

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA SOLDADURA
ORBITAL PARA TUBERÍAS DE DIÁMETROS DE 360 A 920 MM**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

César Steven Díaz Choque

ASESOR:

Mag. Michel Sigüenza Astoquillca

Lima, junio, 2022

RESUMEN

El Perú tiene un déficit de soldadores calificados; en consecuencia, el país no se da abasto de soldadores ante la alta demanda de profesionales que se requieren para todos los proyectos; unos de estos es el desarrollo de los gaseoductos y oleoductos que se realizan en el país para una mejora energética. Por ello, las empresas encargadas de realizar los proyectos optan por contratar mano de obra extranjera aumentando los precios del proyecto; además, la falta de soldadores capacitados en el país conlleva a un retraso en la entrega de los proyectos. Los objetivos de la presente tesis son la elaboración del diseño mecánico, electrónico y de control del sistema automatizado de soldadura orbital para tuberías de 360 mm a 920 mm. Se utiliza la metodología VDI 2221 donde se desarrolla la Idealización, Desarrollo Conceptual y Desarrollo Avanzado. La presente tesis plantea el diseño del tractor soldador que se desplace por medio de un sistema de sujeción alrededor de la tubería; además, el sistema de sujeción debe permitir el acople de esta sobre un vehículo que lo desplace sobre los diferentes ductos. El resultado es el diseño de un tractor automatizado de bajo costo en comparación con los que se ofrecen en el mercado; esto se logró por medio de la integración de diferentes componentes mecánicos obtenidos del mercado nacional e internacional. Por otro lado, el sistema de sujeción es un diseño innovador que permite montar y desmontar todo el sistema de la tubería con facilidad reduciendo en un 90 % la asistencia de un operario. Además, se garantiza la resistencia del sistema de sujeción gracias al excelente desarrollo de las simulaciones de elementos finitos en comparación con otros trabajos realizados. En estas simulaciones se realizaron múltiples análisis estáticos, dinámicos, de pandeo y nodal lo que permitió reducir el peso de algunos componentes y validar la resistencia mecánica de los mismos. Por otro lado, se implementó un sistema electrónico, el cual permite accionar los actuadores para realizar las diferentes operaciones y detectar la junta de soldadura por parte del tractor. Finalmente, debido a que se conoce el modelo dinámico de los subsistemas, se desarrollaron sistemas de control PID en cascada para el tractor soldador lo cual le permite posicionarse automáticamente sobre la junta de soldadura. Por lo tanto, se concluye que es viable la implementación de la presente tesis para sistemas automatizados de soldadura orbital de ductos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	i
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	3
1.1. Alcance de la tesis	3
1.1.1. Objetivo general	3
1.1.2. Objetivos específicos	4
1.2. Metodología	4
1.3. Marco Histórico	4
Diseño Conceptual	14
2.1. Lista de exigencias	14
2.2. Determinación de la secuencia de operaciones	15
2.2. Diseño conceptual de un sistema automatizado de soldadura orbital	16
Diseño Mecánico del Sistema Autónomo de Soldadura Orbital	18
3.1. Subsistema Tractor Soldador	18
3.1.1. Cálculos y dimensionamiento	18
3.1.2. Requerimientos de actuadores	33
3.1.3. Ensamble del tractor soldador	33
3.2. Subsistema de Sujeción	35
3.2.1. Cálculos y dimensionamiento	35
3.2.2. Requerimiento de actuadores	48
3.2.3. Ensamble del sistema de sujeción	49
3.3. Funcionamiento	49
Diseño Electrónico del Sistema Autónomo de Soldadura Orbital	51
4.1. Arquitectura de Hardware	51
4.2. Selección de sensores y ubicación de posiciones	52
4.2.1. Sensores	52
4.2.2. Ubicar altura de la antorcha (eje Z)	54
4.2.3. Ubicar centro de la junta de soldadura	54

4.3. Sistemas de control	55
4.3.1. Desplazar tractor soldador.....	56
4.3.2. Posicionar antorcha y Modificar altura	58
4.4. Diagrama de Flujo.....	61
4.5. Esquemático	62
Simulaciones y Experimentaciones	67
5.1. Metodología FEM	67
5.2. Análisis FEM del sistema de sujeción	71
5.2.1. Análisis estático	71
5.2.2. Análisis dinámico.....	72
5.2.3. Análisis de pandeo	72
5.2.4. Análisis de nodal	73
5.3. Rediseño de la estructura	74
5.3.1. Diseño mejorado análisis estático	75
5.3.2. Diseño mejorado análisis dinámico	76
5.4. Optimización FEM Palanca	77
5.5. Experimentaciones	79
5.6. Sistema de control.....	84
5.6.1. Parámetros y Sintonización de controladores	84
5.6.2. Resultados	86
Planos y Costos.....	88
6.1. Planos Mecánicos.....	88
6.1. Estimación de Costos	90
CONCLUSIONES	94
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
Bibliografía	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Comparación de máquinas comerciales.....	10
Tabla 1. 2 Sistemas de medición topológica.....	12
Tabla 2. 1 Lista de requerimientos para el diseño del módulo de ensayos	14
<i>Tabla 3. 1</i> Propiedades mecánicas del acero AISI 1060.....	18
Tabla 3. 2 Datos extrapolados piñón Lifgo PFN 5	21
Tabla 3. 3. Factores de esfuerzo aplicado	21
Tabla 3. 4 Factores de esfuerzo pulsante	22
Tabla 3. 5 Motores para desplazamiento en el eje Z.....	22
Tabla 3. 6 Factores de corrección para árbol en el eje Z.....	23
Tabla 3. 7 Factores de seguridad calculados.....	24
Tabla 3. 8 Datos de fuerzas Lifgo Linear 5.0.....	26
Tabla 3. 9 Datos del diseño del piñón.....	28
Tabla 3. 10 Factores de esfuerzo aplicado	28
Tabla 3. 11 Factores de esfuerzo pulsante	29
Tabla 3. 12 Motores para Rotación del Tractor Soldador.....	29
Tabla 3. 13 Motor Reductor relación 10:1	30
Tabla 3. 14 Datos para el cálculo de pretensión.....	31
Tabla 3. 15 Factores de esfuerzo pulsante	32
Tabla 3. 16 Cálculo de factores de seguridad	32
Tabla 3. 17 Driver para motores	33
Tabla 3. 18 Actuadores para el pivotar el sistema de sujeción.....	36
Tabla 3. 19 Ubicaciones propuestas para los pivotes.....	37
Tabla 3. 20 Datos Clamp UNIVER LAE 140.....	40
Tabla 3. 21 Datos M10 según DIN 13 TI	42
Tabla 3. 22 Constante de rigidez del tornillo	43
Tabla 3. 23 Constante de rigidez de la placa.....	44
Tabla 3. 24 Fuerza cortante en tornillos ante Mt	46
Tabla 3. 25 Constante de rigidez del tornillo	47
Tabla 3. 26 Constante de rigidez de la placa.....	47
Tabla 3. 27 Fuentes de alimentación.....	49
Tabla 4. 1 Comparación sensores de distancia.....	53
Tabla 4. 2 Señales de entrada y salida que requiere el controlador del sistema.....	62
Tabla 5. 1 Valores del Quality Index de las mallas diseñadas.....	70
Tabla 5. 2 Launchpad Texas Instrument F28379D y sensor de distancia.....	81
Tabla 5. 3 Parámetros de motores DC e Inercias del sistema	84
Tabla 5. 4 Control de corriente	84
Tabla 5. 5 Control de velocidad.....	85
Tabla 5. 6 Control de posición.....	85
Tabla 6. 1 Aglomerado de Planos del Tractor soldador.....	89
Tabla 6. 2 Aglomerado de Planos del Sistema de Sujeción.....	90
Tabla 6. 3 Tractor Soldador: Componentes a comprar	91
Tabla 6. 4 Tractor Soldador: Piezas a Fabricar	92
Tabla 6. 5 Sistema de Sujeción: Componentes a comprar	92
Tabla 6. 6 Costo Total del Proyecto.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. 1 Soldadura de arco con atmósfera de gas inerte (TIG)	6
Figura 1. 2 Sistema automatizado de soldadura orbital. Patente (EP2543460A1)	7
Figura 1. 3 Tractor soldador con rodillos laterales de curvatura de radio variable.....	8
Figura 1. 4 Lincoln Global sistema automatizado de soldadura orbital.....	8
Figura 1. 5 Lincoln Electric sistema automatizado de soldadura orbital.....	9
Figura 1. 6 Fronius Flextrack 45 Pro	9
Figura 1. 7. Sistema de medición topológica	11
Figura 1. 8. Driver para motor puente H.....	13
Figura 2. 1 Diagrama de operaciones.....	16
Figura 2. 2 Sistema Tractor Soldador	16
Figura 2. 3 Principales componentes del diseño mecánico.....	17
Figura 3. 1 Antorcha automatizada AUT42G-180° gas tipo europeo	19
Figura 3. 2 Eje de sujeción antorcha	19
Figura 3. 3 Ensamble soporte de la antorcha	20
Figura 3. 4 Selección del módulo de la cremallera circunferencial	20
Figura 3. 5 Árbol de transmisión	23
Figura 3. 6 Accesorios adicionales para el sistema de actuación en eje Z.....	24
Figura 3. 7 Accesorios adicionales para el sistema de actuación en eje Z.....	24
Figura 3. 8 Sistema de desplazamiento en el eje Z	25
Figura 3. 9 Diagrama de fuerzas en el módulo Lifgo	26
Figura 3. 10 Sistema de desplazamiento en el eje Y.....	27
Figura 3. 11 Centro de gravedad del tractor soldador sobre la cremallera.....	27
Figura 3. 12 Árbol de transmisión para desplazamiento circunferencial.....	30
Figura 3. 13 Casquillos de fijación HP4X24	30
Figura 3. 14 Diagrama de Fuerzas y Momentos Eje Rotación Tractor Soldador	31
Figura 3. 15 Sistema de desplazamiento circunferencial	33
Figura 3. 16 Diseño ensamble de la antorcha con elevación Z.....	34
Figura 3. 17 Cuerpo del Tractor Soldador	34
Figura 3. 18 Ensamble del tractor soldador	35
Figura 3. 19 Sistema antivibración	36
Figura 3. 20 Cinética del pistón según geometrías propuestas	38
Figura 3. 21 Descomposición de fuerzas del pistón.....	38
Figura 3. 22 Sección crítica de la palanca.....	39
Figura 3. 23 Clamp y Bloque de sujeción.....	40
Figura 3. 24 Sujeción Principal.....	41
Figura 3. 25 Cordones de soldadura en el acople.....	41
Figura 3. 26 Cordón de soldadura en la plancha metálica	42
Figura 3. 27 Zonas de compresión según las dimensiones de la placa y dimensiones	43
Figura 3. 28 Distribución de esfuerzos Cilindro y Tronco de Cono	44
Figura 3. 29 Descomposición de fuerzas en los tornillos.....	45
Figura 3. 30 Constante de rigidez del tornillo.....	46
Figura 3. 31 Geometrías de distribución de esfuerzos en las placas	47
Figura 3. 32 Ensamble del sistema de sujeción	49
Figura 3. 33 Ensamble del tractor soldador y el sistema de sujeción.....	50
Figura 3. 34 Apertura y cierre del sistema de sujeción	50

Figura 4. 1 Arquitectura Hardware	52
Figura 4. 2 Corriente de salida del sensor de distancia	53
Figura 4. 3 Posicionamiento del sensor de distancia.....	54
Figura 4. 4 Representación detección de la junta de soldadura	55
Figura 4. 5 Modelo del sistema acoplado a un reductor y una carga	56
Figura 4. 6 Esquema de control para desplazamiento del tractor soldador	57
Figura 4. 7 Control de corriente	57
Figura 4. 8 Función de transferencias vs Dinámica original.....	59
Figura 4. 9 Esquema de control para posicionamiento de antorcha.....	59
Figura 4. 10 Función de transferencias vs Dinámica original.....	60
Figura 4. 11 Flujogramas de accionamiento	61
Figura 4. 12 Subprocesos de accionamiento.....	62
Figura 4. 13 Mega 2560, configuración de pines.....	63
Figura 4. 14 Conexión sensor de distancia	63
Figura 4. 15 Diagrama esquemático del clamp.....	64
Figura 4. 16 Diagrama esquemático de los pistones eléctricos.....	64
Figura 4. 17 Diagrama esquemático de los motores	65
Figura 4. 18 Regulador de voltaje LM7805.....	65
Figura 4. 19 Tablero eléctrico	66
Figura 4. 20 Conectores	66
Figura 5. 1 Procedimiento de Análisis Estructural por FEM	67
Figura 5. 2 Limpiezas de geometrías	68
Figura 5. 3 Mallado de Cremallera	68
Figura 5. 4 Mallado de Estructura.....	69
Figura 5. 5 Malla del enganche principal.....	69
Figura 5. 6 Análisis Estático	71
Figura 5. 7 Análisis dinámico	72
Figura 5. 8 Ubicación de las plataformas de fuerza.....	73
Figura 5. 9 Análisis modal: 1er y 2do modo de vibración.....	73
Figura 5. 10 Análisis modal: 3er modo de vibración.....	74
Figura 5. 11 Rediseño de Componentes de Sujeción.....	74
Figura 5. 12 Remallado de componentes	75
Figura 5. 13 Mejoras: Análisis estático, esfuerzos.....	75
Figura 5. 14 Mejoras: Análisis estático, deformaciones	76
Figura 5. 15 Mejoras: Análisis dinámico, esfuerzos.....	76
Figura 5. 16 Mejoras: Análisis dinámico, deformaciones.....	77
Figura 5. 17 Malla de la Palanca.....	77
Figura 5. 18 . Sujeción principal	78
Figura 5. 19 Calidad de malla diseñada	78
Figura 5. 20 Esfuerzo máximo y deformaciones	79
Figura 5. 21 Rediseño topológico, Esfuerzo máximo y deformaciones.....	79
Figura 5. 22. Banco de pruebas.....	80
Figura 5. 23.. Esquema de la experimentación	80
Figura 5. 24 Estructura de comunicaciones: 1) PC software; 2) Controlador Launchpad F28379D; 3) Banco de Pruebas.....	81
Figura 5. 25. Grupo A, datos recolectados del sensor.....	82
Figura 5. 26 Grupo B, datos recolectados del sensor.....	82
Figura 5. 27 Lugar de las raíces en lazo cerrado para los procesos de desplazamiento.....	85
Figura 5. 28 Respuesta del sistema en lazo cerrado.....	86
Figura 5. 29 Respuesta de la velocidad angular del tractor soldador en lazo cerrado.....	87

INTRODUCCIÓN

Los hidrocarburos cuentan con una alta demanda a nivel doméstico e industrial por su bajo costo P. Morales (2018). En Perú existen grandes yacimientos de hidrocarburos cuya extracción y transporte se ha masificado a lo largo del país América Economía (2016). Además, de la selva se extraen alrededor de 24.8 millones de barriles de petróleo al año y en la costa 6.8 millones de barriles al año MINAGRI (2015).

En Perú, estos hidrocarburos se transportan por ductos cuyos diámetros oscilan entre 254 mm hasta los 820 mm Osinergmin (2003); por ejemplo, el gasoducto de Camisea del TGP tiene una extensión de 730 km lo cual requirió 130000 mil soldaduras Gestión (2016); el gasoducto del Sur peruano con extensión de 1000 km requirió 2000 técnicos SENATI (2014); todos estos ductos fueron unidos por soldadura orbital y bridas de sujeción.

En Perú, aún existen proyectos en desarrollo como Línea 2, 3 y 4 del Metro, el aeropuerto de Chinchero entre otros que requieren soldadores calificados; sin embargo, existe un déficit de soldadores calificados de 35000 al año Gestión (2017) debido al poco interés y la complejidad que afrontan los jóvenes al optar por una carrera técnica de soldadura SENATI (2017). Por lo tanto, las empresas contratan mano de obra extranjera con pensiones de 15,000 soles mensuales Diario el Comercio (2015).

En países desarrollados, para soldar ductos se utilizan sistemas automatizados de soldadura guiados por operarios que permiten agilizar el desarrollo del proyecto como es el caso del gasoducto Ruso-Chino de 3000 km de longitud y diámetros de 14000 mm TeleSUR (2017), El Periódico (2019). Sin embargo, dichas máquinas automatizadas llegan a costar aproximadamente 100,000 dólares Lincoln Electric (2020b).

Las máquinas automatizadas utilizadas actualmente para soldadura orbital de tuberías tienen ventajas respecto al método convencional; se realizan soldaduras más limpias y de mejor calidad con ciclos repetitivos; además, es posible eliminar el error del operario en soldadura TIG y MIG por medio de algoritmos de control incluidos en las máquinas KEHUI (2019). Incluso, es posible utilizar al mismo tiempo muchos módulos automatizados de soldadura supervisados por un solo soldador calificado Crowe (2019), y se generan ahorros gracias a la flexibilidad que poseen de adaptarse a diferentes métodos de soldadura BFMéxico (2019).

Sin embargo, la adquisición de los productos conlleva, según las cotizaciones observadas, un incremento elevado en los costos. Además, los sistemas automatizados no están diseñados para los diámetros requeridos en gaseoductos y oleoductos, incluso carecen de un controlador robusto como un controlador en cascada o un controlador adaptativo. Por último, estos sistemas no cuentan con una estructura mecánica que les permita acoplarse a un vehículo de transporte, así que requieren la presencia de operarios para ser desplazados a lo largo de las tuberías. Por lo mencionado anteriormente, se observa que existe una gran oportunidad en el desarrollo de sistemas automatizados para soldadura orbital que favorezca en la innovación y mejora tecnológica del país, y se reduzcan los costos de ejecución.

Por lo tanto, se propone diseñar un sistema automatizado de soldadura orbital que permita realizar un cordón de soldadura sobre tuberías de acero de 360 mm hasta 920 mm de diámetro. Asimismo, este sistema automatizado debe detectar la junta de soldadura y ubicar la antorcha sobre esta, así que deberán presentarse simulaciones y experimentaciones que validen el comportamiento del sistema automatizado. Además, el diseño definitivo partirá de un diseño conceptual elaborado previamente, comprendiendo el diseño mecánico, electrónico y una propuesta del sistema de control. Finalmente, los planos mecánicos y eléctricos deberán elaborarse, así como las conclusiones y las recomendaciones.

La estructura de la tesis es la siguiente: el primer capítulo presenta los antecedentes y el estado del arte, en el segundo capítulo se presenta el diseño conceptual de la presente tesis, en el tercer capítulo se desarrolla el diseño mecánico de los múltiples sistemas, en el cuarto capítulo se desarrolla el diseño electrónico y los componentes a utilizar, en el quinto capítulo se presentan las simulaciones y los experimentos que validan el sistema automatizado, en el sexto capítulo se presenta la leyenda de planos mecánicos y electrónicos, y costos de implementación; por último, en el séptimo capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

El presente capítulo presenta el alcance y objetivos de la tesis; así como la metodología a implementar. Posteriormente, se realiza un análisis al marco histórico respecto a los sistemas automatizados de soldadura orbital de diámetro variable para tuberías en gaseoductos y oleoductos.

1.1. Alcance de la tesis

La presente tesis tiene como alcance el diseño de un sistema automático de soldadura orbital para tuberías de 360 mm a 920 mm. Los parámetros de entrada son los siguientes: avance del electrodo, posición de la antorcha, cantidad de cordones. Como resultado se debe tener un sistema automatizado verificado por experimentaciones y simulaciones.

Dicho objetivo se pretende alcanzar por medio de la integración de diferentes dominios: electrónico, mecánico y de control. La máquina debe posicionarse sobre la junta y debe realizar la soldadura adecuada de manera autónoma. El usuario solo interactúa con la máquina estableciendo los parámetros de soldadura. Además, el sistema automatizado poder acoplarse a un vehículo autónomo que transportará la máquina a lo largo de la tubería

1.1.1. Objetivo general

El objetivo general de la tesis es el diseño de un sistema automatizado de soldadura orbital para tuberías de diámetros desde 360 mm hasta 920 mm

1.1.2. Objetivos específicos

- Diseñar el sistema mecánico de sujeción para tuberías de diámetros entre 360 mm hasta 920 mm y un sistema mecánico de translación que se desplace alrededor de la tubería.
- Diseñar sistema eléctrico y electrónico que permita energizar los diferentes actuadores empleados en el diseño mecánico, así como leer las señales de los sensores.
- Diseñar el sistema de control para posicionar la antorcha de soldadura sobre la junta de soldadura.

1.2. Metodología

La siguiente tesis implementará la metodología alemana VDI 2221. Esta metodología brinda un enfoque sistemático del diseño de productos técnicos. Las fases son las siguientes: Idealización, Desarrollo Conceptual y Básico, Desarrollo avanzado y Lanzamiento.

Primera fase, se desarrolla el Estado del arte en donde se realizan referencias comerciales, patentes y las herramientas para la integración de diferentes dominios. Además, se elaborará la lista de exigencias de la tesis. Segunda fase, en el Diseño Conceptual se definen las funciones de los sistemas, la estructura de funciones de los diferentes dominios, la matriz morfológica y conceptos soluciones integrados; por último, la preselección del concepto solución óptimo. Tercera fase, Desarrollo Definitivo en la cual se detallan los cálculos para el diseño de los diferentes mecanismos y componentes a utilizar. Cuarta fase, se realizarán las simulaciones, posibles mejoras y la estimación del costo del proyecto.

1.3. Marco Histórico

Los materiales empleados para los ductos de gas natural se rigen bajo la norma API 5L y las Normas Técnicas Peruanas Norma Técnica Peruana (2014). Los materiales utilizados para la fabricación de los ductos de hidrocarburos son acero al carbono de grado A25 hasta X80 con espesores que varían dependiendo del diámetro exterior de la tubería y la presión interna requerida en esta. Por ejemplo, para tuberías de 14 in (360 mm) hasta 32 in (820 mm) los espesores oscilan desde 0.2 in (5 mm) hasta 1.250 in (32 mm).

Es obligatorio y necesario establecer un procedimiento de soldadura antes de realizar este proceso en producción. Esto garantiza la obtención de cordones de soldadura con excelentes propiedades mecánicas API 1104 (1999). A continuación, se enlistan los parámetros relevantes para el diseño de cordones de soldadura en tuberías:

- Los accesorios y el material de tuberías según API 5L.
- El proceso con el que se realiza la soldadura: manual, semiautomático o automático.
- El diámetro exterior y espesor de pared en el cual se realizará el procedimiento.
- El tipo de junta en el cual se indiquen los ángulos de bisel, la abertura de raíz y el tamaño del talón API 1104 (1999).
- Especificar si se utilizará material de aporte y qué tipo según la norma AWS A5.
- Especificar el rango de voltaje y amperaje para cada electrodo, así como la polaridad.
- Especificar el tipo de llama a utilizar (neutra carburante u oxidante), y el tamaño del rip de la antorcha según la norma API 1104.
- Definir si la tubería estará fija o será girada; la dirección de soldadura puede ser ascendente o descendente.
- Establecer el tiempo máximo entre la culminación del cordón de raíz y el inicio del segundo cordón, además el tiempo máximo entre el segundo cordón y el resto de los cordones a realizar API 1104 (1999).
- Es necesario indicar el tipo de dispositivo de alineación el cual puede ser interno o externo.
- La selección de este dispositivo indica el mínimo porcentaje de cordón de raíz necesario antes de desmontar dicho dispositivo.
- El rango de velocidad de avance, gas de protección a utilizar, así como su caudal, y el pre y pos-calentamiento.

En la actualidad, existen diferentes procesos de soldadura como, por ejemplo, procesos SMAW (Soldadura de Arco Eléctrico Manual), SAW (Soldadura por Arco Sumergido), GTAW (Soldadura de Arco Eléctrico con Gas Tungsteno), GMAW (Soldadura por Arco Protegido con Gas Protector), FCAW (Soldadura por Arco con Núcleo de Flujo) o alguna combinación de estos por medio de técnica manual, semiautomática, automática. Los procesos primordiales para el desarrollo de esta tesis es el proceso de soldadura automática TIG (soldadura con gas Tungsteno) y MIG (soldadura con gas protector de metal).

Además, se pueden encontrar múltiples patentes y máquinas comerciales que se encargan del desarrollo de todo el cordón de soldadura, mientras el operario solo se encarga de supervisar y

establecer los parámetros para la realización del cordón. Existen múltiples ventajas respecto a los procesos manuales: mejor calidad en el cordón de soldadura con menor porosidad y sobremonta, mayor producción y disminución de mermas; en consecuencia, reducción en los costos de producción Gamba (2016).

El proceso de soldadura TIG utiliza un gas de protección, siendo el Argón el más empleado, para metal fundido (Figura 1.1) Vemetool (2010). Además, la soldadura TIG emplea un electrodo de Tungsteno no consumible de alto grado de fusión cuyo rango de diámetros es desde 2,38 mm hasta 6,35 mm; este valor depende del tipo de espesor de material a soldar. Este proceso se puede aplicar a una amplia gama de materiales como acero hasta aluminio.

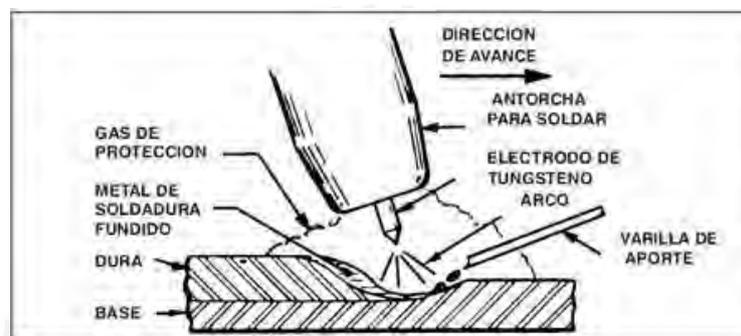


Figura 1. 1 Soldadura de arco con atmósfera de gas inerte (TIG)

Consulta: <https://docplayer.es/11383766-Manual-de-soldadura-cortesia-de-proceso-tig-gtaw.html>.
Revisado el 20 de abril del 2022

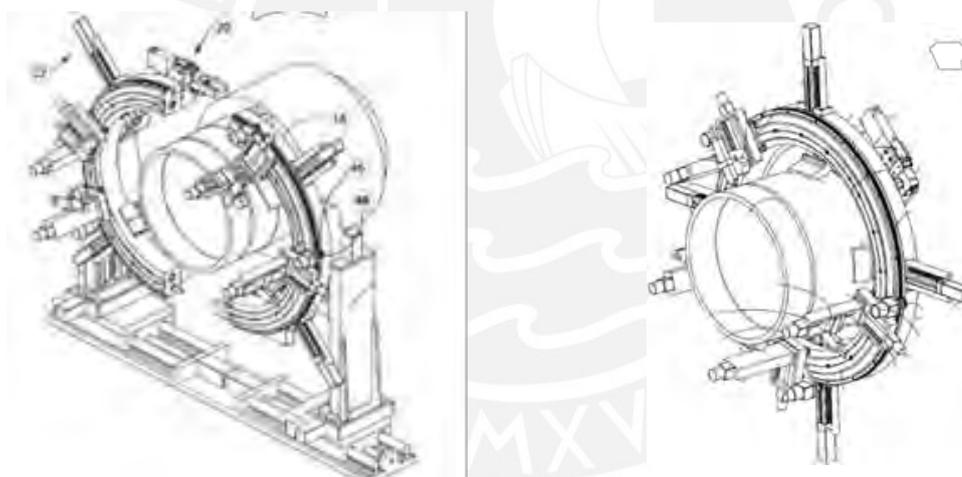
El proceso de MIG se realiza mediante una transferencia por cortocircuito, en la cual la fusión se realiza entre el electrodo consumible con el metal base Siguenza (2018). En este proceso de fusión se utiliza un electrodo consumible con bajo punto de fusión y gas protector. Las ventajas de este proceso son las siguientes: se requiere menor limpieza de salpicaduras al terminar el cordón, adecuado para grandes espesores y la velocidad de deposición son superiores al proceso SWAM Duran y Canchila (2016).

Las máquinas utilizadas en la industria para los procesos de soldadura son robots brazos articulados, tractorares orbitales y máquinas CNC.

- Brazos articulados: Diminución de mermas y aumento en la repetitividad. Se ha masificado su uso reduciendo los tiempos de producción garantizando alta fiabilidad y óptimos resultados.
- Maquinas CNC: Estas máquinas permiten realizar soldaduras rápidas y eficientes. Utilizan control numérico y poseen 3 grados de libertad.

- Tractores orbitales: Sistemas automotrices que se desplazan alrededor de la tubería por medio de rieles. Poseen cuatro grados de libertad: ángulo antorcha, movimiento lateral, velocidad de avance y el Stick-out Siguenza (2018). Por otro lado, pueden incluir un sistema de seguimiento de soldadura y un sistema de control para posicionar la antorcha.

Múltiples sistemas automatizados para soldadura orbital se han patentado. Un ejemplo de ello es presentado en (EP2543460A1). Se diseña una máquina orbital para soldadura con dos anillos divididos de sujeción como se aprecia en la Figura 1.2.a y 1.2.b. Los aspectos más relevantes que se pueden rescatar son los siguientes: esta cuenta con múltiples módulos de soldadura (22) con un sistema de riel (16) y un piñón (46) impulsados por un motor (48). La máquina está dividida en dos permitiendo un acople y desacople de la tubería accionando clamps (20). Además, cuenta con actuadores lineales (22) los cuales mantienen concéntrico la tubería y permiten soldar múltiples diámetros de tuberías.



a) Sistema desacoplado

b) Sistema acoplado

Figura 1. 2 Sistema automatizado de soldadura orbital. Patente (EP2543460A1)

Otras patentes presentan el diseño de tractores soldadores los cuales se acoplan y desacoplan a rieles los cuales les permiten desplazarse sobre la tubería. La máquina de soldadura orbital con rodillos laterales con curvatura de radio variable dependiendo del diámetro de la tubería (KR20120133357A) se presenta en la Figura 1.3.

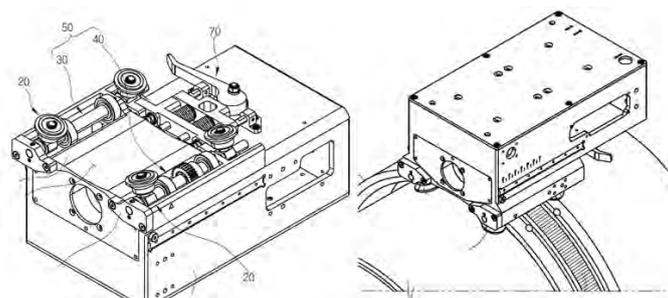


Figura 1. 3 Tractor soldador con rodillos laterales de curvatura de radio variable

Se utiliza un sistema de palanca (70) el cual cuenta con un par de resortes permitiendo establecer un mejor ajuste entre el riel (90), y los rodillos laterales (20) que se extienden al aumentar el área de contacto. También, se utilizan dos pares de ejes (50) para mantener estable el módulo durante el transporte. El módulo cuenta con un piñón el cual es accionado por un motorreductor Jeongmin (2012).

Debido al gran potencial que estos sistemas automatizados de soldadura orbital presentan, empresas como LINCOLN GLOBAL (US2015129581A1) han fabricado productos como el presentado en la Figura 1.4. Este sistema cuenta con una antorcha de soldadura TIG/MIG (30), con un electrodo (32) y un alimentador de alambre para el depósito del material de soldadura en la junta de soldadura (Z).

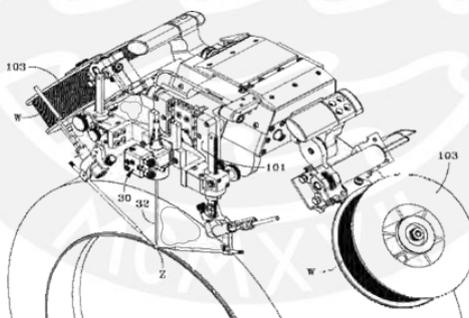


Figura 1. 4 Lincoln Global sistema automatizado de soldadura orbital

Al soldar placas gruesas o tuberías de pared gruesa, el diseño de la junta soldada proporciona ranuras estrechas que permiten que se coloque un electrodo alargado en la junta. Se requiere un ajuste del ángulo de la antorcha para asegurar una buena soldadura. Una de las consideraciones en el entorno de la ranura estrecha es mantener suficiente gas protector para proteger el charco de soldadura fundida de la contaminación atmosférica. Por ello, la antorcha de soldadura está conectado a un suministro de gas protector (102), como el Argón. Este gas protector (S) almacenado a presión debe ser suministrado por medio de tuberías adecuadas y debe ser controlado por un regulador y controlador (107).

Lincoln Electric ha lanzado al mercado diseños de soldadura orbital automatizada; por ejemplo, el modelo APEX™ 2100 Orbital Welding System presentado en la Figura 1.5. Este producto cuenta con los siguientes subsistemas: Mando de control, Tractor soldador, anillo de desplazamiento y fuente de alimentación.



a) Lincoln Electric APEX 2100

b) Lincoln electric Helix Track

Figura 1. 5 Lincoln Electric sistema automatizado de soldadura orbital.

Consulta: <https://www.fronius.com/it-it/italy/energia-solare/installatori-e-partner/prodotti-e-soluzioni/features/funzione-di-backup>. Revisado el 19 de abril del 2022

Fronius es otra empresa dedicada al desarrollo de máquinas automatizadas de soldadura orbital como el producto FlexTrack 45 Pro presentado en la Figura 1.6, la cual resalta por su versatilidad y accesibilidad. Los rieles que modifican su forma para adecuarse a cualquier superficie: rectos o de anillos. Cuenta con una Caja de Control en el interior para comunicar sistema mecánico y el mando a distancia. Además, un grupo de guías motorizadas le permite ajustar la distancia entre la antorcha y la junta de soldadura controlando así el arco.



Figura 1. 6 Fronius Flextrack 45 Pro

Consulta: <https://www.weldsafe.co.uk/fronius-flextrack-45-pro-c-9-p-4889>. Revisado el 19 de marzo del 2022

La Tabla 1.1 presenta un resumen de las características de los diferentes productos comerciales de sistemas automatizados de soldadura orbital.

Tabla 1. 1 Comparación de máquinas comerciales

Características	Fronius Flextrac 45 pro	Helix T55 y Aro	Lincoln One Pack
Procesos de soldadura	MIG/MAG CTM	TIG	TIG
Voltaje de entrada	115/230 V	25 VDC	115 VDC
Corriente de entrada	50/60 Hz	-	50/60 Hz
Peso dimensiones	45/30 Kg 400x200x550 mm	25.9 Kg Radial/Axial 140/295 mm	35.4 Kg 876x241x668 mm
Controlador	SI	-	SI
Soldadura en tiempo real	-	-	SI
Ergonomía	SI	SI	SI
Durabilidad	Bajo condiciones adversas	-	Maltrato ambiental
Integración	Compatible con fuentes de potencia TPS/i	Reubicación rápida de cabezal	Fácil integración
Modular	SI	NO	NO
Valor de protección IEC	IP 23	NO	NO
Velocidad de desplazamiento	5—300 cm/min	1-20 imp. (25-500 mm)	-

Existen un sinnúmero de inconvenientes que propician al tractor soldador a desviarse de la trayectoria de la junta de soldadura. Por ejemplo, el desplazamiento del sistema automatizado puede generar desalineaciones axiales de las tuberías, y/o debido a la perpendicularidad imperfecta de los soportes del sistema de sujeción respecto a la tubería; además, cualquier irregularidad en el material de las tuberías como grietas afectan el perfil a soldar cuyo eje puede estar parcialmente fuera de la sección transversal perpendicular ideal. Por lo tanto, el cordón de soldadura será de baja calidad si no se aplican medidas correctivas Rinaldi y cols. (1998).

De la literatura, existe cierto grupo de sistemas mecánicos en los cuales se mantiene una posición fija para la antorcha de soldadura. Sin embargo, este método presenta limitaciones y se utiliza principalmente en procesos de soldadura con corto periodo de tiempo o no hay ningún tipo de desalineamiento en las tuberías Rieder (2015). Por ello se han implementado las siguientes soluciones:

- Sistema de Seguimiento Táctil: Se utiliza una pieza mecánica de alta sensibilidad que hace contacto con la junta de soldadura. Un software permite saber cuánto es la desviación de la punta de la pistola de soldadura respecto al puntero. La mayor desventaja de este sistema es el tiempo de trabajo en cada búsqueda Rieder (2015).
- Sistema de Seguimiento Láser: En este sistema de seguimiento se utiliza un láser, el cual

es proyectada sobre la superficie de la junta. Este laser es analizado por una cámara o sensores; esto permite realizar cordones de soldadura con gran exactitud a pesar de que las piezas no se encuentren bien alineadas. Rieder (2015)

En la siguiente patente se detalla el circuito embebido, incluido en los tractores automatizados, como sistema de medición (20) de tipo láser (Figura 1.7.). El sistema se desplaza transversalmente por medio de un tornillo sinfín motorizado (220). El rayo r_i incide sobre un punto en la junta de soldadura y se refleja r_r ; por lo tanto, para cada distancia L entre el sensor y la tubería, el rayo r_r será diferente. Para cada valor r_r , el sensor envía una señal de corriente con diferente magnitud; este pulso eléctrico es procesado por un circuito (21), tal que la salida es la distancia L_x . En la unidad de Cálculo (22) con los valores de las distancias obtenidas, se reconstruye topológicamente los perfiles de la junta de soldadura (PC_x) y se compara con los perfiles ideales de la junta de soldadura (PT_x) almacenados en una EEPROM (23). Un circuito procesador (25) y un circuito comparador (24) procesan los perfiles y envían los resultados a un microcontrolador (26), el cual da las señales a los actuadores para corregir los defectos Rinaldi y cols. (1998).

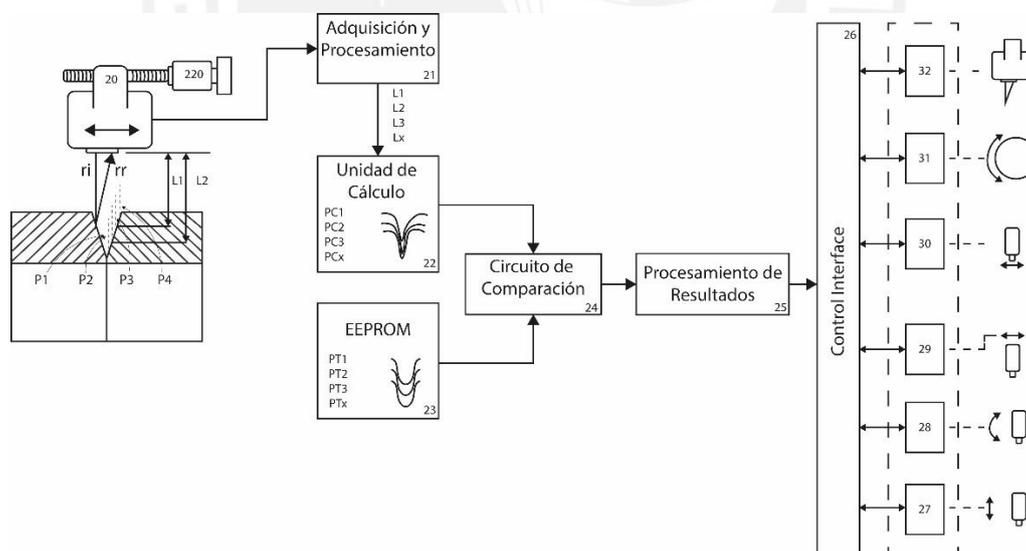


Figura 1. 7. Sistema de medición topológica

Consulta: Adaptación de Rinaldi y cols. (1998). Revisado el 19 de marzo del 2022

La aplicación de esas metodologías de detección de juntas la aplicó la empresa Servo-Robot diseñó el modelo i-CUBE. Este es un multisensor compactado en un cubo, el cual puede ser integrado a múltiples robots industriales. Servo Robot Inc (2013). Este producto cuenta con

una plataforma en la cual se desarrolla la programación de la información recopilada. La Tabla 1.2. presenta una comparación entre los diferentes sistemas de medición implementados.

Tabla 1. 2 Sistemas de medición topológica

	Fronius Flextrac 45 pro	Helix T55 y Aro
Buscador de junta	Si	Si
Seguidor de junta	Si	No
Capacidad Adaptativa	Si	Limitado
Tipos de juntas	Todas	V
Tipo de materiales	Materiales no reflectantes	Todos
Separación mínima de biseles	0.8 mm	2 mm
Complejidad de programación 1-5	4	2
Mantenimiento requerido 1.5	3	1
Procesos de soldadura	Mejora de procesos	Mayoría de procesos

Para elaborar sistemas más económicos, se opta por realizar sistemas de control de lazo cerrado basados en un microcontrolador y drivers; esto permite accionar y corregir las velocidades de los motores DC utilizados. La siguiente tesis, Prototipo de Cabezal de Soldadura Orbital para el pase de raíz en tubería de 8 pulgadas con proceso FCAW, desarrolla el algoritmo de control con PWM (Pulse Width Modulation). Con esta señal de control e incluido unos drivers permiten controlar el desplazamiento de la antorcha de soldadura. Conociendo la velocidad a la que giran los motores se puede modificar este valor para acercarlo más a la velocidad de referencia. En el caso de querer incrementar la velocidad del motor es necesario aumentar la duración en alta (duty cycle) de la señal PWM; para disminuir la velocidad, se disminuye la duración de la señal PWM.

Los motores DC encargados del desplazamiento cuentan con drivers Puente H constituido por 4 mosfet, Figura 1.8. los cuales dependiendo de la corriente de entrada que se le administren se puede controlar el sentido de giro de los motores DC: avance y retroceso con una corriente máxima de 10A.

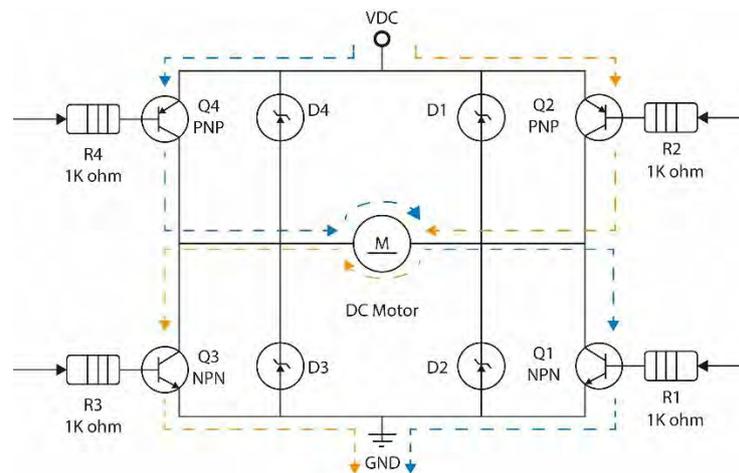


Figura 1. 8. Driver para motor puente H

Consulta: Adaptación de Aucancela Verónica. Revisado el 19 de marzo del 2022

Respecto a los anillos de sujeción, muchos de los trabajos reportados en la literatura no cuentan con un sistema de enganche el cual les permita adherirse a un vehículo de transporte y ser desplazados a otros terminales de los ductos. Además, estos no incluyen un sistema autónomo que les permita engancharse y desacoplarse del ducto, lo cual requiere la presencia de un operario. Por último, se recalca la necesidad de que los anillos de sujeción incluyan soportes o un mecanismo para ajustarse a tuberías de diferentes diámetros.

Mientras que, respecto a los tractores soldadores, en la literatura se han presentado muchos sistemas que se desplazan alrededor de una tubería como los presentados en Mustafa (2016) y Shi (2015). Sin embargo, estos diseños no cuentan con un sistema de control que permita mantener una posición de referencia para la antorcha, lo cual conlleva a un desalineamiento de esta. Por otro lado, tampoco cuentan con un sistema que permita detectar la junta de soldadura y ubicar la antorcha sobre esta.

CAPÍTULO 2

Diseño Conceptual

Dada la exhaustiva revisión del estado del arte del arte y siguiendo la metodología VDI 2206, se elaboró diseño conceptual del sistema automatizado para soldadura orbital de tuberías de diámetros 360 a 920 mm.

2.1. Lista de exigencias

En la Tabla 2.1 se detallan los requerimientos que deben ser cumplidos al momento de desarrollar la presente tesis. Algunos de los corresponden a las siguientes funciones: Función principal, Geometría, Materia, Energía, Señales, Control, Uso, Mantenimiento, entre otros.

Tabla 2. 1 Lista de requerimientos para el diseño del módulo de ensayos

Área	Descripción
Función principal	Ubicar y posicionar una antorcha de soldadura alrededor de tuberías de diámetro de 360 a 920 mm validando el sistema por medio de simulaciones y experimentaciones
Geometría	La zona de trabajo de la máquina tendrá un diámetro máximo de 1500 mm y su longitud lateral máxima de 0.6 m (desde la parte delantera de la antorcha hasta la parte posterior)
Cinemática	Se debe controlar la velocidad de desplazamiento de la máquina de soldadura siendo esta como mínimo 60 mm/seg.
Energía	Los circuitos empleados deben tener una protección IP32 del estándar 60529 del IE, para evitar la humedad y polvo. La fuente de alimentación es de 220 V 60Hz
Materia	El producto de entrada serán dos tuberías biseladas: chaflán doble Y, chaflán simple en V, Chaflán simple o doble en U o chaflán escarpado, con cualquier ángulo y niveladas. El producto de salida serán las dos tuberías soldadas adecuadamente y el espacio entre el tubo y el suelo debe ser superior a 400 mm
Señales	La máquina deberá contar con señales visuales de inicio y fin del proceso, así como señal de parada de emergencia
Control	Se desarrollará un control que permita mantener posicionar la antorcha sobre la junta de soldadura.
Comunicaciones	El sistema de comunicación permitirá implementar múltiples protocolos de comunicación como RS-232 para el intercambio de datos entre dispositivos.

Área	Descripción
Seguridad	El diseño de la máquina se realizará velando por la seguridad del operario que hará uso de ella, respetando las directrices de la Directiva Europea 2006/42/CE referente al diseño de máquinas, así como se evitará la presencia de fallos para proteger a la máquina de cortocircuitos o sobrecargas que se puedan generar. El diseño seguirá el Reglamento de Seguridad en las máquinas (198607-005) para el montaje, uso y mantenimiento
Montaje	El sistema debe ser transportado por un vehículo automático que permite alcanzar la altura de un ducto para el montaje y para el desmontaje del sistema automatizado.
Ergonomía	Los módulos de cada proceso de la máquina estarán dispuestos de forma eficiente y ordenada en base a la Norma Básica de ergonomía y de procedimiento de evaluación de riesgo Disergonómico.
Uso	La máquina podrá usarse en un ambiente de diferentes altitudes, zonas libres de contaminación y un clima favorable para el proceso de soldadura. La altura mínima del centro del ducto será de 2000 mm.
Mantenimiento	El sistema debe ser modular y debe permitir el mantenimiento correctivo preventivo de modo que el técnico tenga acceso a todos los componentes del sistema automatizado.

2.2. Determinación de la secuencia de operaciones

El sistema automatizado a diseñar cuenta con cuatro dominios. En el Dominio Mecánico se encuentran los procesos mecánicos realizados por la máquina automática iniciando desde anclarse sobre la tubería hasta transportar la antorcha. El Dominio Electrónico cuenta con diferentes operaciones de toma de datos de los cuales al procesarlos se pueden tomar acciones respecto a los actuadores. El Dominio de Control es el encargado de realizar los algorítmicos de control y tomar las decisiones basado en las variables medias. Finalmente, el Dominio de Procesamiento de Señales con la cual se ubica la junta y se determina la separación de la antorcha y la junta de soldadura.

Los procesos que realizará el sistema mecánico son cerrar el sistema de sujeción, posicionar la antorcha sobre la junta de soldadura, ajustar la altura y el ángulo de la antorcha, transportar el tractor soldador alrededor de la tubería, y liberar el sistema de sujeción. Por otro lado, los procesos del sistema electrónico constan del acondicionar la energía eléctrica, detección de las señales de inicio, detección de la junta de soldadura, leer la velocidad de avance del tractor soldador, y energizar los sistemas de desplazamiento. Por último, el dominio de control se encarga de calcular diámetro de la tubería, calcular ubicación de la junta, y calcular velocidad de avance. Finalmente, el dominio de procesamiento de señales se compone del análisis de señales, obtención ubicación de la junta de soldadura, Determinar separación entre juntas de soldadura. En la Figura 2.1 se presenta la secuencia de operaciones a realizar por el sistema automatizado.

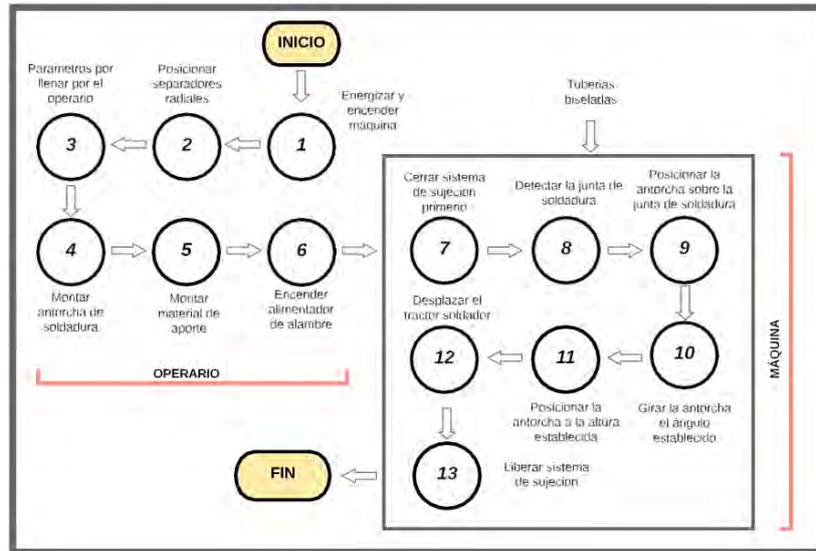


Figura 2. 1 Diagrama de operaciones

2.2. Diseño conceptual de un sistema automatizado de soldadura orbital

Tras un análisis exhaustivo de las alternativas de diseño en el trabajo de investigación “Diseño conceptual de un sistema automatizado de soldadura orbital de tuberías de 360 a 920 mm”, se seleccionaron los conceptos solución mecánico y eléctrico. El sistema mecánico cuenta con dos subsistemas: Sistema Tractor Soldador y Sistema de Sujeción representados en las Figura 2.2. y Figura 2.3, respectivamente.

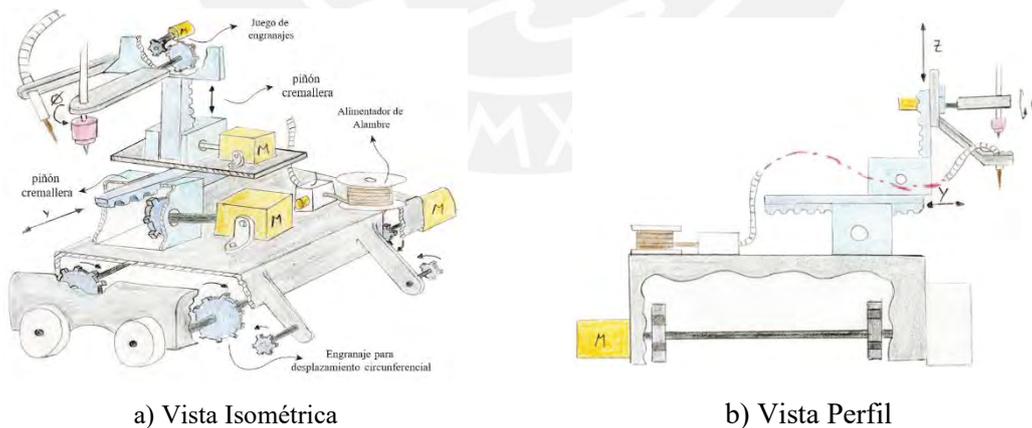


Figura 2. 2 Sistema Tractor Soldador

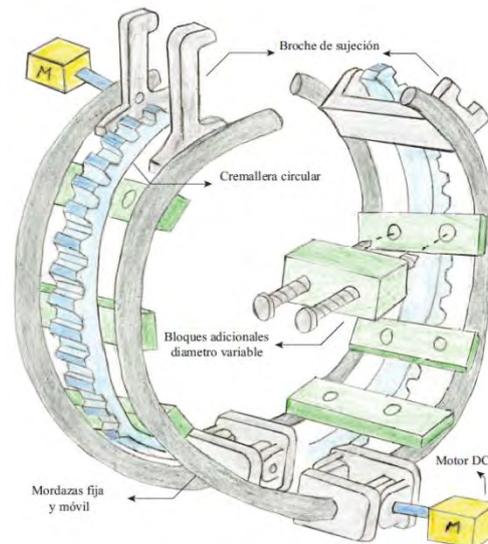


Figura 2. 3 Principales componentes del diseño mecánico

El Sistema de tractor soldador, utiliza un sistema de piñón cremallera para el desplazamiento en eje Y e Z. También, se utiliza un motor DC para conectado a un eje para rotar la antorcha de soldadura ϕ . Para desplazar el tractor soldador sobre la tubería se utiliza un sistema piñón cremallera circunferencial. Por último, se adiciona un espacio para los componentes electrónicos y el alimentador de alambre. El sistema de sujeción utiliza una cremallera circunferencial y guías lineales para trasladar el tractor soldador alrededor de la tubería; se utilizan actuadores lineales radiales para sujetar tuberías de diferentes diámetros; por último, se utiliza un motor DC para abrir y cerrar el sistema.

Capítulo 3

Diseño Mecánico del Sistema Autónomo de Soldadura Orbital

En el presente capítulo se establecerá el dimensionamiento de cada componente a utilizar en el dominio mecánico, así como la justificación teórica de los mismos, también se especificarán los requerimientos de los diferentes actuadores a utilizar y sus características técnicas. Por último, se mostrará el diseño 3D del sistema automatizado de soldadura orbital y los diferentes planos de ensamble y despiece procedentes de esta misma. Primero se desarrolla en el diseño del subsistema tractor soldador; luego se procede al diseño del subsistema de sujeción.

3.1. Subsistema Tractor Soldador

En la presente sección se desarrollan los cálculos y dimensionamientos, se determinan los requerimientos de actuadores y se concluye con el ensamble del tractor soldador.

3.1.1. Cálculos y dimensionamiento

En la Tabla 3.1., se hace una recopilación de todas las características mecánicas de los materiales a utilizar en los cálculos de este subcapítulo.

Tabla 3. 1 Propiedades mecánicas del acero AISI 1060

	Aluminio A6061	Acero A36	Acero St42
Densidad (ρ)	2 700 g/m ³	7 860 g/m ³	7 860 g/m ³
Esfuerzo de Fluencia (σ_F)	270 MPa	250 MPa	270 MPa
Esfuerzo máximo a la tracción (σ_B)	300 MPa	400 MPa	420 MPa
Módulo de elasticidad (E)	63 GPa	200 GPa	210 GPa
Esfuerzo alternante (σ_{Alt})	150 MPa	200 MPa	190 MPa

Se realiza los siguientes pasos para dimensionar el subsistema: Cálculos de la sujeción de la antorcha, Cálculos desplazamiento eje Z (altura de antorcha), Cálculos desplazamiento eje Y (posicionamiento de antorcha), Cálculos desplazamiento eje circunferencial.

A. Cálculos y dimensionamiento

Se puede utilizar cualquier antorcha de soldadura en el mercado. Sin embargo, para la presente tesis los datos de la antorcha de soldadura a utilizar serán de la empresa ERDtorches. Las dimensiones de la antorcha a utilizar es AutomatictorchAU T 42G – 180gas – Eurotype, Figura 3.1, cuyo peso es 2.75 kg y cuya manguera puede generar un torsor de 1 Nm sobre el eje.

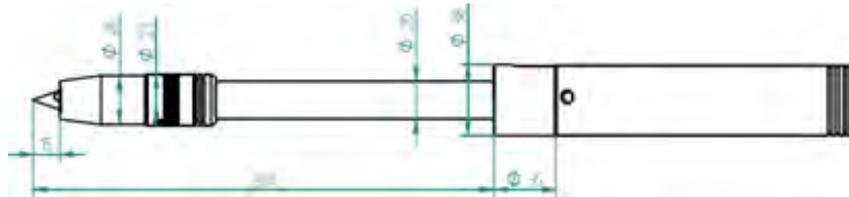


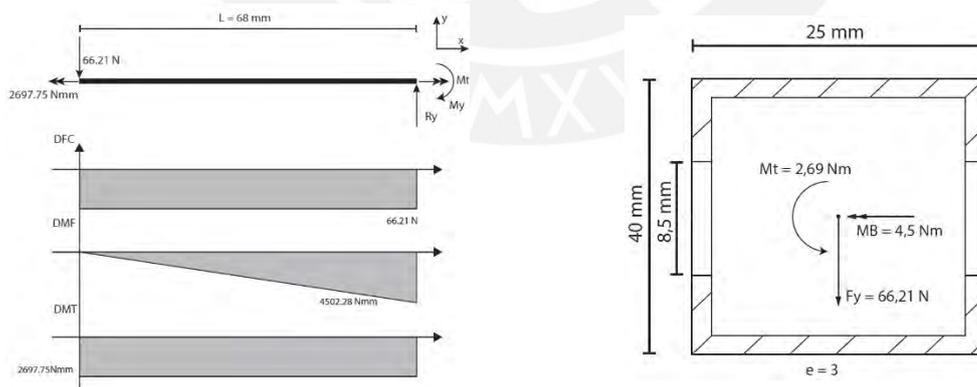
Figura 3. 1 Antorcha automatizada AUT42G-180° gas tipo europeo

Consulta: EDR torches. Revisado el 25 de marzo del 2022

Se asume el centro de gravedad de la manguera a 100 mm del eje, lo cual genera un torque sobre la sujeción de la antorcha, ecuación 3.1.

$$T_{manguera} = \text{Peso}_{manguera} * \text{distancia} * \text{gravedad} = 2697.75 \quad (3.1)$$

En la Figura 3.2.a se muestra el diagrama de Fuerzas y Momentos sobre el perfil de sujeción de la antorcha. Se utiliza aluminio A6061 y se analiza los esfuerzos según la ecuación 3.2 en la sección crítica como se aprecia en la Figura 3.2.b



a) Giro Diagrama de Fuerzas y Momentos Eje

b) Sección Crítica

Figura 3. 2 Eje de sujeción antorcha

$$\text{Esfuerzo de flexión: } \sigma_F = \frac{M_x * y}{I_x} = 0,75 \frac{N}{mm^2} \quad (3.2)$$

$$\text{Esfuerzo de torsión: } \tau_{prom} = \frac{M_t}{2 * t * Area_{media}} = 1,16 \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{Esfuerzo cortante: } \tau_c = \frac{F}{Area} = 0,18 \frac{N}{mm^2}$$

Se determina el esfuerzo equivalente, siendo este menor al esfuerzo de fluencia con FS.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_f + \sigma_n)^2 + 3(\tau_c^2 + \tau_t^2)} = 2,16 \frac{N}{mm^2}, \sigma_{eq} \leq \frac{\sigma_F}{FS} \quad (3.3)$$

La Figura 3.3. muestra todas las piezas metálicas a utilizar en el ensamble del soporte de la antorcha. Los planos de fabricación y ensamble se encuentran en el Anexo B.



