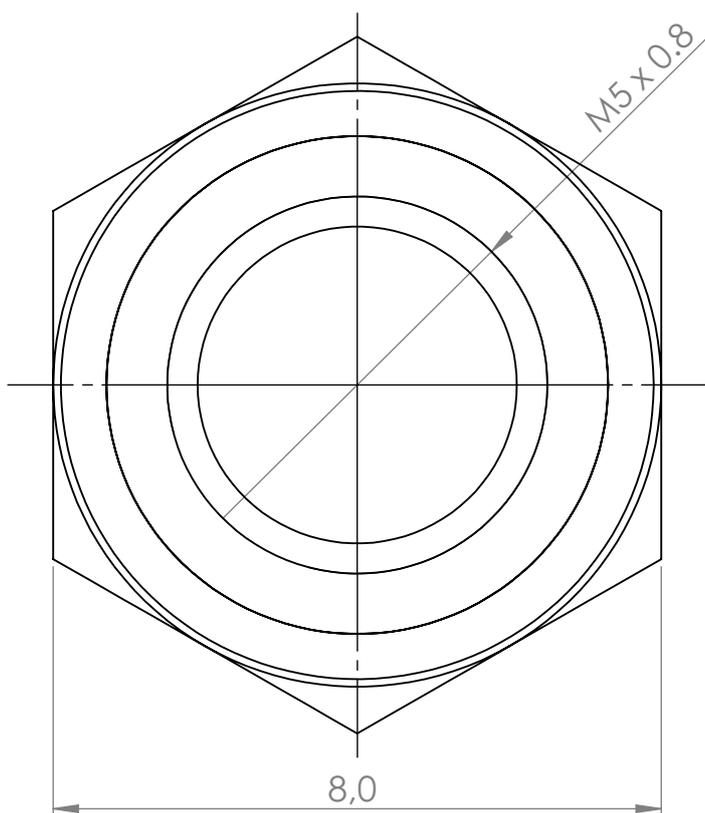
C

B

B

A

A



UNIVERSIDAD ECCI

FECHA: 2023-03-08

PROYECTO: PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL: NO APLICA

RECUBRIMIENTO: NO APLICA

ESCALA: 10:1

TÍTULO: *Tuerca de ajuste servomotor*

CATALOGO Y REFERENCIA: MUNDIAL DE TORNILLOS 2380006

TOLERANCIA: NO APLICA

A4



DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILA

DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILA

REVISÓ: DAVID PEREZ

PLANO: 12/16

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

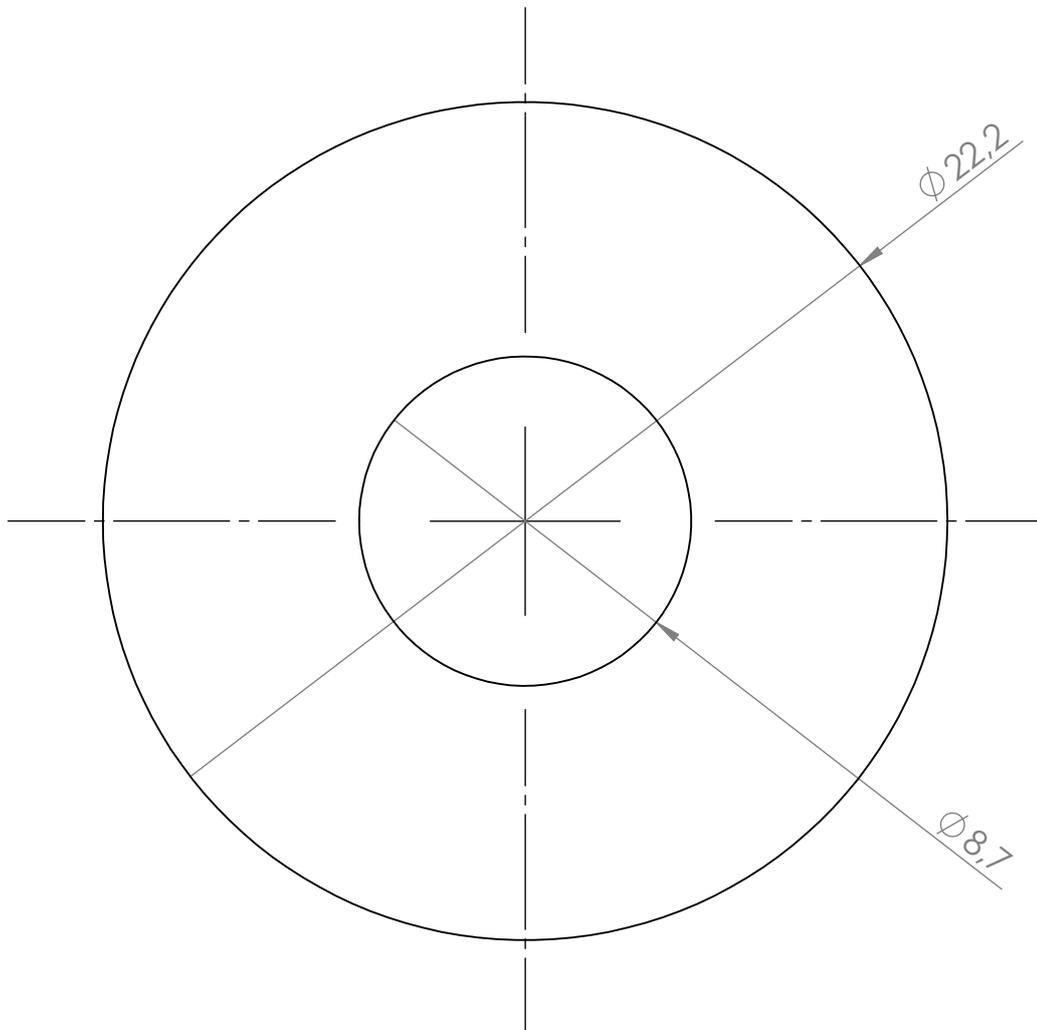
D

C

C

B

B



OBSERVACIONES:
 ESPESOR DE LAMINA 1.6 mm

