

Diseño y Construcción de un Sistema Programable de Transporte para la Aplicación de  
Soldadura Lineal

Juan Alejandro Acevedo Osma  
Karen Alexandra Porras Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Alberto David Pertuz Comas  
Doctor en Ingeniería Mecánica

Codirector

Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra  
Ingeniero Mecánico Especialista en Evaluación y Gerencia de Proyectos

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Bucaramanga

2022

### **Dedicatoria**

A mis papás, los cuales me han brindado los cimientos de la persona que soy hoy en día, a quienes les debo mis principios y valores. Gracias por brindarme siempre su amor, atención y definitivamente han sido mi mejor ejemplo.

A mi hermana, aunque es menor es la que me da lecciones de vida; estoy seguro de que te convertirás en una gran mujer. Siempre confía en tus grandes capacidades creativas e intelectuales. Te amo muchísimo.

A mis abuelos, tíos y primos los cuales me han permitido siempre estar en un ambiente familiar de mucha unión, respeto, cariño y amabilidad.

A todos mis amigos, los que he conocido desde que era tan solo un niño hasta el día de hoy. Gracias por brindarme tantos momentos de alegría y diversión; agradezco infinitamente su lealtad y atesoro inmensamente todos los momentos que hemos compartido.

Finalmente, pero no menos importante agradezco a todos los profesores que han sabido enseñarme, guiarme, y darme siempre ánimos para seguir aprendiendo.

Este logro no es solo mío sino también de todos ustedes. Estoy muy feliz de haber tenido a gente tan especial a lo largo de mi vida. Definitivamente todos han sabido dejar una huella muy grande en mí y decir gracias es muy poco para lo que merecen.

Juan Alejandro Acevedo Osma

### Dedicatoria

“Llega el amor  
y en su tren vienen éxtasis  
viejos recuerdos de gozo  
antiguas historias de dolor.

Y si somos audaces,  
el amor arranca de nuestras almas  
las cadenas del miedo.

Al calor de la luz del amor  
abandonamos nuestra timidez  
nos atrevemos a ser valientes  
Y de pronto vemos que el amor  
nos cuesta todo lo que somos  
y todo lo que podemos ser.

Y sin embargo es el amor  
lo único que nos libera”

Maya Angelou

Para el amor de mis padres, por cultivar mis raíces.  
No importa lo mucho que crezca, ustedes siempre serán la base.

A quienes ya no están, por enseñarme el valor de la ausencia. A veces la mejor compañía  
se brinda desde la distancia.

Karen

### **Agradecimientos**

A la lucha por la educación pública que nos permitió culminar nuestra formación profesional.

A nuestro amigo, el ingeniero Oscar Bohórquez, por su paciencia y confianza para el desarrollo de este proyecto. Gracias por promover en nosotros una actitud crítica que nos permite superar las diversas dificultades. Sin su guía, compañía y dedicación no habría sido posible culminar este ciclo.

A nuestro director PhD. Alberto Pertuz, por apoyar el proceso de desarrollo y divulgación de esta investigación.

A nuestro amigo Robin Cristancho por su compañía incondicional. Las palabras no son suficientes para agradecer su asistencia a lo largo de este recorrido.

A Diego Díaz y Luis Calderón por su carisma y su actitud de colaboración. Gracias por ofrecernos su confianza y compañía en todo momento.

A Don Gustavo Pabón por ser parte del proceso de creación del proyecto y plasmar nuestra visión en elementos tangibles.

Al Semillero de Investigación en Manufactura Aplicada SIMA por abrirnos sus puertas y permitirnos complementar nuestro aprendizaje con los demás miembros del grupo, además de auspiciar esta investigación.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica por patrocinar este proyecto y brindarnos el espacio para su desarrollo, además de impulsar nuestras habilidades por medio de los docentes que fueron parte de nuestro ciclo de formación.

A nuestros lectores, gracias por la atención prestada. Esto es para ustedes.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	13
1. Objetivos.....	16
1.1. Objetivo General.....	16
1.2. Objetivos Específicos.....	16
2. Fases metodológicas.....	17
2.1. Fase Investigativa.....	17
2.1.1. Procesos de Soldadura.....	17
2.1.2. Sistemas de Control de Equipos para Aplicación de Soldadura.....	18
2.1.3. Oferta de Mercado.....	21
2.2. Fase propositiva.....	22
2.3. Fase de desarrollo.....	24
2.3.1. Subsistema de Oscilación.....	24
2.3.2. Subsistema de Desplazamiento.....	26
2.3.3. Subsistema de Control.....	33
2.3.4. Bastidor.....	40
2.4. Fase de prototipado.....	44
2.4.1. Prueba de linealidad.....	44
2.4.2. Prueba de velocidad.....	46
2.4.3. Prueba de calidad de soldadura.....	51
3. Desarrollo del manual de funcionamiento y mantenimiento.....	53

4. Análisis de costos .....	54
5. Conclusiones .....	59
6. Recomendaciones .....	61
Referencias bibliográficas .....	62
Apéndices .....	68

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Resultados de Selección de Alternativas.....	24
Tabla 2. Valores del factor de seguridad por sección según el criterio de Von Mises.....	30
Tabla 3. Factores de seguridad según el criterio de Von Mises.....	32
Tabla 4. Valores obtenidos del registro de velocidad de giro.....	37
Tabla 5. Valores obtenidos de las cargas actuantes en la junta.....	42
Tabla 6. Resultados de la prueba de linealidad.....	46
Tabla 7. Prueba de velocidad.....	47
Tabla 8. Valores corregidos prueba de velocidad en el modelo de empuje.....	50
Tabla 9. Valores corregidos prueba de velocidad en el modelo de arrastre.....	51
Tabla 10. Parámetros de ajuste para prueba de soldadura.....	52
Tabla 11. Inversión por asesoría académica.....	54
Tabla 12. Inversión de materiales e insumos de manufactura.....	54
Tabla 13. Detalle inversión subsistema de desplazamiento.....	55
Tabla 14. Detalle inversión subsistema de oscilación.....	55
Tabla 15. Detalle inversión subsistema de control.....	56
Tabla 16. Detalle inversión del bastidor.....	56
Tabla 17. Inversión para pruebas.....	57
Tabla 18. Inversión para documentación y divulgación.....	57
Tabla 19. Inversión global del proyecto.....	58

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Metodología del Proyecto. ....	14
Figura 2. Representación del Ángulo de Oscilación .....	19
Figura 3. Representación de Amplitud de Onda .....	20
Figura 4. Representación de Amplitud de Onda en el Cordón de Soldadura. ....	20
Figura 5. Representación del Stick Out .....	21
Figura 6. Posiciones para Soldadura .....	22
Figura 7. Subsistema de Oscilación.....	25
Figura 8. Subsistema de Desplazamiento .....	26
Figura 9. Esquema de elementos que conforman el subsistema de control.....	33
Figura 10. Estados de operación del sistema .....	34
Figura 11. Estado on y pause .....	35
Figura 12. Registro de velocidad de giro del motor .....	36
Figura 13. Representación de la relación de cantidad de pulsos y velocidad de giro .....	36
Figura 14. Representación de la relación entre cantidad de pulsos y velocidad de giro ...	36
Figura 15. Algoritmo de funcionamiento del motor DC .....	38
Figura 16. Rutina de oscilación.....	39
Figura 17. Algoritmo motor de oscilación.....	39
Figura 18. Placa PCB.....	40
Figura 19. Estructura del bastidor. ....	41
Figura 20. Zona demarcada para prueba de linealidad .....	45

Figura 21. Montaje para la prueba de linealidad.....	45
Figura 22. Relación de velocidades para valores menores de 50cm/min.....	47
Figura 23. Relación de velocidades para rango de valores de 50-80cm/min.....	48
Figura 24. Relación de velocidades para valores mayores a 80cm/min.....	48
Figura 25. Algoritmo de ajuste valor de diferencia.....	49
Figura 26. Disposición de la antorcha de soldadura.....	50
Figura 27. Resultados de la prueba de calidad de la soldadura.....	52

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Ofertas de máquinas del mercado. ....	68
Apéndice B. Matriz de Calidad. Planteamiento y Selección de Alternativas. ....	76
Apéndice C. Cálculos del Subsistema de Oscilación. ....	88
Apéndice D. Cálculos del Subsistema de Desplazamiento. ....	97
Apéndice E. Cálculos del bastidor. ....	120
Apéndice F. Planos de fabricación del sistema. ....	125
Apéndice G. Fabricación del sistema. ....	127
Apéndice H. Manual de operación y mantenimiento. ....	130

## Resumen

**Título:** Diseño y construcción de un sistema programable de transporte para la aplicación de soldadura lineal\*

**Autor:** Juan Alejandro Acevedo Osma, Karen Alexandra Porras Rodríguez \*\*

**Palabras Clave:** Procesos de soldadura, diseño, soldadura mecanizada, parámetros de soldadura.

**Descripción:** La soldadura ha desempeñado una labor vital en los diferentes proyectos de ingeniería en sectores de infraestructura, minería, producción, entre otros, donde ha sido uno de los principales procesos de ensamble. Diferentes factores y parámetros sobre este procedimiento se dejan a la planeación y el desempeño de un operario, como consecuencia, la reproducibilidad y uniformidad se ve afectada por diversos factores humanos. Un propósito de la ingeniería es la estandarización de procesos, mediante la implementación de sistemas con alto grado de precisión en el control de los parámetros inmersos. Teniendo en cuenta los factores humanos, técnicos y sociales de las tecnologías de la soldadura, en este proyecto se desarrolló un sistema programable para aplicaciones de soldadura por arco eléctrico, teniendo en cuenta los principios de funcionamiento de los modelos existentes y los parámetros de soldadura como la velocidad de desplazamiento, la longitud de arco, la frecuencia y la amplitud. Se aplicaron técnicas de diseño y métodos de iteración para cumplir con los requisitos de la industria y la educación. El diseño conceptual y el diseño de detalle se llevaron a cabo con el uso de herramientas de diseño e ingeniería asistida por computador. Como resultado se obtiene un equipo de bajo costo, buena maniobrabilidad y estabilidad, que se puede implementar fácilmente en diversas aplicaciones de los procesos de soldadura de suministro de material de aporte continuo, ofreciendo un cordón de soldadura acorde con los parámetros seleccionados por el usuario final, garantizando resultados consistentes y al mismo tiempo, disminuyendo la dependencia de la destreza desarrollada por un soldador. Al finalizar, este proyecto será implementado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, con el fin de que los estudiantes puedan ver de forma práctica los procesos de soldadura y relacionarlo con la teoría que concierne este campo.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alberto David Pertuz Comas. Doctor en Ingeniería Mecánica. Codirector: Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra. Ingeniero Especialista en Evaluación y Gerencia de Proyectos.

### Abstract

**Title:** Design and construction of a programmable transport system for linear welding application \*

**Author:** Juan Alejandro Acevedo Osma, Karen Alexandra Porras Rodríguez \*\*

**Key Words:** Welding processes, design, mechanized welding, welding parameters.

**Description:** Welding has performed a vital role in different engineering projects in infrastructure, mining, and production sectors, among others, where it has been one of the main assembly processes. Several factors and parameters regarding this procedure are subject to the planning and performance of an operator, consequently, the reproducibility and uniformity are affected by many human factors. One purpose of engineering is the standardization of processes, through the implementation of systems with a high degree of precision in the control of the parameters involved. Considering the human, technical and social factors of welding technologies, this project developed a programmable system for electric arc welding applications, considering the operating principles of existing models and welding parameters such as travel speed, arc length, frequency, and amplitude. Design techniques and iteration methods to comply with industry and educational requirements were applied. Conceptual design and detail design were carried out with the use of design tools and computer-aided engineering, resulting in a concept of low cost, good operability, and stable equipment design. This could be easily implemented in various applications of continuous filler material supply welding processes, offering a weld bead according to the parameters selected by the end-user, assuring consistent results and at the same time, decreasing the dependence on the skill developed by a welder. In the end, this project will be implemented in the School of Mechanical Engineering of the Universidad Industrial de Santander, to enable students to view welding processes practically and relate them to the theory concerning this study field.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Alberto David Pertuz Comas. Ph.D. in Mechanical Engineering. Co-director: Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra. Engineer Specialist in Project Evaluation and Management.

## Introducción

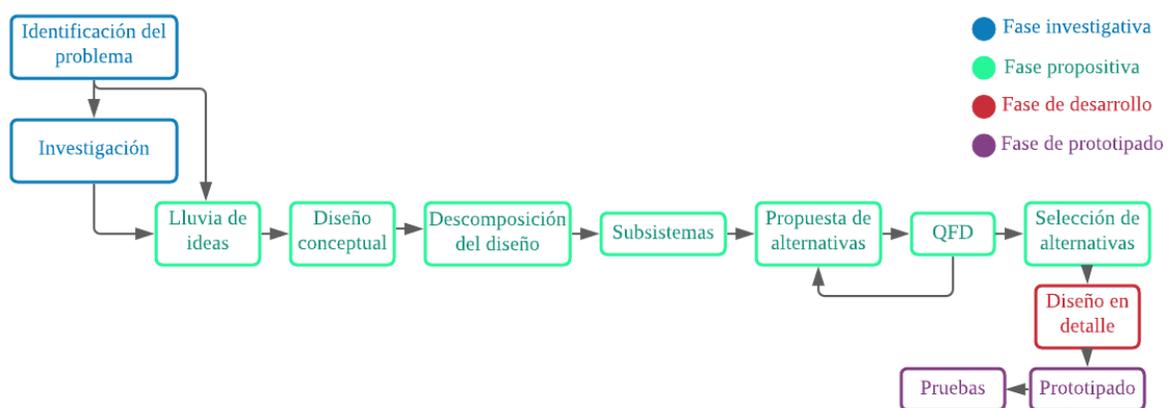
La industria manufacturera es la base de toda nación industrializada y contribuye con aproximadamente el 20-30% del valor de todos los bienes y servicios producidos (Böllinghaus et al., 2009). Habitualmente, se necesitan componentes de gran tamaño, con formas complejas e intrincadas que son difíciles de fabricar como pieza única. Para evitar estos problemas de manipulación de materiales, los componentes se fabrican generalmente en piezas que son mucho más sencillas de producir individualmente y que pueden ensamblarse posteriormente mediante su unión en los productos finales (Kumar et al., 2019). En la actualidad, uno de los métodos más importantes para la unión de piezas y conjuntos metálicos es la soldadura. “La soldadura según la American Welding Society (AWS) es la unión localizada de metales o no metales, producida por el calentamiento de éstos a las temperaturas de soldadura requeridas, con o sin la aplicación de presión, o aplicando solo presión y con o sin el uso de materiales de aporte.” (American Welding Society, 2010).

Actualmente en Colombia se ha presentado un crecimiento notable en proyectos de infraestructura e ingeniería, lo que ha llevado consigo un gran aumento de la demanda de profesionales calificados en todos los ámbitos relacionados, siendo muy notable el sector de la soldadura, ya que se estima que mueve alrededor de 150.000 millones de COP anualmente (Rojas & Patarroyo, 2013) equivalente al 21% del PIB colombiano (Banco de la República, 2015), además, se debe tener en cuenta que es una de las labores técnicas más costosa, la mano de obra cuesta en promedio 142.028 COP (Construdata, 2020) por cada día de trabajo, correspondiente al 4.35 veces del salario mínimo diario legal vigente del mismo año (Ministerio del Trabajo, 2019).

Siendo Colombia un país en desarrollo y debido a las políticas estatales, el incremento de escenarios como la construcción civil, la minería, el sector del petróleo y gas, que implican el uso de maquinaria amarilla que requiere por mantenimiento la incorporación de procesos de soldadura dentro de sus rutinas habituales. Por lo tanto, con el objeto de apoyar la automatización de los procesos de soldadura y acrecentar el área de enseñanza y aprendizaje de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander (Acevedo et al., 2021), se propone desarrollar un sistema programable de transporte y aplicación de soldadura lineal de bajo costo, alta estabilidad, maniobrabilidad y con una interfaz amigable para el usuario, el cual enriquecerá el laboratorio de mantenimiento al concluir el proyecto. Además, se busca que la inversión del equipo no sea demasiado grande, comparado con el valor en el cual rondan los equipos existentes en el mercado extranjero, teniendo en cuenta los altos costos de importación y envío. Para la realización de este proyecto se sigue la metodología ilustrada en la Figura 1.

**Figura 1**

*Metodología del Proyecto*



En la fase investigativa se realiza una búsqueda de información relacionada con el problema en cuestión para luego, en la fase propositiva, realizar un diseño conceptual que

contemple las características implícitas como los procesos de soldadura (Lucey, 1964).

Finalmente, en la fase de desarrollo el objetivo del diseño detallado es obtener la geometría del producto y sus componentes con la intención de construir el prototipo que validará el funcionamiento correcto de la máquina en la fase de prototipado (Feng et al., 1996).

## 1. Objetivos

### 1.1. Objetivo General

Participar en el cumplimiento de la misión del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander en el progreso científico-tecnológico; por medio del diseño y construcción de un sistema programable de transporte para la aplicación de soldadura lineal.

### 1.2. Objetivos Específicos

Diseñar el sistema que cumpla con los siguientes parámetros:

- ❖ Velocidad de avance del equipo: 0 – 30 in/min.
- ❖ Ángulo de rotación de la antorcha 0 – 90°

Construir un prototipo funcional que cuente con los siguientes subsistemas:

- ❖ Transporte o traslación.
- ❖ Oscilación de antorcha.
- ❖ Accionamiento de antorcha.
- ❖ Bastidor y control de movimiento.

Verificar el funcionamiento y viabilidad del sistema, mediante pruebas de desempeño de la soldadura.

Elaborar un instructivo de uso y mantenimiento del sistema de transporte y aplicación de soldadura lineal, con el fin de capacitar al personal para su correcta implementación.

## **2. Fases Metodológicas**

El diseño es un proceso de planeación innovador e iterativo mediante el cual se atienden necesidades o problemas específicos, su ejecución implica tomar diversas decisiones, las cuales están basadas en conocimientos previos o adquiridos mediante la búsqueda de información (Budynas & Nisbett, 2008). Para el desarrollo de este proyecto se siguieron las fases mencionadas a continuación:

### **2.1. Fase Investigativa**

En el planteamiento de este ejercicio se hace necesario el conocimiento del medio para el cual se está trabajando, por lo cual, se presentan los principios clave que comprometen los procesos de soldadura (Bohórquez et al., 2021), en especial la soldadura por arco eléctrico, las implicaciones de la mano de obra y los equipos automatizados presentes en el mercado nacional e internacional.

#### ***2.1.1. Procesos de Soldadura***

La clasificación adecuada de los distintos procesos de soldadura ayuda a clarificar las diferencias elementales de estos, a su vez mostrando sus similitudes y variedades (Messler, 2004). La soldadura en estado sólido se refiere a un grupo de procesos de soldadura que producen uniones sólidas a temperaturas esencialmente inferiores al punto de fusión de los materiales principales o sin la fusión en masa de los materiales principales (Guo, 2015). Por otro lado, la soldadura por fusión consiste en fundir los bordes de las piezas a soldar utilizando diferentes fuentes de energía. Bajo la acción del calor, los bordes del metal son cizallados y forman una unión entre ellos o con un metal de relleno, formando así el baño de fusión, que después de la solidificación forma la soldadura (Debroy & David, 1995).

Debido a su amplio uso en los sectores de empleabilidad de un ingeniero mecánico, el proceso de soldadura de interés en este proyecto es la soldadura por arco eléctrico, Gas Metal Arc Welding GMAW (Nova et al., 2021). Es un proceso de soldadura con electrodo consumible que produce un arco entre el baño de soldadura y un metal de aporte suministrado continuamente (Thompson Martinez et al., 2021). Este método tiene ciertas ventajas comparado con los tradicionales, como la producción de resultados de mejor calidad, mayor velocidad y consistencia, y la producción mínima de desperdicios de consumibles de soldadura (Uribe, 2008).

El proceso GMAW es flexible en su capacidad de proporcionar soldaduras sólidas para un tipo de material base y un rango de espesor muy amplios. Para la aplicación del GMAW es fundamental comprender la interacción entre las siguientes variables:

- ❖ El rango de espesor del material base a soldar dictará el diámetro del alambre de alimentación (electrodo), y el número de veces que se aplique.
- ❖ La selección del gas de protección influirá en la selección del modo de transferencia del metal, y tendrá un efecto definitivo en el perfil de soldadura terminado (Amado, 2013).

### ***2.1.2. Sistemas de Control de Equipos para Aplicación de Soldadura***

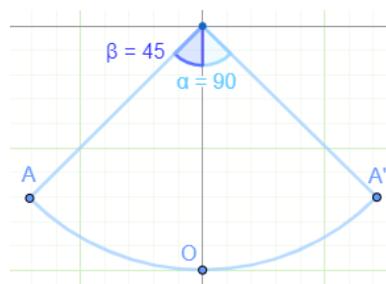
La soldadura inteligente es el uso de computadoras para imitar, fortalecer y/o reemplazar a los operadores humanos en la detección, el aprendizaje, la toma de decisiones, el monitoreo y el control, entre otras (Wang et al., 2020). La soldadura por arco eléctrico metálico con gas (GMAW) se emplea ampliamente en la industria del metal debido a su potencial para aumentar la productividad y calidad de la soldadura, que se controla mediante los parámetros del proceso (L. S. Kim et al., 2001). Los resultados del cordón de soldadura están directamente relacionados con la ejecución de los parámetros operacionales del proceso, por lo cual, se pretende generar un

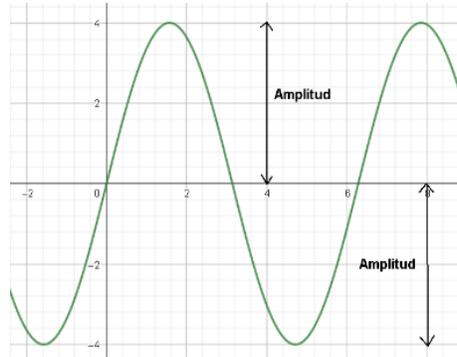
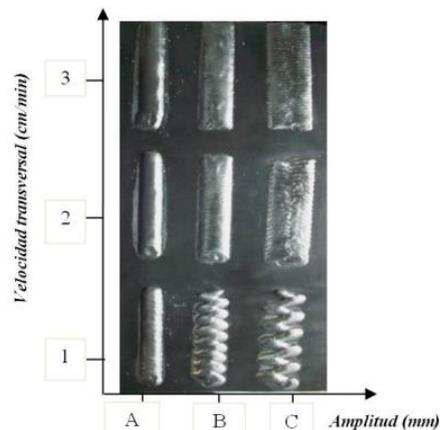
alto grado de flexibilidad en su ajuste, mediante el desarrollo de un sistema de control de las siguientes variables:

- ❖ Velocidad angular: tasa de tiempo a la que un objeto rota o gira alrededor de un eje. Se expresa comúnmente en revoluciones por minuto (rpm). En este proyecto, se considera la influencia de este parámetro directamente en la frecuencia de oscilación que permite definir el número de trazados de onda que realiza la máquina en un determinado periodo de tiempo.
- ❖ Velocidad de desplazamiento: distancia que se moverá la máquina a lo largo de su eje de movimiento en cierto tiempo. El rango de velocidad se estableció teniendo en cuenta la velocidad de alimentación del alambre de soldadura y el área de la unión soldada (0-30 in/min).
- ❖ Ángulo de oscilación: este parámetro contempla el desplazamiento de la antorcha durante el trazado. El rango recorrido total propuesto para este caso es  $0-90^\circ$  teniendo en cuenta que el ángulo para alcanzar la amplitud de onda máximo, desde el eje vertical, es de  $45^\circ$  señalado en la figura 2. La representación de la amplitud de onda se simboliza en la figura 3 y se indica en el cordón de soldadura en la figura 4.

## Figura 2

### *Representación del Ángulo de Oscilación*



**Figura 3***Representación de Amplitud de Onda***Figura 4***Representación de Amplitud de Onda en el Cordón de Soldadura.*

*Nota:* Tomado de Efecto de la Oscilación en la Geometría de Soldaduras Superficiales Aplicadas con GMAW Cortocircuito [Fotografía] Cortés et al., 2012

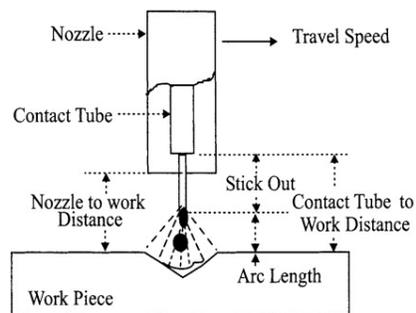
(<https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/view/11283>)

- ❖ Retardos: es el tiempo en el que la antorcha no realizará su movimiento ondulatorio, sino que se mantendrá en posición neutral mientras se aplica la cantidad necesaria en el proceso de fusión (Kang et al., 2019). Este parámetro se ajusta directamente según los requerimientos del proceso.

- ❖ Stick out: definido en los términos y definiciones de la AWS A3.0 como la longitud del electrodo no fundido que se extiende más allá del extremo de la boquilla de gas (American Welding Society, 2015). Al aumentar el stick out la penetración se vuelve más débil y además aumenta la cantidad de proyecciones, las cuales pueden interferir en la salida del gas de protección, generando poros y contaminación excesiva (Kumanan et al., 2007). Vale la pena mencionar, que el stick out, representado en la figura 5, es un parámetro que depende exclusivamente de la habilidad del operario, por esto, dada su importancia, se debe considerar el diseño de un elemento que permita la regulación de este criterio.

### Figura 5

#### *Representación del Stick Out*



*Nota:* Tomado de Modeling, Sensing and Control of Gas Metal Arc Welding [Fotografía], Naidu et al., 2003, Elsevier Science, (<https://www.sciencedirect.com/book/9780080440668/modeling-sensing-and-control-of-gas-metal-arc-welding#book-description>)

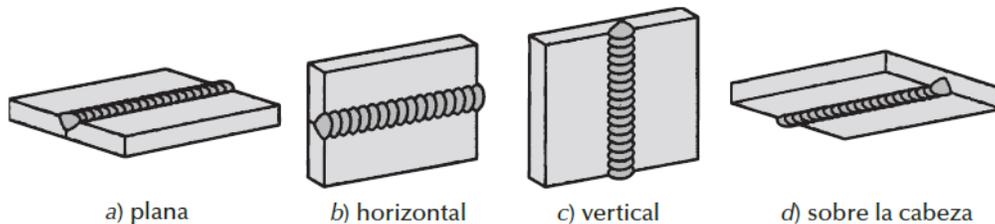
#### **2.1.3. Oferta de Mercado.**

En la actualidad se ha presentado un auge en la automatización de diversos procesos de manufactura, todo esto con el fin de aumentar los niveles de calidad y productividad,

disminuyendo a su vez los costos y el tiempo de ejecución (Y.-B. Kim et al., 2008). La soldadura ha hecho parte de este movimiento, por lo que se pueden encontrar diversas máquinas que facilitan este tipo de trabajo en el mercado que, a su vez, se clasifican en función de las posiciones de soldadura básicas representadas en la figura 6, a) plana, b) horizontal, c) vertical y d) sobre cabeza (Groover, 2019). La posición de soldadura tiene gran influencia en factores que afectan directamente el procedimiento (Cho et al., 2013), por ello, en vista de los parámetros que se controlaron en este proyecto, se trabajó con la posición de soldadura plana considerando su facilidad de operación, sin embargo, el campo queda abierto para futuras investigaciones. En el Apéndice A, se presentan algunas de las opciones que se pueden encontrar hoy en día.

### Figura 6

#### *Posiciones para Soldadura*



*Nota:* Tomado de Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Groover, 2019.

## 2.2. Fase propositiva

Para llevar a cabo el diseño conceptual se implementaron diversas técnicas de creatividad. Se resalta el uso de la lluvia de ideas, la cual fue aplicada para abordar la creación de propuestas que respondan a las necesidades establecidas para el diseño. El objetivo de esta

técnica es maximizar el número de ideas propuestas, con el fin de luego evaluarlas al tener en cuenta criterios de viabilidad y originalidad (Kazakci et al., 2015).

Para abordar el proceso de diseño, se planteó la descomposición del sistema en módulos, con el objetivo de reducir su complejidad y poder aislar las variables e identificarlas más directamente (Kusiak & Wang, 1993). Al dividir el sistema con base en sus tres funciones principales, se obtienen los subsistemas de oscilación, desplazamiento y control. Posteriormente, se plantean alternativas que den respuesta a la necesidad establecida para cada subsistema. Así mismo, se realiza la evaluación de cada propuesta, teniendo en cuenta los requerimientos del usuario final y el diseñador, mediante la matriz de función de calidad.

La función calidad es una metodología que permite crear productos que se adaptan a los gustos y las necesidades del usuario. Con este método de gestión se transforman las demandas del consumidor en criterios de diseño. Su elaboración parte de una serie de requerimientos suministrados por parte del cliente que se examinan junto a los principios que otorga el desarrollador de donde se determinan las cualidades primordiales que debe tener un sistema (Govers, 1996). En el ejercicio de selección de las alternativas, se desarrolla una matriz de calidad por cada subsistema, con el propósito de encontrar los tres factores más importantes con su respectiva ponderación para, finalmente, evaluar las opciones propuestas para el desarrollo del sistema programable de transporte y aplicación de soldadura lineal.

Los resultados obtenidos señalan las opciones más adecuadas para cada subsistema. En la tabla 1 se presentan las alternativas para cada módulo y su respectiva selección. El detalle de esta selección y las matrices desarrolladas se presentan en el apéndice B.

**Tabla 1***Resultados de Selección de Alternativas*

<b>Módulos</b>	<b>Alternativas</b>	<b>Selección</b>
Subsistema de oscilación	Actuador lineal Motor paso a paso Dos motores paso a paso	Motor paso a paso
Subsistema de desplazamiento	Guías lineales Ruedas de fricción	Ruedas de fricción
Subsistema de control	Controlador lógico programable Servo Drive Trifásico Microcontrolador Arduino	Microcontrolador Arduino

### 2.3. Fase de desarrollo

A partir de lo propuesto en el capítulo anterior, se inició el diseño detallado del sistema, por lo cual, se llevaron a cabo una serie de cálculos buscando recrear situaciones de operación similares a las que experimenta el sistema. Como consecuencia, para facilitar la formulación del problema, se realizó la distribución de los subsistemas teniendo en cuenta la función principal que cada uno cumple, adicionando el módulo bastidor encargado de dar soporte a los demás componentes. El objetivo principal de esta sección fue detallar cada subsistema hasta obtener los planos de construcción que se implementaron en la siguiente fase.

#### 2.3.1. Subsistema de Oscilación

El subsistema de oscilación, mostrado en la figura 7, se compone de un motor paso a paso, un soporte para la antorcha, tres acoplamientos y dos brazos articulados que permiten ajustar la posición de operación de la máquina.

**Figura 7***Subsistema de Oscilación*

Los motores paso a paso permiten transformar la energía eléctrica en mecánica, se suelen utilizar en diversas aplicaciones industriales en las que se requiere una baja potencia y en las que la baja velocidad, el par, la dinámica rápida y el posicionamiento preciso son factores importantes (Silaban et al., 2020). Para realizar la selección del motor se tuvo en cuenta la condición de torque necesaria durante la operación determinado mediante la ecuación 1. Los detalles del cálculo y la selección del motor se detallan en el apéndice C.

$$T_O \geq W_{antorcha} * l_{antorcha} = m_{antorcha} * g * l_{antorcha} \quad (1)$$

Donde  $T_O$  es el torque ofrecido por el motor en  $Nm$

$W_{antorcha}$  es el peso de la antorcha en  $N$

$l_{antorcha}$  es la longitud del cuello de la antorcha en  $m$

$g$  es la gravedad en  $\frac{m}{s^2}$

$m_{antorcha}$  es la masa de la antorcha en  $Kg$

Luego de seleccionado el motor, se realizó la estructura que brinda soporte y posibilita el ajuste vertical y horizontal del brazo de oscilación. Este sistema se compone de dos tubos cédula 40 de diámetro nominal 1 ¼" y 25 cm de longitud cada uno. Los acoplamientos fueron

diseñados de tubería cédula 40 de diámetro nominal 1 ½”, con bases de lámina de acero estructural ASTM A36 de espesor 1/8”.

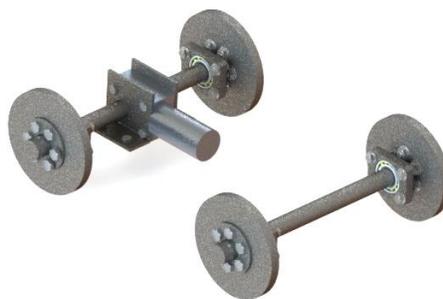
Como se demostró en el apéndice C, se verificó el comportamiento de la zona elástica de los materiales y se comprobó que es óptimo, asegurando un factor de seguridad mayor a tres.

### 2.3.2. *Subsistema de Desplazamiento*

El subsistema de desplazamiento, mostrado en la figura 8, permite generar el movimiento en línea recta del mecanismo mediante el uso de un motorreductor de corriente continua de doble eje, soportado por medio de bases para el motor diseñadas utilizando lámina de acero ASTM A36 de 1/8” de espesor. Cuenta, además, con cuatro ruedas fabricadas en lámina de espesor 3/8” del mismo material, dos tubos macizos de diámetro exterior 17.12 mm para el eje motriz con longitud de 112 mm cada uno y un tubo de las mismas características de longitud 260 mm para el eje conducido.

## Figura 8

*Subsistema de Desplazamiento*



**Cinemática.** En la selección del motor requerido el parámetro para tener en cuenta es el torque. Por consiguiente, se consideró la ecuación 2 para calcular el torque por fricción y la ecuación 3 para evaluar la rodadura. El resultado mayor determinó la condición para la búsqueda

del motor. El procedimiento llevado a cabo durante la ejecución de este ejercicio se detalló en el apéndice D.

$$T_f = N * \mu_f * r_{rueda} \quad (2)$$

$$T_r = N * C_r * r_{rueda} \quad (3)$$

Donde  $T_f$  = Torque calculado a partir del coeficiente de fricción en  $N.m$

$T_r$  = Torque calculado a partir del coeficiente de rodadura en  $N.m$

$N$  = Fuerza normal de la rueda en  $N$

$\mu_f$  = Coeficiente de fricción del neopreno

$C_r$  = Coeficiente de resistencia a la rodadura

$r_{rueda}$  = Radio de la rueda en  $m$

Considerando los valores de torque obtenidos con las ecuaciones anteriores, se calculó el torque entregado por el motor de doble eje. Se verificó el funcionamiento según la ecuación 4.

$$P_{motor} = I * V = T_{motor} * \omega_{motor} \quad (4)$$

Donde  $P_{motor}$  = potencia del motor en  $kW$

$I$  = intensidad de corriente en  $A$

$V$  = voltaje en  $V$

$T_{motor}$  = torque entregado por el motor en  $N.m$

$\omega_{motor}$  = velocidad angular del motor en  $rpm$

**Verificación de resistencia estática del sistema.** A continuación, se determinó el esfuerzo flector presente en el eje mediante la ecuación 5.