Figura 3. 3 Ensamble soporte de la antorcha

Fuente: Elaboración Propia

B. Cálculos desplazamiento eje Z (altura de antorcha)

Primero se estima el peso a ser elevado en 6 kg y se establece la velocidad lineal en $v=5$ cm/seg y la aceleración lineal en $a = 10$ cm/sec². Se utilizará un mecanismo de piñón cremallera y se utilizará el procedimiento de selección de la empresa KOOM (Figura 3.4) con un factor de seguridad recomendado de 2,22.

$$\text{Fuerza vertical real : } F_t = (6kg) * (9,81 + a) = 58,92N \quad (3.4)$$

$$\text{Fuerza tangencial corregida : } F_v = F_t * 2,22 = 130,8N$$

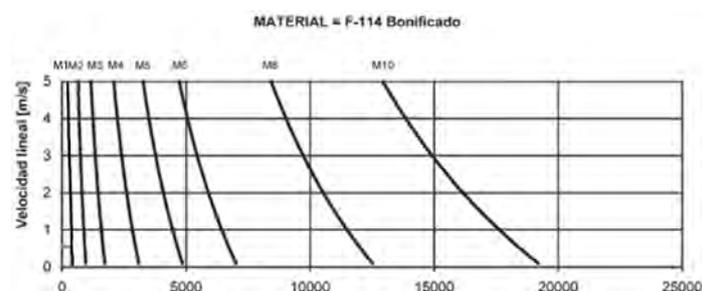


Figura 3. 4 Selección del módulo de la cremallera circular

En la Tabla 3.2 se presentan los datos del piñón y los parámetros para su diseño. Y se calculan las revoluciones necesarias en el piñón y el Par de giro en la ecuación 3.5 y 3.6.

Tabla 3. 2 Datos extrapolados piñón Lifgo PFN 5

Propiedad	Abreviatura	Valor
Angulo de presión	α	20
Módulo	m	1
N° de dientes	-	20
Diámetro primitivo	$\phi_p = z * m$	20 mm
Paso	$p = \pi * m$	3.1415 mm
Adendum	$h_a = m$	1 mm
Deddendum	$h_f = 1,25m$	1.25 mm
Diámetro exterior	$\phi_{exterior} = \phi_p + 2 * h_a$	22 mm
Diámetro interior	$\phi_{interior} = \phi_p - 2 * h_f$	17.5 mm
Espesor y hueco	$s = e = 2$	1.57 mm
Ancho de cara	$b = 12 * m$	12 mm
Redondeo en el diente	$r = 0,3 * m$	0.3 mm
Espacio entre cremallera y piñón		0.1<1<0.2 mm

$$\omega = \frac{v * 6 * 10^4}{\phi_p * \pi} = 26,52 \text{ rpm} \quad (3.5)$$

$$M = \frac{\phi_p * F_v}{2,000 * 0,9} = 4,12 \text{ Nm} \quad (3.6)$$

Resistencia a la fatiga en la raíz del diente, material recomendado acero bonificado CK45 DIN 172000. Primero se calculan los factores que afectan el esfuerzo aplicado y el esfuerzo pulsante de flexión en la raíz del diente, expresados en la Tabla 3.3 y 3.4 respectivamente. Posteriormente se determina la tensión nominal en la raíz del diente y la tensión admisible según la ecuación 3.7 y 3.8 y se verifica que cumpla $\sigma_{FN} \leq \sigma_{FP}$. El módulo de piñón cremallera a comprar de la empresa son los siguientes: piñón, Lifgo®linear PFN 5.0 con el código 500 045; cremallera, Lifgo®linear rack 5.0 con el código 500 117 Z=200.

Tabla 3. 3. Factores de esfuerzo aplicado

Propiedad	Propiedad	Valor	Ubicación
Factor de forma	Y_{Fa}	3.0	Anexo A
Factor de concentración de tensión	Y_{Sa}	1.55	Anexo A
Módulo ángulo de presión	E_β	1.39	
Factor de inclinación	Y_β	0.62	Anexo A
Factor de engrane	Y_ϵ	0.74	Anexo A
Factor de servicio	K_A	1.0	Norma DIN3990

Tabla 3. 4 Factores de esfuerzo pulsante

Propiedad	Abreviatura	Valor	Ubicación
Factor de seguridad mínima	SF_{min}	1.7	Norma DIN 3990
Factor de corrección de tensión	Y_{ST}	2.0	Ing. Mecánica PUCP
Cifra relativa de apoyo (entalla)	$Y_{\delta rel.T}$	0.95	Anexo A
Factor de acabado superficial en el redondeo	$Y_{Rrel.T}$	1.06	Anexo A
Factor de tamaño	Y_x	1	Anexo A
Factor de duración	Y_{NT}	1.8	Anexo A

$$\sigma_{FN} = \frac{F_v}{b * m} * K_A * Y_{Fa} * Y_{Sa} * Y_{\epsilon} * Y_{\beta} = 15,64 \frac{N}{mm^2} \quad (3.7)$$

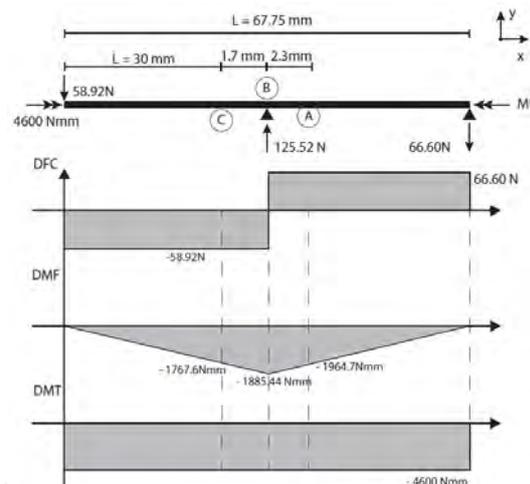
$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{FLim}}{SF_{min}} * Y_{ST} * Y_{\delta rel.T} * Y_{Rrel.T} * Y_x * Y_{NT} = 426,49 \frac{N}{mm^2} \quad (3.8)$$

Luego, se procede a seleccionar el motor, el dimensionamiento del árbol de transmisión y los acoples. De la ecuación 3.5 y 3.6 se obtiene el torque necesario en el engranaje y la velocidad angular: $M_t = 4,12 \text{ Nm}$ y $\omega = 26,52 \text{ rpm}$. Por lo tanto, se comparan diferentes motores disponibles en el mercado, Tabla 3.5 y se selecciona el motor DC PENTA 4S porque este puede ser usado de manera continua y permitirá la implementación de un controlador. Se añade un reductor planetario de relación de transmisión 1:5 de la empresa DAMEN CNC con el código 3988 DCNC-PG-F60 I=5 Planetary Gearbox que permita obtener el torque deseado y mantener un torque de retención.

Tabla 3. 5 Motores para desplazamiento en el eje Z

Marca	Electro Creaft Nema 34	Nema 34 phyBASIC86-2	PENTA 4S 20
			
Potencia (W)	160	240	200
RPM	22.5	220	2000
Torque (Nm)	4.20	3.80	0.95
Eje (mm)	8	12.7	11
Dimensiones (mm)	88x88x90	86x86x108	Ø90x150
Voltaje (V)	80	36/48/72	24/48
Amperaje (A)	2	5	11.11
Peso (Kg)	2.268	2.7	4

Posteriormente, se diseña el árbol de transmisión cuyo material es acero St42 o AISI 1024. En la Figura 3.5 se muestra el diagrama de esfuerzos; el cálculo tentativo para flexión y torsión con un factor de seguridad de 2.5 se presentan en las ecuaciones 3.9 y 3.10.



a) Diseño vista isométrica

b) Arbol Diagrama de fuerza y Momentos

Figura 3. 5 Árbol de transmisión

$$\text{Esfuerzo de torsión } \tau_t = \frac{16 * M_t}{\pi * d^3} = 6,94 \frac{N}{mm^2} \quad (3.9)$$

$$\tau_t = 6,94 \leq \tau_{adm} = \frac{\tau_{tPul}}{FS} = \frac{150}{2,5} = 60 \text{ Cumple!!} \quad (3.10)$$

Se realiza el análisis de fatiga en las secciones A, B y C y se define el esfuerzo alternante puro ya que el árbol gira, ecuación 3.11. Se selecciona un diámetro de 10 mm y se analiza en las secciones A B y C. Los factores de corrección se presentan en la Tabla 3.6

$$\sigma_{fm} = \tau_a = 0$$

$$\sigma_{fa} = \sigma_{fs} = \frac{32 * M_f}{\pi * d^3} \quad (3.11)$$

$$\tau_m = \tau_{ts} = \frac{16 * M_t}{\pi * d^3}$$

Tabla 3. 6 Factores de corrección para árbol en el eje Z

Factores de corrección	Sección A	Sección B	Sección C	Ubicación
Confiabilidad 90 %	0.897			Anexo A
Carga Flexión y Torsión	1			Anexo A
Temperatura 20°C	1			Anexo A
Diámetro 10 mm	1			Anexo A
Rugosidad Rt 40 um	0.9			Anexo
$\beta_{Kflexin}$	1.25	2.5	2	Anexo A
$\beta_{Ktorsin}$	1.25	2.5	1.25	Anexo A
$M_{flector}$	1964.7	1885.44	1767.6	
M_{torsor}	4120			

Esfuerzo flector y torsor modificados están representados en la ecuación 3.12.a y 3.12.b, mientras que los esfuerzos equivalentes vienen expresados en la ecuación 3.12.c.

$$\tau_{ta'} = \frac{\beta_{Ktorsor}}{C_{confi} * C_{carga} * C_{temp} * C_{tamaño} * C_{rugosidad}} * \tau_a \quad (3.12.a)$$

$$\sigma_{fa'} = \frac{\beta_{Kflector}}{C_{confi} * C_{carga} * C_{temp} * C_{tamaño} * C_{rugosidad}} * \sigma_a \quad (3.12.b)$$

$$\sigma_{a'eq} = \sqrt{\sigma_{fa'}^2 + 3\tau_{ta'}^2}; \sigma_{meq} = \sqrt{\sigma_{fm}^2 + 3\tau_{tm}^2}; \sigma_{seq} = \sqrt{\sigma_{fs}^2 + 3\tau_{ts}^2} \quad (3.12.c)$$

Los factores de seguridad calculados, según la ecuación 3.13, se resumen en la Tabla 3.7.

$$Fatiga: \frac{1}{FS} = \frac{\sigma_{equiv}}{\sigma_B} + \frac{\sigma_{a'eq}}{\sigma_{Alt}}; Fluencia: Fs = \frac{\sigma_F}{\sigma_{seq}} \quad (3.13)$$

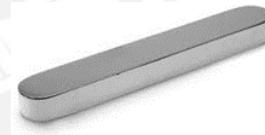
Tabla 3. 7 Factores de seguridad calculados

	Sección A	Sección B	Sección C
FS Fatiga	4.01	2.51	3.11
FS Fluencia	6.50	6.57	6.4

Se utiliza el Anillo de retención DIN 471 9x1 y chavetas planas según DIN 6885 A3x3x30 ilustrados en la Figura 3.6.



a) Anillo de retención



b) Chaveta plana

Figura 3. 6 Accesorios adicionales para el sistema de actuación en eje Z

Por último, se fabrica un soporte de aluminio A6061, Figura 3.7.a, para sostener el módulo LIFGO de piñón y un segundo soporte de la empresa Stepper Online con el código SKU:ST-M7 para sostener el motor, Figura 3.7.b. Estos van montados sobre una plancha metálica, a cuál se le hacen unos pliegues en los laterales para aumentar su rigidez y agujeros para su futuro ensamble con los subsistemas. Para finalizar, el ensamble del sistema de elevación (eje Z) se ilustra en la Figura 3.8. Los planos de fabricación y ensamble se encuentran en el Anexo B.



a) Soporte del módulo LIFGO



b) Soporte de motor

Figura 3. 7 Accesorios adicionales para el sistema de actuación en eje Z

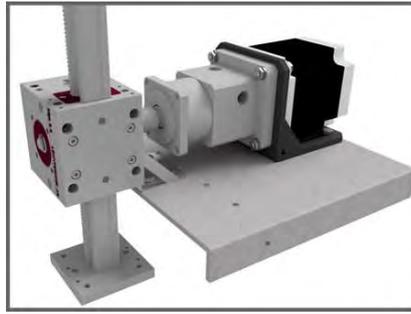


Figura 3. 8 Sistema de desplazamiento en el eje Z

C. Cálculos desplazamiento eje Y

Primero se establece una velocidad y aceleración lineal según la ecuación 3.14, luego se calcula la fuerza horizontal necesaria según la ecuación 3.15; posteriormente, se calcula el momento torsor y la velocidad angular del piñón. Para este procedimiento se utiliza el método establecido por la empresa Leantechnik para la selección de sus productos Lifgo.

$$V_{lineal} = 0,2 \frac{m}{seg}, a_{lineal} = 0,5 \frac{m}{seg^2} \quad (3.14)$$

$$F_{ht} = P(9,81 + a_{lineal}) = 103,1 N \quad (3.15)$$

$$F_{hc} = 2,5 * F_{ht} = 257,75 N$$

Los módulos de piñón cremallera a comprar de la empresa son los siguientes: piñón, Lifgo®linear PFN 5.0 con el código 500 045; cremallera, Lifgo®linear rack 5.0 con el código 500 117 Z=80, la eficiencia del módulo es 92 %. Los datos del piñón según DIN 780 a seleccionar son los mismos que se aprecian en la Tabla 3. 2. En análisis de resistencia del piñón cremallera es el mismo presentado en el cálculo del desplazamiento del eje Z.

$$M = \frac{\phi_p * F_{hc}}{2000 * \eta} = 2,64 \frac{N}{m} \quad (3.16)$$

$$\omega = \frac{V_{lineal} * 60000}{\phi_p * \pi} \approx 200 rpm \quad (3.17)$$

Sin embargo, en este caso hay que tener en cuenta el momento flector que genera la antorcha y todos los componentes utilizados sobre el módulo Lifgo. Por lo tanto, se comparan las cargas presentes con las permisibles por la empresa. El momento Flector es la expresión Mtx según la Figura 3.9; el peso total es aproximadamente 10 kg y a una distancia de 90 mm.

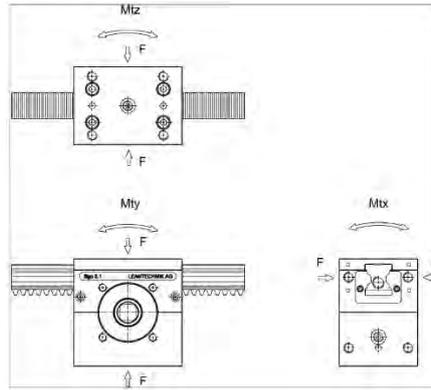


Figura 3. 9 Diagrama de fuerzas en el módulo Lifgo

$$M_{tx} = \text{Peso} * y = 8,829 \text{ Nm} \quad (3.18)$$

La Tabla 3.8. presenta las características del piñón cremallera de la empresa Lifgo y se comparan los datos obtenidos asegurando que satisfagan los requerimientos. Con los datos obtenidos en la ecuación 3.16 y 3.17 se selecciona el motor DC PENTA 4S presentada en la Tabla 3.5. Adicional a esto, se agrega un reductor planetario de relación de transmisión 1:5 de la empresa DAMEN CNC con el código 3988 DCNC-PG-F60 I=5 Planetary Gearbox. Este permitirá obtener el torque necesario y mantener un torque de retención.

Tabla 3. 8 Datos de fuerzas Lifgo Linear 5.0

Propiedad	Valor
Aceleración	50 m/s ²
Torque	20 Nm
Diámetro primitivo	20 mm
Eficiencia	0.92
Torque estático	570 Nm
Torque dinámico	280 Nm
Carga estática de retención	38400 N
Carga dinámica de retención	19100 N
Longitud avance por revolución	62.83 mm/360°

Por último, se requiere un Soporte como el mostrado en la Figura 2.4.a para sostener el motor. Dada las dimensiones de los componentes, se detecta interferencia entre el motor y el sistema de desplazamiento de eje Z; por ello, se adiciona un V-SLOT 25x25x250 mm para aumentar la altura de este sujetado en los extremos a la cremallera de la empresa Lifgo por medio de tornillos. Se presenta el ensamble completo del sistema de desplazamiento del eje Y, Figura 3.10.

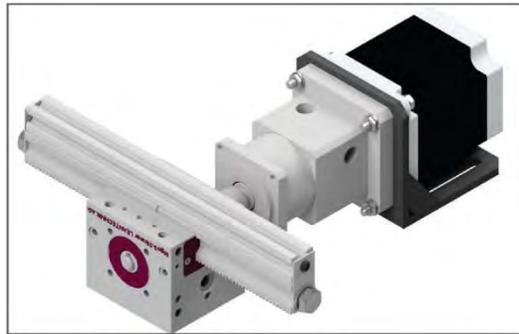


Figura 3. 10 Sistema de desplazamiento en el eje Y

D. Cálculos de desplazamiento eje circunferencial

Primero se analiza el punto crítico en toda la trayectoria, esto se da en el eje vertical como se aprecia en la Figura 3.11. Se determina por medio de un software CAD el centro de gravedad del tractor soldador a 160 mm y un peso aproximado de 15 kg. Esta carga es trasladada al punto de unión de los diámetros primitivos del piñón cremallera (A) y luego se traslada la carga al centro del piñón (O).

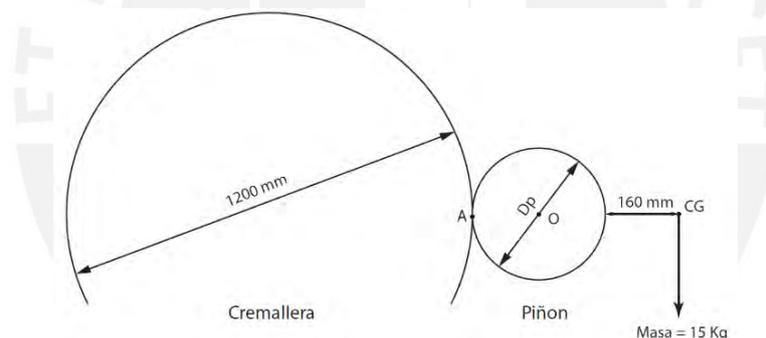


Figura 3. 11 Centro de gravedad del tractor soldador sobre la cremallera

Selección del diámetro primitivo según la empresa HepcoMotion®. Se realizará el análisis para la cremallera y el piñón proporcionados por la empresa. La velocidad de avance en la antorcha de soldadura es una variable esencial; el valor recomendado por la norma API 1104 es $V_t = [8 - 16] \text{ in/min} = [3,4 - 6,8] \text{ mm/seg}$. Se utilizará una velocidad de avance de 50 mm/seg en los cálculos para no limitar al tractor soldador, Diego Ernesto Garcia Pacheco (2015). Además, se utiliza un factor de corrección de 2.5 recomendado por la empresa KOOM®. Los datos del piñón a seleccionar según DIN 780 y se presentan en la Tabla 3.9. Ecuaciones 3.19 y 3.20 presentan el cálculo para la Fuerza vertical y Fuerza vertical corregida respectivamente.

$$V_t = 50 \frac{\text{mm}}{\text{seg}} \Rightarrow a_t = \alpha * r = 100 \frac{\text{mm}}{\text{seg}^2} \quad (3.19)$$

$$F_V = P(9,81 + a_t) = 147,3 N$$

$$F_{VC} = 2,5 * F_T = 294,6 N$$
(3.20)

Tabla 3. 9 Datos del diseño del piñón

Propiedad	Abreviatura	Valor
Angulo de presión	α	20
Módulo	m	4
N° de dientes	-	24
Diámetro primitivo	$\phi_p = z * m$	96 mm
Paso	$p = \pi * m$	12,56 mm
Adendum	$h_a = m$	4 mm
Dedendum	$h_f = 1,25m$	6 mm
Diámetro exterior	$\phi_{exterior} = \phi_p + 2 * h_a$	104 mm
Diámetro interior	$\phi_{interior} = \phi_p - 2 * h_f$	90 mm
Espesor y hueco	$s = e = \frac{p}{2}$	6,28 mm
Ancho de cara	$b = 12 * m$	56 mm
Redondeo en el diente	$r = 0,3 * m$	1,2 mm
Espacio entre cremallera y piñón		0.1 < Δ < 0.2 mm

Las revoluciones en el piñón y el par de giro se calculan por medio de las siguientes ecuaciones.

$$\omega = \frac{v * 6 * 10^4}{\phi_p * \pi} \approx 10 \text{ rpm}$$
(3.21)

$$M = P(D_p + 160) + \frac{\phi_p * F_V}{2000 * \eta} = 37,67 \text{ Nm}$$
(3.22)

Luego se realizan los cálculos de la resistencia a la fatiga en la raíz del diente cuyo material es Aluminio A6061 según la hoja de datos. La Tabla 3.10 presentan los factores que afectan el esfuerzo aplicado, mientras que la Tabla 3.11 presentan los factores para el esfuerzo pulsante de flexión en la raíz del diente. La tensión en la raíz del diente y la tensión admisible del material según las ecuaciones 3.7 y 3.8 son 2.13 N/mm² y 368.94 N/mm²; por lo tanto, se cumple que $\sigma_{FN} \leq \sigma_{FP}$. El piñón y la cremallera se obtendrán de la empresa HepcoMotion® por medio de los siguientes códigos: la cremallera, Anillo HDR 1280G492N especificar el material en Aluminio; piñón, HP4x24; rodamiento, THJR64E17.

Tabla 3. 10 Factores de esfuerzo aplicado

Propiedad	Propiedad	Valor	Ubicación
Factor de forma	Y_{Fa}	2.6	Anexo A
Factor de concentración de tensión	Y_{Sa}	1.7	Anexo A
Módulo ángulo de presión	E_β	1.69	
Factor de inclinación	Y_β	0.54	Anexo A
Factor de engrane	Y_ϵ	0.68	Anexo A
Factor de servicio	K_A	1.0	Norma DIN3990

Tabla 3. 11 Factores de esfuerzo pulsante

Propiedad	Abrev.	Valor	Ubicación
Factor de seguridad mínima	SF_{min}	1,7	Norma DIN 3990
Factor de corrección de tensión	Y_{ST}	2,0	Ing. Mecánica PUCP
Cifra relativa de apoyo (entalla)	$Y_{\delta rel.T}$	0,98	Anexo A
Factor de acabado superficial en el redondeo	$Y_{Rrel.T}$	1,06	Anexo A
Factor de tamaño	Y_x	1	Anexo A
Factor de duración	Y_{NT}	1,6	Anexo A

De la ecuación 3.21 y 3.22 el torque de salida y la velocidad angular son los siguientes: $M_t \approx 30\text{Nm}$ y $\omega = 10\text{rpm}$. Se utilizará un motorreductor como actuador; por ello, primero se calcula el torque y potencia requeridos según la ecuación 3.23. Se recomienda la selección un motor DC debido a que el tractor se desplazará de manera constante sobre la tubería; por lo tanto, en las Tablas 3.12 y 3.13 se presentan comparaciones entre diferentes productos comerciales. Se selecciona el motor DC PENTA 7MA y se selecciona el reductor de la empresa NanoTec por medio del siguiente código GSGE80 debido a se adapta a las dimensiones del motor seleccionado y cuenta con mayor torque a la salida por si se aumentan más componentes de lo diseñado sobre el tractor soldador.

$$Potencia_{salida} = Torque_{salida} * \omega_{salida} = 30.5 \text{ Watss}$$

$$Potencia_{entrada} = \frac{Potencia_{salida}}{\eta} = 42.36 \text{ Watss}$$

$$Torque_{entrada} = \frac{Potencia_{entrada}}{\omega_{entrada}} = 40.34 \text{ Nm}$$

Tabla 3. 12 Motores para Rotación del Tractor Soldador

Marcas NEMA34	PENTA 7MA 20	Phyton	Electro Creaft
			
Potencia (W)	750	240	240
RPM	2000	1800	1500
Torque (Nm)	3.5	4.6	5.0
Eje (mm)	14	14	14
Dimensiones (mm)	Ø130x390	86x86x97	85x85x126
Voltaje (V)	48	36-48	24-72
Amperaje (A)	23	5	5.0
Peso (Kg)	10.6	8.7	7.9

(3.23)

Tabla 3. 13 Motor Reductor relación 10:1

Marca	NANOTEC	TEC Electric Motors
		
Reducción	12.5	10
Torque de salida (Nm)	62.3	40
Velocidad nominal de salida (rpm)	20-112	140
Velocidad nominal de entrada (rpm)	250-1400	1400
Eficiencia (%)	72	-
Dimensiones (mm)	121x83x152	122x71x102
Peso (Kg)	2.268	2.3

Con los componentes a utilizar se dimensiona el árbol de transmisión como se aprecia en la Figura 3.12. Primero, se calcula la fuerza de pretensión en los tornillos del casquillo de fijación, Figura 3.13, que viene incluido en el piñón HP4x24; los datos extraídos se encuentran en las tablas del Anexo A. Primero, se calcula la fuerza de pretensión en un tornillo F_v según la ecuación 3.24 dando un valor de 3063 KN, se presenta un resumen de las expresiones necesarias para este cálculo en la Tabla 3.14, siendo $p = 36.6 \text{ N/mm}^2$ y $F_v = 3.063 \text{ KN}$.



Figura 3. 12 Árbol de transmisión para desplazamiento circunferencial

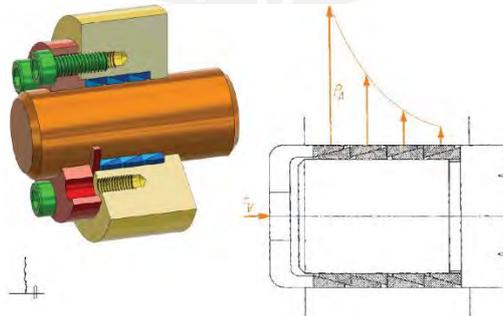


Figura 3. 13 Casquillos de fijación HP4X24

$$F_v = \frac{F_o + C * P}{i} \quad (3.24)$$

Tabla 3. 14 Datos para el cálculo de pretensión

Propiedad	Abreviatura	Valor
Fuerza axial para eliminar el juego de montaje	F_0	8.5 KN
Tasa de efectividad de fuerza de sujeción	C	270 mm ²
Número de tornillos	i	6
Momento de giro	$T=k*m*p$	30 Nm
Factores de reducción	$[n, k]$	[1,1]
Factor de momento de giro	m	0.9

Por otro lado, según los datos del fabricante, el casquillo de fijación HP4X24 fue diseñado para introducir un eje ϕ 30h8. El árbol de transmisión será de material St42 y su diagrama de fuerzas se presenta en la Figura 3.14.

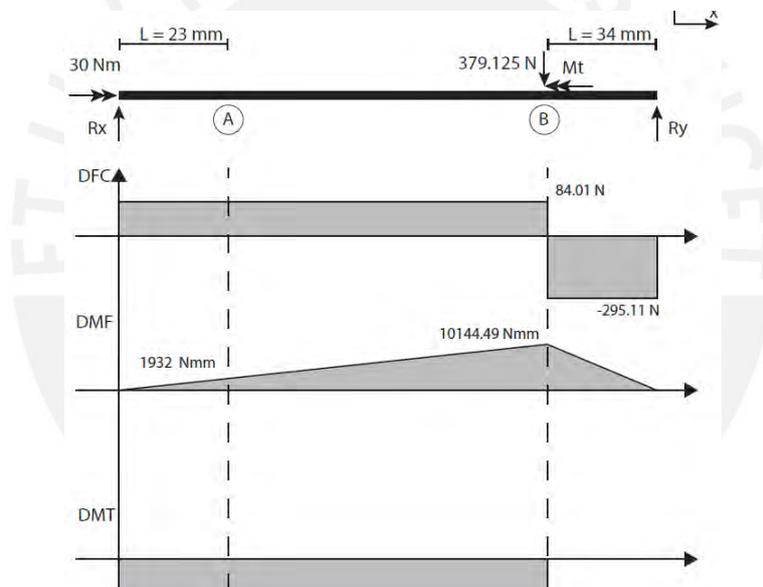


Figura 3. 14 Diagrama de Fuerzas y Momentos Eje Rotación Tractor Soldador

Análisis de fatiga en los cambios de sección A y B. Sección A: $M_f = 1932$ Nmm y $M_t = 30$ Nm se utilizan las ecuaciones 3.12 y 3.13 para determinar los esfuerzos en el eje. Mientras que la sección B está sometida a un $M_f = 10144.4$ Nmm y $M_t = 30$ Nm. Se determinan los factores de corrección que afectan la resistencia a la fatiga son los mismos que se muestran en la Tabla 3.3 y Tabla 3.4 a excepción de los presentados en la Tabla 3.15. Los factores de seguridad calculados para las dos secciones se presentan en la Tabla 3.16.

Tabla 3. 15 Factores de esfuerzo pulsante

Factores de Corrección	Sección A	Sección B	Ubicación
Diámetro 30 mm	0.85		Anexo A
$\beta_{Kflexión}$	1.8		Anexo A
$\beta_{Ktorsión}$	1.6		Anexo A
$M_{flector}$	1932 Nm	10144.4 Nm	
M_{torsor}	30 Nm	30 Nm	

Tabla 3. 16 Cálculo de factores de seguridad

Sección	FS Fatiga	FS Fluencia
Sección A	7.75	6.98
Sección B	19.66	25.71

Luego se realiza en análisis a la chaveta a utilizar según la norma DIN 6885 verificando la presión de aplastamiento. Se asume una que la presión (p) entre el canal chavetero y la chaveta es uniforme, y la fuerza resultante F_t es tangente al eje, estos se determinan por medio de las ecuaciones 3.2. Donde: L_{ef} es la longitud de contacto efectiva entre el cubo y la chaveta, t es la profundidad que penetra la chaveta en el cubo. También, se analiza solo el área de contacto entre el eje y el cubo por ser el menor.

$$p = \frac{F_t}{t * L_{ef}} \text{ y } F_t = \frac{M_t}{d/2} \quad (3.25)$$

Para evitar las deformaciones plásticas en los elementos en contacto se debe cumplir que la presión ejercida es menor a la admisible $p \leq p_{adm}$. Por lo tanto, el rango permisible para la longitud efectiva viene descrita por la ecuación 3.26. Se omite el análisis de resistencia al corte por tener una resistencia no menor a un acero St 50 o ASTM572. Finalmente, puede seleccionar la chaveta normalizada tipo A según la norma DIN 6885.

$$L_{ef} \geq \frac{2 * M_t}{d. (h - t_1). p_{adm}} = \frac{2 * M_t}{d. b. \tau_{adm}} \quad (3.26)$$

El torque total que se transmite es el calculado en la ecuación 3.22, la presión admisible por el cubo es $p_{adm} = 40 \text{ N/mm}^2$, el diámetro del eje $d = 18 \text{ mm}$, se utilizarán dos piñones por lo que el torque se divide entre los dos. Remplazando, se obtiene una $L_{ef} > 22,4\text{mm}$; por lo tanto, la chaveta a utilizar según norma será DIN 6885-1A A 6x6x25. Por otro lado, se agrega un anillo de retención según la norma DIN 471 18x1,2. Finalmente, se añade a cada extremo del eje una chumacera de pared para soportar las cargas transversales y permitir el giro, esta se selecciona de la empresa SKF con el siguiente código SY20TF., el ensamble del mecanismo de desplazamiento circunferencial en la Figura 3.15.

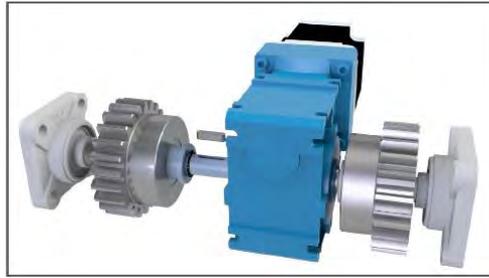


Figura 3. 15 Sistema de desplazamiento circunferencial

3.1.2. Requerimientos de actuadores

En la Tabla 3.17 se hace una recopilación de todos los motores seleccionados para poder determinar la potencia eléctrica necesaria que debe soportar cada driver, y para finalizar la potencia que debe suministrar la fuente de alimentación.

Tabla 3. 17 Driver para motores

	Desplazamiento eje Z	Desplazamiento eje Y	Rotación del Tractor
	PENTA 4S 20	PENTA 4S 20	PENTA 7MA 20
Torque necesario	0.95 Nm	0.95 Nm	3.5 Nm
Velocidad de rotación	2000 rpm	2000 rpm	2000 rpm
Corriente	11.11 A	11.11 A	23 A
Voltaje	24 V	24 V	48 V
DRIVER (MAXON)	ESCON 70/10	ESCON 70/10	ESCON 70/10
Voltaje	10/70 VDC	10/70 VDC	10/70 VDC
Corriente	10/30 A	10/30 A	10/30 A
Wight	259 g	259 g	259 g
Controlador de Velocidad/Corriente	SI	SI	SI

La corriente total necesaria es aproximadamente de 23A a 24V y 23A a 48V. Se utilizarán dos fuentes switching: para los desplazamientos del eje Z e Y se utilizará una fuente de 700 Watts con salida DC 24V garantizando un 30 % más de capacidad, mientras que para la rotación del tractor se usará una fuente de 1KW. La empresa que proporcionará la fuente switching será STEPPER ONLINE con el siguiente código TS-700-248B y S-1000-48 respectivamente. Estos últimos componentes son posicionados en el subsistema de sujeción.

3.1.3. Ensamble del tractor soldador

Se realiza el ensamble de los diferentes subsistemas mencionados hasta el momento: elevación (eje Z), posicionamiento (eje Y) y desplazamiento circunferencial. Para ello se requiere una

serie extra de componentes que permitan la unión entre estos. Primero, es necesario ensamblar la sujeción de la antorcha de soldadura con subsistema de elevación; esto se logra por medio de un bloque de aluminio A6061 que permita acoplarse al LIFGO Linear Rack 5.0 y a su vez a la sujeción de la antorcha por medio de pernos. Este ensamble se muestra en la Figura 3.16.

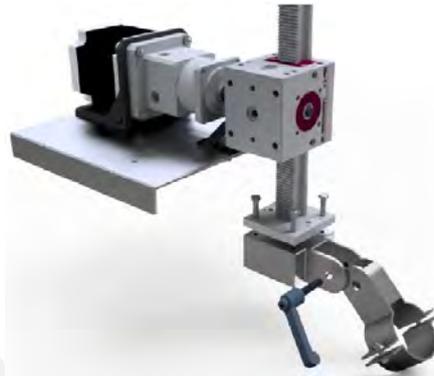
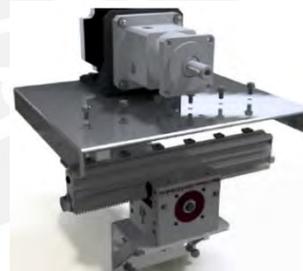


Figura 3. 16 Diseño ensamble de la antorcha con elevación Z

Se diseña una cubierta principal en la cual se montaran los diferentes subsistemas, Figura 3.17.a. Por otro lado, para ensamblar el subsistema de elevación con el de posicionamiento se atornillarán estos dos por medio de 6 tuercas en T posicionadas dentro del perfil V-Slot 25x25 como se muestra en la Figura 3.17.b. Además, se diseña otro Soporte LIFGO para sujetar el módulo en la cara frontal de la cubierta principal.



a) Cubierta Principal



b) Ensamble desplazamiento eje Y y Z

Figura 3. 17 Cuerpo del Tractor Soldador

El diseño final del tractor soldador se aprecia en la Figura 3.18; este incluye cuatro rodamientos excéntricos (0) en la parte inferior y el piñón diseñado dentro del vehículo. Para montar el tractor sobre la cremallera, se deben ajustar los rodamientos excéntricos; estos se ensamblan sobre el cuerpo del tractor (2) por medio de unos Brackets de sujeción (1). Mayor detalle del funcionamiento de los sistemas se da en las siguientes secciones, y todos los planos de fabricación y ensamble se encuentran en el anexo B.

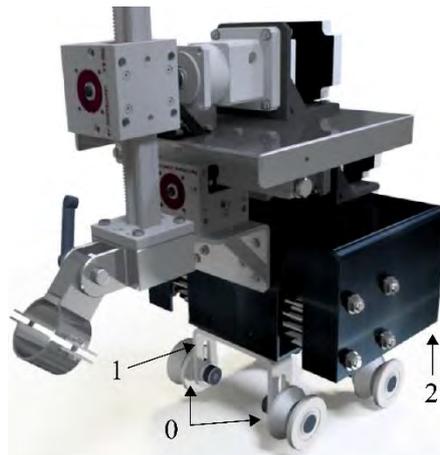


Figura 3. 18 Ensamble del tractor soldador

3.2. Subsistema de Sujeción

En la presente sección se desarrollan los cálculos y dimensionamientos del subsistema de sujeción; además, se determinan los actuadores requeridos y se finaliza con la presentación del ensamble.

3.2.1. Cálculos y dimensionamiento

Se realizan los siguientes pasos para el dimensionamiento del subsistema: Cálculos del sistema antivibración, Cálculos del sistema de apertura, Cálculos de la estructura.

A. Cálculos del sistema antivibración

Esto es requerido para alinear la tubería con la cremallera y ambas piezas queden concéntricas. El sistema se aprecia en la Figura 3.19; el muelle permite aislar las vibraciones que se producen al momento de que se genere el contacto, además se diseñan piezas de caucho natural R608 para absorber las vibraciones y disminuir el peso. Debido a que la presente tesis debe adaptarse a diferentes diámetros de tuberías se utilizan piezas con diferentes longitudes; en caso se requiera un diámetro en específico solo se debe variar la longitud del cobertor del caucho; los diseñados son para tuberías de 18", 24" y 32". Por último, es necesario un eje roscado que permita sujetar todo el sistema y un soporte en L de aluminio para ensamblarlo a la cremallera. El muelle es de la empresa AMC Mecanocaucho con el siguiente código, AMC doble campana 150; este soporta una carga máxima de 150 kg; estos datos se encuentran en el Anexo A.



Figura 3. 19 Sistema antivibración

B. Cálculos del Sistema de apertura

Para desmontar el sistema automatizado de soldadura orbital se utiliza un sistema de pivote a la mitad de las cremalleras. Para accionar este sistema se hace la comparación entre un motorreductor y un actuador Lineal como se muestra en la Tabla 3.18. Se utilizará un actuador Lineal por lo reducido de sus dimensiones, lo reducido de la potencia requerida y los pocos componentes necesarios en comparación del motor.

Tabla 3. 18 Actuadores para el pivotear el sistema de sujeción

Actuador	Actuador Lineal	Motorreductor
		
Componentes adicionales	Soportes metálicos pines	Ejes de transmisión chumacera, chavetas
Dimensión (mm)	65x65x584	240x140x746
Costo (\$US)	130	620
Torque (Nm)	-	360
Load (N)	2891.34	-
Potencia (Watts)	100	720
Voltaje (V)	24	72-320
Amperaje (A)	4,2	7-9,9
Peso (Kg)	3,6	21,34

Se realiza un análisis de la cinemática de la palanca accionada por el pistón para ello se proponen dos diseños con diferente distancias y ángulos de accionamiento (punto F); estas geometrías se presentan en la Tabla 3.19. Se realiza el cálculo de la fuerza necesaria del pistón en la geometría B en el instante crítico, donde los vectores R, F y C corresponden a los puntos de pivote, fuerza de accionamiento y Centro de gravedad respectivamente, donde el peso es de 200 N aproximadamente.

Tabla 3. 19 Ubicaciones propuestas para los pivotes

	Geometría A	Geometría B
Simulaciones		
Angulo de inclinación	54°	34°
Vector RF	(60,48; 188,84) mm	(100,48; 117,64) mm
Fuerza del pistón	3 521 N	5 000 N
Retracción del pistón	135 mm	130 mm
Largo del pistón (punto a punto)	280 mm	400 mm

$$\text{Vectores: } \vec{R} = (0; 0) \text{ mm}; \theta = 34$$

$$\vec{C} = (416,42; 545,81) \text{ mm} \quad (3.26)$$

$$\vec{F} = (100,48; 117,64) \text{ mm}$$

$$\sum M_F : 117,64 * F_p * \cos(34) - 100 * F_p * \sin(34) = 200 * 416,4 \quad (3.27)$$

$$F_p \approx 2000N$$

Se deduce de la ecuación 3.27 que, al disminuir el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal o la componente X del punto de acción F, el valor de la fuerza disminuye, mientras que disminuir la componente Y del punto F conlleva a un aumento en la fuerza del pistón. Para comprobar dicho comportamiento se realizan las dos simulaciones para dos diseños diferentes en el Software MSC Adams para conocer el comportamiento de los mecanismos para cada instante de tiempo. En la Figura 3.20 se muestra la cinética que ejecutará el pistón para abrir la cremallera; la geometría B propuesta va acorde a lo calculado en la Ecuación 3.27.

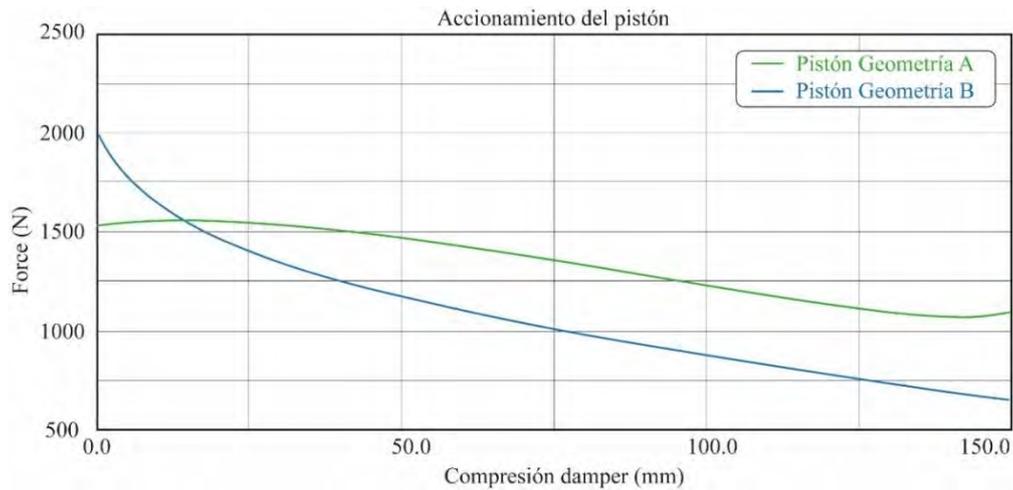


Figura 3. 20 Cinética del pistón según geometrías propuestas

Para el diseño final se utilizarán dos actuadores lineales a las laterales de la cremallera. Se utilizará la propuesta de geometría B, ya que las reducidas dimensiones requeridas para el actuador de la geometría A no son accesibles en el mercado. Para el diseño de la palanca se tomará en cuenta la componente X en el punto F.

El actuador lineal requiere soportes en los extremos. Estos dos son proporcionados por la empresa Progressive Automotion con el código PA-10 Stroke 8, para el actuador; BRK-09, para el soporte trasero; un pasador de horquilla con cabeza DIN EN 22341 8x60 mm. Se realizan los cálculos de resistencia para la fabricación de la palanca, para ello se descompone en la dirección X e Y la fuerza ejercida por el pistón, Figura 3.21, sobre la sujeción con la palanca, Figura 3.22. El material de la palanca es Acero A36.

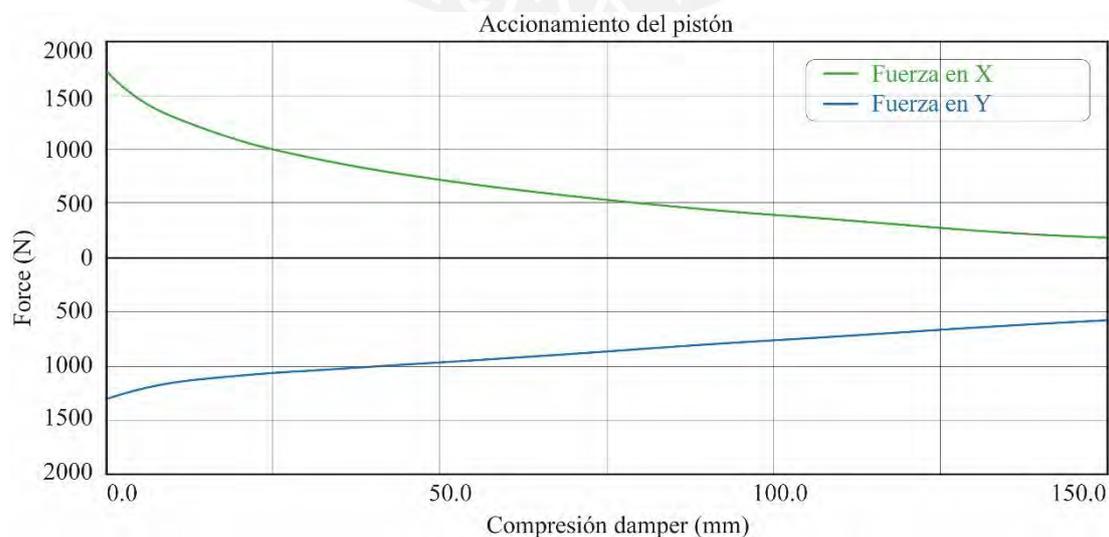


Figura 3. 21 Descomposición de fuerzas del pistón

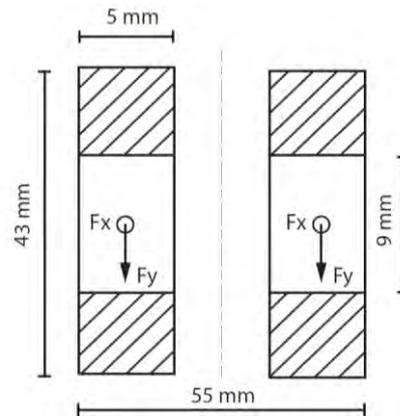


Figura 3. 22 Sección crítica de la palanca

$$I_x = I_0 + A * d^2 = 32824 \text{ mm}^4 \quad (3.28)$$

Se analiza la carga máxima proporcionada por el actuador y se descompone en las componentes $F_x = 1\ 650 \text{ N}$ e $F_y = 1\ 250 \text{ N}$. Estas se dividen en dos, ya que se utilizan dos pistones.

$$\text{Esfuerzo Normal Tracción: } \sigma_N = \frac{825}{85} = 9,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (3.29)$$

$$\text{Esfuerzo Cortante: } \tau_c = \frac{625}{85} = 7,35 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Determinación de esfuerzos principales $\sigma_1 = 13,65 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_2 = -3,95 \text{ N/mm}^2$

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3.30)$$

Ya que tienen diferentes signos, se deben comparar cada uno con el esfuerzo límite. Sin embargo, se usa solo σ_1 , ya que es muy superior a σ_2 . De la ecuación 3.31 se obtiene un Factor de seguridad superior al recomendado $FS = 3$.

$$\sigma_1 \leq \sigma_{adm} = \frac{\sigma_F}{FS}, FS = \frac{270}{19,44} = 17,1 \quad (3.31)$$

Adicionalmente se hará un análisis con elementos finitos al componente palanca para comprobar los cálculos teóricos. Por otro lado, ya que las cremalleras exteriores no cuentan con restricciones radiales más que el punto de pivote se utilizará un Clamp. Los requerimientos para la selección de este componente es que sea un módulo eléctrico y no neumático como los que se venden usualmente en el mercado; además, deben contar con una alimentación de 24 a 48 voltios para tener voltajes similares al resto de componentes seleccionados hasta el momento. Basado en los requerimientos se selecciona el clamp eléctrico de la empresa UNIVER LAE 140. Este se engancha en el extremo por forma con un

bloque en la parte inferior, Figura 3.23. Esto evita el desplazamiento al momento de utilizar las cremalleras, y manteniéndolas unidas y concéntricas. El material del bloque es de HDPE y los datos del Clamp están en la Tabla 3.20.

Tabla 3. 20 Datos Clamp UNIVER LAE 140

Características	Clamp UNIVER LAE 140
	
Dimensiones (mm)	42x97x305
Clamping momento (Nm)	140
Potencia (Watts)	96
Voltaje (V)	24
Amperaje (A)	4
Peso (Kg)	2,5
Tiempo de cierre	1,15sec x 90°



Figura 3. 23 Clamp y Bloque de sujeción

B. Cálculos de la estructura

Esta estructura permite sujetar y posicionar las cremalleras sobre la tubería, Figura 3.24. Se incluyeron 14 tornillos M10 que soportan la carga de la cremallera y el tractor; estos transmiten la carga del peso de la cremallera y tractor sobre la estructura. Además, esta estructura presenta un enganche principal; esto permitirá a acoplar todo el sistema automatizado de soldadura orbital sobre algún vehículo de transporte que lo desplace entre tuberías. Se plantea utilizar un bloque rectangular soldado a un acople; este se atornilla a una plancha metálica, la cual va soldada a la estructura.

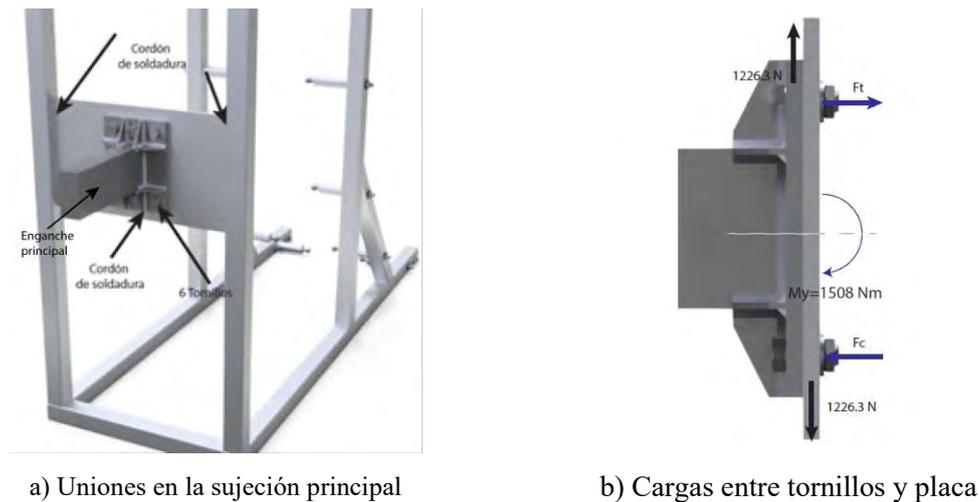


Figura 3. 24 Sujeción Principal

Primero se determina la resistencia mecánica del bloque rectangular soldado al acople; esto se realiza con la norma del Eurocodigo y AWS D1,1. Se utiliza la ecuación 3.32 para determinar la resistencia de la soldadura, donde f_u es el esfuerzo máximo a la tracción, β_w depende de los materiales a soldar, en nuestro caso Acero A36, y M_w es el factor de seguridad recomendado de 1,5. Las cargas en los cordones se detallan en la Figura 3.25.

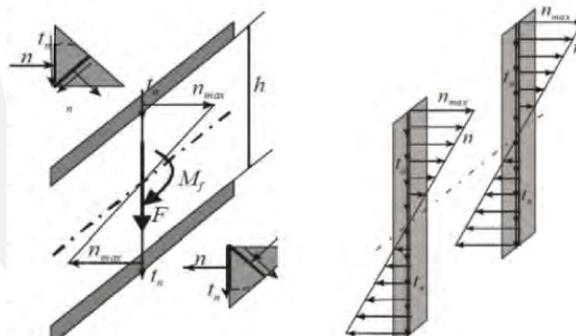


Figura 3. 25 Cordones de soldadura en el acople

$$\sqrt{\sigma^2 + 3(\tau_n^2 + \tau_a^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} \quad (3.32)$$

$$\sigma \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}}$$

Se tiene una carga de 1226,3N a una distancia de 1230 mm lo cual genera un momento flector en la soldadura. Reemplazando las variables en la ecuación se obtiene un cordón de soldadura con un espesor de garganta mínimo de 2 mm para un bloque cuya sección rectangular es de 76x35 mm. Luego se utiliza la misma ecuación para determinar la resistencia de los cordones de soldadura en la plancha metálica de Aluminio A6061 de 8mm de espesor sobre la estructura; sin embargo, debido a que ya no hay esfuerzo flector se omite la segunda formula de la

ecuación. Los cordones son longitudinales, las cargas sobre estas se aprecian en la Figura 3.26.

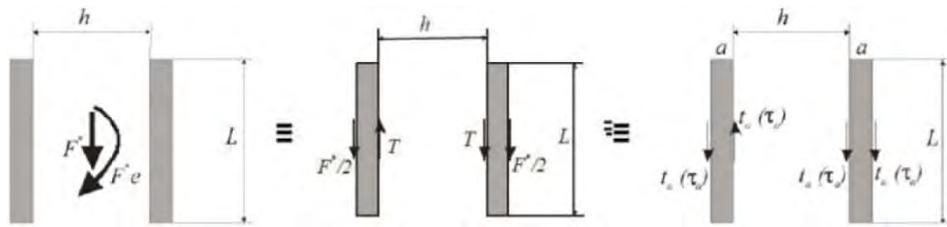


Figura 3. 26 Cordón de soldadura en la plancha metálica

En este caso la fuerza presente en el cordón es la mitad de la indicada anteriormente, mientras que la distancia se mantiene; además, el momento flector que se generaba en los cordones de soldadura ahora es un momento torsor. Las dimensiones de la sección de la plancha es 200x8 mm y el cordón mínimo permisible es de 2 mm. Tercero, las uniones atornilladas son elementos fundamentales para la estabilidad y resistencia de la estructura de sujeción; por ello, se debe realizar un análisis minucioso para garantizar la estabilidad del sistema mecatrónico. Primero se determinó la resistencia de los tornillos que unen el acople con la plancha metálica, este es un sistema múltitornillos sometidos a una fuerza cortante y un momento flector. En la Figura 3.24b se aprecia la disposición de las fuerzas en los tornillos y las placas. Se estima a utilizar un tornillo M10 10.9; los datos del tornillo según norma DIN 13T1 se presentan en la Tabla 3.21.

Tabla 3. 21 Datos M10 según DIN 13 TI

d	d1	d2	b	dag	As	Az	m	P
M10	16	9.026	32	12	58	52.3	8.4	1.5

$$L_{\text{tornillo}} = L_{\text{placa}} + 2 * \text{paso} + m = 28 \quad (3.33)$$

Se calcula la constante de rigidez del tornillo y las placas según la ecuación 3.34. La Tabla 3.22 presenta el resumen de las constantes de rigidez.

$$\frac{1}{c_t} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i} \Rightarrow c_i = \frac{E * A_i}{L_i} \quad (3.34)$$

$$A_i = \frac{\pi * D_i^2}{4}$$

Tabla 3. 22 Constante de rigidez del tornillo

Tramo	Descripción	Diámetro	Longitud	Área	Constante de rigidez	Inversa constante
1	Cabeza del tornillo	16	8	201.06	5277875.66	1.8947E-07
2	Tramo directo	16	4	201.06	10555751.32	9.47351E-08
3	Tramo roscado fuera de la tuerca	8.16	3.6	52.30	3050833.33	3.27779E-07
4	Tramos roscado interior tuerca	8.16	8	52.30	1372875.00	7.28398E-07
5	Filetes en contacto	16	6.4	201.06	6597344.57	1.51576E-07
					Suma	1.49196E-06
					Constante rigidez del Tornillo	670259.65

Cálculo de la constante de rigidez de las placas de acero y aluminio, primero se requiere determinar el tipo de geometría de distribución de esfuerzos que se genera entre las placas tornillo y la tuerca como se aprecia en la Figura 3.27.

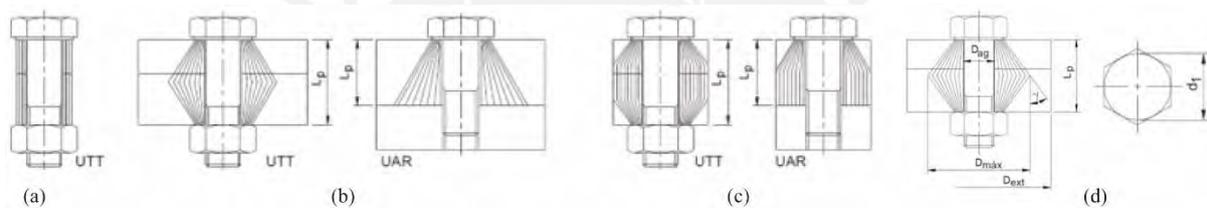


Figura 3. 27 Zonas de compresión según las dimensiones de la placa y dimensiones

Es necesario conocer los valores de $d_1 = 16$, D_{max} , $D_{ext} = 20$, $L_p = 16$

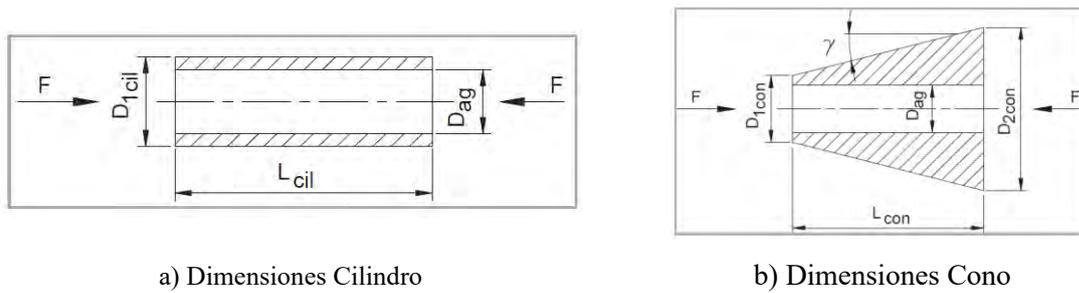
$$D_{max} = d_1 + L_p \tan \gamma$$

$$\tan \gamma = 0,362 + 0,032 \ln \left(\frac{\beta_L}{2} \right) + 0,153 \ln \varepsilon \quad (3.35)$$

$$\beta_L = \frac{L_p}{d_1} = 1 ; \varepsilon = \frac{D_{ext}}{d_1} = 1,25 ; \gamma = 0,35$$

$$D_{max} = 21,92 \text{ mm}$$

Se concluye que $d_1 = 16 \text{ mm} \leq D_{ext} = 20 \text{ mm} \leq D_{max} = 21,92$; es decir el caso a analizar es el ilustrado en la Figura 3.27.c donde hay dos conos y un cilindro. Para calcular la constante de rigidez total de la placa se utiliza la ecuación 3.34, para la rigidez del tronco de cono se utiliza la ecuación 3.36 y para la del cilindro la ecuación 3.36. La distribución de esfuerzos en un cono y un cilindro se presenta en la Figura 3.28.



a) Dimensiones Cilindro

b) Dimensiones Cono

Figura 3. 28 Distribución de esfuerzos Cilindro y Tronco de Cono

$$c_{con} = \frac{\pi \cdot E_{con} \cdot D_{ag} \cdot \tan \gamma}{\ln \left(\frac{(D_{2con} - D_{ag}) \cdot (D_{1con} + D_{ag})}{(D_{2con} + D_{ag}) \cdot (D_{1con} - D_{ag})} \right)} \quad (3.36)$$

$$c_{cil} = \frac{\pi \cdot E \cdot (D_{1cil}^2 - D_{ag}^2)}{4 \cdot L_{cil}} \quad (3.37)$$

En la Tabla 3.23 se aprecian las constantes de rigidez de las placas.