UNIVERSIDAD ECCI

FECHA: 2023-03-08

PROYECTO:
 PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL:
 HIERRO GALVANIZADO

RECUBRIMIENTO:
 NO APLICA

ESCALA:
 5:1

TÍTULO:
Arandela del sistema antivibratorio

CATALOGO Y REFERENCIA:
 MUNDIAL DE TORNILLOS 460008

TOLERANCIA:
 NO APLICA

A4



DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
 DAVID CAMILO BULLA AVILA

DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
 DAVID CAMILO BULLA AVILA

REVISÓ:
 DAVID PEREZ

PLANO:
 13/16

4

3

2

1

A

A

4

3

2

1

F

F

E

E

D

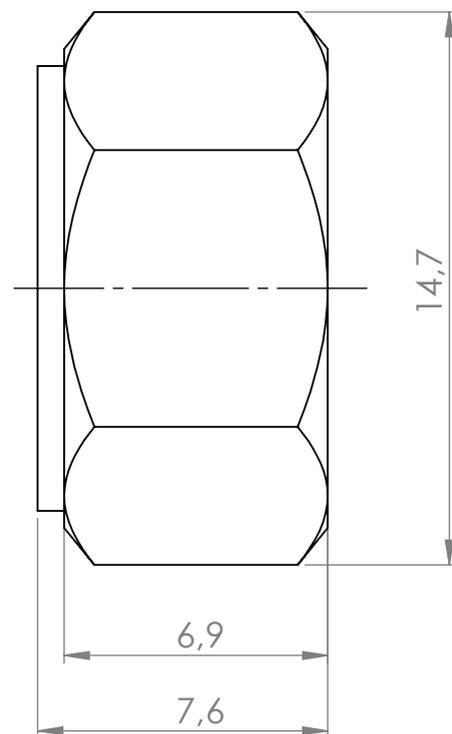
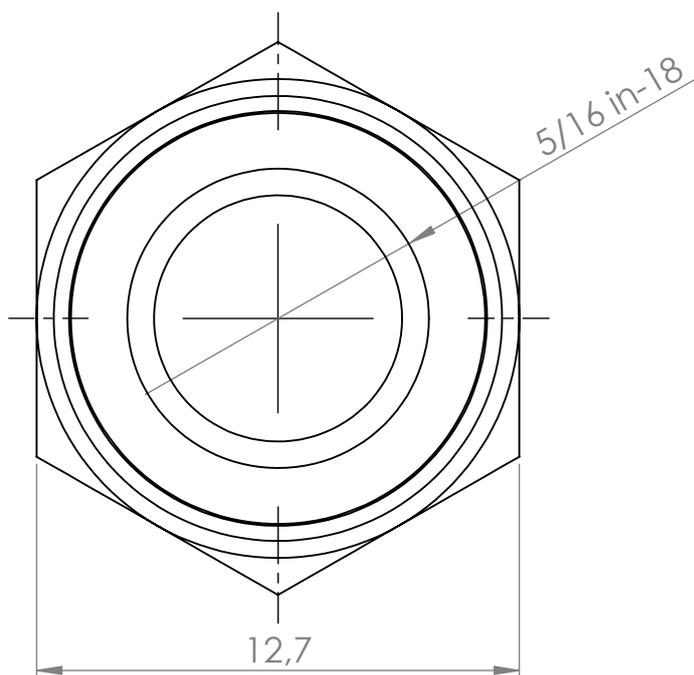
D