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \quad I = \frac{1}{4} * \pi * r^4 \quad (5)$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo de flexión máximo en  $MPa$

$M$  es el momento flector máximo en  $N.m$

$c$  es el radio del eje en  $m$

$I$  es el segundo momento de área alrededor del eje  $z$  en  $m^4$

Del mismo modo, se determinó el esfuerzo cortante máximo debido a flexión  $\tau_V$  en *MPa*, según la ecuación 6.

$$\tau_V = \frac{4 * V}{3 * A} \quad (6)$$

Donde  $V$  es el valor de la fuerza cortante máxima en *N*

$A$  es el área de la sección transversal del eje en *m*

Finalmente, el esfuerzo de torsión  $\tau_T$  se calculó en *MPa*, según la ecuación 7.

$$\tau_T = \frac{T * c}{J} \quad J = \frac{1}{2} * \pi * r^4 \quad (7)$$

Donde  $T$  es el valor del par de torsión en *N.m*

$c$  es el radio del eje en *m*

$J$  es el segundo momento polar del área en *m*

En las secciones concentradoras de esfuerzo se añade un factor geométrico de la concentración de esfuerzos para relacionar el esfuerzo máximo real en la discontinuidad con el esfuerzo nominal (Budynas & Nisbett, 2008), los factores fueron definidos por medio de la ecuación 8.

$$K_t = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_0} \quad K_{ts} = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\tau_0} \quad (8)$$

Donde  $K_t$  es el factor teórico para esfuerzos normales

$K_{ts}$  es factor para esfuerzos cortantes

$\sigma_0$  y  $\tau_0$  los esfuerzos nominales, se determinan según el tipo de carga y sus diferentes geometrías.

Para una barra redonda o un tubo con agujero redondo transversal el valor aproximado del esfuerzo flexionante nominal  $\sigma_0$  en *MPa*, se determinó según las ecuaciones 9. Y para el esfuerzo cortante nominal  $\tau_0$  en *MPa*, se utilizó la ecuación 10.

$$\sigma_0 = \frac{M}{Z_{neto}} \quad Z_{neto} = \frac{\pi * A * (D^4 - d^4)}{D * 32} \quad (9)$$

Donde  $M$  es el momento flector en el punto de estudio en  $N. m$

$D$  es el diámetro exterior del eje en  $m$

$d$  es el diámetro del orificio en  $m$

$A$  es un factor adimensional explicado en el apéndice d

$$\tau_0 = \frac{T * D}{2 * J_{neto}} \quad J_{neto} = \frac{\pi * A * (D^4 - d^4)}{32} \quad (10)$$

Donde  $T$  es el valor del torque de la sección de estudio en  $N. m$

$D$  es el diámetro externo del eje en  $m$

$d$  es el diámetro del agujero en  $m$

$A$  es el factor adimensional explicado en el apéndice d

Finalmente, la ecuación 11 corresponde a la teoría de la energía de distorsión para evaluar la falla estática del sistema. Gracias a la ecuación 12 se determinó el factor de seguridad para cada sección, como se observa en la tabla 2, según el criterio de Von Mises para un modelo conservador.

$$\sigma' = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$\sigma' = \frac{S_y}{n} \quad (12)$$

El detalle del cálculo del factor de seguridad para cada sección se encuentra en el apéndice D.

**Tabla 2**

*Valores del factor de seguridad por sección según el criterio de Von Mises*

	Primera sección	Segunda sección	Tercera sección
<b>Factor de seguridad</b>	5.64	2.36	1.55

**Verificación de la resistencia dinámica del sistema.** Concluido el análisis estático, se consideró el comportamiento del subsistema cuando se somete a cargas que varían con el tiempo de modo que se presentan esfuerzos máximos y mínimos.

De esta forma, se generaron los elementos de esfuerzo alternante y esfuerzo medio a partir de la ecuación 13a y ecuación 13b.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \qquad \sigma_a = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \qquad (13 a)$$

$$\tau_m = \frac{\tau_{m\acute{a}x} + \tau_{m\acute{i}n}}{2} \qquad \tau_a = \frac{\tau_{m\acute{a}x} - \tau_{m\acute{i}n}}{2} \qquad (13 b)$$

Donde  $\sigma_{m\acute{a}x}$  = esfuerzo flexionante máximo

$\sigma_{m\acute{i}n}$  = esfuerzo flexionante mínimo

$\tau_{m\acute{a}x}$  = esfuerzo torsional máximo

$\tau_{m\acute{i}n}$  = esfuerzo torsional mínimo

$\sigma_m$  = componente de esfuerzo flexionante medio

$\sigma_a$  = componente de la amplitud flexionante

$\tau_a$  = componente de la amplitud torsional

$\tau_m$  = componente del esfuerzo torsional medio

A continuación, se determinó  $K_f$  comúnmente conocido como factor de concentración del esfuerzo por fatiga mediante la ecuación 14. El detalle del cálculo se presenta en el apéndice D.

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad K_{fs} = 1 + q_{cortante}(K_{ts} - 1) \quad (14)$$

Donde  $K_t$  y  $K_{ts}$  se determinaron según la geometría de la pieza

$q$  se determinó especificando el material

Se evaluó un esfuerzo equivalente de Von Mises para cada elemento, según la ecuación 15 y la ecuación 16.

$$\sigma'_a = \left\{ \left[ (K_f * \sigma_a)_{flexión} + \frac{(K_f * \sigma_a)_{axial}}{0.85} \right]^2 + 3 \left[ (K_{fs} * \tau_a)_{torsión} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (15)$$

$$\sigma'_m = \left\{ \left[ (K_f * \sigma_m)_{flexión} + (K_f * \sigma_m)_{axial} \right]^2 + 3 \left[ (K_{fs} * \tau_m)_{torsión} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (16)$$

Donde  $\sigma'_a$  = esfuerzo equivalente alterno

$\sigma'_m$  = esfuerzo equivalente medio

Se seleccionó el criterio de falla por fatiga de Soderberg por ser el único que ofrece protección a la fluencia. La ecuación 17 representa el criterio de Soderberg considerando la carga combinada.

$$\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_y} = \frac{1}{n_f} \quad (17)$$

Donde  $S_e$  = límite de resistencia a la fatiga

$S_y$  = límite de resistencia a la fluencia

$n_f$  = factor de seguridad de fallo por fatiga

Para evaluar el límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte del subsistema según la geometría y condición de uso (Budynas & Nisbett, 2008), se tuvo en cuenta la ecuación 18 correspondiente a la ecuación de Marín (Liu & Yan, 2019).

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S_e' \quad (18)$$

Donde  $k_a$  = factor de modificación de la condición superficial

$k_b$  = factor de modificación de la carga

$k_c$  = factor de modificación de la temperatura

$k_d$  = factor de confiabilidad

$k_e$  = factor de modificación del tamaño

$k_f$  = factor de modificación de efectos varios

$S_e'$  = límite de resistencia a la fatiga en una viga rotatoria

$S_e$  = límite de resistencia a la fatiga

Teniendo los valores de las componentes de la ecuación 18, se evaluó el factor de seguridad para cada sección crítica del eje. En la tabla 3 se evidencian los resultados estimados según el criterio elegido, con lo cual se precisó la sección crítica en el ajuste del eje principal con la rueda, sin embargo, siendo el criterio de falla más conservativo, se aceptó el factor para el diseño del eje. El detalle del cálculo del factor de seguridad se encuentra en el apéndice D.

**Tabla 3**

*Factores de seguridad según el criterio de Von Mises*

	<b>Primera sección</b>	<b>Segunda sección</b>	<b>Tercera sección</b>
<b>Factor de seguridad</b>	3.984	2.1665	1.664

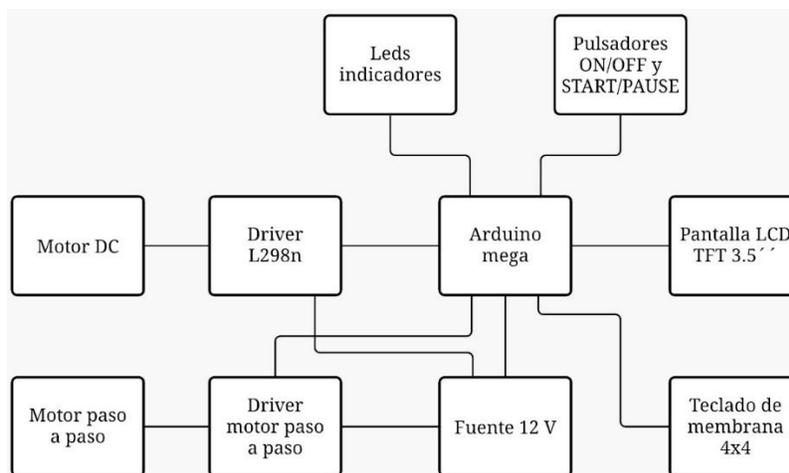
**Selección de rodamientos.** Finalizado el diseño del eje, se determinó un rodamiento rígido de una hilera de bolas considerando que soportan cargas radiales y pequeñas cargas axiales, asimismo, la disponibilidad de los rodamientos en el mercado y facilidad de mantenimiento. El detalle de la selección del rodamiento se presenta en el apéndice D.

### 2.3.3. Subsistema de Control

El subsistema de control es el responsable de llevar a cabo las operaciones de acuerdo con los valores deseados durante la puesta en marcha del equipo. Se integró de un microcontrolador Arduino Mega seleccionado por la cantidad de puertos que contiene y su facilidad de uso, un motor paso a paso que brinda precisión en la operación, un motor DC encargado del movimiento de avance del sistema, un driver para cada motor, dos switches, una pantalla LCD TFT como interfaz, un teclado numérico de membrana que facilita el ingreso de los parámetros, dos leds, jumpers para realizar las conexiones y una fuente eléctrica. En la figura 9 se observa el esquema de los elementos.

**Figura 9**

*Esquema de elementos que conforman el subsistema de control*



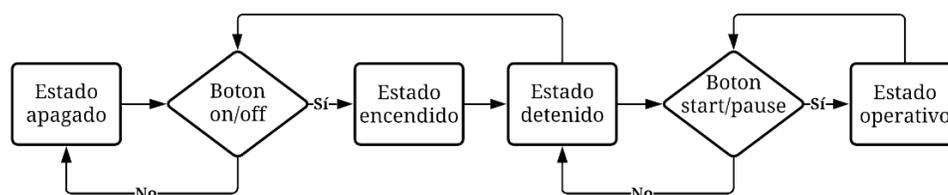
- ❖ **Plataforma Arduino.** Se implementó la plataforma Arduino incluido su software Arduino IDE basado en lenguaje de programación C++. Cuenta con una variedad de librerías que facilitan el proceso de programación. El código desarrollado tiene tres etapas:

- Declaración de variables y librerías utilizadas para llevar a cabo el funcionamiento de la máquina
  - Función setup, ejecutada solo una vez, donde además se declara la función de los pines del microcontrolador, en otras palabras, definición de entradas o salidas.
  - Función loop, la cual una vez terminado el ciclo lo repite constantemente y envía las señales correspondientes a los elementos electrónicos del sistema.
- ❖ Estados operativos e ingreso de datos. La máquina tiene tres estados:
- Sistema apagado
  - Sistema encendido y detenido
  - Sistema encendido y operando

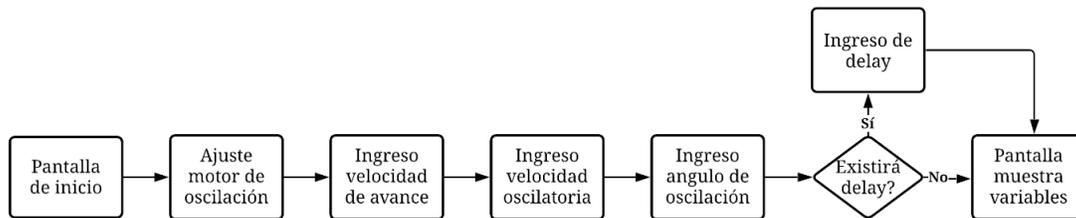
Para poder realizar el cambio entre estos estados, se usaron dos botones, uno de on/off y el otro de start/pause. En la figura 10 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo para los estados de operación. Adicionalmente para facilitar la distinción del estado actual de la máquina se implementaron leds pilotos, a su vez disminuyendo riesgos durante la operación.

### Figura 10

*Estados de operación del sistema*



El estado encendido y detenido se ejecuta las operaciones mostradas en la figura 11. Para el estado encendido y operando se envían señales a los drivers de cada motor, atendiendo los parámetros ingresados previamente.

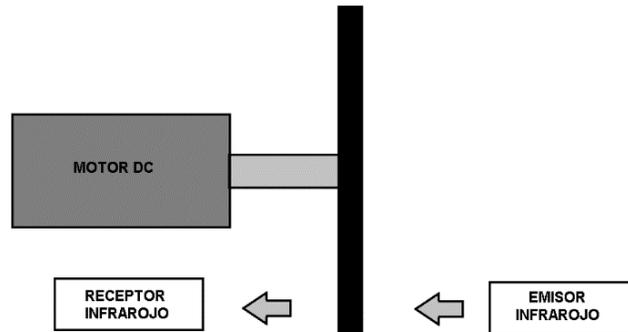
**Figura 11***Estado on y pause*

- ❖ **Operación motriz.** El sistema de aplicación de soldadura lineal cuenta con dos motores encargados de realizar los movimientos principales del sistema: el motor DC de doble eje y el motor paso a paso nema 17.

El motor DC de doble eje permite generar el movimiento de avance para controlar la velocidad mediante el driver L298n al enviarle el voltaje adecuado. El voltaje se envía a modo número o cantidad de pulsos (PWM) que pueden ir desde 0 a 255, donde 0 representa 0 voltios y 255 representa 5 voltios. Esta relación de voltaje no es directamente proporcional a la velocidad de giro a la cual opera el motor. Con el fin de encontrar esta velocidad, se tomaron los tiempos que tardaba el motor en girar mediante el uso de un emisor y un receptor infrarrojo, como se aprecia en la figura 12. De esta prueba se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 4, cuyos valores se representan en la figura 13 y 14, debido a que el comportamiento difería para los valores de pwm entre 50 y 100 al compararlos con los valores entre 100 y 255.

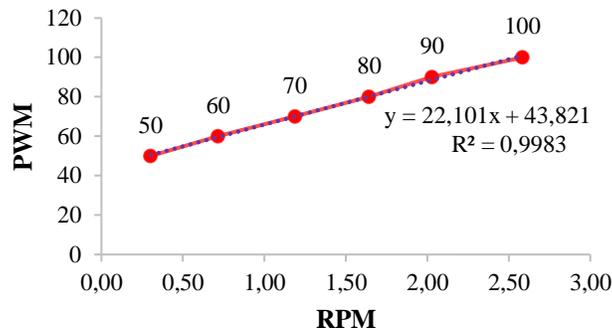
**Figura 12**

*Registro de velocidad de giro del motor*



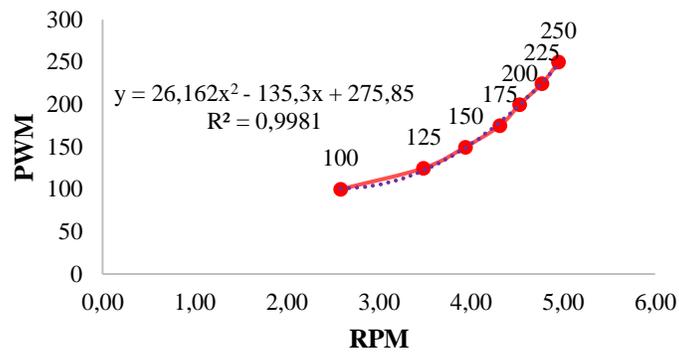
**Figura 13**

*Representación de la relación de cantidad de pulsos y velocidad de giro*



**Figura 14**

*Representación de la relación entre cantidad de pulsos y velocidad de giro*



**Tabla 4**

*Valores obtenidos del registro de velocidad de giro*

<b>PWM</b>	<b>Ángulo [°]</b>	<b>Tiempo [s]</b>	<b>Velocidad angular [rpm]</b>	<b>Velocidad lineal [cm/min]</b>
50	180	99.25	0.3	9.5
60	180	41.86	0.72	22.51
70	180	25.26	1.19	37.31
80	180	18.25	1.64	51.64
90	180	14.78	2.03	63.76
100	360	23.21	2.59	81.21
125	180	8.6	3.49	109.63
150	180	7.61	3.94	123.83
200	180	6.62	4.53	142.33
225	180	6.28	4.77	150
250	180	6.06	4.95	155.6

A partir de lo presentado en las gráficas anteriores se obtuvo la ecuación 19 para valores de pwm entre 50 y 100, y la ecuación 20 para valores entre 100 y 255.

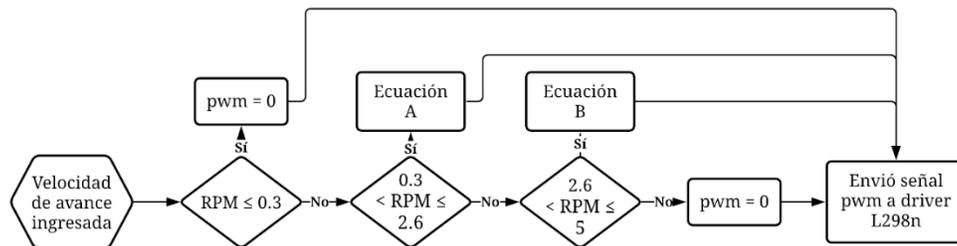
$$PMW = 22.101 * rpm + 43.821 \quad (19)$$

$$PMW = 26.162 * rpm^2 - 135.3 * rpm + 275.85 \quad (20)$$

Con estas ecuaciones se generó el algoritmo ilustrado en la figura 15, dependiente principalmente del valor de velocidad de avance ingresado por el usuario. La ecuación A y la ecuación B corresponden a las ecuaciones 19 y 20 respectivamente.

**Figura 15**

*Algoritmo de funcionamiento del motor DC*



En resumen, esta propuesta relacionó el rango de operación motriz del sistema representando una máxima velocidad angular de 5 RPM, en otras palabras, 157 centímetros por cada minuto.

**Motor de oscilación.** El motor paso a paso nema 17 tiene una caja de reducción con relación 51:1 que le permite realizar el movimiento oscilatorio, considerando la curva de torque brindada por el fabricante vista en el apéndice c. Así bien, se debía encontrar el número de pasos por vuelta, con el fin de controlar el ángulo de oscilación.

Como respuesta, se utilizó la ecuación 21 que permitió controlar la amplitud de oscilación. De igual forma, en el control de la velocidad se contempló el funcionamiento mediante una sucesión de pasos del motor, los cuales se traducen en señales enviadas mediante pulsos con un delay entre ellos. La ecuación 22 permitió calcular el delay implementado en el control de la velocidad.

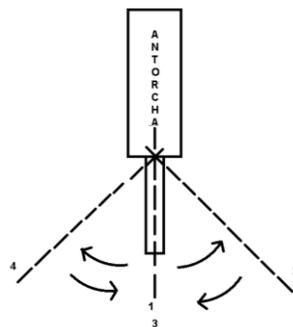
$$\frac{\text{Pasos}}{360^{\circ}_{NEMA\ 17}} * \text{reducción} = \frac{400}{360^{\circ}} * 50.895 = 56.55 \frac{\text{Pasos}}{\circ} \quad (21)$$

$$RPM = \frac{\circ}{\text{Pasos}} * \text{frecuencia} * \frac{60\text{seg}}{360^{\circ}} = \frac{1}{56.55} * \frac{60}{360} * \frac{10^6}{2 * \text{delay}} = \frac{1473.622}{\text{delay}_{\mu s}} \quad (22)$$

Encontrado el número de pasos necesarios para que el motor gire un grado y con la ecuación que permitió realizar el control de la velocidad angular, se generó una secuencia de 4 pasos, como se muestra en la figura 16. Para esta secuencia se desarrolló el algoritmo ilustrado en la figura 17 basado principalmente en el uso de la función for que permitió realizar una operación un número determinado de veces. Este parámetro se determinó por el ángulo oscilatorio ingresado por el usuario. El rango de oscilación del motor de 0-90° cumplió satisfactoriamente con lo propuesto al inicio de este proyecto.

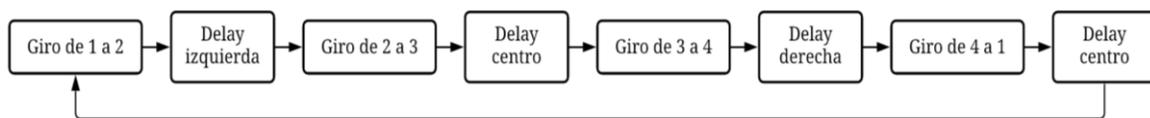
**Figura 16**

*Rutina de oscilación*



**Figura 17**

*Algoritmo motor de oscilación*

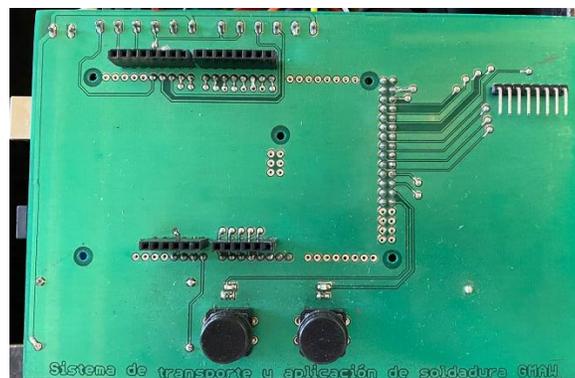


**Interfaz del subsistema de control.** En la figura 18 se muestra la placa PBC implementada para facilitar el cableado y las conexiones electrónicas del sistema. Se conectó por su parte inferior con el microcontrolador Arduino y en su parte superior se instalaron los

pulsadores, los leds indicadores, la pantalla LCD y el teclado matricial. La placa PCB permite el cambio de algún componente electrónico que presente fallas de forma sencilla y fácil, ya que se acopló al bastidor mediante una pieza de acrílico atornillada, facilitando los procesos de mantenimiento

### Figura 18

#### *Placa PCB*



En resumen, la interfaz del sistema programable de transporte para la aplicación de soldadura lineal se compuso de una pantalla, un teclado, pulsadores y leds indicadores, generando la interacción con el usuario final mediante la programación y regulación de los parámetros inmersos en el proceso de soldadura.

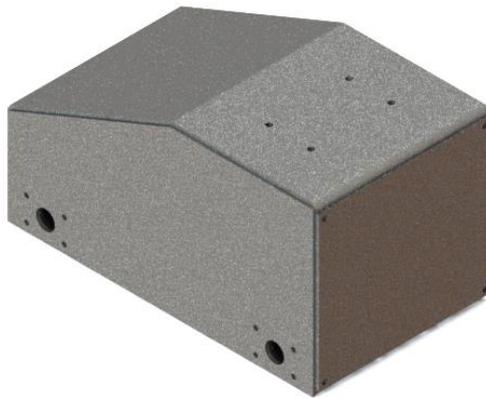
#### **2.3.4. Bastidor**

El bastidor representó una pieza fundamental en el diseño del sistema, ya que aloja los elementos electrónicos protegiéndolos de la exposición a la radiación y al calor generado durante el proceso de soldadura y brindó la estabilidad necesaria para evitar que exista volcamiento debido al peso del subsistema de oscilación. Otro aspecto importante fue su facilidad de acceso a los componentes internos gracias al diseño de una compuerta que permitió el acercamiento al

sistema motriz y al sistema electrónico. La estructura del bastidor, como aparece en la figura 19, se fabricó con placas de acero estructural ASTM A36 de 1/8" de espesor asegurando la resistencia de las condiciones ambiente y de trabajo que puede experimentar el sistema.

### Figura 19

*Estructura del bastidor*



Se analizó también la junta de la parte superior del bastidor, donde está el empalme entre el bastidor y el subsistema de oscilación, en donde se incorporaron orificios de 6 mm de diámetro. Después de tener las reacciones en las tres direcciones del plano 3D, se analizó el plano XZ para obtener la fuerza transversal según la ecuación 23.

$$F_{transversal} = \sqrt{F_x^2 + F_z^2} \quad (23)$$

Mediante el uso del complemento Simulation de Solidworks® se encontró la suma de las reacciones, presentes en la tabla 5. Estos valores se dividieron en 4, con el fin de aproximar la carga que actuaba en cada junta, el detalle de la información se presenta en el apéndice E.

**Tabla 5**

*Valores obtenidos de las cargas actuantes en la junta*

Reacción en X [N]	Reacción en Y [N]	Reacción en Z [N]
51.079	40.9475	-13.9638

Se concluyó que en cada junta había una fuerza transversal de 13.24 N aplicada en un modelo de esfuerzo por cortante o por aplastamiento en la placa. Por otro lado, la carga en Y presente en cada tornillo fue de 10.24 N generando posible fallas por tensión.

Como parte final del diseño del bastidor se revisó el volcamiento del sistema. La información detallada se encuentra en el apéndice E.

**Cálculo de la fuerza cortante en los tornillos.** Para realizar este cálculo se empleó la ecuación 24 considerando la carga máxima que resiste la junta atornillada, el esfuerzo último del tornillo, el área resistente y un factor de seguridad (Montenegro Bernuy, 2017). En el apéndice E se encuentra el cálculo en detalle.

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 * S_{u,t} * A_S}{C_{s,t}} \quad (24)$$

**Cálculo de tensión en los tornillos.** De forma similar al cálculo de la resistencia al cortante, se obtuvo la carga máxima que resistía la junta sometida a tensión según la ecuación 25.

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 * S_{u,t} * A_S}{C_{s,t}} \quad (25)$$

Luego de obtener los valores de resistencia de la fuerza cortante y de tensión en el tornillo de la junta se corroboró su resistencia, dado que se experimenta un esfuerzo combinado.

En efecto, se verificó el cumplimiento de la condición de la ecuación 26, usando los valores de carga de la junta.

$$\frac{F_{transversal}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_y}{1.4 * F_{t,Rd}} \leq 1 \quad (26)$$

Al evaluar la ecuación se garantizó el cumplimiento de la condición, por lo cual, la junta resiste las condiciones de carga experimentadas debido al peso del subsistema de oscilación.

**Cálculo de aplastamiento en la placa superior.** Se analizó el aplastamiento presentado mediante la ecuación 27.

$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 * S_u * d * t * \alpha}{C_{s,t}} \quad (27)$$

Donde  $S_u$  es la resistencia última de tracción del material en  $Pa$

$d$  es el diámetro del agujero en  $m$

$t$  es el espesor del material en  $m$

$\alpha$  es el menor resultado de las ecuaciones 28, 29 y 30

$C_{s,t}$  es el coeficiente de seguridad

Se comparó el valor con la carga transversal asumiendo que solo así se generaba aplastamiento.

$$\frac{e_1}{3 * d} = \alpha \quad (28)$$

Donde  $e_1$  es la distancia al eje frontal con respecto a la junta.

$$\frac{p_1}{3 * d} - \frac{1}{4} = \alpha \quad (29)$$

Donde  $p_1$  es la distancia de separación menor entre los tornillos.

$$\frac{S_{u,t}}{S_u} = \alpha \quad (30)$$

En la ecuación 30 se relacionó el valor de resistencia última del tornillo con la resistencia última del material de la placa. A partir de esto se obtuvo la resistencia al aplastamiento aproximada de 15.264 kN, la cual supera la fuerza transversal que actúa en la junta de tornillos con la placa, en otras palabras, la placa superior del bastidor soporta las cargas sin aplastamiento.

**Revisión del volcamiento.** Para verificar el diseño del bastidor se comprobó la estabilidad del sistema considerando el peso generado por la antorcha de soldadura. El detalle del proceso de comprobación se encuentra en el apéndice E.

## 2.4. Fase de prototipado

Con el diseño conceptual producido, y como resultado del diseño en detalle se obtuvo el conjunto de planos necesarios en la fabricación del equipo vistos en el apéndice F. A partir de esto, se iniciaron las tareas de manufactura que dieron lugar a las piezas de cada subsistema. Parte de este proceso se llevó a cabo en el taller de metalistería de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Las figuras de la actividad de fabricación se presentan en el apéndice G.

Después de tener el prototipo fabricado y ensamblado, se inició la serie de pruebas y validaciones de funcionalidad del sistema según lo planteado en la fase de desarrollo. El detalle de cada una se presenta a continuación.

### 2.4.1. Prueba de linealidad

La finalidad de esta prueba fue comprobar la trayectoria rectilínea trazada por el sistema. Para ello, se dispuso de una zona demarcada con ayuda de una banda en una distancia de un

metro como se observa en la figura 20. Igualmente, se ubicó un distintivo en el equipo de manera que coincidiera con la banda en el suelo como se expone en la figura 21.

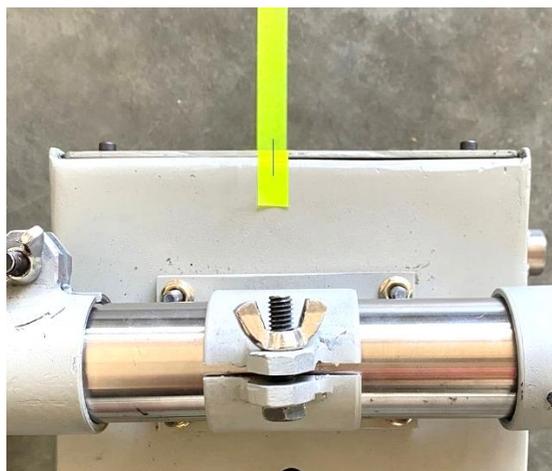
### Figura 20

*Zona demarcada para prueba de linealidad*



### Figura 21

*Montaje para la prueba de linealidad*



El desplazamiento se realizó en un rango de velocidades de 20-100 cm/min para examinar la influencia de este parámetro. Al finalizar el recorrido se registró la desviación presentada para cada velocidad como se evidencia en la tabla 6.

**Tabla 6***Resultados de la prueba de linealidad*

Velocidad [ $cm/min$ ]	Desviación [ $mm$ ]
20	2
40	2
60	5
80	6
100	10

A partir de los resultados mostrados en la tabla 6, se evidenció el incremento de la desviación con el aumento de la velocidad del sistema, lo cual se atribuyó a la vibración generada por las irregularidades de la superficie donde se ejecutó la actividad. Sin embargo, teniendo en cuenta la distancia recorrida de un metro, esta desviación no representó un problema en el desarrollo del proceso de soldadura.

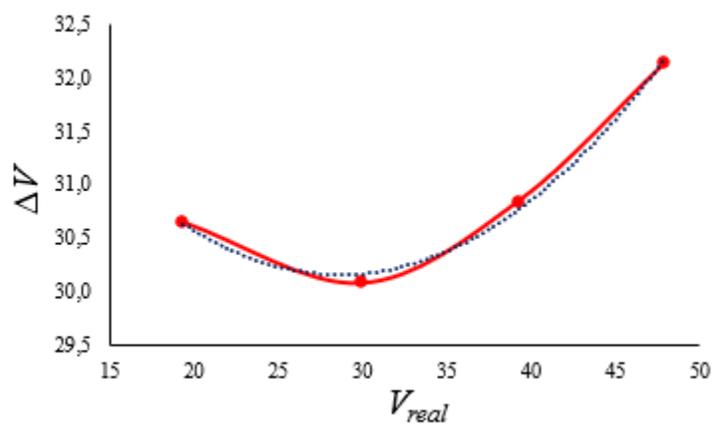
#### **2.4.2. Prueba de velocidad**

Con el fin de evaluar la exactitud de los valores de velocidad efectuados en la operación del sistema, se preparó una distancia de 30 cm teniendo en cuenta las limitaciones de espacio en el lugar de trabajo y, se registró tres veces el tiempo empleado para obtener un promedio representativo por cada cifra de velocidad. En la tabla 7 se exponen los valores obtenidos.

Los resultados se segmentaron con el fin de obtener gráficas que describieron el comportamiento de la velocidad real ingresada al sistema y la velocidad real ejecutada. En el primer rango de valores se expone la figura 22, las velocidades entre 50 y 80 cm/min se representaron en la figura 23 y para los valores mayores de 80 cm/min se elaboró la figura 24.

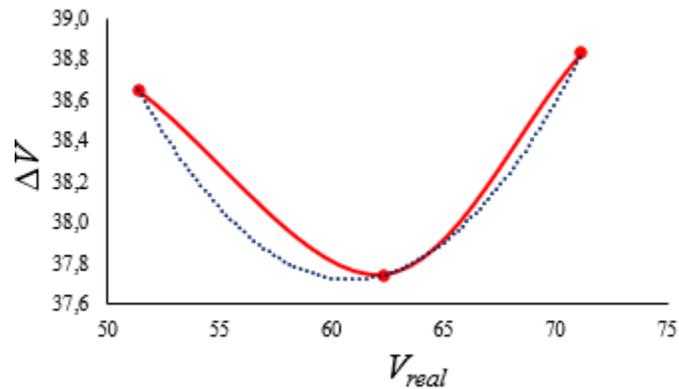
**Tabla 7***Prueba de velocidad*

$V_{teórica} \left[ \frac{cm}{min} \right]$	$t_1 [s]$	$t_2 [s]$	$t_3 [s]$	$t_{prom} [s]$	$V_{real} \left[ \frac{cm}{min} \right]$	$\Delta V \left[ \frac{cm}{min} \right]$	% <i>Error</i>
150	15.03	14.76	15.05	14.95	120.43	29.57	19.71%
140	16.04	16.13	15.93	16.03	112.27	27.73	19.81%
130	18.29	18.09	18.12	18.17	99.08	30.92	23.78%
120	20.96	20.98	21.12	21.02	85.63	34.37	28.64%
110	25.34	25.24	25.62	25.4	70.87	39.13	35.58%
100	28.89	28.93	28.74	28.85	62.39	37.62	37.62%
90	35.34	34.76	35.08	35.06	51.34	38.66	42.95%
80	37.59	37.62	37.49	37.57	47.91	32.09	40.11%
70	46.28	45.65	46.21	46.05	39.09	30.91	44.16%
60	60.68	59.65	60.32	60.22	29.90	30.11	50.18%
50	93.49	92.57	93.15	93.07	19.34	30.66	61.32%

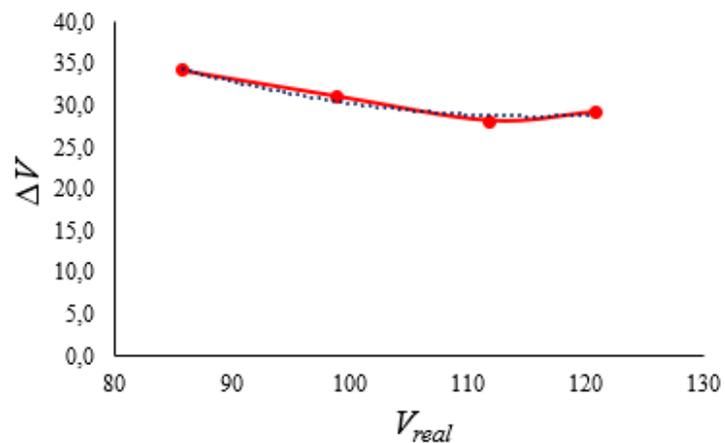
**Figura 22***Relación de velocidades para valores menores de 50cm/min*

**Figura 23**

*Relación de velocidades para rango de valores de 50-80cm/min*

**Figura 24**

*Relación de velocidades para valores mayores a 80cm/min*



A partir de las figuras se obtuvieron las ecuaciones de las curvas presentes en cada una. La ecuación 31 determinó el rango de valores menores de 50cm/min. Para el siguiente conjunto de datos se estableció la ecuación 32 y de igual forma, la ecuación 33 incluyó la información de la figura 24.

$$\text{Diferencia} = 0.0055V_{real}^2 - 0.3135V_{real} + 34.648 \quad (31)$$

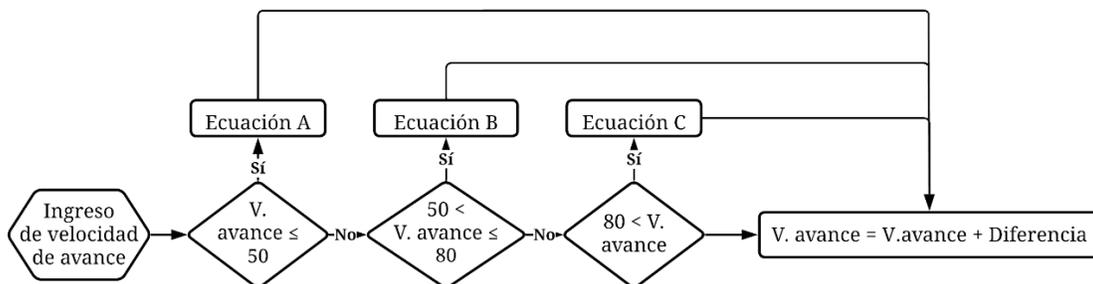
$$\text{Diferencia} = 0.0104V_{real}^2 - 1.2596V_{real} + 76.023 \quad (32)$$

$$\text{Diferencia} = 0.0063V_{real}^2 - 1.4524V_{real} + 112.82 \quad (33)$$

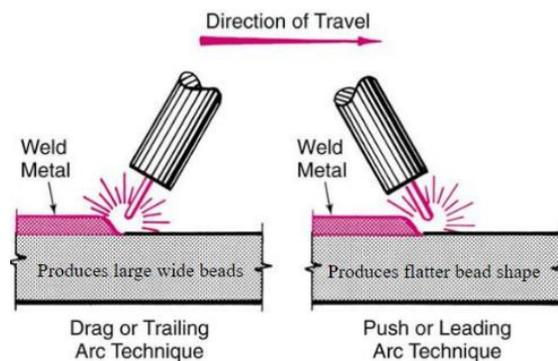
Estas ecuaciones se integraron en la programación con el objetivo de ajustar los valores de la velocidad de avance. Esta operación se realizó utilizando las condicionales if y else if que permitieron encontrar el valor diferencial, según la figura 25.