Tabla 3. 23 Constante de rigidez de la placa

Geometría	Valor(ci)	Inversa(1/ci)
Constante rigidez del cono	1536726.006	6.50734E-07
Constante rigidez cilindro	23125005.044	4.32431E-07
Constante rigidez cono	1536726.006	6.50734E-07
	Suma	1.7339E-06
	Constante rigidez Placa	576734.64

Para el cálculo de la fuerza en el tornillo se requieren las siguientes expresiones:

$$\delta_s = 3,29 * \left(\frac{L_p}{d_1} \right)^{0,34} ; \phi = \frac{C_t}{C_t + C_p} = 0,53 ; n = \frac{l_k}{l_1} = 1$$

$$F_{as} = \delta_s \frac{C_p C_t}{C_t + C_p} ; F_{res} = \frac{F_{corte}}{n_{tornillos}} ; F_{ext} = \frac{M}{d_{tor} * n_{tor}} ; F_{ext/p} = (1 - n * \phi) * F_{ext}$$

Posteriormente, se verifica el tornillo utilizando la ecuación 3.38. Mientras que el momento de ajuste viene expresado por la ecuación 3.39.

$$F_{max} = \alpha(F_{res} + F_{as} + (1 - n * \phi)F_{ext}) = 3428,38 \quad (3.38)$$

$$M_{Ajuste} = M_{tM} + M_{fp} = F_{Mmax} \cdot \tan(\varphi + \rho) \cdot \frac{d_2}{2} + \frac{\mu_F \cdot F_M \cdot \frac{d_1 + d_{ag}}{2}}{2} \quad (3.39)$$

A continuación, se presentan las ecuaciones requeridas para el cálculo del M_{ajuste} siendo este

igual a 8076,22 Nm. Por lo tanto, se concluye que $M_{ajusMax} \geq M_{ajuste}$ cumple.

$$\mu_{tor-tuerca} = 0.15 ; \tan \rho = \frac{\mu}{\cos \frac{\alpha}{2}} \rightarrow \rho = 9.82 ; \tan \varphi = \frac{Paso}{d_2 \pi} \rightarrow \varphi = 3.028$$

Se realiza el cálculo de seguridad estática, esfuerzo del tornillo durante el montaje y el esfuerzo del tornillo durante el trabajo con carga exterior estática y esfuerzo del tornillo ante cargas variables en ecuaciones 3.40 hasta la 3.43 respectivamente.

$$F_{ext} = 2251,5 \leq 0,1 \cdot \sigma_{0,2} \cdot A_s = 3712 \quad (3.40)$$

$$\sigma_{eqM} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3\tau_t^2} = 85.87 \leq 0,9\sigma_B = 576 \quad (3.41)$$

$$\sigma_{eqM} = \sqrt{\frac{\sigma_{max}^2}{t} + 3\tau_{t.trab}^2} = 102.76 \leq \sigma_F = 640 \quad (3.42)$$

$$FS = \frac{\sigma_A}{\sigma_{a/t}} = 6.9 > FS_R = 1.2 \quad (3.43)$$

Por último, se realiza el cálculo en los 14 tornillos que sostienen la cremallera trabajan al corte. Primero se divide la carga total (1250 N) en dos y se realiza el análisis para una cara; luego se determina el centro de gravedad de los tornillos, aquí se establece el origen; después se trasladan las cargas a esta para determinar el tornillo más cargado. El tractor soldador se encuentra en constante rotación; por ello, en centro de gravedad del sistema se desplaza constantemente. En la Figura 3.29 (a) se muestran ambos extremos del desplazamiento del centro de gravedad. Cada tornillo está sometido a una fuerza de corte estática Figura 3.29 (b) y otra debido al momento torsor pulsante puro Figura 3.29 (c).

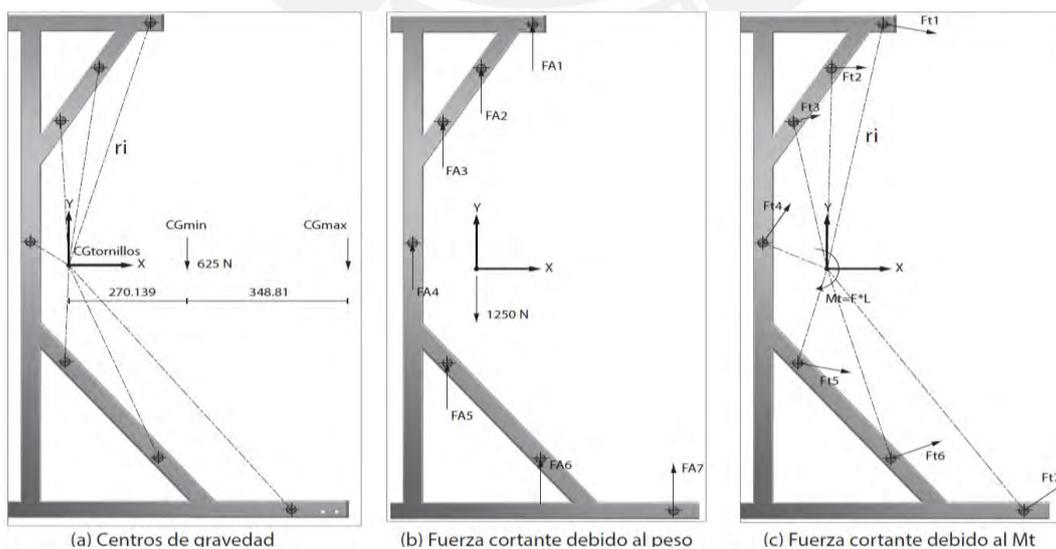


Figura 3. 29 Descomposición de fuerzas en los tornillos

$$FA_i = \frac{\text{Peso}}{\text{Numero de tornillos}} = \frac{625}{7} = 25,51 \text{ N} \quad (3.44)$$

$$L_{min} = 270,14 \rightarrow Mt_{minimo} = 168836,87 \text{ Nmm}$$

$$L_{max} = 618,95 \rightarrow Mt_{maximo} = 386843,75 \text{ Nmm}$$

Por medio de las siguientes ecuaciones se pueden obtener los valores para las fuerzas cortantes debido al momento torsor. En la Tabla 3.24 se aprecian los valores de las fuerzas cortantes y la fuerza resultante.

$$\sum_{i=1}^7 Ft_i * r_i = Mt \quad (3.45)$$

$$\frac{Ft_1}{r_1} = \frac{Ft_2}{r_2} = \dots = \frac{Ft_i}{r_i}$$

Tabla 3. 24 Fuerza cortante en tornillos ante Mt

Tornillo	Angulo (°)	Radio (mm)	Fuerza Ft mínimo (N)	Fuerza Ft máximo (N)	Fuerza A (N)	Fuerza Resultante mínima(N)	Fuerza Resultante máxima(N)
7	60.77	636.87	87.81	201.20	25.51	102.71	214.81
6	81.48	447.36	61.68	141.33	25.51	70.16	147.28
5	66.25	256.59	35.38	81.06	25.51	34.29	74.54
4	9.37	171.26	23.61	54.10	25.51	48.96	79.38
3	68.84	312.79	43.13	98.81	25.51	57.49	110.61
2	84.05	409.87	56.51	129.48	25.51	59.55	129.35
1	84.12	507.73	70.01	160.40	25.51	72.01	159.81

Se observa que el tornillo 7 es el que está más cargado; por lo tanto, se realizarán las verificaciones con esas cargas. Los tornillos para utilizar serán M10 8.8, los datos extraídos del tornillo son de la norma DIN 13 T1, Tabla 3.25, y la longitud de tornillo es $L_{tornillo} = 124.5 + 2 * 1.5 + 8.4 = 135.9$. Luego se procede con el cálculo de la constante de rigidez del tornillo cuyo módulo de elasticidad es $E = 210 \text{ GPA}$ y cuya estructura se presenta en la Figura 3.30.

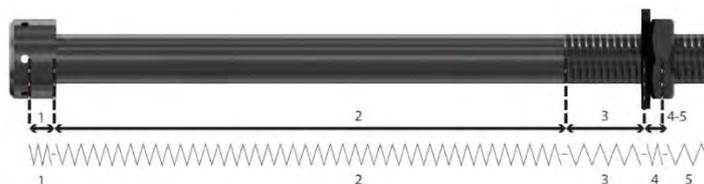


Figura 3. 30 Constante de rigidez del tornillo

Tabla 3. 25 Constante de rigidez del tornillo

Tramo	Descripción	Diámetro	Longitud	Área	Constante rigidez Tramos	Inversa constante
1	Cabeza de tornillo	16	8	201.06	5277875.66	1.8947E-07
2	Tramo directo	16	124.5	201.06	339140.60	2.94863E-06
4	Tramo roscado fuera de tuerca	8.16	2.5	52.30	4393200.00	2.27625E-07
5	Tramo roscado interior tuerca	8.16	8	52.30	1372875.00	7.28398E-07
6	Filetes en contacto	16	6.4	201.06	6597344.57	1.51576E-07
					Suma	4.2457E-06
					Constante rigidez Tornillo	235532.49

Para el cálculo de la constante de rigidez de las placas de acero y aluminio, la Figura 3.31, es necesario conocer los valores de $d_1 = 16$, $D_{ext} = 25.4$, $L_p = 124.5$. Aplicando ecuación 3.35 $D_{max} = 78.25$ mm. Se concluye que $d_1 = 16\text{mm} \leq D_{ext} = 25,4\text{mm} \leq D_{max} = 78,25$; es decir el caso a analizar es el (c) mostrado en la Figura 3.27 donde hay dos conos y un cilindro. Para calcular la constante de rigidez total de la placa se utiliza la ecuación 3.34; para la rigidez del tronco de cono y el cilindro se utiliza la ecuación 3.28. En la Tabla 3.26 se aprecian las constantes de rigidez de las placas.

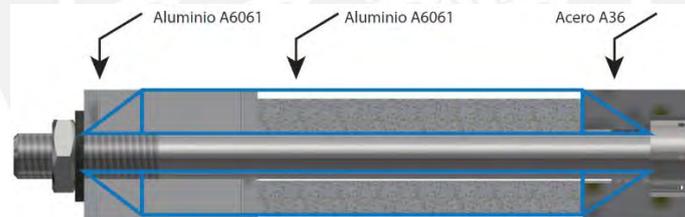


Figura 3. 31 Geometrías de distribución de esfuerzos en las placas

Tabla 3. 26 Constante de rigidez de la placa

Geometría	Valor(ci)	Inversa(1/ci)
Constante rigidez cono	3042851.302	3.28639E-07
Constante rigidez cilindro	229193.1352	4.36313E-06
Constante rigidez cono	10475389.73	9.54618E-08
Suma		4.78723E-06
Constante rigidez Placa		208888.92

Ya que no se requiere una pretensión en el montaje se considera el factor de ajuste $\alpha_A = 1$; por lo tanto, $F_{Mmax} = F_{Mmin} = F_M$. Por lo tanto, se realiza la verificación de la fuerza máxima admisible con $\phi = 0.53$. Se realiza el cálculo de seguridad estática, esfuerzo del tornillo

durante el montaje y el esfuerzo del tornillo durante el trabajo con carga exterior estática y esfuerzo del tornillo ante cargas variables en ecuaciones 3.46 hasta la 3.49 respectivamente.

$$F_{ext} = 113.84N \leq 0,1 \cdot \sigma_{0,2} \cdot A_s = 3712 \quad (3.46)$$

$$\sigma_{eqm} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3\tau_t^2} = 90.01 \leq 0,9\sigma_B = 576 \quad (3.47)$$

$$\sigma_{eqM} = \sqrt{\frac{\sigma_{max}^2}{t} + 3\tau_{t, trab}^2} = 58.96 \leq \sigma_F = 640 \quad (3.48)$$

Además, se requiere determinar el esfuerzo alternante del tornillo, siendo este igual a 51MPa. Para ello, primero se determina la fuerza media en el tornillo según la ecuación 3.49.a; posteriormente, el esfuerzo medio se halla según la ecuación 3.49.b y se verifica que esté en el rango de [0.3 - 1]. Luego, se calcula el esfuerzo alternante por medio de la ecuación 3.49.c; y finalmente, se determina el FS= 6.47 cumpliendo con los requerimientos según la ecuación 3.49.d.

$$F_{tm} = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} + 0,9 \cdot \sigma_{0,2} \cdot A_s = 33725,52 \quad (3.49.a)$$

$$0,3 \leq \frac{F_{tm}}{\sigma_{0,2} A_s} \leq 1 \quad (3.49.b)$$

$$\sigma_A = 0,85 \left(\frac{150}{M} + 45 \right) = 51 \text{ MPa} \quad (3.49.c)$$

$$\frac{1}{FS} = \frac{\sigma_{alt}}{\sigma_A} + \frac{\sigma_m}{\sigma_B} ; FS = 6,47 > FS_R = 1.2 \quad (3.49.d)$$

3.2.2. Requerimiento de actuadores

A continuación, en la Tabla 3.27 se muestra un resumen de los componentes a utilizar y la potencia necesaria para cada uno. Se utilizarán diferentes fuentes switching para accionar los actuadores, todas estas se seleccionarán con un 30 % más de la carga requerida.

Tabla 3. 27 Fuentes de alimentación

Marca: Stepper Online	S350-24	S350-24	S700-248B	S1000-48
				
Utilidad	Clamps eléctricos	Actuadores lineales	Motores (Z e Y)	Motor (circunferencial)
Potencia requerida(w)	186	200	360	700
Output	20.8V~27.2V / 14.6 A	20.8V~27.2V /14.6 A	32.4V~39.6V / 11A	32V~48V / 21A
Potencia max (W)	350	350	700	1000
AC - Voltaje Entrada	90~132V/180~264VAC	90~132V/180~264VAC	93~132V/176~264VAC	180~264VAC
Peso (Kg)	1.1	1.1	1.15	1.5
Dimensiones (mm)	135x50x215	135x50x215	135x50x215	111x65x238
Costo	\$25	\$26.76	\$60	\$145.88

3.2.3. Ensamble del sistema de sujeción

Las dimensiones del sistema una vez ensamblado son $1090 \times 1600 \times 520$ mm, y se ilustra en la Figura 3.32.



Figura 3. 32 Ensamble del sistema de sujeción

3.3. Funcionamiento

Para ensamblar el tractor soldador (0) y el sistema de sujeción (1), es necesario montar el vehículo sobre las cremalleras (4), Figure 3. 33.a. Se deben ajustar los rodamientos excéntricos (2) para generar fricción entre la cremallera, el piñón y los rodamientos. En la Figura 3. 33.b y 3. 33.c, se aprecian las vistas de perfil y frontal del sistema automatizado. Aquí la cremallera funciona como una tierra virtual; por lo tanto, gracias a la fricción el piñón puede desplazar el tractor en sentido horario o antihorario.

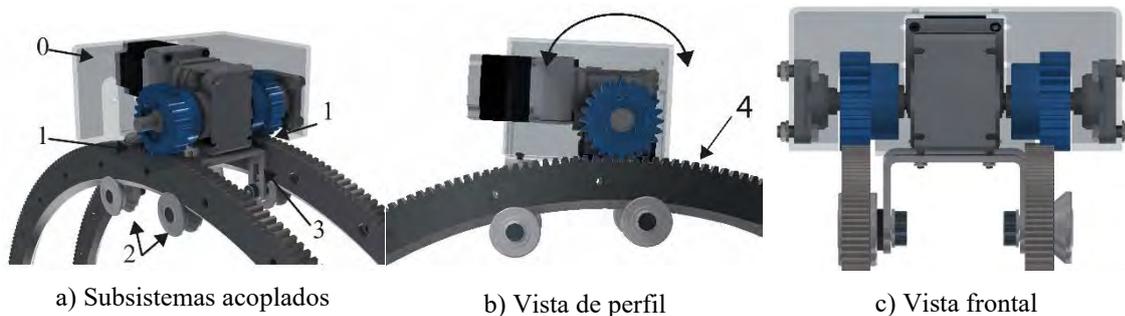


Figura 3. 33 Ensamble del tractor soldador y el sistema de sujeción

El funcionamiento del sistema de sujeción se ilustra en la Figura 3. 34 pasando de una posición abierta a estar cerrado. El sistema de sujeción es pivoteado desde un extremo (0), el cual funciona como una tierra virtual evitando que la estructura (1) se desplace. Para abrir o cerrar el sistema se debe accionar los actuadores lineales (2) y los clamps eléctricos (5).

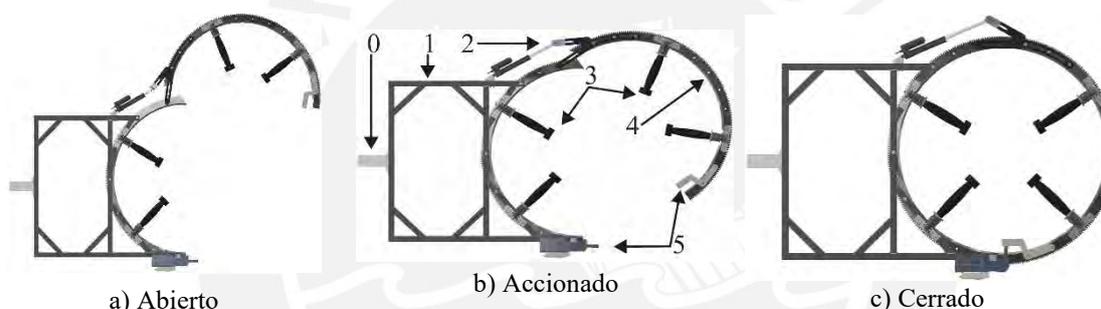


Figura 3. 34 Apertura y cierre del sistema de sujeción

El presente sistema mecatrónico ha automatizado el 90% de todas las operaciones mecánicas y manuales que se deben realizar en un sistema para soldadura orbital. Las únicas operaciones que requieren de un operario, es el cambio del sistema de antivibración (3), para que así el sistema mecatrónico pueda adaptarse a varios diámetros. En la presente tesis se diseñaron tres sistemas de antivibración con diferentes longitudes; sin embargo, el diseño del sistema es escalable a cualquier longitud. Los planos fabricación y ensamble de todos los componentes se presentan en los Anexo B.

Capítulo 4

Diseño Electrónico del Sistema Autónomo de Soldadura Orbital

En el presente capítulo se desarrollarán el sistema electrónico y de control que permitirá automatizar el sistema mecatrónico. Primero se presenta la Arquitectura de hardware detallando la conexión entre los diferentes actuadores, sensores y alimentación. Luego, se presenta la metodología a utilizar para la detección del centro de la junta de soldadura y la altura a la que se encuentra. Posteriormente, se desarrolla el sistema de control para posicionar la antorcha de soldadura sobre la junta, y se procede a presentar los diagramas de flujo que rigen el comportamiento del sistema automatizado; finalmente, se presentan los diagramas esquemáticos.

4.1. Arquitectura de Hardware

La arquitectura Hardware se aprecia en la Figura 4.1; todos los componentes en este diagrama fueron seleccionados en el capítulo anterior. Se cuenta con dos los siguientes dos subsistemas: sistema de sujeción y sistema de tractor soldador. El subsistema de sujeción cuenta con 2 pistones eléctricos, 2 clamps eléctrico, un sensor ultrasonido y 4 relés. Así mismo, el subsistema del tractor soldador cuenta en total tres motores con sus respectivos drivers y un sensor laser para determinar la posición de la junta de soldadura. Por otro lado, también se cuentan con las diferentes fuentes switching a utilizar y el controlador, además se aprecian las diferentes conexiones que se requieren con los actuadores.

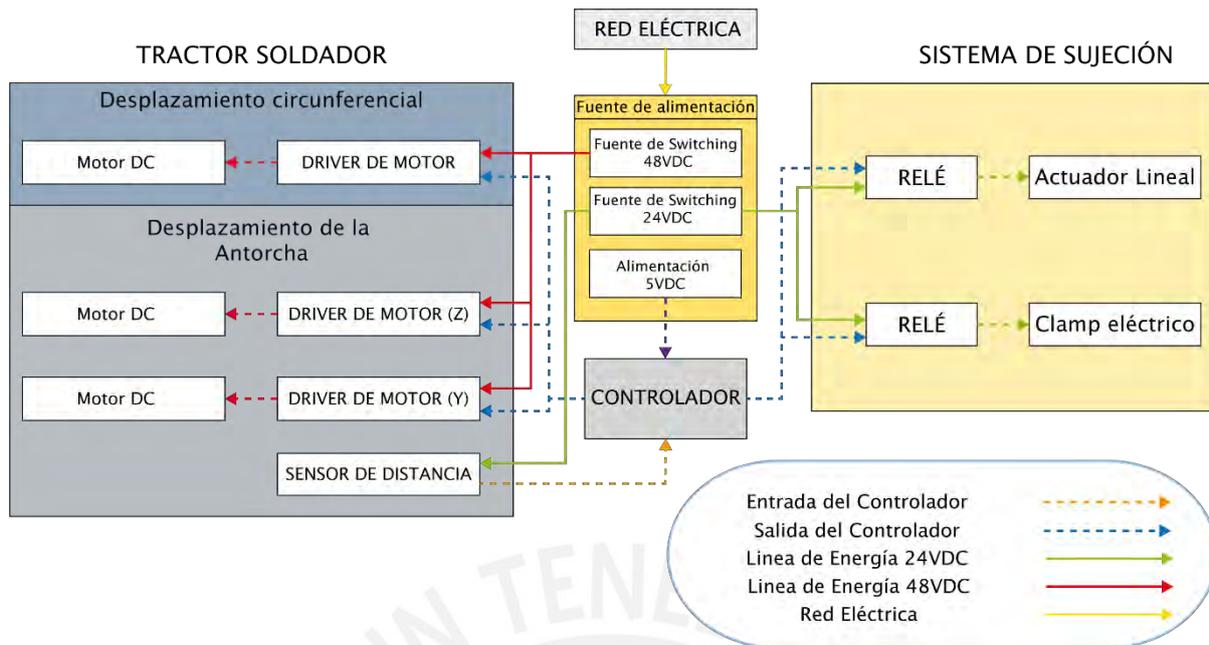


Figura 4. 1 Arquitectura Hardware

4.2. Selección de sensores y ubicación de posiciones

Un sistema automatizado requiere un conjunto de componentes electrónicos capaces controlar y tomar datos del entorno en el que se trabaja. Además, este sistema requiere posicionar la antorcha sobre el cordón de soldadura. Por ello, esta sección presentará los sensores a utilizar, la metodología a implementar para determinar el centro de la junta de soldadura y la metodología para determinar la altura a la que se encuentra la antorcha

4.2.1. Sensores

Para determinar la posición de la junta se seguirá el modelo de la patente de Rinaldi (1998); para ello, primero se requiere adquirir un sensor con el cual se puede determinar la profundidad de la junta y, así, dar las señales correspondientes a los diferentes actuadores para posicionar la antorcha sobre la junta de soldadura. Cabe resaltar que esta operación solo se realizará antes de iniciar el proceso de soldadura.

Es necesario un sensor de distancia con un alcance entre 20 – 80 cm, ya que este es el rango de separación que se tiene entre la antorcha y la tubería; además, el sensor debe poder operar en materiales como el acero A25 O X80; y, por último, se requiere un sensor que pueda captar milímetros. La Tabla 4.1 muestra una comparación de los diferentes sensores de distancias.

Tabla 4. 1 Comparación sensores de distancia

Características	SHARP GP2Y0A21YK0F	OsiSense XUJK803538	Ultrasonic sensor XX918A3C2M12
			
Tipo	Infrarrojo difuso	Infrarrojo difuso	Ultrasonido
Rango (cm)	10-80	20-80	5-51
Output	-0.3/5.3 V	4/20 mA	4/20 mA
Voltaje (V)	4.5-5.5	24	12-24
Amperaje (mA)	30	35	40
Dimensiones (mm)	29.5x13x13.5	27x85x61	M18x76
Conexión	JST PH de 3 pines	Screw, 6-pin conector	M12, 4-pin conector

Los sensores ultrasonidos no funcionarían debido a la geometría que presentan las tuberías; las señales acústicas no brindarían mediciones apropiadas. Por otro lado, no se agregan sensores capacitivos debido a la distancia que se encuentra la tubería de la antorcha de soldadura siendo esta mayor de 10 cm solo para los ductos de menor tamaño, además el principal uso que se le dan a los sensores capacitivos es para la detección de objetos a cortas distancias. Por lo explicado anteriormente, se selecciona el sensor fotoeléctrico XUJK803538 de la empresa Schneider Electric debido al método de triangulación que utiliza respecto al ultrasonido y a su salida directamente proporcional a la distancia comparado con el infrarrojo Sharp.

El sensor cuenta con una salida analógica de corriente y voltaje de 0-10 V. En la Figura 4.2, se aprecia la relación entre la salida de voltaje y la distancia que esta representa. Por lo tanto, el controlador debe leer la señal analógica y por medio de un Convertor Analógico Digital (ADC) transformar la señal analógica en una señal digital. Luego esta señal digital se compara con el rango de distancias que mide el sensor y se obtiene la resolución en las siguientes unidades mm/Voltaje.

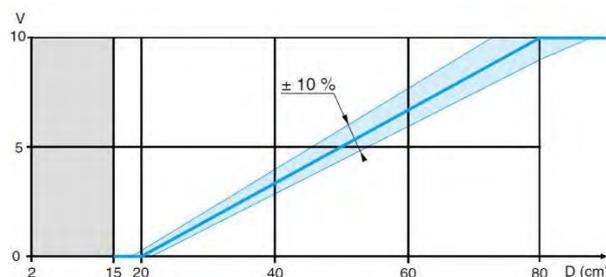


Figura 4. 2 Corriente de salida del sensor de distancia

4.2.2. Ubicar altura de la antorcha (eje Z)

Utilizando como referencia la Figura 4.2 y asumiendo que se utiliza un ADC de 16bits de resolución se establece que para una distancia de 20 cm el voltaje será 0 V mientras que para una distancia de 80 cm el voltaje será 10 V; esto se representa en la ecuación 4.1. Luego estos valores se reescalan, es decir para 0 V la salida digital será 0000, mientras que para 10 V la salida digital será $(2^6 - 1)$; esto se representa en la ecuación 4.2.

$$\text{Altura(cm)} \Rightarrow Z = (80 - 20)/10 * \text{Voltaje} + 20 \quad (4.1)$$

$$\text{Voltaje} \Rightarrow V = \text{Señal digital} * \frac{10 V}{(2^6 - 1)} \quad (4.2)$$

Por lo tanto, al saber la salida digital se puede calcular la salida analógica correspondiente y, en consecuencia, la distancia L que esta representa. Al saber la altura de separación de la antorcha de la tubería se calcula las vueltas que debe girar el piñón del eje Z para posicionarse a la altura indicada. Es necesario recalcar que la cremallera del módulo Lifgo avanza 62,83 mm por vuelta que del piñón. La Figura 4.3 muestra la ubicación del sensor de distancia; este es sujetado en el bloque del sistema de sujeción de la antorcha con dos pernos M4 a los costados.



Figura 4. 3 Posicionamiento del sensor de distancia

4.2.3. Ubicar centro de la junta de soldadura

En la Figura 4.4 se presenta un esquema de la metodología que se implementa para medir la distancia de separación entre el sensor y el ducto. Se utilizará un sensor infrarrojo a una distancia L_i de la tubería; este sensor emite un rayo r_o que se refleja sobre la tubería y regresa como r . Por lo tanto, para cada distancia L_i se tendrá un rayo r ángulo de incidencia diferente. El sensor transmite al controlador una señal analógica, la cual es proporcional a la distancia medida. Esta señal analógica es transformada a una señal digital por medio de un conversor analógico digital (ADC) lo cual permite cuantificar la separación entre el sensor y el ducto.

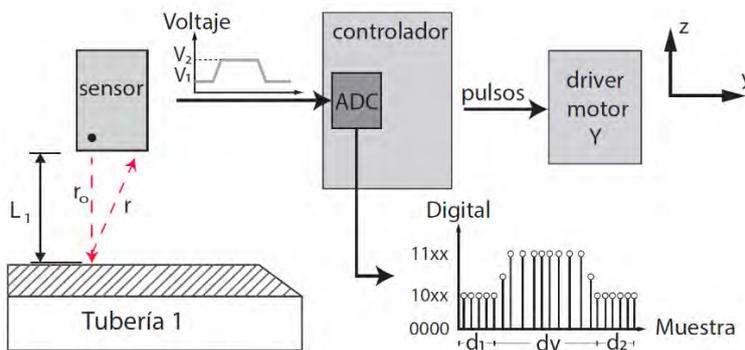


Figura 4. 4 Representación detección de la junta de soldadura

De los cálculos mecánicos, el desplazamiento máximo permitido en el eje Y es de 171 mm y la velocidad lineal de accionamiento es 0.01 m/seg. Además, se puede determinar el número total de muestras conociendo la frecuencia de muestreo del sensor (f_m), el periodo de muestreo (T_m). De todo el muestreo se espera obtener valores constantes a lo largo de la tubería (d_1 y d_2), y un incremento de la señal digital en la sección del bisel y la separación de los ductos (dv). Para delimitar estas secciones se utilizará un filtro definido por un valor límite superior. Por lo tanto, dado un número de muestras restantes dv , se puede determinar el tiempo y separación entre el inicio de biselados por medio de las ecuaciones 4.3 y 4.4 respectivamente.

$$t_v = d_v * T_m \quad (4.3)$$

$$y_v = t_v * 0.01 \quad (4.4)$$

Para determinar la distancia que se requiere accionar el sistema de desplazamiento en el eje Y, se debe calcular la distancia desde uno de los extremos de la cremallera hasta el centro de las juntas de soldadura, este cálculo viene expresado por la ecuación 4.5. En el siguiente capítulo se presentarán experimentaciones que validen el funcionamiento de este sistema de detección.

$$y = y_v + d_1 * T_m * 0.01 \quad (4.5)$$

4.3. Sistemas de control

En la presente sección se detalla las lógicas de control utilizadas para mantener una velocidad angular de desplazamiento del tractor soldador (\emptyset), posicionar la antorcha a una respectiva altura (eje Z) y posicionar la antorcha sobre la junta de soldadura en la dirección axial (eje Y). En el capítulo de Simulaciones y Experimentación, se presenta un resumen de los datos del sistema, así como las ganancias de los controladores.

4.3.1. Desplazar tractor soldador

Como se presentó en el capítulo anterior, el desplazamiento del tractor soldador se da por medio del accionamiento de un motor DC, el cual desplaza una carga alrededor de las cremalleras. En la Figura 4.5, se presenta el modelo dinámico simplificado de un motor DC desplazando una carga.

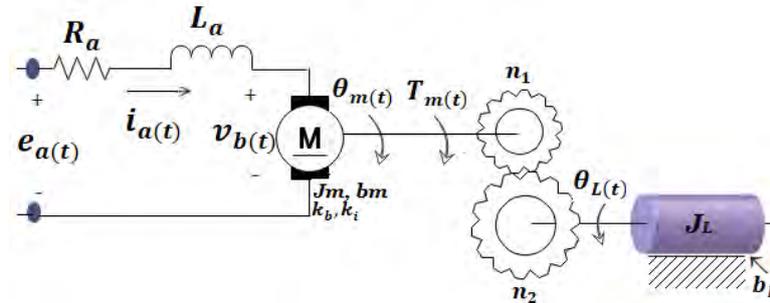


Figura 4. 5 Modelo del sistema acoplado a un reductor y una carga

Consulta: <https://dademuch.com/2018/05/24/servomotores-sistema-de-control-de-posicion/> .

Revisado el 20 de abril del 2022

Donde $e_a(t) = v_a(t)$, $i_a(t)$, R_a , L_a son el voltaje, corriente, resistencia e inductancia de la armadura del motor DC respectivamente. También $\theta_m(t)$, $T_m(t)$, k_i , J_m , b_m son la posición del eje, el torque, constante par, momento de inercia y el coeficiente de fricción viscosa del motor respectivamente. Además, $v_b(t)$ y k_b son la fuerza electromotriz y contraelectromotriz respectivamente. Por último, n_1 , n_2 son la relación de transmisión de los reductores, mientras que $\theta_L(t)$, J_L son la posición del eje de salida del reductor y la inercia del tractor soldador respectivamente. Las ecuaciones dinámicas se presentan a continuación.

$$\begin{aligned}
 v_a &= i_a \cdot R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + v_b \\
 v_b &= k_b \frac{d\theta_m}{dt} \\
 T_m &= k_i \cdot i_a \\
 T_m &= J_{eq} \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + b_{eq} \frac{d\theta_m}{dt} \\
 n_1 &= m \cdot n_2 ; \theta_L = \theta_m \cdot m \\
 J_{eq} &= J_m + m^2 J_L ; b_{eq} = b_m + m^2 b_L
 \end{aligned}$$

Para el desplazamiento del tractor soldador, la variable controlada será la velocidad angular de los piñones que están en contacto con la cremallera circular del sistema de sujeción. La presente tesis desarrolla un controlador robusto en cascada para perturbaciones. El esquema de control en lazo cerrado se presenta en la Figura 4.6.

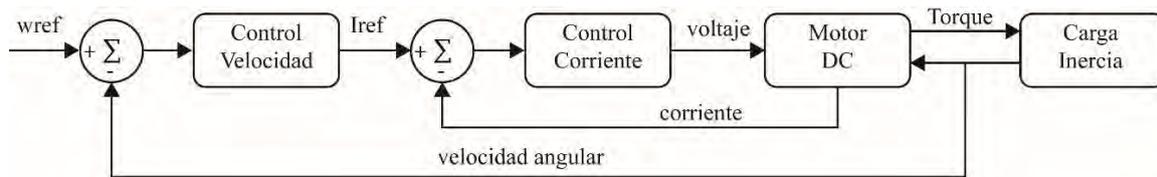


Figura 4. 6 Esquema de control para desplazamiento del tractor soldador

El presente esquema de control incluye dos controladores en cascadas. Primero se implementa el control de corriente y posteriormente el control de velocidad angular del motor. El diseño de controladores en cascada solo es viable si la respuesta del lazo interno es 5 veces superior al lazo externo. La frecuencia a la que opera el lazo interno de corriente es alrededor de los 5KHz, mientras que para el lazo externo de velocidad angular es alrededor de los 1KHz debido a que es una señal mecánica. Por lo tanto, se concluye que es viable el diseño del esquema de control.

Por otro lado, el control para perturbaciones tiene como fundamento que del modelo dinámico del motor no se pueden obtener, al mismo tiempo, el Torque y la velocidad angular. Una de estas debe ser proporcionada por el sistema (inercia del tractor soldador). En el modelo propuesto, se selecciona la velocidad angular como una perturbación del sistema. El orden de la sintonización de los controladores inicia con el lazo interno hasta llegar al lazo externo.

Para el primer lazo de control, i_a es la variable controlada, v_a la variable manipulada y $d\theta_m/dt$ la perturbación. Por lo tanto, de las ecuaciones dinámicas y aplicando la transformada de Laplace, se puede obtener la una función de transferencia de primer orden, ecuación 4.6 donde $t_e = L/R$. Se diseña un controlador PI sintonizado por medio de la cancelación de polos y la frecuencia de corte. Es esquema de control se presenta en la Figura 4.7.

$$\frac{ia(s)}{va(s)} = \frac{1}{R} \left(\frac{1}{te \cdot s + 1} \right) \quad (4.6)$$

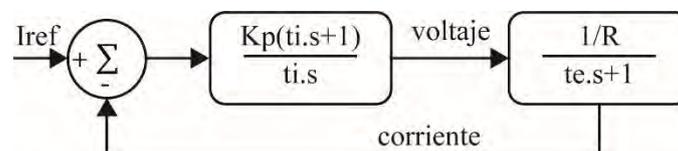


Figura 4. 7 Control de corriente

Igualando el cero del controlador y el polo del sistema, se obtiene la constante de tiempo de la integral t_i igual a la constante de tiempo del sistema t_e . Por lo tanto, la función de transferencia en lazo cerrado viene dado por la ecuación 4.7. Realizando el análisis de bode de la función de transferencia y en base a la literatura, la frecuencia de corte (f_{cut}) los motores DC ronda entre los 500 a 1000 Hz. Finalmente, se determina la ganancia K_p por medio de la ecuación 4.8.

$$\frac{i(s)}{\dot{i}_{ref}(s)} = \left(\frac{1}{L/Kp \cdot s + 1} \right) \quad (4.7)$$

$$K_p = 2 \cdot \pi \cdot f_{cut} \cdot L \quad (4.8)$$

Finalizado la sintonización del lazo interno, se procede a sintonizar el lazo externo. Dado que se conoce la dinámica del sistema, es posible obtener todas las funciones de transferencias necesarias para sintonizar un controlador PID. Sin embargo, por efectos prácticos, se opta por obtener un modelo aproximado de la función de transferencia $w(s)/\dot{i}_{ref}(s)$ aplicando un escalón unitario y analizando la respuesta del sistema, esta viene expresada en la ecuación 4.9.

$$\frac{w(s)}{\dot{i}_{ref}(s)} = \frac{0.1125}{s + 0.01235} \quad (4.9)$$

Siendo esta una función de primer orden, la sintonización para el lazo de velocidad se realiza por medio de la metodología explicada anteriormente. Donde, la nueva constante de tiempo se representa por $t_{e2} = 1/0.1125$, mientras que $R_2 = 0.01235/0.1125$ y $L_2 = t_{e2} * R_2$. Los resultados de la sintonización serán presentados en el siguiente capítulo.

4.3.2. Posicionar antorcha y Modificar altura

En el capítulo del diseño mecánico, se mencionó que el mismo motorreductor se puede utilizar para modificar la altura de la antorcha (eje Z) y posicionar la antorcha sobre la junta de soldadura (eje Y). Por lo tanto, la única diferencia en la dinámica del sistema será la inercia que se debe vencer. Estas inercias son obtenidas a través de un software CAD, siendo mayor para el desplazamiento en el eje Y.

Por otro lado, debido al cambio de inercia, los parámetros del motor y en consecuencia las ganancias del controlador de corriente PI, cada proceso requiere nuevas aproximaciones de las funciones de transferencia $w(s)/\dot{i}_{ref}(s)$. Todos los parámetros de los actuadores utilizados para el cálculo de las funciones de transferencia se presentarán en el siguiente capítulo en la sección Sistema de Control. La ecuación 4.10 y 4.11 representan las funciones de transferencia de primer orden para el desplazamiento en eje Y e en el eje Z respectivamente.

$$\frac{w(s)}{\dot{i}_{ref}(s)} = \frac{0.4267}{s + 0.02263} \quad (4.10)$$

$$\frac{w(s)}{\dot{i}_{ref}(s)} = \frac{0.5029}{s + 0.02668} \quad (4.11)$$

Los porcentajes de similitud entre el sistema aproximado y la dinámica original son los siguientes: para el proceso de desplazamiento en el eje Y 99.85%, mientras que para el desplazamiento en el eje Z 99.86%. En la Figura 4.8.a y 4.8.b se muestran las respuestas de las dinámicas originales y las funciones de transferencias aproximadas.

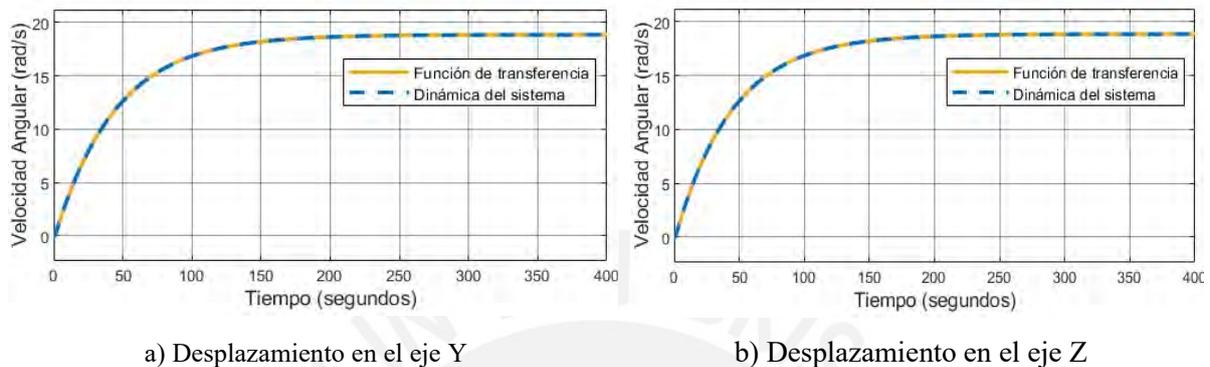


Figura 4. 8 Función de transferencias vs Dinámica original

El esquema de control propuesto se presenta en la Figura 4.9. En este diseño se utiliza un control en cascada previamente diseñado y se le añade un lazo externo para el control de posición. La respuesta en frecuencia de este lazo externo es de aproximadamente 500Hz; por lo tanto, es viable el diseño del controlador.

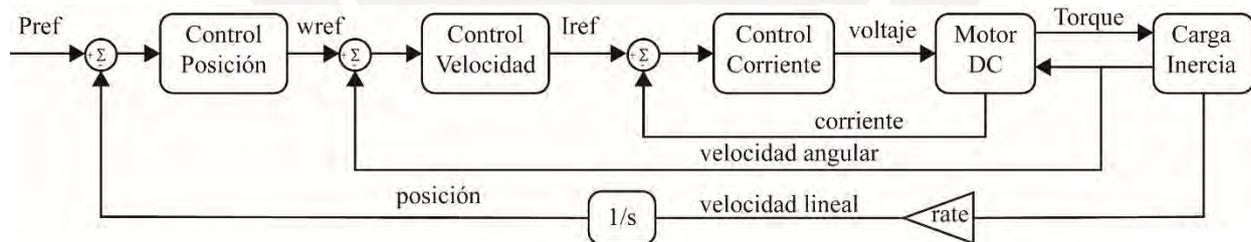


Figura 4. 9 Esquema de control para posicionamiento de antorcha

Para determinar la posición de la antorcha se debe primero conocer la velocidad lineal de las cremalleras, esta se representa por la ecuación 4.12 donde se multiplica la velocidad angular del piñón w por una ganancia. Al integrar la velocidad lineal de la cremallera se obtiene el desplazamiento de esta, por lo tanto, en el último lazo de control, se cuenta con un integrador. Esto significa que el error en estado estable siempre será cero y no se requiere incluir un integrador en el controlador de posición.

$$v_{lineal} = \pi \cdot modulo \cdot N^{\circ}dientes \cdot w \quad (4.12)$$

Posteriormente, aplicando un escalón unitario a w_{ref} y analizando la salida del sistema v_{lineal} se aproxima el comportamiento del sistema a una función de transferencia $F(s)$ de primer orden. Para el desplazamiento en el eje Y e el desplazamiento en el eje Z se obtienen la función de transferencia $F_Y(s)$ y $F_Z(s)$ respectivamente, ecuación 4.13 y 4.14. Los porcentajes de similitud entre el sistema aproximado y la dinámica original son los siguientes: para el proceso de desplazamiento en el eje Y 98.75%, mientras que para el desplazamiento en el eje Z 98.5%, y se presentan en la Figura 4.10.

$$F_Y(s) = \frac{v_{lineal}(s)}{w_{ref}(s)} = \frac{1.487}{s + 23.65} \quad (4.13)$$

$$F_Z(s) = \frac{v_{lineal}(s)}{w_{ref}(s)} = \frac{1.761}{s + 28.01} \quad (4.14)$$

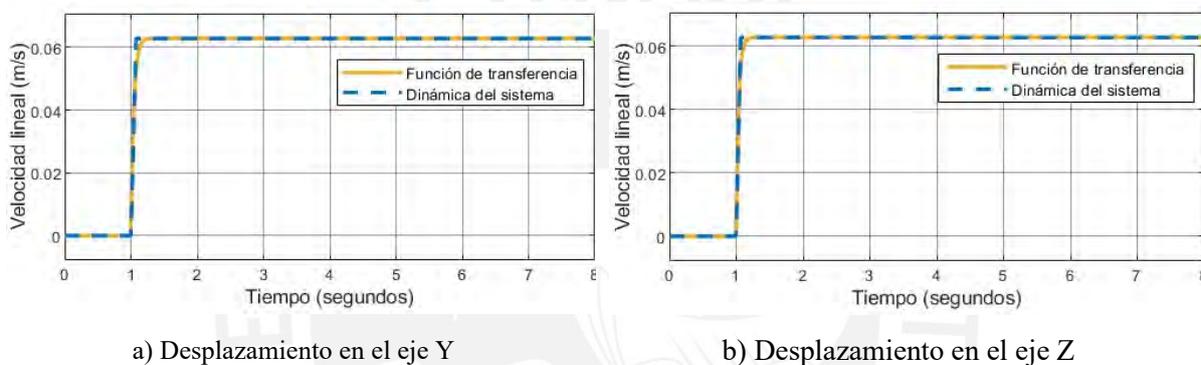


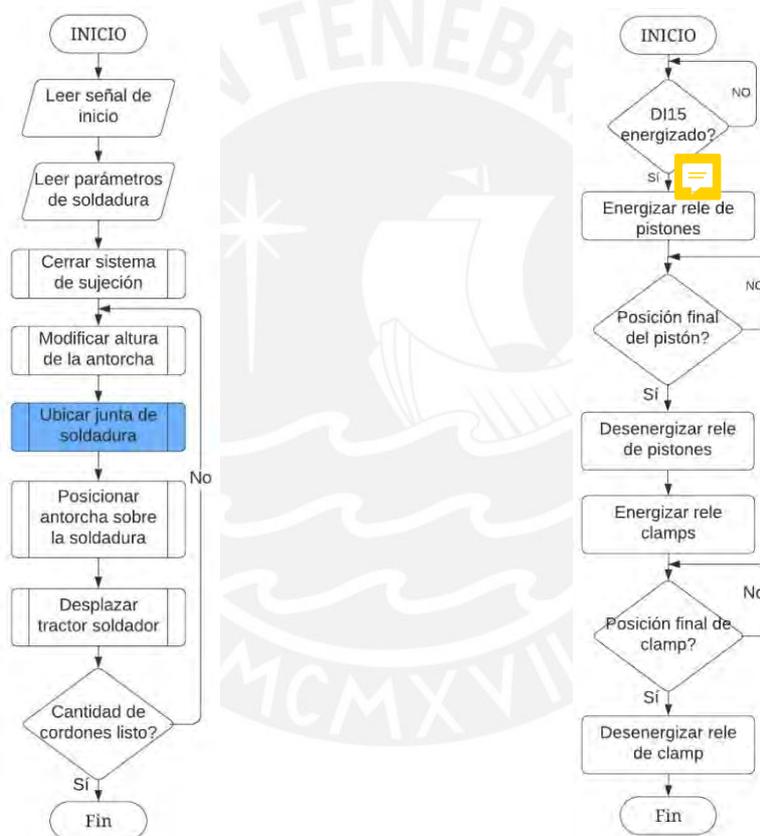
Figura 4. 10 Función de transferencias vs Dinámica original

Posteriormente, se establece un controlador proporcional con ganancia K y se obtiene la función de transferencia en lazo cerrado $G(s)$ del control de posición, ecuación 4.15. Para sintonizar el controlador, se realiza un análisis del lugar de las raíces del sistema en lazo cerrado $G(s)$. Esto permite entender el comportamiento del sistema al variar la ganancia K del controlador. En el presente diseño se establecen los siguientes requerimientos del controlador: tiempo de establecimiento $t_{ss} = 1sec$ y un máximo sobreimpulso del $m_p = 2\%$. Por último, el controlador de corriente y de velocidad angular pueden ser implementados en el driver seleccionado en el capítulo de Diseño Mecánico, mientras que el control de posición puede ser implementado en un microcontrolador.

$$G(s) = \frac{posicion(s)}{Pref(s)} = \frac{F(s) \cdot K}{1 + F(s) \cdot K} \quad (4.15)$$

4.4. Diagrama de Flujo

En el siguiente diagrama de flujo, Figura 4.11.a, se detallan todas las tareas secuenciales a realizar por el sistema automatizado. Primero se lee las señales de inicio, luego se leen los parámetros de soldadura ingresados por el soldador calificado. Después, se deben acciona el sistema de sujeción para posteriormente modificar la altura de la antorcha deseada. Luego, se determina la posición de la junta de soldadura por la metodología mencionada anteriormente. Este subproceso dará la ubicación de referencia de la junta de soldadura la cual servirá como referencia para posición la antorcha sobre la junta. Posteriormente, se desplaza el tractor soldador y se determina si se completaron todos los cordones de soldadura.



a) Flujoograma: Sistema automatizado

b) Subproceso: Cerrar sistema de sujeción

Figura 4. 11 Flujoogramas de accionamiento

El subproceso para cerrar el sistema de sujeción se ilustra en la Figura 4.11.b. Primero, se energizan sus respectivos relés, y una vez expandido por completo los pistones se desenergizan sus relés y se procede a energizan los relés de los clamps. Alcanzada la posición final se desenergizan los relés de los clamps.

Los siguientes subprocesos: Modificar altura de la antorcha, Posicionar antorcha sobre la junta y Desplazar el tractor soldador se ilustran en las Figuras 4.12.a, 4.12.b y 4.12.c respectivamente. En estos subprocesos son desarrollados por medio controladores en lazo cerrado considerando la dinámica del sistema como se explicó en la sección anterior.

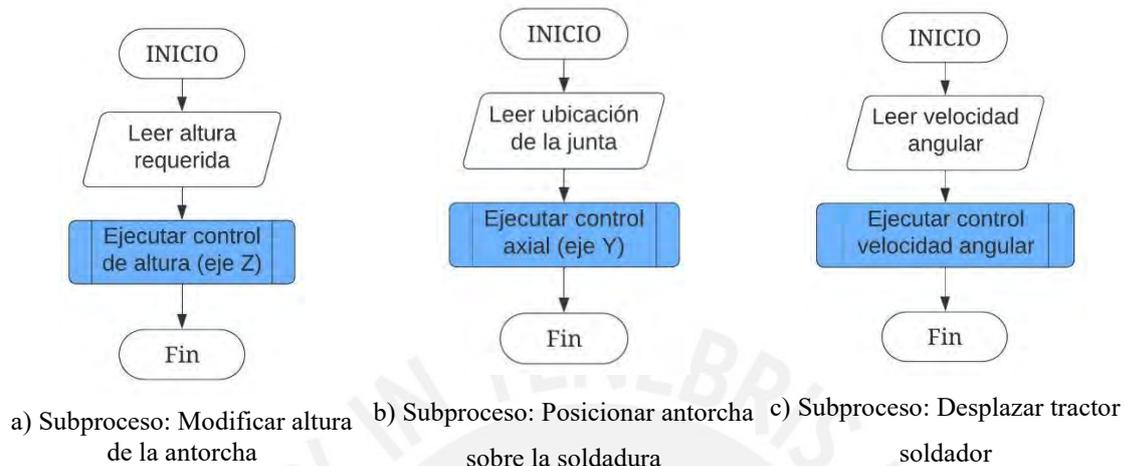


Figura 4. 12 Subprocesos de accionamiento

Para desplazar el tractor de soldadura es necesario tener presente algunos datos de importancia; el piñón del sistema de desplazamiento circunferencial cuenta con 24 dientes módulo 4, además la cremallera tiene 318 dientes módulo 4; por ello, por cada vuelta que del piñón el desplazamiento sobre la cremallera será 96 mm. A modo de ejemplo, si se desea una velocidad de avance de 96 mm/min, el piñón debe girar a 1 rpm.

4.5. Esquemático

Una vez seleccionado los sensores y actuadores, y desarrollado la lógica de control, se selecciona el controlador. Se tomará en cuenta los siguientes requerimientos de señales de entradas y salidas, Tabla 4.2.

Tabla 4. 2 Señales de entrada y salida que requiere el controlador del sistema

Señales de entrada	DI/AI	Señales de salida	DO/AO
Sensores de distancia	1 AI	3 motores DC	6 PWM
2 Clamps eléctricos	4 DI	2 Clamps eléctricos	2DO
		2 actuadores lineales	1PWM / 2DO

Por lo tanto, se requieren un total de 7 PWM para cambio de giros y velocidades, 4 DO (salida digital), 4 DI (entrada Digital) y 1 AI (entrada analógica). Además, el controlador requiere sus propios pines de alimentación y sus conexiones a tierra. Se opta por un Arduino MEGA2560, este cuenta con 12 PWM a la salida, 10 GPIO, la entrada analógica y el convertidor ADC.

En la Figura 4.13 se muestra el microcontrolador, atmega2560, con los diferentes pines a utilizar para controlar el accionar de los actuadores y leer la señal de entrada del sensor. La cantidad de pines a utilizar se encuentra detallada en la Tabla 4.2. Luego se detalla el diagrama esquemático del sensor de distancia a utilizar este requiere un pin analógico para la lectura de datos y su respectiva alimentación, Figura 4.14.

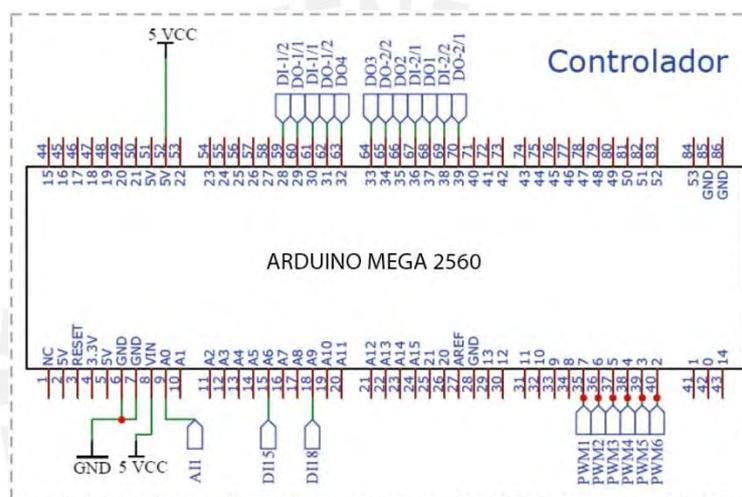


Figura 4. 13 Mega 2560, configuración de pines

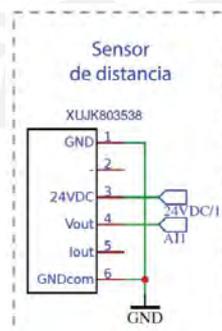


Figura 4. 14 Conexión sensor de distancia

En la Figura 4.15 se detalla la disposición de pines requeridos por los clamps eléctricos; estos son dos pines de salida y dos pines de entrada, además de la alimentación.

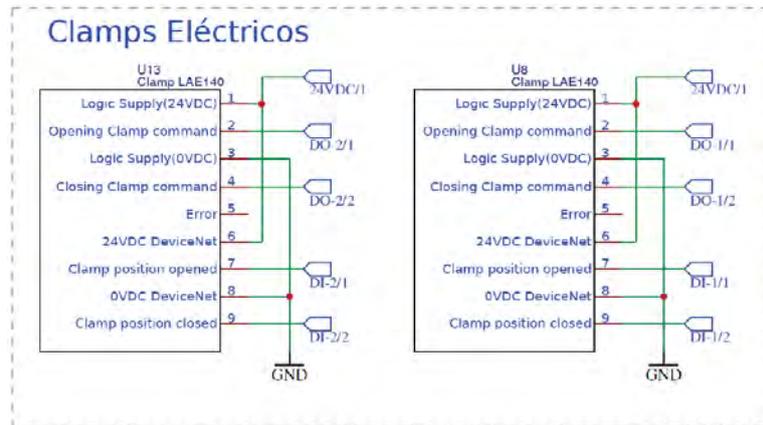


Figura 4. 15 Diagrama esquemático del clamp

Los actuadores lineales son energizados por medio de un relé de doble canal; dependiendo de la señal digital que reciban permitirán al pistón comprimirse o expandirse. Cada relé debe soportar una corriente máxima de 14A para un voltaje de 36VDC, Figura 4.16.

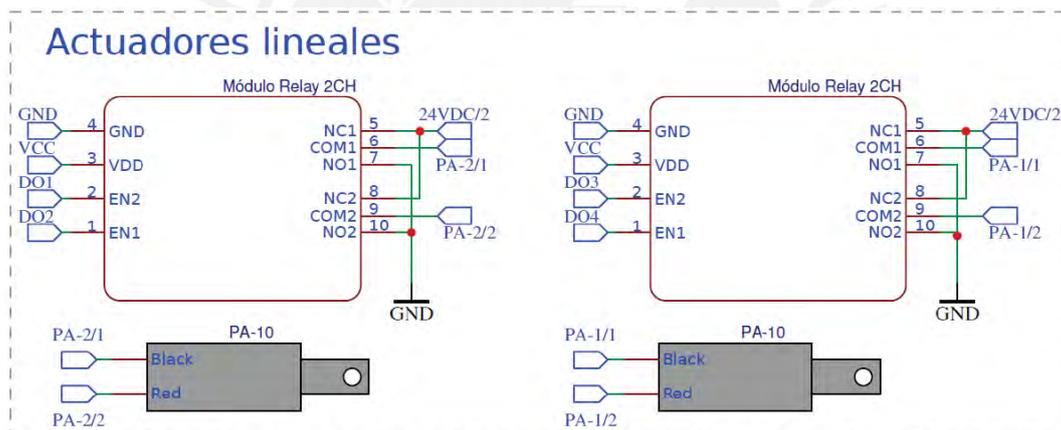


Figura 4. 16 Diagrama esquemático de los pistones eléctricos

A continuación, en la Figura 4.17, se detallan los pines de conexión utilizados entre los diferentes motores y sus drivers. Además, se aprecian las conexiones necesarias entre los drivers y los pines del controlador.

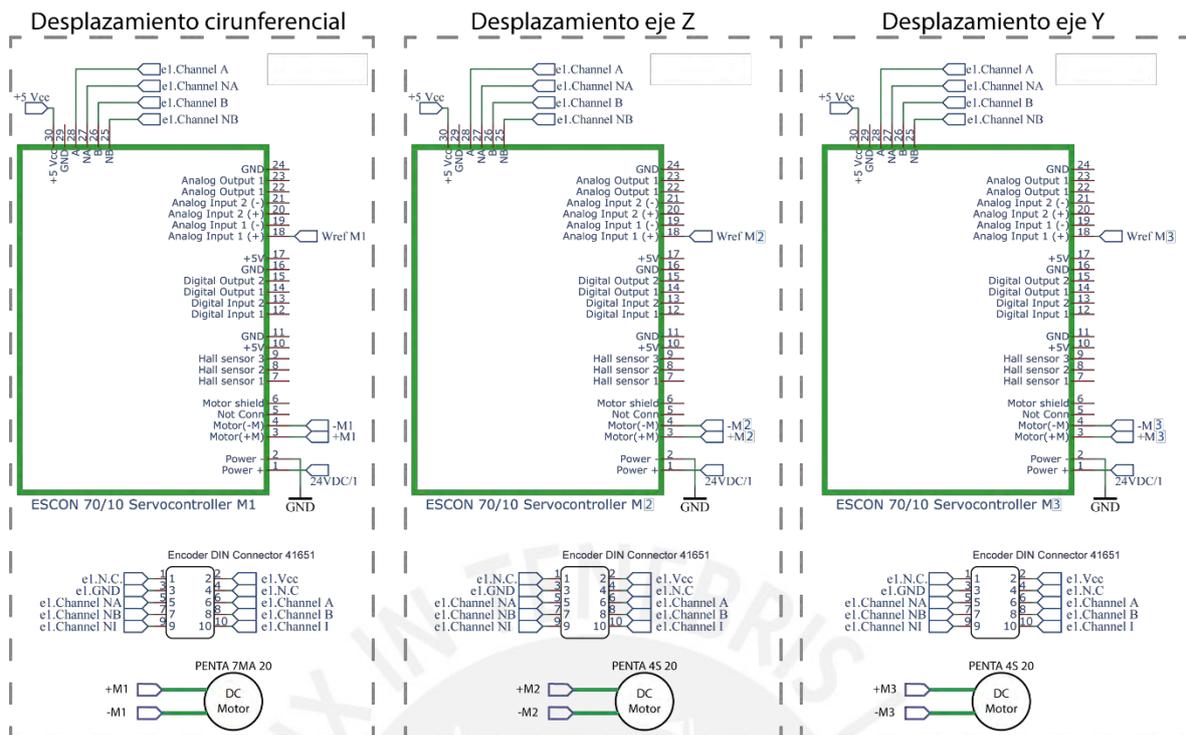


Figura 4. 17 Diagrama esquemático de los motores

Por último, se utilizará un regulador de voltaje LM7805 para obtener una salida de 5V y alimentar el Arduino por medio de la fuente switching de 24VDC. El diagrama esquemático se presenta en la Figura 4.18.

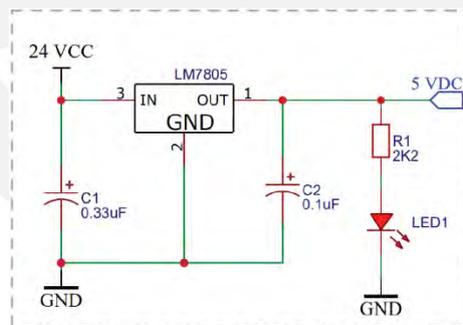


Figura 4. 18 Regulador de voltaje LM7805

Los planos completos del diagrama esquemático se pueden ver en el Anexo C. Todos los componentes electrónicos irán montados dentro de un tablero eléctrico de 600x500x80 mm de modo que se pueda tener ordenado cada componente, Figura 4.19. Este tablero eléctrico debe contener conectores en los laterales de modo que funcionen como intermediarios entre la electrónica y los actuadores.