C

C

B

B



UNIVERSIDAD ECCI

FECHA:
2023-03-08PROYECTO:
PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL:
NO APLICARECUBRIMIENTO:
NO APLICAESCALA:
5:1TÍTULO:
*Tuerca de ajuste Antivibratorios*CATALOGO Y REFERENCIA:
MUNDIAL DE TORNILLOS 2390003TOLERANCIA:
NO APLICA

A4

DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILADIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILAREVISÓ:
DAVID PEREZPLANO:
14/16

4

3

2

1

A

A

6

5

4

3

2

1

D

D

C

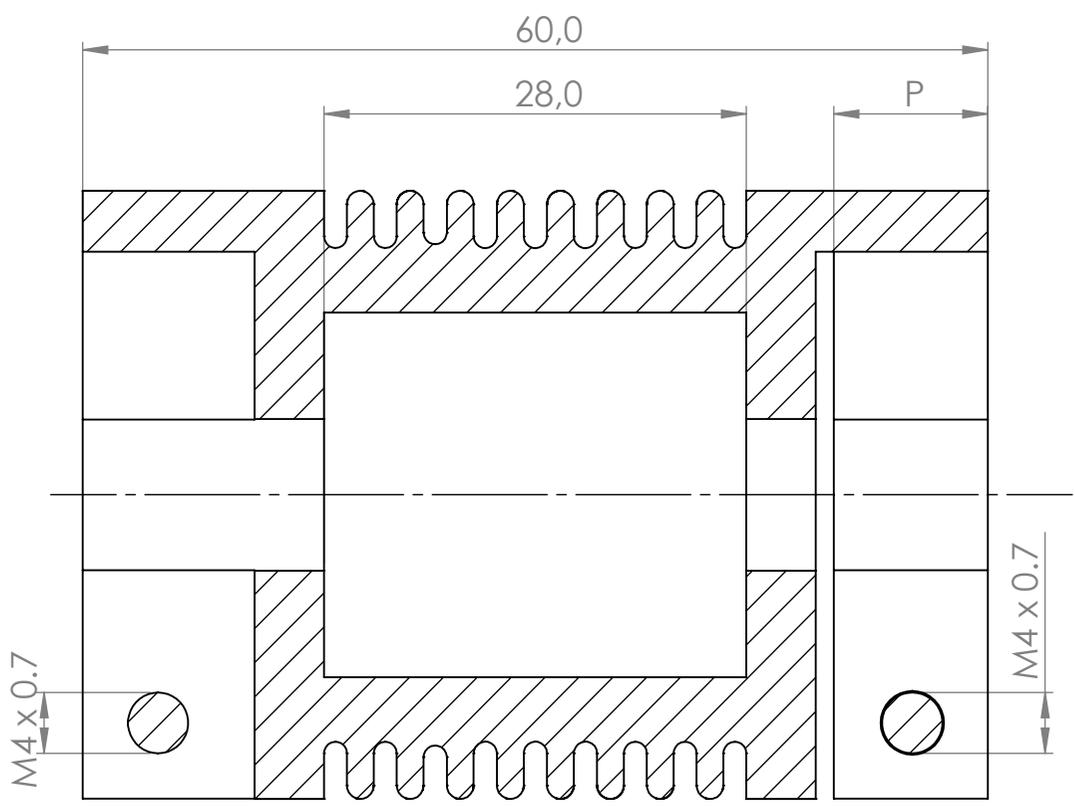
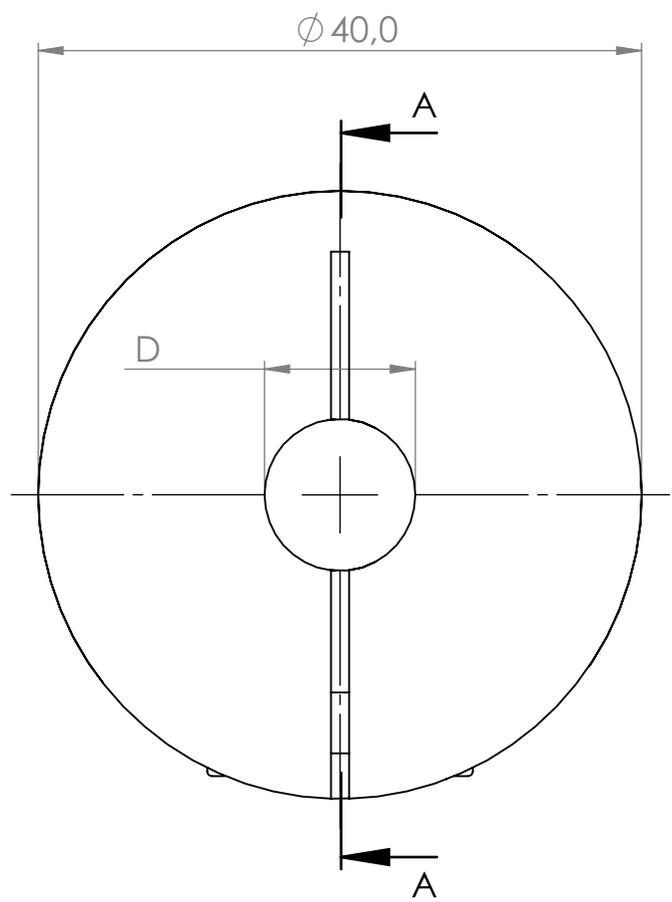
C