**Figura 25**

*Algoritmo de ajuste valor de diferencia*



Luego de implementar el ajuste, se realizaron nuevamente las pruebas de velocidad. Teniendo en cuenta la disposición de la antorcha de soldadura se examinaron dos casos: cuando el alambre del electrodo está en la dirección del desplazamiento y cuando está contrario a la dirección del desplazamiento según se muestra en la figura 26. Los resultados de la prueba en movimientos de empuje y arrastre se presentan en las tablas 8 y 9 respectivamente.

**Figura 26***Disposición de la antorcha de soldadura*

*Nota.* Tomado de Welding: Principles and Practices [Fotografía], Sacks, 1981

**Tabla 8**

*Valores corregidos prueba de velocidad en el modelo de empuje*

$V_{teórica}$ [ $\frac{cm}{min}$ ]	$t_1$ [s]	$t_2$ [s]	$t_3$ [s]	$t_{prom}$ [s]	$V_{real}$ [ $\frac{cm}{min}$ ]	$\Delta V$ [ $\frac{cm}{min}$ ]	% <i>Error</i>
10	178.12	185.15	187.13	183.47	9.81	0.19	1.93
20	92.53	91.45	92.45	92.14	19.53	0.47	2.38
30	62.05	63.24	61.86	62.38	28.85	1.15	3.97
40	46.78	46.35	46.92	46.68	38.56	1.44	3.74
50	37.56	38.32	36.68	37.52	47.97	2.03	4.22
60	32.29	31.65	31.72	31.89	56.45	3.55	6.29
70	27.14	28.22	27.53	27.63	65.15	4.85	7.45
80	22.79	23.51	26.36	24.22	74.32	5.68	7.64

**Tabla 9***Valores corregidos prueba de velocidad en el modelo de arrastre*

$V_{teórica}$ $\left[\frac{cm}{min}\right]$	$t_1$ [s]	$t_2$ [s]	$t_3$ [s]	$t_{prom}$ [s]	$V_{real}$ $\left[\frac{cm}{min}\right]$	$\Delta V$ $\left[\frac{cm}{min}\right]$	% <i>Error</i>
10	180.83	178.61	183.39	180.94	9.95	0.05	0.52
20	89.62	91.38	90.41	90.47	19.90	0.10	0.52
30	61.93	60.26	62.73	61.64	29.20	0.80	2.73
40	44.78	45.65	46.76	45.73	39.36	0.64	1.62
50	36.58	37.43	37.12	37.04	48.59	1.41	2.90
60	31.15	32.98	30.34	31.49	57.16	2.84	4.97
70	26.12	27.23	27.69	27.01	66.63	3.37	5.05
80	23.89	23.34	23.87	23.70	75.95	4.05	5.33

Según los resultados obtenidos se evidenció que para velocidades de operación bajas el porcentaje de error es menor y aumentó en velocidades altas. Se determinaron posibles causas que generaban este fenómeno entre las cuales se destacó la irregularidad de la superficie de trabajo y la imprecisión en la toma de los tiempos. Se debe tener en cuenta que los procesos de soldadura se realizan generalmente a bajas velocidades para garantizar el aporte correcto y la fusión de los materiales. Del mismo, se observó la influencia de la posición de la antorcha en arrastre generando un impulso positivo en el movimiento, reflejado en el porcentaje de error de la tabla 9.

#### **2.4.3. Prueba de calidad de soldadura**

Como se expuso en el apartado 2.1.2, el control de los parámetros determinó la calidad del cordón de soldadura, por lo cual, para comprobar los resultados óptimos del proceso, se llevaron a cabo revisiones de trazo, linealidad y continuidad en el cordón de soldadura.

En la figura 27 aparecen los resultados obtenidos a partir de la operación del sistema. Los parámetros de trabajo utilizados se muestran en la tabla 10.

### Figura 27

*Resultados de la prueba de calidad de la soldadura*



### Tabla 10

*Parámetros de ajuste para prueba de soldadura*

Velocidad de desplazamiento [ <i>cm/mm</i> ]	13
Velocidad de oscilación [ <i>rpm/mm</i> ]	8
Angulo de oscilación [°]	2.75
Retraso central [ <i>cs</i> ]	20
Retraso hacia la derecha [ <i>cs</i> ]	5
Retraso hacia la izquierda [ <i>cs</i> ]	5

Como se evidencia en la figura 27, la geometría de los cordones de soldadura se mantuvo uniforme durante la realización de la prueba. No obstante, se presumió que las discontinuidades fueron causa de la regulación de los parámetros de las herramientas de soldadura, tales como el voltaje alto o bajo, la velocidad de alimentación del material de aporte, insuficiencias en el gas de protección, entre otras.

### **3. Desarrollo del manual de funcionamiento y mantenimiento**

Como parte del ejercicio de diseño y construcción del sistema programable de transporte y aplicación de soldadura lineal se ofrece una guía gráfica de operación y mantenimiento mediante el manual visto en el apéndice H. El objetivo principal de este recurso es orientar al usuario durante los procesos posteriores de trabajo.

#### 4. Análisis de costos

Se realizó un presupuesto según la ejecución realizada durante la elaboración e implementación del sistema programable de transporte para la aplicación de soldadura lineal. En las tablas 11 a 18, se detallan los conceptos implicados, finalmente, en la tabla 19, se encuentra el valor total del proyecto. Adicionalmente, se evaluó la desviación del presupuesto comparando los valores estimados iniciales con los finalmente invertidos.

**Tabla 11**

*Inversión por asesoría académica*

<b>Personal</b>	<b>Valor hora</b>	<b>Número de horas</b>	<b>Fuente</b>	<b>Valor total</b>
Director de proyecto de grado	\$305.000	16	UIS-ESPECIE	\$4.880.000
Codirector de proyecto de grado	\$11.500	16	UIS-ESPECIE	\$184.000
			<b>Total</b>	<b>\$5.064.000</b>

**Tabla 12**

*Inversión de materiales e insumos de manufactura*

<b>Concepto</b>	<b>Fuente</b>	<b>Valor estimado</b>	<b>Valor total</b>	<b>Desviación</b>
Subsistema de desplazamiento	UIS-MECÁNICA	\$600.000	\$617.000	2.75%
Subsistema de oscilación	UIS-MECÁNICA	\$450.000	\$464.570	3.13%
Subsistema de control	UIS-MECÁNICA	\$400.000	\$402.900	0.72%
Bastidor	UIS-MECÁNICA	\$500.000	\$485.984	-2.88%
Sistemas de sujeción	UIS-MECÁNICA	\$250.000	\$100.000	-150%

Ensamblaje del sistema	UIS-MECÁNICA	\$500.000	\$680.000	26.47%
Otros insumos	UIS-MECÁNICA	\$350.000	\$320.000	-9.375
<b>Total</b>		\$3.050.000	\$3.070.454	0.66%

**Tabla 13**

*Detalle inversión subsistema de desplazamiento*

Concepto	Valor total
Controlador de velocidad motor DC	\$95.000
Motor DC de doble eje	\$270.000
Varilla lisa	\$12.000
Rodamientos rígidos de bolas <b>x4</b>	\$240.000
<b>Total</b>	<b>\$617.000</b>

**Tabla 14**

*Detalle inversión subsistema de oscilación*

Concepto	Valor total
Controlador de motor paso a paso	\$152.100
Motor paso a paso	\$264.500
Tubería 1 ½"	\$23.630
Tubería 1 ¼"	\$24.340
<b>Total</b>	<b>\$464.570</b>

**Tabla 15***Detalle inversión subsistema de control*

<b>Concepto</b>	<b>Valor total</b>
Fuente de poder	\$30.000
Microcontrolador arduino mega	\$187.000
Pantalla TFL LCD	\$78.000
Teclado matricial	\$15.600
Protoboard	\$45.000
Resistencias de precisión	\$12.000
Leds	\$11.700
Pulsadores	\$5.500
Jumpers de conexión	\$18.100
<b>Total</b>	<b>\$402.900</b>

**Tabla 16***Detalle inversión del bastidor*

<b>Concepto</b>	<b>Valor total</b>
Lámina de acero A36, espesor 1/8"	\$261.088
Lámina de acero A36, espesor 1/4"	\$92.580
Lámina de acero A36, espesor 3/8"	\$132.316
<b>Total</b>	<b>\$485.984</b>

**Tabla 17***Inversión para pruebas*

<b>Concepto</b>	<b>Valor hora / Valor unitario</b>	<b>Números de horas / Cantidad</b>	<b>Fuente</b>	<b>Valor total</b>
Equipo de soldadura	\$9.200.000	1	UIS-MECÁNICA	\$9.200.000
Consumibles	\$200.000	1	TESISTAS-ESPECIE	\$200.000
Piezas de soldar	\$300.000	1	TESISTAS-ESPECIE	\$300.000
Equipo de protección	\$150.000	2	TESISTAS-ESPECIE	\$300.000
Insumos de verificación de calidad	\$195.000	1	UIS-SIMA	\$195.000
Auxiliar de laboratorio	\$7.000	10	UIS-SIMA	\$70.000
			<b>Total</b>	<b>\$10.265.000</b>

**Tabla 18***Inversión para documentación y divulgación*

<b>Concepto</b>	<b>Fuente</b>	<b>Valor total</b>
Papelería	Tesistas-Especie	\$200.000
Licencia SolidWorks	UIS-Especie	\$9.607.500
Material bibliográfico	UIS-Especie	\$1.000.000
Divulgación del proyecto	UIS-Profesor Planta Proyecto	\$2.500.000
<b>Total</b>		<b>\$13.307.500</b>

**Tabla 19***Inversión global del proyecto*

<b>Concepto</b>	<b>Valor Estimado</b>	<b>Valor total</b>	<b>Desviación</b>
Asesoría académica	\$5.064.000	\$5.064.000	0 %
Materiales e insumos para la manufactura	\$3.050.000	\$3.070.454	0.66%
Pruebas	\$10.265.000	\$10.265.000	0%
Diseño, Documentación y Divulgación	\$14.107.500	13.307.500	-6.01%
<b>Total</b>	\$32.486.500	\$31.706.954	
<b>Imprevistos (10%)</b>	\$3.248.650	\$3.170.695,4	
<b>Total, con imprevistos</b>	\$35.735.150	\$34.877.649,4	-2.46%

## 5. Conclusiones

Se desarrolló el diseño y construcción del sistema programable de transporte para la aplicación de soldadura lineal. La metodología utilizada empleó la fragmentación del sistema general con base en sus tres funciones principales, las cuales son el desplazamiento del sistema, el movimiento oscilatorio de la antorcha y la comunicación y sincronía entre los componentes electrónicos, para abordar por técnicas de cálculo estáticas y dinámicas los sistemas de carga, así como la selección adecuada de materiales y procesos de fabricación disponibles, a su vez, generando los algoritmos de ejecución de las funciones en el subsistema de control.

El subsistema de desplazamiento permitió el movimiento en línea recta del equipo trasladándose a velocidades en el rango de 0-120 cm/min. Este tipo de equipos requiere pruebas de linealidad, repetibilidad y reproducibilidad de trayectorias las cuales fueron ejecutadas. Al comprobar la funcionalidad del sistema, se atribuyen desviaciones de la trayectoria a condiciones como rugosidades de superficie, eficiencias de transmisión y pesos del sistema de soldadura, los cuales fueron corregidos a través de experimentación y corrección numérica en la programación, elementos mostrados en el apartado 2.4.2.

Con los requerimientos implícitos en los procesos de soldadura se implementó el movimiento oscilatorio, que es programado por el usuario según las necesidades operacionales, teniendo en cuenta la velocidad de giro, el ángulo de oscilación y los retardos. Conscientes de la necesidad geométrica de extensión y elevación, se fabricaron un conjunto de elementos para ajustar la posición vertical y horizontal de la antorcha de soldadura. En cuanto al sistema de accionamiento, se determinaron y programaron las variables involucradas, sin embargo, se

prescindió su implementación por el sistema cuatro tiempos que permite el accionamiento de la antorcha automático al iniciar el ciclo.

Se desarrolló el subsistema de control brindando una interfaz amigable para el usuario en el proceso de regulación de los parámetros dinámicos, a partir de las configuraciones desarrolladas y descritas en el manual de operación y mantenimiento adjunto en este proyecto.

Para verificar el funcionamiento y la estabilidad del sistema, se realizaron pruebas de desempeño en factores de linealidad, velocidad de desplazamiento y calidad del cordón de soldadura. En la prueba de linealidad se encontró una desviación despreciable, sin consecuencias en el proceso de soldadura. Por otro lado, en la prueba de velocidad se determinó el factor de corrección para los valores de operación en el rango establecido de funcionamiento. Finalmente, la relación entre la oscilación y el desplazamiento permitieron la creación de cordones de soldadura uniformes verificados según su trazo, continuidad y linealidad.

Como parte del proceso de aprendizaje y divulgación del conocimiento, se redactó el reporte ‘Meaningful learning through the design process of an electric arc welding mechanized application system’ sustentado en el congreso ‘International Meeting for Researchers in Materials & Plasma Technology – IMRMPT 5+1’ el cual tuvo lugar en la ciudad de Medellín del 2-4 de junio del 2021, disponible en <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2046/1/012077>

El ejercicio del diseño tiene un papel importante en la formación profesional del ingeniero, debido a su impacto en el comportamiento y la toma de decisiones, proporcionando las herramientas necesarias para lograr la autonomía en situaciones que requieran su desempeño.

Este proyecto contribuye al fortalecimiento de la automatización de los procesos de soldadura debido al incremento de proyectos de infraestructura e ingeniería en Colombia, siendo escenarios como la construcción civil, la minería, el sector del petróleo y gas, los cuales implican el uso de maquinaria amarilla que requiere por mantenimiento la incorporación de procesos de soldadura dentro de sus rutinas habituales. Además, se favorecen los procesos de investigación que puedan desarrollarse en torno a esta temática en la escuela de ingeniería mecánica de la universidad.

La proyección de gastos presentada en el plan de trabajo fomentó la planificación y el control de los recursos durante la ejecución de las actividades de diseño y fabricación del sistema. Este comportamiento se refleja en las tablas presupuestales del apartado 5 donde la desviación entre los valores supuestos y los reales gastados se mantuvo bajo el rango del 3%.

## **6. Recomendaciones**

La implementación de una programación diferente para el movimiento oscilatorio y el desplazamiento del sistema posibilita la ampliación del rango de caligrafías, así como procedimientos de relleno y plug weld.

Adaptar al sistema un control de avance en los tres ejes de movimiento permite el desarrollo de la manufactura aditiva por soldadura mediante la superposición de capas.

La incorporación de sistemas que permitan la elevación de la antorcha permite la realización de los procesos de soldadura de forma ascendente y descendente.

### Referencias Bibliográficas

- Acevedo, J. A., Porras, K., Bohórquez, O., & Martínez, M. (2021). Meaningful learning through the design process of an electric arc welding mechanized application system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2046(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2046/1/012077>
- Alibaba.com. *Hk-5c Huawei Filete Soldadora Tractor.*, de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/hk-5c-huawei-fillet-welding-tractor-60419627701.html>
- Amado, J. J. (2013, August 12). *Calificación de Soldadores – Industria y Gente.* <https://arcoindustrial.org/2013/08/12/calificacion-de-soldadores/>
- American Welding Society. (2010). *AWS A3.0: 2010 Standard Welding Terms and Definitions (A 3.0).*
- American Welding Society. (2015, October). *Stick Out.* [https://app.aws.org/forum/topic\\_show.pl?tid=34940](https://app.aws.org/forum/topic_show.pl?tid=34940)
- Arduino.cl. *Arduino UNO*, de <https://arduino.cl/arduino-uno/>
- Banco de la República. (2015). *PIB Total y por habitante a precios corrientes.* <https://totoro.banrep.gov.co/analytics/saw.dll?Go>
- Bohórquez, O., Pertuz, A., & Rincón-Ortíz, M. (2021). An overview framework of welding process selection, current state and expectatives. *Journal of Physics: Conference Series*, 2046(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2046/1/012076>
- Böllinghaus, T., Byrne, G., Cherpakov (deceased), B. I., Chlebus, E., Cross, C. E., Denkena, B., Dilthey, U., Hatsuzawa, T., Herfurth, K., Herold (deceased), H., Kaldos, A., Kannengiesser, T., Karpenko, M., Karpuschewski, B., Marya, M., Marya, S. K., Matthes, K.-J., Middeldorf, K., Oliveira, J. F. G., ... Woeste, K. (2009). *Manufacturing*

- Engineering. In *Springer Handbook of Mechanical Engineering* (pp. 523–785). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-30738-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30738-9_7)
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (9th ed.). McGraw Hill.
- Calderón, L., Bohórquez, O., Rojas, M. A., & Pertuz, A. (2021). Experimental relationship of tensile strength and hardness of welded structural steel. *Journal of Physics: Conference Series*, 2046(1), 012065. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2046/1/012065>
- Cho, D. W., Na, S. J., Cho, M. H., & Lee, J. S. (2013). A study on V-groove GMAW for various welding positions. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(9), 1640–1652. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2013.02.015>
- Construdata. (2020, March). Revista Construdata 194 | Construdata. *Legis*, 14. <https://www.construdata.com/revistas/revista-construdata-194>
- Cortés, Paula., Gómez, D., Posada, D., & Giraldo, J. (2012). Effect of oscillation on geometry of bead on plate welds applied with shortcircuit gmaw. En *Revista Colombiana de Materiales* (Issue 2). <https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/view/11283>
- Debroy, T., & David, S. A. (1995). Physical processes in fusion welding. *Reviews of Modern Physics*, 67(1), 85–112. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.67.85>
- ESAB. (2020). *Welding Tractors*. <https://www.esab.es/es/sp/products/welding-automation-robotics/gas-metal-arc-welding-gmaw/carriers-manipulators/welding-tractors/index.cfm>
- Feng, C. X., Huang, C. C., Kusiak, A., & Li, P. G. (1996). Representation of functions and features in detail design. *CAD Computer Aided Design*, 28(12), 961–971. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(96\)00027-9](https://doi.org/10.1016/0010-4485(96)00027-9)

- Govers, C. P. M. (1996). What and how about quality function deployment (QFD). *International Journal of Production Economics*, 46–47, 575–585. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(95\)00113-1](https://doi.org/10.1016/0925-5273(95)00113-1)
- Groover, M. P. (2019). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems* (Wiley, Ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Fundamentals+of+Modern+Manufacturing%3A+Materials%2C+Processes%2C+and+Systems%2C+7th+Edition-p-9781119475217>
- Guo, J. (2015). Solid state welding processes in manufacturing. In *HandBook of Manufacturing Engineering and Technology* (pp. 569–592). Springer-Verlag London Ltd. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4670-4\\_55](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4670-4_55)
- HepcoMotion. *GV3 - Sistema de Movimiento Lineal.*, de <https://www.hepcotion.com/es/producto/componentes-de-movimiento-lineal/gv3-sistema-de-guiado-y-transmision/>
- Huawei. *Welding carriage.*, de <https://www.huawei-cutting.com/welding-carriage-9.html>
- i40Store. *Servo Drive trifásico.*, de <https://i40store.com/products/umd-0050e-b3-servo-drive-trifasico-380-440-vac-5kw>
- ITM Industrial Tool and Machinery Sales. *Rail Bull Welding Carriage.*, de <https://www.industrialtool.com.au/product-group/540-rail-bull-welding-carriage/product>
- Jhon. (2011, June 11). *Motor paso a paso / 3D CAD Model Library*. GrabCAD. <https://grabcad.com/library/motor-paso-a-paso-1>
- Kang, C., Liu, Z., Chen, S., & Jiang, X. (2019). Circular trajectory weaving welding control algorithm based on space transformation principle. *Journal of Manufacturing Processes*, 46, 328–336. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.08.027>

- Kazakci, A. O., Gillier, T., Piat, G., & Hatchuel, A. (2015). Brainstorming vs. Creative Design Reasoning: A Theory-Driven Experimental Investigation of Novelty, Feasibility and Value of Ideas. In *Design Computing and Cognition '14* (pp. 173–188). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14956-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14956-1_10)
- Kim, L. S., Park, C. E., Jeong, Y. J., & Son, J. S. (2001). Development of an intelligent system for selection of the process variables in gas metal arc welding processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(2), 98–102. <https://doi.org/10.1007/s001700170080>
- Kim, Y.-B., Kim, J.-G., Jang, W.-T., Park, J.-R., Moon, H.-S., & Kim, J.-O. (2008). Development of Automatic Welding System for Multi-Layer and Multi-Pass Welding. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 4290–4291. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-kr-1001.00721>
- Kumanan, S., Edwin Raja Dhas, J., & Gowthaman, K. (2007). Determination of submerged arc welding process parameters using Taguchi method and regression analysis. In *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* (Vol. 14).
- Kumar, K., Kalita, H., Zindani, D., & Davim, J. P. (2019). *Materials and Manufacturing Processes*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-21066-3>
- Kusiak, A., & Wang, J. (1993). Decomposition of the design process. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 115(4), 687–695. <https://doi.org/10.1115/1.2919255>
- Liu, B., & Yan, X. (2019). A new model of multiaxial fatigue life prediction with the influence of different mean stresses: <https://doi.org/10.1177/1056789518824396>, 28(9), 1323–1343. <https://doi.org/10.1177/1056789518824396>

Lucey, J. A. (1964). Survey of welding processes. In *Annals of Occupational Hygiene* (Vol. 7, Issue 3, pp. 203–206). Oxford Academic. <https://doi.org/10.1093/annhyg/7.3.203>

Made In China. *ZT-5A Portable auto horizontal automatic fillet Welding Tractor.*, de <https://chdwelding.en.made-in-china.com/product/SjqQgpRuXUWw/China-ZT-5A-Portable-auto-horizontal-automatic-fillet-Welding-Tractor-For-220V.html>

Messler, R. W. (2004). *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*.

Ministerio del Trabajo. (2019, December 26). *Salario mínimo en Colombia - Ministerio del trabajo*. <https://www.mintrabajo.gov.co/web/guest/prensa/comunicados/2019/diciembre/salario-minimo-con-auxilio-de-transporte-para-los-trabajadores-colombianos-en-el-2020-sera-de-980-mil-657-pesos>

Montenegro Bernuy, A. (2017). *Construcción de una máquina para medir las características de los muelles*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/104949>

Naidu, D. S., Ozcelik, S., & Moore, K. L. (2003). Modeling, Sensing and Control of Gas Metal Arc Welding. In *Modeling, Sensing and Control of Gas Metal Arc Welding*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044066-8.X5000-9>

Nova, D. A. D., Martinez, M., & Bohórquez, O. (2021). Impact of mechanical properties of structural steel by three transfer modes in gas metal arc welding. *Journal of Physics: Conference Series*, 2046(1), 012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2046/1/012053>

Parker NA. *Electric Cylinders.*, de <https://ph.parker.com/us/en/electric-cylinders>

Petkov, N. (2014, August 24). *XY motion*. GrabCAD. <https://grabcad.com/library/xy-motion-1>

Rodachines Industriales y CIA LTDA. *Ruedas AF IMSA.*, de <https://www.rodachines.co/product-page/serie-af>

- Rojas, H., & Patarroyo, H. (2013). *Aproximación al estado del arte de la soldadura en Colombia y su comparación a nivel internacional*. Universidad Libre Seccional de Colombia.  
<https://docplayer.es/40910821-Aproximacion-al-estado-del-arte-de-la-soldadura-en-colombia-y-su-comparacion-a-nivel-internacional.html>
- Sacks, R. J. (1981). *Welding, principles, and practices*.
- SIEMENS. *LOGO! Módulo lógico | Controladores SIMATIC.*, de  
<https://new.siemens.com/mx/es/productos/automatizacion/systems/industrial/plc/logo.htm>  
1
- Silaban, F. A., Budiyanto, S., & Raharja, W. K. (2020). Stepper motor movement design based on FPGA. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 10(1), 151–159. <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i1.pp151-159>
- Thompson Martinez, R., Alvarez Bestard, G., & Absi Alfaro, S. C. (2021). Two gas metal arc welding process dataset of arc parameters and input parameters. *Data in Brief*, 35, 106790. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106790>
- TWECO, E. (2019). *Mig Guns, Welding Accessories & Consumables*.  
<https://www.esabna.com/shared/documents/litdownloads/64-2103.pdf>
- Uribe, C. L. (2008). *Un proceso rápido, limpio y versátil*. <http://www.reisrobotics.de>
- Wang, B., Hu, S. J., Sun, L., & Freiheit, T. (2020). Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives. In *Journal of Manufacturing Systems* (Vol. 56, pp. 373–391). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.020>

## Apéndices

### Apéndice A. Ofertas de máquinas del mercado.

A continuación, se presentan algunas de las opciones que se pueden encontrar hoy en día en el mercado nacional e internacional.

#### **Mercado Nacional (Colombia)**

La empresa ESAB mediante su distribuidora West Arco es la principal compañía que ofrece equipos semiautomáticos para soldadura a nivel nacional, a continuación, se detallan las máquinas y se denotan sus características principales:

#### ***Miggytrac B501***

Es un tractor compacto, impulsado por baterías que automatiza fácilmente el proceso de soldadura GMAW, plasma y oxicorte. Ideal para su uso con las fuentes de alimentación semiautomáticas y las unidades de alimentación de ESAB. Cuenta con lo último en tecnología de motores paso a paso para una alta eficiencia, que proporcionan desplazamiento suave en bajas y altas velocidades (hasta 130 cm/min). Las cuatro ruedas de alta fricción, como se observa en la figura 1, aseguran un movimiento estable incluso en superficies inclinadas hasta un ángulo de 45°, además, la tracción y velocidad del desplazamiento permanecen constantes hasta el final del tiempo de operación de la batería.

#### ***Miggytrac B5001***

Puede ser usado para aplicaciones continuas e intermitentes de soldadura. Cuando se conecta a un alimentador de hilo ESAB puede establecer el voltaje y la velocidad de alimentación del cable en porcentaje directamente de la unidad. En la figura 2 se puede observar

la interfaz del sistema, consiste en una gran pantalla TFT multicolor que simplifica la configuración de la velocidad de viaje, la puntada o soldadura continua, la longitud de la soldadura y las distancias entre las soldaduras. Otros ajustes adicionales incluyen el precalentamiento, tiempo de relleno de cráteres y espalda. Los operadores pueden ajustar varias funciones para mejorar la calidad de la soldadura, estándares de cordones, tipos de oscilaciones y hasta programar una velocidad de movimiento intermitente más rápido entre los puntos de soldadura. (hasta 170 cm/min).

### Figura 1

*Miggytrac B501*



*Nota:* Tomado de Equipos de Automatización de Soldadura [Fotografía], 2020, ESAB, (<https://www.esab.es/es/sp/products/welding-automation-robotics/gas-metal-arc-welding-gmaw/carriers-manipulators/welding-tractors/index.cfm>)

### Figura 2

*Miggytrac B5001*



*Nota.* Tomado de Equipos de Automatización de Soldadura [Fotografía], 2020, ESAB, (<https://www.esab.es/es/sp/products/welding-automation-robotics/gas-metal-arc-welding-gmaw/carriers-manipulators/welding-tractors/index.cfm>)

***RailTrac B42V***

Es un sistema de tractor de soldadura de componentes, que puede ser configurado para crear la solución óptima para aplicación de soldadura mecanizada. Para minimizar los problemas asociados a los entornos difíciles, la mayoría de las piezas mecánicas están construidas en aluminio o acero inoxidable. El Railtrac B42V visto en la figura 3, está diseñado para subir/bajar en horizontal y en vertical cuando sea aplicable. En las funciones de desplazamiento y oscilación implementan motores de paso que garantizan un buen funcionamiento y alta precisión. Asimismo, los operadores pueden programar patrones de oscilación, velocidad de desplazamiento, tensión y velocidad alimentación de alambre para cinco programas estándar.

**Figura 3*****RailTrac B42V***

*Nota:* Tomado de Equipos de Automatización de Soldadura [Fotografía], 2020, ESAB, (<https://www.esab.es/es/sp/products/welding-automation-robotics/gas-metal-arc-welding-gmaw/carriers-manipulators/welding-tractors/index.cfm>)

Para dar por concluido este apartado, en la tabla 1 se realiza una comparativa entre los tractores de soldadura expuestos anteriormente, con el fin de identificar y articular semejanzas y diferencias esenciales entre ellos.

**Tabla 1***Comparativa Datos Técnicos Tractores de Soldadura ESAB*

<b>Datos técnicos</b>	<b>Miggytrac B501</b>	<b>Miggytrac B5001</b>	<b>RailTrac BV42</b>
Alimentación	Batería 18VDC	42V AC por la fuente o batería 18VDC	24 – 70 VCC, 20 – 50 VCA, Batería 18V
Tiempo de Funcionamiento (Batería)	8 h	6 h	3 – 4 h
Velocidad de Desplazamiento	10 – 130 cm/min	1 – 170 cm/min	30 mm/s
Ángulo máximo o ajuste de altura	45°	45°	+/- 45 mm
Peso	12 kg	13 kg	8 kg
Oscilación	No	No	Si
Sistema de Arrastre	Ruedas resistentes a la temperatura	Ruedas resistentes a la temperatura	Rieles con imanes o ventosas
Precio sin Iva	8.373.000	11.700.000	35.000.000

**Mercado internacional**

A diferencia del mercado nacional, la oferta extranjera es más extensa en equipos de esta categoría, no obstante, presentan más limitaciones debido a los costos adicionales que deben asumirse, tales como, valor de envío e impuestos de importación, adicionalmente no se cuenta con servicio técnico por parte del proveedor y la disponibilidad está sujeta a muchas variables. Seguidamente, se exponen algunos modelos que cuentan con características similares a los modelos disponibles a nivel nacional.

***HK-5C***

Es un equipo que se puede utilizar para cortar o para soldar el filete horizontal continuo. La velocidad máxima de funcionamiento de la carretilla de soldadura en el momento de no soldar es de 1900mm/min. Hay un dispositivo para la escorrentía y el tiempo de escorrentía es 0-7 segundos. La soldadura puede ser izquierda o derecha, posee interruptores inductivos en ambos lados del sistema, como se observa en la figura 4, así que cuando la soldadura está terminada el tractor se puede detener automáticamente, esto es conveniente para que un trabajador opere varios equipos. Además, hay un imán permanente para evitar que el mecanismo desenganche el cable de sellado (Alibaba.com).

**Figura 4**

*Tractor de soldadura HK-5C*



*Nota.* Tomado de HK-5C Huawei Fillet Welding Tractor [Fotografía], Alibaba.com, (<https://spanish.alibaba.com/product-detail/hk-5c-huawei-fillet-welding-tractor-60419627701.html>)

***ZT-5A***

Es un dispositivo de soldadura automática que se utiliza en la industria de la soldadura de ángulo horizontal. Con este aparato se logra soldadura de dos direcciones, también, en el extremo del sistema hay un interruptor de inducción instalado, con lo cual el coche puede detenerse automáticamente después de terminar su trabajo. Entre sus características principales

se destacan su pequeño volumen, peso ligero, su conveniencia para instalar y mover, una imagen de este dispositivo puede apreciarse en la figura 5. La instalación de imanes permanentes tiene como fin evitar que el coche se caiga de la línea de soldadura, permitiendo que pueda ser instalado en el plano vertical. De la misma forma, cuenta con excelente función de control de arco plegado, evitando efectivamente la escoria de soldadura de arco y los defectos de los cráteres. Entre otras características, incluye una pantalla de velocidad precisa que muestra los parámetros del proceso de soldadura correspondiente facilitando su operación.

### **Figura 5**

*Tractor de Soldadura ZT-5A*



*Nota.* Tomado de ZT-5A Portable auto horizontal automatic fillet Welding Tractor [Fotografía], Made In China, (<https://chdwelding.en.made-in-china.com/product/SjqQgpRuXUWw/China-ZT-5A-Portable-auto-horizontal-automatic-fillet-Welding-Tractor-For-220V.html>)

### **HK-5W**

Como se ilustra en la figura 6, es un dispositivo compuesto por un cuerpo que es el marco de la máquina y el portador de las demás partes, asimismo, el sistema de arrastre está compuesto por llantas de goma, engranaje angular, cadena y polea de cadena. Por otro lado, el sistema permite que la antorcha de soldadura se ajuste hacia arriba y abajo siguiendo un patrón oscilante, además se puede ajustar la velocidad y el ángulo de oscilación. El tractor cuenta también, con un

sistema inductivo de parada que permite la auto detención del movimiento cuando se ha finalizado el cordón de soldadura.