Figura 4. 19 Tablero eléctrico

Para conectar los Clamps eléctricos se requieren dos conectores M12 de 6 pines, Figura 4.20b. Mientras que para los pistones es necesario montar dos borneras de 4 entradas cada una, Figura 4.20a. Para realizar la conexión con los motores es necesario incluir 3 borneras de 4 entradas cada una. Para conectar el sensor, es necesario contar con una bornera de 3 pines.



a) Conectores M12 – 6 pines



b) Borneras

Figura 4. 20 Conectores

La comunicación con el controlador se dará por medio de conexión serial USB con una computadora; además, se puede utilizar el software de Simulink para diseñar la interfaz gráfica y poder establecer todos los parámetros de soldadura requeridos como velocidad de avance, número de cordones de soldadura, señales de inicio y parada. Por otro lado, al sistema eléctrico se le añaden tres pulsadores de la empresa Scheneider Electric: pulsador de emergencia, pulsador de inicio y pulsador de parada; estos se muestran en los planos eléctricos Anexo C. El pulsador de inicio energiza el pin digital DI15 del microcontrolador lo cual permite iniciar el subproceso cerrar sistema de sujeción presentado en la Figura 4.11.b, mientras que el pulsador de parada energiza el pin digital DI 18, el cual se lee para determinar si se desenergizan los Reles.

Capítulo 5

Simulaciones y Experimentaciones

En el presente capítulo, se presentarán múltiples simulaciones y experimentaciones que validarán el correcto funcionamiento del sistema automatizado de soldadura orbital. Primero se realizarán análisis FEM sobre los diferentes componentes mecánicos diseñados lo cual permitirá determinar los esfuerzos que se producen al desplazar el tractor soldador sobre la tubería; además, se optimizarán los componentes mecánicos para disminuir los esfuerzos. Posteriormente, se presentarán las experimentaciones realizadas en un banco de prueba de un grado de libertad, el cual simulará el desplazamiento de la antorcha en el eje Y; por lo tanto, se validará la metodología propuesta en el capítulo anterior para ubicar el centro de la junta de soldadura. Finalmente, se presentarán los resultados del sistema de control en cascada propuesto en el capítulo anterior; estas experimentaciones se realizarán en Matlab/Simulink.

5.1. Metodología FEM

Se utilizará el software Altair Hypermesh, el cual es muy utilizado en la industria internacional. Este software es un preprocesador de elementos finitos de alto rendimiento dedicado exclusivamente al mallado de piezas mecánicas. La Figura 5.1 se detalla los pasos a realizar para un apropiado análisis FEM en la estructura (Ms. Padilla Rodrigo, 2020).

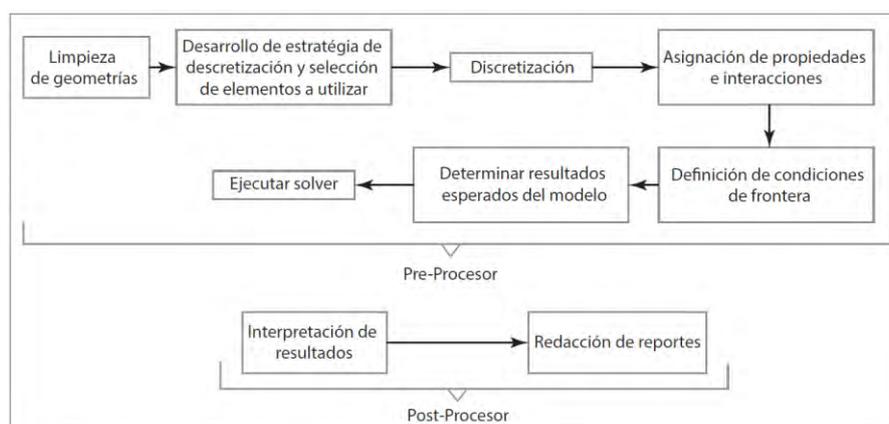


Figura 5. 1 Procedimiento de Análisis Estructural por FEM

Se quiere determinar el comportamiento del sistema de sujeción cuando el tractor soldador se desplaza alrededor de la tubería. Para ello primero se realiza la limpieza a la geometría eliminando los diferentes componentes innecesarios y los detalles de las geometrías que no permitan generar una malla de excelente calidad. La Figura 5.2 muestra en sistema 3D limpio y consiste en lo siguiente: cremalleras, estructura con sus respectivos pernos y el soporte principal.

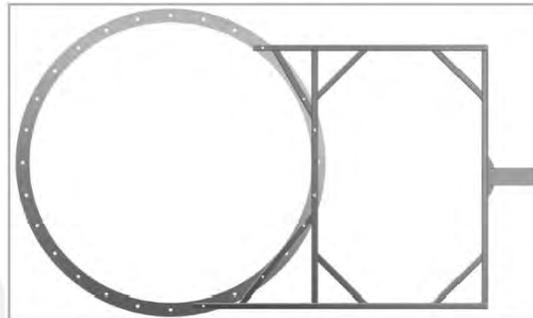


Figura 5. 2 Limpiezas de geometrías

Se establece un tamaño de malla estándar para todos los componentes con una tolerancia para que los elementos pudieran variar dependiendo de la superficie de la geometría, la dimensión estándar que se propuso fueron elementos tamaño 5 (5x5 mm) con una tolerancia de ± 2 mm con elementos quads y mixtos para que la malla se ajuste a las curvaturas del deck y transmita de manera apropiada los esfuerzos.

- Estrategia de mallado de la cremallera: Solo para esta geometría se utiliza elementos tamaño 8(8x8 mm) como se ilustra en la Figura 5.3. porque la resistencia de esta está garantizada por la empresa HepcoMotion; además, permite reducir el número de elementos a utilizar. Se extrae la superficie media para utilizar elementos tipo shell con espesor de 25mm y el material es Aluminio A6061.



Figura 5. 3 Mallado de Cremallera

- Estrategia de mallado de la estructura: De la misma manera, se extrae la superficie media para disminuir la cantidad de elementos y los perfiles están unidos con soldadura

como se ilustra en la Figura 5.4. El material de la estructura acero similar al ASTM A501. Se utilizan perfiles cuadrados de 1" con 1 mm de espesor. Por medio de la presente simulación se determinará si la estructura falla. Por otro lado, el factor de seguridad recomendado es de 1,2.

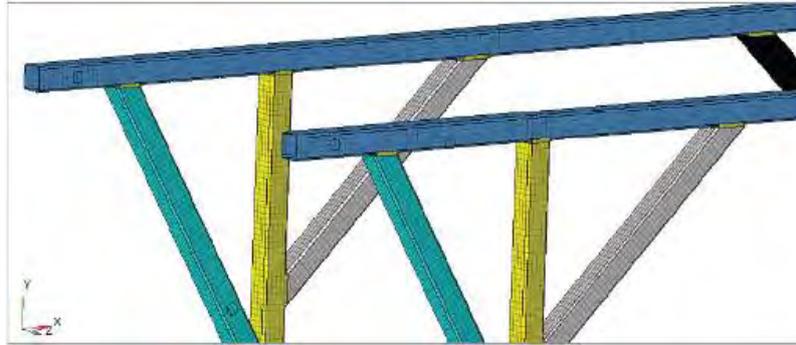


Figura 5. 4 Malla de Estructura

- Estrategia de mallado de la sujeción principal: Se utilizan elementos 3D tetragonales, Figura 5.5, debido a que los espesores de las placas y del enganche principal son superiores a los tamaños de los elementos utilizados en la estructura. Además, permite determinar a exactitud el comportamiento de las piezas mecánicas. Los elementos de unión son tornillos para la placa frontal y posterior de 8mm; por otro lado, se utiliza soldadura para las cartelas y la placa posterior.

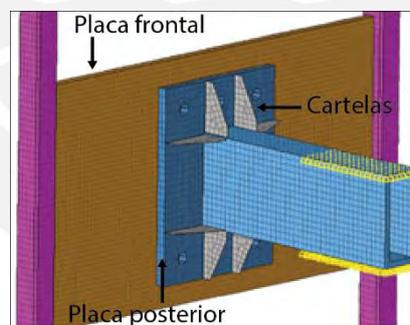
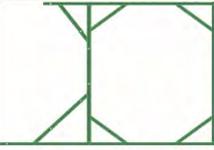


Figura 5. 5 Malla del enganche principal

Es importante determinar si los elementos de las mallas cumplen con los requerimientos mínimos de diseño. Algunos de los requerimientos que deben cumplir los elementos son los siguientes: tamaño mínimo y máximo, relación de aspecto, jacobianos, calidad de elementos, #fallos y %fallos. Se utiliza el quality index del software para determinar la calidad de las mallas. El min. size y el max. size se refieren a la longitud mínima y máxima de las longitudes de los elementos; estos valores deben ser $\pm 2\text{mm}$ del tamaño del elemento. El aspect ratio es la medida de la desviación de un elemento de malla de tener todos los lados de la misma longitud;

se produce una relación de aspecto alta con elementos largos y delgados. El jacobiano es la medida de desviación de un elemento de su forma ideal o perfecta; los elementos de forma deficiente pueden causar un error de volumen negativo durante la ejecución; lo ideal es tener un jacobiano no menor a 0.6. La Tabla 5.1 presenta un resumen de los requerimientos para cada malla generada para cada pieza.

Tabla 5. 1 Valores del Quality Index de las mallas diseñadas

Componente	Min size	Max Size	Aspect ratio	Jacobian	Comp. IQ	# Failed	%Failed
	*	*	*	*	0	0	0
	3.2	5.6	1.5	0.71	0.07	0	0
	*	*	*	*	0	0	0
	*	*	*	*	0	0	0
	2.8	6.8	2.6	0.75	0.03	2	0.2
	6.2	9.2	1.9	0.68	0.01	0	0
Estructura completa							
	2.8	9.2	2.2	3.2	1.2	2	0

Como se puede apreciar la calidad de las mallas son óptimas; por lo tanto, se procede a establecer las cargas y las condiciones de fronteras.

5.2. Análisis FEM del sistema de sujeción

La estructura de sujeción es el sistema principal y debe garantizar la estabilidad; por ello, es necesario analizar el caso estático crítico, en el cual los componentes mecánicos fallan. Además, es imprescindible realizar un análisis dinámico sobre la estructura, ya que el tractor soldador se estará trasladando sobre la cremallera; en este caso el peso del tractor puede ser analizado como una carga alternante. Por otro lado, debido a las dimensiones de la estructura y a que esta está apoyada en un extremo, se requiere realizar obligatoriamente un análisis de pandeo y nodal para validar el sistema y determinar las frecuencias fundamentales. En este capítulo se realizarán los siguientes casos de carga: Análisis estático, Análisis dinámico, Análisis de pandeo y Análisis modal

5.2.1. Análisis estático

Se ponen las cargas del tractor soldador en el extremo más distante del sistema de sujeción. Para ello se determina el peso del tractor soldador (25Kg) y el momento flector que genera este sobre la cremallera, además se considera que las cremalleras no están montadas sobre las tuberías. En la Figura 5.6 se muestran los esfuerzos máximos en las piezas, así como las deformaciones. La deformación máxima es de 8,5 cm; sin embargo, esto es contrarrestado con el sistema antivibración implementado el cual permite ajustar la cremallera sobre la tubería reduciendo la deformación. El esfuerzo máximo, 426 MPa, se encuentra en el perfil conectado a las placas de sujeción; sin embargo, sobrepasa el esfuerzo de fluencia del material: 320 MPa. Por lo tanto, el sistema de sujeción falla.

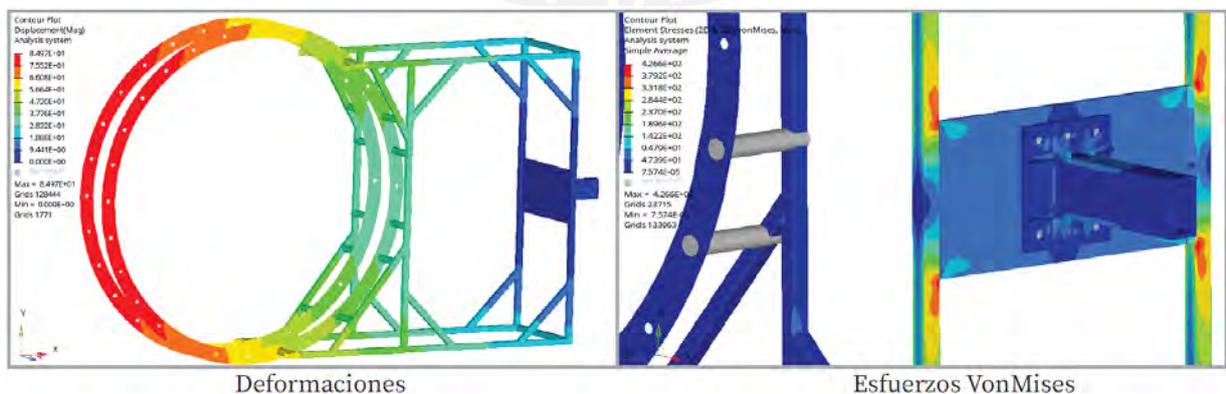


Figura 5. 6 Análisis Estático

5.2.2. Análisis dinámico

En este caso, se analizará el comportamiento de la estructura cuando el tractor soldador se desplaza sobre las cremalleras. Para ello se determina el centro de gravedad de las cremalleras y se aplica una carga sinusoidal de magnitud igual al peso del tractor más cremalleras; este caso se puede representar como un análisis de esfuerzo alternante puro, lo cual permite tener una aproximación del comportamiento planteado. De este modo, en la Figura 5.7 se aprecia una deformación máxima de 6 cm y un esfuerzo máximo de 314 MPa; por lo tanto, se concluye que la estructura es capaz de soportar las cargas, pero no satisface el factor de seguridad recomendado.

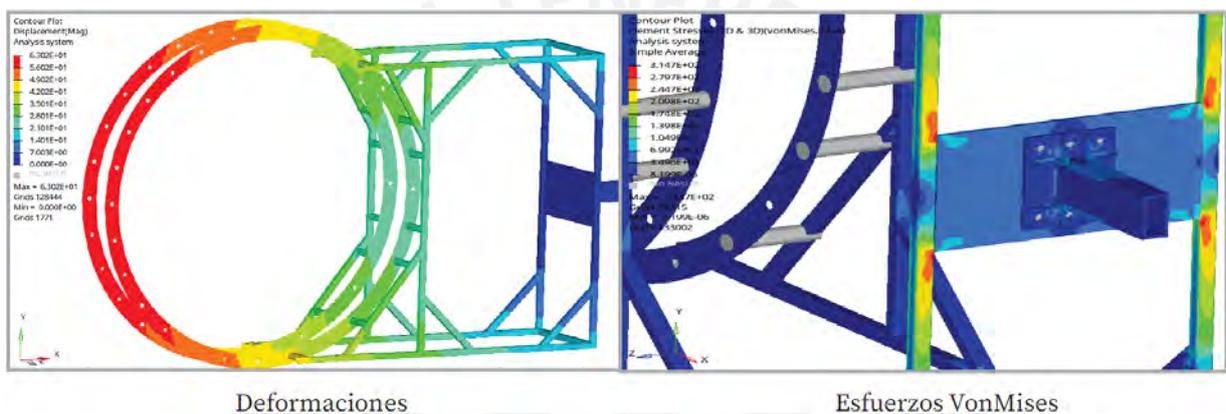


Figura 5. 7 Análisis dinámico

5.2.3. Análisis de pandeo

Es necesario conocer el comportamiento propio de la estructura y cuál es el posible modo de pandeo. Para esto se basa en el análisis estático. Se obtienen los 10 primeros modos de pandeo, pero se toma en consideración solo el primero. Los resultados se presentan en la Figura 5.8 y se observa que el valor del multiplicador λ es mayor a 1; esto indica que la fuerza de tracción presente en la estructura puede ser 8 veces mayor para generar el pandeo y falle. Sin embargo, de los análisis realizados anteriormente se demostró que la estructura ya no permite el aumento de cargas.

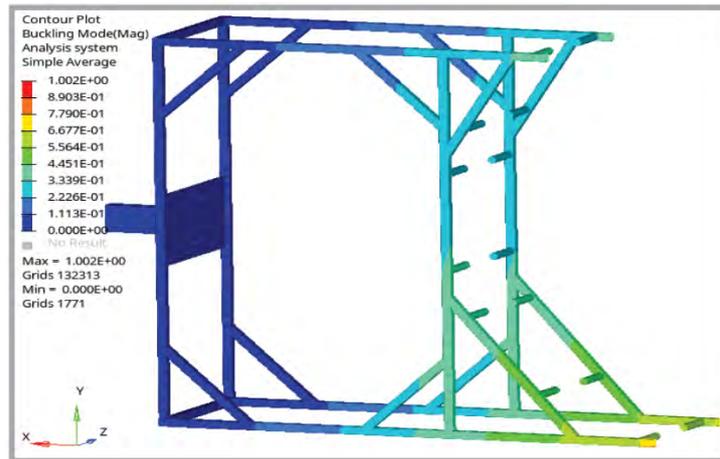


Figura 5. 8 Ubicación de las plataformas de fuerza

5.2.4. Análisis de nodal

Por último, se requiere determinar las frecuencias de natural de vibración del sistema de sujeción. En este caso solo se considera el peso del sistema de sujeción. El primer modo de vibración se da a 1,7 Hz (Figura 5.9) y el esfuerzo es de 65 MPa, mientras que el segundo modo de vibración se da a 1,95 Hz (Figura 5.9) y genera un esfuerzo en la placa de 76 MPa, y para el tercer modo de vibración, Figura 5.9, se da a 3,11 Hz (Figura 5.10) con un esfuerzo máximo de 40 MPa.

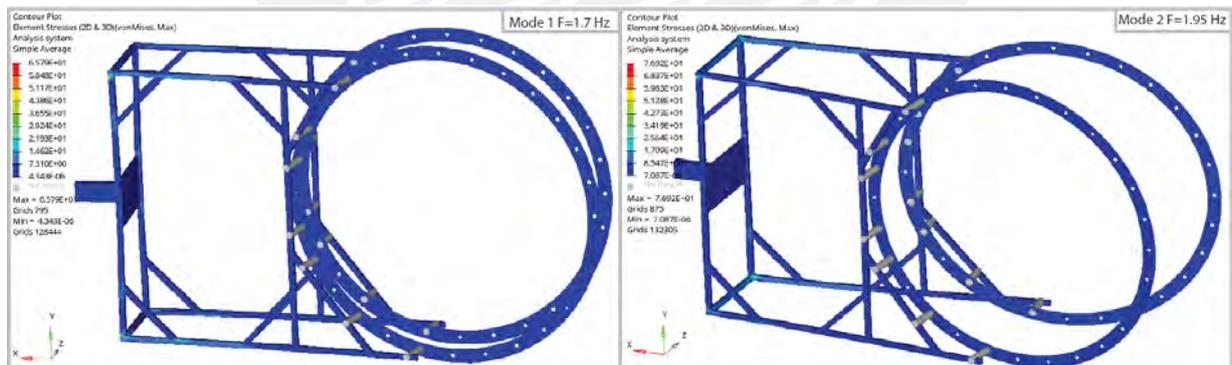


Figura 5. 9 Análisis modal: 1er y 2do modo de vibración

De los análisis realizados anteriormente, se concluye que la estructura es capaz de soportar las cargas; sin embargo, se propone el siguiente rediseño en la unión de las placas con la estructura.

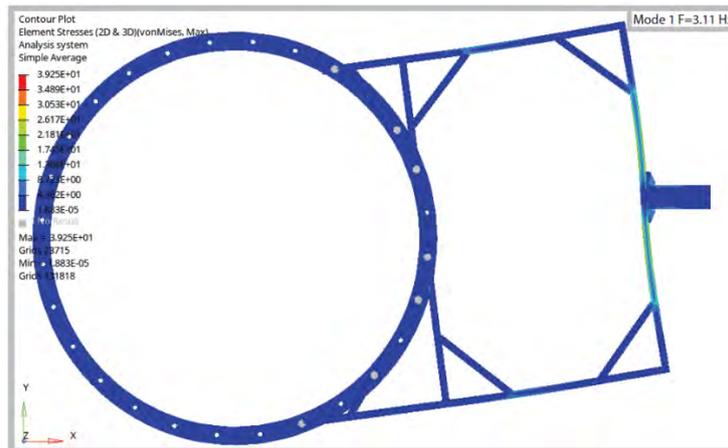


Figura 5. 10 Análisis modal: 3er modo de vibración

5.3. Rediseño de la estructura

Se rediseñan las uniones y se incluyen abrazaderas atornilladas (M8) a la estructura, además se alarga el área de sujeción para disminuir los esfuerzos; estas abrazaderas van soldadas en la parte superior a la estructura. La placa principal, en vez de ir soldadas directamente a la estructura, van soldadas a las abrazaderas, y se adicionan cuatro cartelas de 3 mm de espesor en las esquinas de la placa principal para disminuir los esfuerzos. El nuevo diseño se muestra en la Figura 5.11 y se presenta las mallas de las nuevas piezas en la Figura 5.12 y se verifica la calidad de los elementos del mismo modo que se realizó anteriormente.

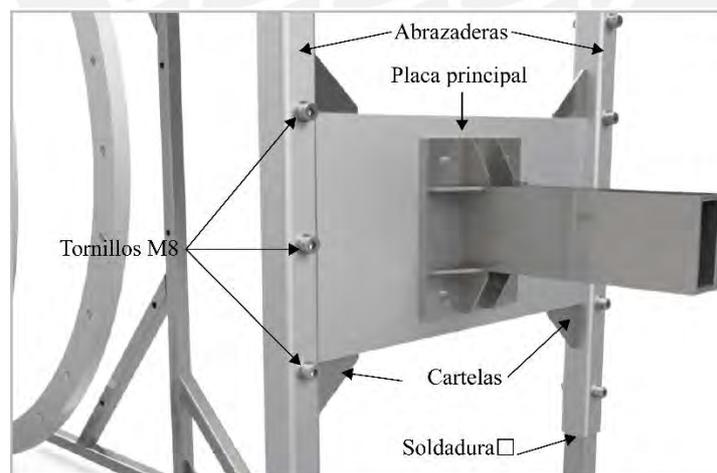


Figura 5. 11 Rediseño de Componentes de Sujeción

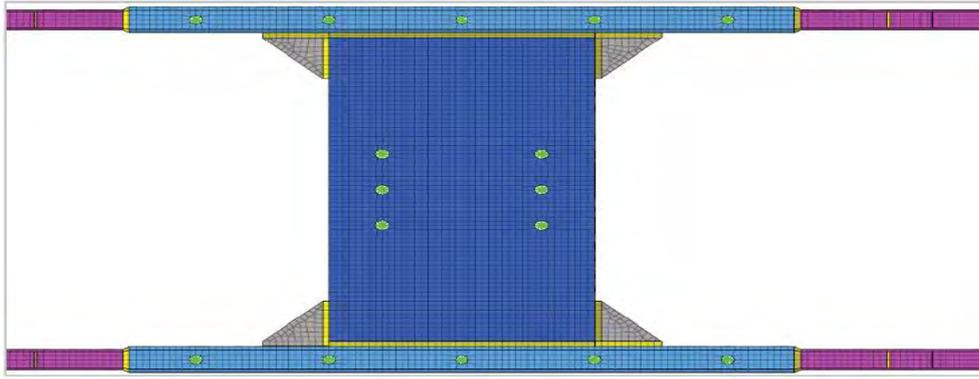


Figura 5.12 Remallado de componentes

5.3.1. Diseño mejorado análisis estático

Se repite el análisis estático, Figura 5.13. Se muestran una disminución en los esfuerzos en la estructura a 276 MPa; esto representa un 35 % menos de esfuerzos en los perfiles, además se cumple con un factor de seguridad de 1,18. Las cartelas tienen un esfuerzo máximo de 184 MPa cumpliendo su propósito de absorber parte de la carga. Además, en la Figura 5.14, se aprecia una disminución en la deformación del extremo de la cremallera en 3 cm; esto es imperceptible en la fuera que debe aplicar en el sistema antivibración.

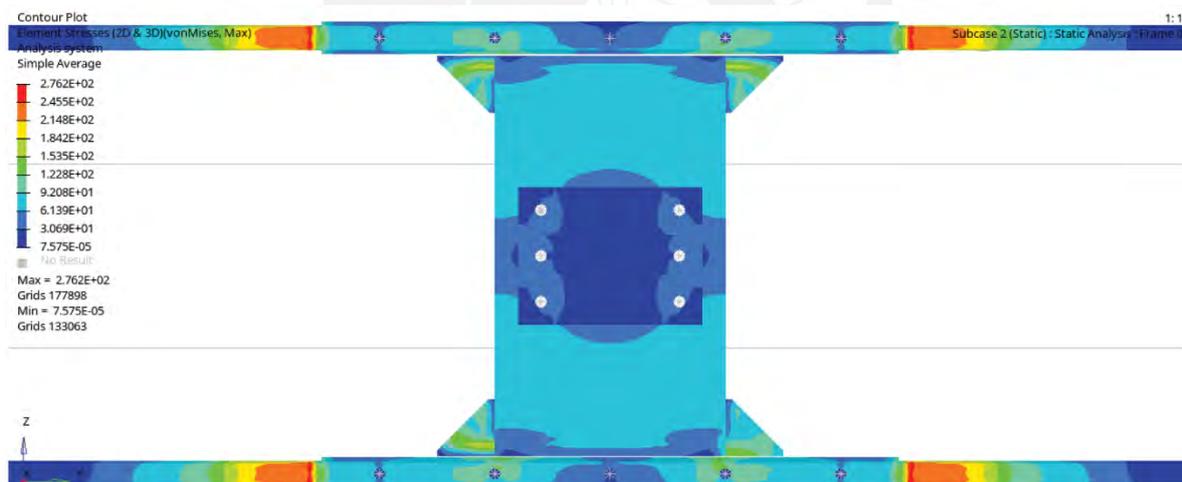


Figura 5.13 Mejoras: Análisis estático, esfuerzos

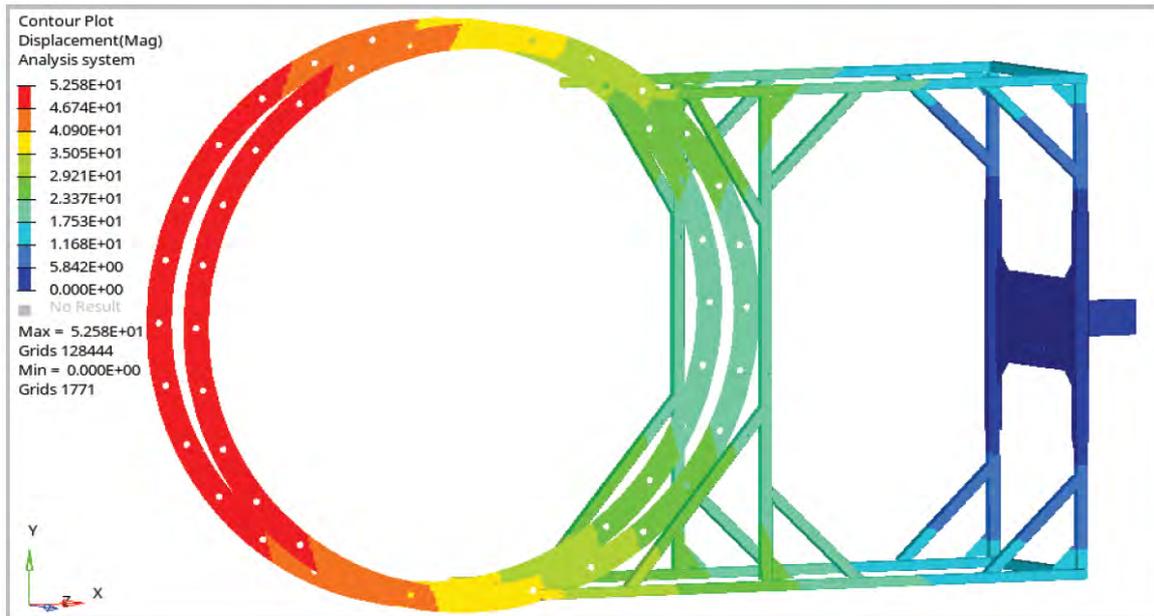


Figura 5. 14 Mejoras: Análisis estático, deformaciones

5.3.2. Diseño mejorado análisis dinámico

Se repite el análisis dinámico, Figura 5.15. Se aprecia una disminución de los esfuerzos en la estructura a 223 MPa; esto representa un 28 % menos de esfuerzos en el perfil. Las cartelas tienen un esfuerzo máximo de 143 MPa. En la Figura 5.16, se aprecia una disminución en la deformación al extremo de la cremallera en 3,8 cm. Sin embargo, esto no tiene repercusión en el sistema antivibración, ya que este análisis con carga alternante no se aplica sobre la tubería.

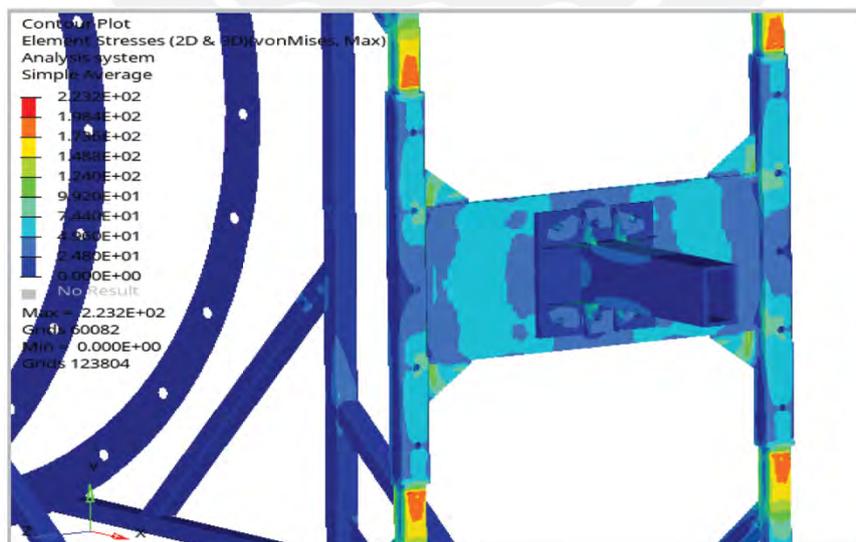


Figura 5. 15 Mejoras: Análisis dinámico, esfuerzos

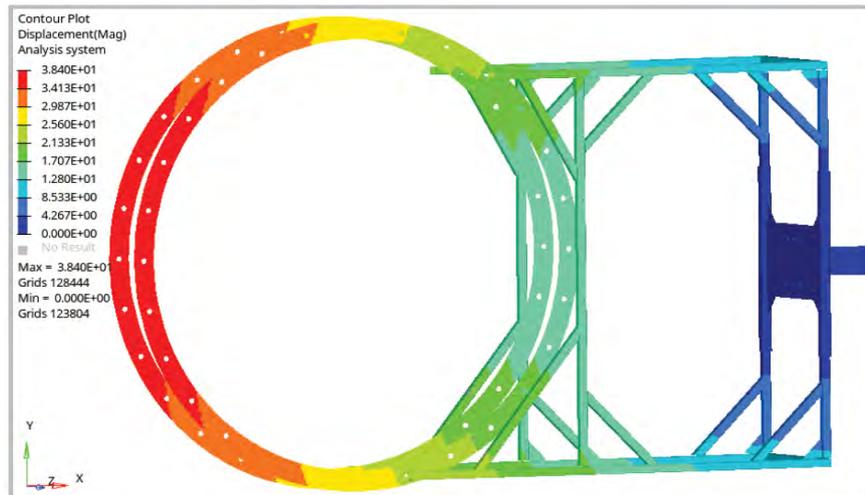


Figura 5. 16 Mejoras: Análisis dinámico, deformaciones

5.4. Optimización FEM Palanca

Se realizará el rediseño topológico a la palanca, al soporte del clamp y al soporte principal de sujeción. Los objetivos planteados son los siguientes: Análisis de esfuerzos en las piezas mecánicas y disminución del material innecesario en las piezas por medio de un análisis topológico. El espesor establecido fue de 5mm y el material acero A36, además dos de las dimensiones de las piezas son más grandes que el espesor. Por lo tanto, se sugiere utilizar elementos tipo shell: el tamaño de los elementos serán 5mm y para refinar la malla en los agujeros se utilizarán elementos de tamaño 2,5mm como se presenta en la Figura 5.17.

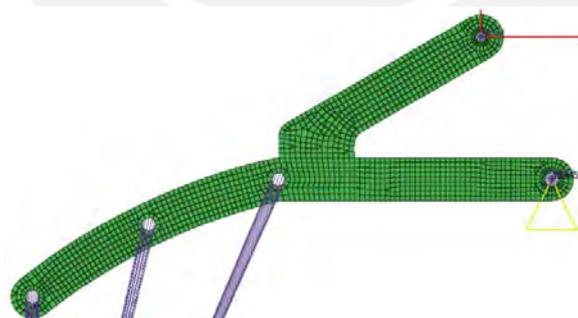


Figura 5. 17 Malla de la Palanca

Para determinar la calidad de la malla generada se utilizará el Qualityindex del software; todos los parámetros que deben cumplir los elementos para sus respectivos tamaños se presentan en la Figura 5.18. Se puede apreciar en la Figura 5.19 que todos los elementos generados pasan los criterios de calidad.

Target element size: 2.500		Advanced Criteria Table	
Checks	On	Fail	Individual Methods
Min Size	<input checked="" type="checkbox"/>	1.250	Minimal normalized height
Max Size	<input checked="" type="checkbox"/>	4.000	
Aspect Ratio	<input checked="" type="checkbox"/>	5.000	OptStruct
Warpage	<input checked="" type="checkbox"/>	15.000	OptStruct
Max Interior Angle Quad	<input checked="" type="checkbox"/>	140.000	
Min Interior Angle Quad	<input checked="" type="checkbox"/>	40.000	
Max Interior Angle Tria	<input checked="" type="checkbox"/>	120.000	
Min Interior Angle Tria	<input checked="" type="checkbox"/>	30.000	
Skew	<input checked="" type="checkbox"/>	40.000	OptStruct
Jacobian	<input checked="" type="checkbox"/>	0.600	At integration points
Chordal Deviation	<input type="checkbox"/>	1.000	
Taper	<input checked="" type="checkbox"/>	0.600	OptStruct
% of Trias	<input checked="" type="checkbox"/>	15.000	

Use min length from timestep calculator			
Min Size	On	Fail	
User input	<input checked="" type="checkbox"/>	1.250	
Based on time step	<input checked="" type="checkbox"/>	4.511	

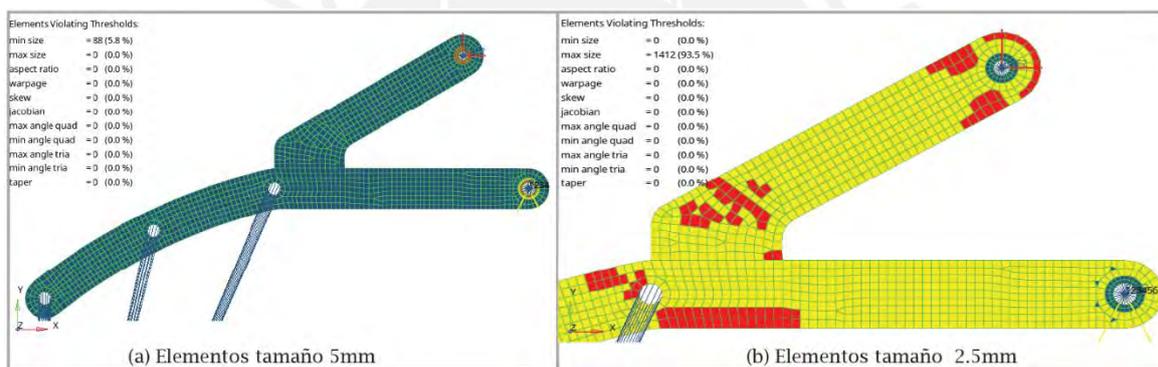
Target element size: 5.000		Advanced Criteria Table	
Checks	On	Fail	Individual Methods
Min Size	<input checked="" type="checkbox"/>	2.500	Minimal normalized height
Max Size	<input checked="" type="checkbox"/>	8.000	
Aspect Ratio	<input checked="" type="checkbox"/>	5.000	OptStruct
Warpage	<input checked="" type="checkbox"/>	15.000	OptStruct
Max Interior Angle Quad	<input checked="" type="checkbox"/>	140.000	
Min Interior Angle Quad	<input checked="" type="checkbox"/>	40.000	
Max Interior Angle Tria	<input checked="" type="checkbox"/>	120.000	
Min Interior Angle Tria	<input checked="" type="checkbox"/>	30.000	
Skew	<input checked="" type="checkbox"/>	40.000	OptStruct
Jacobian	<input checked="" type="checkbox"/>	0.600	At integration points
Chordal Deviation	<input type="checkbox"/>	1.000	
Taper	<input checked="" type="checkbox"/>	0.600	OptStruct
% of Trias	<input checked="" type="checkbox"/>	15.000	

Use min length from timestep calculator			
Min Size	On	Fail	
User input	<input checked="" type="checkbox"/>	2.500	
Based on time step	<input checked="" type="checkbox"/>	4.511	

a) Criterio Quality index 2.5 mm

b) Criterio Quality index 5 mm

Figura 5. 18 . Sujeción principal



(a) Elementos tamaño 5mm

(b) Elementos tamaño 2.5mm

Figura 5. 19 Calidad de malla diseñada

Las cargas presentes en la pieza son las fuerzas de pistón (Figura 3. 21) y el peso de la cremallera; este se aproximadamente 9kg incluyendo el peso del sistema antivibración. Se realiza un análisis dinámico de las cargas durante todo el proceso de elevar la cremallera, y se obtiene los esfuerzos críticos y deformaciones de la palanca como se aprecia en la siguiente imagen. Para disminuir los esfuerzos en la pieza se aumentó el espesor de 5mm a 7mm y en la siguiente imagen se aprecia que el esfuerzo máximo de Von Mises es de 154 MPa en la esquina; además, la deformación máxima es de 2mm y se encuentra ubicado en el extremo de la palanca. La deformación y esfuerzos es aceptable.

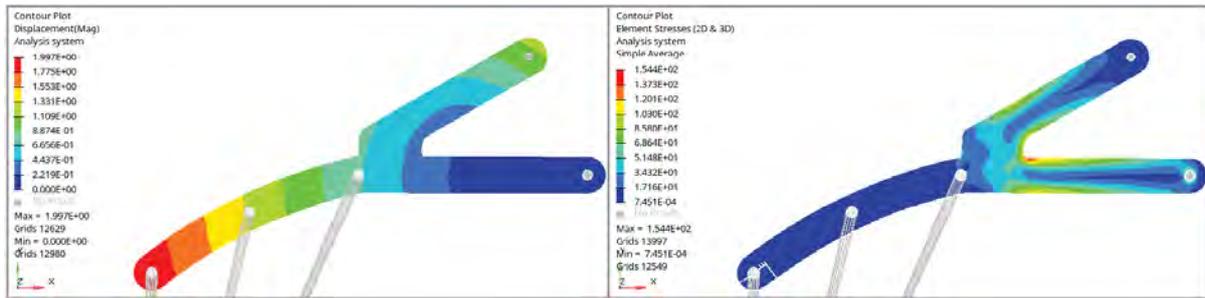


Figura 5. 20 Esfuerzo máximo y deformaciones

Se realiza el rediseño de la pieza para disminuir los esfuerzos y el material innecesario; el nuevo modelo se aprecia a continuación. Como se aprecia el esfuerzo de von Mises disminuye a 145 MPa gracias al redondeo incluido en la esquina y se disminuye el peso del material en un 40 %.

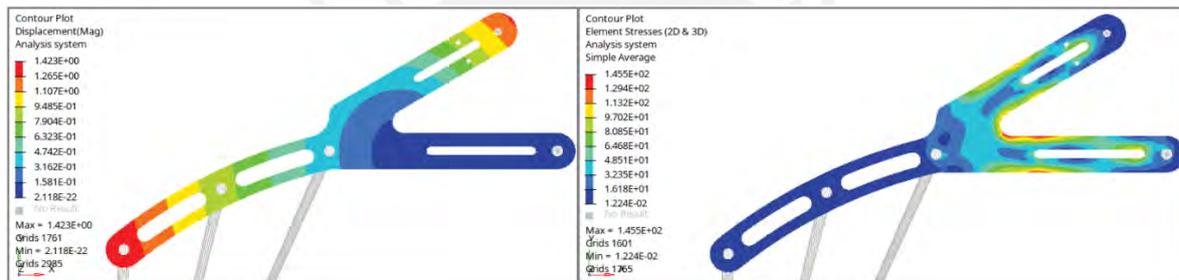


Figura 5. 21 Rediseño topológico, Esfuerzo máximo y deformaciones

5.5. Experimentaciones

Se realiza la validación de la lógica propuesta para la detección de la junta de soldadura propuesto en el capítulo anterior. Para ello se realiza una experimentación, en la cual se debe replicar el desplazamiento en el eje Y del tractor soldador. El objetivo será determinar el desplazamiento en Y requerido por la cremallera para desplazar la antorcha sobre el centro de la junta de soldadura. Esta experimentación requiere los siguientes componentes: tubos de acero biselados, un microcontrolador, un sensor de distancia, un mecanismo de desplazamiento lineal, fuente de voltaje, software y hardware para la adquisición de datos.

Se utiliza un banco de pruebas con un grado de libertad (eje Y), Figura 5.22, para simular el desplazamiento en el eje Y del tractor soldador. Este banco consta de un pistón hidráulico con un controlador de velocidad lineal y será accionado a 0.01 m/seg simulando la velocidad lineal de la cremallera; además, la carrera del pistón es de 1 metros.

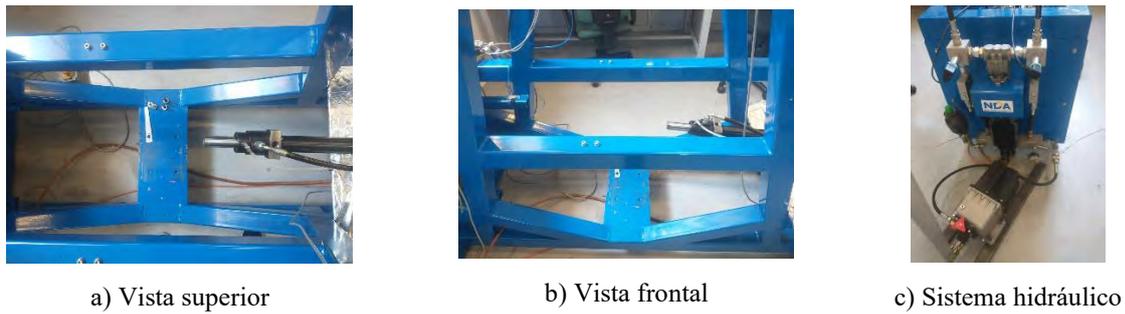


Figura 5. 22. Banco de pruebas

El esquema de la experimentación se presenta en la Figura 5.23. En el extremo del pistón del banco de pruebas se coloca el sensor de distancia y debajo de estos se colocan dos tubos biselados, además se conectó el sensor de distancia a un microcontrolador para la manipulación de datos, y este a una PC para la visualización de datos. Las condiciones iniciales de las experimentaciones se dan cuando el pistón está completamente contraído, mientras que el origen de coordenadas se alinea con el sensor y se posicionan a 5 cm de cilindro hidráulico. Por otro lado, las experimentaciones estarán divididas en dos grupos: el grupo A tendrá el centro de la junta de soldadura a 0.55 m del origen, mientras que el grupo B tendrá el centro de la junta de soldadura a 0.25 m del origen, y se realizarán cuatro experimentaciones por grupo.

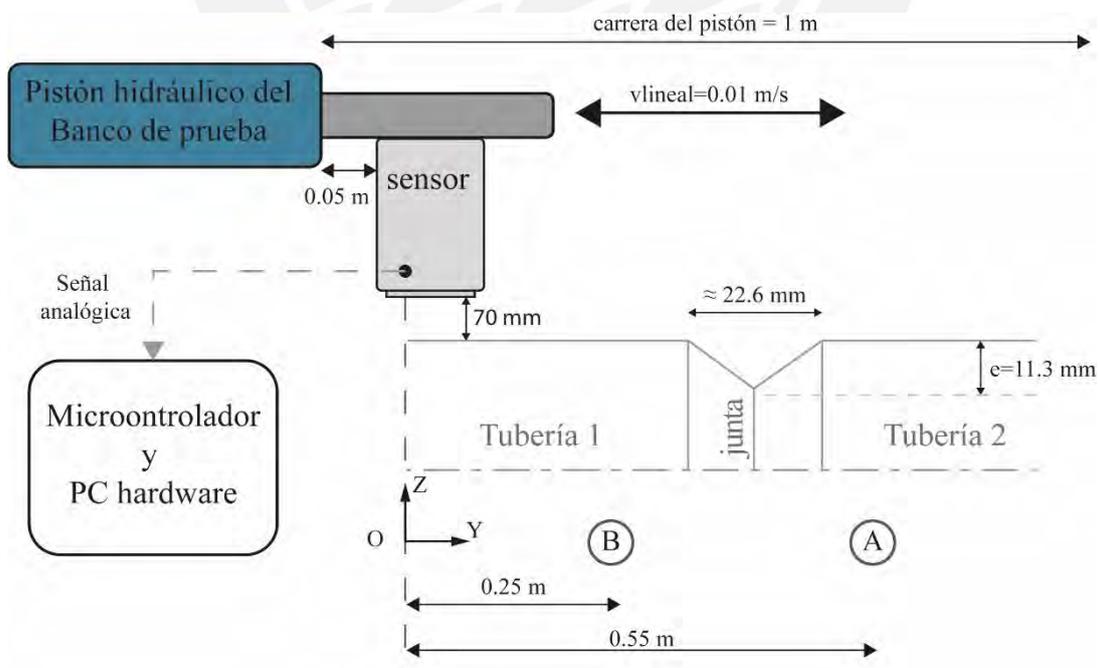


Figura 5. 23.. Esquema de la experimentación

Dadas las dimensiones del banco de pruebas, se utilizan dos tubos según norma API 5L GR. B/ASTM A 106 GR. B de 4 pulgadas (114.3 mm) y espesor de $e = 11.3 \text{ mm}$ con una longitud de 500 mm y biselados de 45% en los extremos, además la separación entre el sensor y el diámetro exterior de los tubos es aproximadamente de x . Por otro lado, el sensor de distancia a utilizar es optoNCDT LD 1605-20 de la marca Micro-Epsilon Messtechnikm cuyas características se encuentran descritas en la Tabla 5.2. este sensor cuenta con una salida analógica; por lo tanto, la distancia medida es directamente proporcional a la salida de voltaje. Para la lectura de datos se utiliza el launchpad de Texas Instruments F28379D, este por medio de un módulo ADC se convierte la señal analógica en digital. Las características de dicho microcontrolador se detallan en la Tabla 5.2. Por último, se utiliza una fuente de voltaje para la alimentación del sensor.

Tabla 5. 2 Launchpad Texas Instrument F28379D y sensor de distancia

Launchpad F28379D		optoNCDT LD	
Características	Valor	Características	Valor
Voltaje	5V	Rango	100 +/- 50mm
Salidas analógicas	Sí	Salida	+/- 10V
Matlab/Simulink integración	Sí	Frecuencia de muestreo	2.5 KHz
CPU	200MHz	Alimentación	24V/200mA
Convertor analógico/digital	16 bit	Error de medición	0.5%

Para la visualización y manipulación de los datos obtenidos por el sensor, se conecta el launchpad con el software SIMULINK, en el cual se configura el módulo ADC con 16 bits de resolución y la frecuencia de muestreo; la Figura 5.24 muestra la estructura de comunicaciones.

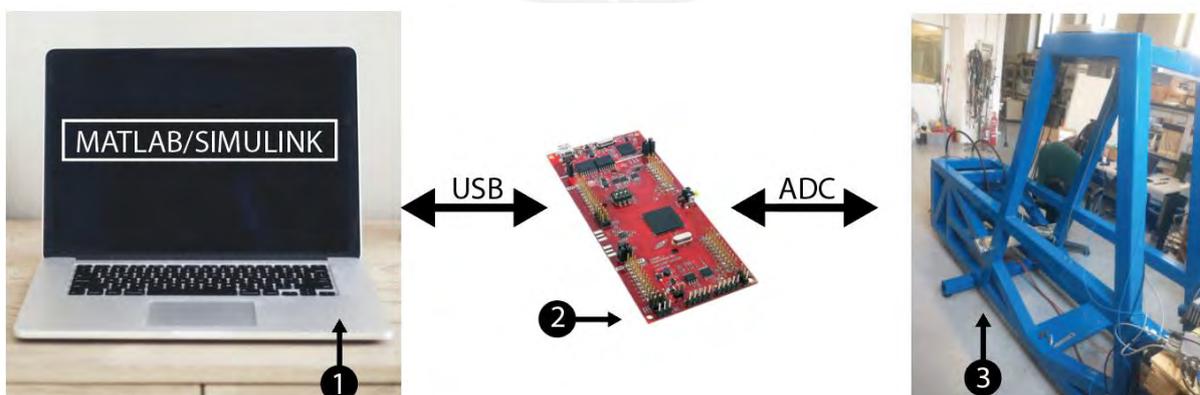


Figura 5. 24 Estructura de comunicaciones: 1) PC software; 2) Controlador Launchpad F28379D; 3) Banco de Pruebas

Los resultados experimentales obtenidos para el grupo A y B se presentan en la Figura 5.25 y Figura 5.26 respectivamente. El diámetro exterior de las tuberías se encuentra a una distancia $Z = 0 \text{ m}$, mientras que las curvas representan las alturas de los biseles. Se aprecia que todas las experimentaciones no presentan el mismo resultado, tienen un desfase y las alturas máximas medidas son diferentes. Para el grupo A, dada la velocidad lineal y la posición a la que se encuentra la junta de soldadura, se espera que las curvas de medición se encuentren centradas en el instante $t = 55 \text{ seg}$; sin embargo, se observa que ninguna logra cumplir con lo esperado y se detecta la junta aproximadamente 2 segundos antes. Del grupo B, se espera que las curvas de medición estén centradas en el instante $t = 25 \text{ seg}$; sin embargo, las juntas se detectan aproximadamente 3 segundos antes de lo esperado. Por otro lado, como se presenta en la Figura 5.23, la altura máxima que debe medir el sensor es $z = e = 11.3 \text{ mm}$; sin embargo, las alturas máximas son de 12 mm aproximadamente.

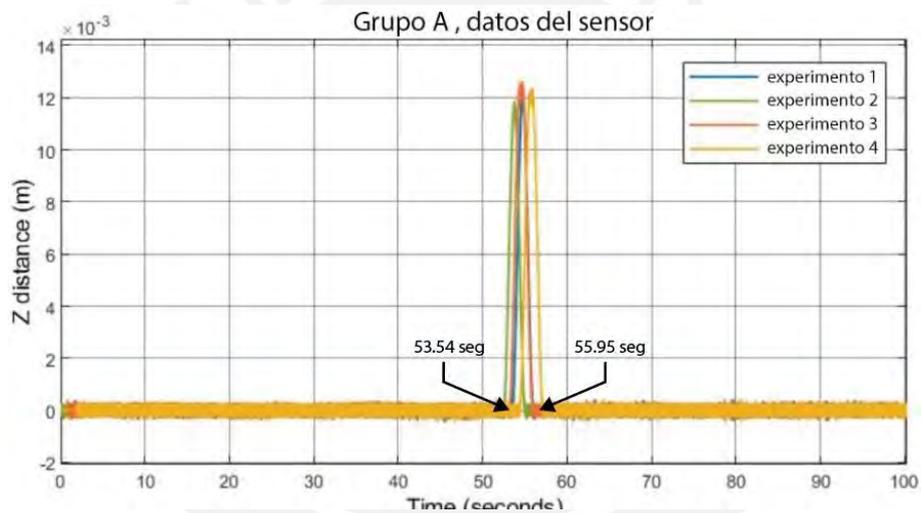


Figura 5. 25. Grupo A, datos recolectados del sensor

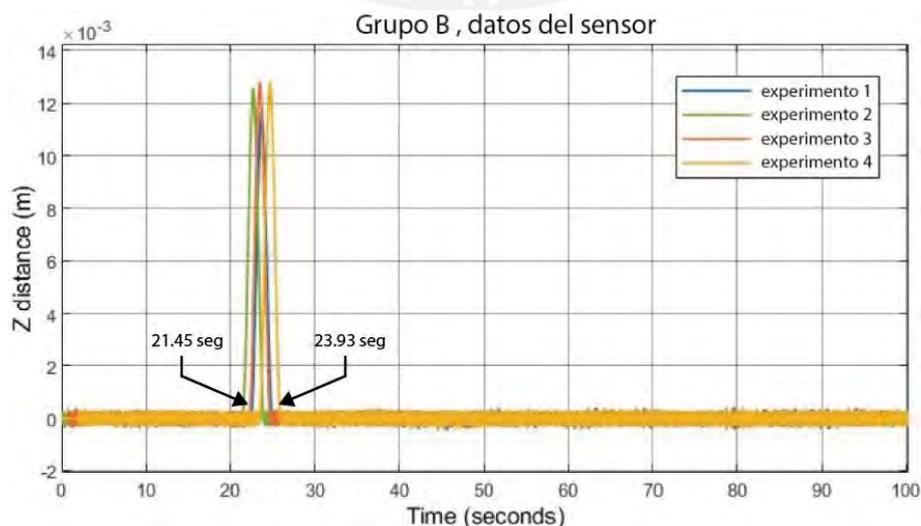


Figura 5. 26 Grupo B, datos recolectados del sensor

Debido a la presencia del ruido, es necesario filtrar las alturas para determinar el inicio y fin de las juntas de soldadura; por ello, en base a las mediciones observadas, se decide eliminar todas las alturas inferiores a 0.4 mm . Para estimar la separación entre juntas y_j se utiliza la ecuación 5.1, donde $v_{lineal} = 0.01 \text{ m/seg}$ es la velocidad lineal, mientras que t_2 y t_1 son los límites del intervalo de tiempo t , en el cual las mediciones son superiores a 0.4 mm . Los posteriores análisis se realizan para los experimentos 1.

$$y_j = (t_2 - t_1) * v_{lineal} \quad (5.1)$$

En el grupo A, se detectan mediciones superiores a 0.4 mm en el intervalo de tiempo $t = [53.54 - 55.95] \text{ seg}$; en consecuencia, se estima la separación entre juntas de $y_j = 24.10 \text{ mm}$. Según el esquema de experimentación propuesto, la separación entre juntas debe ser 22.6 mm ; por lo tanto, se calcula un error aproximado de 6.63% en la estimación de la separación de juntas de soldadura. En el grupo B, el intervalo de tiempo es $t = [21.45 - 23.93] \text{ seg}$; por lo tanto, se estima una separación entre juntas de $y_j = 24.80 \text{ mm}$ y calcula un error aproximado de 9.73% .

Finalmente, se determina el desplazamiento Y_{ref} que debe realizar el tractor soldador para colocarse sobre la junta por medio de la ecuación 5.2, donde y_0 es la distancia del origen hasta el instante que se detectan mediciones superiores a 0.4 mm . Este valor se calcula multiplicando la velocidad lineal y el instante t_1 siendo estas distancias de 535.4 mm y 214.5 mm para los grupos A y B respectivamente. Por lo tanto, las distancias que se debe desplazar el tractor soldador desde el origen son 559.5 mm y 239.3 mm para los experimentos 1 de los grupos A y B respectivamente. Estos valores calculados pueden ser utilizados como los desplazamientos de referencia en el eje Y requeridos en el sistema de control que será presentado en la siguiente sección.

$$Y_{ref} = y_0 + \frac{y_j}{2} \quad (5.2)$$

El excesivo ruido en las mediciones se debe principalmente al ambiente en el que se realizaron las experimentaciones, y además se debe a la falta de un filtro entre el sensor y el ADC del microcontrolador. Por otro lado, los desfases en las curvas se deben principalmente a que el pistón del banco de pruebas no estaba completamente comprimido debido a pequeñas diferencias del volumen del fluido; sin embargo, este problema no se presentaría en un mecanismo de piñón cremallera, ya que no hay fluido.

5.6. Sistema de control

Para estimar el comportamiento del accionamiento del tractor soldador, se utilizó el software MATLAB/SIMULINK. En este se diseñó la dinámica del sistema, y se implementaron los controladores en cascada PID. La presente sección se divide en la presentación de los parámetros y sintonización de controladores, y los resultados

5.6.1. Parámetros y Sintonización de controladores

En la tabla 5.3, se presenta un resumen de todos los parámetros de los motores utilizados, así como las respectivas inercias.

Tabla 5. 3 Parámetros de motores DC e Inercias del sistema

Parámetro de motor	nomenclatura	Eje Z	Eje Y	Desplazamiento circunferencial
Inercia motor	J_m (kg.m ²)	0.00115	0.00115	0.0028
Inercia del sistema	J_l (kg.m ²)	170039.12e-6	200397.405e-6	1352984.7 e-6
Par motor constante	K_i (N.m/A)	0.0855	0.0855	0.1522
Fuerza electromotriz	K_b (rpm/V)	0.1012	0.1012	51.2821
Resistencia eléctrica	R_a (Ω)	0.47	0.47	0.22
Constante de fricción viscosa de motor	B (rpm/mNm)	0.0045	0.0045	0.5714
Inductancia eléctrica	L_a (mH)	0.51	0.51	0.22
Voltaje de alimentación	V_a (V)	24	24	48
Relación de engranajes	n	5	5	10

Dado que se conocen todos los parámetros del sistema, es posible determinar las ganancias de los controladores como se explicó en el capítulo anterior. En la Tabla 5.4 y Tabla 5.5, se muestra un resumen de las ganancias del lazo de control de corriente y las ganancias del lazo de control de velocidad.