B

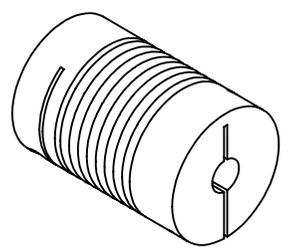
B

A

A



OBSERVACIONES:
 - El diámetro D se establece de 14 [mm] para el eje del servo y de 8 [mm] para el eje de la FCU.
 - La profundidad P se establece de 10 [mm] para el ensamble de ambos ejes.



UNIVERSIDAD ECCI		FECHA: 2023-03-08	PROYECTO: PT6 FAC CMCP	
Ingeniería Mecatrónica		MATERIAL: NO APLICA	RECUBRIMIENTO: NO APLICA	
ESCALA: 2:1	TÍTULO: <i>Acople Flexible</i>	CATALOGO Y REFERENCIA: CONTROL DE MOVIMIENTO R+W M2K-100	TOLERANCIA: NO APLICA	A4
	DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA DAVID CAMILO BULLA AVILA	DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA DAVID CAMILO BULLA AVILA	REVISÓ: DAVID PEREZ	PLANO: 15/16

6

5

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

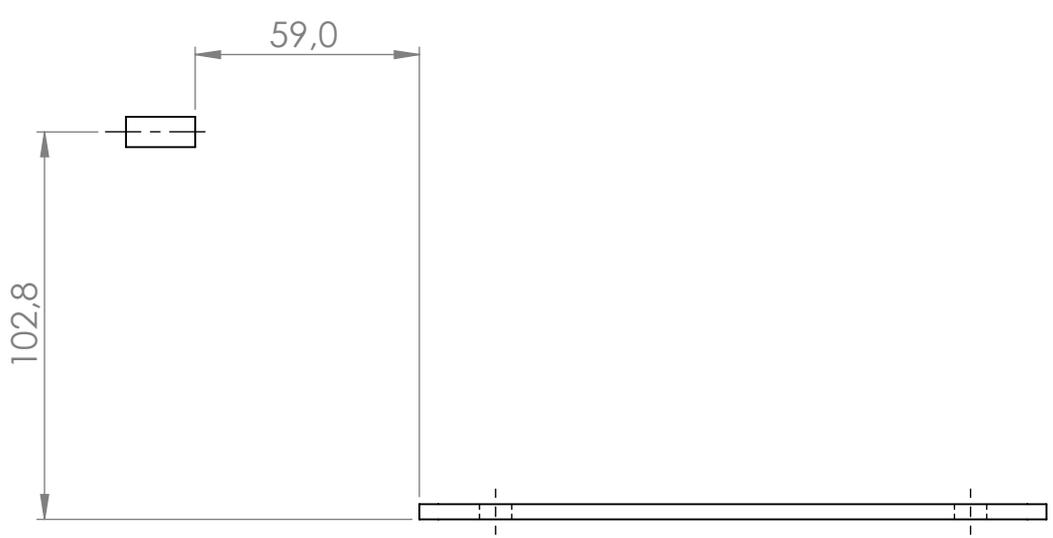
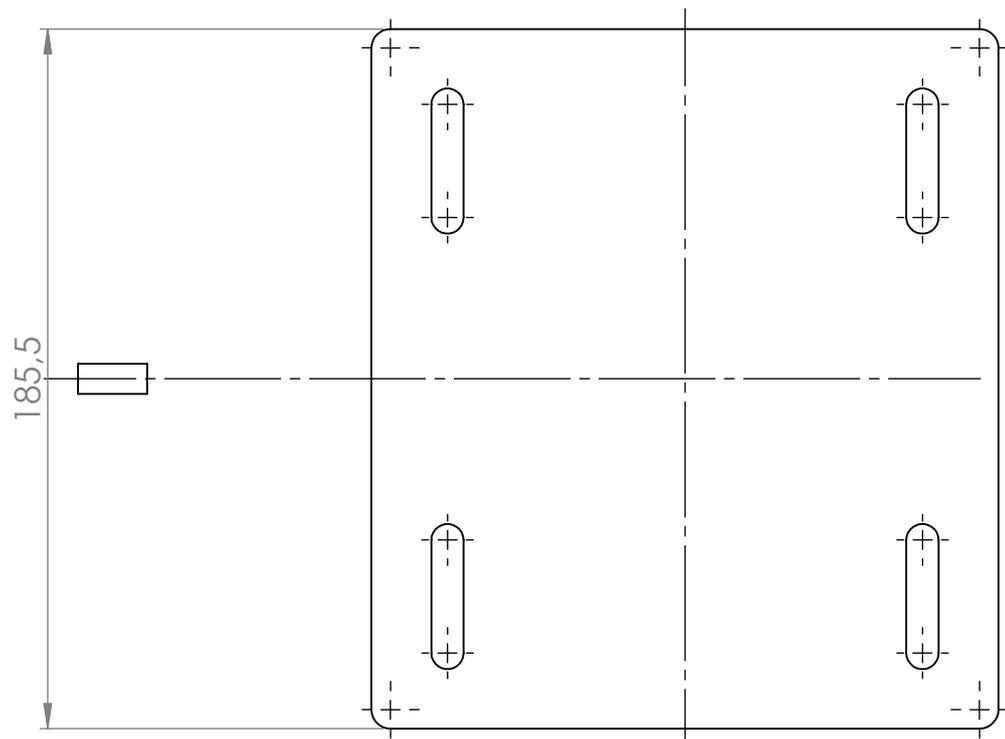
C