### **Figura 6**

*Tractor de Soldadura HK-5W*



*Nota.* Tomado de HK-5A Wavering Auto Welding Carriage [Fotografía], Huawei, (<https://www.huawei-cutting.com/welding-carriage-9.html>)

### ***Rail Bull***

Es un carro de soldadura de vías diseñado para producir soldaduras a tope y en ángulo con o sin oscilación. El carro puede trabajar en las posiciones de soldadura plana (1F/1G), horizontal vertical (2F), horizontal (2G), horizontal-vertical (4F), superior (4G) y vertical-arriba / vertical-abajo (3G). Posee un diseño compacto y ligero con una carcasa de aluminio fundido, asimismo, un mecanismo de sujeción rápida de antorchas para diferentes tipos de antorchas MIG/MAG con diámetros de 16-22mm; opción de hasta 35mm. En la figura 7 se aprecia una imagen de esta máquina que igualmente cuenta con una pantalla LED multifuncional que permite observar los parámetros de proceso y advertencias. La activación y desactivación automática del arco inicia la soldadura y el recorrido, simultáneamente. El sistema de control de posición consta de un motor eléctrico con codificador que asegura una mayor precisión de la velocidad y el posicionamiento. El arrastre del carro se realiza mediante un sistema de rieles rígidos y la transmisión por cremallera y piñón.

**Figura 7***Tractor de Soldadura Rail Bull*

*Nota.* Tomado de Rail Bull Welding Carriage [Fotografía], ITM Industrial Tool and Machinery Sales, (<https://www.industrialtool.com.au/product-group/540-rail-bull-welding-carriage/category/838-welding-carriages>)

Como resumen de esta información, la tabla 2 compara los tractores de soldadura discutidos para identificar y aclarar las similitudes y diferencias esenciales entre ellos.

**Tabla 2***Comparativa de Equipos Ofertados a Nivel Internacional*

<b>Datos Técnicos</b>	<b>HK-5C</b>	<b>ZT-5A</b>	<b>HK-5W</b>	<b>Rail Bull</b>
Alimentación	24 V DC	220 V	24 V DC	115 – 230 V
Dimensiones	320 mm x 230 mm x 290 mm	298 mm x 240 mm x 269 mm	430 mm x 280 mm x 290 mm	-
Velocidad de Desplazamiento	30-1900 mm/min	0-990 mm/min	50 – 1900 mm/min	0 – 1200 mm/min
Ángulo Máximo o Ajuste de Altura	+/- 45°	+ 45°	+/- 45°	-
Peso	8,5 kg	8,1 kg	12 kg	20 kg
Oscilación	No	No	Si	Si
Sistema de Arrastre	Ruedas de alta tracción	Ruedas de alta tracción	Ruedas de alta tracción	Sistema de rieles rígidos
Precio en dólares	900	500-1000	1000 - 1500	4500

### **Apéndice B. Matriz de Calidad. Planteamiento y Selección de Alternativas.**

En el ejercicio de selección de las alternativas, se desarrolla una matriz de calidad por cada subsistema, con el propósito de encontrar los tres factores más importantes con su respectiva ponderación para finalmente, evaluar las opciones propuestas para el desarrollo del sistema programable de transporte y aplicación de soldadura lineal. Los parámetros se evalúan mediante la siguiente calificación:

- ❖ No tiene relación: se utiliza el valor de 0.
- ❖ Nivel bajo de relación: se utiliza el valor de 1.
- ❖ Nivel medio de relación: se utiliza el valor de 3.
- ❖ Nivel superior de relación: se utiliza el valor de 9.

#### **Matriz de Calidad para el Subsistema de Oscilación**

Las necesidades del cliente y las especificaciones del diseñador se relacionan en la tabla 1.

Requerimientos del usuario:

- ❖ Uniformidad del cordón (U.C): garantizar un cordón de soldadura con alta reproducibilidad.
- ❖ Precio (\$): el valor del sistema debe ajustarse a un presupuesto adecuado (inferior al valor del mercado).
- ❖ Facilidad de ajuste (F.A): capacidad de ajustar de forma rápida y sencilla los parámetros implicados en la oscilación.
- ❖ Caligrafías distintas (C.D): brindar diferentes estilos de caligrafía según las preferencias del usuario.

- ❖ **Mantenibilidad (M):** capacidad de mantener el equipo en condiciones óptimas de funcionamiento.  
Requerimientos del diseñador:
- ❖ **Liviano (L):** un subsistema de bajo peso evita sobrecargar la máquina, permitiendo mayor fluidez en el movimiento.
- ❖ **Costos (C):** se estima que el valor final del producto se ajuste a los fondos del cliente.
- ❖ **Facilidad de programación (F.P):** un diseño sencillo simplifica la codificación e implementación de las distintas variables del proceso de soldadura.
- ❖ **Grados de libertad (G.L):** hace referencia a los diferentes tipos de movimiento del sistema.
- ❖ **Confiabilidad (CF):** asegura el funcionamiento adecuado del equipo.
- ❖ **Estabilidad (E):** se garantiza que la antorcha estará fija durante todo el recorrido de la máquina.

**Tabla 1***Matriz de calidad subsistema de oscilación*

		L		C		F.P		G.L		CF		E	
		Cal.	Pond.										
<b>5</b>	U.C	0	0	1	5	3	15	9	45	3	15	9	45
<b>4</b>	\$	3	12	9	36	1	4	0	0	0	0	0	0
<b>3</b>	F.A	3	9	1	3	0	0	0	0	3	9	1	3
<b>2</b>	C.D	0	0	0	0	3	6	9	18	1	2	0	0
<b>1</b>	M	1	1	9	9	0	0	0	0	3	3	0	0
<b>Total</b>		22		53		25		63		29		48	

Después de realizar el ejercicio de la matriz de función calidad se obtienen los 3 factores de diseño de mayor relevancia, los cuales están compuestos por: grados de libertad, costos y estabilidad.

### **Matriz de Calidad para el Subsistema de Desplazamiento**

A continuación, se realiza el despliegue de características expuestas por el consumidor y el diseñador. En la tabla 2 se observa la matriz que relaciona dichas características.

Requerimientos de usuario:

- ❖ Precio (\$): el valor del sistema debe ajustarse a un presupuesto inferior a los valores de mercado.
- ❖ Tiempo de preparación (T.P): se refiere al tiempo requerido para instalar el equipo en el lugar de trabajo.
- ❖ Portabilidad (P): facilidad de transporte del equipo de un lugar de trabajo a otro.
- ❖ Precisión (P.C): es el grado de ajuste con el cual debe contar el mecanismo para mantener su trayectoria lineal.
- ❖ Mantenibilidad (M): requerimiento bajo de intervención para mantener las condiciones funcionales del equipo.

Requerimientos del diseñador:

- ❖ Control de movimiento (C.M): capacidad de regular los parámetros implícitos en el movimiento de traslación.
- ❖ Estabilidad (E): seguridad del equipo para evitar volcamientos.
- ❖ Simplicidad de diseño (S.D): sencillez en la integración al sistema final.
- ❖ Montaje e incorporación (M.I): facilidad en la puesta en marcha del equipo en diferentes ambientes operativos.
- ❖ Costos(C): se estima que el valor final del producto se ajuste a los fondos del cliente (inferior a los precios del mercado).

- ❖ Facilidad de mantenimiento (F.M): se debe seleccionar un diseño que pueda mantenerse de forma práctica y sencilla para alargar la durabilidad del equipo.

**Tabla 2***Matriz de Calidad Subsistema de Desplazamiento*

		C.M		E		S. D		M.I		C		F.M	
		Cal.	Pond.										
5	\$	0	0	0	0	0	0	1	5	9	45	3	15
4	T.P	0	0	0	0	1	4	9	36	0	0	1	4
3	P	0	0	0	0	9	36	3	12	0	0	1	4
2	P.C	9	18	9	18	0	0	0	0	1	2	1	2
1	M	0	0	1	1	0	0	3	3	9	9	9	9
Total		18		19		40		56		56		34	

**Matriz de Calidad Subsistema de Control**

En la tabla 3, se representa el vínculo entre las demandas del cliente y la oferta técnica establecidas por el diseñador.

## Requerimientos del usuario

- ❖ Facilidad de uso (F.U): la utilización del equipo se comprende de manera sencilla.
- ❖ Tiempo de respuesta (T.R): el sistema de control ejecuta las acciones de forma rápida.
- ❖ Costos (\$): el valor del sistema debe ajustarse a un presupuesto adecuado.
- ❖ Intuitivo (I): el entendimiento del sistema es inmediato.

## Requerimientos del diseñador

- ❖ Facilidad de programación (F.P): un diseño sencillo simplifica la codificación e implementación de las distintas variables del proceso de soldadura.
- ❖ Costo (C): se estima que el valor final del producto se ajuste a los fondos del cliente.

- ❖ Portabilidad (P): facilidad de transporte del equipo de un lugar de trabajo a otro.
- ❖ Compatibilidad (CD): permite el funcionamiento de diversos componentes electrónicos implicados en el diseño.

**Tabla 3**

*Matriz de Calidad Subsistema de Control*

		F. P		C		P		C.D	
		Cal.	Pond.	Cal.	Pond.	Cal.	Pond.	Cal.	Pond.
4	F. U	9	36	0	0	0	0	1	4
3	T. R	3	9	0	0	0	0	3	9
2	\$	0	0	9	18	3	6	0	0
1	I	9	9	1	1	0	0	3	3
Total		54		19		6		16	

Con el desarrollo de la matriz Q.F.D se obtienen los tres parámetros del diseño que van más acorde con las exigencias de un usuario, los cuales son facilidad de programación, costo y compatibilidad.

### **Planteamiento de Alternativas**

En este apartado se presentan algunas opciones que dan respuesta a la necesidad establecida en cada subsistema. Seguidamente, se evaluaron de acuerdo con los cinco requerimientos destacados en el desarrollo de la matriz de función calidad (QFD), a la hora de calificar cada alternativa y su relevancia medida en porcentaje, con el fin de seleccionar la opción más adecuada para cada subsistema.

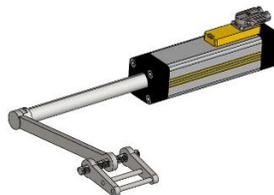
### *Alternativas Subsistema de Oscilación*

Para la oscilación de la antorcha se requiere un mecanismo que genere un trazado similar al que realiza un operario involucrado en el proceso de soldadura. Como respuesta a esta solicitud se presentan las siguientes alternativas:

- ❖ Alternativa 1: Para realizar el movimiento oscilatorio, se plantea el uso de un cilindro eléctrico de doble función, como se ilustra en la figura 1. Los actuadores de movimiento lineal pueden entregar altos valores de fuerza y velocidad de manera muy precisa, son una alternativa económica y eficiente en energía a los cilindros neumáticos en aplicaciones que requieren mayor flexibilidad y control, sin embargo, su costo en general es elevado.
- ❖ Alternativa 2: Para la generación del movimiento oscilatorio, se plantea la implementación de un motor de paso a paso bipolar, visto en la figura 2, el cual pueda controlarse de manera adecuada en cuanto a su sentido de giro y su ángulo, el motor debe estar acoplado a un mecanismo de sujeción para la antorcha, dicho sistema de sujeción debe ser graduable, con el fin de generar una mayor variabilidad en las pistolas de soldar compatibles.

### **Figura 1**

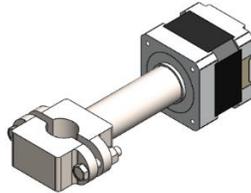
*Subsistema de oscilación. Alternativa 1*



*Nota.* Tomado de Parker NA [Modelo CAD del cilindro], (<https://ph.parker.com/us/en/electric-cylinders>)

**Figura 2**

*Subsistema de oscilación. Alternativa 2*

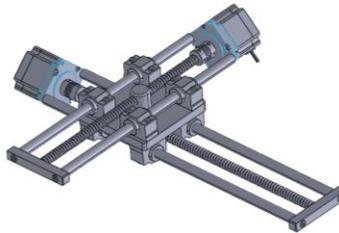


*Nota.* Tomado de GrabCAD [Modelo CAD motor paso a paso], Jhon, 2011, (<https://grabcad.com/library/motor-paso-a-paso-1>)

- ❖ Alternativa 3: se propone una alternativa basada en el funcionamiento de una máquina CNC, como se muestra en la figura 3, la cual cuenta con dos motores paso a paso bipolares, que permitan realizar una alta variedad de caligrafías en cuanto a la soldadura.

**Figura 3**

*Subsistema de oscilación. Alternativa 3.*



*Nota:* Tomado de GrabCAD [Modelo CAD XY motion CNC], Nemanja Petkov, 2014, (<https://grabcad.com/library/xy-motion-1>)

***Alternativas Subsistemas de Desplazamiento***

El subsistema de arrastre del sistema realizará el movimiento del equipo en un eje, permitiendo realizar uniones soldadas de manera longitudinal. A continuación, se presentan dos alternativas que se consideraron convenientes para realizar esta función.

- ❖ Alternativa 1: los sistemas de guías mostrados en la figura 4, otorgan una gran estabilidad y permiten trabajar en superficies que no sean horizontales, siempre y cuando estén instalados de forma adecuada, pero reducen de gran manera la portabilidad del equipo. El sistema lineal puede funcionar con o sin lubricación. Su acción única de barrido expulsa la suciedad, manteniendo las máquinas fiables y en funcionamiento.
- ❖ Alternativa 2: teniendo en cuenta las limitaciones de espacio, se muestran en la figura 5 las ruedas de fricción, que se caracterizan por ser resistentes a la abrasión, absorber choques y vibraciones, asimismo, rodar con suavidad garantizando un nivel bajo de ruido.

#### **Figura 4**

*Subsistema de desplazamiento. Alternativa 1*



*Nota.* Tomado de GV3 Sistema de Movimiento Lineal [Fotografía], HepcoMotion, (<https://www.hepcotion.com/es/producto/componentes-de-movimiento-lineal/gv3-sistema-de-guiado-y-transmision/>)

#### **Figura 5.**

*Subsistema de desplazamiento. Alternativa 2*



*Nota.* Tomado de Ruedas AF IMSA [Fotografía], Rodachines Industriales y CIA LTDA, (<https://www.rodachines.co/product-page/serie-af>)

### *Alternativas del Subsistema de Control*

Como respuesta a la necesidad de controlar los parámetros relacionados con el proceso de soldadura, se proponen las siguientes alternativas para el control:

- ❖ Alternativa 1: un controlador lógico programable (P.L.C) como el mostrado en la figura 6, es un dispositivo electrónico que utiliza entradas y salidas para controlar un proceso mediante instrucciones definidas en su lógica programable. Son aparatos asequibles en precio, su instalación es sencilla, cableado mínimo, programación fácil de usar.

### **Figura 6**

#### *Alternativa 1. Subsistema de Control*



*Nota.* Tomado de LOGO - Lo pequeño es hermoso [Fotografía], SIEMENS, (<https://new.siemens.com/mx/es/productos/automatizacion/systems/industrial/plc/logo.html>)

- ❖ Alternativa 2: el servo drive que se evidencia en la figura 7, es un controlador preciso, que permite regular diversas variables manteniendo un bajo nivel de ruido, este sería perfectamente compatible con la alternativa de un cilindro eléctrico para el movimiento oscilatorio.
- ❖ Alternativa 3: un microcontrolador es un circuito integrado programable capaz de realizar operaciones matemáticas complejas a gran velocidad. En la figura 8 se puede observar el microcontrolador Arduino, el cual permite regular una señal que se envía a elementos como motores paso a paso de manera precisa, a un costo muy asequible para el usuario.

**Figura 7**

*Subsistema de Control. Alternativa 2.*



*Nota.* Tomado de Servo Drive Trifásico [Fotografía], i40Store, (<https://i40store.com/products/umd-0050e-b3-servo-drive-trifasico-380-440-vac-5kw>)

**Figura 8**

*Subsistema de Control. Alternativa 3.*



*Nota.* Tomado de Arduino UNO [Fotografía], Arduino.cl, (<https://arduino.cl/arduino-uno/>)

**Selección de Alternativas**

A partir de las matrices de función de calidad realizadas y con la selección de los tres parámetros de mayor incidencia en cada caso, se contrarrestaron con las alternativas expuestas anteriormente. Así mismo, se expuso el proceso de evaluación de cada subsistema, calificándolos con valores comprendidos entre 0-5 según el cumplimiento de cada parámetro.

***Subsistema de Oscilación.***

Por lo que se refiere al subsistema de oscilación, la opción que mejor se ajustó es la que comprende el uso de un motor paso a paso, la cual aparece como alternativa 2 en la tabla 4. La

ventaja de esta opción es su bajo costo y la facilidad de acoplamiento al sistema mediante un mecanismo de fijación que permite ajustar la posición de la antorcha de soldadura.

**Tabla 4**

*Selección de Alternativa Subsistema de Oscilación*

Criterios de diseño	%	Alternativas					
		1		2		3	
Grados de libertad	39	3.5	1.4	3.5	1.4	4	1.6
Costos	32	1	0.3	4.5	1.4	3.5	1.1
Estabilidad	29	3.5	1	3.5	1	3.5	1
Total	100	2.7		3.8		3.7	

*Subsistema de Desplazamiento.*

Al realizar el proceso de evaluación en la tabla 5, se evidenció que la alternativa más adecuada para este subsistema es la 2, la cual es la implementación de ruedas de alta fricción, excelentes para desplazamientos suaves y movimientos amortiguados.

**Tabla 5**

*Selección de Alternativa Subsistema de Arrastre*

Criterios de diseño	%	Alternativas			
		1		2	
Montaje e incorporación	37	3	1.1	5	1.9
Costos	37	3	1.1	4	1.5
Simplicidad en el diseño	26	4	1	4	1
Total	100	3.2		4.4	

***Subsistema de Control***

Finalmente se muestra en la tabla 6, como respuesta a la necesidad establecida en el subsistema de control, se planteó la integración de un microcontrolador Arduino Uno. El software necesario para la programación del Arduino es fácil de codificar, ya que está basado en un lenguaje de programación C++, además, este microcontrolador tiene un alto nivel de compatibilidad con distintos componentes analógicos y digitales.

**Tabla 6*****Selección de Alternativa Subsistema de Control***

Criterios de diseño	%	Alternativas					
		1		2		3	
Facilidad de programación	61	2	1.2	3	1.8	3	1.8
Costos	21	2.5	0.5	1	0.2	4	0.8
Compatibilidad	18	3	0.5	2.5	0.5	4	0.7
Total	100	2.2		2.5		3.3	

### Apéndice C. Cálculos del Subsistema de Oscilación.

Para calcular el torque requerido se utilizó la ecuación 1 teniendo en consideración una antorcha con cuello de ganso para soldadura tipo GMAW con un peso aproximado de 5 [kgf] y longitud de cuello de 20 [cm] según el catálogo de fabricante (TWECO, 2019). Se designó 9,81 [ $\frac{m}{s^2}$ ] como valor aproximado de la gravedad.

$$T_o \geq 49.05[N] * 0,2 [m] = 5[kgf] * 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] * 0,2 [m] \quad (1)$$

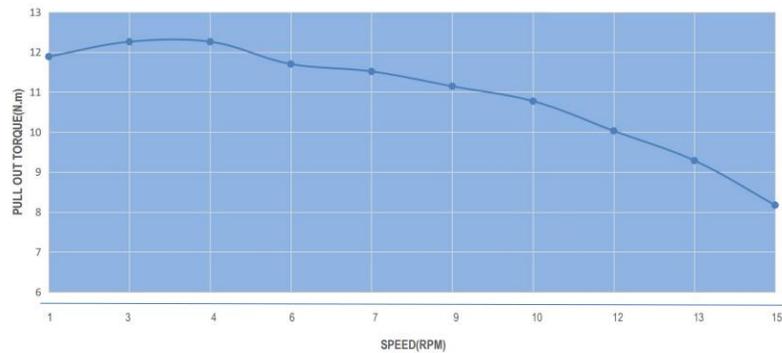
$$T_o \geq 9.9$$

Con esto, se prefirió un motor capaz de ofrecer valores de torque mayores a lo obtenido en la ecuación 1. En atención a esto, se seleccionó el motor paso a paso nema 17 que proporciona un torque superior a 8 [Nm] en un rango de velocidad de giro de 1 a 15 [rpm] según la gráfica de torque entregada por el fabricante de la figura 1. Luego de seleccionar el motor, se realizó la estructura que brinda soporte y posibilita el ajuste vertical y horizontal del brazo de oscilación. Este sistema se calculó inicialmente suponiendo sus componentes de tubería cédula 40 de diámetro nominal 1 ½" y 1 ¼". Al mismo tiempo se implementaron estrategias de simulación mediante el método de elementos finitos utilizando el software SolidWorks Simulation, para analizar la carga inmersa en la estructura.

Para iniciar el proceso se ajustaron las condiciones reales de operación en los componentes, en otras palabras, sus respectivos valores de masa y la fuerza de la gravedad. Para ello, se eligió un material para calcular la masa de las piezas modeladas. En tal sentido, se seleccionó el acero ASTM A36 como primer material de prueba debido a sus propiedades mecánicas adecuadas para la aplicación del proyecto (Calderón et al., 2021), considerando su bajo costo y la disponibilidad en el mercado.

**Figura 1.**

*Relación velocidad vs torque del motor paso a paso*

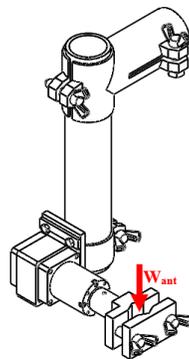


*Nota.* Tomado de StepperOnline [Fotografía], Stepper Online, (<https://www.omc-stepperonline.com/>)

Se hizo necesario el desglose del subsistema en tres partes para disminuir la carga computacional y el tiempo de procesado de la simulación. En la primera parte, como se observa en la figura 2, se tuvo en cuenta la fuerza externa aplicada correspondiente al peso de la antorcha [ $W_{ant}$ ] utilizada en el estudio, aproximadamente de 5 [Kgf] (TWECO, 2019).

**Figura 2**

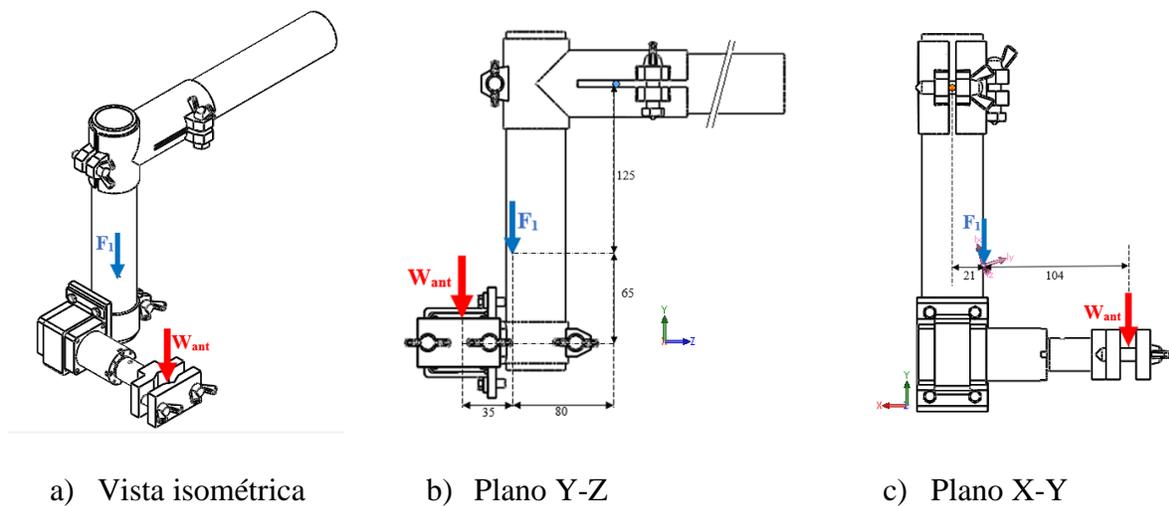
*Primera parte. Diagrama de cuerpo libre*



En la segunda parte se estudió únicamente el eje horizontal incluyendo la fuerza que sigue siendo aplicada al sistema y las cargas ocasionadas por el peso de los elementos anexos a la pieza de estudio, en consecuencia, como se muestra en la figura 3, se trasladaron las fuerzas correspondientes al peso de la primera parte del subsistema de oscilación y la carga de la antorcha al extremo izquierdo del elemento, generando momentos en el eje x y eje z para mantener el sistema en equilibrio.

**Figura 3**

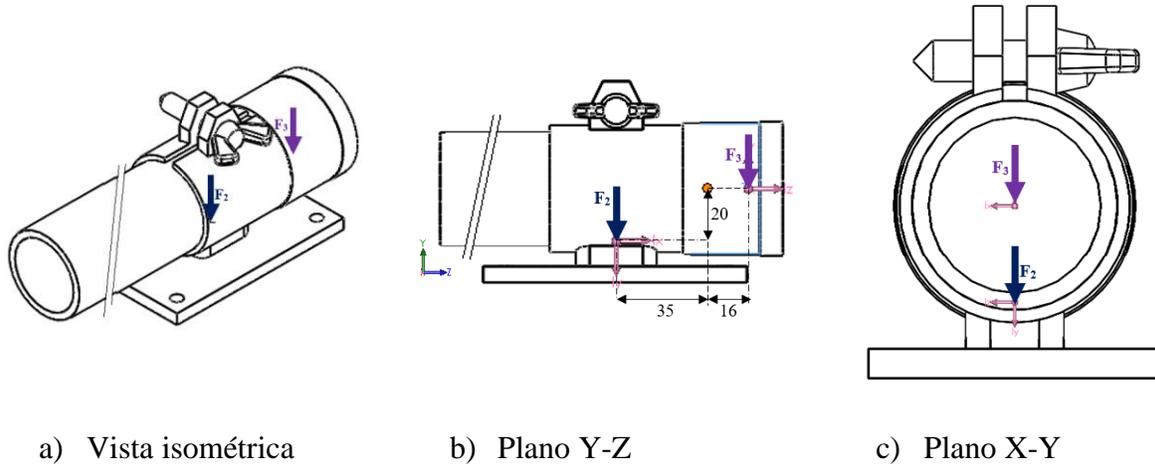
*Segunda Parte. Diagrama de cuerpo libre extremo izquierdo*



De la misma forma, la carga del acoplamiento principal del sistema y la cubierta del eje se trasladaron al extremo derecho del eje horizontal como se muestra en la figura 4.

**Figura 4**

*Segunda parte. Diagrama de cuerpo libre extremo derecho*



Teniendo en cuenta el espacio tridimensional en que actúan las fuerzas, se efectuó el producto vectorial de Gibbs para la determinación de los resultados, como se indica en las siguientes ecuaciones.

$$M_{izq} = \begin{bmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ -125 & -190 & -115 \\ 0 & -W_{ant} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ -21 & -125 & -80 \\ 0 & -F_1 & 0 \end{bmatrix}$$

Resolviendo las matrices y convirtiendo los valores a metros, se tiene que:

$$\begin{aligned} M_{izq} = & \{ [(-0.190 * 0) - (-0.115 * -49.05)](\hat{i}) + [(-0.125 * 0) - (-0.115 * 0)](\hat{j}) \\ & + [(-0.125 * -49.05) - (-0.190 * 0)](\hat{k}) \} \\ & + \{ [(-0.125 * 0) - (-0.080 * -27.817)](\hat{i}) \\ & + [(-0.021 * 0) - (-0.080 * 0)](\hat{j}) \\ & + [(-0.021 * -27.817) - (-0.125 * 0)](\hat{k}) \} \end{aligned}$$

$$M_{izq} = \{[(-5.641)](\hat{i}) + [(0)](\hat{j}) + [(6.131)](\hat{k})\} \\ + \{[(-2.225)](\hat{i}) + [(0)](\hat{j}) + [(0.584)](\hat{k})\}$$

$$M_{izq} = [(-7.866)](\hat{i}) + [(0)](\hat{j}) + [(6.715)](\hat{k})$$

$$M_{der} = \begin{bmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & -20 & -35 \\ 0 & -F_2 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 0 & 16 \\ 0 & -F_3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_{der} = \{[(-0.020 * 0) - (-0.035 * -4.518)](\hat{i}) + [(0 * 0) - (-0.035 * 0)](\hat{j}) + \\ [(0 * -4.518) - (-0.020 * 0)](\hat{k})\} + \{[(0 * 0) - (0.016 * -2.323)](\hat{i}) + [(0 * 0) - (0.016 * \\ 0)](\hat{j}) + [(0 * -2.323) - (0 * 0)](\hat{k})\}$$

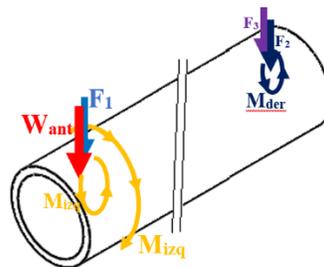
$$M_{der} = \{[(-0.158)](\hat{i}) + [(0)](\hat{j}) + [(0)](\hat{k})\} + \{[(0.037)](\hat{i}) + [(0)](\hat{j}) + [(0)](\hat{k})\}$$

$$M_{der} = \{[(-0.121)](\hat{i}) + [(0)](\hat{j}) + [(0)](\hat{k})\}$$

La figura 5 representa el diagrama de cuerpo libre del eje horizontal después del traslado de las cargas.

**Figura 5**

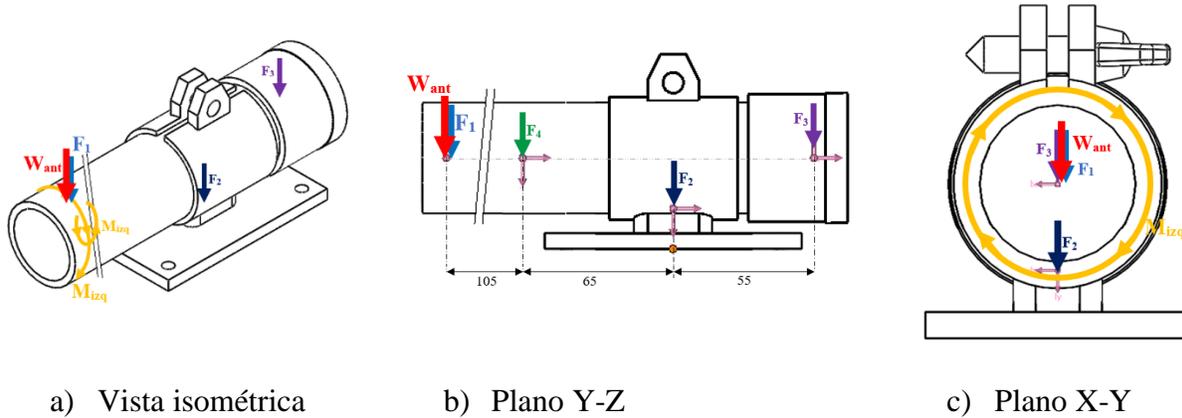
*Segunda parte. Diagrama de cuerpo libre eje horizontal*



Finalmente, en el acoplamiento trabajado en la tercera parte del estudio se incluyeron las cargas anteriormente mencionadas como se ilustra en la figura 6. Las respectivas distancias entre el punto de aplicación de las cargas y el centro de masa del elemento se presentan en la figura 6 a y b. El traslado de las fuerzas se efectuó mediante la sumatoria de momentos en el punto de origen considerando las fuerzas coplanares en X.

**Figura 6**

*Tercera parte. Diagrama de cuerpo libre*



a) Vista isométrica

b) Plano Y-Z

c) Plano X-Y

$$M = \begin{bmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 35 & -170 \\ 0 & -W_{ant} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 35 & -170 \\ 0 & -F_1 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 35 & 55 \\ 0 & -F_3 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 35 & -65 \\ 0 & -F_4 & 0 \end{bmatrix}$$

Los resultados obtenidos al cambiar las unidades de las distancias a metros y resolver se presentan a continuación:

$$M = \{[(0.035 * 0) - (-0.170 * -49.05)](\hat{i}) + [(0)](\hat{j}) + [(0)](\hat{k})\} \\ + \{[(0.035 * 0) - (-0.170 * -27.817)](\hat{i}) + [(0)](\hat{j}) + [(0)](\hat{k})\} \\ + \{[(0.035 * 0) - (0.055 * -2.323)](\hat{i}) + [(0)](\hat{j}) + [(0)](\hat{k})\} \\ + \{[(0.035 * 0) - (-0.065 * -8.033)](\hat{i}) + [(0)](\hat{j}) + [(0)](\hat{k})\}$$

$$M = \{[(-8.339)](\hat{i})\} + \{[(-4.729)](\hat{i})\} + \{[(0.128)](\hat{i})\} + \{[(-0.522)](\hat{i})\}$$

Con los valores de carga obtenidos para cada sección mostrados en la tabla 1, se realizó el mallado de los elementos y se procesó la información. Los resultados entregados por la simulación determinaron los valores de esfuerzo según el criterio de Von Mises para la primera y tercera parte del subsistema.

**Tabla 1**

*Valores de cargas para cada parte del subsistema de oscilación*

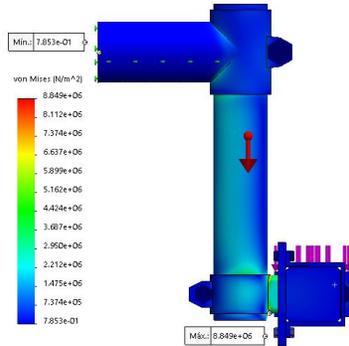
		Fuerzas eje Y [N]		Momentos eje X [Nm]		Momentos eje Z [Nm]
<b>Primera Parte</b>	$W_{ant}$	49.05				
	$W_{ant}$	49.05	$M_{XW_{ant}}$	-5.641	$M_{ZW_{ant}}$	6.131
<b>Segunda Parte</b>	$F_1$	27.817	$M_{X1}$	-2.225	$M_{Z1}$	0.584
	$F_2$	4.518	$M_{X2}$	-0.158		
	$F_3$	2.323	$M_{X3}$	0.037		
<b>Tercera Parte</b>	$W_{ant}$	49.05	$M_{XW_{ant}}$	-8.339	$M_{ZW_{ant}}$	6.131
	$F_1$	27.817	$M_{X1}$	-4.729	$M_{Z1}$	0.584
	$F_2$	4.518				
	$F_3$	2.323	$M_{X3}$	0.128		
	$F_4$	8.033	$M_{X4}$	-0.522		

En la figura 7, se observa el valor obtenido para la primera sección estudiada, sin embargo, el máximo esfuerzo estuvo presente en el acoplamiento analizado en la tercera parte del subsistema de oscilación, como se observa en la figura 9, con un valor de 26,77 [MPa]. El

comportamiento del eje horizontal del subsistema se evidencia en la figura 8, la máxima tensión axial y de flexión en el límite superior se determinó en 2 [MPa].