Tabla 5. 4 Control de corriente

Proceso	K_p	K_i	K_d
Desplazamiento Eje Y	4.8066	4429.6	0
Desplazamiento Eje Z	4.8066	4429.6	0
Desplazamiento circunferencial	2.0735	2073	0

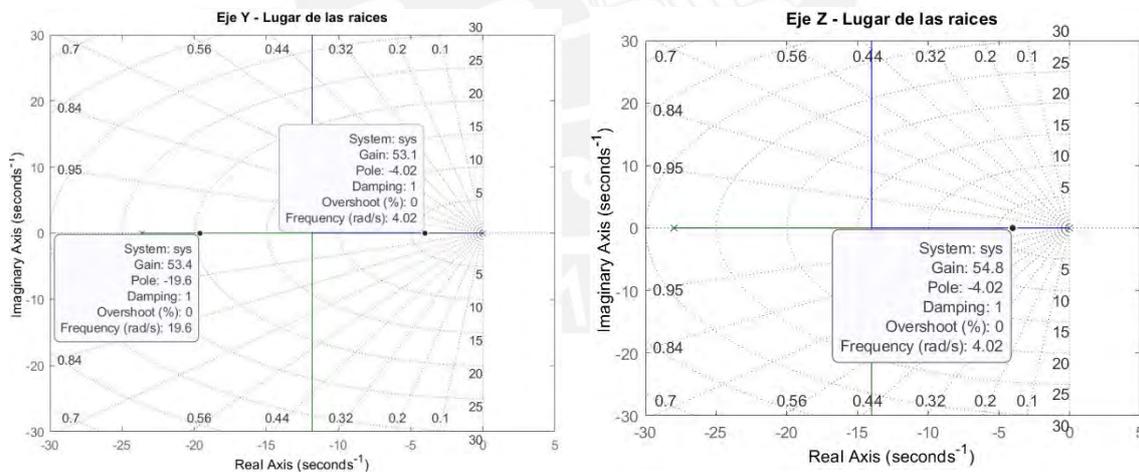
Tabla 5. 5 Control de velocidad

Proceso	Kp	Ki	Kd
Desplazamiento Eje Y	14725	333.228	0
Desplazamiento Eje Z	12494	333.337	0
Desplazamiento circunferencial	55851	689.75	0

El control de posición solo es requerido para desplazar la antorcha en el eje Y e eje Z. El objetivo del controlador sobre el sistema es establecer un tiempo de establecimiento $\tau_{SS} = 1\text{seg}$ y se utiliza el criterio del 2%.

$$\tau_{SS} = \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{\zeta \cdot \omega_n} = 1$$

La sintonización se hace analizando el lugar de las raíces del sistema en lazo cerrado y buscando una ganancia tal que $\sigma = 4$. En la Figura 27.a y Figura 27.b se presentan el lugar de las raíces de las funciones de transferencia en lazo cerrado para el proceso de desplazamiento en el eje Y y el desplazamiento en el eje Z respectivamente. Las ganancias del controlador proporcional se resumen en la Tabla 5.6.



a) Proceso desplazamiento eje Y

b) Proceso desplazamiento eje Z

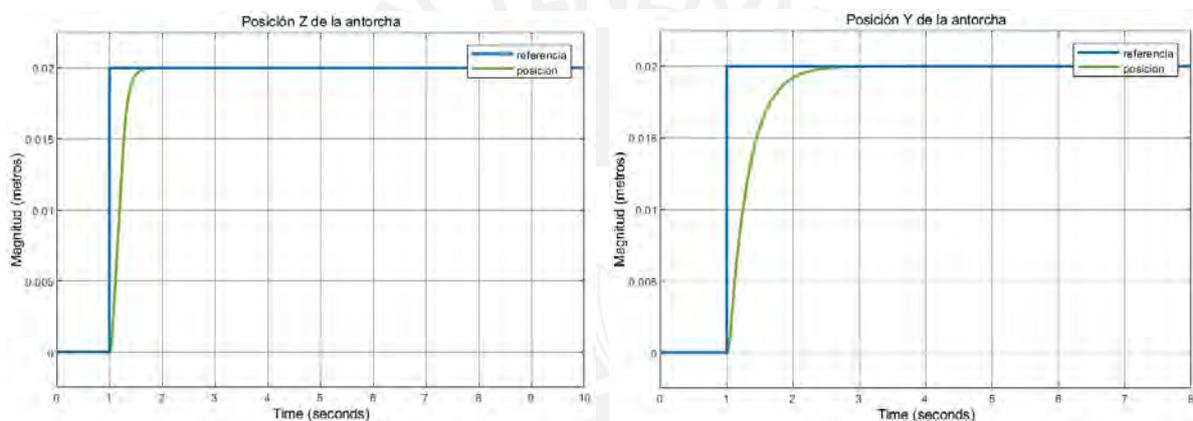
Figura 5. 27 Lugar de las raíces en lazo cerrado para los procesos de desplazamiento

Tabla 5. 6 Control de posición

Proceso	Kp	Ki	Kd
Desplazamiento Eje Y	53.1	0	0
Desplazamiento Eje Z	54.8	0	0

5.6.2. Resultados

Se analiza el comportamiento del sistema en el eje Z y el eje Y. Para ello, se pueden utilizar los resultados obtenidos de las distancias requeridas para posicionar la antorcha sobre centro de la junta de soldadura; sin embargo, por efectos prácticos se aplica una entrada escalón para un desplazamiento lineal deseado de 2cm en ambos ejes. Además, se añade la saturación a la salida de los controladores. La corriente que puede proporcionar el driver del motor es ± 30 Amperes mientras que el voltaje máximo de alimentación de los motores es ± 24 Voltios. Los resultados del desplazamiento en el eje Z se aprecian en la Figura 28.a y para el eje Y en la Figura 28.b.



a) Posición antorcha eje Z

b) Posición antorcha eje Y

Figura 5. 28 Respuesta del sistema en lazo cerrado

Se puede concluir que se alcanza la referencia según los requerimientos establecidos. Además, como se esperaba, el tiempo de respuesta para el desplazamiento en el eje Z es menor que en el eje Y. Esto es principalmente por la magnitud de la inercia que se debe vencer siendo para el eje Y mayor.

Por otro lado, para el proceso de desplazamiento del tractor soldador, la variable controlada es la velocidad angular en el piñón. Los resultados de la respuesta del sistema ante un escalón unitario se presentan en la Figura 29. Se puede concluir que el control mantiene la velocidad angular del sistema igual a la señal de referencia para el estado estacionario y se cumplen con los requerimientos de tiempo de establecimiento.

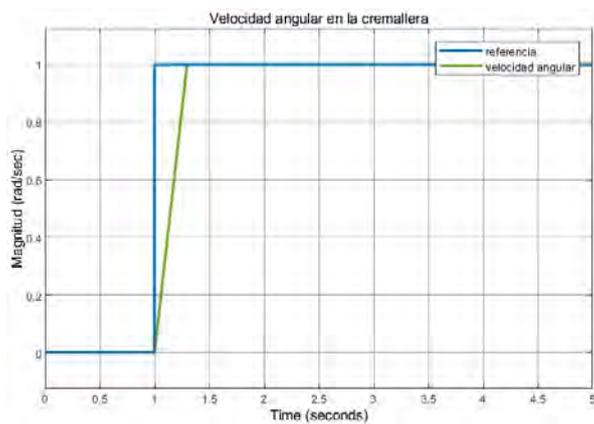


Figura 5. 29 Respuesta de la velocidad angular del tractor soldador en lazo cerrado



Capítulo 6

Planos y Costos

En el presente capítulo se presenta el listado de planos de ensamble y fabricación. Estos se pueden encontrar en la sección de Anexos B. Por otro lado, se realiza una estimación de los costos de las diferentes piezas a fabricar y los componentes que se deben comprar de las diferentes empresas, también se agrega el precio de la ingeniería de las horas invertidas en el presente trabajo. Cabe resaltar que estos costos pueden sufrir variaciones a lo largo del tiempo debido al tipo de cambio, disponibilidad en el mercado y los costos de envío. Estos componentes solo sirven de referencia para estimar la inversión necesaria para implementar el sistema automatizado, ya que se puede optar por adquirir los componentes mecánicos del mercado local teniendo en cuenta que deben presentar similares características

6.1. Planos Mecánicos

El listado completo de los planos para el diseño del tractor soldador se encuentran detallados en la Tabla 6.1, mientras que los planos para el diseño del sistema de sujeción se encuentran detallados en la Tabla 6.2. Los códigos de los planos siguen la siguiente regla: PF (plano de fabricación) o PE (plano de ensamble) seguido de las iniciales del plano y seguido del tamaño de la hoja del plano.

Tabla 6. 1 Aglomerado de Planos del Tractor soldador

Tractor Soldador			
Número	Descripción	Código	Tamaño
1	Ensamble Tractor Soldador	PE-TS-A3	A3
2	Sistema de Desplazamiento Circunferencial	PE-DC-A3	A3
3	Sistema de Desplazamiento Y	PE-SDY-A3	A3
4	Sistema de Elevación	PE-SE-A3	A3
5	Elevación y Antorcha	PE-EA-A3	A3
6	Sujeción de Antorcha	PE-SA-A4	A4
7	Soporte LIFGO Base	PF-SLB-A4	A4
8	Soporte LIFGO Altura	PF-SLA-A4	A4
9	Brackets Sujeción Rodamiento Frontal	PF-BSRF-A4	A4
10	Bracket Sujeción Rodamiento Posterior	PF-BSRP-A4	A4
11	Soporte de Antorcha	PF-SA-A3	A3
12	Plancha Base	PF-PB-A3	A3
13	Eje de Transmisión Lifgo	PF-ETL-A3	A3
14	Sujetador Posterior	PF-SP-A4	A4
15	Sujetador Delantero	PF-SD-A4	A4
16	Cuerpo Sujetador	PF-CS-A4	A4
17	Cubierta Principal	PF-CP-A2	A2
18	Plancha de Sujeción V-Slot	PF-PSV-A4	A4
19	Eje de trasmisión circunferencial	PF-ETC-A3	A3

Tabla 6. 2 Aglomerado de Planos del Sistema de Sujeción

Sistema de Sujeción			
Número	Descripción	Código	Tamaño
1	Sistema de Sujeción	PE-SS-A1	A1
2	Sistema de Sujeción Explosionado	PE-SSE-A1	A1
2	Sistema Anvibración	PE-SA-A2	A2
3	Tornillo Soporte M12	PF-TSM-A4	A4
4	Bracket Anvibración	PF-BA-A4	A4
5	Covertor de caucho	PF-CC-A4	A4
6	Tapa	PF-T-A4	A4
7	Espaciador Clamp	PF-E-A3	A3
8	Espaciador Estructura	PF-E-A3	A3
9	Espaciador Palanca	PF-E-A3	A3
10	Palanca	PF-P-A3	A3
11	Pliegue de palanca	PF-PP-A4	A4
12	Estructura Soporte	PF-ES-A2	A2
13	Bloque Sujeción Clamp	PF-BSC-A3	A3
14	Bracket Sujeción Clamp	PF-BSC-A4	A4
15	Placa de Estructura	PF-PE-A4	A4
16	Soporte Sujeción Principal	PF-SSP-A4	A4
17	Complemento Palanca	PE-CP-A4	A4
18	Complemento Estructura	PE-CE-A3	A3
19	Complemento Clamp	PE-CC-A4	A4

6.1. Estimación de Costos

A continuación, se presentan una aproximación de los costos de los componentes a comprar, Tabla 6.3, y los componentes a fabricar, Tabla 6.4, para el Tractor soldador. Todos los precios se presentan en dólares americanos.

Tabla 6. 3 Tractor Soldador: Componentes a comprar

Tractor Soldador					
Componente	Candad	Descripción	Compañía	Precio (\$) por unidad	Precio Total (\$)
Platillo de retención	1	Lifgo5.0 500 181	LIFGO	216	216
Platillo fin de carrera	3	Lifgo5.0 500 539	LIFGO	16.2	48.6
Cremallera	1	Lifgo5.0 rack Z=200 500 169	LIFGO	1050	1050
Cremallera	1	Lifgo5.0 rack Z=80 500 173	LIFGO	814	814
Módulo Piñón	1	Lifgo5.0 PFN 500 013	LIFGO	1120	1120
Módulo Lineal Piñón	1	Lifgo5.0 Linear PFN 500 045	LIFGO	1080	1080
Chaveta plana	2	DIN 6885 A 3 x 3 x 36		1.8	3.6
Chaveta plana	2	DIN 6885 A 6 x 6 x 25		1.8	3.6
Reductor planetario	2	DCNC-PG-F60 I=5	DamenCNC	540	1080
Brackets para Motor	2		StepperOnline	10.8	21.6
Motor DC	2	PENTA 4S 20	Motor Power	54	108
Motor DC	1	PENTA 7MA 20	Motor Power	260	260
Anillo de retención	4	DIN 471 9x1 mm		1.8	7.2
Anillo de retención	2	DIN 471 18x1.2 mm		1.8	3.6
Perfil V slot	1	20x20x250 mm	Naylamp	47.5	47.5
Reductor 12.5	1	GSGE80-12.5-1	Nanotec	558	558
Piñón	2	HP4x24	HepcoMoon	342	684
Rodamientos excéntricos	4	THJR 64E 12	HepcoMoon	270	1080
Chumacera de pared	2	FYK 20 TD	SKF	15	30
Tornillo de palanca	1	M8 X 65		9	9
Caja eléctrica	1		SODIMAC	25	25
Ciento de tornillos	2			18	36
Ciento de tuercas	2			18	36
Ciento de arandelas	2			18	36
Sensor de distancia fotoeléctrico	1	XUJK803538	Schneider Electric	54	54
				TOTAL	8411.7

Tabla 6. 4 Tractor Soldador: Piezas a Fabricar

Tractor Soldador				
Componente	Cantidad	Descripción	Precio (\$) por unidad	Precio Total
Eje de transmisión Lifgo	2	Plano PF-ETL-A3	30	60
Plancha base	1	Plano PF-PB-A3	15	15
Sujetador delantero	1	Plano PF-SD-A4	10	10
Sujetador posterior	1	Plano PF-SP-A4	10	10
Cuerpo del sujetador	1	Plano PF-CS-A4	40	40
Soporte de antorcha	1	Plano PF-SA-A3	20	20
Plancha sujeción Vslot	2	Plano PF-PSV-A4	3	6
Eje de transmisión circunferencial	2	Plano PF-ETC-A3	40	80
Cubierta Principal	1	Plano PF-CP-A2	50	50
Bracket de rodamientos	2	Plano PF-BSRP-A4	8	16
TOTAL				323

A continuación, se presentan una aproximación de los costos de los componentes que se compran, Tabla 6.5, y los componentes a fabricar, Tabla 6.6, para el Sistema de Sujeción. Todos los precios se presentan en dólares americanos.

Tabla 6. 5 Sistema de Sujeción: Componentes a comprar

Sistema de Sujeción					
Componente	Cantidad	Descripción	Compañía	Precio unitario (\$)	Precio Total (\$)
Cremallera circular HDR	2	HDR1280G4P2N Aluminio	HepcoMoon	7200	14400
Pistón eléctrico	2	PA-10 Stroke 8	Progressive Auto.	324	648
Brackets de pistón	2	BRK-09	Progressive Auto.	17	34
Pasador de horquilla	2	DIN 22341 8x60	Progressive Auto.	1.8	3.6
Muelle	8	AMC-doble campana 150/ 20309	AMC Mecanocaucho	90	720
Driver	3	DM860D	StepperOnline	83	249
Fuente de alimentación 350W/24V	2	S-350-24	StepperOnline	45	90
Fuente de alimentación 700W/36V	1	S-700-24	StepperOnline	60	60
Fuente de alimentación 1000W/48V	1	S-1000-48	StepperOnline	145	145
Clamp eléctrico	2	LAE140VC10	UNIVER	800	1600
TOTAL					17934.6

El costo total del proyecto incluye lo siguiente: Costo del tractor soldador, Costo del sistema de sujeción y el Costo de ingeniería. Los costos que se aprecian en la Tabla 6.6 están en dólares americanos.

Tabla 6. 6 Costo Total del Proyecto

Componentes	Subtotal (\$)
Costo de fabricación del tractor soldador	8499.212
Costo de fabricación del sistema de sujeción	18780.6
Costo de ingeniería	10000
TOTAL	37279.812



CONCLUSIONES

- Se concluye que mediante las simulaciones de elementos finitos se comprobó que el sistema mecánico es viable y se puede utilizar sin ningún riesgo de falla en la estructura. Además, usando un software CAE se puede determinar a precisión el comportamiento que puede tener el sistema mecánico si se le desea aumentar componentes y a partir de los resultados verificar la viabilidad.
- Se concluye que este sistema automatizado de soldadura orbital está dividido en el diseño del tractor soldador y el sistema de sujeción. Sin embargo, a lo largo del desarrollo se vio necesario dividir dichos sistemas en más subsistemas mecánicos para facilitar el diseño mecánico y la comprensión de las partes. No obstante, es imprescindible conocer las uniones que se pueden utilizar entre subsistemas
- Se concluye que gran parte de los componentes mencionados en la presente tesis se obtienen de algún proveedor. Esto demuestra que no es necesario fabricar todos los componentes y con un correcto uso de la ingeniería es posible integrar las diferentes componentes y lograr diseñar por completo el sistema mecánico. Además, comprar los componentes a una empresa garantiza el correcto funcionamiento de estos; esto conlleva a un aumento en la viabilidad de la presente tesis.
- Se concluye por medio de las experimentaciones realizadas que se puede realizar un modelo sencillo para la detención de la junta de soldadura de bajo costo y sencilla implementación. Sin embargo, es necesario entender el tipo de entorno en el que se está trabajando como luminosidad, material de incidencia, distancia a la que se trabaja, entre otros. Además, se debe conocer a detalle las características del sensor a utilizar, así como el software a utilizar.
- Se concluye que en el mercado local e internacional se puede encontrar una amplia variedad de componentes electrónicos como motores, drivers, fuentes de alimentación, entre otros, que pueden remplazar los componentes seleccionados en la presente tesis. Sin embargo, es imprescindible que los componentes a seleccionar cumplan con las especificaciones mínimas para de tal modo que se garantice un correcto funcionamiento del sistema mecatrónico.

- Se concluye que el diseño de un controlador en cascada favorece al desempeño del sistema cumpliendo con los indicadores de desempeño establecidos como tiempo de establecimiento y sobreimpulso. Sin embargo, esto requiere un conocimiento más profundo de la dinámica del sistema y cumplir los requisitos para el diseño de dicho controlador. Además, se comprobó la viabilidad para la implementación del controlador por medio de la correcta selección de componentes electrónicos.
- Se concluye que es imprescindible utilizar un software CAD para modelar e integrar los diferentes componentes mecánicos. Esto permite comprender a detalle cómo es la interacción entre estos. Además, con un correcto uso del software se puede determinar si los sistemas mecánicos van a operar sin ningún inconveniente o hay interferencia entre los componentes.



OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- El diseño de la estructura se puede hacer más liviana utilizando perfiles de V-slot de 20x40. Estos perfiles presentan excelentes propiedades mecánicas y no requieren utilizar soldadura para unir dichos perfiles. Sin embargo, queda en el presente lector determinar cuál es el método de unión apropiado entre la estructura y la cremallera.
- El diseño electrónico se puede mejorar utilizando sensores de mejor precisión que los mencionados en la presente tesis. También, es posible mejorar el método de ubicación de junta de soldadura al cambiarlo por un sistema de rastreo de soldadura del cual se habló en el estado del arte. Estos sistemas de rastreo permiten ubicar la junta de soldadura mientras el tractor se desplaza alrededor de la tubería garantizando la calidad del cordón a soldar.
- Gracias al conocimiento completo de la dinámica del sistema del tractor soldador, es posible realizar una mejor sintonización de las ganancias en función de los parámetros del sistema. Esto favorece en la escalabilidad del proyecto, ya que se podría reutilizar el modelo para otro sistema con parámetros diferentes, y no se tendría que volver a realizar la aproximación de las funciones de transferencias del sistema.
- Se recomienda analizar a mayor profundidad la necesidad del control de velocidad angular, ya que por medio de múltiples simulaciones se comprobó que las ganancias del control no tienen mayor efecto sobre el tiempo de establecimiento de la variable controlada y solo se requiere un lazo cerrado con ganancia unitaria para garantizar un error en estado estacionario igual a cero.

Bibliografía

- AHMSA (2013) Manual de diseño para la construcción de acero. Recuperado de https://www.ahmsa.com/assets/files/manuales/manual-ahmsa/Capitulo_1.pdf
- Institute, A. P. (2007). API 5L specification for line pipe. API Spec., 5(44), 1-40
<https://doi:10.1520/G0154-12A>
- América Economía (2016). Descubren cuatro yacimientos de gas en el sur del Perú y no descartan la presencia de otros. Recuperado de <https://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/descubren-cuatro-yacimientos-de-gas-en-el-sur-del-peru-y-no-descartan-la>
- API 1104. (1999). Soldadura de Tuberías e Instalaciones Relacionadas.
- América Economía (2016). Descubren cuatro yacimientos de gas en el sur del Perú y no descartan la presencia de otros. Recuperado de <https://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/descubren-cuatro-yacimientos-de-gas-en-el-sur-del-peru-y-no-descartan-la>
- Aucancela Guamán, V. J. (2013). Artículo Científico-Diseño y construcción de un prototipo de cabezal para soldadura orbital automática en pase de raíz en tubería de ocho pulgadas std con el proceso fcaw para acesilicon design technology ltda.
- BBC News Mundo. (2019). *Cómo es el nuevo megagasoducto con el que Rusia y China dan inicio al acuerdo del siglo* - BBC News Mundo. Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-50647056>
- BFMéxico (2019). Beneficios de instalar una soldadora automática FlexFast en manufactura. Recuperado de <https://www.bfmx.com/automatizacion/beneficios-de-instalar-una-soldadora-automatica-flexfast/>
- Campodónico Morales, C. E. Diseño de una máquina hidráulica astilladora de troncos. Recuperado de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/13600>
- Conacyt (2019). Soldadura orbital para superficies difíciles. Recuperado de <https://centroconacyt.mx/objeto/orbital/>
- Crowe, S (2019). Hirebotics BotX Welder uses UR10e cobots to automate arc welding. Recuperado de <https://www.therobotreport.com/botx-welder-ur10e-cobots-arc-welding/>
- Diario el Comercio. (2015). *Técnicos calificados ganan de S/4 mil a S/15 mil mensual*. Recuperado de <https://diariocorreo.pe/economia/tecnicos-calificados-ganan-de-s-4-mil-a-s-15-mil-mensual-677766/>
- García Pacheco, D. E. (2015). Desarrollo de dos procedimientos de soldadura (wps) para la fabricación de uniones soldadas en tubería de producción.
- Duran, J., y Canchila, J. (2016). Ventajas Y Desventajas De GMAW. Recuperado de

<https://prezi.com/zmrjzmkgxvua/ventajas-y-desventajas-de-matlab/>

El Periódico de la Energía. (2018). El oleoducto TransAlaska. Recuperado de <https://elperiodicodelaenergia.com/el-oleoducto-transalaska-uno-de-los-mas-grandes-del-mundo-a-punto-de-echar-el-cierre/>

El Periódico. (2019). *Putin y Xi Jinping inauguran el gasoducto que llevará gas ruso a Pekín*. Recuperado de <https://www.elperiodico.com/es/internacional/20191202/putin-xi-jinping-inauguran-gasoducto-llevara-gas-ruso-china-7759452>

Guerrero, O. E. (2008). Procesos de manufactura. Bogotá, Colombia. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/Firefalls/procesos-productivos-de-manufactura>.

ESAN (2007). *¿Por qué es importante la masificación del gas natural en Perú?* Recuperado de: <https://esan.edu.pe/conexion-esan/por-que-es-importante-la-masificacion-del-gas-natural-en-peru>

Europapress (2007). Crónica Internacional, *Un nuevo conflicto comercial entre Rusia y Bielorrusia deja sin crudo a Berlín, Varsovia y Kiev*. Recuperado de: <https://www.europapress.es/otrapress/cronicas/noticia-cronica-internacional-nuevo-conflicto-comercial-rusia-bielorrusia-deja-crudo-berlin-varsovia-kiev-20070108204106.html>

GAMBA, S. (2016). *¿Soldadura automatizada, un gran paso para los fabricantes latinoamericanos?* Recuperado de: <http://www.metalmecanica.com/temas/Soldadura-automatizada.-un-gran-paso-para-los-fabricantes-latinoamericanos+110570>

García Mogollón, J. E. (2016). Diseño de gasoductos mediante el uso de herramientas computacionales de propósito general.

Gestión. (2016). *¿Qué tipo de profesionales se buscarán más cuando se construya el Gasoducto Sur Peruano?*. Descargado de <https://archivo.gestion.pe/empleo-management/que-tipo-profesionales-se-buscaran-mas-cuando-se-construya-gasoducto-sur-peruano-2172722>

Gestion. (2017). *Déficit de soldadores calificados en Perú es de 3,500 por año*. Recuperado de <https://gestion.pe/tendencias/management-empleo/deficit-soldadores-calificados-peru-3-500-ano-131493-noticia/>

Gómez, P. (2004). Sistema detector de obstáculos basado en tecnología láser. Patent Number: 2187275B1

González Coral, A., & Torres Reyna, G. M. (2010). Manual de cultivo de metohuayo *Caryodendron orinocense* Karst.

Jeongmin, K. (2012). Orbital welding apparatus with side rollers having variable radius of curvature depending on a diameter of pipe. 0133357(19). Recuperado de <https://patentimages.storage.googleapis.com/a0/a2/3f/4422eb4a2ec061/KR20120133357A.pdf>

f

- KEHUI. (2019). Industrial Automation and Intelligence Solutions. Recuperado de <https://www.zzkehui.com/aboutus/aboutkehui/>
- KOOM (2019). Transmisión por Cremallera Piñon. Recuperado de <http://www.mecapedia.uji.es/catalogos/engranaje/spitkoom.1.pdf>
- Lincoln Electric. (2020a). APEX™ 2100 ORBITAL WELDING SYSTEM. Recuperado de <https://m.lincolnelectric.com/assets/global/Products/K52003-1/e9620.pdf>
- Lincoln Electric. (2020b). HELIX® M85 Weld Head. Recuperado de [https://www.lincolnelectric.com/en-us/Equipment/Pages/product.aspx?product=K52101-1\(LincolnElectric\)](https://www.lincolnelectric.com/en-us/Equipment/Pages/product.aspx?product=K52101-1(LincolnElectric))
- Lincoln Electric. (2020c). Helix Tracks for orbital and flat track welding. Recuperado de <https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/K52000-28/e9617.pdf>
- Milanés, V., Naranjo, J. E., González, C., Alonso, J., García, R., y De Pedro, T. (2008). Sistema de posicionamiento para vehículos autónomos. RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial, 5. MINAGRI. (2015). Producción de petróleo. Descargado de <http://minagri.gob.pe/portal/61-sector-agrario/el-petroleo/344-produccion-de-petroleo#:~:text=EnelPeruseproducen,delpetroleocrudodelpais.>
- MINEM. (2001). Oleoducto nor peruano, 2001. http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/atlas/hidrocarburos/oleoducto_nor_peruano.pdf
- Marhofer, W. E., Sanford, S., Craig, J., & Flynn, T. (1999). U.S. Patent No. 5,932,123. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Mustafa, F. F., & Rao, M. I. (2016). Automatic welding machine for pipeline using MIG welding process. International Research of Engineering and Technology (IRJET), 3(12), 1-7.
- Peruana, N. T. Peruana 111.011-2014. GAS NATURAL SECO. Sistema de tuberías para instalaciones internas residenciales y comerciales.
- OSINERGMIN (2007). Aprueban el Reglamento de Transporte de Hidrocarburos por Ductos. Decreto Supremo N°081-2007-em. Recuperado de: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/PlantillaMarcoLegalBusqueda/Reglamento%20de%20Transporte%20de%20Hidrocarburos%20por%20Ductos.pdf
- Osinerg. (2003). Proceso de Supervisión y Fiscalización del Medio Ambiente y Social. Recuperado de: http://www4.congreso.gob.pe/congresista/2001/sjaimes/documentos/audiencias/camisea/CA_MISEA-08-05-03-OSINERG.pdf
- Osinergmin. (2013). Transporte de Gas Natural y Líquidos de Gas Natural por Ductos de Camisea al City Gate. Recuperado de http://gasnatural.osinerg.gob.pe/contenidos/consumidores_industriales/alcance_labores-transporte_gas_natural_liquidos.html

- P. Morales. (2018). Los combustibles Petróleo, gas natural y carbón. Recuperado de <http://blog.pucp.edu.pe/blog/qm2-202-131/2018/09/09/los-combustibles-petroleo-gas-natural-y-carbon/>
- Pontificia Universidad Católica del Perú. (2018). MEC270 Procesos de Manufactura
- Quevedo, F. (2018). Procesos de Soldadura. Recuperado de <http://elizaldevi-proc-manu.blogspot.com/2013/06/laminado.html>
- QUIMICA GENERAL. (2011). Calor Especifico y Capacidad Calorífica. Recuperado de <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/131-calor-especifico-y-capacidad-calorifica.html>
- Rieder, P. (2015). Three Welding Manipulator Seam Tracking Options How To Find The Right One For You. Descargado de <https://www.ljwelding.com/blog/welding-with-seam-tracking>
- Rinaldi, F., Crivellaro, G., & Denaro, R. (1996). U.S. Patent No. 5,534,676. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Ritmo. (2019). Delta 800 Fusión a Tope Alta Presión RITMO Fittings Machines Manufacturing. Recuperado de <https://www.ritmo.it/es/butt-fusion-for-pressure-pipe/delta-800/>
- Rodriguez, H. (2013). Sistemas automáticos de control. Recuperado de <http://ieshuelin.com/huelinwp/download/Tecnologia/Tecnologia%20industrial/3-SISTEMAS-AUTOMATICOS-DE-CONTROL-ampliacion.pdf>
- RPP. (2014). *Gasoducto del Sur demandará más de dos mil soldadores RPP Noticias*. Recuperado de <https://rpp.pe/economia/economia/gasoducto-del-sur-demandara-mas-de-dos-mil-soldadores-noticia-739937>
- Seenouvong, N., Watchareeruetai, U., Nuthong, C., Khongsomboon, K., & Ohnishi, N. (2016, February). A computer vision based vehicle detection and counting system. In 2016 8th International conference on knowledge and smart technology (KST) (pp. 224-227). IEEE.
- SENATI. (2014). Técnico Operativo. Recuperado de https://www.senati.edu.pe/sites/default/files/archivos/2017/publicaciones/09/senati-catalogo_2014.pdf
- SENATI. (2017). Senati y Soldexa inauguran el primer centro de excelencia en soldadura Senati. Recuperado de <https://www.senati.edu.pe/noticias/senati-y-soldexa-inauguran-el-primer-centro-de-excelencia-en-soldadura>
- Servo Robot Inc. (2013). iCUBE Universal Robot Sensor SERVO ROBOT Inc. <https://servo-robot.com/i-cube-universal-robot-sensor/>
- Shi, L., & Tian, X. (2015). Automation of main pipe-rotating welding scheme for intersecting pipes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 77(5), 955-964.
- Sigüenza Astoquillca, M. (2018). Diseño e implementación de un sensor híbrido de bajo costo para

seguimiento de uniones en soldadura MIG.

- Soldadura, A.D.E. (2019). Catálogo 2019. Descargado de http://edrtorches.com/wp-content/uploads/2018/07/esEDRCAT_BOT_2019_r.pdf
- Soldexa. (2019). Smaw Contenido General. Recuperado de <https://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/support/documentation/upload/revista-soluciones-2019.pdf>
- Sputnik Mundo. (2014). *El oleoducto Druzhba, el más largo del mundo – Sputnik Mundo*. Recuperado de <https://www.kitempleo.pe/empleo/6651630/practicante-mantenimiento-v-955-chosica/>
- TeleSUR. (2017). *China inicia soldadura de tuberías del gasoducto ruso - YouTube*. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=qYxiw1PdIPU>
- Torches, E. (2019). Robótica antorchas de soldadura. Recuperado de www.edrtorches.com
- Vemetool. (2010). Manual para el soldador TIG.2010. Recuperado de <https://desoldador.com/wp-content/uploads/2020/04/MANUAL-PARA-SOLDADOR-TIG.pdf>
- Venegas, Y. (2015). *Welding And Safety - Línea de tiempo de la Soldadura*. Recuperado de http://weldingandsafety.blogspot.com/2015/07/linea-de-tiempo-de-la-soldadura_6.html
- Vilaca, P., Magalhaes, P., Gouvela, H., y Quintino, L. (2003). *Sistemas de control y monitorización para la soldadura*. Recuperado de <https://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/12133-Sistemas-de-control-y-monitorizacion-para-la-soldadura.html>
- Watanabe, Y., & Yuta, S. I. (1990, May). Position estimation of mobile robots with internal and external sensors using uncertainty evolution technique. In Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 2011-2016). IEEE.
- Zhao, Y., Liu, F., & Wang, R. (2016, August). Location technology of indoor robot based on laser sensor. In 2016 7th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS) (pp. 683-686). IEEE.

Anexos

0.1. Anexo A

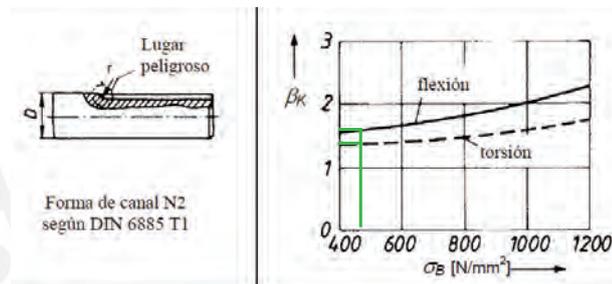


Figura 1: Factor concentración de esfuerzos β_K para chaveta

Fuente: Roloff/Matek, Maschinenelemente, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1996

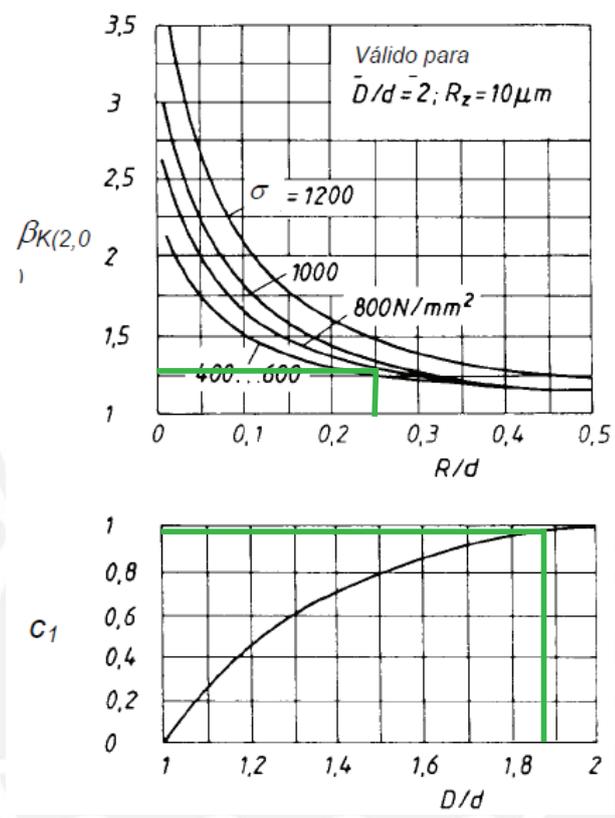
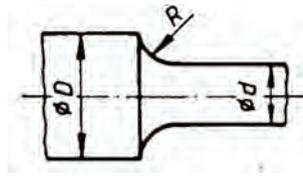


Figura 2: Factor de concentración de esfuerzos β_K cambio de sección

Fuente: Roloff/Matek, Maschinenelemente, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1996

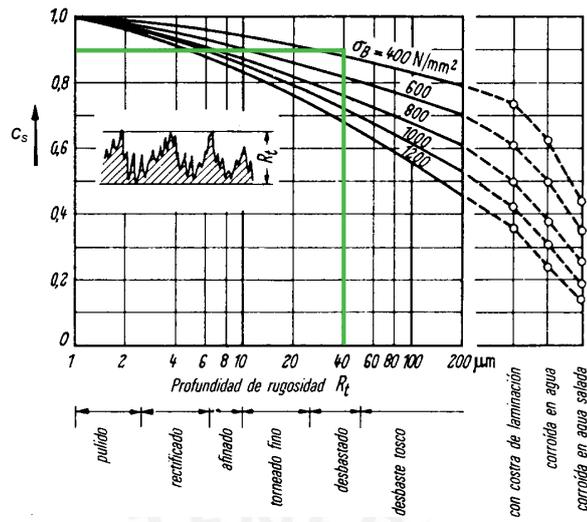


Figura 3: Factor coeficiente de superficie C_s

Fuente: Rodríguez, Jorge

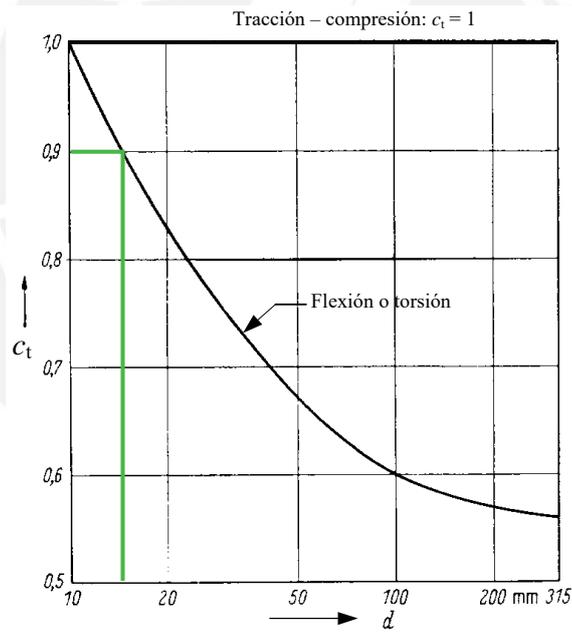


Figura 4: Factor Coeficiente de tamaño

Fuente: Rodríguez, Jorge

Cuadro 1: Fatiga: Factor de carga C_{carga}

Tipo de carga	C_{carga}
Flexión	1.0
Axial	0.85
Torsión	1.0

Fuente: Adaptación Rodríguez, Jorge

Cuadro 3: Fatiga: Factor de temperatura C_{temp}

T (°C)	C_{temp}
20	1.00
50	1.01
100	1.020

Fuente: Adaptación Rodríguez, Jorge

Cuadro 2: Fatiga: Factor de confiabilidad C_c

Confiabilidad R	C_c
0.5	1
0.9	0.897
0.95	0.868
0.99	0.814

Fuente: Adaptación Rodríguez, Jorge

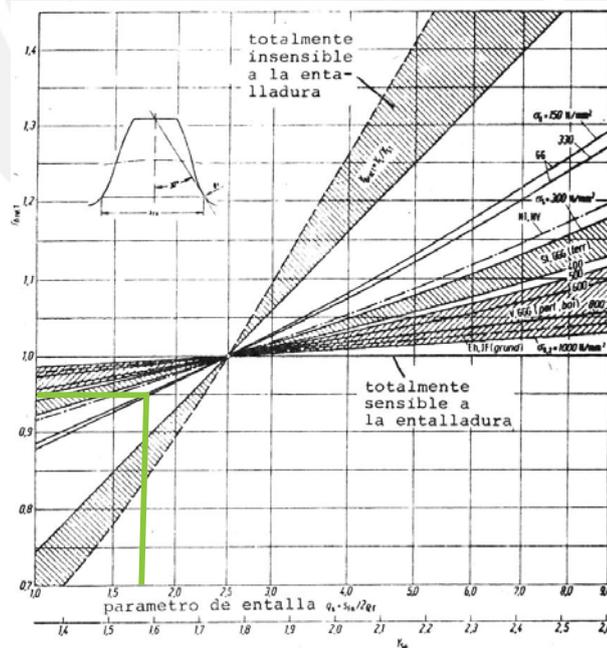


Figura 5: Cifra relativa de apoyo

Fuente: DIN3990

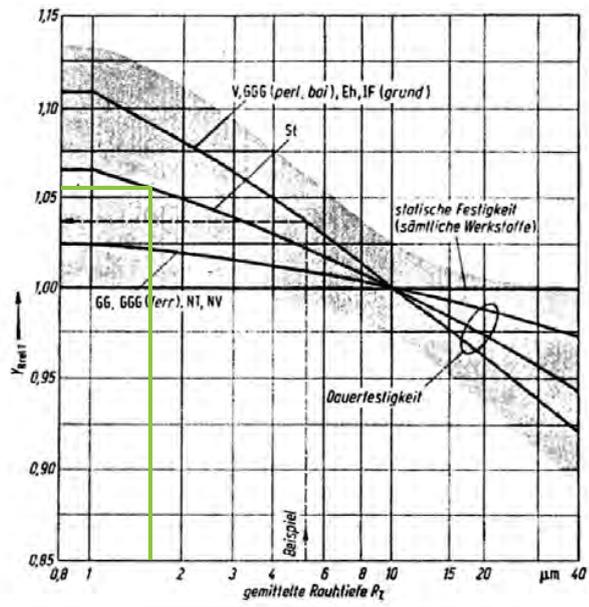


Figura 6: Factor de acabado superficial en el redondeo

Fuente: DIN3990

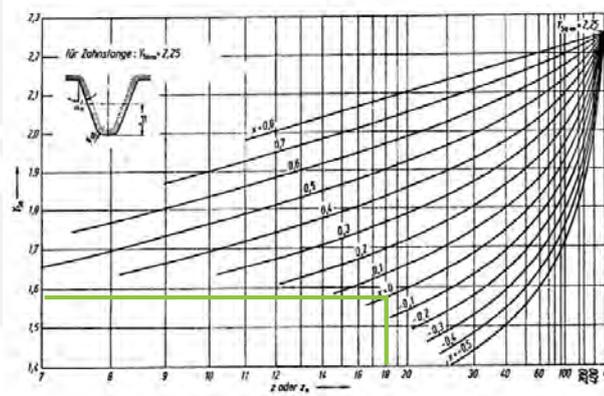
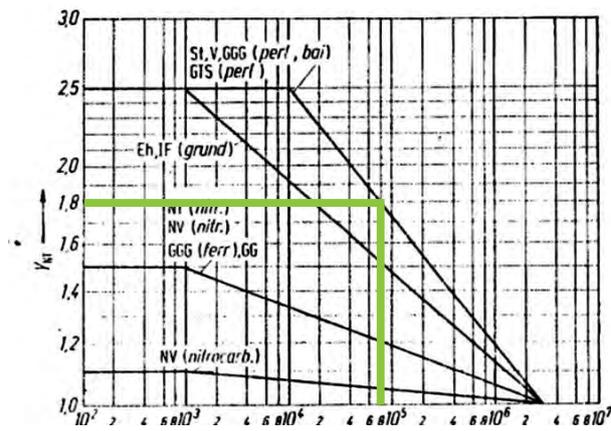


Figura 7: Factor de concentración de tensión

Fuente: DIN3990



N_L : ciclos de repetición de carga

$N_L = t.n.60$,
 donde:
 t: vida en horas
 n: RPM

Figura 8: Factor de duración

Fuente: DIN3990

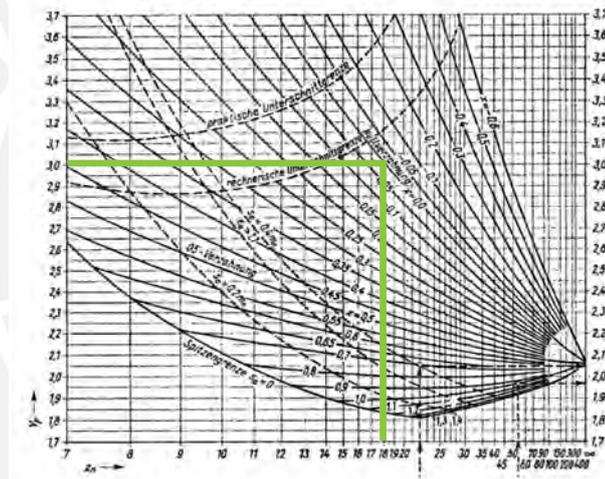


Figura 9: Factor de Forma

Fuente: DIN3990

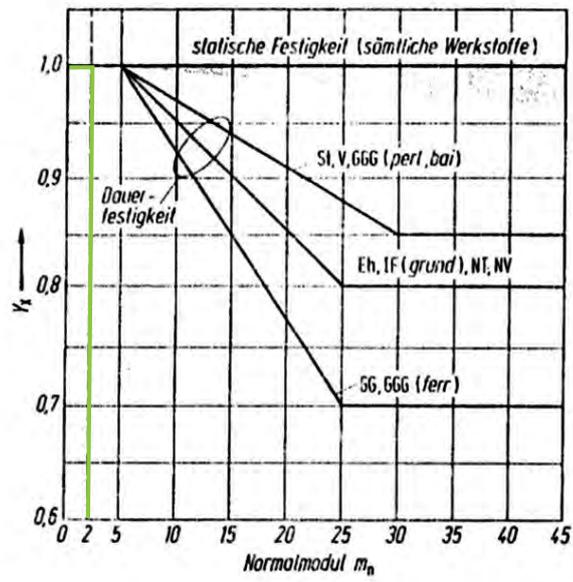
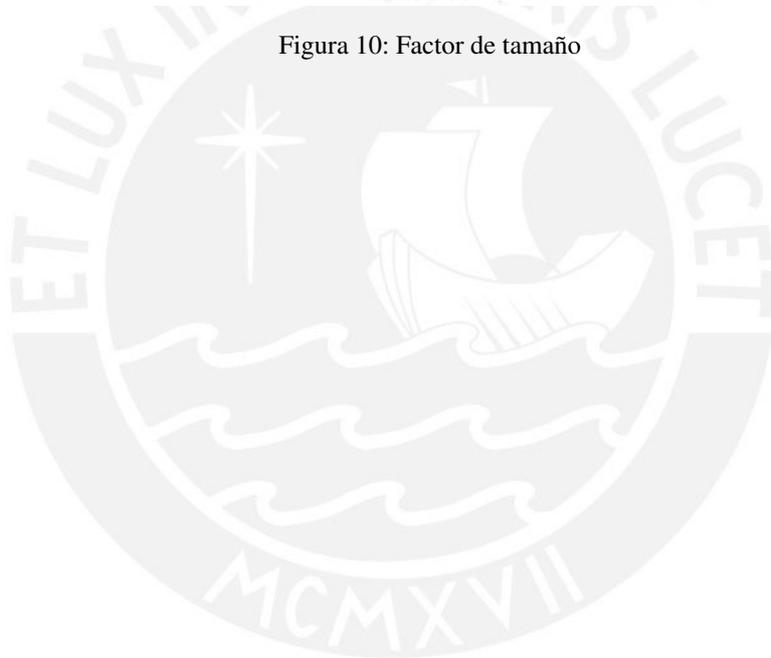


Figura 10: Factor de tamaño

Fuente: DIN3990



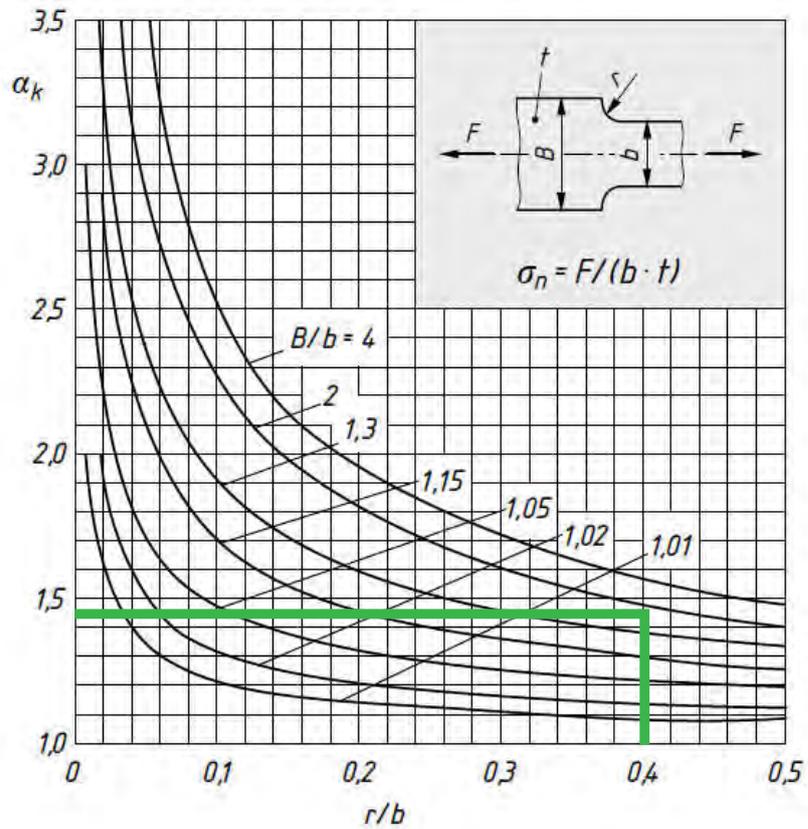


Figura 11: Concentración de esfuerzos en sección con espesor

Fuente: Elaboración propia

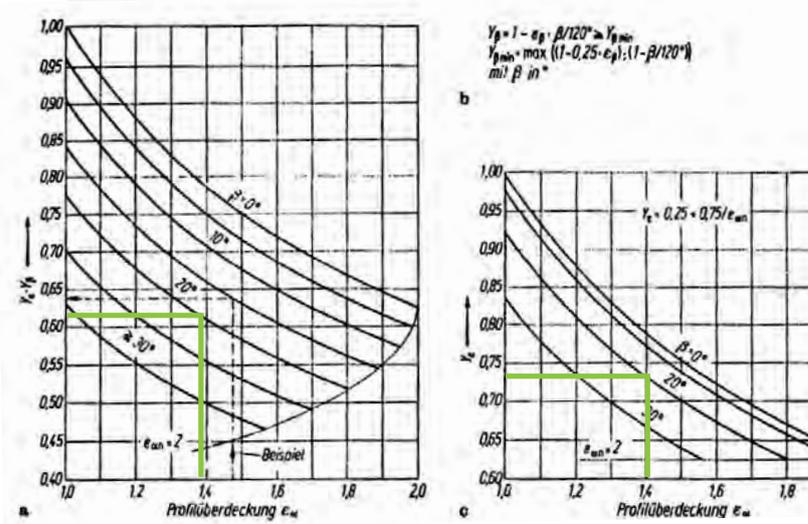


Figura 12: Factor de inclinación y Factor de engrane

Fuente: DIN3990

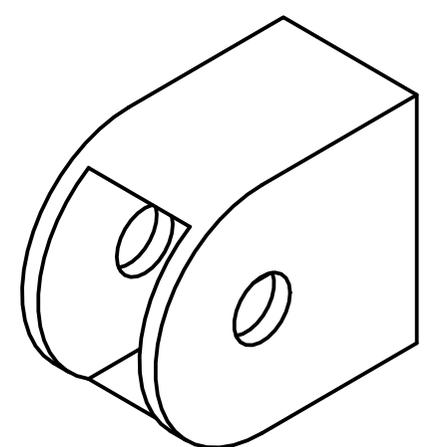
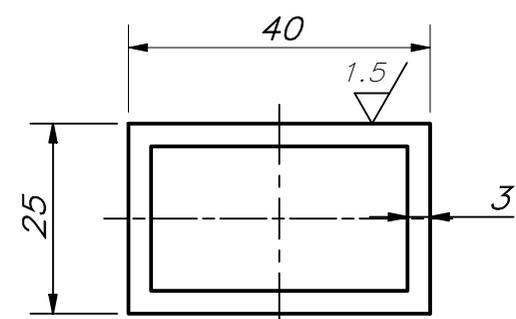
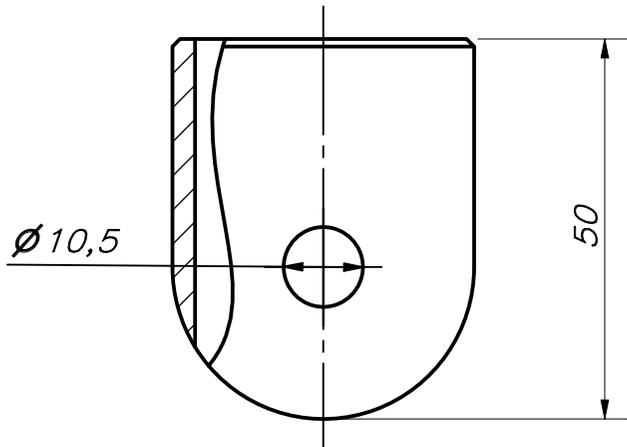
Cuadro 4: Factor de reducción

$n = 1$	$k = 1$
$n = 2$	$k = 1,55$
$n = 3$	$k = 1,86$
$n = 4$	$k = 2$

Cuadro 5: Datos de elementos tensores

$d \times D$ mm	L mm	l mm	F_0 kN	c mm ²	f mm ²	m m · mm ²	$d \times D$ mm	L mm	l mm	F_0 kN	c mm ²	f mm ²	m m · mm ²
6 × 9	4,5	3,7	—	32,4	7,2	0,022	60 × 68	12	10,4	27,4	1060	235	7,0
7 × 10	4,5	3,7	—	37,8	8,4	0,029	63 × 71	12	10,4	26,3	1110	248	7,8
8 × 11	4,5	3,7	—	43,0	9,6	0,038	63 × 71	12	10,4	26,3	1110	248	7,8
9 × 12	4,5	3,7	7,6	57,0	12,7	0,057	65 × 73	12	10,4	25,4	1150	256	8,3
10 × 13	4,5	3,7	6,95	63,0	14,0	0,070	70 × 79	14	12,2	31,0	1450	320	11,2
12 × 15	4,5	3,7	6,95	75,0	16,7	0,10	71 × 80	14	12,2	31,0	1470	326	11,6
13 × 16	4,5	3,7	6,45	81,5	18,1	0,12	75 × 84	14	12,2	34,6	1550	344	12,9
14 × 18	6,3	5,3	11,2	126	28,0	0,20	80 × 91	17	15	48,0	2030	450	18,1
15 × 19	6,3	5,3	10,7	135	30,0	0,22	85 × 96	17	15	45,6	2160	480	20,4
16 × 20	6,3	5,3	10,1	144	31,9	0,25	90 × 101	17	15	43,4	2290	510	22,9
17 × 21	6,3	5,3	9,5	153	34,0	0,29	95 × 106	17	15	41,2	2420	540	25,5
18 × 22	6,3	5,3	9,1	162	36,0	0,32	100 × 114	21	18,7	60,7	3170	700	35,2
19 × 24	6,3	5,3	12,6	171	37,9	0,36	110 × 124	21	18,7	66,0	3490	770	42,5
20 × 25	6,3	5,3	12,0	180	40,0	0,40	120 × 134	21	18,7	60,2	3800	840	50,5
22 × 26	6,3	5,3	9,0	198	44,0	0,48	130 × 148	28	25,3	96,2	5580	1240	80,5
24 × 28	6,3	5,3	8,3	216	48,0	0,58	140 × 158	28	25,3	89,0	6000	1340	93,5
25 × 30	6,3	5,3	9,9	225	50,0	0,62	150 × 168	28	25,3	84,5	6430	1430	107
28 × 32	6,3	5,3	7,4	252	56,0	0,78	160 × 178	28	25,3	78,5	6860	1525	122
30 × 35	6,3	5,3	8,5	270	60,0	0,90	170 × 191	33	30	117,5	8650	1920	163
32 × 36	6,3	5,3	7,8	288	64,0	1,0	180 × 201	33	30	111,2	9160	2040	183
35 × 40	7	6	10,1	356	79,0	1,4	190 × 211	33	30	105,0	9660	2140	204
36 × 42	7	6	11,6	366	82,0	1,5	200 × 224	38	34,8	134,0	11800	2620	262
38 × 44	7	6	11,0	387	86,0	1,6	210 × 234	38	34,8	127,0	12390	2750	289
40 × 45	8	6,6	13,8	450	99,5	2,0	220 × 244	38	34,8	122,0	12980	2880	317
42 × 48	8	6,6	15,6	470	104	2,2	230 × 257	43	39,5	165,0	15400	3420	394
45 × 52	10	8,6	28,2	660	146	3,3	240 × 267	43	39,5	157,5	16100	3580	430
48 × 55	10	8,6	24,6	700	156	3,7	250 × 280	48	44	190,0	18700	4150	520
50 × 57	10	8,6	23,5	730	162	4,0	260 × 290	48	44	182,0	19500	4350	565
55 × 62	10	8,6	21,8	800	178	4,9	270 × 300	48	44	177,0	20300	4500	610
56 × 64	12	10,4	29,4	990	220	6,1	280 × 313	53	49	206,0	23300	5200	725

0.2. Anexo B

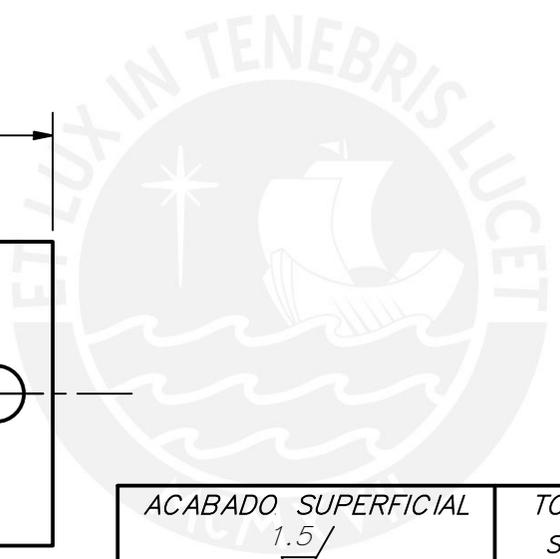
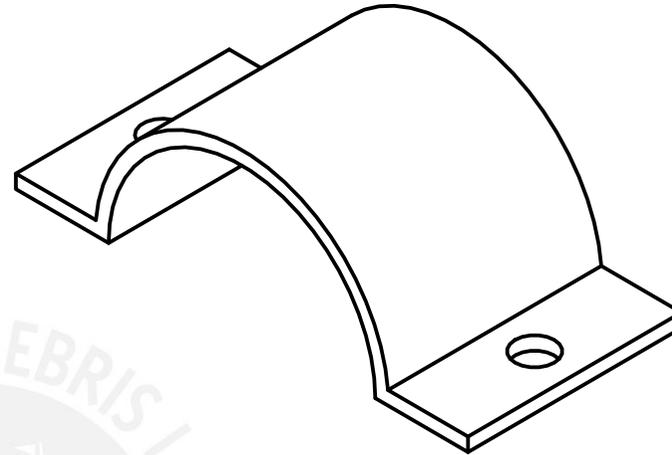
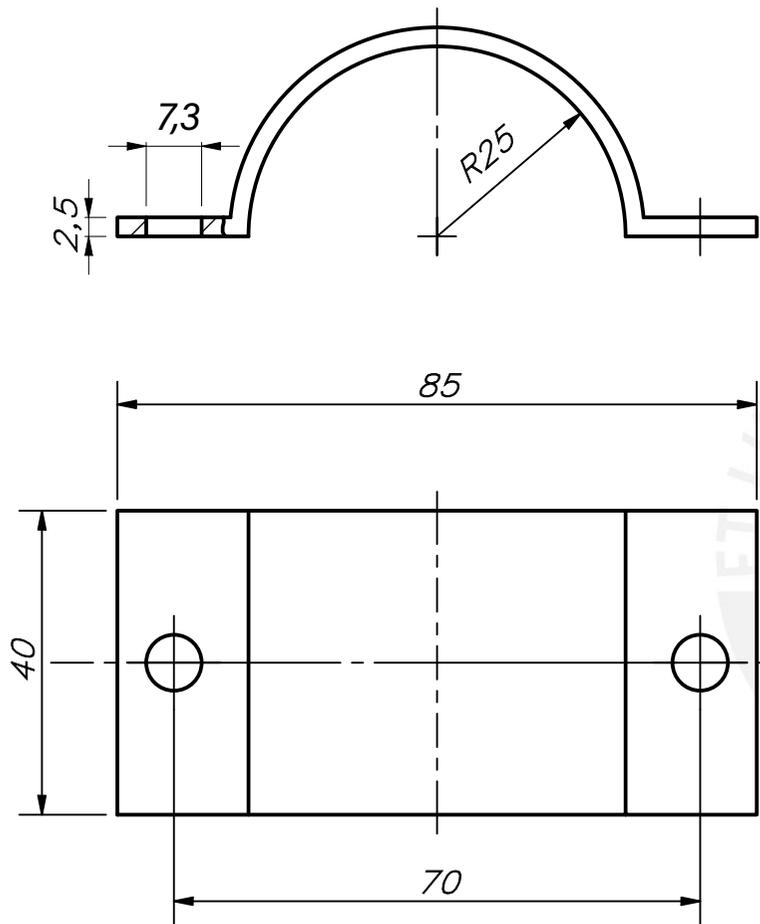


CLAFLANES NO INDICADOS 1X45

ACABADO SUPERFICIAL 1.5 /	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL A6061
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA-INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TESIS 2 CUERPO DEL SUJETADOR	ESCALA 1:1
20155909	DIAZ CHOQUE, CESAR STEVEN	FECHA: 20.10.2020
		LÁMINA: PF-CS-A4

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2



ACABADO SUPERFICIAL 1.5/ ▽	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL A-6061
----------------------------------	--	--------------------