B

B

A

A



NOTA:
ESTE PLANO POSICIONA LA
BASE DEL ACOPLÉ MECÁNICO
(PLANO 7) CON RESPECTO AL
EJE DE LA FCU

UNIVERSIDAD ECCI

FECHA: 2023-03-08

PROYECTO:
PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL:
NO APLICA

RECUBRIMIENTO:
NO APLICA

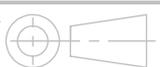
ESCALA:
1:2

TÍTULO:
Dimensionamiento Acople - FCU

CATALOGO Y REFERENCIA:
NO APLICA

TOLERANCIA:
0.1 mm

A4



DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILA

DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILA

REVISÓ:
DAVID PEREZ

PLANO:
16/16

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

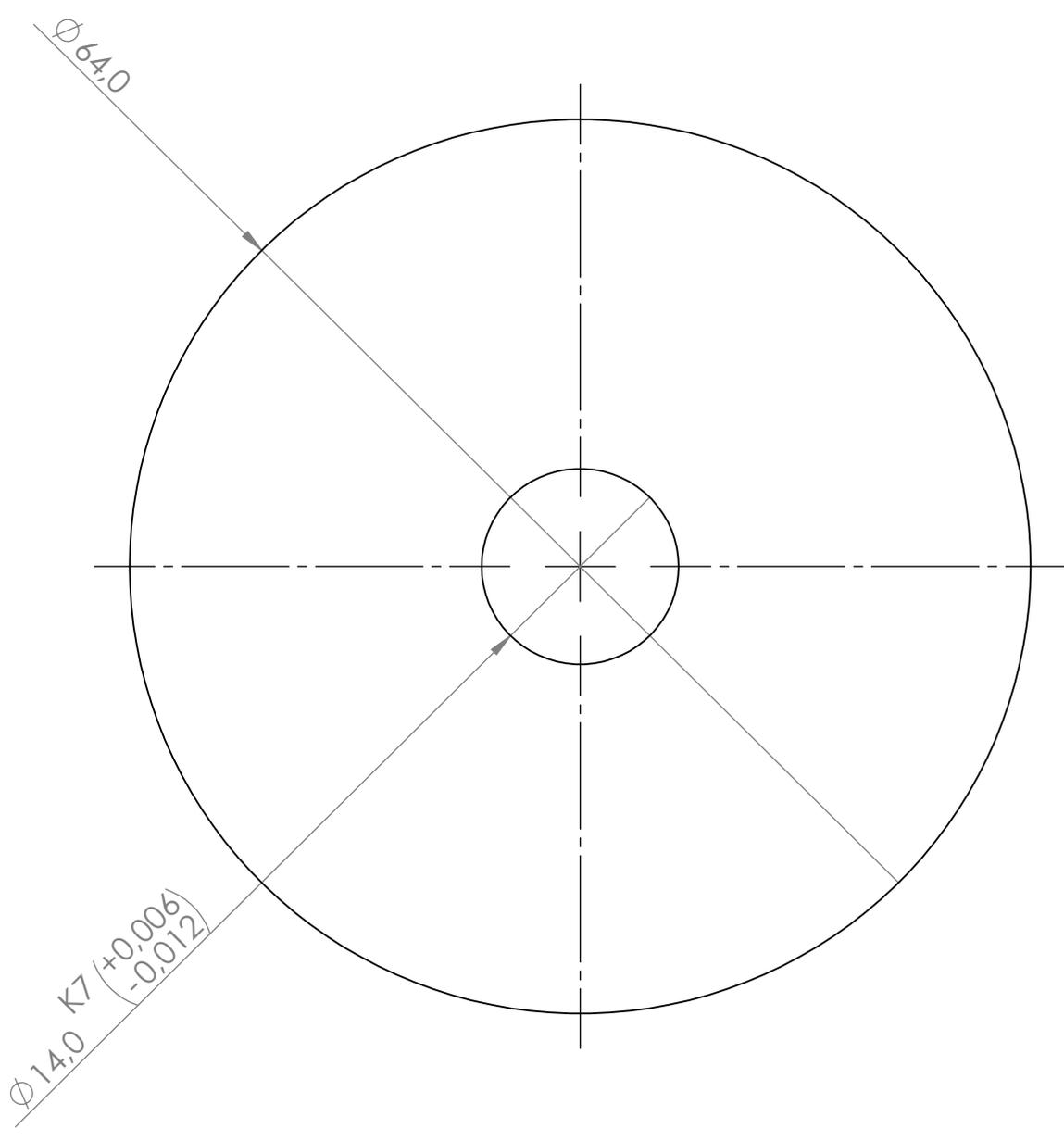
C

B

B

A

A



OBSERVACIONES:
 ESPESOR DE LAMINA 10 mm