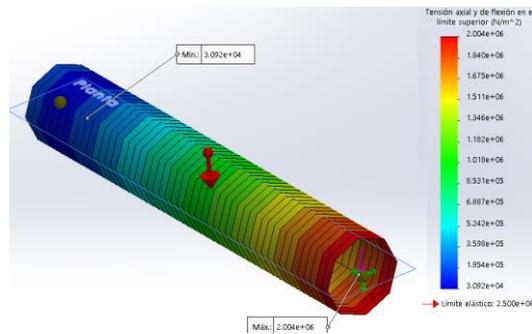
**Figura 7**

*Primera parte. Resultados de simulación*



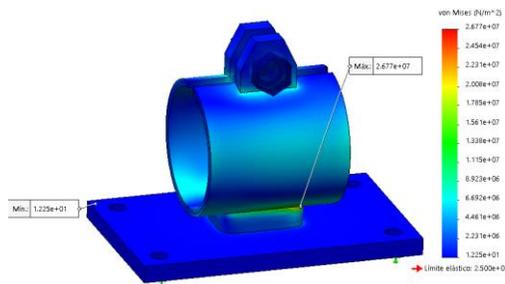
**Figura 8**

*Segunda parte. Resultados de simulación*



**Figura 9**

*Tercera parte. Resultados de simulación*



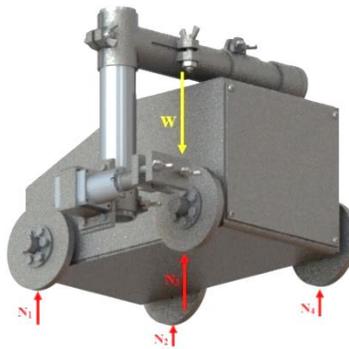
De acuerdo con lo anterior, se resolvió que la relación entre el valor del esfuerzo máximo, obtenido según el criterio de Von Mises gracias a la simulación del subsistema, y el límite de fluencia del material seleccionado como prueba para la realización de los cálculos fue mayor a tres, lo cual evidenció que los valores inicialmente supuestos para el diámetro de los elementos empleados para facilitar la adaptación vertical y transversal de la antorcha, según la necesidad de operación y, el material utilizado en todo el subsistema fueron correctos y garantizan un diseño conservativo.

### Apéndice D. Cálculos del Subsistema de Desplazamiento.

Nuevamente, utilizando como material de prueba el acero ASTM A36, con la ayuda del software SolidWorks®, se determinó la masa total del sistema junto a su centro de masa y sus respectivas coordenadas, para calcular el sistema de manera estática según la figura 1, donde  $N$  corresponde a las fuerzas normales en cada rueda en  $N \cdot m$  y  $W$  es el peso total del equipo en  $Kg$ .

#### Figura 1

*Diagrama de cuerpo libre del sistema*



Después de realizado el análisis estático del sistema se obtuvieron los resultados presentes en la tabla 1.

#### Tabla 1

*Valores de las cargas normales del sistema*

<b>Resultados obtenidos [N]</b>			
$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$
44.590	3.712	165.415	13.770

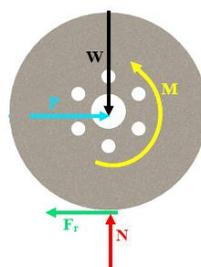
## Cinemática

En el sistema existían dos causas principales frente a la resistencia al movimiento de una rueda: la fuerza de fricción y la fuerza de resistencia a la rodadura. En el cálculo de este apartado fue necesario tener en cuenta las condiciones externas de operación como la temperatura, la radiación y convección producidas por la antorcha de soldadura, además, los materiales de la superficie de las ruedas y el suelo, esenciales para la identificación de los coeficientes de fricción y rodadura.

Para analizar la fricción del sistema se seleccionó la rueda que soportaba más carga según los resultados del análisis estático, mostrados en la tabla 1 y, se realizó el diagrama de cuerpo libre de la rueda, mostrado en la figura 2. Por otro lado, la resistencia a la rodadura representa la deformación que tiene una rueda o la superficie sobre la que esta realiza su movimiento. Experimentalmente, la fuerza resultante ejercida por el piso sobre la rueda a lo largo del área es una fuerza  $R$  aplicada en un punto no localizado directamente debajo del centro de la rueda (Beer et al., 2007). El diagrama de cuerpo libre para este caso se presenta en la figura 3.

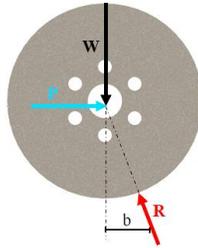
### Figura 2

*Diagrama de cuerpo libre de la rueda para cálculos de fricción*



**Figura 3**

*Diagrama de cuerpo libre de la rueda para cálculos de rodadura*



Teniendo en cuenta las condiciones de temperatura durante la operación se identifican los posibles materiales que brindan una solución óptima de operación. Los modelos más adecuados y sus características se observan en la tabla 2.

**Tabla 2**

*Selección de materiales silicona, policetona, neopreno*

	<b>Silicona</b>	<b>Policetona</b>	<b>Neopreno</b>
Densidad [ $g/cm^3$ ]	1.20	1.24	1.36
Módulo de Young [ $MPa$ ]	7	1500	2.5
Coefficiente de fricción	1.00	0.27	0.65
Temperatura de trabajo [ $^{\circ}C$ ]	-60/190	-40/120	-30/100
Dureza [ $Shore A$ ]	20-90	75-85	60-80

Se seleccionó el neopreno como material de trabajo, ya que sus características se adecuaban correctamente a los requerimientos del proyecto. Ahora bien, el parámetro importante en la selección del motor requerido fue el torque. Por consiguiente, se consideró la ecuación 1 para calcular el torque por fricción y con la ecuación 2 se contempló la rodadura. El coeficiente

de rodadura contempló la superficie de trabajo, por lo cual, se tuvo en cuenta un rango de valores posibles, por consiguiente, se realizó el cálculo del valor máximo y mínimo. El resultado mayor determinó la condición para la búsqueda del motor.

$$T_f = 165.415[N] * 0.65 * 0.05[m] = 5.376[Nm] \quad (1)$$

$$T_r = 165.415[N] * 0.01 * 0.05[m] = 0.082[Nm] \quad (2)$$

$$T_r = 165.415[N] * 0.34 * 0.05[m] = 2.812[Nm]$$

Considerando los valores de torque obtenidos anteriormente, se calculó el torque entregado por el motor seleccionado. Se verificó el funcionamiento según la ecuación 3. Los datos numéricos fueron dados por el fabricante en las especificaciones del motor en la tabla 3.

$$P_{motor} = 1.09[A] * 24[V] = T_{motor} * 5[rpm] \quad (3)$$

$$T_{motor} = \frac{1.09[A] * 24[V]}{5 \left[ \frac{rev}{min} \right] * \frac{2\pi}{1 rev} * \frac{1 min}{60 s}} = 49.962[Nm]$$

**Tabla 3**

*Características del motor de doble eje*

Marca	Uxcell
Velocidad	5 rpm
Voltaje	24 V
Corriente nominal	1090 mA
Dimensiones	7.36 x 5.31 x 2.76 in
Peso	12.6 oz

El valor de torque calculado según la ecuación 3 correspondió al torque máximo entregado en una situación ideal. Sin embargo, existían pérdidas de energía causadas por diferentes factores como la transformación de energía eléctrica a energía mecánica, el acople entre el eje del motor y el eje de las ruedas, la fricción existente entre el revestimiento de neopreno y la superficie de trabajo, las pérdidas de energía por calentamiento y deslizamiento de rodamientos, entre otros. Estas cifras se contemplaron en valores relativos conocidos como eficiencias, que se pueden determinar a partir de la experimentación.

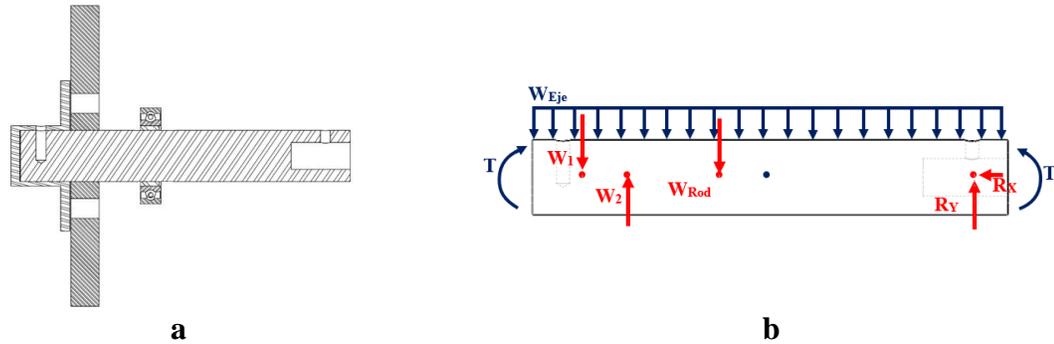
Como resultado, se estimó el valor de torque real aproximadamente de 85% con respecto al valor nominal calculado a partir de la ecuación 3. De allí, se seleccionó la cifra mayor obtenida con el objeto de mantener un modelo conservativo en el diseño.

### **Verificación de la resistencia estática del sistema**

De acuerdo con lo anterior, se diseñó el eje motriz del subsistema de desplazamiento para la carga mayor incluyendo la selección del material, la configuración geométrica, el esfuerzo y resistencia estática y de fatiga. En primer lugar, se determinó el posicionamiento de los elementos que conforman el eje, visto en la figura 4.a, con el fin de realizar el análisis de fuerzas en el cuerpo libre de la figura 4.b, donde  $W_1$  es la reacción generada por la pieza de unión de la rueda y eje motriz en  $N$ ,  $W_2$  la reacción de la rueda en  $N$ ,  $W_{Rod}$  es la reacción causada por el rodamiento en  $N$ ,  $W_{Eje}$  es la carga producida por el peso del eje en función de su longitud en  $\frac{N}{m}$ ,  $T$  es el torque máximo entregado por el motor en  $N.m$  al cual se somete el eje,  $R_x$  y  $R_y$  son las reacciones producto de la sujeción del motor en  $N$ .

**Figura 4**

Eje de diseño a) Posicionamiento de los elementos b) Diagrama de cuerpo libre



Con el planteamiento del diagrama de cuerpo libre de la figura 4.b, se calcularon las reacciones  $R_x$ ,  $R_y$  y  $W_{Rod}$  utilizando las ecuaciones de equilibrio para el análisis estático del sistema. Los valores de cada componente del diagrama se presentan en la tabla 4. La magnitud de la reacción  $R_x$  se desestima en el estudio.

**Tabla 4.**

Valores obtenidos del diagrama de cuerpo libre para el eje

$W_1$	$W_2$	$W_{Rod}$	$W_{Eje}$	$T$	$R_x$	$R_y$
0.538	160.532	213.845	1.985	24.981	0	55.835

Conociendo las magnitudes anteriores se realizaron los diagramas de fuerza cortante, momento flector y momento torsor correspondiente, como se observa en la figura 5 sus respectivos valores se presentan en las tablas 5, 6 y 7. A continuación, se calcularon los esfuerzos para los puntos críticos del eje, los cuales se determinaron considerando tres secciones: la primera sección que resiste mayor momento flector, los concentradores de esfuerzos presentes en el eje, esto es, la segunda sección que comprende el anclaje del eje principal con el eje del

motor y la tercera sección que incluye el anclaje entre el eje y el soporte de unión entre el eje y la rueda.

**Tabla 5**

*Valores correspondientes del diagrama de fuerza cortante*

	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>7</u>
<b>V [N]</b>	0.815	1.00	159.532	159.140	54.706	55.659	0.178

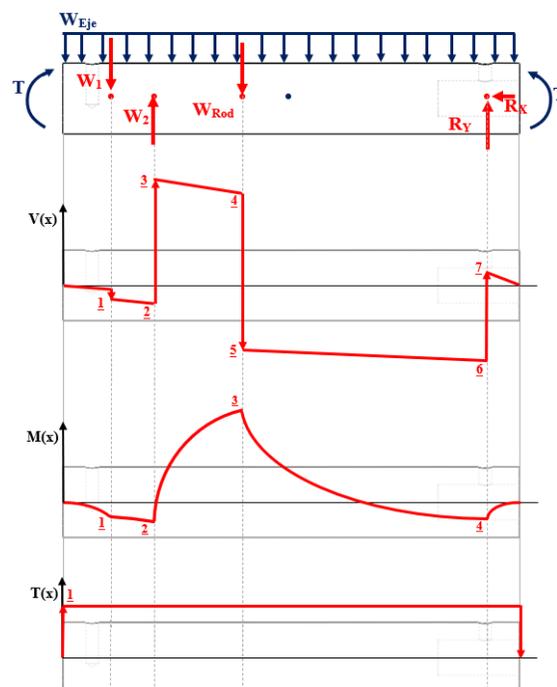
**Tabla 6**

*Valores correspondientes del diagrama de momento flector*

	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>
<b>M [N.m]</b>	$2.174 \times 10^{-3}$	0.0116	3.522	0.557

**Figura 5**

*Diagramas de fuerza cortante, momento flector y momento torsor*



**Tabla 7**

Valores correspondientes del diagrama de momento torsor

	<u>1</u>
<b>T [N.m]</b>	24.980

El esfuerzo en flexión varía linealmente con la distancia desde el eje neutro, por consiguiente, según esta distribución, el esfuerzo máximo del eje estuvo en la distancia más alejada desde el eje neutro, en otras palabras, en el valor del radio del eje, mostrado en la ecuación 4. Además, se determinó el esfuerzo cortante máximo debido a flexión  $\tau_V$  en *MPa*, según la ecuación 5. Del mismo modo, el esfuerzo de torsión  $\tau_T$  se calculó en *MPa*, según la ecuación 6, considerando el torque mayor de los calculados anteriormente y teniendo en cuenta que el motor es de doble eje.

$$\sigma = \frac{3.522 * \frac{0.01712}{2}}{4.217 \times 10^{-9}} = 7.15 \text{ MPa} \quad I = \frac{1}{4} * \pi * \left(\frac{0.01712}{2}\right)^4 \quad (4)$$

$$\tau_V = \frac{4 * 159.532}{3 * 2.302 \times 10^{-4}} = 0.924 \text{ MPa} \quad A = \pi * \left(\frac{0.01712}{2}\right)^2 \quad (5)$$

$$\tau_T = \frac{24.980 * 0.00856}{8.434 \times 10^{-9}} = 25.354 \text{ MPa} \quad J = \frac{1}{2} * \pi * \left(\frac{0.01712}{2}\right)^4 \quad (6)$$

Sin embargo, en las secciones concentradoras de esfuerzo se añade un factor geométrico de la concentración de esfuerzos para relacionar el esfuerzo máximo real en la discontinuidad con el esfuerzo nominal (Budynas & Nisbett, 2008). Para este caso particular, en la segunda sección, el valor aproximado del esfuerzo flexionante nominal  $\sigma_0$  en *MPa*, para una barra

redonda o un tubo con agujero redondo transversal, se determinó según la ecuación 7. El factor adimensional  $A$  fue encontrado a partir de la tabla 8 teniendo en cuenta los valores de los diámetros del eje y los agujeros como se observa en la figura 6.a y b.

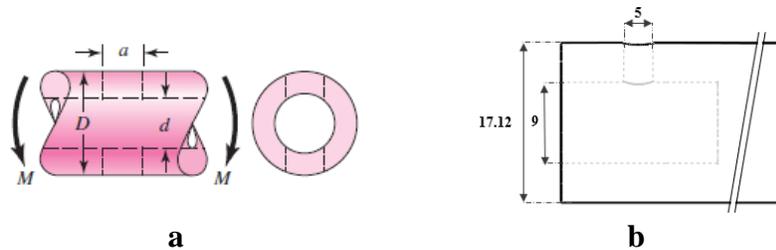
$$\sigma_0 = \frac{0.557}{2.662 \times 10^{-7}} = 2.093 \text{ MPa} \quad Z_{neto} = \frac{\pi * 0.585 * (0.01712^4 - 0.009^4)}{0.01712 * 32} \quad (7)$$

En esta misma sección, para calcular el esfuerzo cortante nominal  $\tau_0$  en [MPa], se utilizó la ecuación 8. El factor adimensional  $A$  se determinó según la tabla 9.

$$\tau_0 = \frac{24.98 * 0.01712}{2 * 6.021 \times 10^{-9}} = 35.512 \text{ MPa} \quad J_{neto} = \frac{\pi * 0.773 * (0.01712^4 - 0.009^4)}{32} \quad (8)$$

### Figura 6

Barra redonda. a) Representación gráfica b) Medidas de cálculo



Nota. Tomado de Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Groover, 2019.

De modo similar, en la tercera sección se utilizó la ecuación 9, donde el diámetro del agujero  $d$  corresponde a 3 mm según la figura 7. Al mismo tiempo, para determinar el factor teórico de concentración  $K_{ts}$  se utilizó la figura 8 considerando la ecuación 10.

$$\sigma_0 = \frac{2.174 \times 10^{-3}}{\left[ \frac{\pi * 0.01712^3}{32} - \frac{0.003 * 0.01712^2}{6} \right]} = 6.282 \times 10^{-3} \text{ MPa} \quad (9)$$

$$\tau_0 = \frac{24.980}{8.387 \times 10^{-7}} = 29.785 \text{ MPa} \quad \frac{J}{c} = \frac{\pi * 0.01712^3}{16} - \frac{0.003 * 0.01712^2}{6} \quad (10)$$

**Tabla 8**

*Factores aproximados de  $K_t$ , barra redonda con agujero redondo transversal en flexión*

$a/D$	0.9		d/D 0.6		0	
	A	$K_t$	A	$K_t$	A	$K_t$
0.050	0.92	2.63	0.91	2.55	0.88	2.42
0.075	0.89	2.55	0.88	2.43	0.86	2.35
0.10	0.86	2.49	0.85	2.36	0.83	2.27
0.125	0.82	2.41	0.82	2.32	0.80	2.20
0.15	0.79	2.39	0.79	2.29	0.76	2.15
0.175	0.76	2.38	0.75	2.26	0.72	2.10
0.20	0.73	2.39	0.72	2.23	0.68	2.07
0.225	0.69	2.40	0.68	2.21	0.65	2.04
0.25	0.67	2.42	0.64	2.18	0.61	2.00
0.275	0.66	2.48	0.61	2.16	0.58	1.97
0.30	0.64	2.52	0.58	2.14	0.54	1.94

*Nota.* Tomado de Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Groover, 2019.

**Tabla 9**

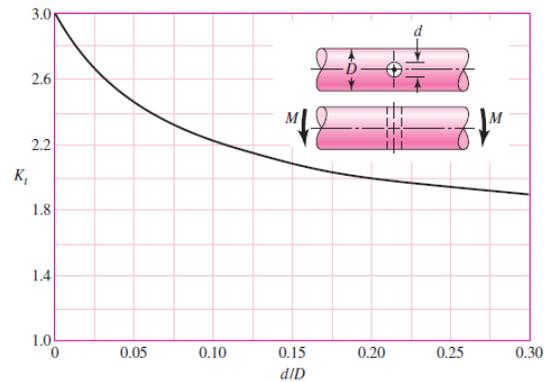
*Factores aproximados de  $K_{ts}$ , barra redonda con agujero redondo transversal en torsión*

$a/D$	0.9		0.8		d/D 0.6		0.4		0	
	A	$K_{ts}$	A	$K_{ts}$	A	$K_{ts}$	A	$K_{ts}$	A	$K_{ts}$
0.05	0.96	1.78							0.95	1.77
0.075	0.95	1.82							0.93	1.71
0.10	0.94	1.76	0.93	1.74	0.92	1.72	0.92	1.70	0.92	1.68
0.125	0.91	1.76	0.91	1.74	0.90	1.70	0.90	1.67	0.89	1.64
0.15	0.90	1.77	0.89	1.75	0.87	1.69	0.87	1.65	0.87	1.62
0.175	0.89	1.81	0.88	1.76	0.87	1.69	0.86	1.64	0.85	1.60
0.20	0.88	1.96	0.86	1.79	0.85	1.70	0.84	1.63	0.83	1.58
0.25	0.87	2.00	0.82	1.86	0.81	1.72	0.80	1.63	0.79	1.54
0.30	0.80	2.18	0.78	1.97	0.77	1.76	0.75	1.63	0.74	1.51
0.35	0.77	2.41	0.75	2.09	0.72	1.81	0.69	1.63	0.68	1.47
0.40	0.72	2.67	0.71	2.25	0.68	1.89	0.64	1.63	0.63	1.44

*Nota.* Tomado de Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Groover, 2019.

**Figura 7**

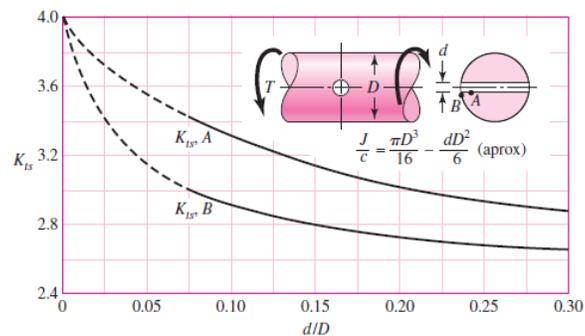
Factores aproximados de  $K_t$ , para eje redondo en flexión con agujero transversal



Nota. Tomado de Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Groover, 2019.

**Figura 8**

Factores aproximados de  $K_{ts}$ , para eje redondo en flexión con agujero transversal



Nota. Tomado de Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Groover, 2019.

Los valores correspondientes a los factores teóricos de concentración de esfuerzo y los esfuerzos nominales de cada sección estudiada se observan en la tabla 10.

**Tabla 10**

*Valores de esfuerzos nominales y factores de concentración de esfuerzos*

	$K_t$	$K_{ts}$	$\sigma_0$ [MPa]	$\tau_0$ [MPa]
<b>Segunda sección</b>	2.123	1.720	2.093	35.512
<b>Tercera sección</b>	2.08	3.12	$6.282 \times 10^{-3}$	29.785

Finalmente, los esfuerzos máximos para cada sección se definieron por medio de las ecuaciones 11.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{m\acute{a}x_2} &= 2.12 * 2.09 = 4.443 & \tau_{m\acute{a}x_2} &= 1.72 * 35.5 = 61.08 \\
 \sigma_{m\acute{a}x_3} &= 2.08 * 6.282 \times 10^{-3} = 0.013 & \tau_{m\acute{a}x_3} &= 3.12 * 29.7 = 92.9
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Los productos resultantes de los cálculos para el punto de mayor momento flector y los puntos de concentración de esfuerzos se señalan en la tabla 11.

**Tabla 11**

*Valores de esfuerzos máximos para sección de estudio*

	$\sigma$ [MPa]	$\tau_V$ [MPa]	$\tau_T$ [MPa]
Primera sección	7.150	0.924	25.374
Segunda sección	4.443	0.322	61.080
Tercera sección	0.013	$4.722 \times 10^{-3}$	92.929

A continuación, se determinaron los esfuerzos principales según el estado de esfuerzos para cada sección presente en la figura 9, utilizando el método de los invariantes y su ecuación característica 12.

**Figura 9**

*Estado de esfuerzos por sección de estudio*

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & \tau_{xz} \\ 0 & 0 & 0 \\ \tau_{zx} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Primera sección	Segunda sección	Tercera sección
$\begin{bmatrix} 7.15 & 0 & 25.37 \\ 0 & 0 & 0 \\ 25.37 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4.44 & 0 & 61.08 \\ 0 & 0 & 0 \\ 61.08 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.013 & 0 & 92.92 \\ 0 & 0 & 0 \\ 92.92 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

$$-\sigma^3 + I_1 * \sigma^2 - I_2 * \sigma + I_3 = 0 \quad (12)$$

Donde  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  se calcularon a su vez mediante las ecuaciones 13, 14 y 15.

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} \quad (13)$$

$$I_2 = \det(1) + \det(2) + \det(3) \quad (14)$$

$$I_3 = \det(\sigma) \quad (15)$$

El procedimiento mostrado se realizó con los datos de la primera sección. Los resultados obtenidos para cada sección se presentan en la tabla 12.

$$\begin{bmatrix} 7.150 & 0 & 25.374 \\ 0 & 0 & 0 \\ 25.374 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$I_1 = 7.150 + 0 + 0 = 7.150$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} 7.150 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 7.150 & 25.374 \\ 25.374 & 0 \end{vmatrix}$$

$$I_2 = (0) + (0) + (-(25.374 * 25.374)) = -643.840$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} 7.150 & 0 & 25.374 \\ 0 & 0 & 0 \\ 25.374 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 0$$

Para concluir se reemplazaron los valores en la ecuación característica y se resolvieron las raíces utilizando una calculadora.

$$-\sigma^3 + 7.150 * \sigma^2 - (-643.840) * \sigma + 0 = 0$$

$$\sigma_1 = 29.02$$

$$\sigma_2 = 22.05$$

$$\sigma_3 = 0$$

**Tabla 12**

*Esfuerzos principales para cada sección de estudio*

	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
Primer sección	29.02	-22.05	0
Segunda sección	63.342	-58.899	0
Tercera sección	92.936	-92.923	0

Por último, se aplicó la teoría de falla estática para comprobar que las suposiciones propuestas en el planteamiento del subsistema fueron correctas. La ecuación 16 corresponde a la teoría de la energía de distorsión la cual se prefirió ya que garantiza un diseño conservativo y es el criterio recomendado en los ejercicios del diseño. Gracias a la ecuación 18 se determinó que el factor de seguridad según el criterio de Von Mises proporcionó un modelo conservador para cada una de las secciones calculadas, los resultados se expresan en la tabla 13.

$$\sigma' = \left[ \frac{(92.936 + 92.923)^2 + (-92.923)^2 + (-92.936)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (16)$$

$$n = \frac{250}{160.958} \quad (18)$$

**Tabla 13**

*Factor de seguridad obtenido según el criterio de Von Mises para cada sección*

	Primera sección	Segunda sección	Tercera sección
<b>Factor de seguridad <math>n</math></b>	5.64	2.36	1.55

### Verificación de la resistencia dinámica del sistema

Concluido el análisis estático, se consideró el comportamiento del subsistema cuando se somete a cargas que varían con el tiempo de modo que se presentan esfuerzos máximos y mínimos. En atención a esto, se analizó la resistencia a la fatiga teniendo en cuenta los esfuerzos presentes en la pieza de estudio. En este caso particular se presenta una combinación de modos de carga: flexión y torsión.

Para resolver este ejercicio, en primer lugar, se generaron los elementos de esfuerzo alternante y esfuerzo medio según la ecuación 19 y la ecuación 20. Sin embargo, por efectos de carga torsional constante, la componente de la amplitud torsional fue nula. De igual forma, la componente del esfuerzo flexionante medio fue nula debido a la carga completamente reversible. Para los esfuerzos de la segunda y tercera sección se tuvo en cuenta la geometría. Los resultados se exponen en la tabla 15.

$$\sigma_a = \frac{7.150 - (-7.150)}{2} = 7.150 \quad (19)$$

$$\tau_m = 25.374 \quad (20)$$

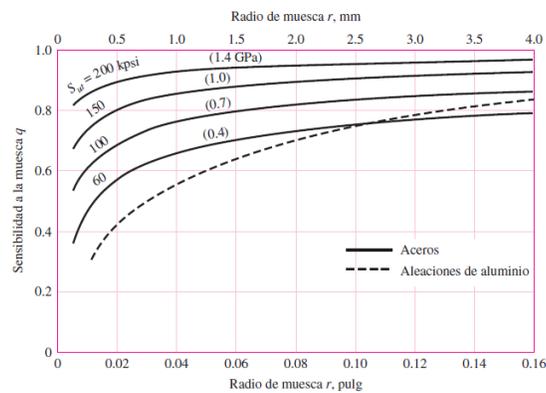
A continuación, estimando la concentración del esfuerzo y la sensibilidad a la muesca para la segunda y tercera sección se definió  $K_f$  como un valor reducido de  $K_t$ . Es comúnmente conocido como factor de concentración del esfuerzo por fatiga y se determinó mediante la ecuación 21, donde primero se encontraron  $K_t$  y  $K_{ts}$  según la geometría de la pieza en la tabla

10, después se especificó el material para determinar  $q$  considerando las figuras 10 y 11 y finalmente se despejó la ecuación. En el cálculo guía se utilizaron los datos de la segunda sección. Los resultados obtenidos para los concentradores de esfuerzo se presentan en la tabla 14.

$$K_f = 1 + 0.79 * (2.123 - 1) = 1.88 \quad K_{fS} = 1 + 0.98 * (1.720 - 1) = 1.705 \quad (21)$$

**Figura 10**

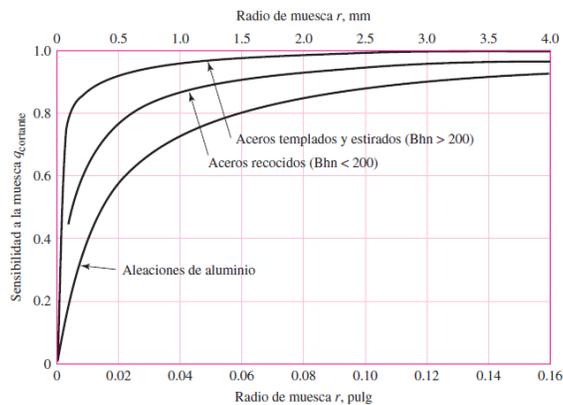
*Determinación de la sensibilidad a la muesca en aceros sometidos a flexión*



*Nota.* Tomado de Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Groover, 2019.

**Figura 11**

*Determinación de la sensibilidad a la muesca de materiales sometidos a torsión*



*Nota.* Tomado de Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Groover, 2019.

**Tabla 14**

*Resultados obtenidos de la sensibilidad a la muesca y factor de concentración de esfuerzo*

	$q$	$q_{cortante}$	$K_f$	$K_{fs}$
<b>Primera sección</b>	0	0	1	1
<b>Segunda sección</b>	0.79	0.98	1.887	1.705
<b>Tercera sección</b>	0.68	0.9	1.734	2.908

Con estos resultados, se evalúa un esfuerzo equivalente de Von Mises para cada elemento, según la ecuación 22 y la ecuación 23. Nuevamente se desprecia la carga axial. Los valores del cálculo se presentan en la tabla 15.

$$\sigma'_a = \left\{ \left[ (1.887 * 2.092)_{flexión} \right]^2 \right\}^{1/2} = 3.947 \quad (22)$$

$$\sigma'_m = \left\{ 3 \left[ (1.705 * 35.512)_{torsión} \right]^2 \right\}^{1/2} = 104.872 \quad (23)$$

**Tabla 15**

*Resultados de esfuerzos para cada sección*

	$\sigma_m [MPa]$	$\sigma_a [MPa]$	$\tau_m [MPa]$	$\tau_a [MPa]$	$\sigma'_m [MPa]$	$\sigma'_a [MPa]$
Primera sección	0	7.150	25.374	0	43.950	7.150
Segunda sección	0	2.093	35.512	0	104.872	3.947
Tercera sección	0	6.282x10 <sup>-3</sup>	29.785	0	150.021	10.893 x10 <sup>-3</sup>

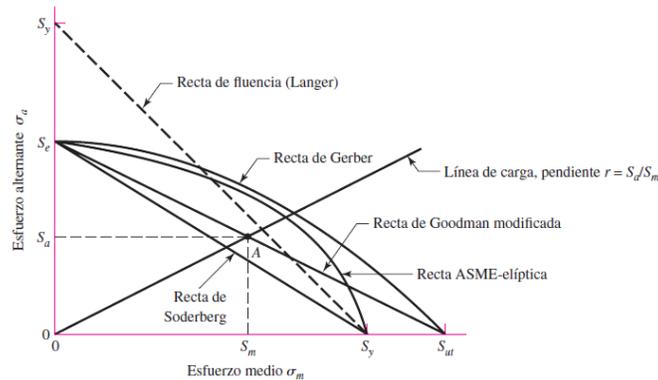
Teniendo los valores de esfuerzo equivalente para cada sección enlistados en la tabla 16, se seleccionó el criterio de falla por fatiga de Soderberg por ser el único que ofrece protección a

la fluencia según la figura 12. La ecuación 24 representa el criterio de Soderberg considerando la carga combinada de la primera sección.

$$\frac{7.150}{S_e} + \frac{43.950}{250} = \frac{1}{n_f} \quad (24)$$

### Figura 12

Diagrama ilustrativo de los criterios de falla por fatiga



*Nota.* Tomado de Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Groover, 2019.

Para evaluar el límite de resistencia a la fatiga se tuvo en cuenta la ecuación de Marín correspondiente a la ecuación 25, para lo cual, fue necesario el cálculo de cada uno de sus componentes, determinando  $S'_e$  a partir de la resistencia a la tensión mínima del material como se indica en la ecuación 26 y el factor de superficie como en la ecuación 27.

$$S_e = 0.0922 * 0.915 * 1 * 1.010 * 0.620 * 0.9 * 200 = 95.09MPa \quad (25)$$

$$S'_e = 0.5 * S_{ut} = 0.5 * 400MPa = 200Mpa \quad (26)$$

$$k_a = a * S_{ut}^b = 4.51 * 400^{-0.265} = 0.922 \quad (27)$$

Donde  $S_{ut}$  es la resistencia mínima a la tensión del acero ASTM A36 y los valores  $a$  y  $b$  se determinaron según la condición de acabado superficial de la figura 13.

**Figura 13**

Valores  $a$  y  $b$  para la determinación del factor de superficie de la ecuación de Marin

Acabado superficial	Factor $a$		Exponente $b$
	$S_{ult}$ kpsi	$S_{ult}$ MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

*Nota.* Tomado de Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Groover, 2019.

En el factor de tamaño se utilizó la ecuación 28, teniendo en cuenta el diámetro del eje de estudio, en este caso 17.12 mm.

$$k_b = \left( \frac{d}{7.62} \right)^{-0.107} = 1.24 * 17.12^{-0.107} = 0.915 \quad (28)$$

El factor de temperatura se seleccionó según la carga experimentada. Se recomienda utilizar  $k_c = 1$  cuando la torsión está combinada con otros esfuerzos como la tensión (Groover, 2019). Por otro lado, la temperatura de operación del sistema determinó la elección del factor de temperatura según la figura 14.

**Figura 14**

Factor de temperatura  $k_b$

Temperatura, °C	$S_i/S_{RT}$	Temperatura, °F	$S_i/S_{RT}$
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

*Nota.* Tomado de Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Groover, 2019.

El factor de confiabilidad se seleccionó mediante la figura 15, mientras que el factor de efectos varios se supuso como prevención ante las alteraciones generadas por factores externos como la corrosión.

### Figura 15

*Factores de confiabilidad*

Confiabilidad, %	Variación de transformación $z_a$	Factor de confiabilidad $k_e$
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

*Nota.* Tomado de Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Groover, 2019.

### Tabla 16

*Valores de los componentes de la ecuación de Marín*

$k_a$	$k_b$	$k_c$	$k_d$	$k_e$	$k_f$	$S_e'$ [MPa]	$S_e$ [MPa]
0.922	0.915	1.00	1.010	0.620	0.9	200	95.091

Teniendo los valores de las componentes de la ecuación 24, se evaluó el factor de seguridad para cada sección del eje. En la tabla 17 se evidencian los resultados estimados según el criterio elegido, con lo cual se precisa la sección crítica en el ajuste del eje principal con la rueda, sin embargo, siendo el criterio de falla más conservativo, se acepta el factor para el diseño del eje.

**Tabla 17**

*Factor de seguridad obtenido según el criterio de Soderberg para cada sección*

	<b>Primera sección</b>	<b>Segunda sección</b>	<b>Tercera sección</b>
<b>Factor de seguridad</b>	3.984	2.1665	1.664

### **Rodamientos**

Finalizado el diseño del eje, se continuó con la selección de los rodamientos teniendo en cuenta dos factores: el diámetro del eje y el tipo de carga experimentada. De esta manera, se determinó un rodamiento rígido de una hilera de bolas considerando que soportan cargas radiales y pequeñas cargas axiales, asimismo, la disponibilidad de los rodamientos en el mercado y facilidad de mantenimiento. Con esta información y con ayuda del catálogo de la compañía SKF (SKF, 2018), se seleccionó inicialmente el rodamiento rígido de bolas 61804, su especificación técnica se presenta en la figura 16.