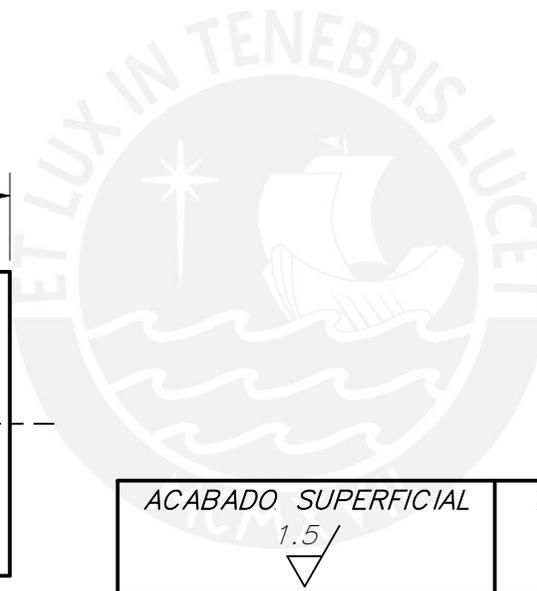
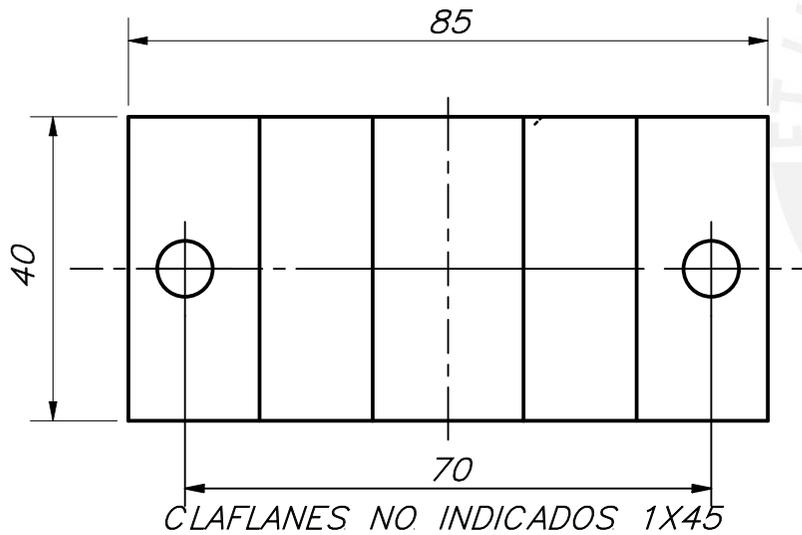
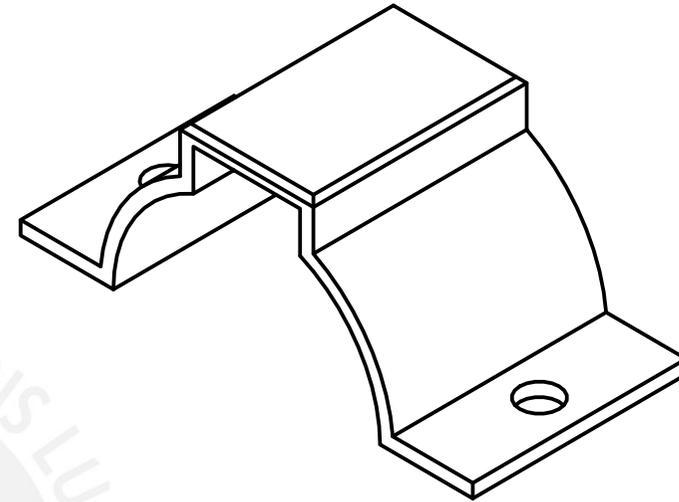
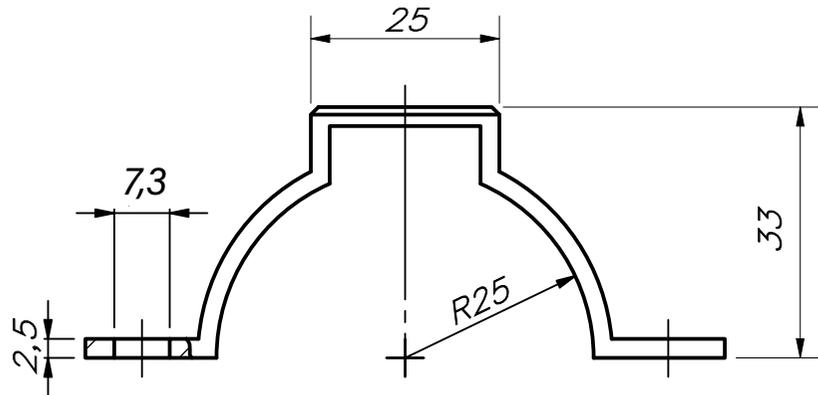
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGIERIA-INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TESIS 2	ESCALA 1:1
--------------------------	---------	---------------

20155909	DIAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 20/10/2020
----------	---------------------------	----------------------

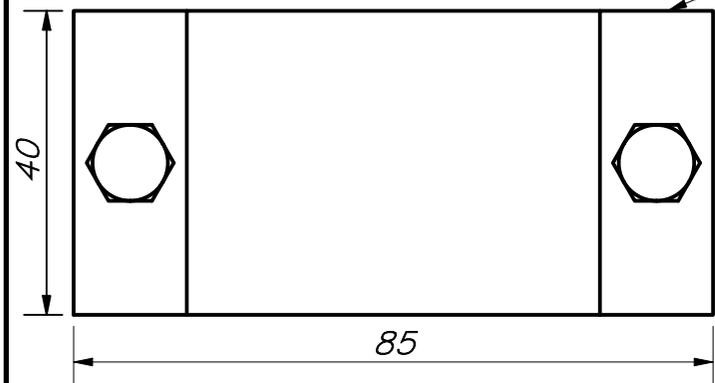
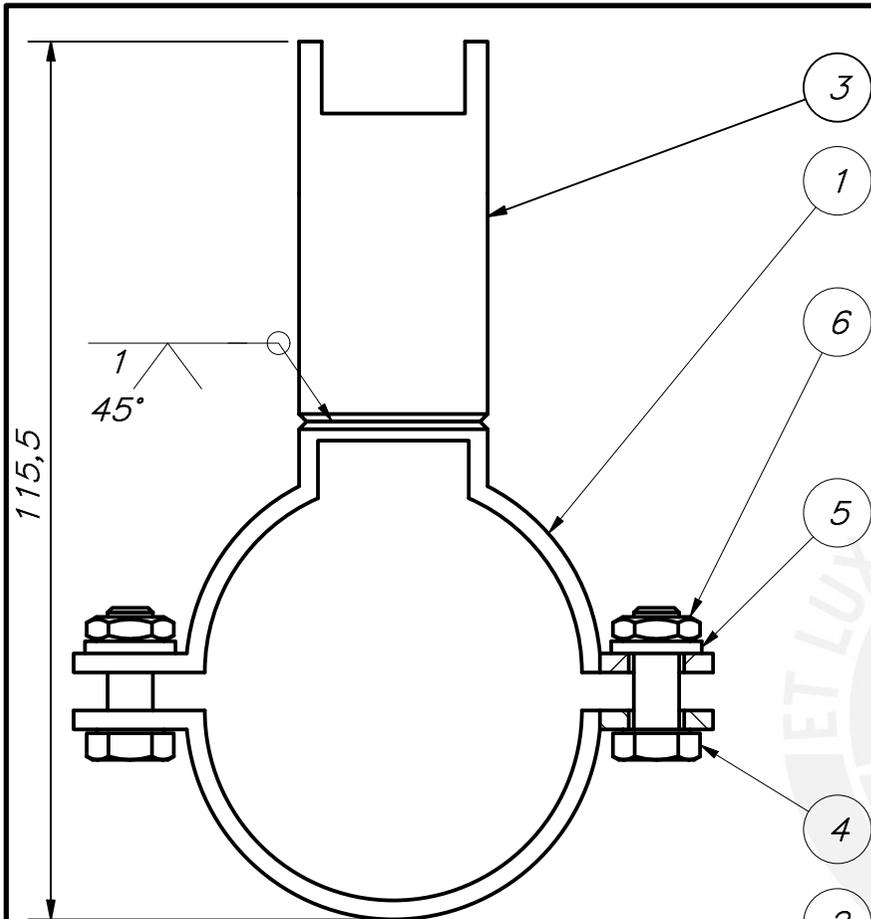
		LÁMINA: PF-SD-A4
--	--	---------------------

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1							
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2



ACABADO SUPERFICIAL 1.5 /	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL A-6061
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA- INGENIERÍA MECATRÓNIA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TESIS 2	ESCALA 1:1
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 20.10.2020
		LÁMINA: PF-SP-A4

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1							
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2



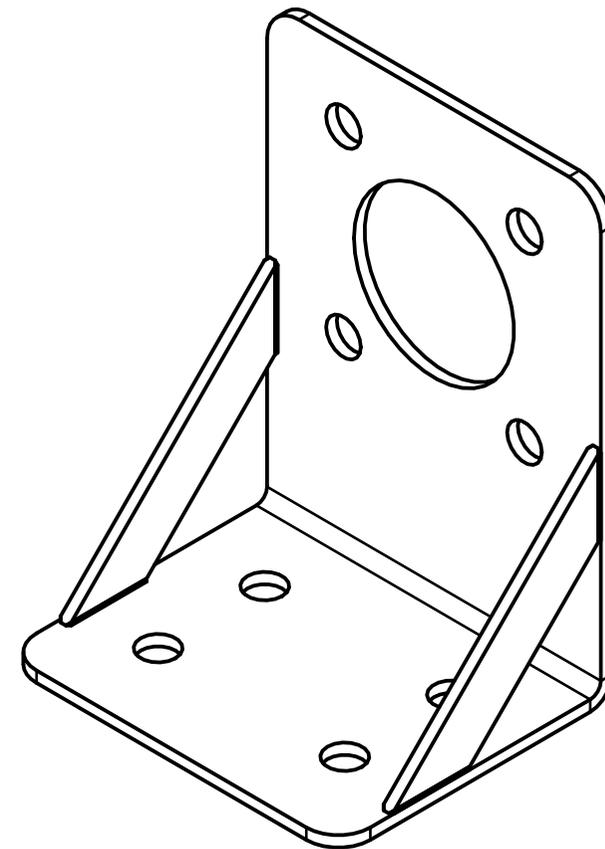
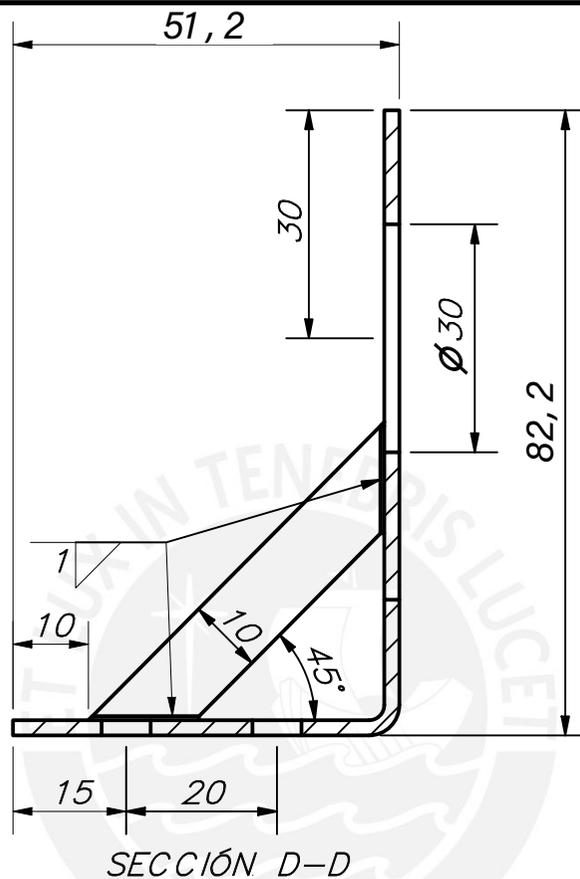
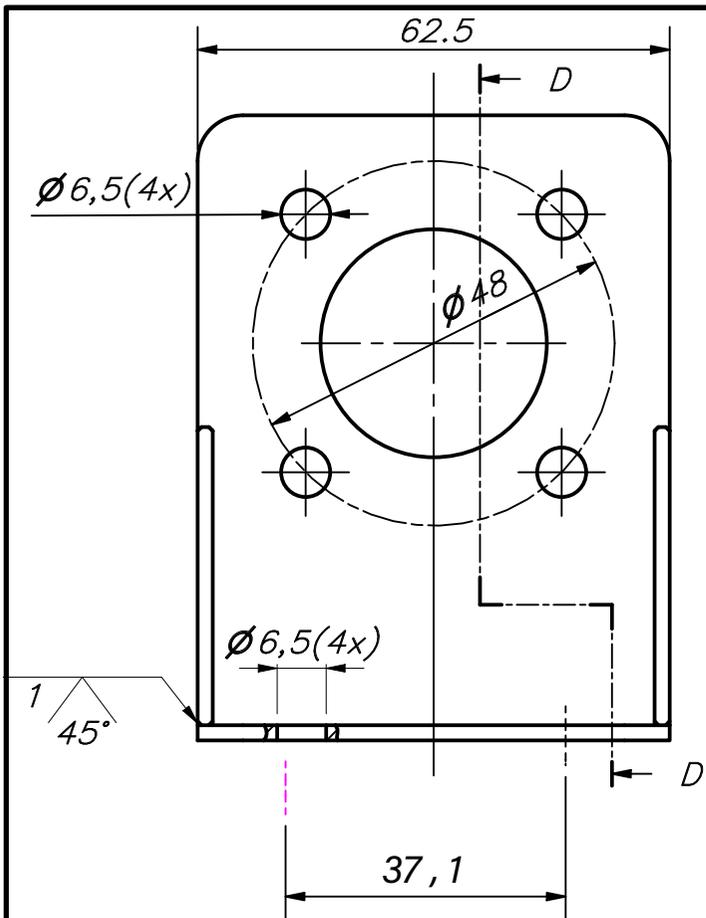
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------

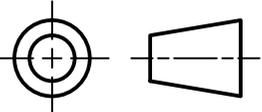
PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
6	2	TUERCA HEXAGONAL M6	ISO 4035	8	
5	2	ARANDELA A6	ISO 7091	St 50	
4	2	TORNILLO HEXAGONAL M6X16	DIN 4017	8.8	
3	1	CUERPO DEL SUJETADOR		ALUMINIO A6061	PF-CS-A4
2	1	SUJETADOR DELANTERO		ALUMINIO A6061	PF-SD-A4
1	1	SUJETADOR POSTERIOR		ALUMINIO A6061	PF-SP-A4

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA

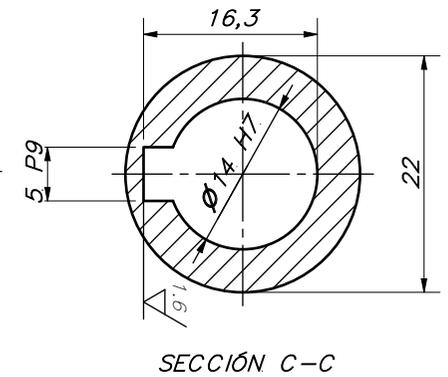
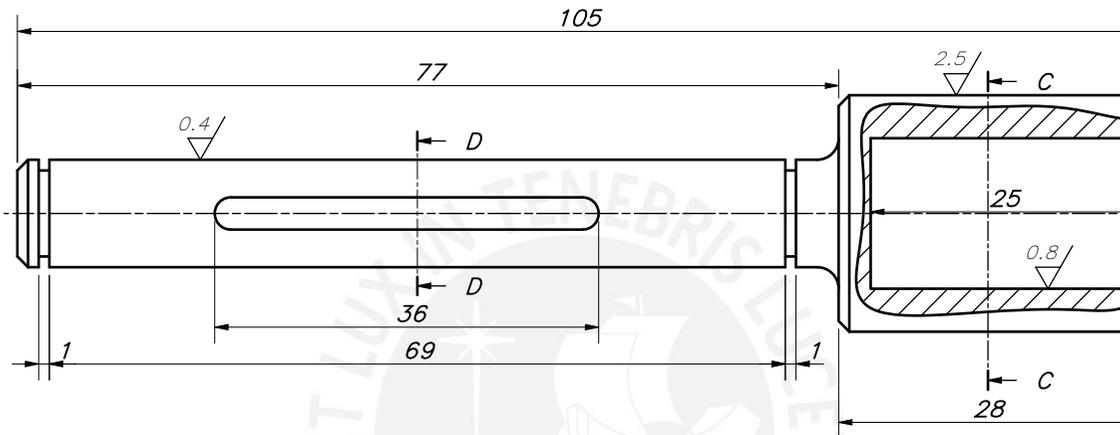
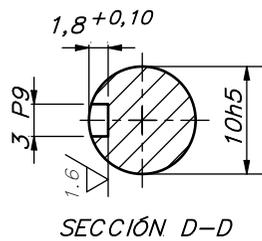
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TESIS 2...	ESCALA
	SUJECION DE ANTORCHA	1:1
20155909	DIAZ CHOQUE, CESAR STEVEN	FECHA: 20/10/2019

		LÁMINA: PE-SA-A4
--	--	---------------------



ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768	MATERIAL St 34
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TESIS	ESCALA
	SOPORTE LIFGO ALTURA	1:1
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.05
		LÁMINA: PF-SLA-A4

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1							
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2



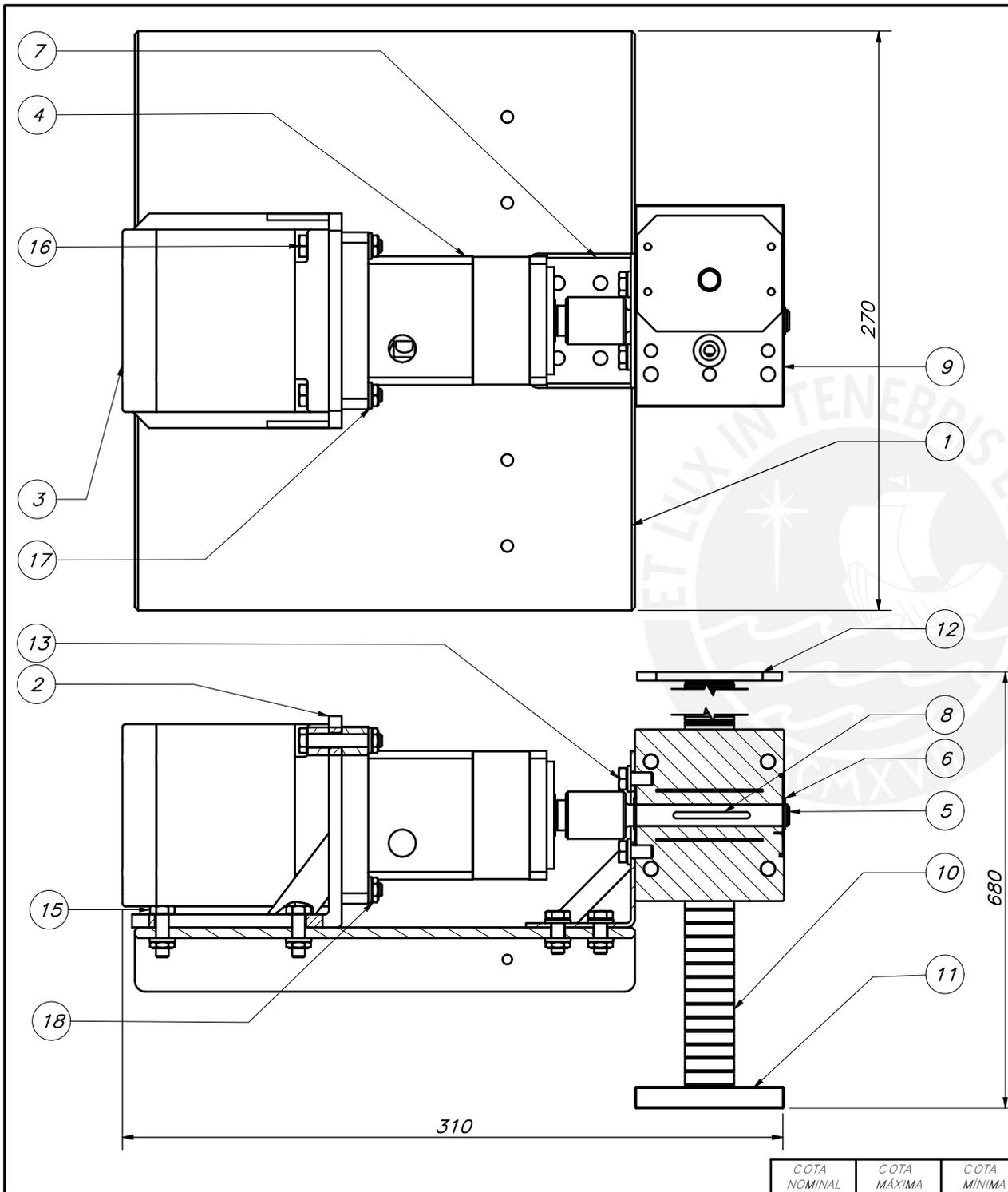
REDONDEOS NO INDICADOR R2
CHAFLANES NO INDICADOS 1x45°

ACABADO SUPERFICIAL $(\sqrt{2.5}/\sqrt{1.6}/\sqrt{0.8}/\sqrt{0.4})$	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL St42
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TESIS EJE DE TRANSMISIÓN LIFGO	ESCALA 2:1
14.000	14.018	14.000
10.000	10.000	9.994
5.000	4.988	4.958
3.000	2.994	2.969
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.05
		LÁMINA: PF-ETL-A3

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

14.000	14.018	14.000
10.000	10.000	9.994
5.000	4.988	4.958
3.000	2.994	2.969
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

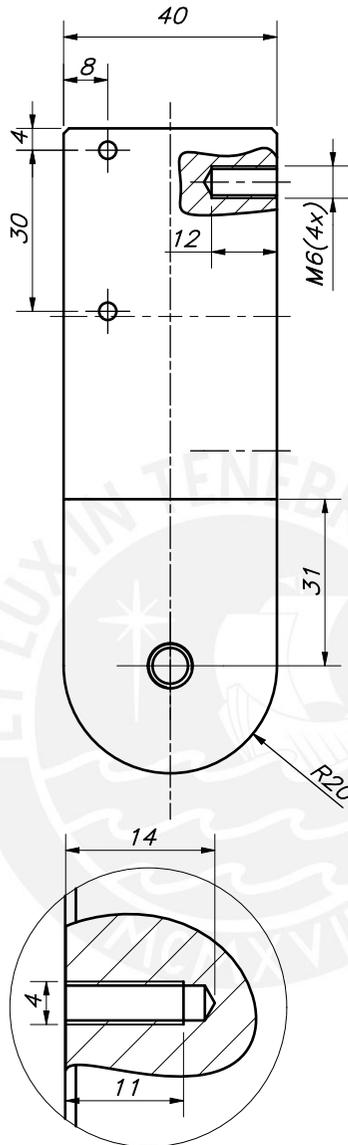
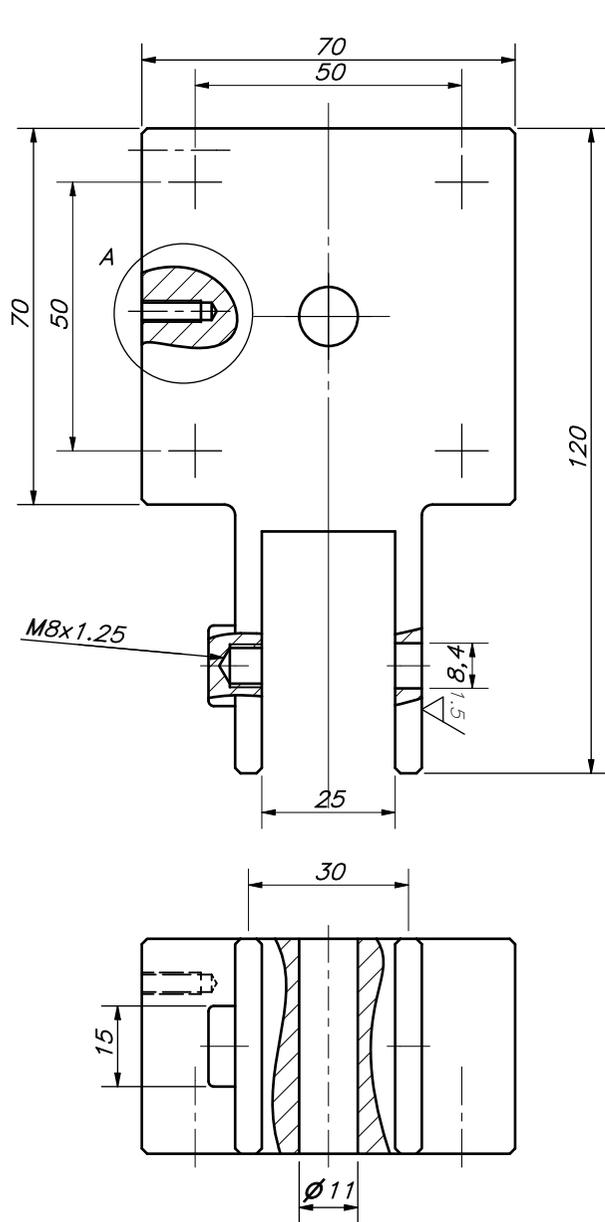


PARTS LIST					
18	12	TUERCA M6	ISO 4035	8	
17	20	ARANDELA A6	ISO 7089	St	
16	4	TORNILLO HEXAGONAL M6 x 35	ISO 4017	8.8	
15	4	TORNILLO HEXAGONAL M6 x 20	ISO 4017	8.8	
14	4	TORNILLO HEXAGONAL M6 x 16	ISO 4017	8.8	
13	4	TORNILLO HEXAGONAL M6 x 12	ISO 4017	8.8	
12	1	LIFGO 5.0. PLATILLO FIN DE CARRERA	500 539		LEANTECHNIK
11	1	LIFGO 5.0. PLATILLO DE RETENCIÓN	500 181		LEANTECHNIK
10	1	LIFGO 5.0. CREMALLERA Z=200	500 0169		LEANTECHNIK
9	1	LIFGO 5.0. MÓDULO PIÑÓN	500 013		LEANTECHNIK
8	1	CHAVETA PLANA A 3 x 3 x 36	DIN 6885-1	St 50	
7	1	SOPORTE LIFGO ALTURA		St 34	PF-SLA-A4
6	2	ANILLO DE RETENCIÓN 9x1	DIN 471	St 50	
5	1	EJE DE TRANSMISIÓN LIFGO		St 42	PF-ETL-A3
4	1	REDUCTOR PLANETARIO	DCNC-PG-F 60-15		DCNC
3	1	PENTA 4S 20	PENTA 4S 20 24/48 V		PENTA
2	1	BRACKET DC		St 34	NAYLAMP
1	1	PLANCHA BASE		AlSI. 304	PF-PB-A3
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

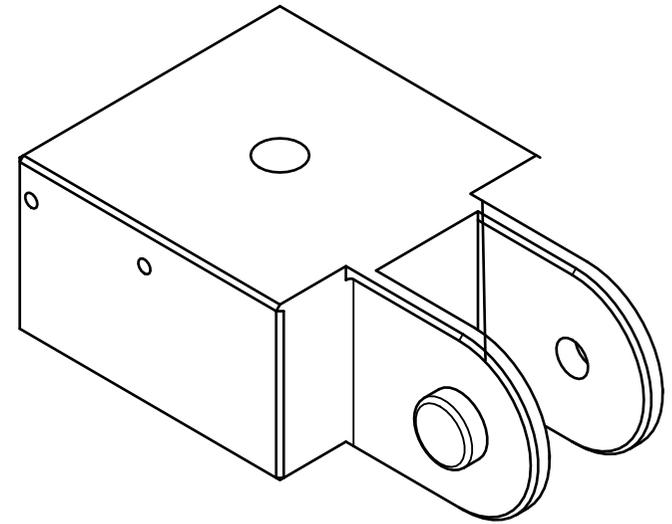
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGENIERÍA-INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TESIS 2	ESCALA
	SISTEMA DE ELEVACIÓN	1:2
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.3
		LÁMINA: PE-SE-A3

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------



DETALLE A
ESCALA 2 : 1

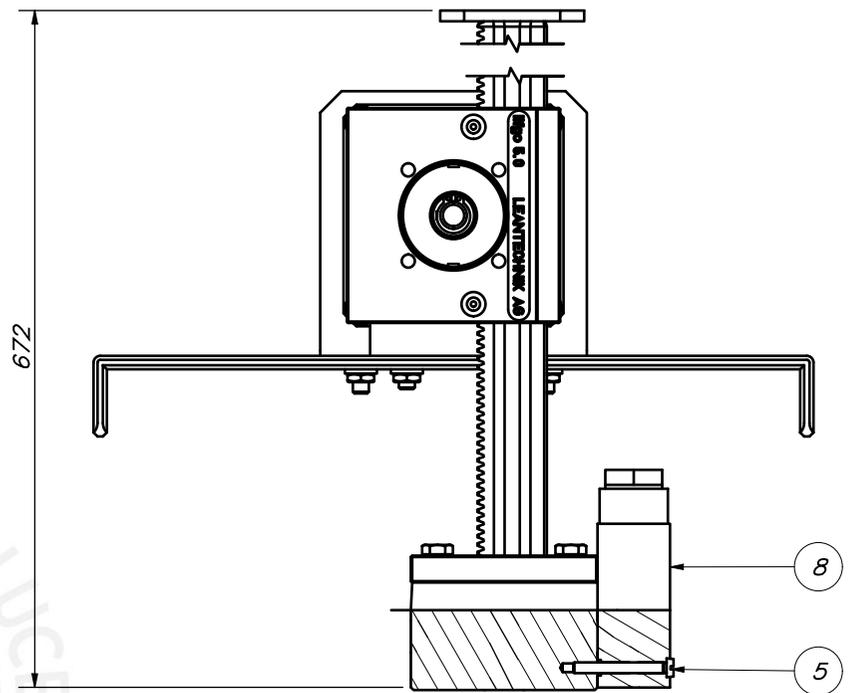
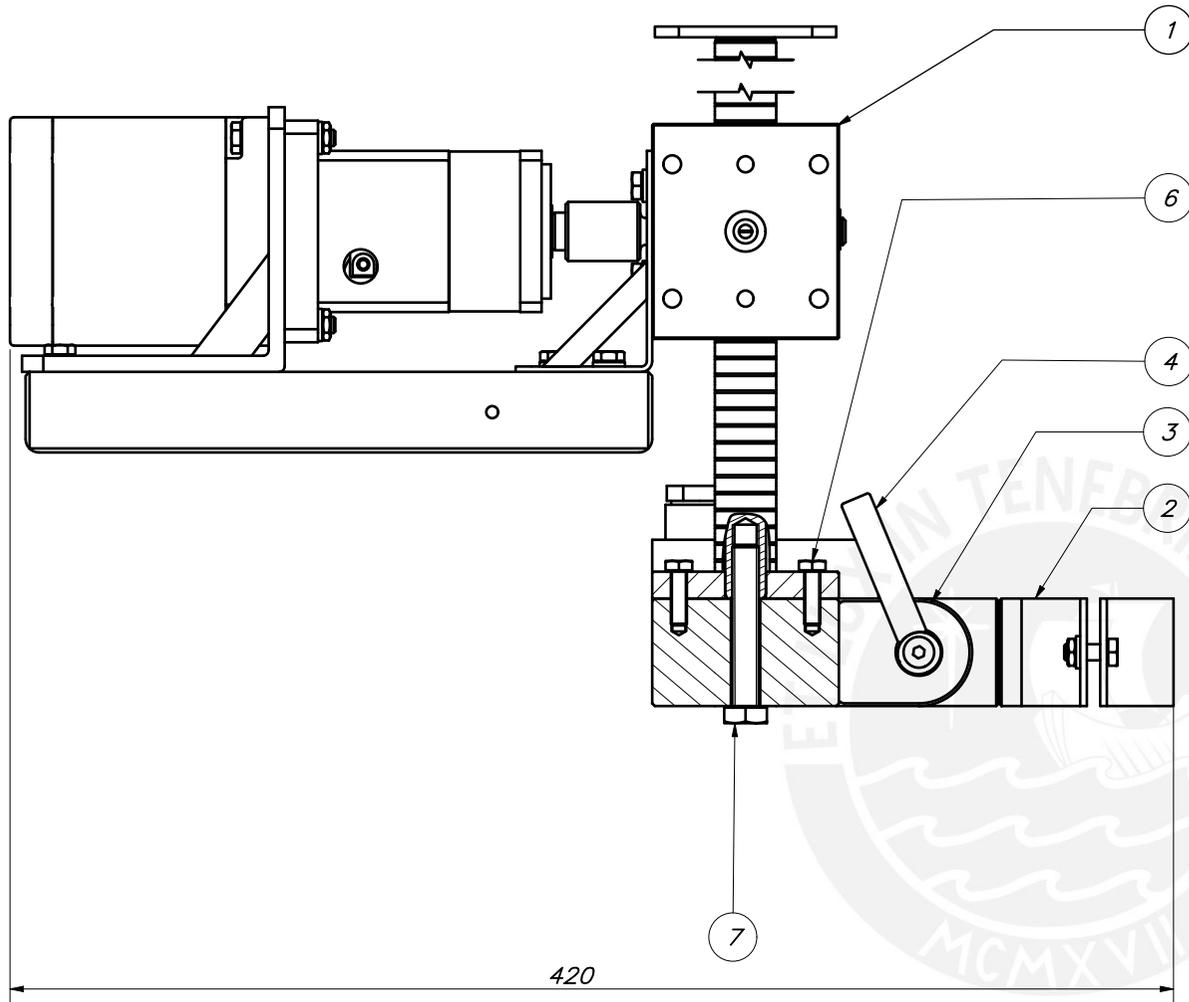


CHAFLANES NO INDICADOS 2X45°
REDONDEOS NO INDICADOS R5

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1							
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

ACABADO SUPERFICIAL 1.5/	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL A-6061
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA-INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TESIS 2 SOPORTE DE ANTORCHA	ESCALA 1:1
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.10.28
		LÁMINA: PF-SA-A3

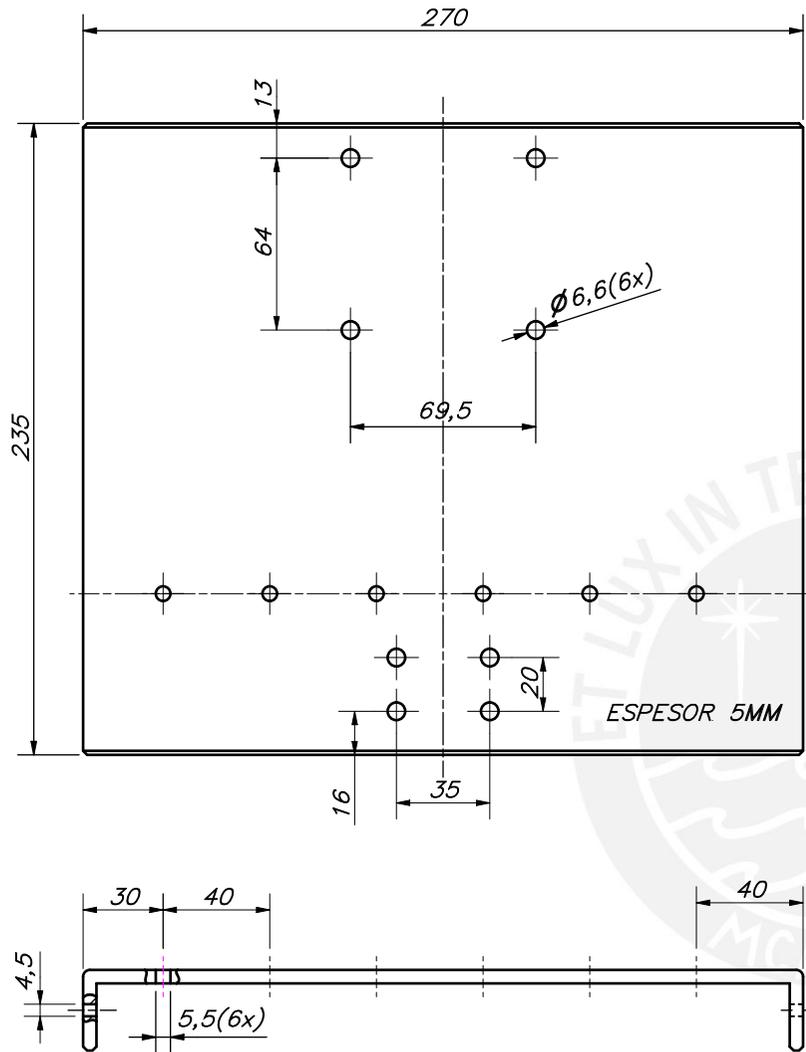


PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
8	1	SENSOR DE DISTANCIA	XUJK803538		SCHNEIDER
7	1	TORNILLO HEXAGONAL M10X60	ISO 4017	8.8	
6	4	TORNILLO HEXAGONAL M6X20	ISO 4017	8.8	
5	2	TORNILLO . M4 x 35	ISO 1207	8.8	
4	1	TORNILLO DE PALANCA M8X35			
3	1	SOPORTE DE ANTORCHA		ALUMINIO A6061	PF-SA-A3
2	1	SUJECION ANTORCHA			PE-SA-A4
1	1	SISTEMA DE ELEVACIÓN			PE-SE-A3

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGENIERÍA-INGENIERÍA MECATRÓNIA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TESIS 2	ESCALA
	ELEVACIÓN ANTORCHA	1:2
20155909	DIAZ CHOQUE, CESAR STEVEN	FECHA: 2020.10.28
		LÁMINA: PE-EA-A3

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

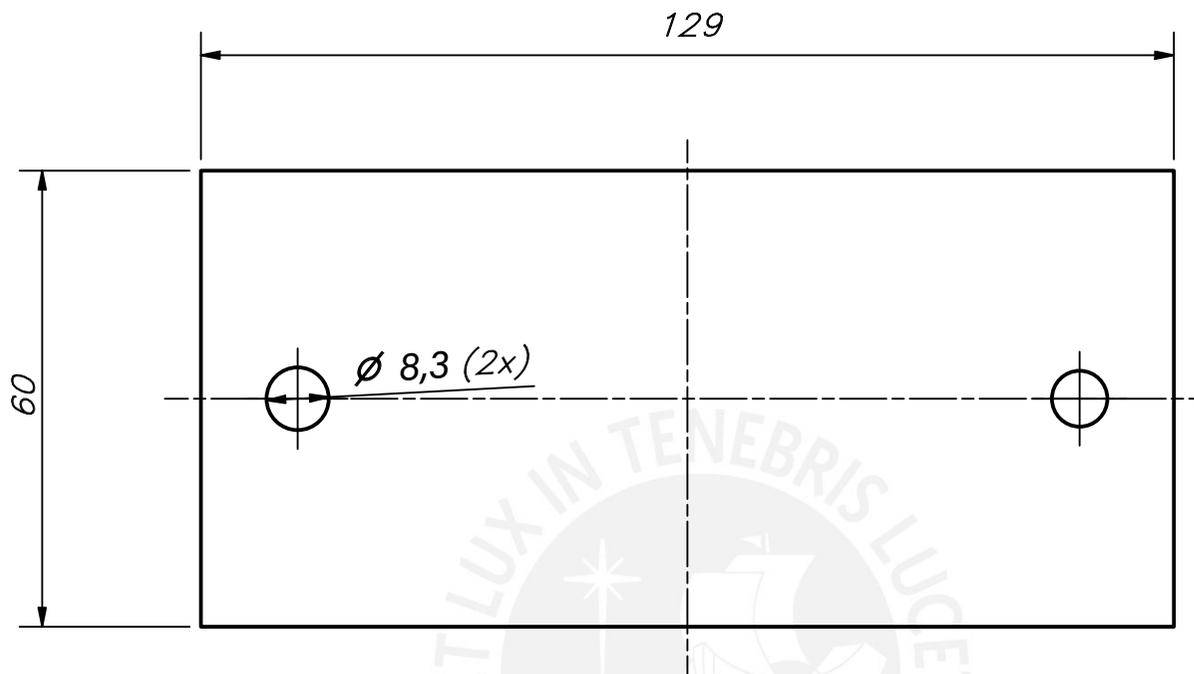


CHAFLANES NO INDICADOS 1.5x45°

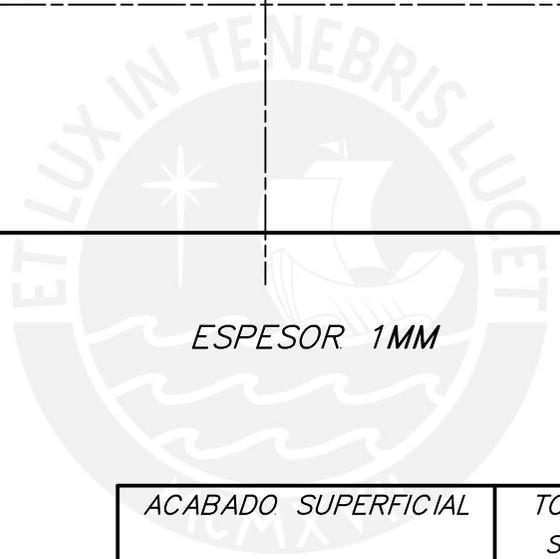
ACABADO SUPERFICIAL 1.8/	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIA E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TESIS PLANCHA BASE	ESCALA 1:2
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.05
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
		LÁMINA: PF-PB-A3

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

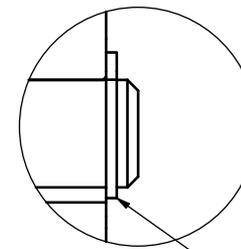
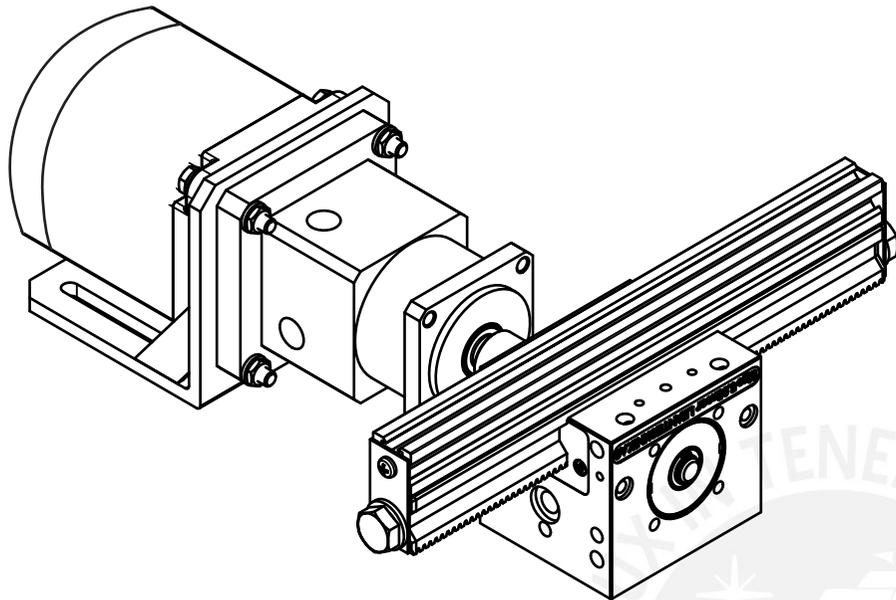


ESPESOR 1MM

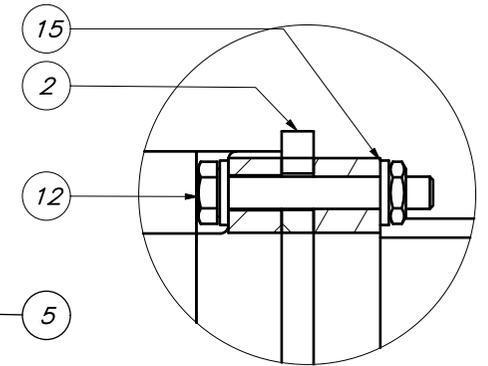


ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768	MATERIAL AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TESIS <i>Plancha Sujeción V-Slot</i>	ESCALA 1:1
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LÁMINA: PF-PSV-A4

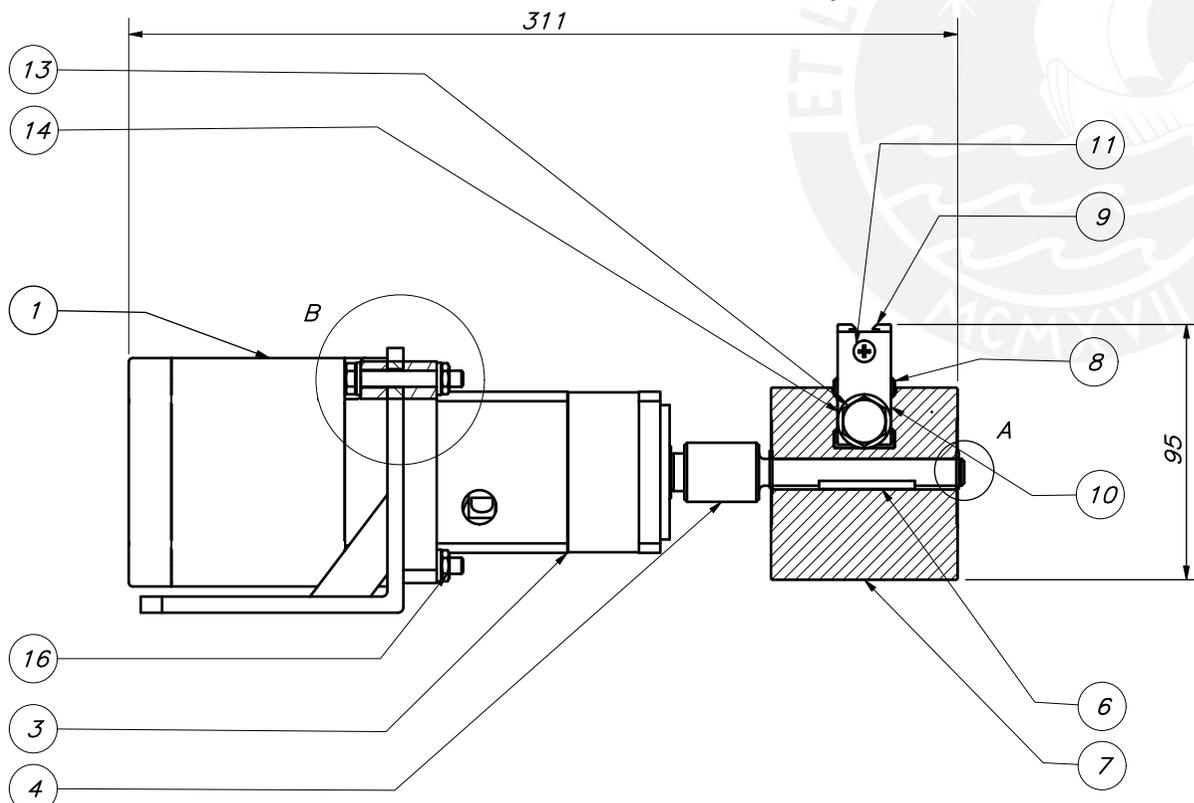
TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1							
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2



DETALLE A
ESCALA 2:1



DETALLE B
ESCALA 1 : 1

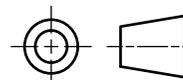


PARTS LIST

POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
16	4	TUERCA M6	ISO 4035	8	
15	8	ARANDELA A6	ISO 7089	St	
14	2	ARANDELA A10	ISO 7089	St	
13	2	TORNILLO HEXAGONAL M10 x 20	ISO 4017	8.8	
12	4	TORNILLO HEXAGONAL M6 x 40	ISO 4017	8.8	
11	2	TORNILLO HEXAGONAL M4 x 8	ISO 7045	8.8	
10	2	PLANCHA SUJECION V. SLOT		AIISI. 304	PF-PSV-A
9	1	PERFIL V-SLOT. 20X20x250mm	V-SLOT.		NAYLAMP
8	1	LIFGO 5.0 CREMALLERA Z=80	500. 173 Z=80		LEANTECHNIK
7	1	LIFGO MODULO LINEAL 5.0 PFN	500. 045		LEANTECHNIK
6	1	CHAVETA PLANA A 3 x 3 x 36	DIN 6885-1	St 50	
5	2	ANILLO DE RETENCIÓN 9x1	DIN 471	St 50	
4	1	EJE DE TRANSMISIÓN LIFGO		St 42	PF-ETL-A3
3	1	REDUCTOR PLANETARIO	DCNC-PG-F 60-15		DCNC
2	1	BRACKET DC			NAYLAMP
1	1	PENTA 4S 20	PENTA 4S 20 24/48 V		PENTA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGENIERÍA- INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN



TESIS 2

SISTEMA DE
DESPLAZAMIENTO Y

ESCALA

1:2

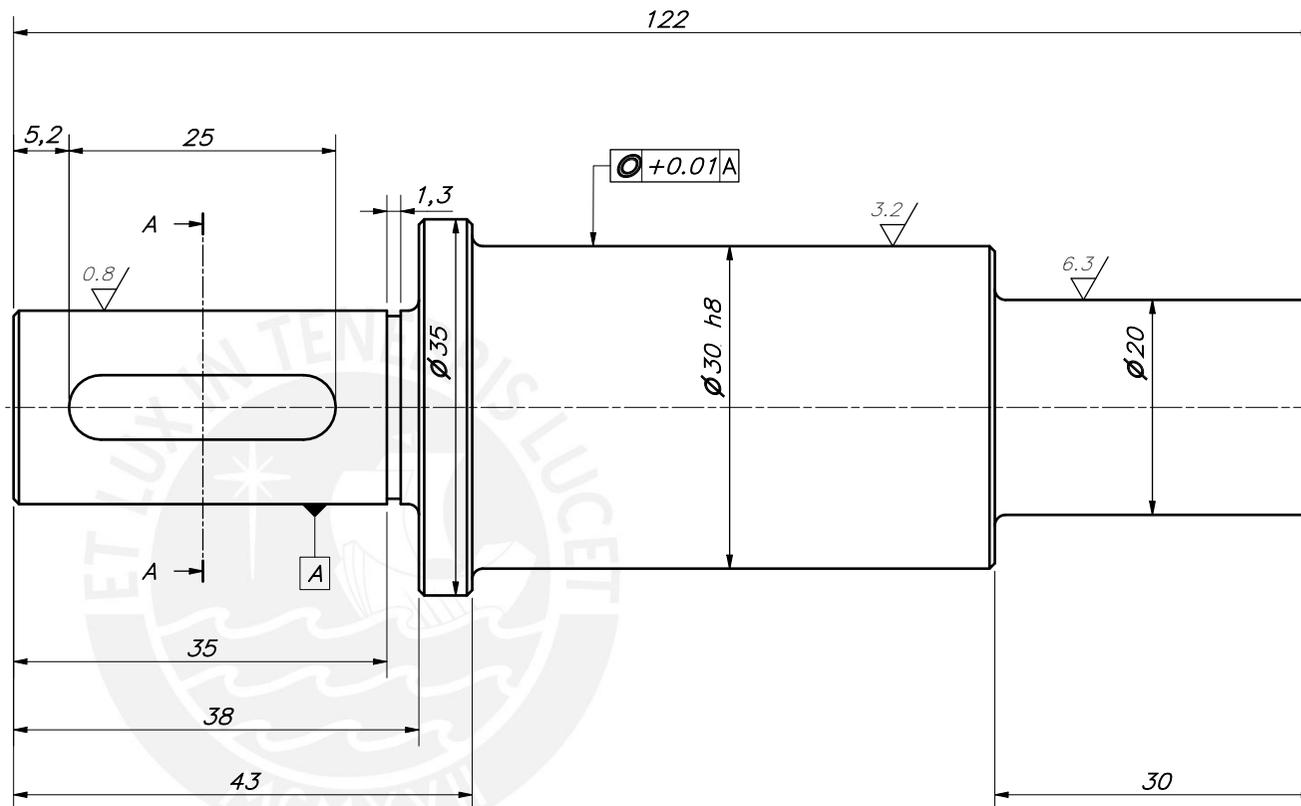
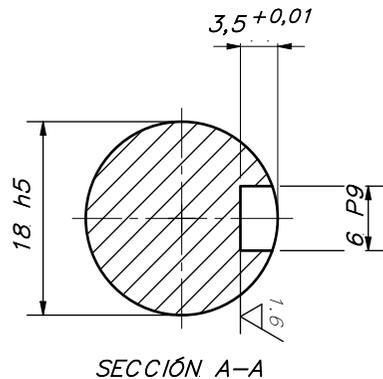
20155909

DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN

FECHA:
2020.11.4

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

LÁMINA:
PE-SDY-A3



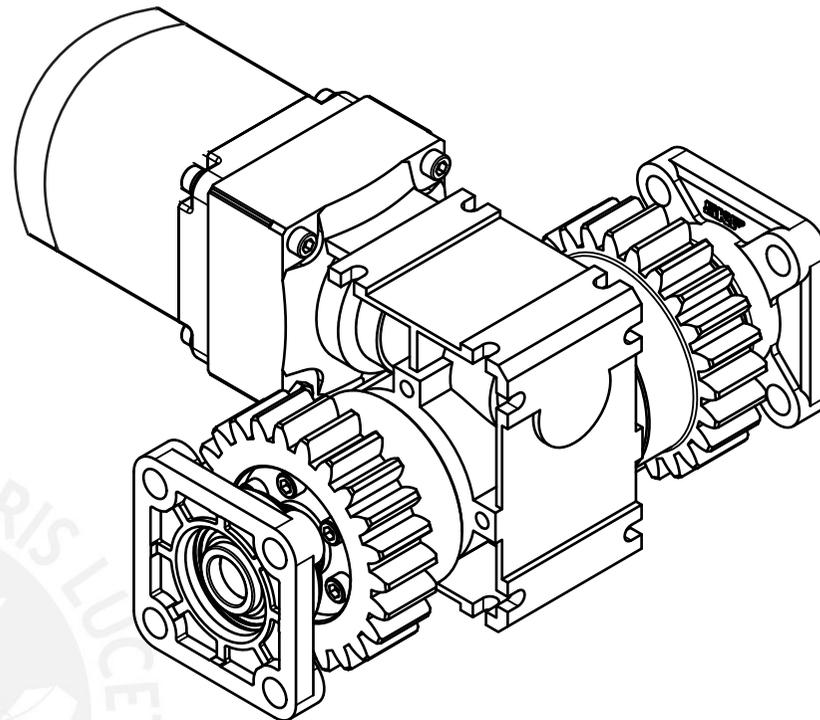
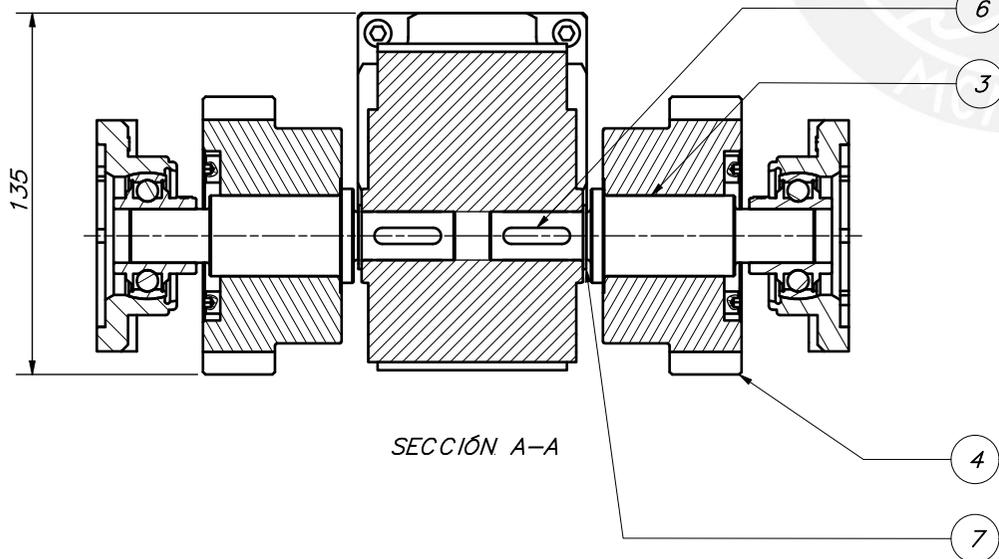
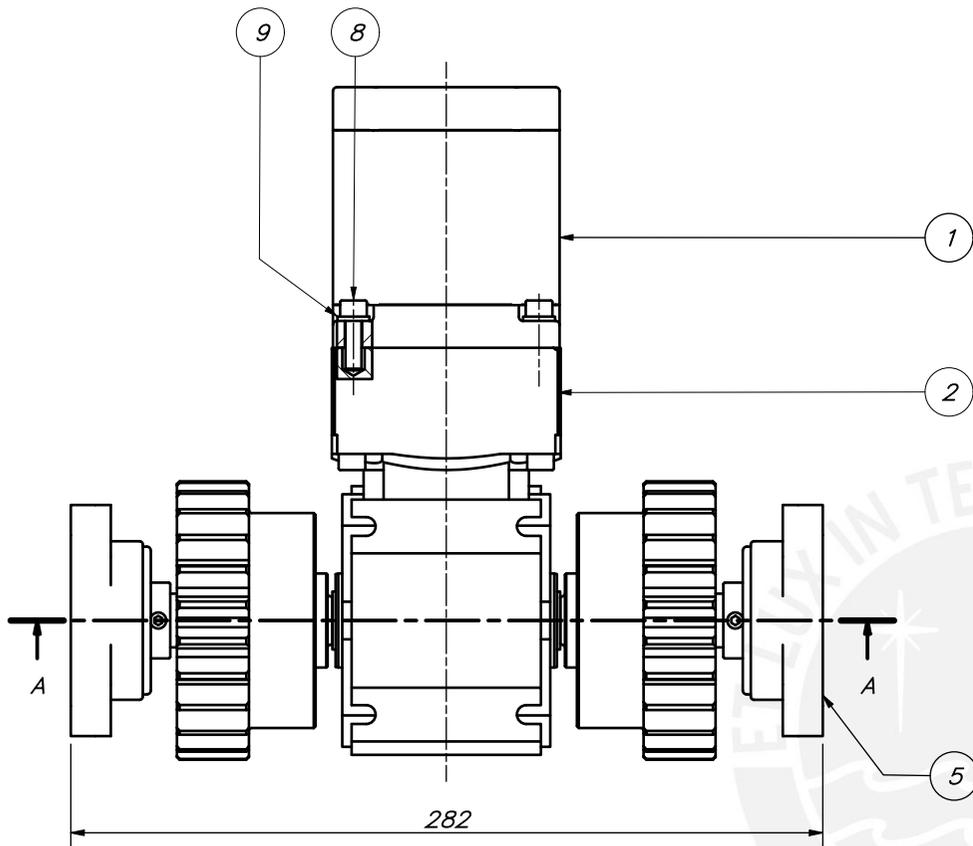
REDONDEOS NO INDICADOR R1.
CHAFLANES NO INDICADOS 1x45°

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

30.000	30.000	29.967
18.000	18.000	17.992
6.000	5.988	5.958
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

ACABADO SUPERFICIAL 6.3 / 3.2 / 1.6 / 0.8 / (∇, ∇, ∇, ∇)	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768	MATERIAL St-42
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TESIS 2 EJE DE TRANSMISIÓN CIRCUNFERENCIAL	ESCALA 1:1
20155909	DIAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.09
		LÁMINA: PF-ETC-A3



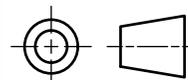
PARTS LIST					
9	4	ARANDELA A6	ISO 7089	St	
8	4	TORNILLO ALLEN M6 x 20	ISO 4762	8.8	
7	2	ANILLO DE RETENCIÓN 18 x 1.2	DIN 471	St 50	
6	2	CHAVETA PLANA A 6 x 6 x 25	DIN 6885-1	St 50	
5	2	CHUMACERA DE PARED	FYD 20		SKF
4	2	RODAMIENTOS	HP4x24		HEPCOMOTION
3	2	ÁRBOL DE TRANSMISIÓN ROTACIONAL		St 42	PF-ATR-A4
2	1	REDUCTOR 12.5 A 1	GSGE80-12.5-1		NANOTEC
1	1	PENTA 7MA 20	PENTA 7MA 48 V		PENTA
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN

TESIS 2

ESCALA



DESPLAZAMIENTO
CIRCUNFERENCIAL

1:2

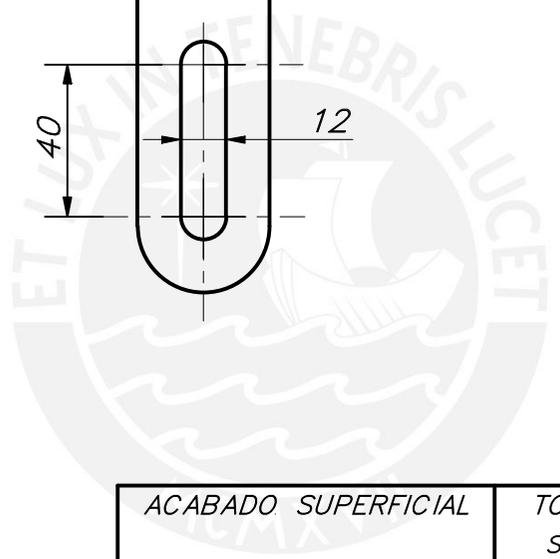
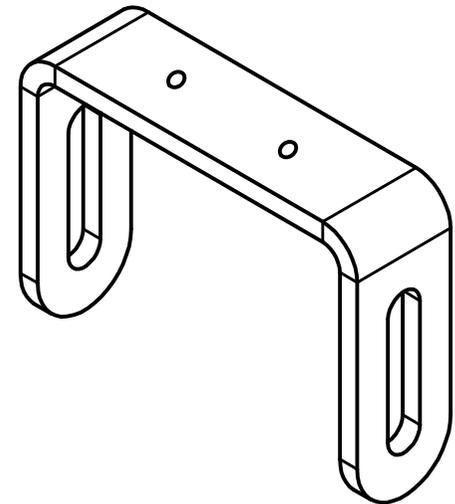
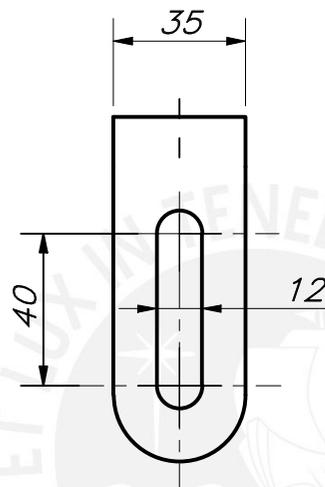
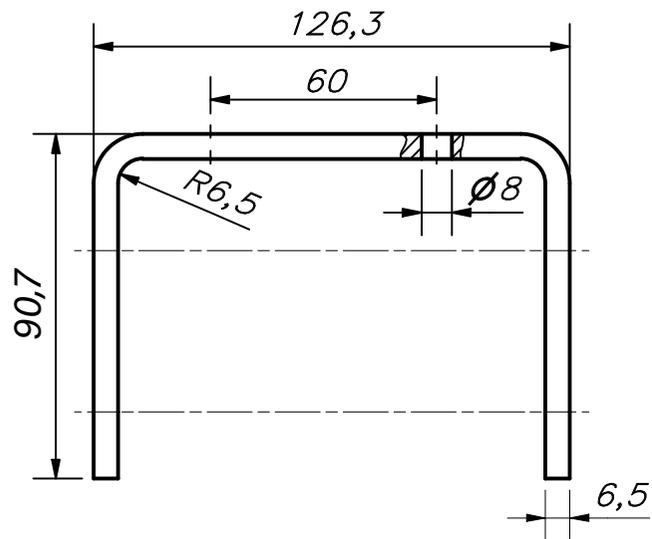
20155909

DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN

FECHA:
2020.10.20

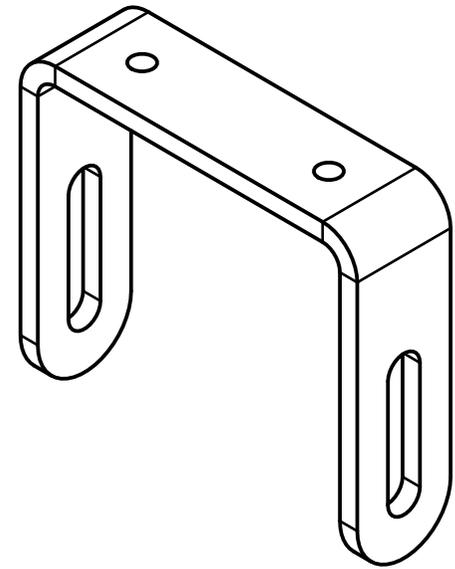
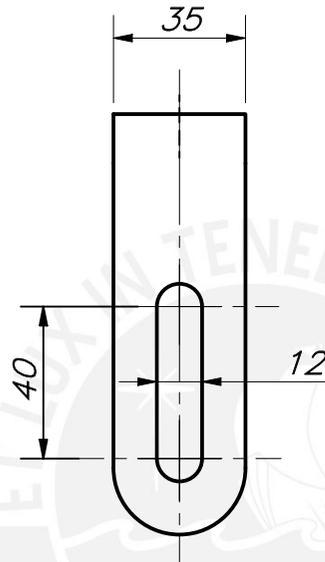
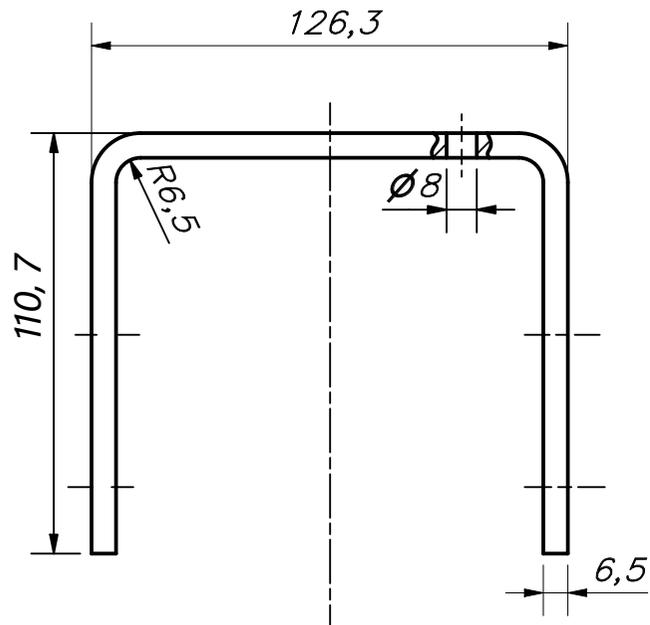
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

LÁMINA:
PE-DC-A3



ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2568	MATERIAL A6061
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TESIS	ESCALA
	BRACKET SUJECION RODAMIENTO FRONTAL	1:2
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LÁMINA: PF-BSRF-A4

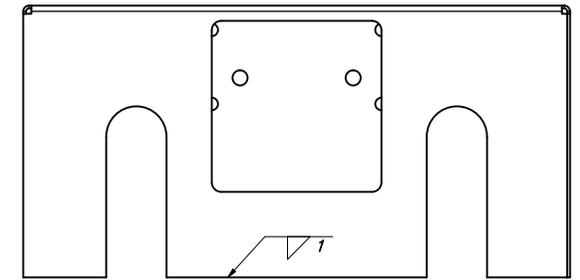
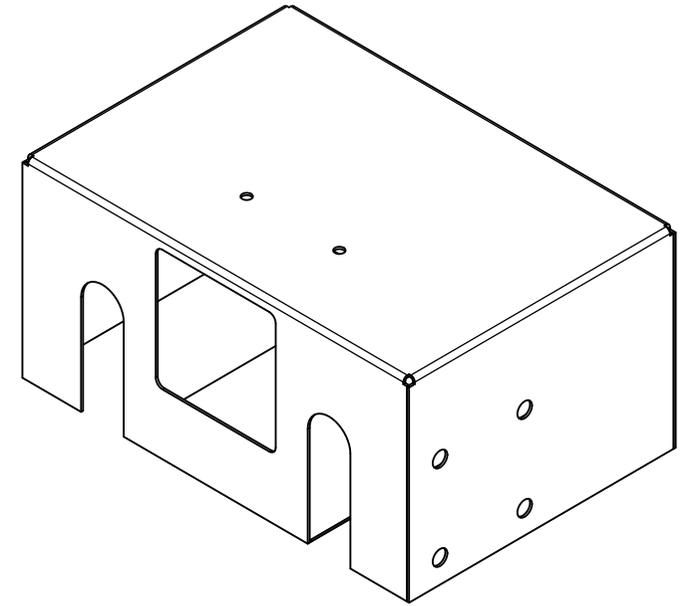
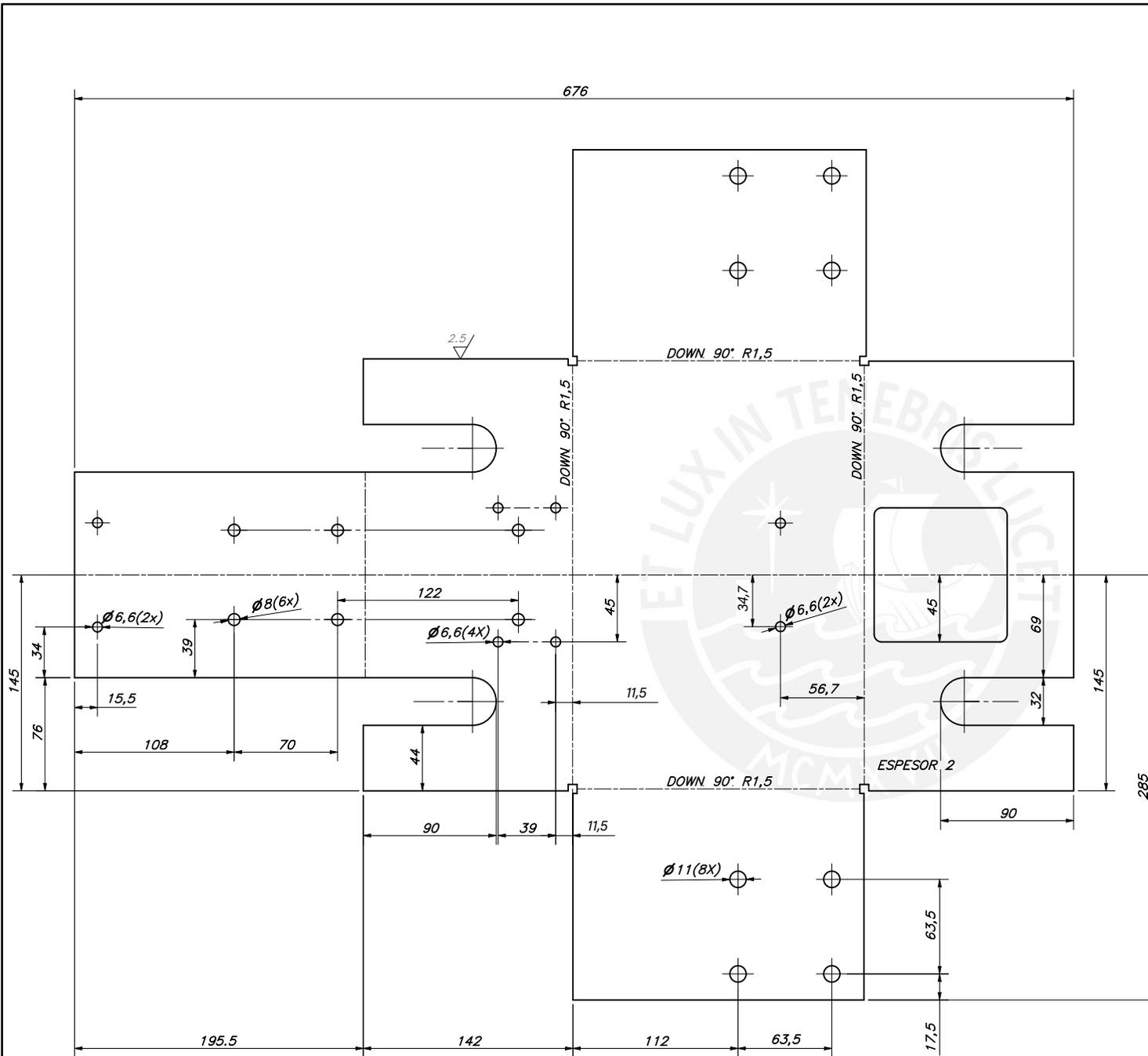
TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1					
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5



ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2568	MATERIAL St 34
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERIA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TESIS	ESCALA
	BRACKET SUJECION RODAMIENTO POSTERIOR	1:2
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LÁMINA: PF-BSRP-A4

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5



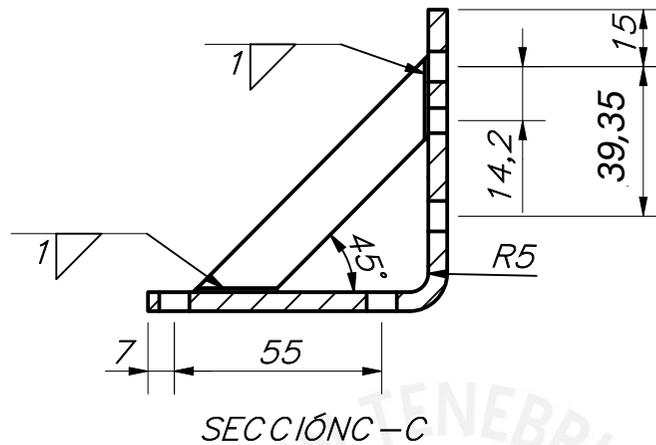
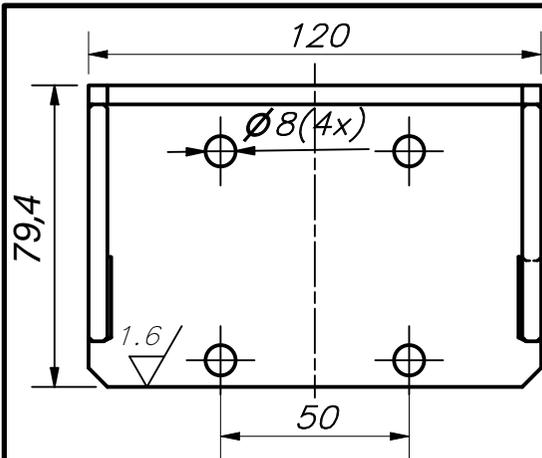
TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

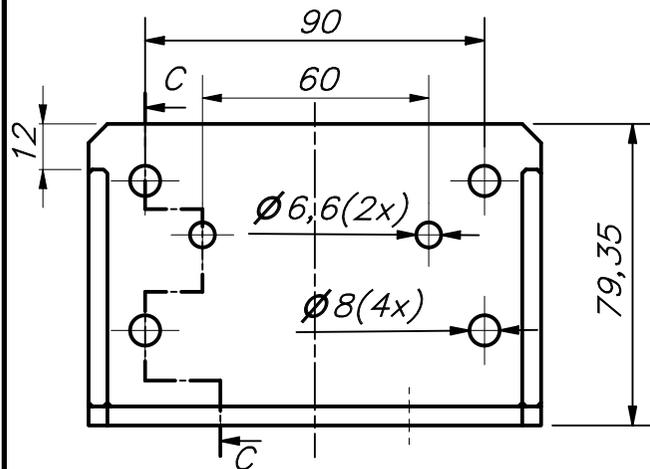
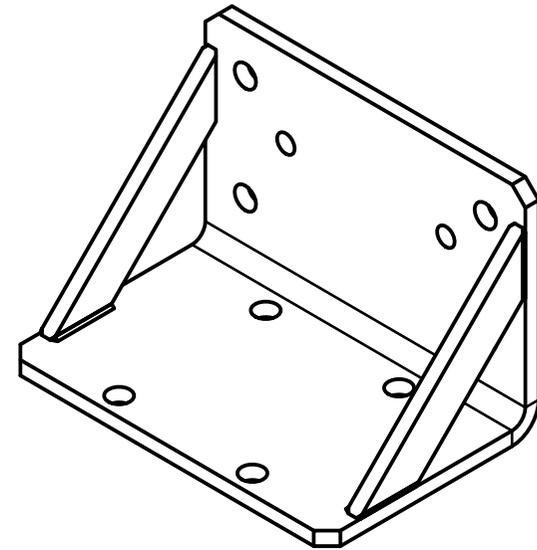
REDONDEOS NO INDICADOR R5

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

ACABADO SUPERFICIAL 2.5/√	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768	MATERIAL ASTM A36
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ		
MÉTODO DE PROYECCIÓN [Symbol]	TESIS CUBIERTA PRINCIPAL	ESCALA 1:2
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LÁMINA: PF-CP-A2



ESPESOR 5mm
CHAFLANES NO INDICADOS 5x45°

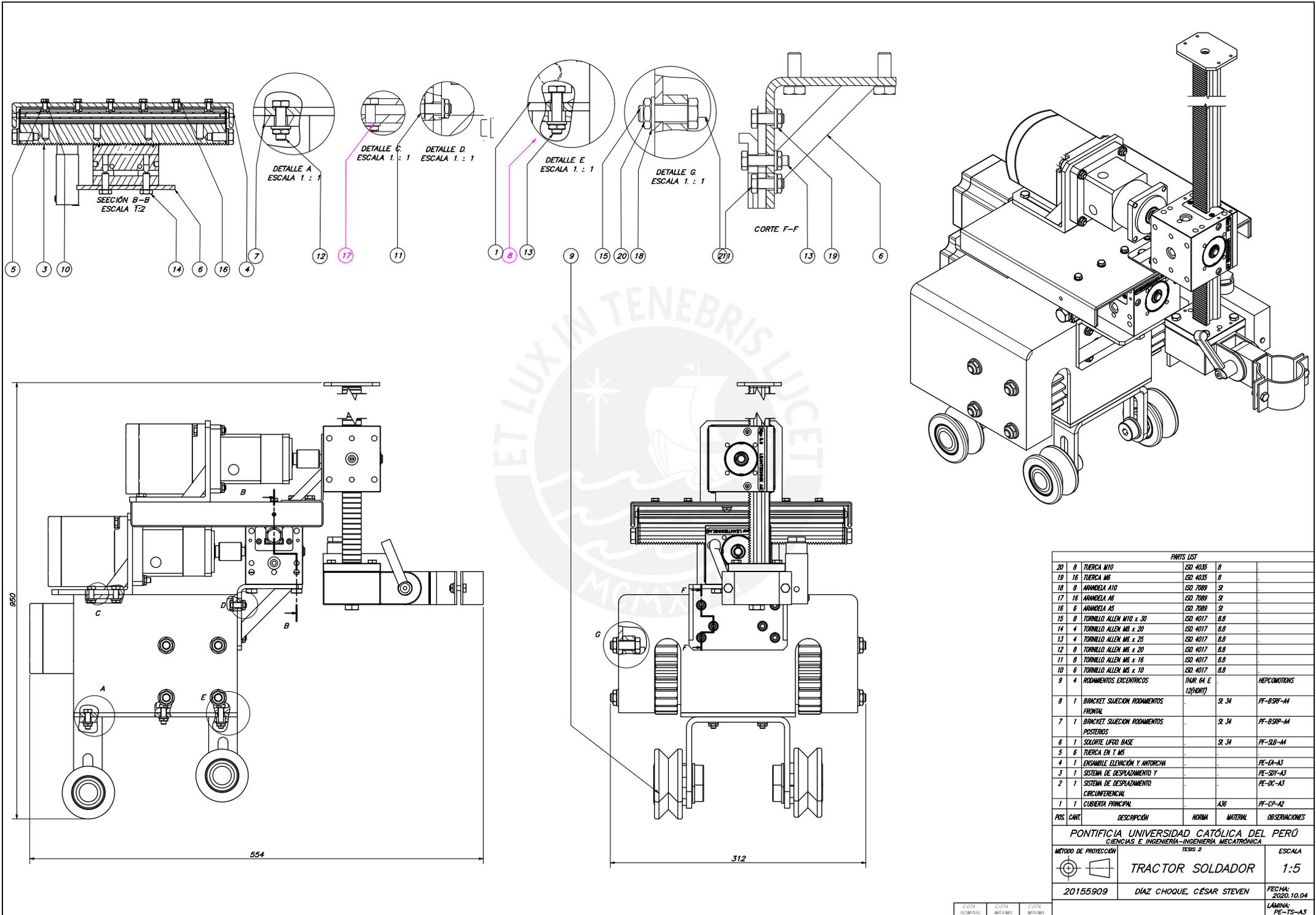


TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120
	MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

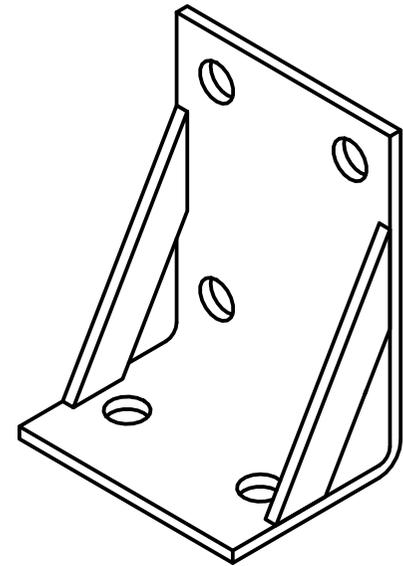
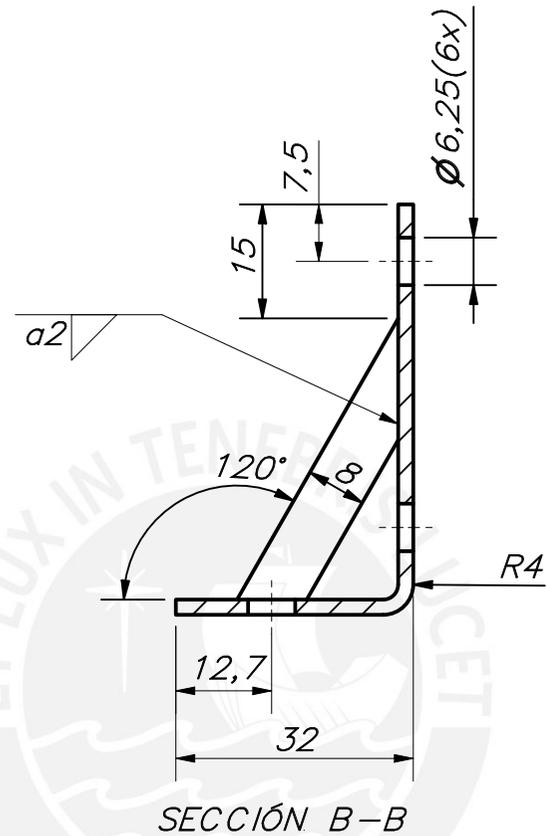
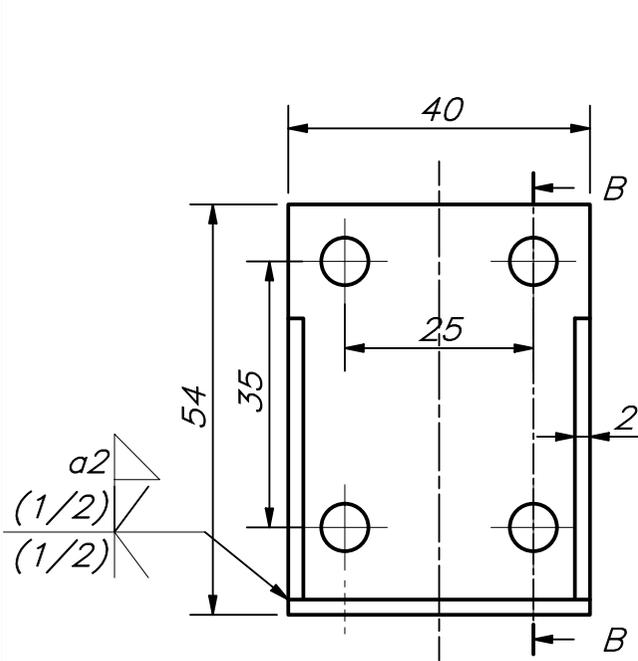
ACABADO SUPERFICIAL 1.6/	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768	MATERIAL St 34
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TESIS	ESCALA
	SOPORTE LIFGO BASE	1:2
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.4
		LÁMINA: PF-SLB-A4



PARTS LIST				
20	8	TIERZA M10	ISO 4035	8
19	16	TIERZA M6	ISO 4035	8
18	8	ARRANDELA A10	ISO 7089	31
17	16	ARRANDELA A6	ISO 7089	31
16	6	ARRANDELA A5	ISO 7089	31
15	8	TORNILLO ALLEN M10 x 30	ISO 4017	8.8
14	4	TORNILLO ALLEN M8 x 20	ISO 4017	8.8
13	4	TORNILLO ALLEN M6 x 25	ISO 4017	8.8
12	8	TORNILLO ALLEN M6 x 20	ISO 4017	8.8
11	8	TORNILLO ALLEN M6 x 16	ISO 4017	8.8
10	6	TORNILLO ALLEN M5 x 10	ISO 4017	8.8
9	4	RODAMIENTOS EXCÉNTRICOS	TAUR 6A E 12(HORT)	HEPCOMOTIONS
8	1	BRACKET SUECIÓN RODAMIENTOS FRONTAL	SI 34	PF-BSPF-A4
7	1	BRACKET SUECIÓN RODAMIENTOS POSTERIOS	SI 34	PF-BSPF-A4
6	1	SALORTE LIFRO BASE	SI 34	PF-SLB-A4
5	6	TIERZA EN T M5		
4	1	ENSAMBLE ELEVACIÓN Y ANTORCHA		PE-EH-A3
3	1	SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO Y CIRCUNFERENCIAL		PE-SOY-A3
2	1	SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO CIRCUNFERENCIAL		PE-DC-A3
1	1	CUBIERTA PRINCIPAL	A36	PF-CP-A2

POS	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA—INGENIERÍA MECATRÓNICA TESIS 2					
MÉTODO DE PROTECCIÓN		TRACTOR SOLDADOR		ESCALA 1:5	
20155909		DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN		FECHA: 2020.10.04	
				LAMINA: PE-TS-A3	

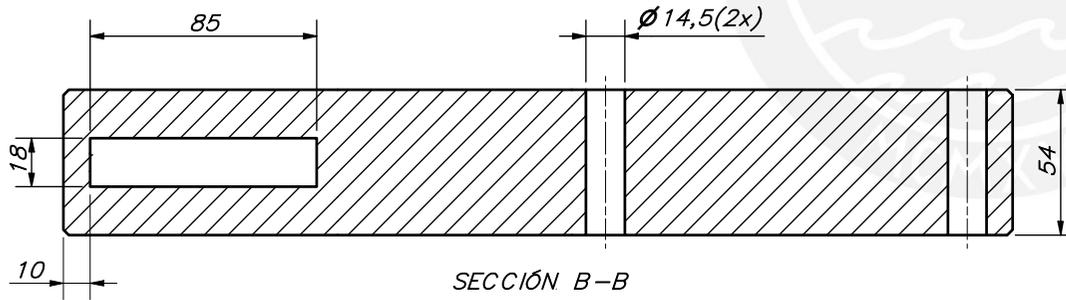
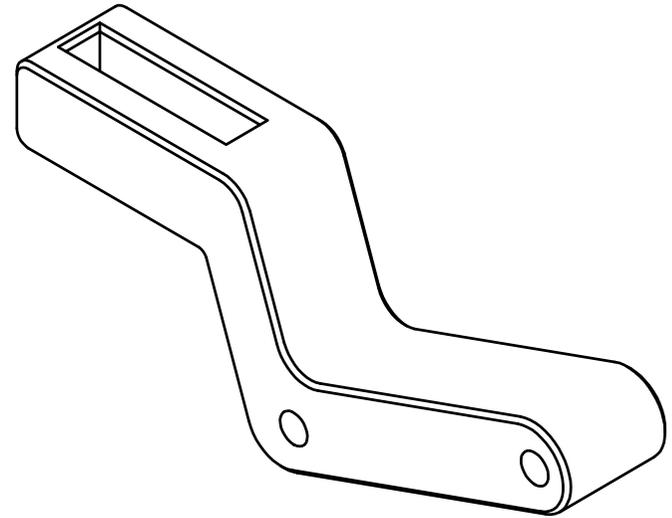
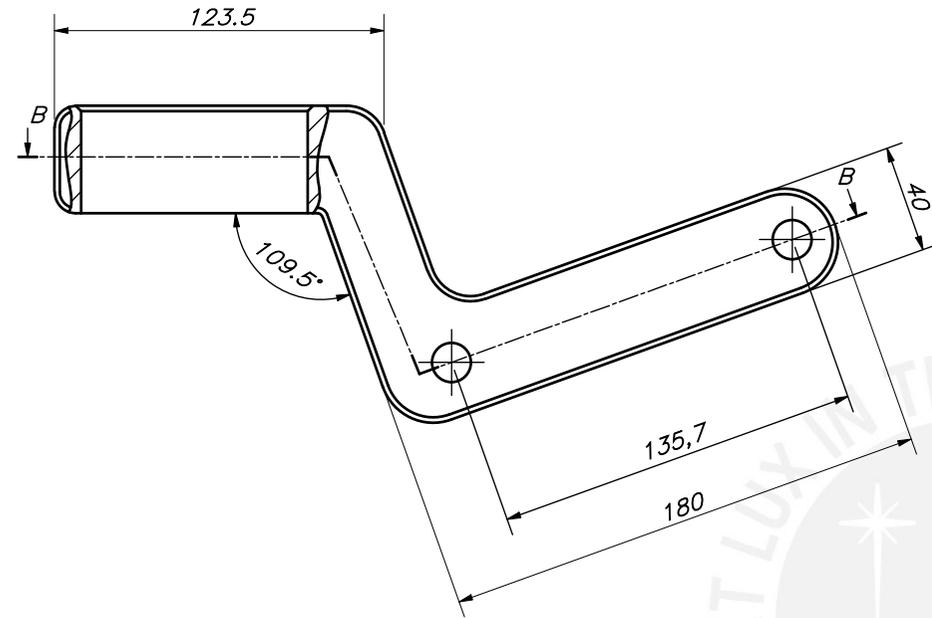
COTA NOMINAL	COTA MEDIANA	COTA MINIMA



**TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1**

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768	MATERIAL St 34
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TESIS BRACKET DE SUJECCIÓN CLAMP	ESCALA 1:2
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LÁMINA: PF-BSC-A4

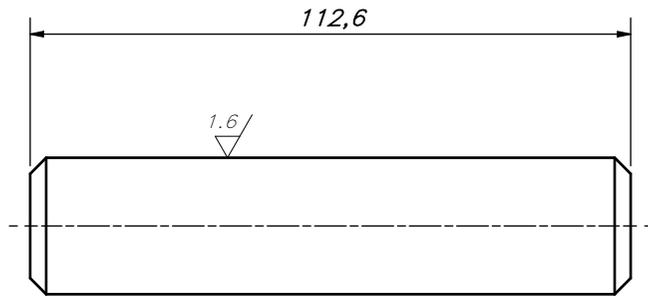


CHAFLANES NO INDICADOS 2x45°

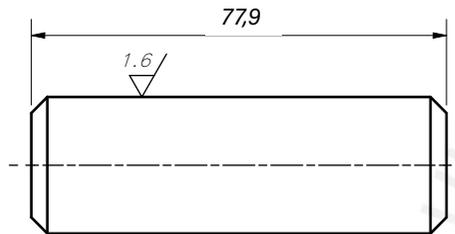
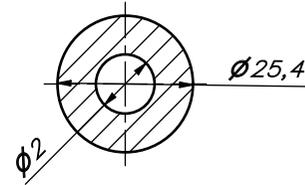
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768	MATERIAL A36
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TESIS BLOQUE DE SUJECCIÓN CLAMP	ESCALA 1:2
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LÁMINA: PF-BSC-A4

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1							
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

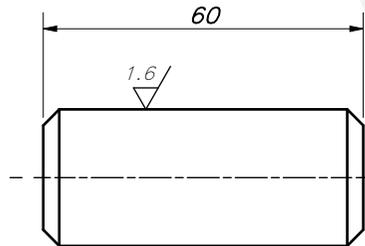
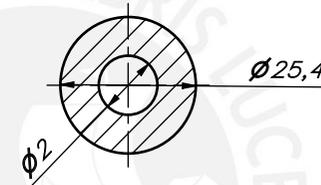
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------



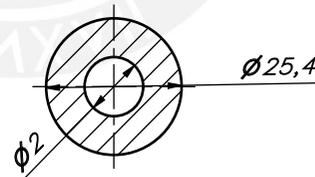
ESPAZIADOR CLAMP
MATERIAL: ALUMINIO. A6061



ESPAZIADOR ESTRUCTURA
MATERIAL: A36



ESPAZIADOR PIVOTE
MATERIAL: A36



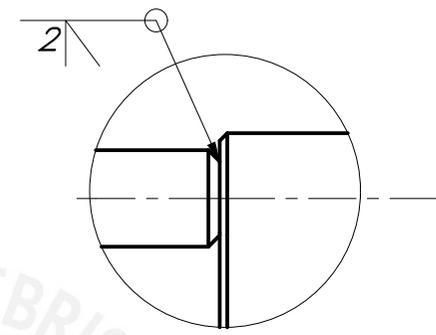
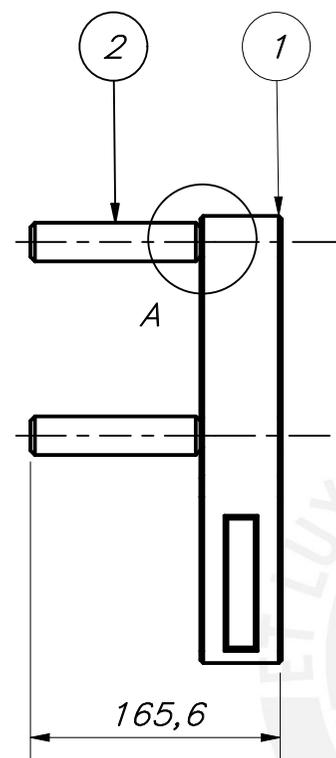
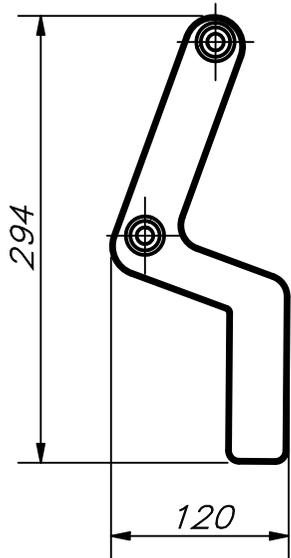
CHAFLANES NO. INDICADOS 3x45°

ACABADO SUPERFICIAL 1.6/	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TESIS	ESCALA
	ESPACIADORES	1:1
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LÁMINA: PF-E-A3

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------



DETALLE A
ESCALA 1:2

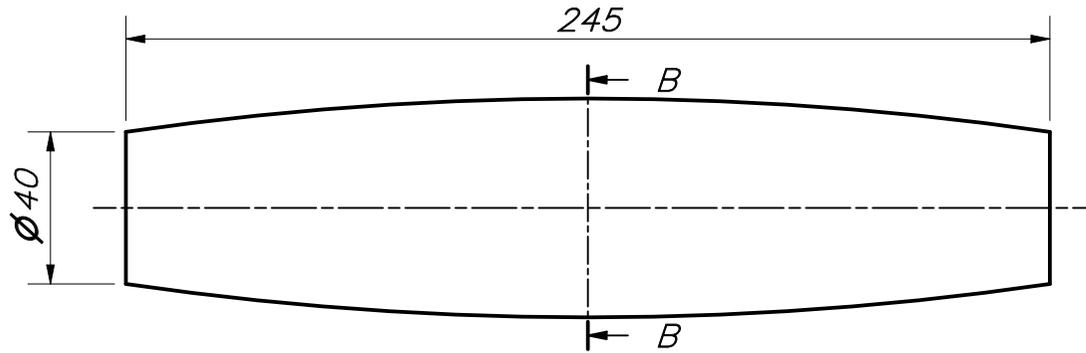
PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
2	2	ESPACIDOR CLAMP		ALUMINIO A6061	PF-E-A3
1	1	BLOQUE DE SUJECCIÓN CLAMP		ALUMINIO A6061	PF-BSC-A3

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA

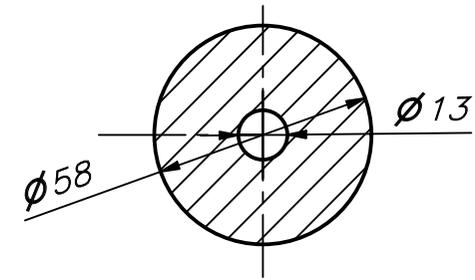
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TESIS	ESCALA
	COMPLEMENTO CLAMP	1:5
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.10.10

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------

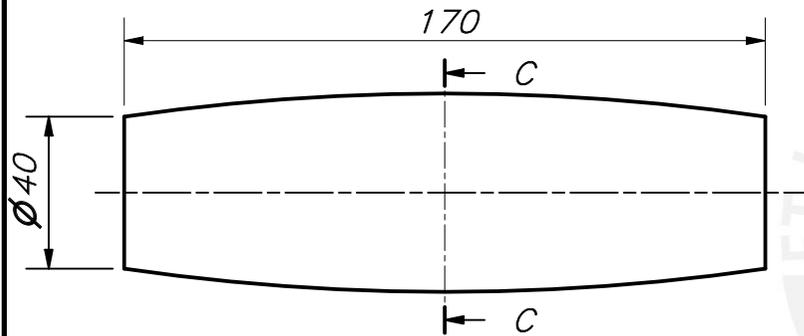
LÁMINA:
PE-CC-A4



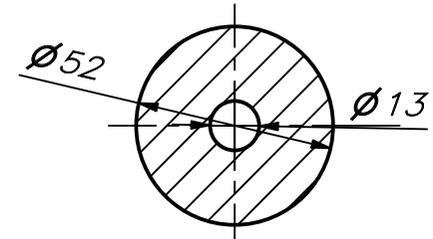
SISTEMA ANTIVIBRATORIO 18"



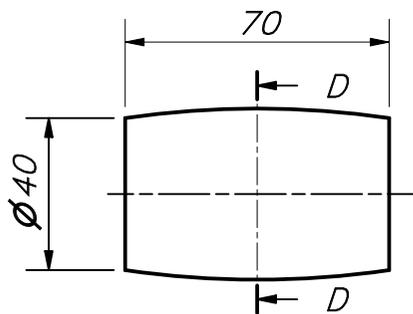
CORTE B-B



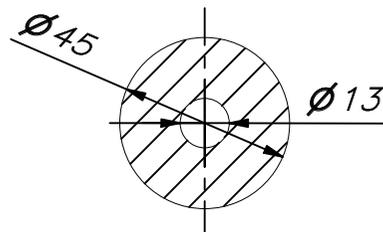
SISTEMA ANTIVIBRATORIO 24"



CORTE C-C



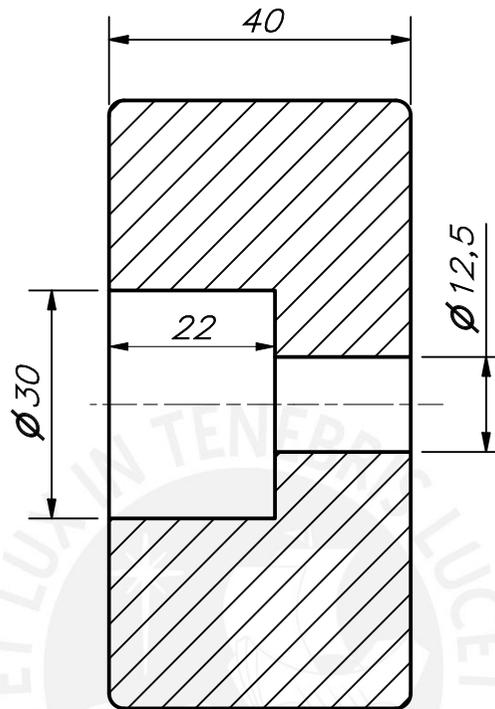
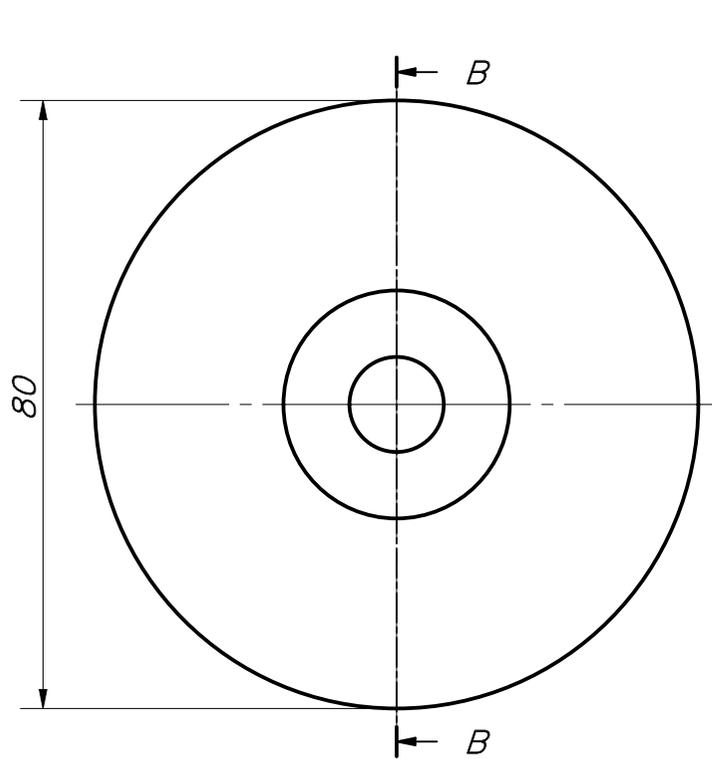
SISTEMA ANTIVIBRATORIO 32"



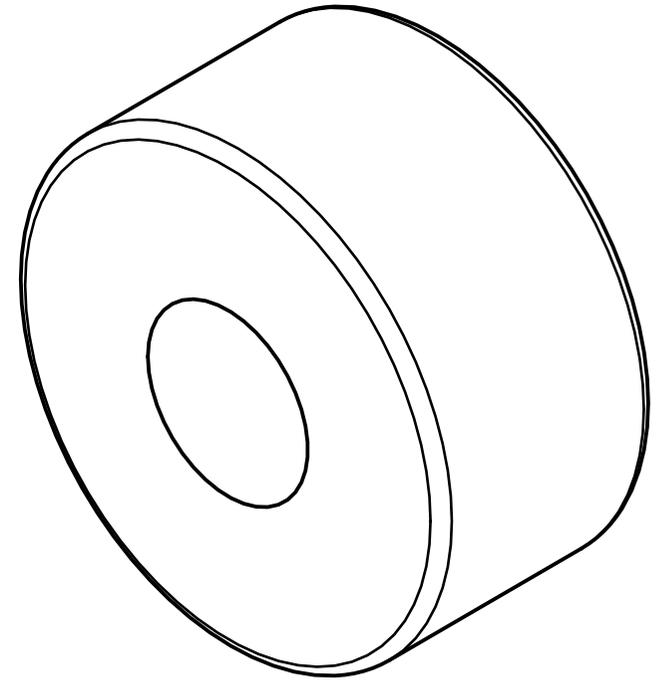
CORTE D-D

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 3302	MATERIAL CAUCHO NATURAL R608
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TESIS	ESCALA
	COBERTOR DE CAUCHO	1:2
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LÁMINA: PF-CC-A4

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

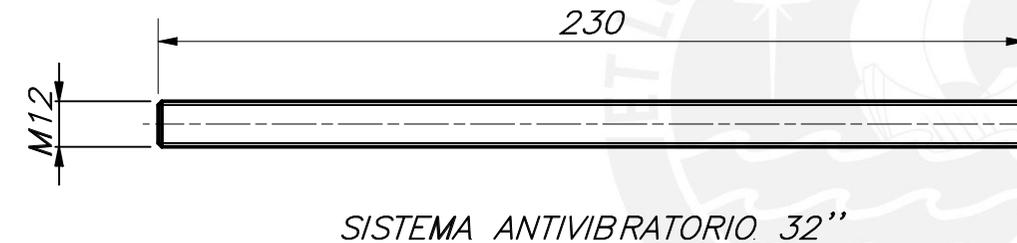
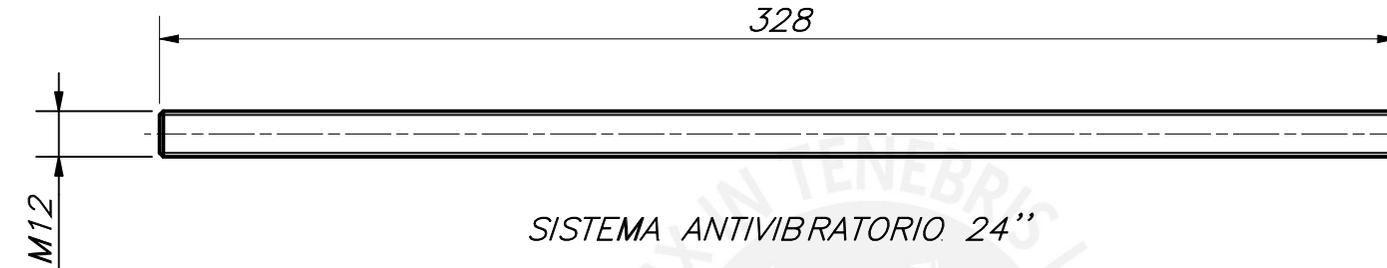
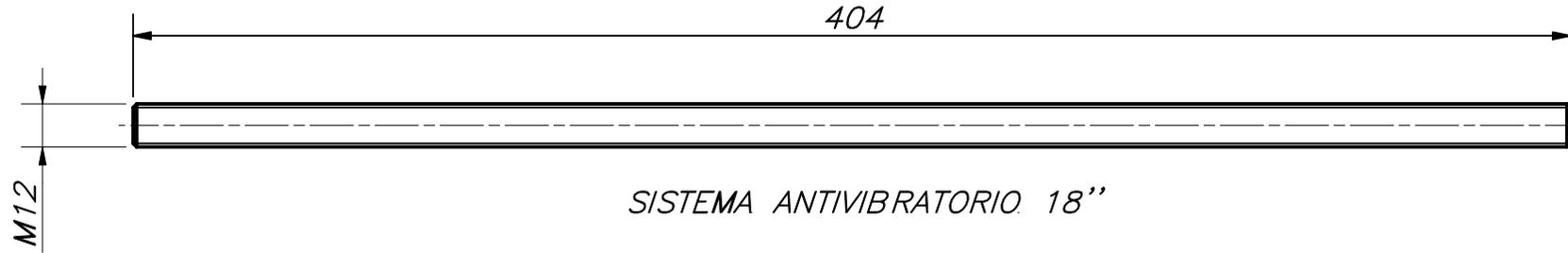


CORTE B-B



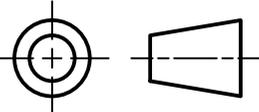
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 3302	MATERIAL CAUCHO NATURAL R608
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TESIS	ESCALA
	TAPA	1:1
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LÁMINA: PF-T-A4

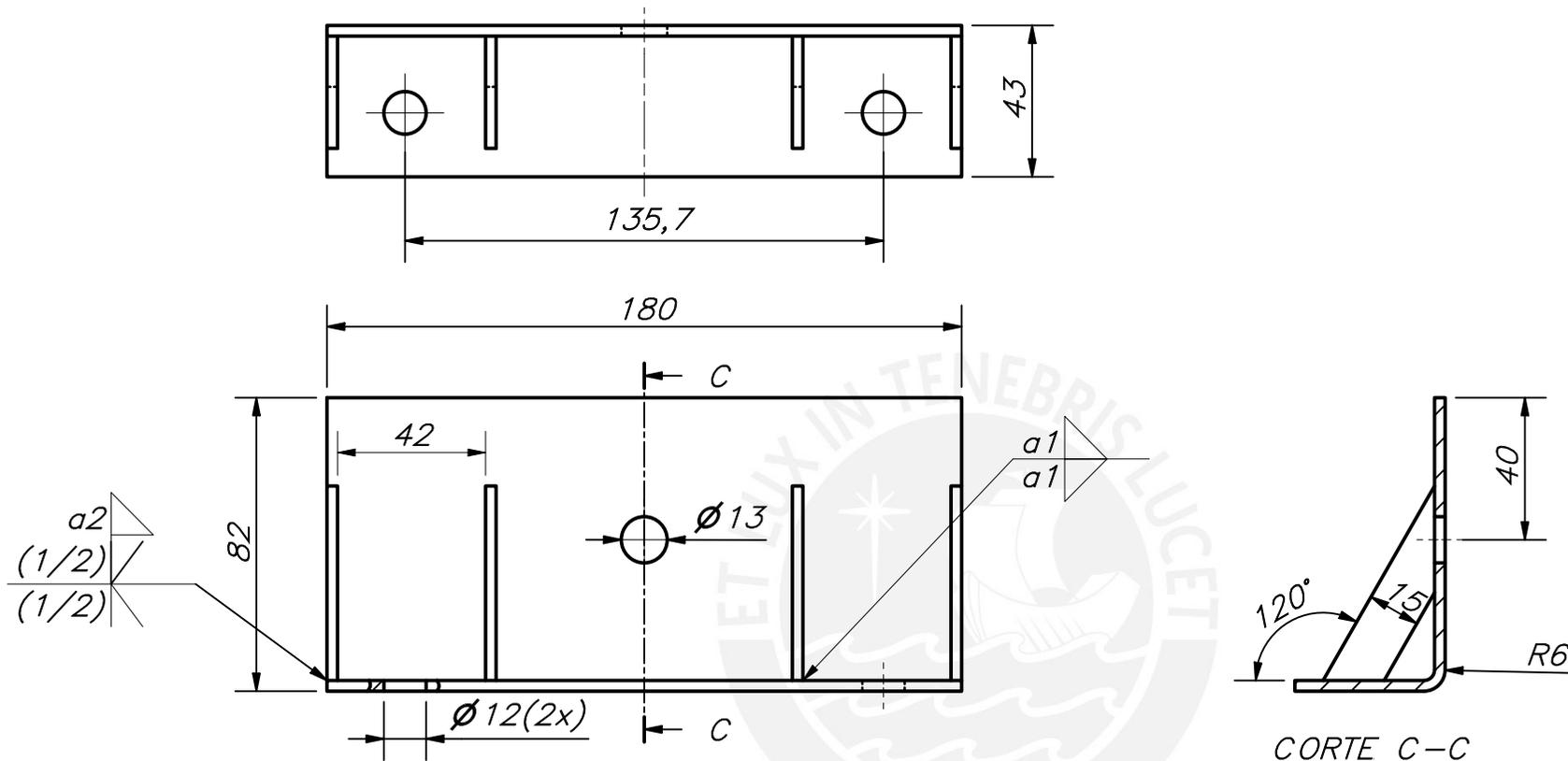
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
-----------------	----------------	----------------



CHAFLANES NO INDICADOS 1x45°

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1						
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768 MEDIO	MATERIAL St 42
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TESIS TORNILLO SOPORTE M12	ESCALA 1:2
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LÁMINA: PF-TSM-A4

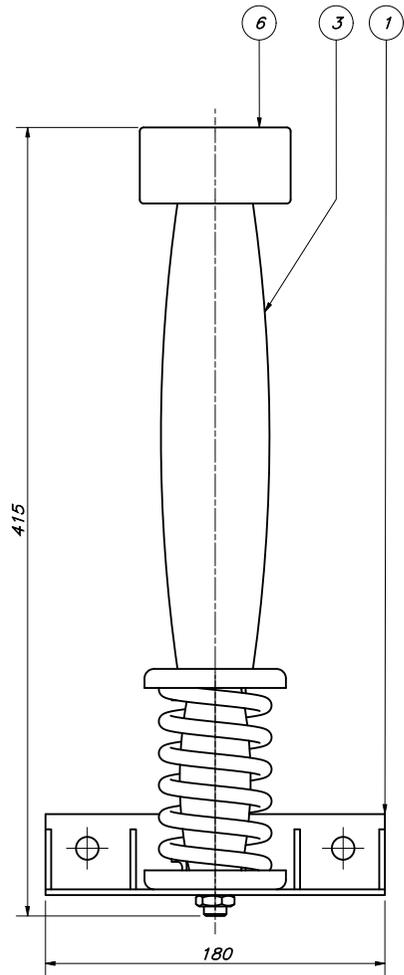


ESPESOR 3MM

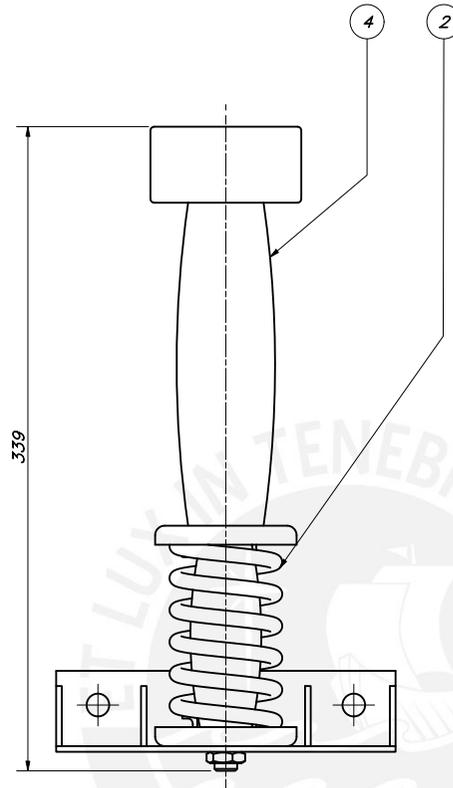
CORTE C-C

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL St 34
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TESIS	ESCALA
	BRACKET ANTIVIBRACIÓN	1:2
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LÁMINA: PF-BA-A4

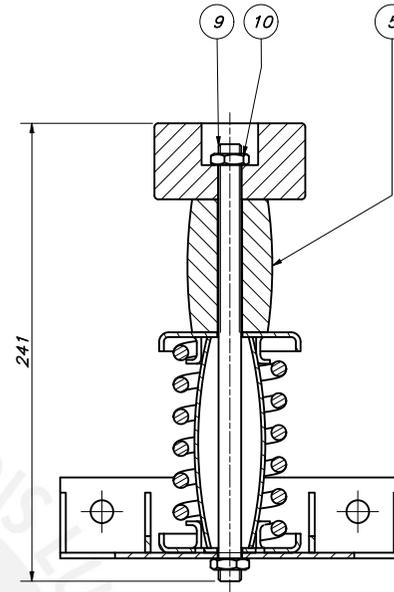
TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1							
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2



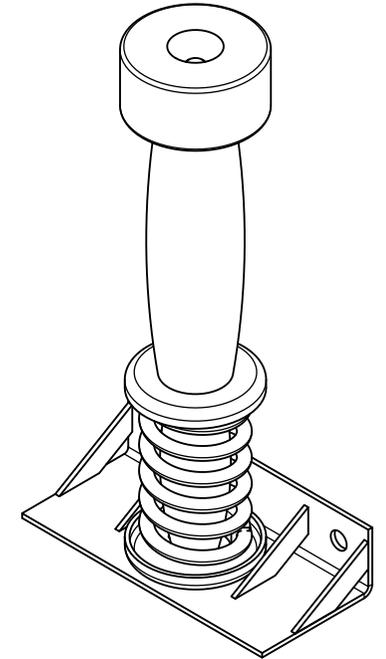
SISTEMA ANTIVIBRACIÓN 18"



SISTEMA ANTIVIBRACIÓN 24"



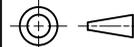
SISTEMA ANTIVIBRACIÓN 32"



PARTS LIST							
POS.	CANT. 18"	CANT. 24"	CANT. 32"	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
10	2	2	2	TUERCA M12	ISO 4035	B	
9	0	0	1	TORNILLO DE SOPORTE M12 32"		SL 42	PF-TSM-AA
8	0	1	0	TORNILLO DE SOPORTE M12 24"		SL 42	PF-TSM-AA
7	1	0	0	TORNILLO DE SOPORTE M12 18"		SL 42	PF-TSM-AA
6	1	1	1	TAPA		CAUCHO R608	
5	0	0	1	COBERTOR DE CAUCHO 32"		CAUCHO R608	PF-CC-AA
4	0	1	0	COBERTOR DE CAUCHO 24"		CAUCHO R608	PF-CC-AA
3	1	0	0	COBERTOR DE CAUCHO 18"		CAUCHO R608	PF-CC-AA
2	1	1	1	ACM DOBLE CAMPANA 150			MECANOCAUCHO
1	1	1	1	BRACKET ANTIVIBRACIÓN		SL 34	PF-BA-AA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN



TESIS

SISTEMA ANTIVIBRACIÓN

ESCALA

1:2

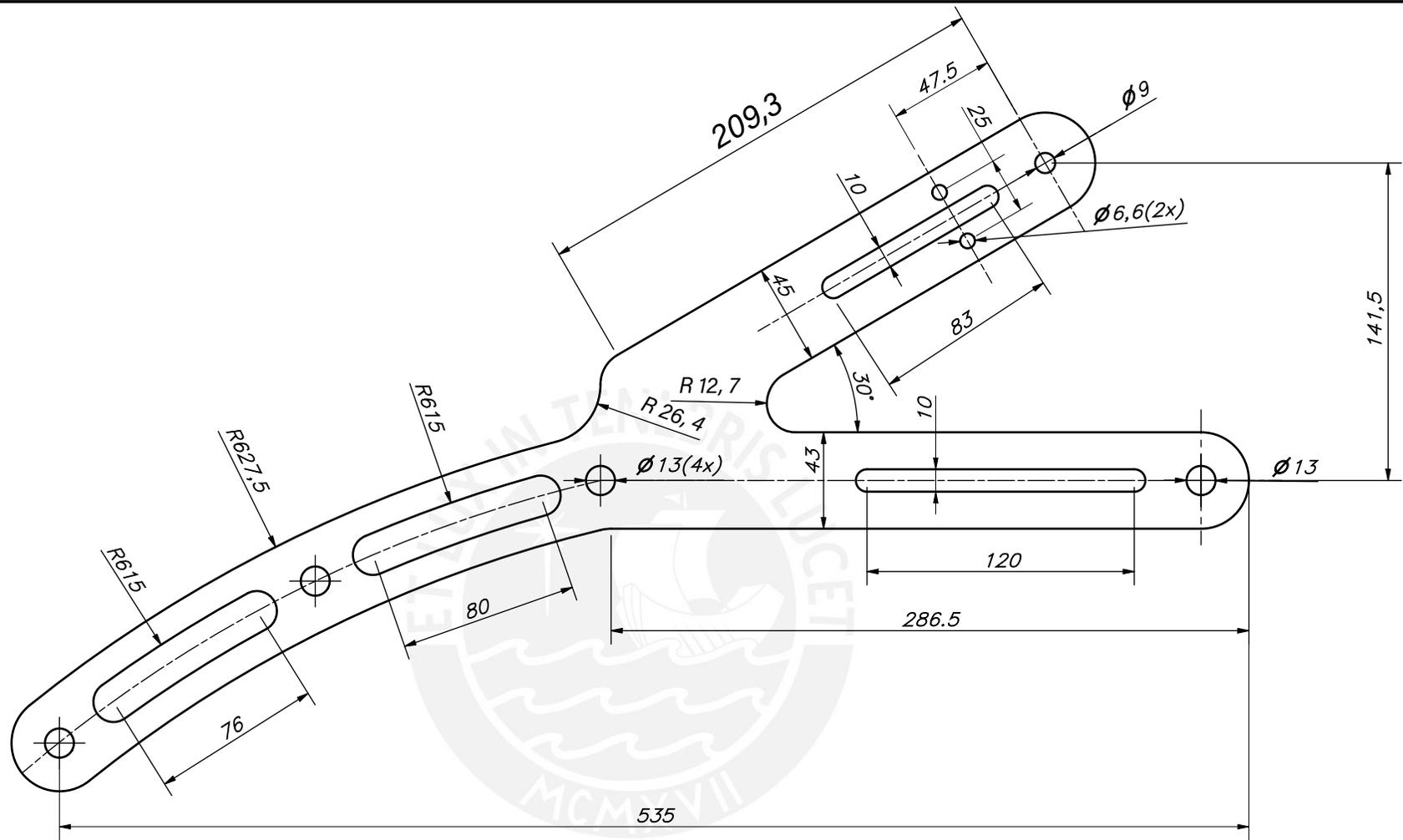
20155909

DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN

FECHA:
2020.11.04

LÁMINA:
PE-SA-A2

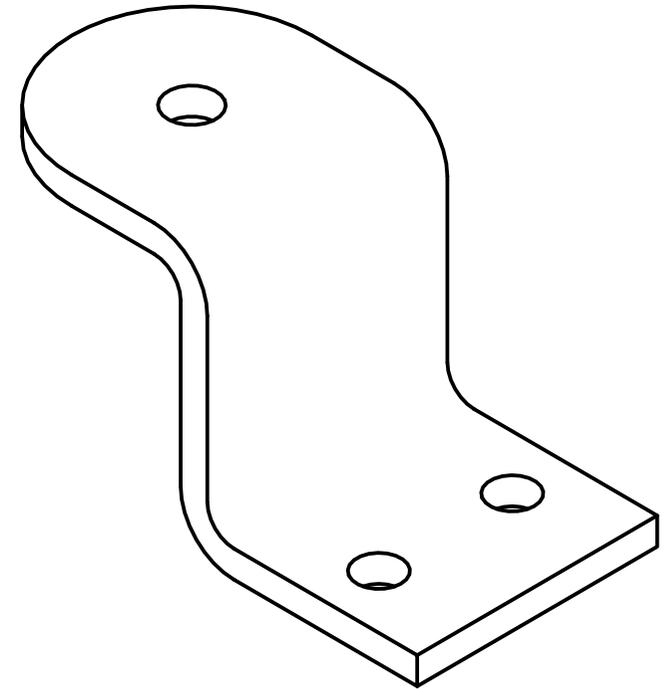
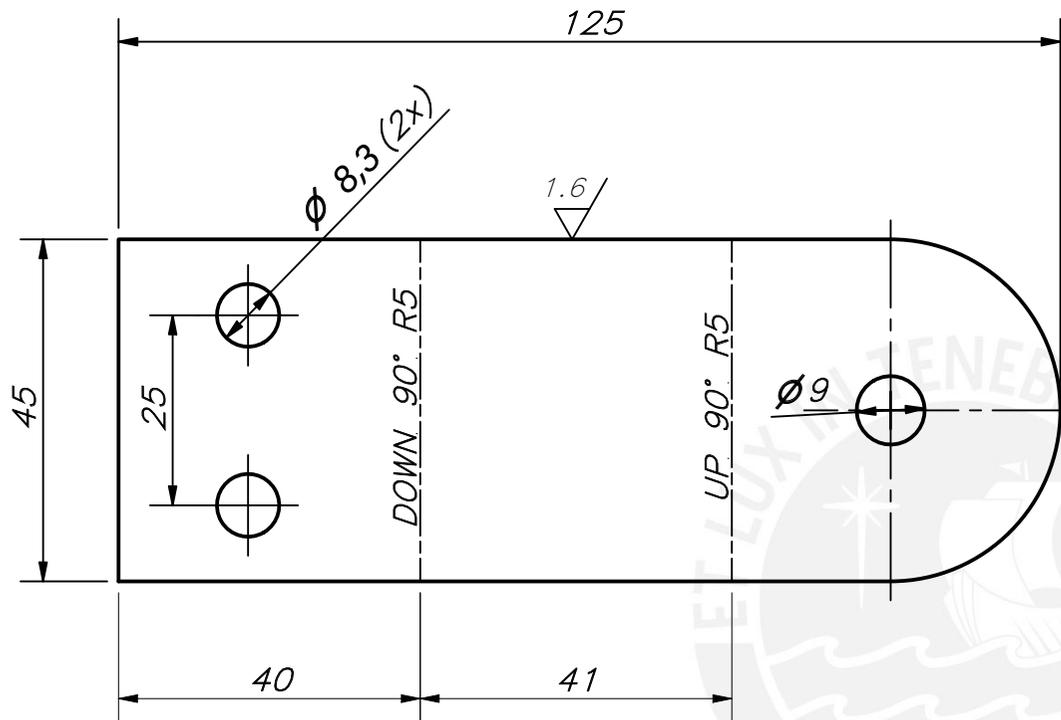
COTA NOMINAL COTA MÁXIMA COTA MÍNIMA



REDONDEOS NO. INDICADOS R15
 ESPESOR 5MM

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL DIN E 7168 - F.GRIS SEGÚN DIN 2768 - MEDIO	MATERIAL A36
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TESIS PALANCA	ESCALA 1:2
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LÁMINA: PF-P-A3

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN E 7168					TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1								
TIPO DE FUNDICIÓN	Más de 10 hasta 30	Más de 30 hasta 80	Más de 80 hasta 180	Más de 180 hasta 315	GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000	
FUNDICIÓN GRIS	+2 -1	+3 -1,5	+4 -2	+5 -2,5	+7 -3,5	MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

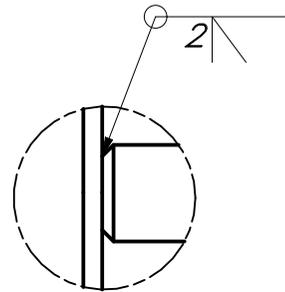
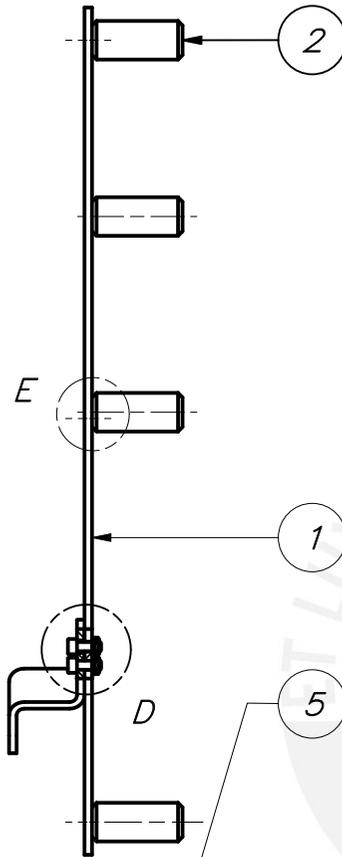
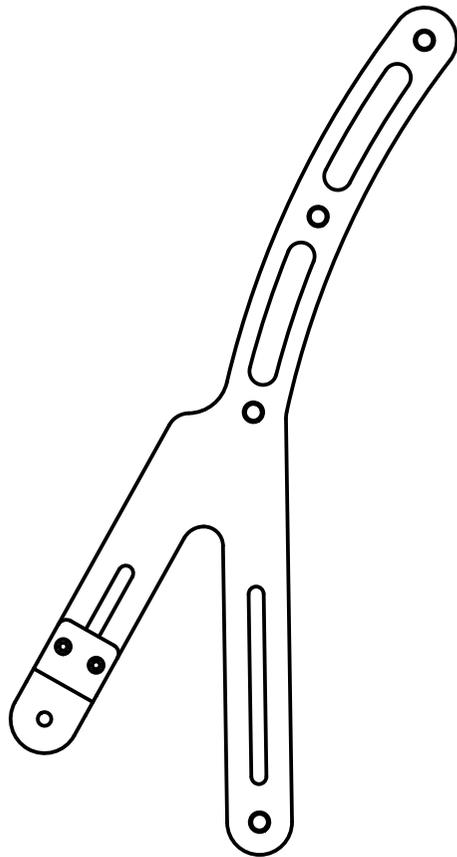


ESPESOR 5mm

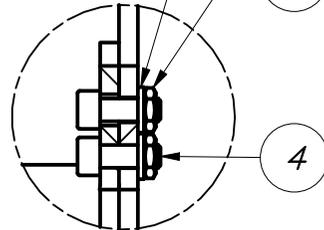
ACABADO SUPERFICIAL 1.6 /	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768 MEDIO	MATERIAL ASTM A36
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TESIS	ESCALA
	PLIEGUE DE PALANCA	1:1
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LÁMINA: PF-PP-A4

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5



DETALLE E
ESCALA 1:2



DETALLE D
ESCALA 1:2

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

PARTS LIST

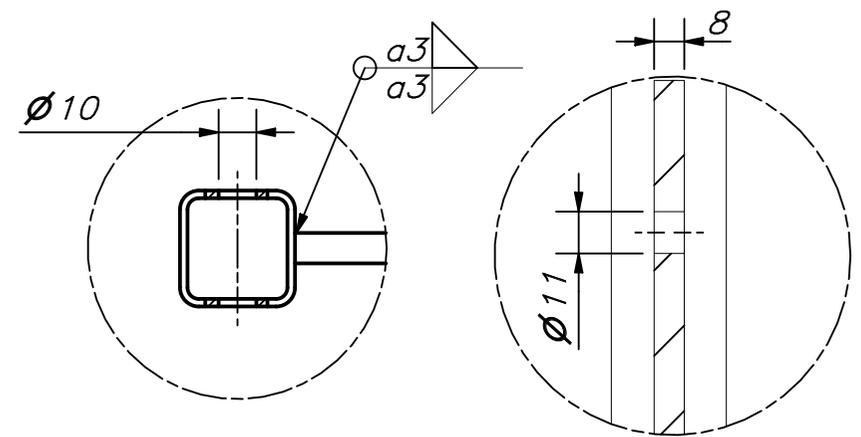
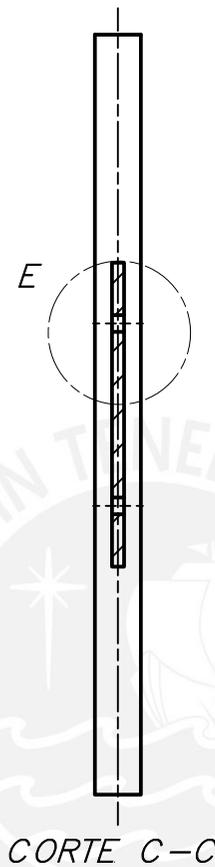
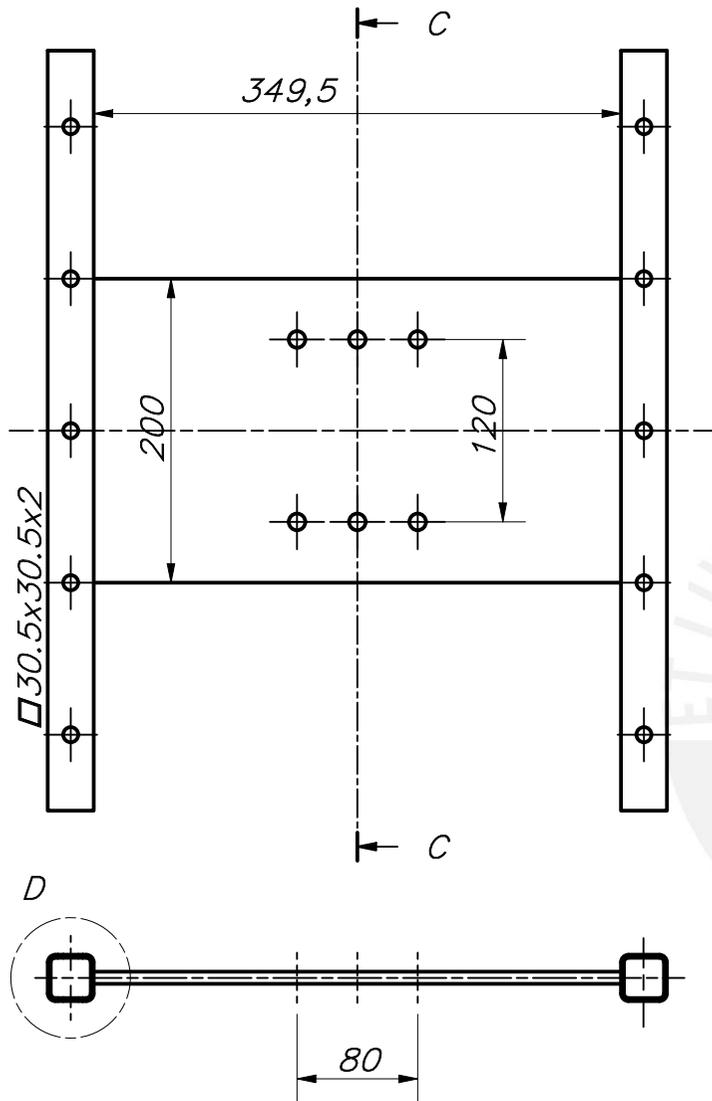
6	2	TUERCA M6	ISO 4035	8	
5	2	ARANDERA M6	ISO 7089	St	
4	2	TORNILLO M6 x 16	ISO 4762	8.8	
3	1	PLIEGUE DE PALANCA		ASTM A36	PF-PP-A4
2	4	ESPACIADOR DE PALANCA		ASTM A36	PF-E-A3
1	1	PALANCA		ASTM A36	PF-P-A3

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768	MATERIAL A36
---------------------	--	-----------------

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TESIS	ESCALA
	<p>PALANCA COMPLEMENTADA</p>	<p>1:5</p>
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04

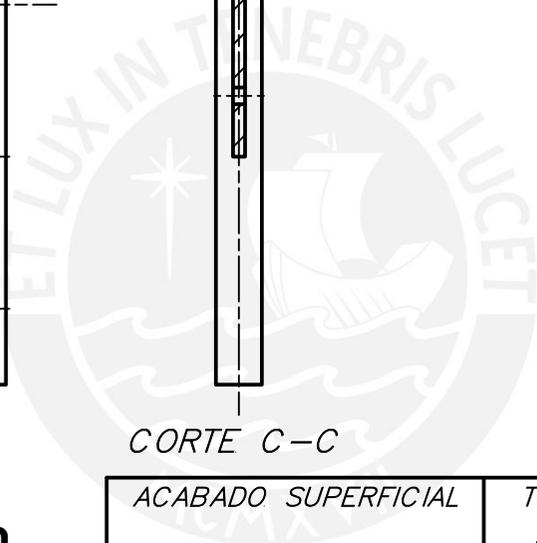
LÁMINA:
PE-PC-A4



DETALLE D
ESCALA 1:2

DETALLE E
ESCALA 1:2

Redondeos no. indicados R5



ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768 MECANIZADO MEDIO	MATERIAL ASTM A36
---------------------	--	----------------------

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA

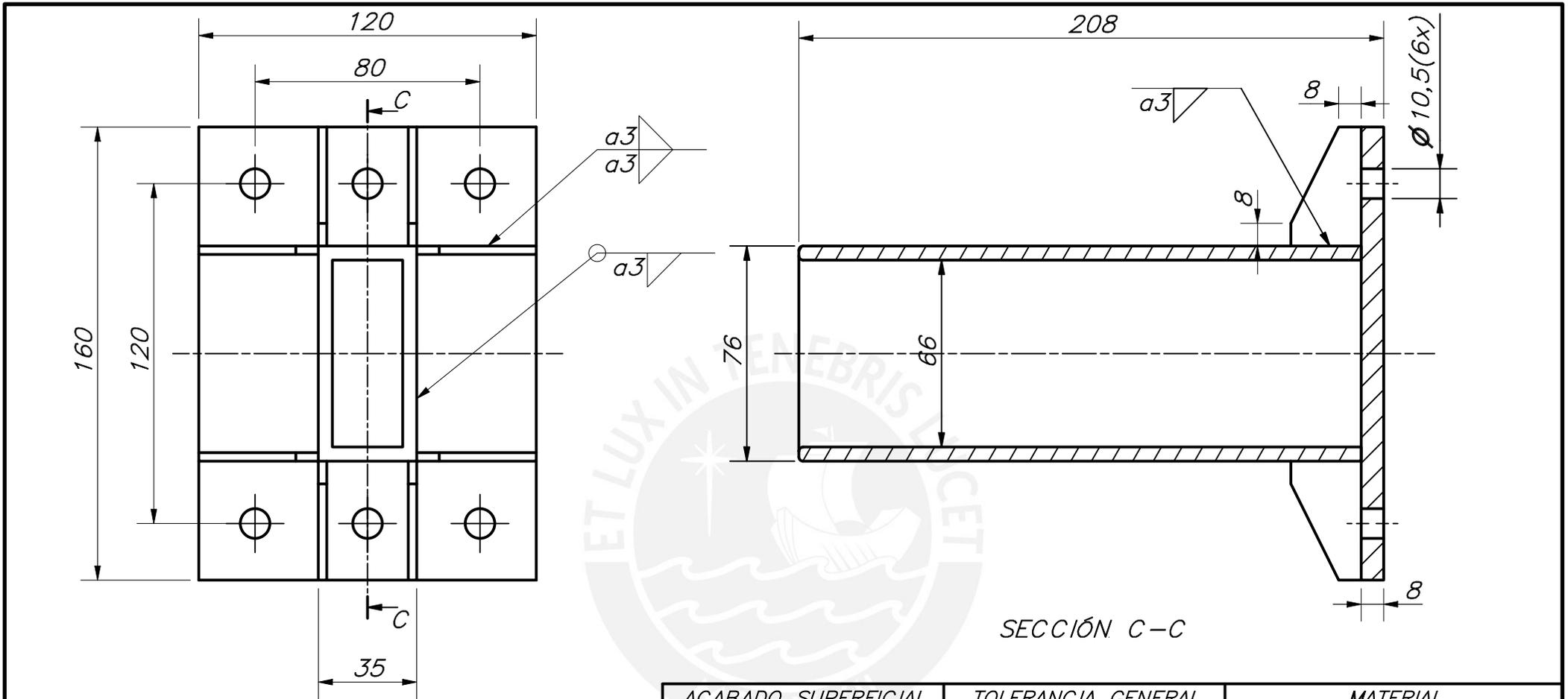
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TESIS	ESCALA
	PLACA DE ESTRUCTURA	1:2

20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
----------	---------------------------	----------------------

		LÁMINA: PF-PE-A4
--	--	---------------------

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2



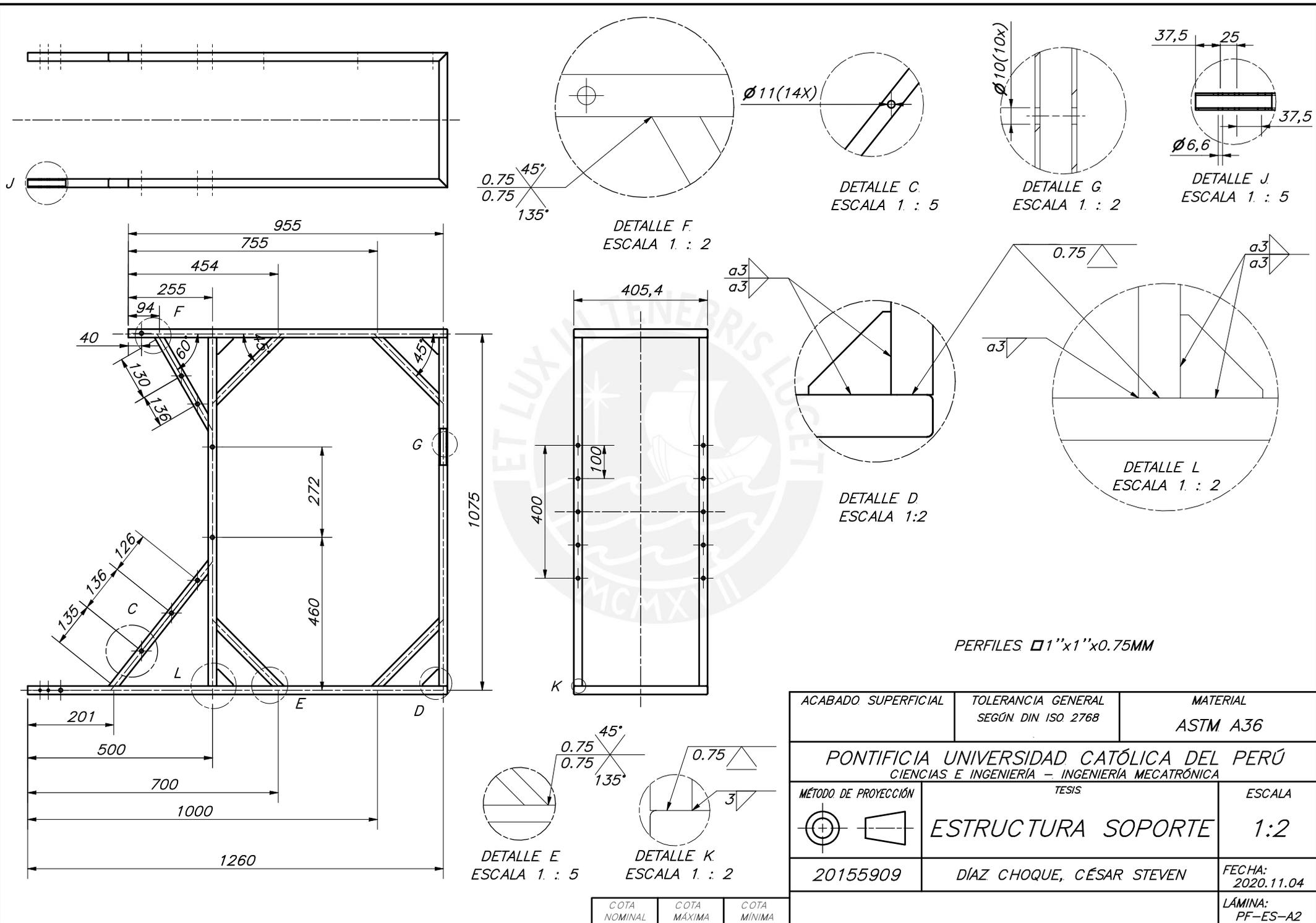
SECCIÓN C-C

ESPESOR DE CARTELAS 3MM

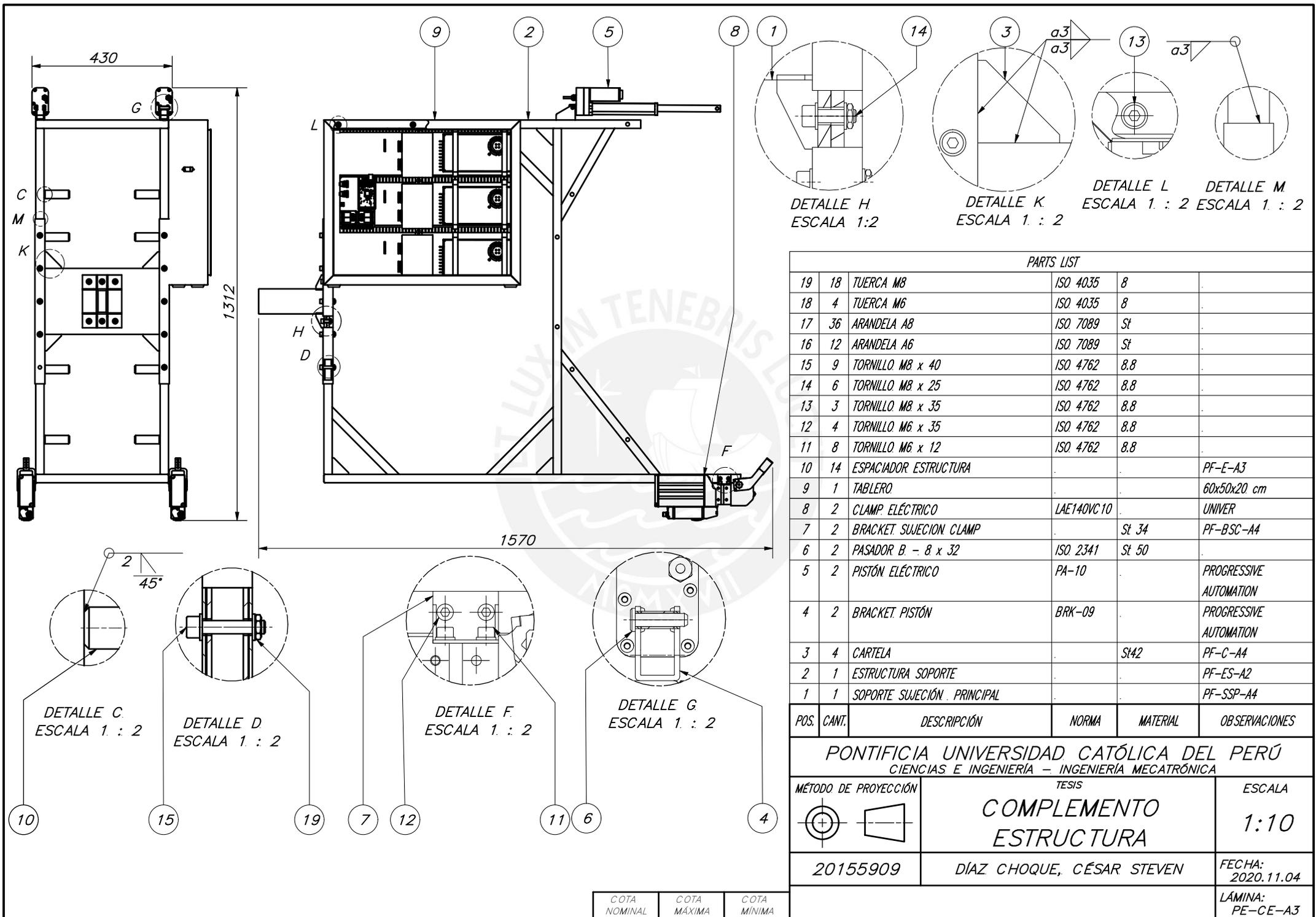
TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN DIN ISO 2768 MEDIO	MATERIAL ASTM A36
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TESIS	ESCALA
	SOPORTE DE SUJECIÓN PRINCIPAL	1:2
20155909	DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LÁMINA: PF-SSP-A4



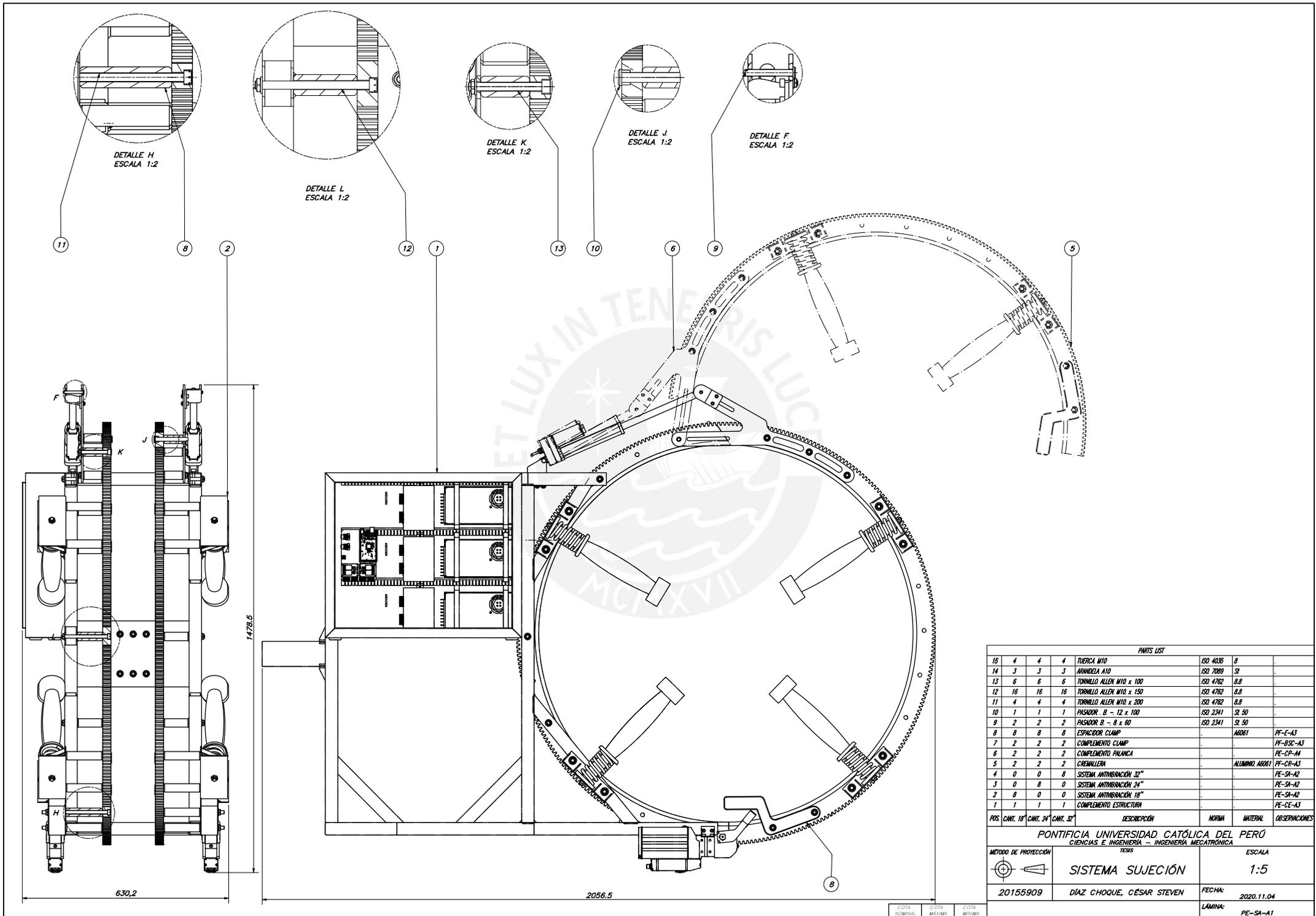
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
-----------------	----------------	----------------



PARTS LIST					
19	18	TUERCA M8	ISO 4035	8	
18	4	TUERCA M6	ISO 4035	8	
17	36	ARANDELA A8	ISO 7089	St	
16	12	ARANDELA A6	ISO 7089	St	
15	9	TORNILLO M8 x 40	ISO 4762	8.8	
14	6	TORNILLO M8 x 25	ISO 4762	8.8	
13	3	TORNILLO M8 x 35	ISO 4762	8.8	
12	4	TORNILLO M6 x 35	ISO 4762	8.8	
11	8	TORNILLO M6 x 12	ISO 4762	8.8	
10	14	ESPACIADOR ESTRUCTURA			PF-E-A3
9	1	TABLERO			60x50x20 cm
8	2	CLAMP ELÉCTRICO	LAE140VC10		UNIVER
7	2	BRACKET SUJECION CLAMP		St 34	PF-BSC-A4
6	2	PASADOR B - 8 x 32	ISO 2341	St 50	
5	2	PISTÓN ELÉCTRICO	PA-10		PROGRESSIVE AUTOMATION
4	2	BRACKET PISTÓN	BRK-09		PROGRESSIVE AUTOMATION
3	4	CARTELA		St42	PF-C-A4
2	1	ESTRUCTURA SOPORTE			PF-ES-A2
1	1	SOPORTE SUJECION PRINCIPAL			PF-SSP-A4

POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA					
MÉTODO DE PROYECCIÓN		TESIS		ESCALA	
		COMPLEMENTO ESTRUCTURA		1:10	
20155909		DÍAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN		FECHA: 2020.11.04	
				LÁMINA: PE-CE-A3	

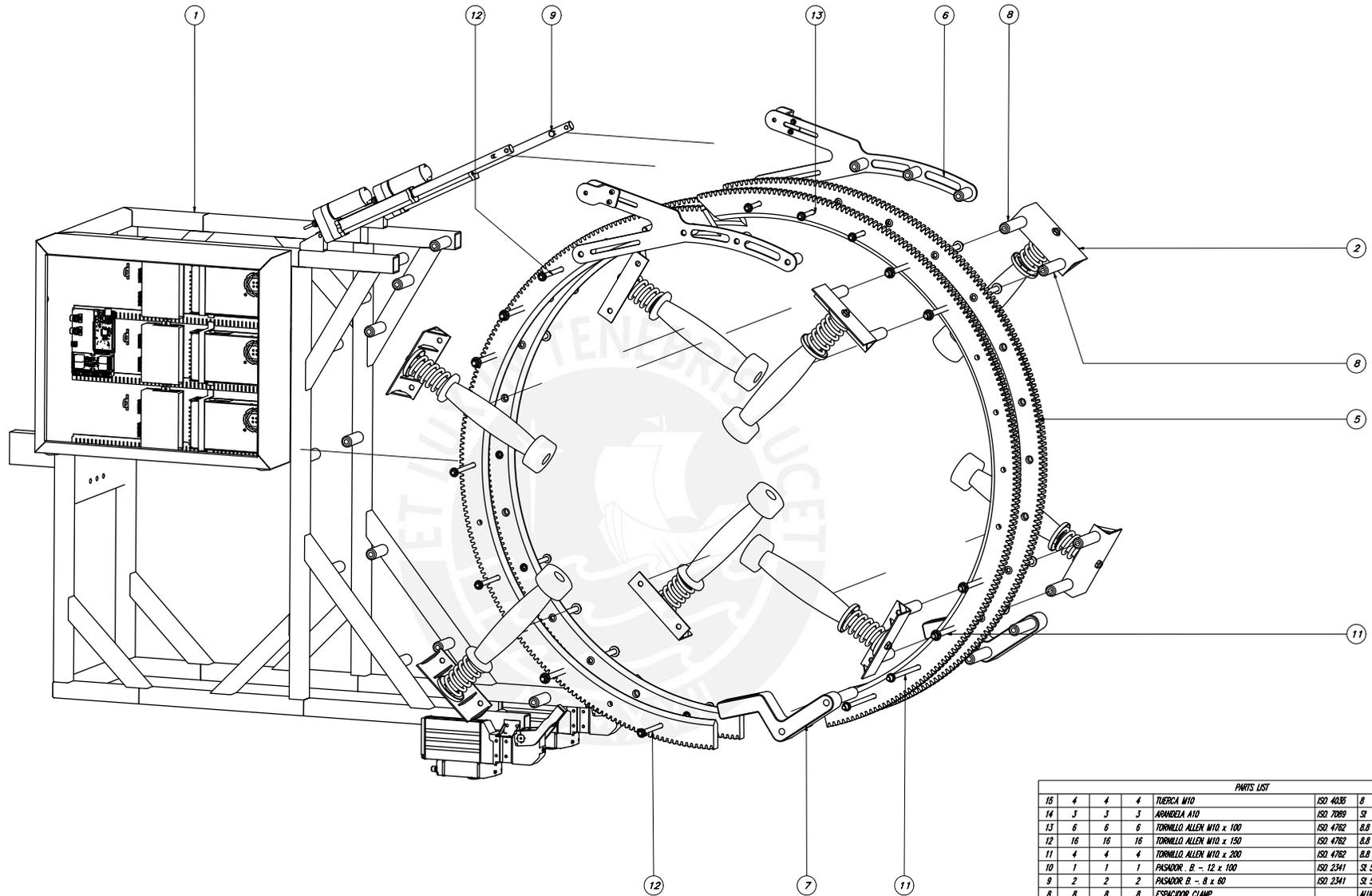
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA



PARTS LIST							
15	4	4	4	TUERCA M10	ISO 4035	8	
14	3	3	3	ARANDELA A10	ISO 7089	SI	
13	6	6	6	TORNILLO ALLEN M10 x 100	ISO 4762	8.8	
12	16	16	16	TORNILLO ALLEN M10 x 150	ISO 4762	8.8	
11	4	4	4	TORNILLO ALLEN M10 x 200	ISO 4762	8.8	
10	1	1	1	PASADOR B - 8 x 100	ISO 2341	SI 50	
9	2	2	2	PASADOR B - 8 x 60	ISO 2341	SI 50	
8	8	8	8	ESPACIADOR CLAMP		AR061	PF-F-A3
7	2	2	2	COMPLEMENTO CLAMP			PF-BSC-A3
6	2	2	2	COMPLEMENTO PALANCA			PF-CP-A4
5	2	2	2	CREMALLERA		ALUMINIO A6061	PF-CP-A3
4	0	0	0	SISTEMA ANTIHIBRACION 32"			PF-SA-A2
3	0	0	0	SISTEMA ANTIHIBRACION 24"			PF-SA-A2
2	0	0	0	SISTEMA ANTIHIBRACION 18"			PF-SA-A2
1	1	1	1	COMPLEMENTO ESTRUCTURAL			PF-CE-A3
POS.	CANT. 18"	CANT. 24"	CANT. 32"	DESCRIPCION	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU CIENCIAS E INGENIERIA - INGENIERIA MECATRONICA 1235			ESCALA
METODO DE PROYECCION	SISTEMA SUJECION		1:5
20155909	DIAZ CHOQUE, CESAR STEVEN		FECHA: 2020.11.04
			LAMINA: PE-SA-A1

COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA
--------------	-------------	-------------



PARTS LIST							
15	4	4	4	TUERCA M10	ISO 4035	8	
14	3	3	3	ARANDELA A10	ISO 7089	S8	
13	6	6	6	TORNILLO ALLEN M10 x 100	ISO 4762	8,8	
12	16	16	16	TORNILLO ALLEN M10 x 150	ISO 4762	8,8	
11	4	4	4	TORNILLO ALLEN M10 x 200	ISO 4762	8,8	
10	1	1	1	PASADOR B - 12 x 100	ISO 2341	S8 50	
9	2	2	2	PASADOR B - 8 x 60	ISO 2341	S8 50	
8	8	8	8	ESPACADOR CLAMP		ALUMINIO 6061	
7	2	2	2	COMPLEMENTO CLAMP		PE-S8-A3	
6	2	2	2	COMPLEMENTO PALANCA		PE-CP-A4	
5	2	2	2	CREMALLERA		ALUMINIO 6061	
4	0	0	8	SISTEMA ANTIHIBRACION 32"		PE-SH-A2	
3	0	0	8	SISTEMA ANTIHIBRACION 24"		PE-SH-A2	
2	8	0	0	SISTEMA ANTIHIBRACION 18"		PE-SH-A2	
1	1	1	1	COMPLEMENTO ESTRUCTURAL		PE-CE-A3	
POS.	CANT. 18"	CANT. 24"	CANT. 32"	DESCRIPCION	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

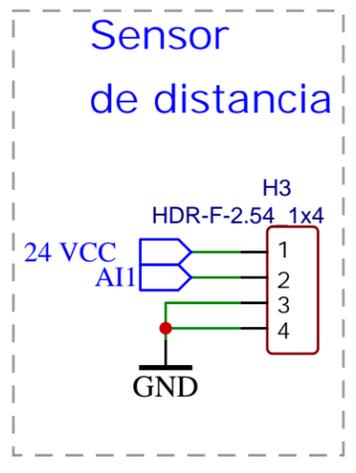
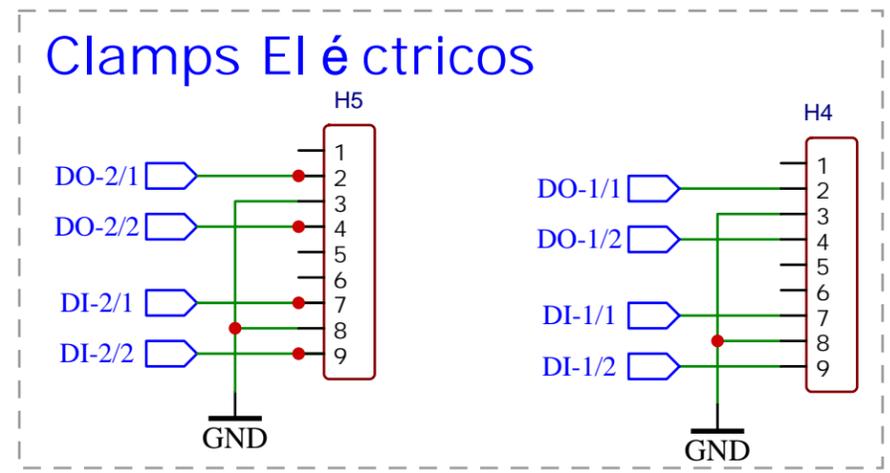
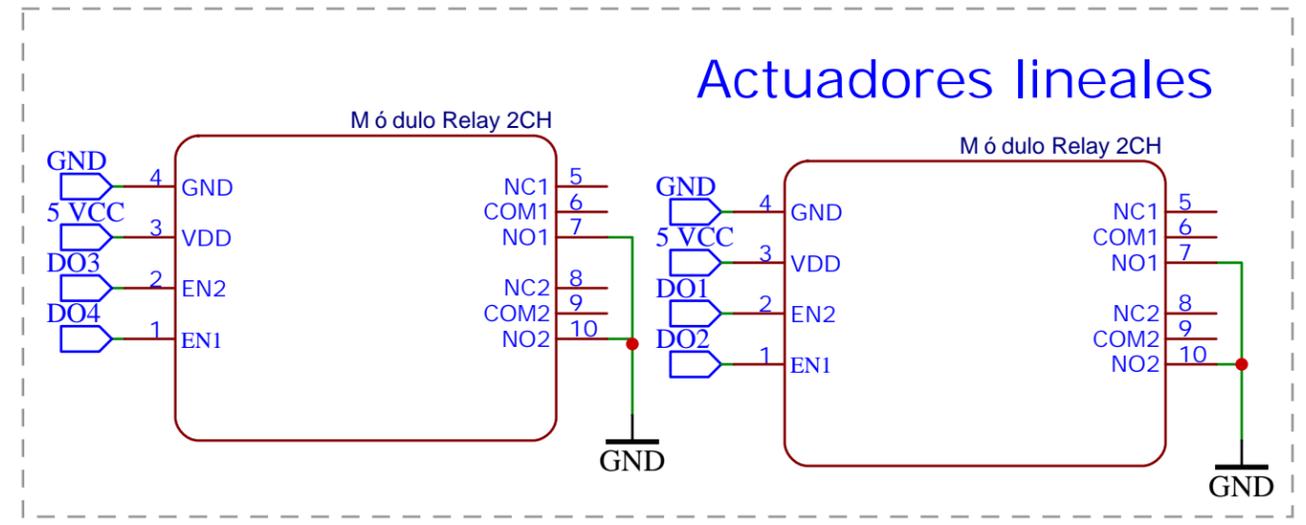
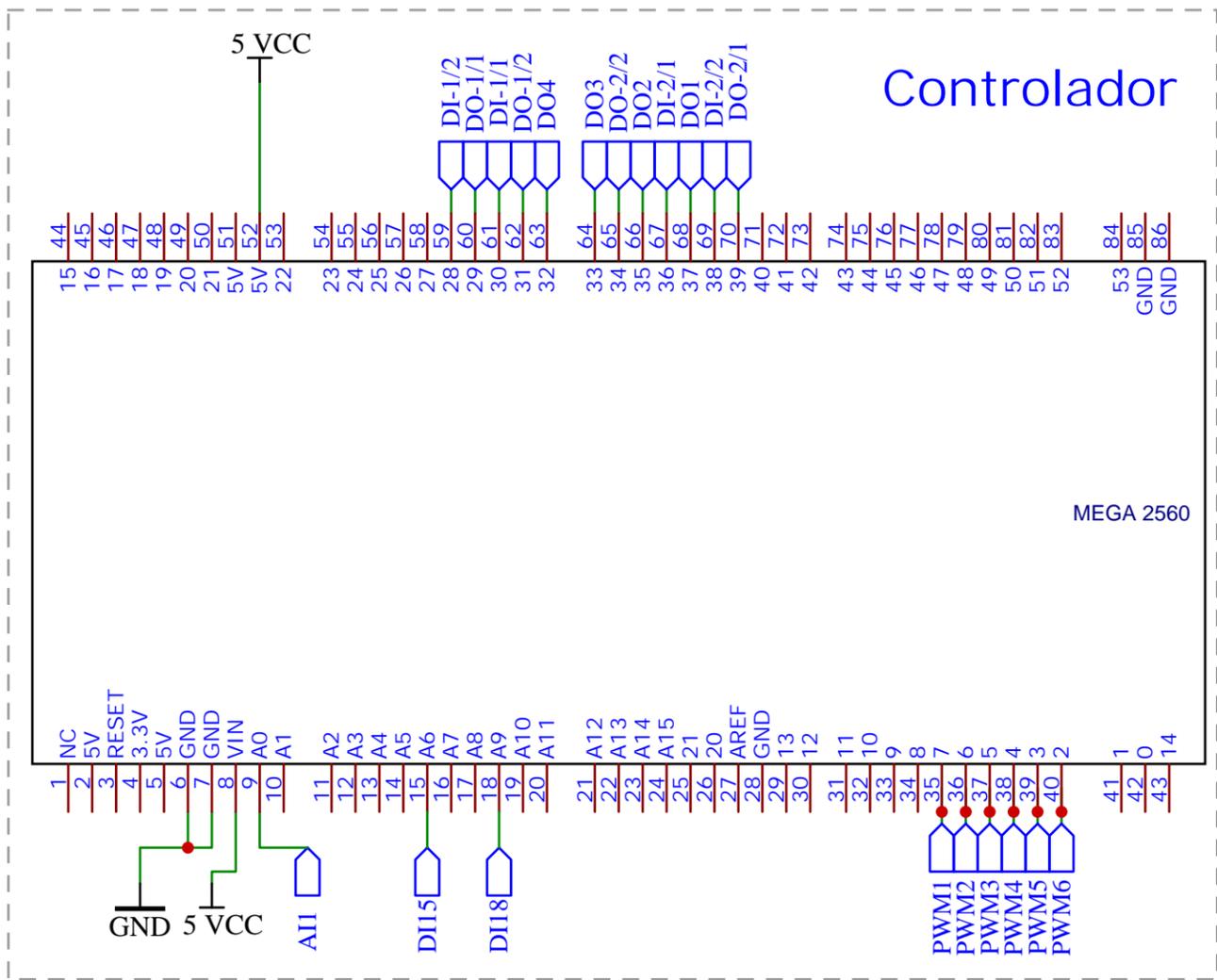
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
 CIENCIAS E INGENIERIA - INGENIERIA MECATRONICA
 TESIS

METODO DE PROYECCION 	SISTEMA SUJECION EXPLOSIONADO	ESCALA 1:5
20155909	DIAZ CHOQUE, CÉSAR STEVEN	FECHA: 2020.11.04
		LAMINA: PE-SSE-A1

COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA

0.3. Anexo C



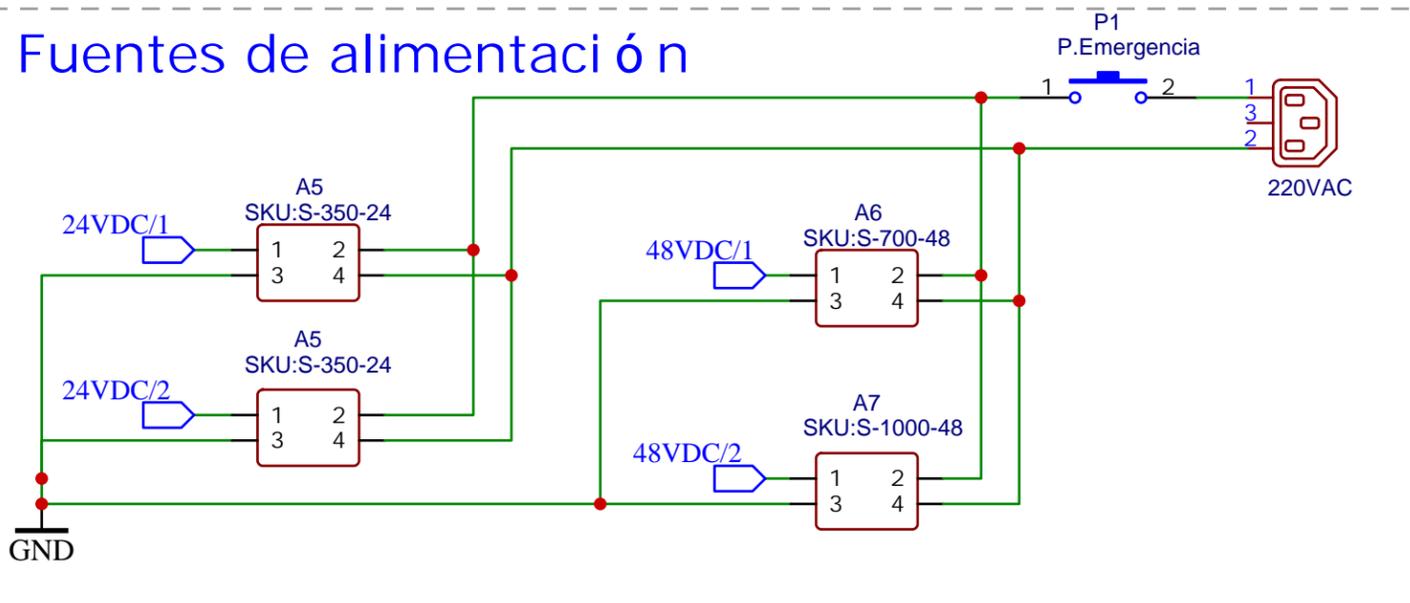


2	Actuador Eléctrico PA-10 stroke 8'	Progressive Automation
2	Modilo Relay 2CH SKU: 193	Naylamp Mechatronic
2	Clamps Eléctricos LAE140	UNIVER
1	Sensor de distancia XUJK803538	Schneider Electric
1	Arduino Mega 2560	Arduino
Cantidad	Componente	Fabricante

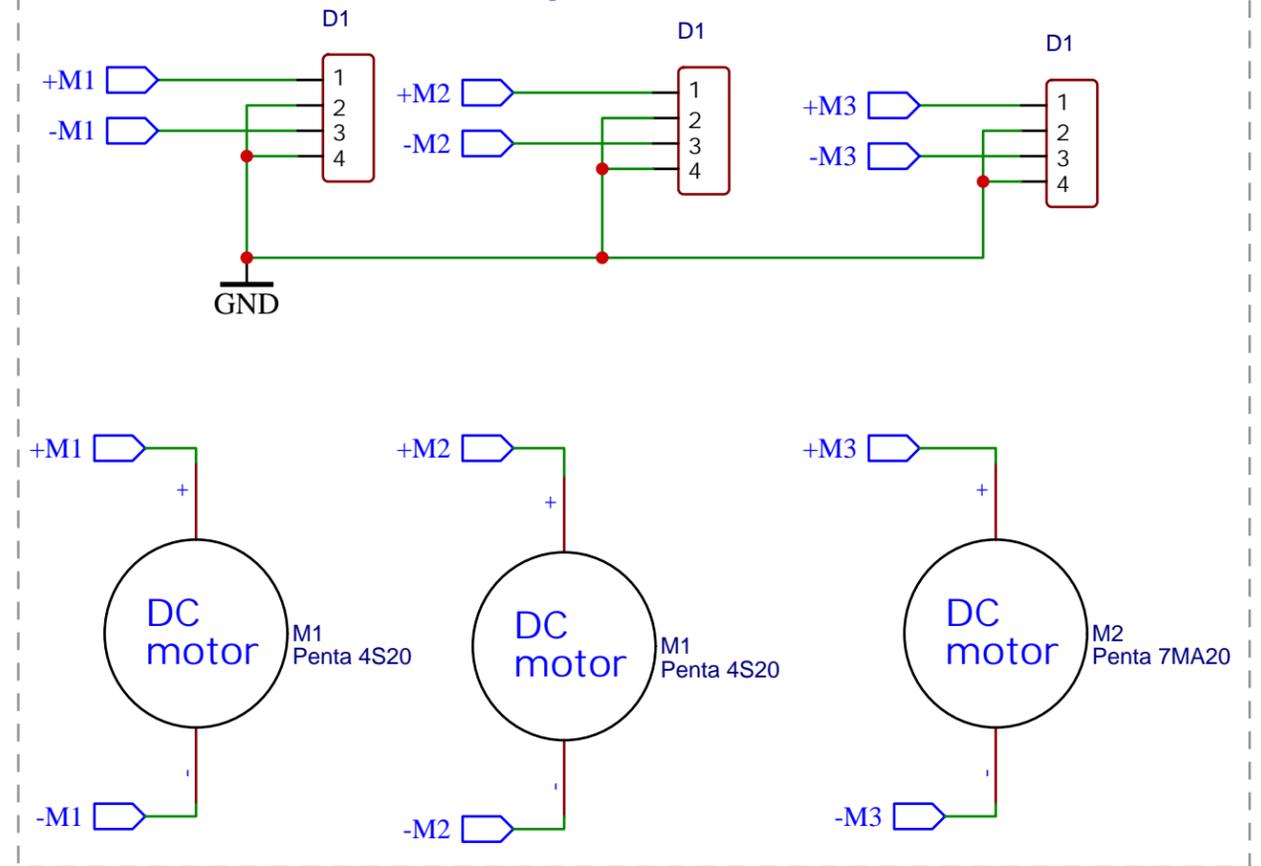
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA

TITLE: TRABAJO DE FIN DE CARRERA SISTEMA AUTOMATIZADO DE SOLDADURA ORBITAL PARA TUBERÍAS DE 360 A 920 MM		REV: 1:1
Company: PUCP		Sheet: EE1-A4
Date: 2020.10.22	Drawn By: CESAR STEVEN DIAZ CHOQUE	

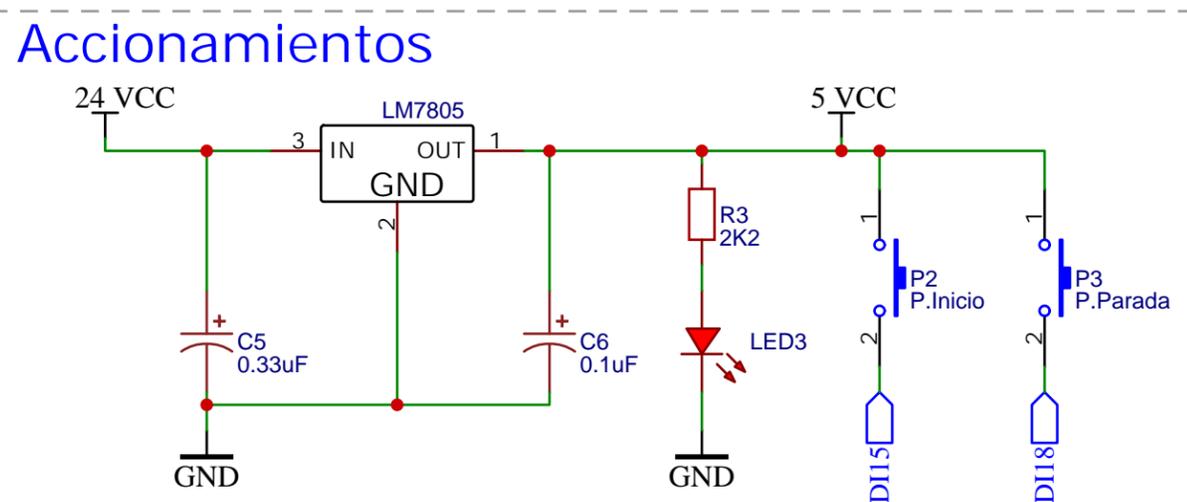
Fuentes de alimentación



Drivers y Motores



Accionamientos



3	ESCON 70/10	ESCON	A4-D1
2	Motor DC PENTA 4S 20	PENTA	A4-M1
1	Motor DC PENTA 7MA 20	PENTA	A4-M2
2	Fuente Switching SKU: S-350-24	Stepper Online	A4-A5
1	Fuente Switching SKU: S-700-48	Stepper Online	A4-A6
1	Fuente Switching SKU: S-1000-48	Stepper Online	A4-A7
1	Pulsador de emergencia XB4BS8445	Schneider electric	A4-P1
1	Pulsador de inicio XB4BS8445	Schneider electric	A4-P2
1	Pulsador de parada XB4BS8445	Schneider electric	A4-P3
Cantidad	Componente	Fabricante	Ubicación

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA

TITLE: TRABAJO DE FIN DE CARRERA
SISTEMA AUTOMATIZADO DE SOLDADURA ORBITAL
PARA TUBERÍAS DE 360 A 920 MM

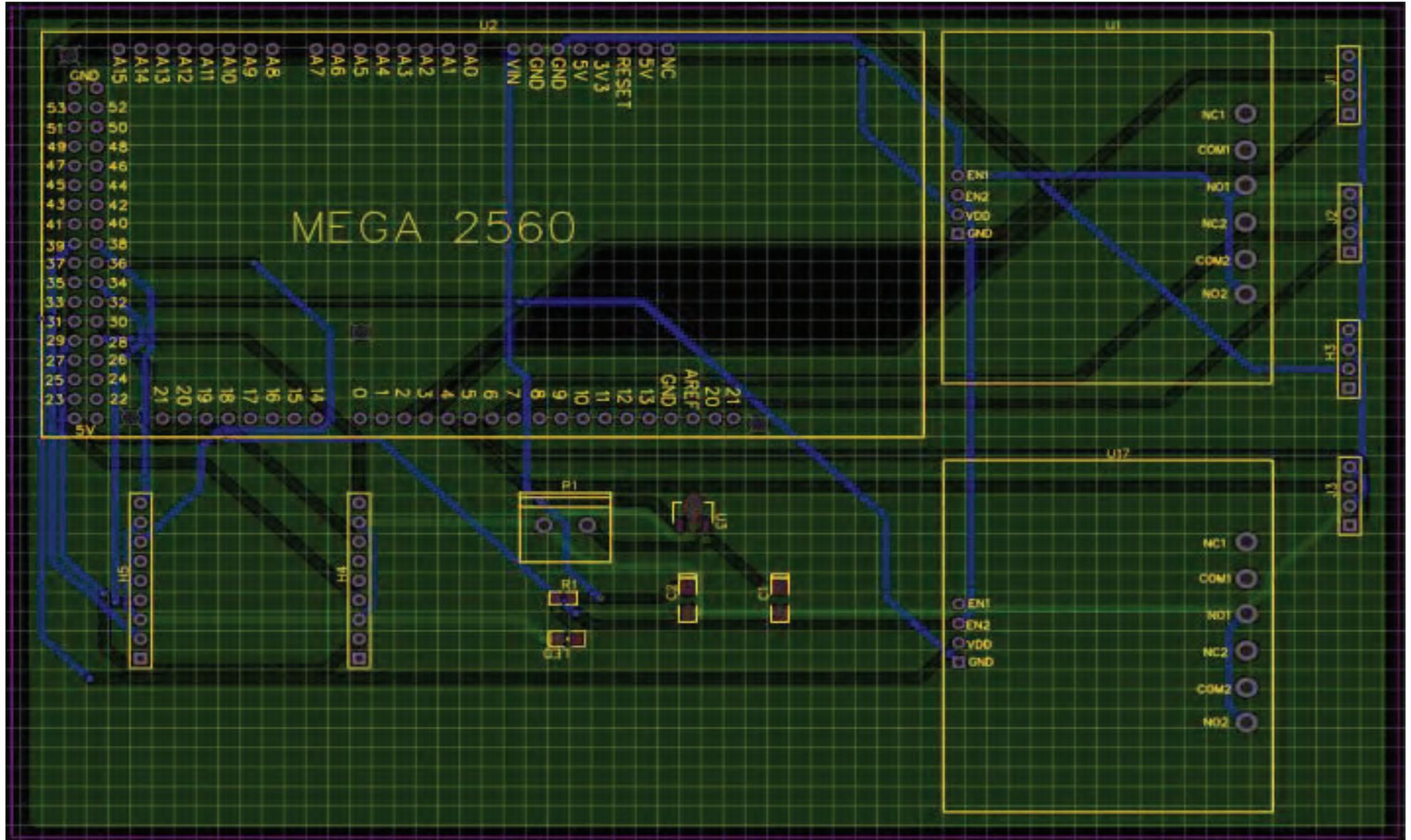
REV: 1:1



Company:

Sheet: EE1-A4

Date: 2022.10.22 Drawn By: CESAR STEVEN DIAZ CHOQUE



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA

TITLE: TRABAJO DE FIN DE CARRERA
 SISTEMA AUTOMATIZADO DE SOLDADURA ORBITAL
 PARA TUBERÍAS DE 360 A 920 MM

REV: 1:1



Company:

Sheet: EE1-A4

Date: 2020.10.22 Drawn By: CESAR STEVEN DIAZ CHOQUE