UNIVERSIDAD ECCI

FECHA: 2023-03-08

PROYECTO:
 PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL:
 ACERO 1020

RECUBRIMIENTO:
 NO APLICA

ESCALA:
 2:1

TÍTULO:
Disco de inercia

CATALOGO Y REFERENCIA:
 NO APLICA

TOLERANCIA:
 0.1 mm

A4



DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
 DAVID CAMILO BULLA AVILA

DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
 DAVID CAMILO BULLA AVILA

REVISÓ:
 DAVID PEREZ

PLANO:
 17/19

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

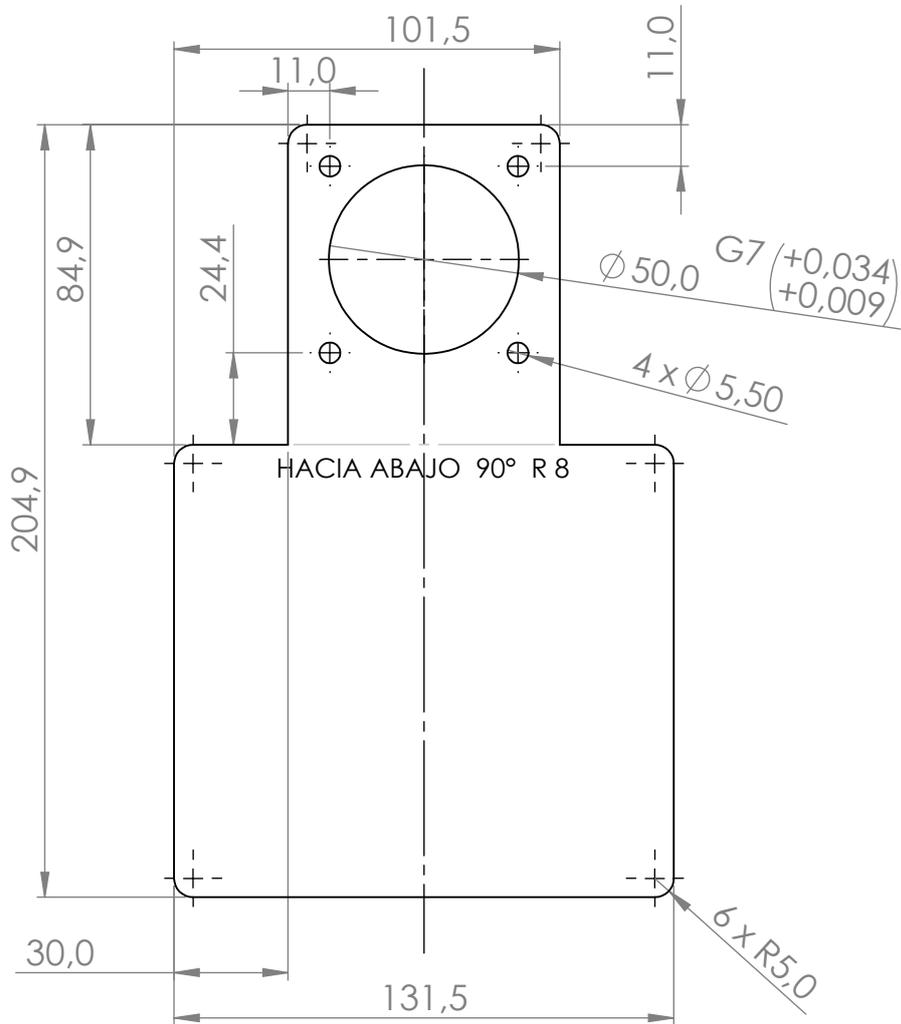
C

B

B

A

A



OBSERVACIONES:
ESPESOR DE LAMINA 3 mm

UNIVERSIDAD ECCI

FECHA: 2023-03-08

PROYECTO:
PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL:
ACERO ESTRUCTURAL A36