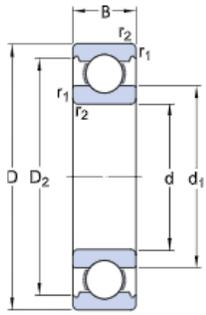
Para la verificación del rodamiento, se seleccionó el tamaño utilizando las fórmulas de la vida útil. Según la normativa ISO 281, la ecuación 29 representa la vida nominal de un rodamiento, pero si la velocidad es constante se determina la vida expresada en horas de funcionamiento según la ecuación 30.

$$L_{10} = \left( \frac{4.03kN}{213.845 \times 10^{-3}kN} \right)^3 = 18.845 \text{ millones de revoluciones} \quad (29)$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 * 5 \text{ rpm}} * 18.845 = 62818.085 \text{ horas de funcionamiento} \quad (30)$$

**Figura 16**

*Especificación técnica rodamiento rígido de bolas 61804*



d		20 mm
D		32 mm
B		7 mm
d <sub>1</sub>		≈ 23.85 mm
D <sub>1</sub>		≈ 28.25 mm
D <sub>2</sub>		≈ 29.4 mm
r <sub>1,2</sub>		min. 0.6 mm
Capacidad de carga dinámica básica	C	4.03 kN
Capacidad de carga estática básica	C <sub>0</sub>	2.32 kN
Carga límite de fatiga	P <sub>u</sub>	0.104 kN
Velocidad de referencia		45 000 r/min
Velocidad límite		28 000 r/min
Factor de cálculo	k <sub>r</sub>	0.015
Factor de cálculo	f <sub>0</sub>	14.5

*Nota.* Tomado de Catálogo de Rodamientos SKF, 2018,

([https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196802809de-Rolling-bearings---17000\\_1-EN\\_tcm\\_12-121486.pdf#cid-121486](https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196802809de-Rolling-bearings---17000_1-EN_tcm_12-121486.pdf#cid-121486))

Sin embargo, el tamaño del rodamiento se debía seleccionar según las capacidades de carga estática  $C_0$  en vez de la vida útil del rodamiento dado que se gira bajo carga a velocidades menores de 10 rpm. De allí que, para calcular el tamaño del rodamiento en este ejercicio con base en la capacidad de carga estática, se empleó la ecuación 31, donde se introdujo el factor de seguridad  $S_0$  que representa la relación entre la capacidad de carga estática básica  $C_0$  y la carga estática equivalente del rodamiento  $P_0$  que, a su vez, por tratarse de solo carga radial, equivale a la fuerza

del rodamiento presentada en la tabla 4. Los valores guía experimentales del factor de seguridad se encuentran en la figura 17.

$$S_0 = \frac{2.32 \times 10^3 N}{213.845 N} = 10.849 \quad (31)$$

### Figura 17

Valores orientativos para el factor de seguridad estática  $S_0$

Tipo de funcionamiento	Rodamientos giratorios						Rodamientos fijos	
	Requisitos de rendimiento (p. ej., funcionamiento silencioso o funcionamiento sin vibraciones)							
	sin importancia		normal		sup.			
	Rodamientos de bolas	Rodamientos de rodillos	Rodamientos de bolas	Rodamientos de rodillos	Rodamientos de bolas	Rodamientos de rodillos	Rodamientos de bolas	Rodamientos de rodillos
Suave, sin vibración	0,5	1	1	1,5	2	3	0,4	0,8
Normal	0,5	1	1	1,5	2	3,5	0,5	1
Cargas de choque pronunciadas <sup>1)</sup>	≥ 1,5	≥ 2,5	≥ 1,5	≥ 3	≥ 2	≥ 4	≥ 1	≥ 2

Para los rodamientos axiales de rodillos a rótula, se recomienda utilizar  $s_0 \geq 4$ .

<sup>1)</sup> Cuando no se conoce la magnitud de la carga de choque, deben utilizarse valores de  $s_0$  por lo menos iguales a los arriba mencionados. Si se conoce la magnitud de las cargas de choque, se pueden aplicar valores de  $s_0$  menores.

Nota. Tomado de Catálogo de Rodamientos SKF, 2018,

([https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196802809de-Rolling-bearings---17000\\_1-EN\\_tcm\\_12-121486.pdf#cid-121486](https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196802809de-Rolling-bearings---17000_1-EN_tcm_12-121486.pdf#cid-121486))

El factor de seguridad estático supera los valores indicativos proporcionados por el fabricante, por lo cual, el rodamiento supuesto inicialmente cumple con las condiciones de carga y operación del proyecto.

### Apéndice E. Cálculos del bastidor

Inicialmente, se analizó la junta superior de la placa del bastidor. Sus agujeros de 6 mm de diámetro, se comprobaron al tener en cuenta las cargas obtenidas en el apéndice C para el subsistema de oscilación. Luego, mediante el complemento de simulación del software SolidWorks se encontraron las reacciones que actuaron sobre las juntas pernadas, donde se obtuvieron los resultados que aparecen en la tabla 1.

**Tabla 1**

*Resultados obtenidos para cargas de las juntas pernadas*

Reacción en X [N]	Reacción en Y [N]	Reacción en Z [N]
51.079	40.9475	-13.9638

Después de tener las reacciones en las direcciones principales del plano 3D, se analizó el plano XZ obteniendo la fuerza transversal al usar la ecuación 1.

$$F_{transversal} = \sqrt{F_x^2 + F_z^2} = \sqrt{51.079^2 + 13.9638^2} = 52.95 \text{ N} \quad (1)$$

Estos valores se dividieron en cuatro, con el fin de aproximar la carga que actuaba en cada junta, de donde se obtuvo un valor de 13.24 N transversalmente y 10,24 N longitudinalmente en cada junta, así como se puede observar en la figura 1.

Para comprobar la resistencia de los tornillos se tuvo en cuenta un tornillo tipo 4.6, por lo que su resistencia última es 400 MPa y su resistencia a la fluencia 240 MPa. Posteriormente, se seleccionó un coeficiente de seguridad de 1.25, por lo cual se verificó su resistencia a cortante, a tracción y de la placa por aplastamiento.

**Figura 1**

*Representación gráfica de las fuerzas actuantes en los tornillos de la placa superior*

**Cálculos de Esfuerzos en la Junta*****Resistencia al Corte de la Junta***

Se implementó la ecuación 2 en el cálculo de la carga máxima que debería resistir la junta atornillada en cuestión (Montenegro Bernuy, 2017). El área resistente para un tornillo de rosca métrica M6 correspondió a  $20.12 \text{ mm}^2$  y el factor de seguridad mencionado previamente.

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 * S_{u,t} * A_S}{C_{s,t}} = \frac{0.6 * 400 * 20.12}{1.25} = 3863.04 \text{ N} \quad (2)$$

***Resistencia a la Tensión de la Junta***

De forma similar, se dispuso la ecuación 3 para obtener la carga máxima que resistía la junta experimentando una carga de tensión.

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 * S_{u,t} * A_S}{C_{s,t}} = \frac{0.9 * 400 * 20.12}{1.25} = 5794.56 \text{ N} \quad (3)$$

***Verificación de esfuerzos cortante y flector***

Después de obtener los valores de resistencia para cortante y tensión del tornillo de la junta se corroboró su resistencia. La condición de la ecuación 4, determinó el cumplimiento de la selección del tornillo.

$$\frac{F_{transversal}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_y}{1.4 * F_{t,Rd}} = \frac{52.95}{3863.04} + \frac{40.95}{1.4 * 5794.56} = 0.019 \leq 1 \quad (4)$$

### ***Cálculo del aplastamiento en la placa superior***

Después de comprobar la junta según el esfuerzo cortante y de tensión presente en los tornillos de la placa superior, se procedió a analizar el aplastamiento presente en la placa superior. Como respuesta, se implementó la ecuación 5 que tiene en cuenta la resistencia última de la placa y su espesor, el diámetro del agujero, y donde el valor de  $\alpha$  es el menor resultado entre las ecuaciones 6, 7 y 8.

$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 * S_u * d * t * \alpha}{C_{s,t}} = \frac{2.5 * 400 * 6 * 3.18 * 1}{1.25} = 15264 \text{ N} \quad (5)$$

Se comparó este valor con la carga transversal, al ser el único involucrado en el aplastamiento en la placa y se comprobó la inexistencia de este fenómeno en la placa.

$$\frac{e_1}{3 * d} = \frac{48}{3 * 6} = 2.67 \quad (6)$$

En la ecuación 6, el factor  $e_1$  representa la distancia al eje frontal con respecto a la junta, con un valor de 48 mm.

$$\frac{p_1}{3 * d} - \frac{1}{4} = \frac{44}{3 * 6} - \frac{1}{4} = 2.19 \quad (7)$$

En la ecuación 7, el factor  $p_1$  es la separación menor entre tornillos, según la disposición de los orificios, en este caso de 44 mm.

$$\frac{S_{u,t}}{S_u} = \frac{400}{400} = 1 \quad (8)$$

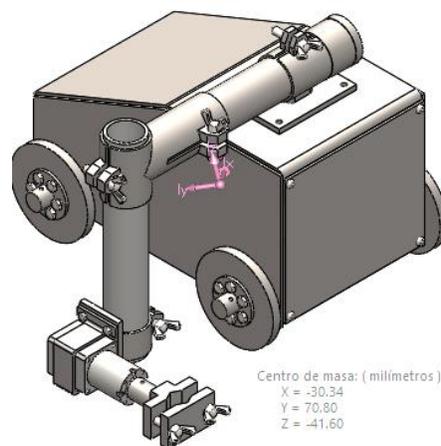
En la ecuación 8, se relacionó el valor de resistencia última del tornillo con la resistencia última de la placa.

### ***Revisión del volcamiento***

En la verificación del diseño del bastidor, se comprobó el volcamiento del sistema dada la carga externa del peso de la antorcha. Para este procedimiento se necesitó el peso total del sistema y la ubicación de su centro de masa, de donde se obtuvo que la máquina tuvo un peso aproximado de  $178.84\text{ N}$  y su centro de masa está ubicado en las coordenadas mostradas en la figura 2, de donde se analizó la condición límite de carga, bajo la hipótesis de que toda la fuerza normal se ejercía en la rueda más cargada, es decir, la más cercana al punto de apoyo de la antorcha.

### **Figura 2**

*Representación del centro de masa del sistema*



Tomando en cuenta lo previamente mencionado se encontraron dos distancias necesarias, la primera en el plano XZ entre la antorcha y el centro de masa con un valor de  $294.25\text{ mm}$  y la distancia entre la rueda donde actúa la normal y la antorcha aproximadamente de  $189.37\text{ mm}$ . Posteriormente se generaron la ecuación 9 en la sumatoria de momentos en el punto de apoyo de la antorcha y la ecuación 10 en la sumatoria de fuerzas en Y.

$$\sum M_{ant} = 0 = (N * 189.37) - (W * 294.25) \quad (9)$$

$$\sum F_y = 0 = N - W - W_{ant} \quad (10)$$

Al resolver el sistema de ecuaciones se obtuvo un nuevo valor de la fuerza normal del sistema de 277.89  $N$  y que el peso de la antorcha máximo que generó volcamiento es de 99.05  $N$ , lo cual favoreció el diseño formulado, ya que el peso de las antorchas analizadas no superó los 50  $N$ . En conclusión, el diseño resultó favorable en cuanto a su volcamiento.

### **Apéndice F. Planos de fabricación del sistema**

“Los planos están adjuntos al presente documento”

Plano 1. Vista isométrica del sistema de transporte y aplicación de soldadura

Plano 2. Vista frontal del sistema

Plano 3. Vista lateral derecha del sistema

Plano 4. Vista superior del sistema

Plano 5. Vista explosionada por subsistemas

Plano 6. Vista isométrica del subsistema de oscilación

Plano 7. Vista explosionada del subsistema de oscilación

Plano 8. Subsistema de oscilación. Pieza 1. Soporte horizontal

Plano 9. Subsistema de oscilación. Pieza 2. Eje horizontal

Plano 10. Subsistema de oscilación. Pieza 3. Tapón horizontal

Plano 11. Subsistema de oscilación. Pieza 4. Soporte en T

Plano 12. Subsistema de oscilación. Pieza 5. Eje vertical

Plano 13. Subsistema de oscilación. Pieza 6. Soporte vertical

Plano 14. Subsistema de oscilación. Pieza 7. Soporte de antorcha 1

Plano 15. Subsistema de oscilación. Pieza 8. Soporte de antorcha 2

Plano 16. Subsistema de oscilación. Pieza 9. Soporte motor de oscilación

Plano 17. Vista isométrica del subsistema de avance

Plano 18. Vista explosionada del subsistema de avance

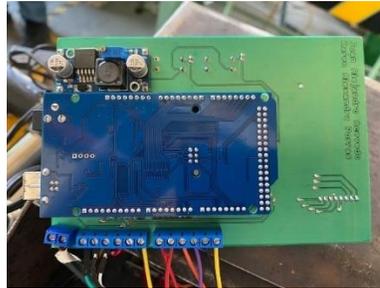
Plano 19. Subsistema de avance. Pieza 1. Eje trasero

Plano 20. Subsistema de avance. Pieza 2. Superficie de rueda

- Plano 21. Subsistema de avance. Pieza 3. Sujetador de rueda
- Plano 22. Subsistema de avance. Pieza 4. Interior de rueda
- Plano 23. Subsistema de avance. Pieza 5. Soporte de rodamiento
- Plano 24. Subsistema de avance. Pieza 6. Eje delantero
- Plano 25. Subsistema de avance. Pieza 7. Buje eje-rodamiento
- Plano 26. Subsistema de avance. Pieza 8. Soporte derecho motor de avance
- Plano 27. Subsistema de avance. Pieza 9. Soporte izquierdo motor de avance
- Plano 28. Vista isométrica del bastidor
- Plano 29. Vista explosionada del bastidor
- Plano 30. Bastidor. Pieza 1. Placa inferior
- Plano 31. Bastidor. Pieza 1. Placa inferior desplegada
- Plano 32. Bastidor. Pieza 2. Placa lateral
- Plano 33. Bastidor. Pieza 3. Placa superior
- Plano 34. Bastidor. Pieza 3. Placa superior desplegada
- Plano 35. Bastidor. Pieza 4. Placa intermedia
- Plano 36. Bastidor. Pieza 5. Placa compuerta
- Plano 37. Vista isométrica de la interfaz del sistema
- Plano 38. Vista explosionada de la interfaz del sistema
- Plano 39. Interfaz del sistema. Pieza 1. Panel de interfaz
- Plano 40. Interfaz del sistema. Pieza 2. Placa PCB
- Plano 41. Interfaz del sistema. Pieza 2. Placa PCB: Esquema

**Apéndice G. Fabricación del sistema****Figura 1**

*Placa principal subsistema de control*

**Figura 2**

*Montaje del subsistema de control*

**Figura 3**

*Soporte base motor de doble eje del subsistema de desplazamiento*



**Figura 4**

*Soporte de rodamientos del subsistema de desplazamiento*

**Figura 5**

*Soporte de unión para la rueda y eje del subsistema de desplazamiento*

**Figura 6**

*Rueda del subsistema de desplazamiento*



**Figura 7**

*Ensamblaje del motor del subsistema de desplazamiento*



**Figura 8**

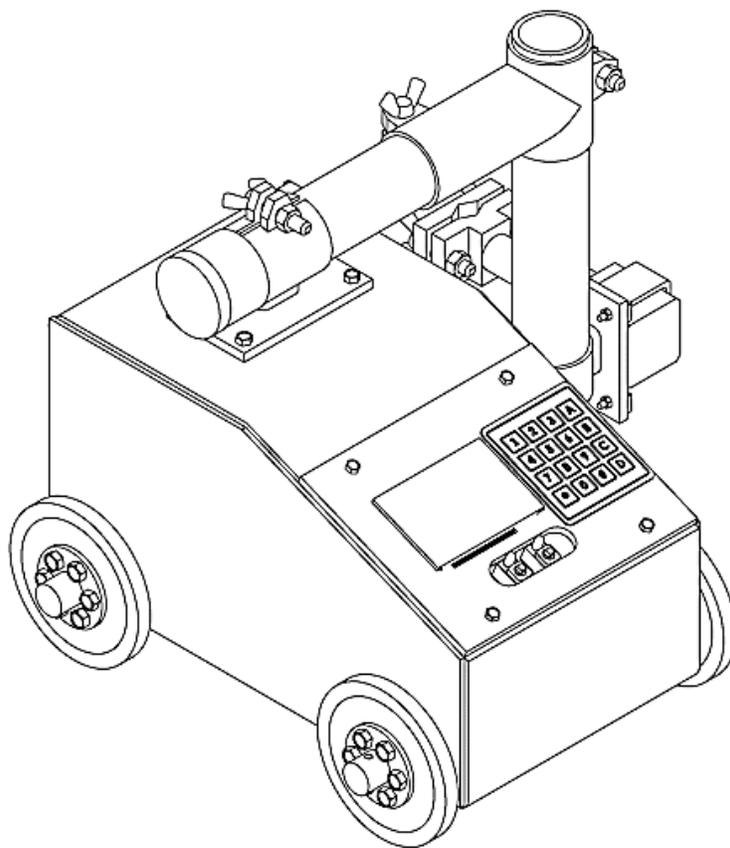
*Subsistema de desplazamiento*



**Apéndice H. Manual de operación y mantenimiento.**

# **MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

## **SISTEMA PROGRAMABLE DE TRANSPORTE PARA LA APLICACIÓN DE SOLDADURA LINEAL**



Juan Alejandro Acevedo Osma - Karen Alexandra Porras Rodriguez  
PhD. Alberto David Pertuz Comas  
Ingeniero Mecánico y Especialista Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra

Universidad Industrial de Santander - Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**Tabla de contenido**

	<b>Pág</b>
1. Información general.....	3
1.1. Aplicación.....	3
1.2. Datos técnicos.....	3
1.3. Dimensiones.....	4
1.4. Diseño.....	5
2. Recomendaciones de seguridad.....	7
3. Puesta en marcha y funcionamiento.....	9
3.1. Configuración del equipo.....	9
3.2. Ejecución de la operación.....	10
3.3. Finalización del proceso.....	11
4. Mantenimiento.....	12
4.1. Rutina de mantenimiento.....	12
4.2. TroubleShooting.....	13
4.3. Lista de repuestos.....	14

## 1. Información general

### 1.1 Aplicación

El sistema programable de transporte para la aplicación de soldadura lineal es un mecanismo diseñado para asistir los procesos de automatización de soldadura en los distintos campos de aplicación presentes en el país. El equipo puede trabajar en la posición plana 1F y 1G, con o sin oscilación. Se desplaza sobre cuatro ruedas de acero revestidas de una capa de polímero de cloropreno conocido comercialmente como neopreno de 10 cm (3.94”) de diámetro y 9.525 mm (3/8”) de espesor conducidas por un motorreductor de doble eje. El movimiento oscilatorio se realiza por medio de un motor paso a paso conectado a un sistema de piezas que facilitan el ajuste de la antorcha de soldadura según los requerimientos de operación.

### 1.2 Datos técnicos

**Tabla 1**

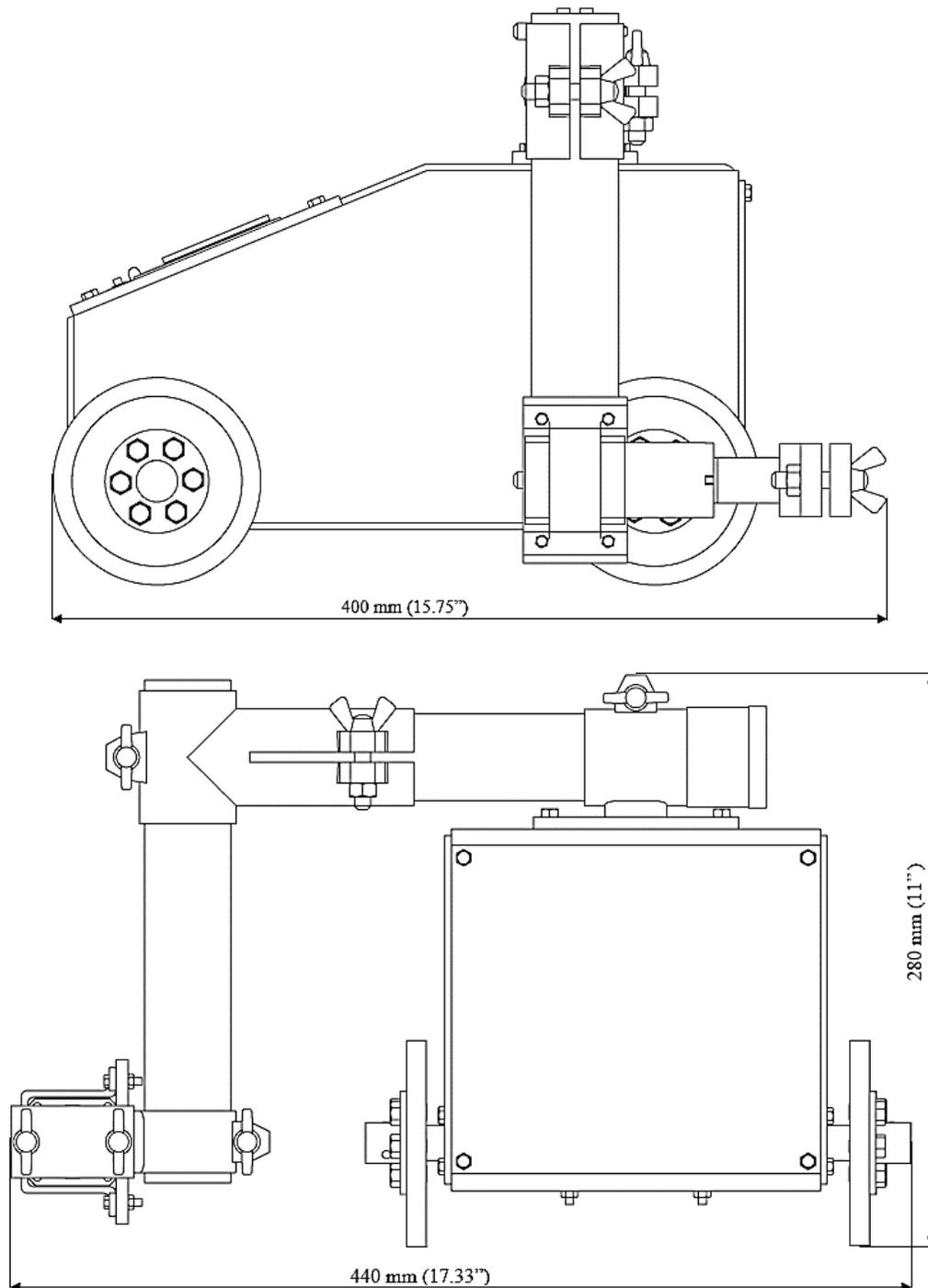
*Datos técnicos del sistema*

Voltaje	<b>110 V, 60Hz</b>
Potencia	<b>60W</b>
Posiciones de soldadura (según la norma ISO 6947)	<b>1F/1G</b>
Tipo de antorcha	<b>MIG/MAG</b>
Diámetro de antorcha	<b>16 – 22 mm (0.63 – 0.87”)</b>
Velocidad de desplazamiento	<b>0 – 120 cm/min (47.25 in/min)</b>
Velocidad de oscilación	<b>0 – 15 rpm min</b>
Ángulo de oscilación	<b>0-90°</b>
Retraso de oscilación en el centro y los extremos	<b>0 – 1000 cs</b>
Temperatura ambiente máxima permitida	<b>50°C (122F)</b>
Humedad ambiental máxima permitida	<b>85%</b>
Peso	<b>20 kg (44lb)</b>

### 1.3 Dimensiones

**Figura 1**

*Medidas generales del sistema*



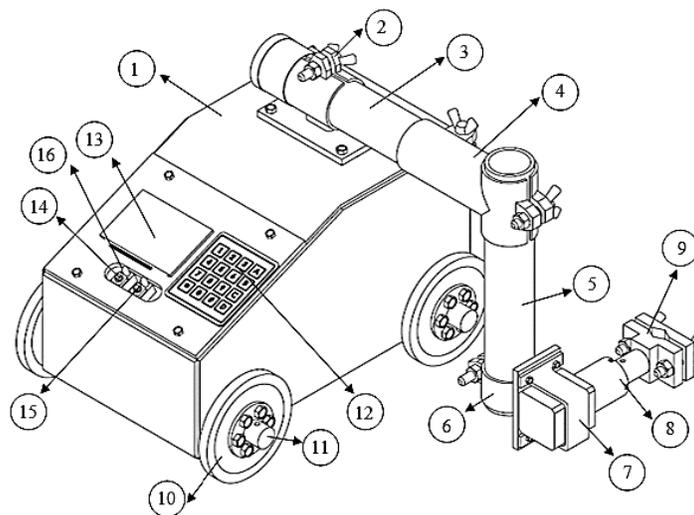
## 1.4 Diseño

El sistema programable para la aplicación de soldadura lineal está constituido por un bastidor, un subsistema de desplazamiento, un subsistema de oscilación y un subsistema de control. El bastidor está diseñado de láminas de acero estructural ASTM A36 de 1/8" de espesor. El subsistema de desplazamiento se compone de un motorreductor de corriente continua de doble eje, soportado por medio de bases elaboradas en láminas del mismo acero, cuatro ruedas de espesor 3/8" y dos tubos macizos de diámetro exterior de 17.12 mm (0.67").

El subsistema de oscilación es un conjunto de acoplamientos fabricados en acero estructural y dos tubos metálicos encargados del posicionamiento vertical y horizontal de la antorcha de soldadura, también, un motor paso a paso y un soporte para la antorcha de soldadura. Por otro lado, la interfaz del equipo se compone de una pantalla, un teclado matricial, dos pulsados y dos leds indicadores, que permiten la interacción del usuario final con el sistema mediante la regulación de los parámetros del proceso de soldadura.

### Figura 2

*Partes del sistema programable para la aplicación de soldadura lineal*



<b>1</b>	Bastidor	<b>9</b>	Soporte de antorcha de soldadura
<b>2</b>	Acoplamiento base	<b>10</b>	Rueda de desplazamiento
<b>3</b>	Eje horizontal	<b>11</b>	Soporte de rueda
<b>4</b>	Acoplamiento en T	<b>12</b>	Teclado matricial
<b>5</b>	Eje vertical	<b>13</b>	Pantalla
<b>6</b>	Acoplamiento del motor	<b>14</b>	Pulsador On / Off
<b>7</b>	Soporte del motor	<b>15</b>	Pulsador Start / Pause
<b>8</b>	Motor paso a paso	<b>16</b>	Leds indicadores

## 2. Recomendaciones de seguridad

Las siguientes recomendaciones se deben tener en cuenta en la puesta en marcha del equipo. La desatención podría poner en riesgo la integridad física de quienes estén en el lugar de trabajo u ocasionar pérdidas en el sistema.

- ❖ Para el uso y manejo de cualquier equipo de soldadura debe contarse con la aprobación del personal del taller.
- ❖ Los elementos de protección recomendados durante las operaciones de soldadura son requisito para permanecer en el área de trabajo.
- ❖ Para la configuración e iniciación de aplicaciones especializadas, es necesaria la validación de personal calificado o con formación en procesos de soldadura acorde a normas constructivas.
- ❖ El sistema programable debe estar completo y todas sus piezas deben ser auténticas y totalmente operativas.
- ❖ Conectar el sistema a una fuente de alimentación con conexión a tierra.
- ❖ Evitar las operaciones en áreas húmedas. La exposición a la lluvia puede generar daños por corrosión.
- ❖ Nunca cargar el equipo por los cables o el soporte para la antorcha de soldadura.
- ❖ Antes de comenzar, asegurarse de la condición adecuada del bastidor, la fuente de alimentación, el cable de la antorcha de soldadura, el revestimiento de las ruedas, y la interfaz.
- ❖ No colocar el equipo sobre superficies calientes.
- ❖ Instalar solo antorchas de soldadura MIG/MAG con el diámetro de cuello correspondiente al soporte de la antorcha en uso.

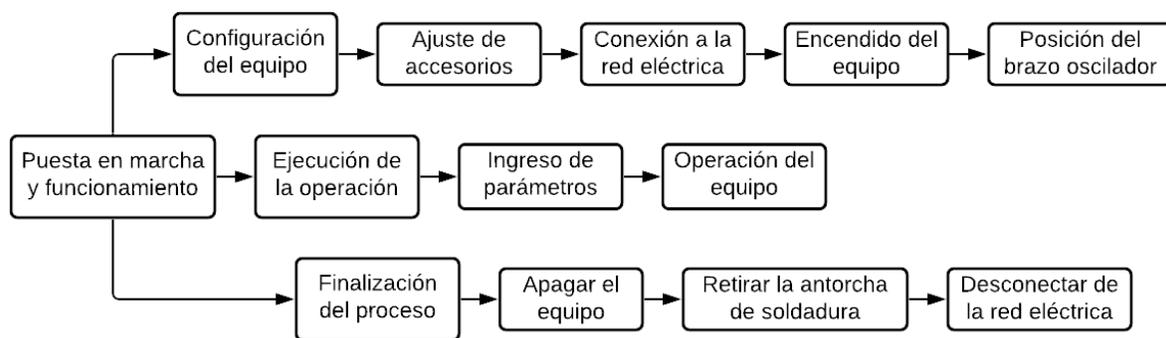
- ❖ Cuando se trabaje en altura, proteja el sistema contra las caídas. Para ello, asegúrese de contar con un espacio suficiente para alojar el equipo según las medidas presentadas en el manual de operación y mantenimiento.
- ❖ No ubicarse debajo del sistema cuando se esté trabajando en altura.
- ❖ Antes de cada uso, inspeccionar el equipo para asegurar que todo está en óptimas condiciones. Comprobar si hay piezas deterioradas o mal ajustadas. Mantener las condiciones adecuadas que puedan afectar el funcionamiento del equipo.
- ❖ No tratar de detener manualmente el movimiento del sistema. Para detenerlo, utilice los pulsadores de la interfaz.
- ❖ Realice el mantenimiento solo cuando el equipo esté desconectado de la fuente de alimentación.
- ❖ Si el equipo se cae desde cualquier altura, se moja o presenta cualquier otro daño que pueda afectar su estado técnico, detenga el funcionamiento y contacte el centro de servicio de inspección y reparación.
- ❖ Nunca abandone el lugar de trabajo mientras el sistema está operando.

### 3. Puesta en marcha y funcionamiento

Después de ubicar el equipo en el lugar de trabajo dispuesto, se tiene en cuenta el procedimiento mostrado en la figura 3.

**Figura 3.**

*Procedimiento de operación del sistema*



#### 3.1 Configuración del equipo

En primer lugar, se adapta la antorcha de soldadura mediante los ejes vertical y horizontal del subsistema de oscilación según la ubicación de la junta a soldar. Posteriormente, se conecta el cable a la fuente de alimentación teniendo en cuenta las recomendaciones de seguridad del Manual de Operación y Mantenimiento. Una vez conectado el sistema se oprime el pulsador on / off para encenderlo. Inmediatamente el brazo oscilador comienza a girar, por lo cual debe presionarse la opción A del teclado matricial para detenerlo.

A continuación, para acondicionar la antorcha de soldadura se separa el soporte por medio de las tuercas mariposa hasta la distancia requerida teniendo en cuenta el diámetro del cuello de la antorcha. Finalmente se verifica que la antorcha quede ajustada correctamente.

### 3.2 Ejecución de la operación

Para ingresar los parámetros de operación requeridos se utiliza el teclado matricial según lo que indica la pantalla de la interfaz del sistema. En la tabla 2 se presenta el detalle de las variables.

**Tabla 2**

*Parámetros operativos del sistema*

Orden de aparición	Parámetro de operación	Valor	Descripción
1	Velocidad de avance	0 – 120 [cm/min]	Distancia recorrida por el sistema en determinado tiempo. Se determina teniendo en cuenta la velocidad de alimentación del alambre de soldadura y el área de la unión soldada
2	Rpm oscilatorios	0 – 15 [rpm/min]	La velocidad angular es la tasa de tiempo a la que un objeto rota alrededor de un eje.
3	Angulo oscilatorio	0 – 90 [°]	Desplazamiento de la antorcha de soldadura durante el trazado. El ángulo para alcanzar la mayor amplitud de onda es de 45° desde el eje vertical.
4	Delay en el centro	0 – 1000 [cs]	El retardo es el tiempo en el que la antorcha se detiene en su posición mientras aplica la cantidad necesaria en el proceso de fusión
5	Delay en la derecha	0 – 1000 [cs]	
6	Delay en la izquierda	0 – 1000 [cs]	

Posterior al ingreso de parámetros se muestran los valores en pantalla como se observa en la figura 4. Si los valores ingresados superan los rangos de operación del sistema se deberá reiniciar el equipo y realizar nuevamente el proceso.

**Figura 4**

*Parámetros de operación del sistema en la interfaz*



Si los parámetros son adecuados se presiona el pulsador start /pause en la interfaz, en seguida se inicia el proceso.

**3.3 Finalización del proceso**

Una vez finalizado el trabajo, se detiene el movimiento mediante el pulsador start/pause y se apaga el sistema pulsando on/off. Se retira la antorcha de soldadura desajustando las tuercas mariposa y se desconecta el equipo de la fuente de alimentación. Se deben tener en cuenta las recomendaciones de seguridad del Manual de Operación y Mantenimiento.