RECUBRIMIENTO:
NO APLICA

ESCALA:
1:2

TÍTULO:
Soporte de Prueba Servomotor

CATALOGO Y REFERENCIA:
NO APLICA

TOLERANCIA:
0,1 mm

A4



DISEÑÓ: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILA

DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA
DAVID CAMILO BULLA AVILA

REVISÓ:
DAVID PEREZ

PLANO:
18/19

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

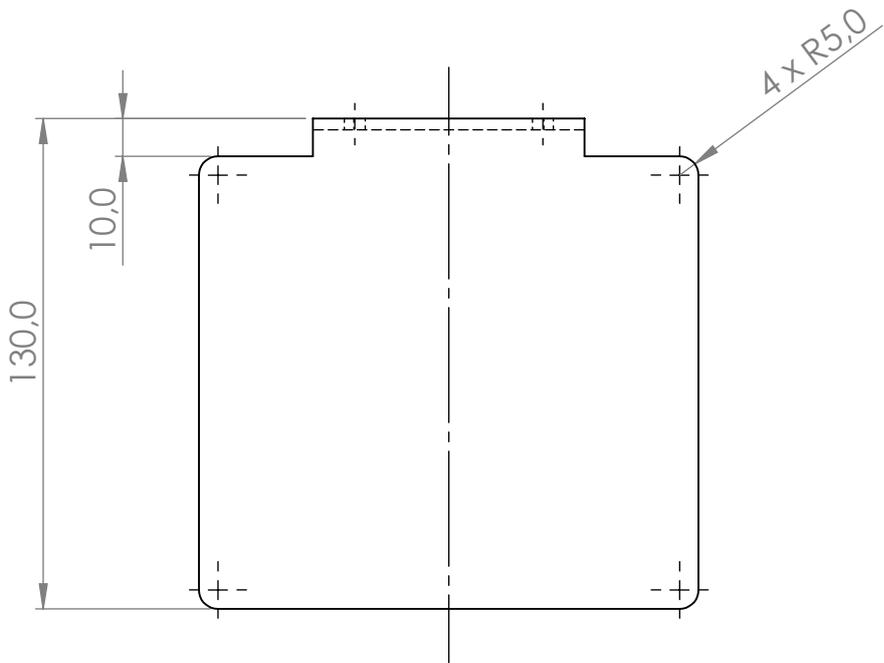
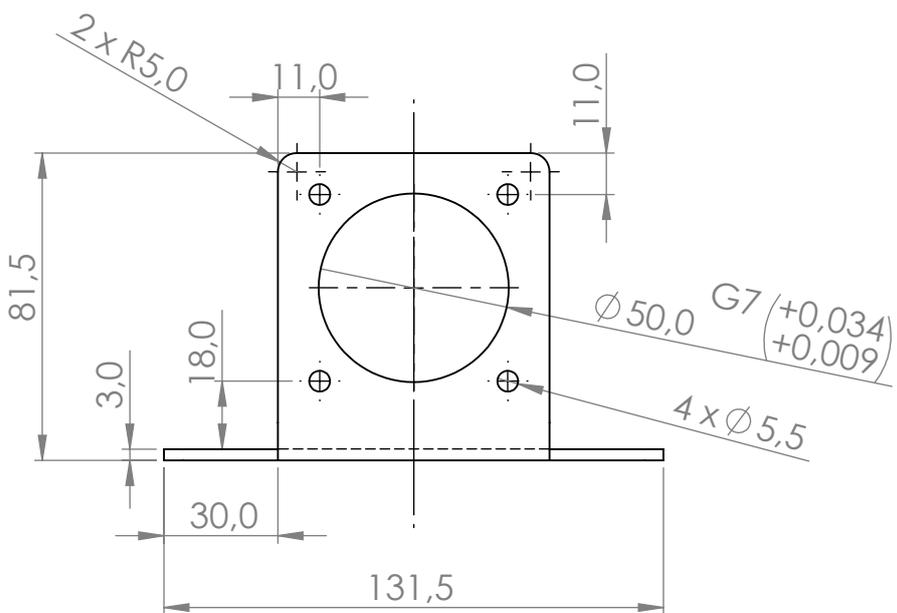
C

B

B

A

A



UNIVERSIDAD ECCI

FECHA: 2023-03-08

PROYECTO: PT6 FAC CMCP

Ingeniería Mecatrónica

MATERIAL: ACERO ESTRUCTURAL A36

RECUBRIMIENTO: NO APLICA

ESCALA: 1:2

TÍTULO: Soporte de prueba Servomotor con Doblez

CATALOGO Y REFERENCIA: NO APLICA

TOLERANCIA: 0,1 mm A4



DISEÑO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA DAVID CAMILO BULLA AVILA

DIBUJO: ANDRÉS FELIPE ESPINOSA SILVA DAVID CAMILO BULLA AVILA

REVISÓ: DAVID PEREZ PLANO: 19/19

4

3

2

1