## 4. Mantenimiento

### 4.1 Rutina de mantenimiento

Actividad	Frecuencia	Duración [horas]
Inspección del sistema	Diaria	1
Limpieza de los revestimientos de las ruedas	Diaria	1
Ajustar y lubricar tuercas y tornillos	Quincenal	1
Revisión de corrosión	Trimestral	1
Revisión de conexiones eléctricas	Semanal	1
Verificar contactos en la placa PCB de la interfaz del sistema	Mensual	2
Verificar linealidad de avance del sistema	Bimensual	2
Limpieza de superficie del equipo	Semanal	1
Inspección de rodamientos	Semestral	2
Comprobación de funcionamiento de pulsadores y teclado matricial	Mensual	1

## 4.2 Troubleshooting

Síntoma	Causa	Solución
Pantalla LCD oscura después de conectar el equipo a la fuente de alimentación	Mal funcionamiento del cable de alimentación Falta de energía en el lugar de trabajo Problemas de conexión en la interfaz	Revisar el equipo y el lugar de trabajo
Anomalías en la pantalla LCD. Imposibilidad de leer los valores	Daños en la pantalla por exposición al agua. Daños en la fuente de alimentación	Revisar la interfaz del equipo y cambiar la pieza de ser necesario
Deterioro del revestimiento de las ruedas	Superficies rugosas Superficies calientes	Cambiar el revestimiento cuando el equipo esté fuera de operación
Detenimiento del desplazamiento	La carga de la antorcha sobrepasa la carga máxima permitida Deterioro del revestimiento de las ruedas Fallo en la fuente de alimentación	Revisar la carga de la antorcha de soldadura Inspeccionar el funcionamiento de la interfaz del sistema
Fallo en los pulsadores	Exposición al agua Fallo en la fuente de alimentación	Revisar la interfaz del sistema Revisar el cable de alimentación de la fuente
Corrosión	Exposición al agua	Reemplazar la pieza
Fricción en los ejes de desplazamiento	Fallo de los rodamientos	Revisar los bujes y rodamientos del sistema de desplazamiento
Vibración del subsistema de oscilación	Tornillos y tuercas desajustados Superficie de trabajo irregular	Ajustar y lubricar tuercas y tornillos Revisar la zona de trabajo
Detenimiento del movimiento oscilatorio	Fallo en la fuente de alimentación Exceso de carga en la antorcha	Revisar el cable de alimentación Revisar la carga de la antorcha

## 4.3 Lista de repuestos

Cantidad	Denominación	Notas
1	Motor de desplazamiento	<p>Motor de reducción de velocidad de doble eje  Tensión nominal: 12 V dc  Velocidad sin carga: 5 RPM  Eje de salida: 0.315 in x 0.591 in  Dimensiones del cuerpo del motor: 1.22 x 2.24 in  Dimensiones de la caja de cambios: 2.283 x 1.575 x 1.378 in  Longitud del cable: 7.9 in  <a href="http://tinyurl.com/Motordeavance">tinyurl.com/Motordeavance</a></p>
1	Motor de oscilación	<p>Nema 17 stepper motor bipolar  L=48mm w/Gear Ratio 51:1  Planetary gearbox  Tamaño del marco: 42 x 42 mm  Longitud del motor: 48 mm  Longitud de la caja de cambios: 42.7 mm  Diámetro del eje: 8 mm  Longitud del eje: 20 mm  Longitud del corte en D: 15 mm  Número de cables: 4  Longitud del cable: 500 mm  Peso: 620g  <a href="https://www.omc-stepperonline.com/">https://www.omc-stepperonline.com/</a></p>
4	Rodamientos	<p>Rodamiento rígido de bolas SKF 61804  <a href="https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-61804">https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-61804</a></p>
4	Recubrimiento de neopreno	<p>Anillos de 100 mm de diámetro exterior x diámetro interno 81 mm x espesor 3/8”  Tecnicauchos y plásticos  Cra 19 #22-12, Bucaramanga, Santander, Colombia</p>

1	Microcontrolador Arduino mega	<p>Voltaje de alimentación: 7-12V          Voltaje de funcionamiento 5Vdc          N° Puertos: 54I/O</p> <p><a href="https://dynamoelectronics.com/tienda/arduino-mega-adk/">https://dynamoelectronics.com/tienda/arduino-mega-adk/</a></p>
1	Controlador del motor de oscilación	<p>Corriente máxima de salida: 1.0~4.2A (3.0 RMS)          Voltaje de entrada: +20~50VDC (típico 36VDC)          Corriente de señal lógica: 7 ~ 16 mA (típico 10 mA).          Frecuencia de entrada de pulso: 0 ~ 200 kHz.          Ancho del pulso: 2,5 µS.          Resistencia de aislamiento: 500 MΩ.</p> <p><a href="https://www.omc-stepperonline.com/stepper-motor-driver/">https://www.omc-stepperonline.com/stepper-motor-driver/</a></p>
1	Controlador del motor de desplazamiento	<p>Controlador PWM de velocidad de motor          Voltaje de funcionamiento: 6V-90VDC          Potencia: 0.01-1000W (Corriente máxima: 15A)          Corriente de reposo: 0.05A (en espera)          Ciclo de trabajo PWM: 0% -100%          Frecuencia de PWM: 15khz</p> <p><a href="https://electronilab.co/tienda/controlador-pwm-de-velocidad-de-motor-dc-6v-90v-15a/">https://electronilab.co/tienda/controlador-pwm-de-velocidad-de-motor-dc-6v-90v-15a/</a></p>
1	Pantalla tft lcd	<p>Tipo de LCD: TFT transmissivo          Dirección de visualización: 12 en punto          Contorno del módulo (ancho x alto x profundidad): 2.185 x          3.345 x 0.098 in.          Área activa: 2.891 x 1.928 in.          Número de puntos: 320 (RGB) x 480          Driver IC: ILI9486</p> <p>Tipo de retroiluminación: 6 chips LED blancos, paralelo          Tipo de interfaz: paralelo de 16 bits.          Voltaje de entrada: 2,8 ~ 3,3 V</p> <p><a href="http://tinyurl.com/pantallatft">tinyurl.com/pantallatft</a></p>
1	Teclado matricial	<p>Máximo voltaje operativo: 24V          Tiempo de rebote: 5 ms          Tipo de conector: hembra          Largo cable: 7.5 cm          Dimensiones: 8 x 7 cm          Peso: 20 g</p>

<https://electronilab.co/tienda/teclado-matricial-de-membrana-4x4-16-digitos/>

Voltaje de entrada: 110V

Voltaje de salida: 12V

Corriente de salida: 5A

1 Fuente de alimentación

<https://electronicasdc.com.co/product/798-s-60-12-fuente-12vdc-5a-in-110-220vac.html?search=fuente%2012v>

6 ANSI B18.6.7 –  
M8x1.25x45  
DIN 315 M8 x 1.5

6 ANSI B18.6.7 –  
M8x1.25

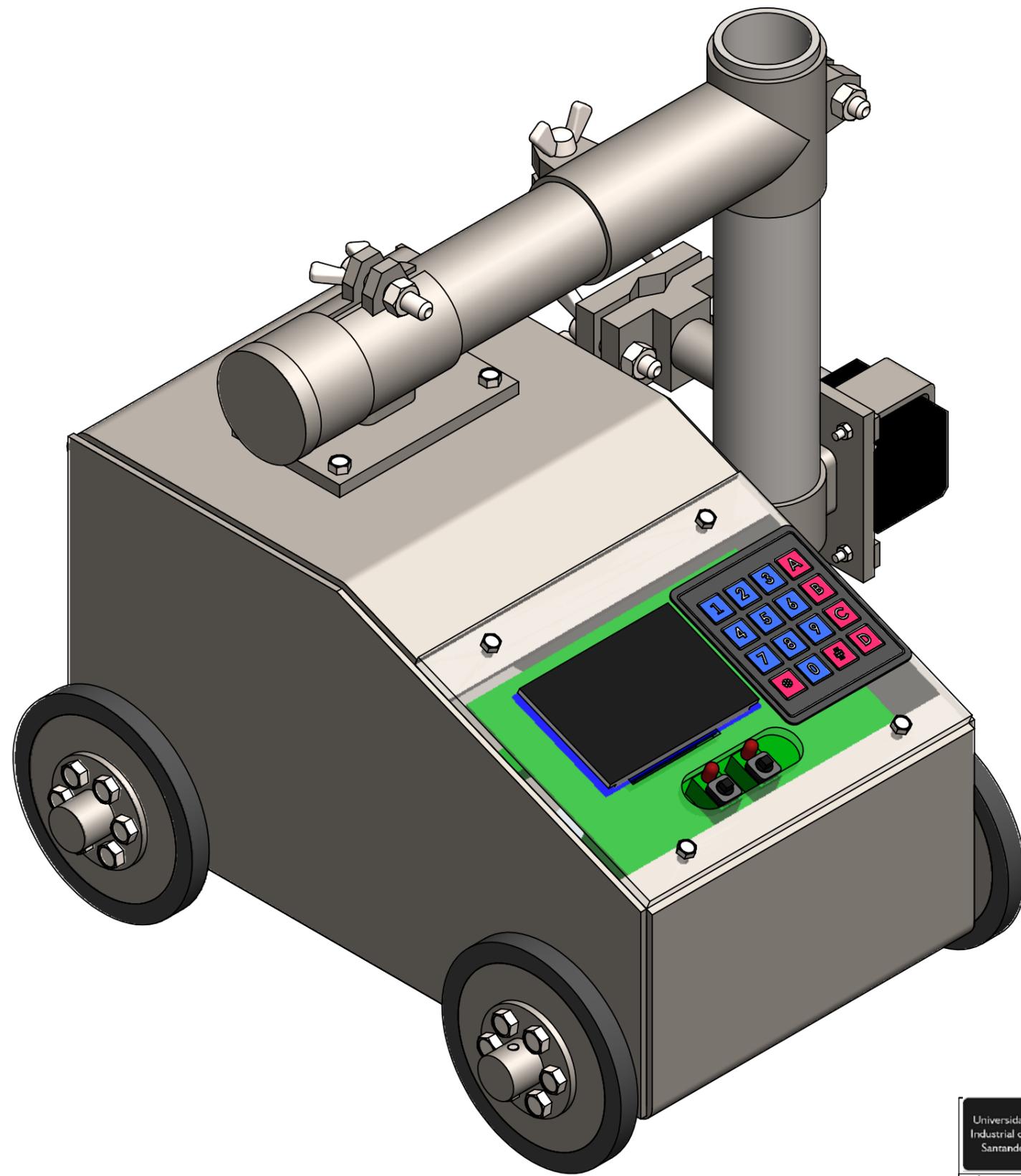
Tuercas y tornillos del soporte del motor paso a paso del sistema

4 ANSI B18.6.7 –  
M3.5x0.6x16

ANSI B18.2.4 –  
M3.5x06

6 DIN 315 M8 x  
1.25

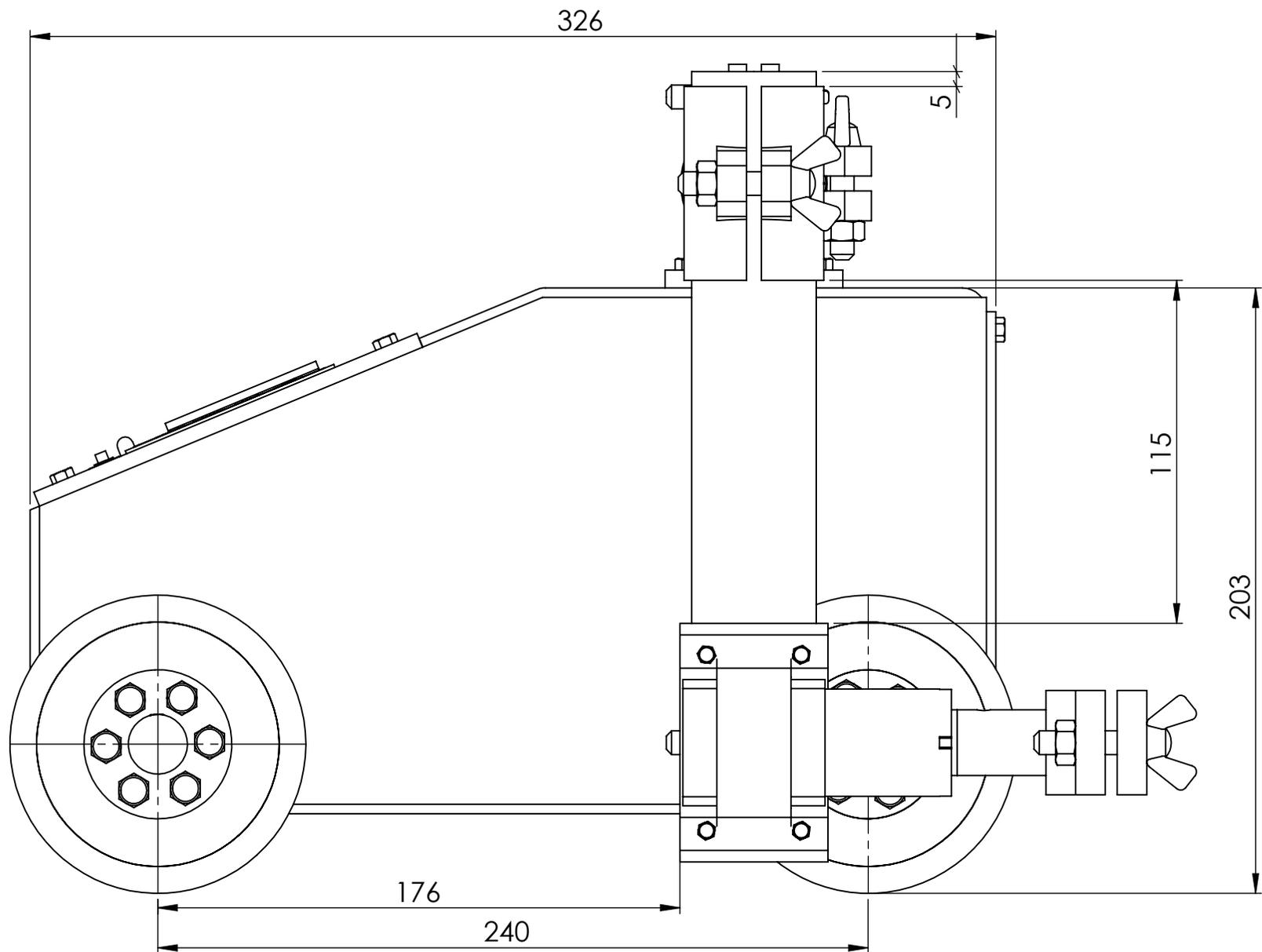
---



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

TÍTULO: SISTEMA PROGRAMABLE PARA LA APLICACIÓN DE SOLDADURA LINEAL  
VISTA ISOMÉTRICA

	DIBUJADO POR:	JUAN ACEVEDO KAREN PORRAS	FECHA: 02/10/21
FORMATO: A3	REVISADO POR:	ALBERTO PERTUZ OSCAR BOHÓRQUEZ	ESCALA: 1:1
UNIDADES: MM	MATERIAL:	ACERO ASTM A36	PL N° 1



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

VISTA FRONTAL

SISTEMA DE  
TRANSPORTE PARA  
LA APLICACIÓN DE  
SOLDADURA LINEAL

MATERIAL: A36

ESCALA: 1:2

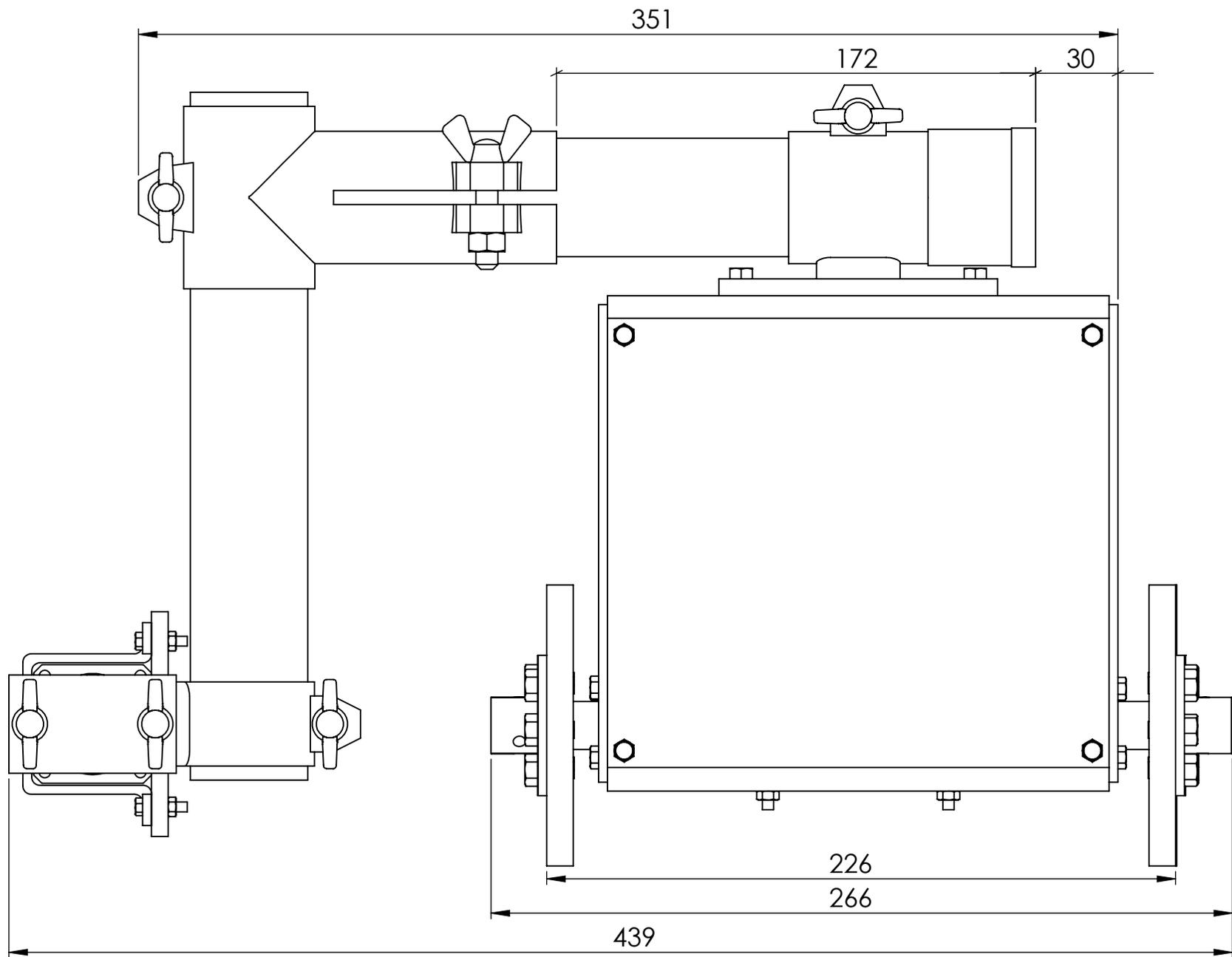
MEDIDAS: mm

FECHA: 02/10/21

DIBUJADO POR:

JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

PL # 2



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

VISTA LATERAL

SISTEMA DE  
TRANSPORTE PARA  
LA APLICACIÓN DE  
SOLDADURA LINEAL

MATERIAL: A36

ESCALA: 1:2

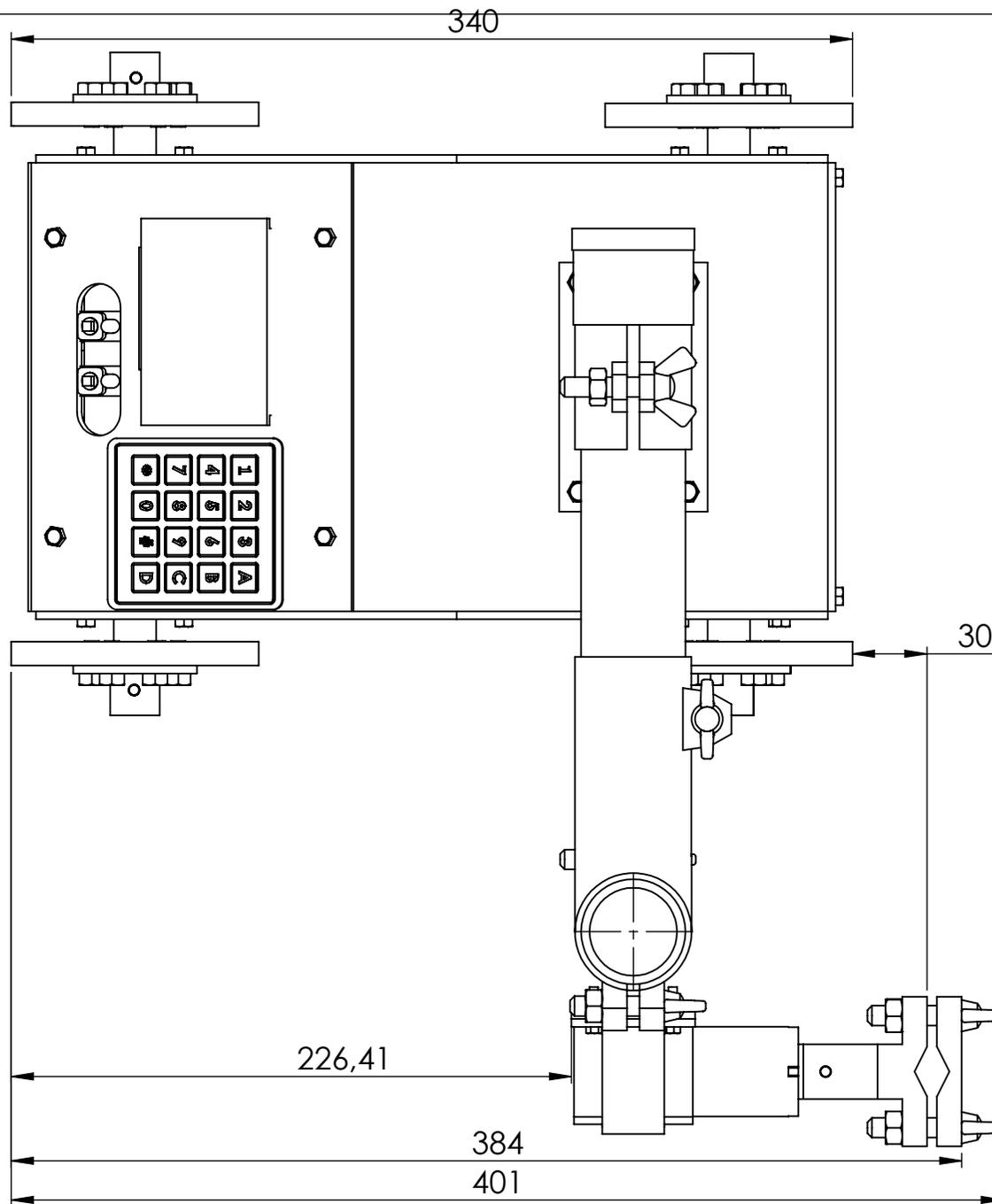
MEDIDAS: mm

FECHA: 02/10/21

DIBUJADO POR:

JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

PL # 3



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

ESCALA: 1:3    MEDIDAS: mm    FECHA: 02/10/21

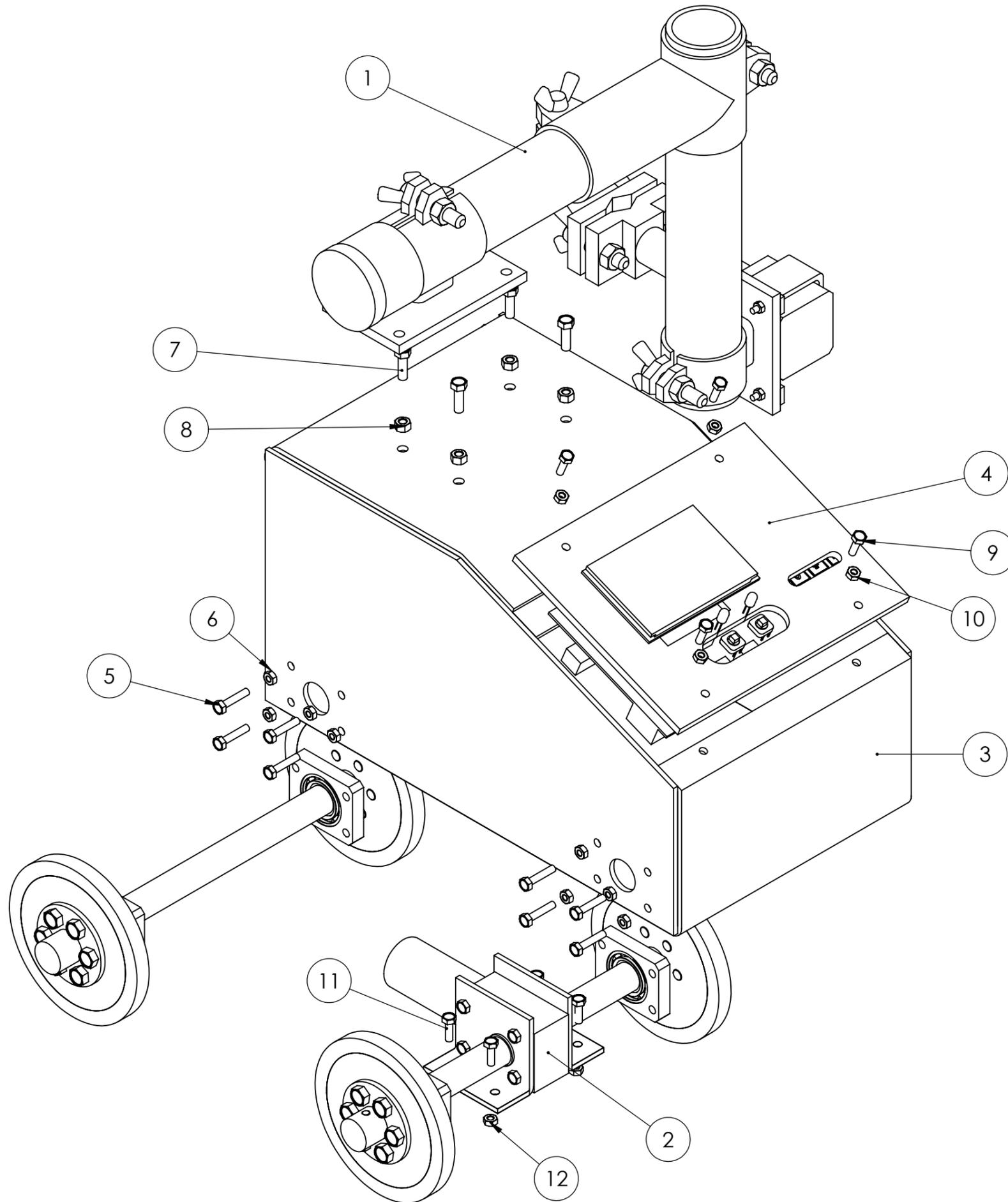
VISTA SUPERIOR

DIBUJADO POR: JA. ACEVEDO K. PORRAS

SISTEMA DE TRANSPORTE PARA LA APLICACIÓN DE SOLDADURA LINEAL

MATERIAL: A36

PL # 4



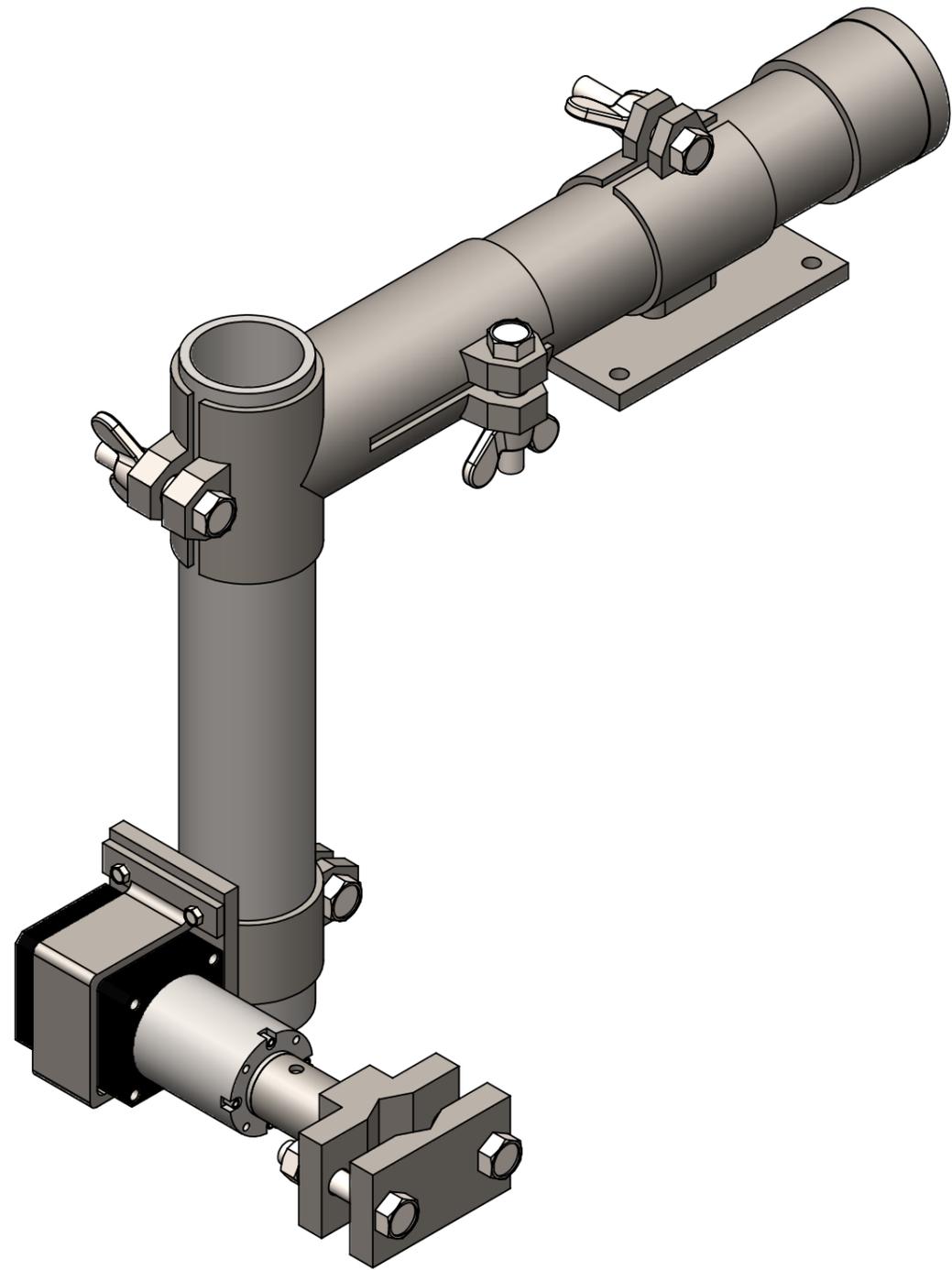
#	NOMBRE	CANT	MATERIAL
1	SUBSISTEMA DE OSCILACIÓN	1	ASTM A36
2	SUBSISTEMA DE AVANCE	1	ASTM A36
3	BASTIDOR	1	ASTM A36
4	INTERFAZ	1	VARIOS
5	TORNILLO FIJACIÓN SUB. DE AVANCE	16	ANSI B18.6.7 - M4 X 0.7 X 20
6	TUERCA FIJACIÓN SUB. DE AVANCE	16	ANSI B18.2.4.1 - M4 X 0.7
7	TORNILLO FIJACIÓN SUB. DE OSCILACIÓN	4	ANSI B18.6.7 - M5 X 0.8 X 16
8	TUERCA FIJACIÓN SUB. DE OSCILACIÓN	4	ANSI B18.2.4.1 - M5 X 0.8
9	TORNILLO FIJACIÓN INTERFAZ	4	ANSI B18.6.7 - M4 X 0.7 X 13
10	TUERCA FIJACIÓN INTERFAZ	4	ANSI B18.2.4.1 - M4X0.7
11	TORNILLO FIJACIÓN SUB. DE AVANCE	4	ANSI B18.6.7 - M4 X 0.7 X 13
12	TUERCA FIJACIÓN SUB. DE AVANCE	4	ANSI B18.2.4.1 - M4X 0.7



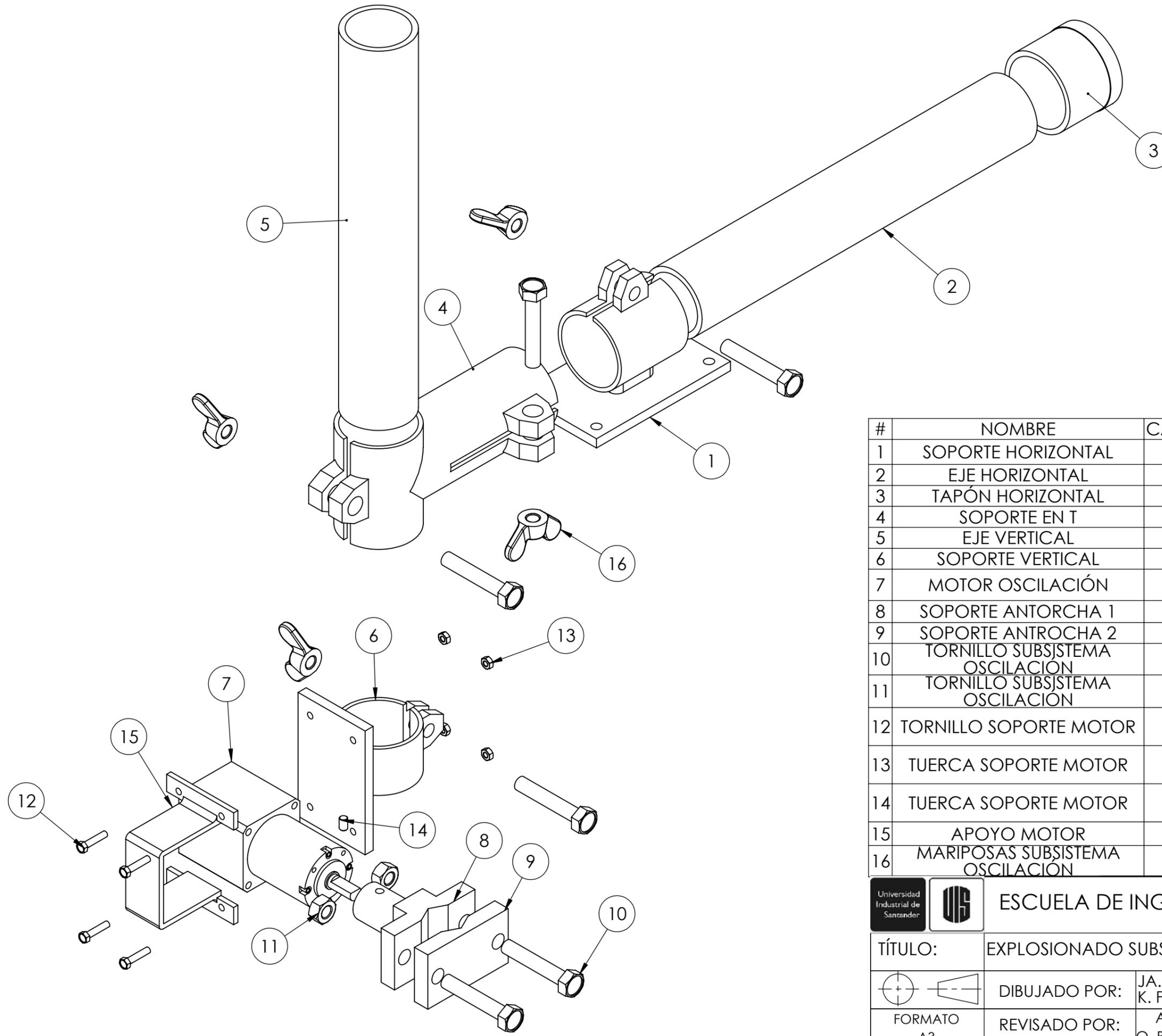
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

TÍTULO: SISTEMA PROGRAMABLE PARA LA APLICACIÓN DE SOLDADURA LINEAL  
VISTA EXPLOSIONADA

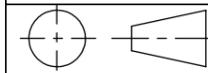
	DIBUJADO POR:	JUAN ACEVEDO KAREN PORRAS	FECHA: 02/10/21
FORMATO: A3	REVISADO POR:	ALBERTO PERTUZ OSCAR BOHÓRQUEZ	ESCALA: 1:2
UNIDADES: mm	MATERIAL:	ACERO ASTM A36	PL N° 5

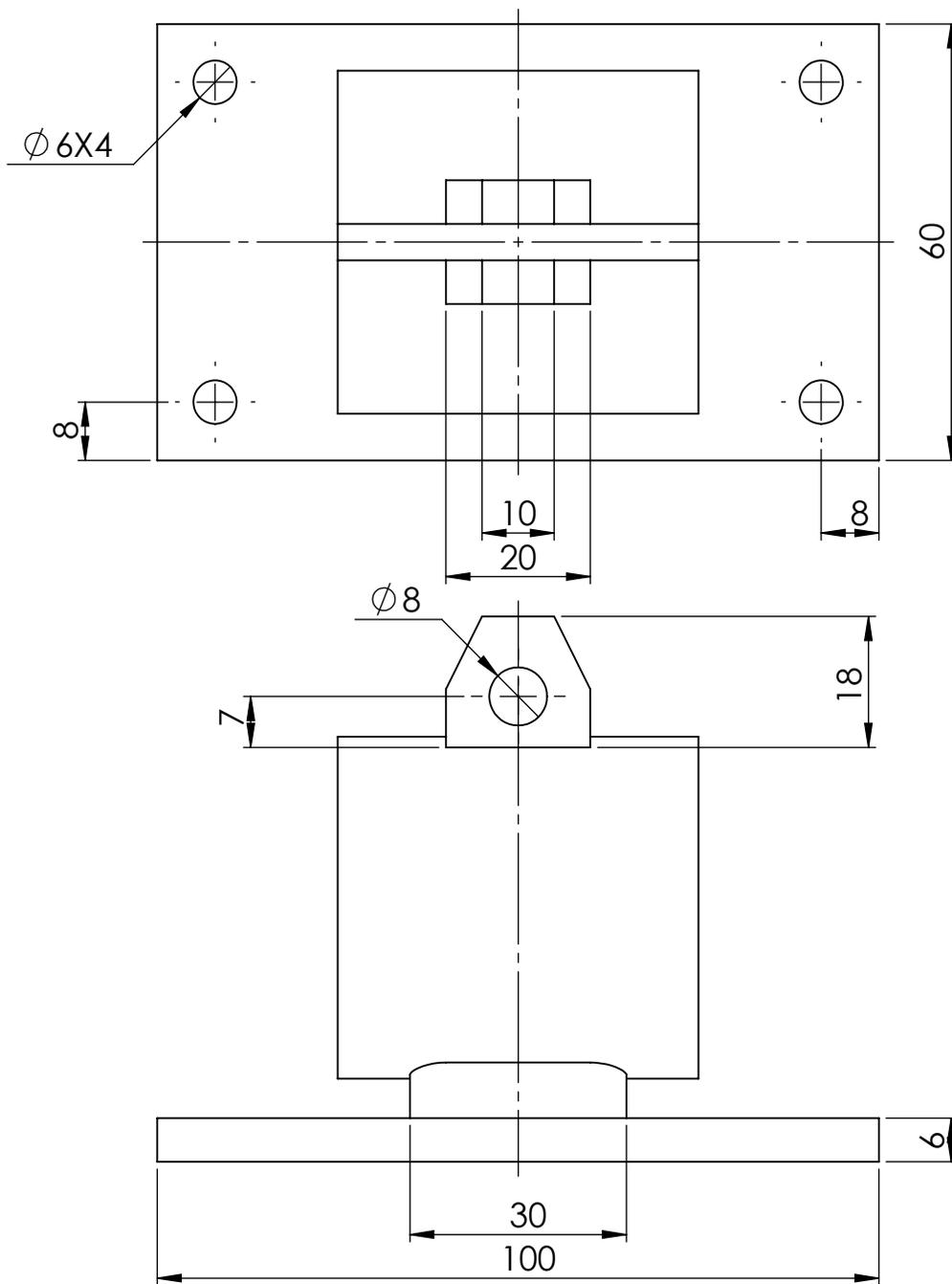


		<b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>	
<b>TÍTULO:</b>		<b>ISOMÉTRICO SUBSISTEMA DE OSCILACIÓN</b>	
		<b>DIBUJADO POR:</b> JA. ACEVEDO K. PORRAS	<b>FECHA:</b> 02/10/21
<b>FORMATO</b> A3	<b>REVISADO POR:</b> A. PERTUZ O. BOHÓRQUEZ	<b>ESCALA</b> 1:2	
<b>MEDIDAS EN:</b> MILIMETROS	<b>MATERIAL:</b>	ASTM A36	PL N°6



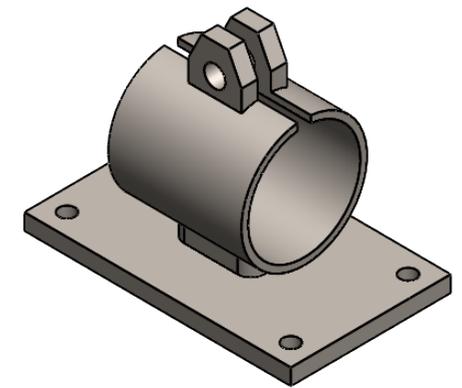
#	NOMBRE	CANT	MATERIAL/REF
1	SOPORTE HORIZONTAL	1	ASTM A36
2	EJE HORIZONTAL	1	ASTM A36
3	TAPÓN HORIZONTAL	1	ASTM A36
4	SOPORTE EN T	1	ASTM A36
5	EJE VERTICAL	1	ASTM A36
6	SOPORTE VERTICAL	1	ASTM A36
7	MOTOR OSCILACIÓN	1	NEMA 17 - 51:1
8	SOPORTE ANTORCHA 1	1	ASTM A36
9	SOPORTE ANTORCHA 2	1	ASTM A36
10	TORNILLO SUBSISTEMA OSCILACION	6	ANSI B18.6.7 - M8 X 1.25 X 45
11	TORNILLO SUBSISTEMA OSCILACION	6	ANSI B18.6.7 - M8 X 1.25 X 45
12	TORNILLO SOPORTE MOTOR	4	ANSI B18.6.7 - M3.5 X 0.6 X 16
13	TUERCA SOPORTE MOTOR	4	ANSI B18.6.7 - M3.5 X 0.6
14	TUERCA SOPORTE MOTOR	4	ANSI B18.6.7 - M3.5 X 0.6
15	APOYO MOTOR	1	ASTM A36
16	MARIPOSAS SUBSISTEMA OSCILACION	4	DIN 315 M8 X 1.25

 		<b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>	
TÍTULO:		EXPLOSIONADO SUBSISTEMA DE OSCILACIÓN	
	DIBUJADO POR:	JA. ACEVEDO K. PORRAS	FECHA:02/10/21
	REVISADO POR:	A. PERTUZ O. BOHÓRQUEZ	ESCALA 1:2
FORMATO A3  MEDIDAS EN: MILIMETROS	MATERIAL:	ASTM A36	PL N° 7

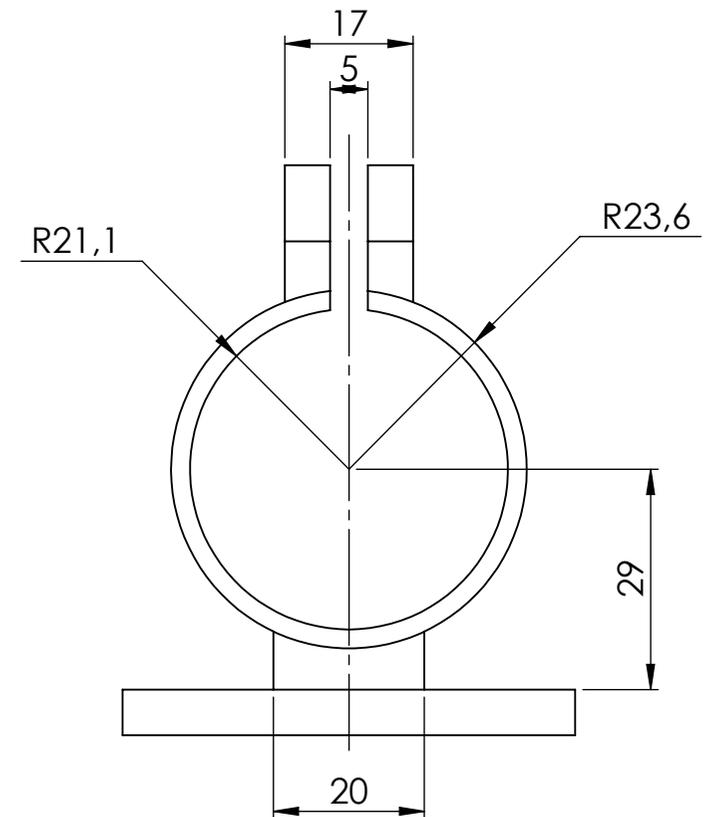


UNIONES REALIZADAS  
CON SOLDADURA

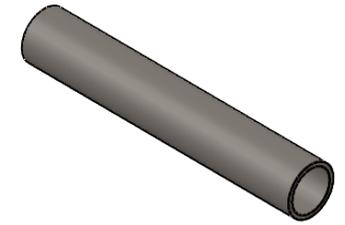
TORNEADO A PARTIR  
DE TUBO SCH 40 1½"



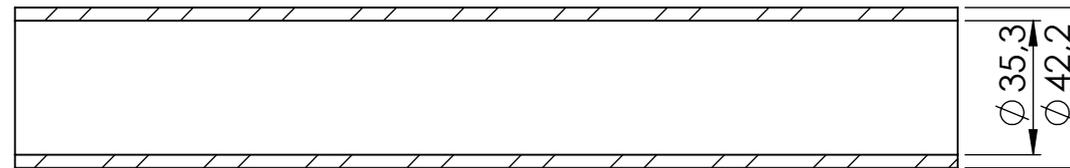
ESCALA 1:2



TORNEADO A PARTIR DE TUBO SCH 40  $1\frac{1}{4}$ "

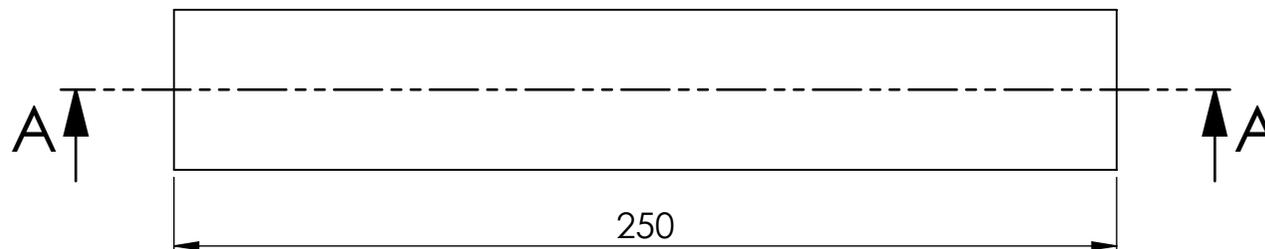


ESCALA 1:5

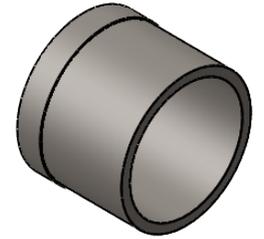


SECCIÓN A-A

ESCALA 1 : 2

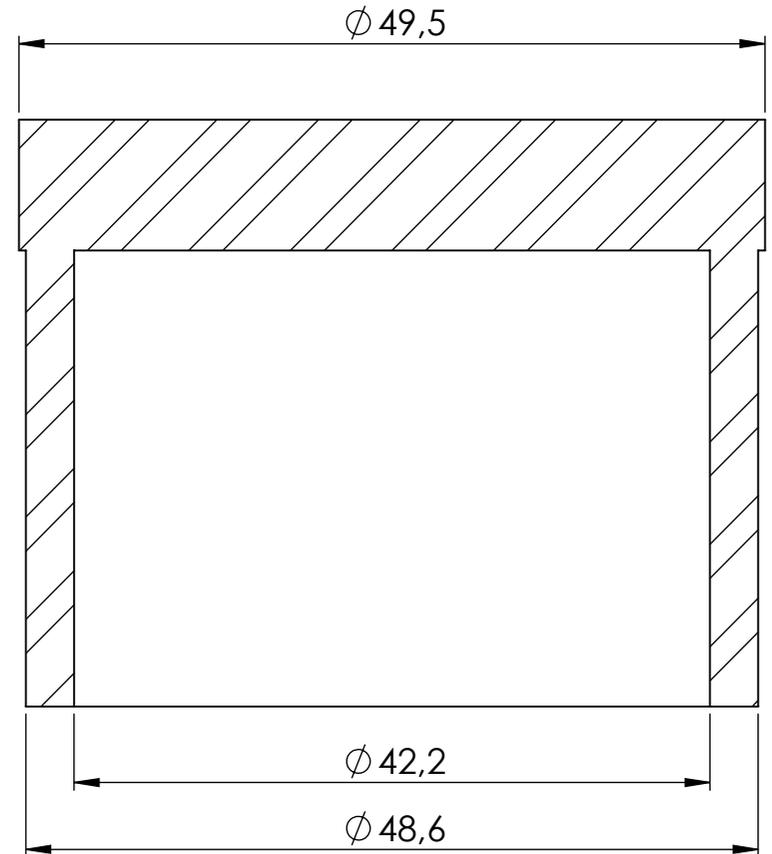
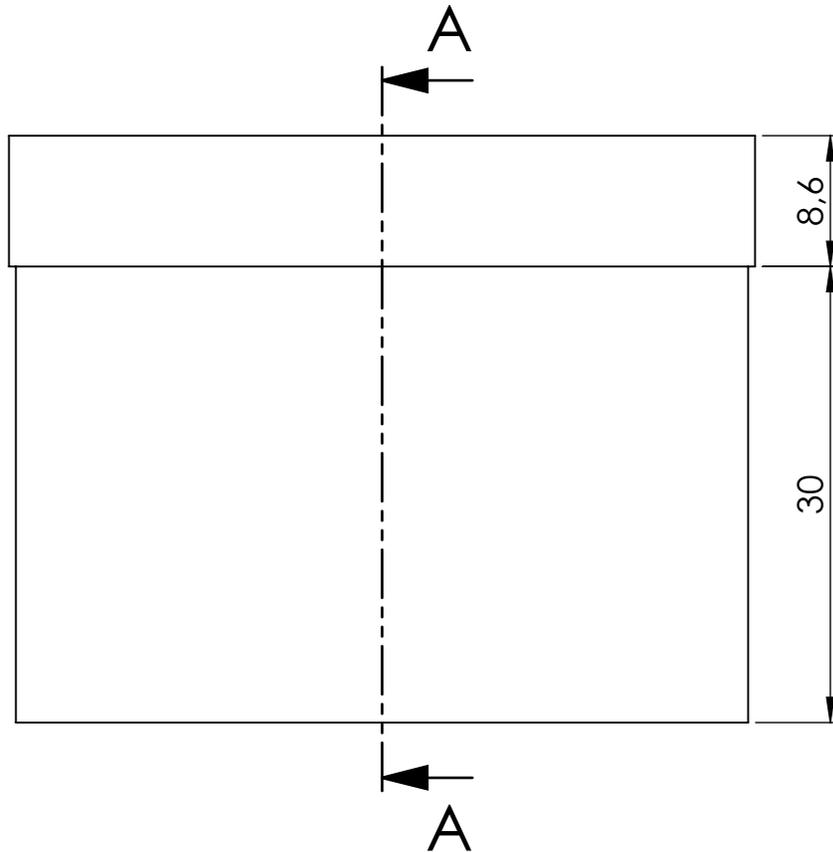


TORNEADO A PARTIR DE TUBO  
SCH 40 1 $\frac{1}{2}$ "



UNIÓN REALIZADA CON SOLDADURA

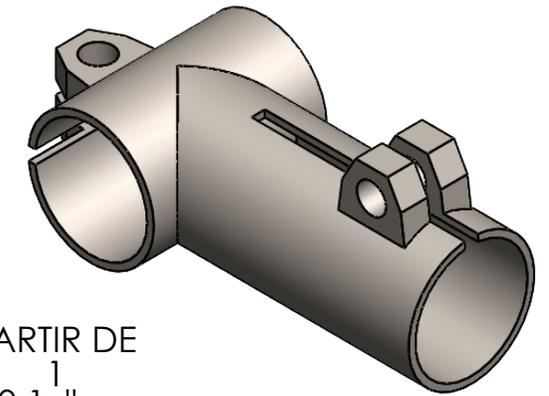
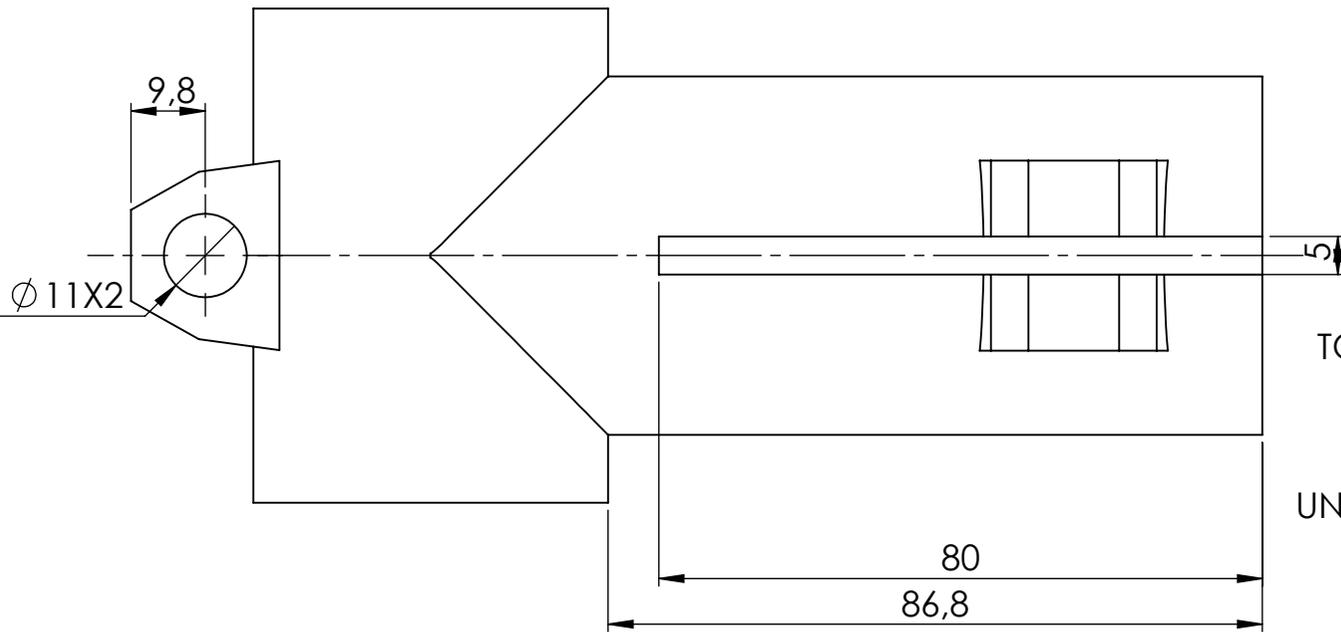
ESCALA 1:2



SECCIÓN A-A

ESCALA 2 : 1

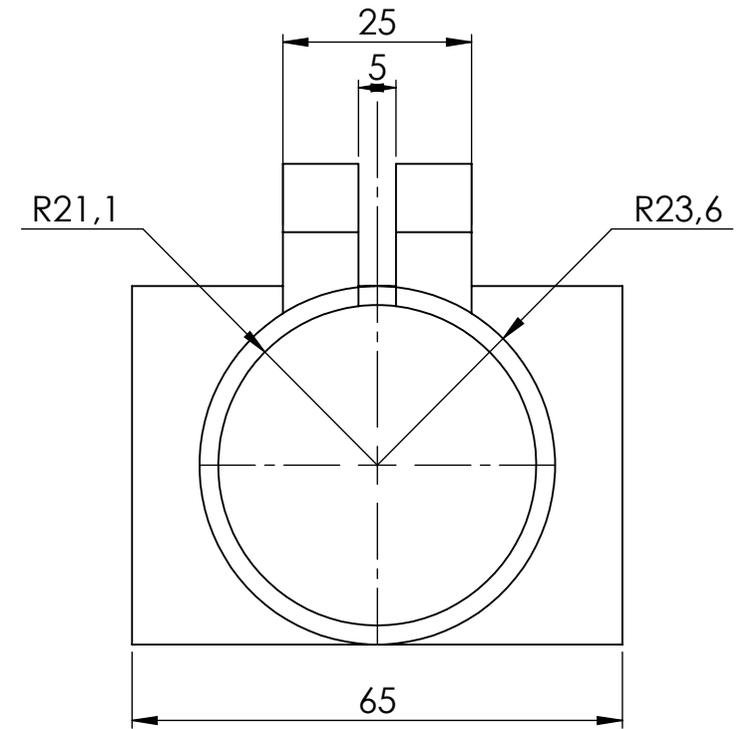
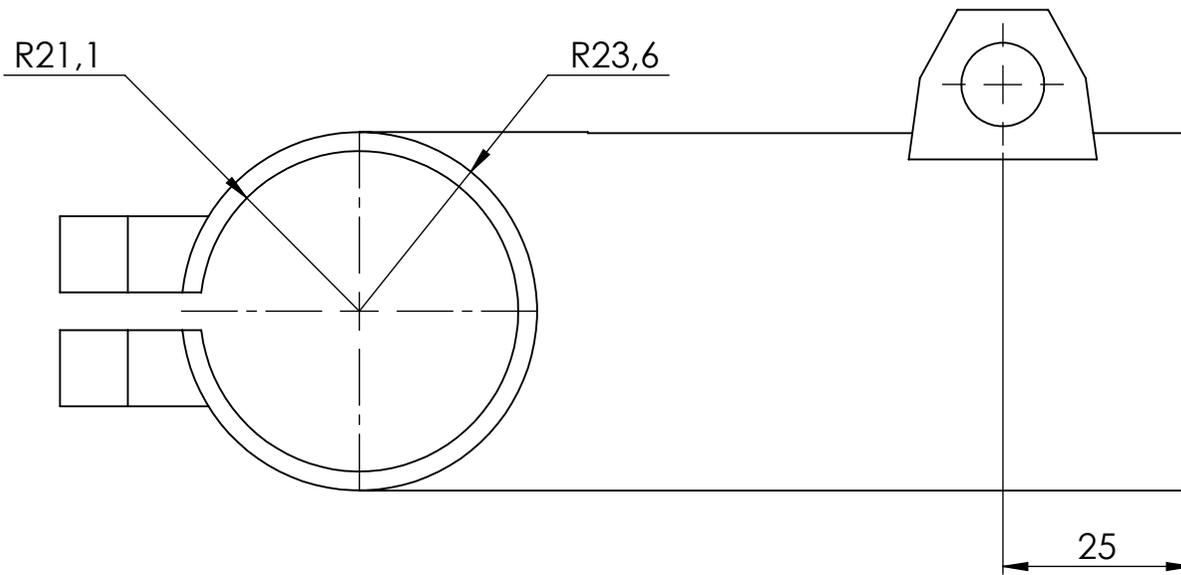
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			TAPÓN HORIZONTAL		PIEZA N° 3	MATERIAL: A36
	ESCALA: 2:1	MEDIDAS: mm	FECHA:02/10/21	DIBUJADO POR:	JA. ACEVEDO K. PORRAS	SUBSISTEMA OSCILACIÓN	PL #10



TORNEADO A PARTIR DE  
TUBO SCH 40  $\frac{1}{2}$ "

ESCALA 1:2

UNIONES CON SOLDADURA

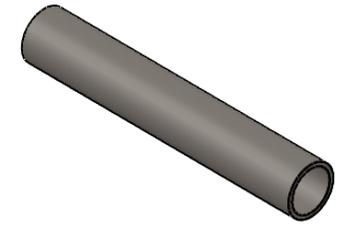


ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
 ESCALA: 1:1    MEDIDAS: mm    FECHA: 02/10/21

SOPORTE EN T  
 DIBUJADO POR: JA. ACEVEDO  
 K. PORRAS

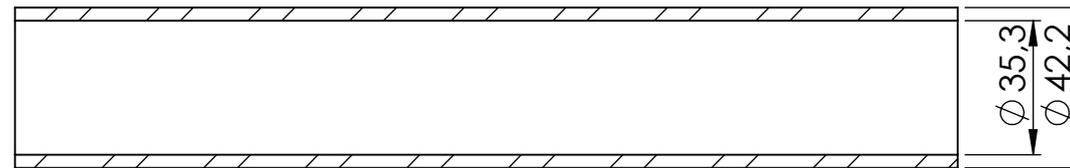
PIEZA N° 4  
 SUBSISTEMA  
 OSCILACION

MATERIAL: A36  
 PL #11



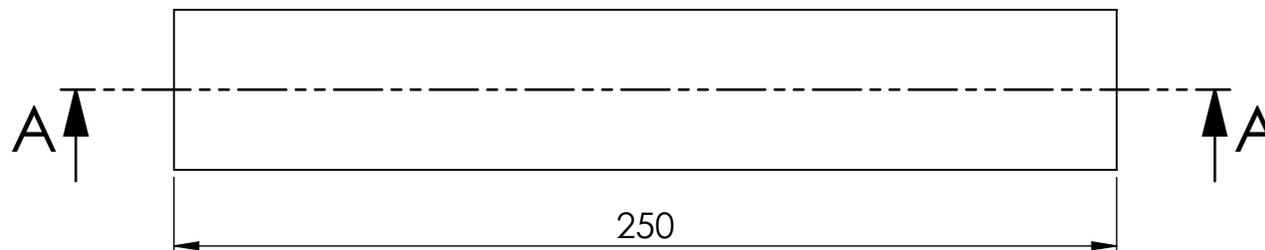
ESCALA 1:5

TORNEADO A PARTIR DE TUBO SCH 40  $1\frac{1}{4}$ "



SECCIÓN A-A

ESCALA 1 : 2



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

EJE VERTICAL

PIEZA N° 5

MATERIAL: A36

ESCALA: 1:2

MEDIDAS: mm

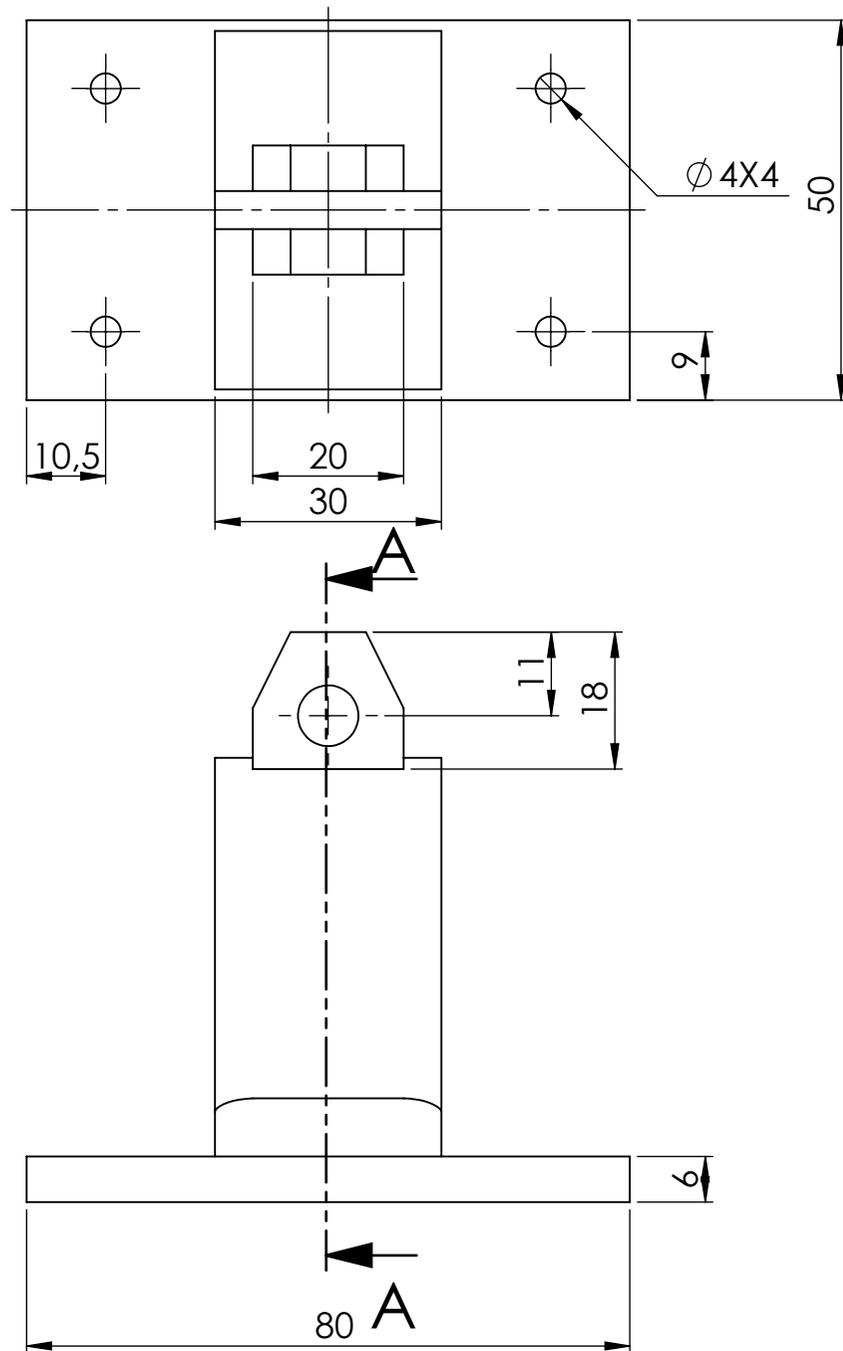
FECHA:02/10/21

DIBUJADO POR:

JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

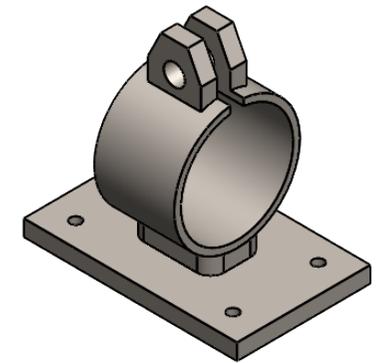
SUBSISTEMA  
OSCILACIÓN

PL #12

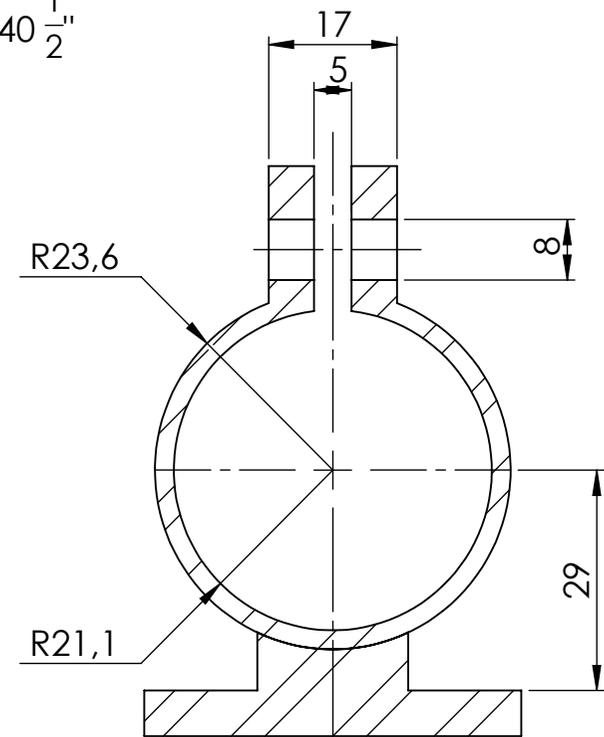


UNIONES REALIZADAS  
CON SOLDADURA

TORNEADO A PARTIR DE TUBO  
SCH 40  $\frac{1}{2}$ "



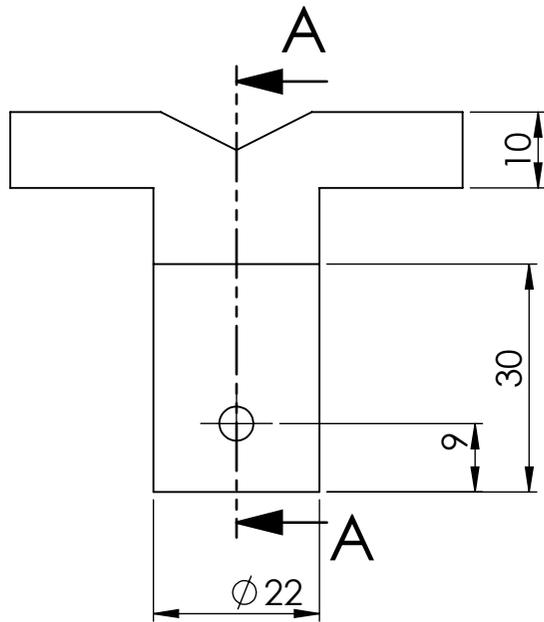
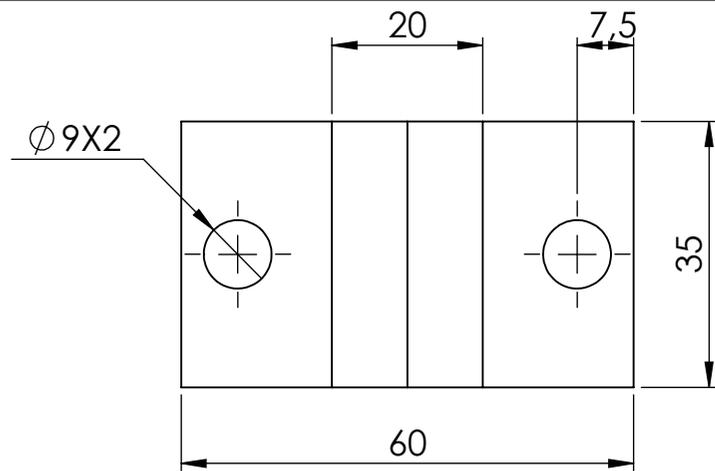
ESCALA 1:2



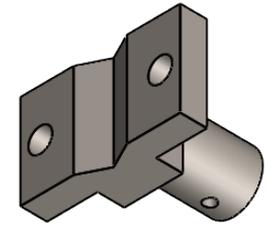
SECCIÓN A-A

ESCALA 1:1

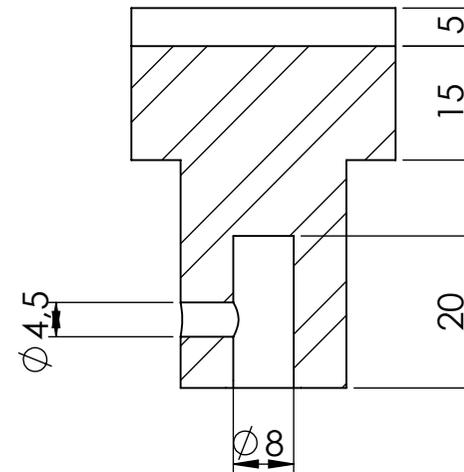
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			SOPORTE VERTICAL		PIEZA N° 6	MATERIAL: A36
	ESCALA: 1:1	MEDIDAS: mm	FECHA: 02/10/21	DIBUJADO POR:	JA. ACEVEDO K. PORRAS	SUBSISTEMA OSCILACION	PL #13



UNIÓN REALIZADA CON SOLDADURA



ESCALA 1:2



SECCIÓN A-A



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

SOPORTE ANTORCHA 1

PIEZA N° 8

MATERIAL: A36

ESCALA: 1:1

MEDIDAS: mm

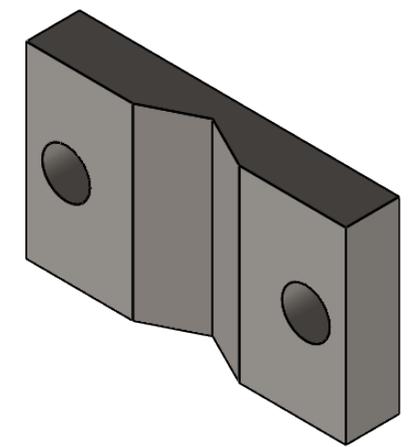
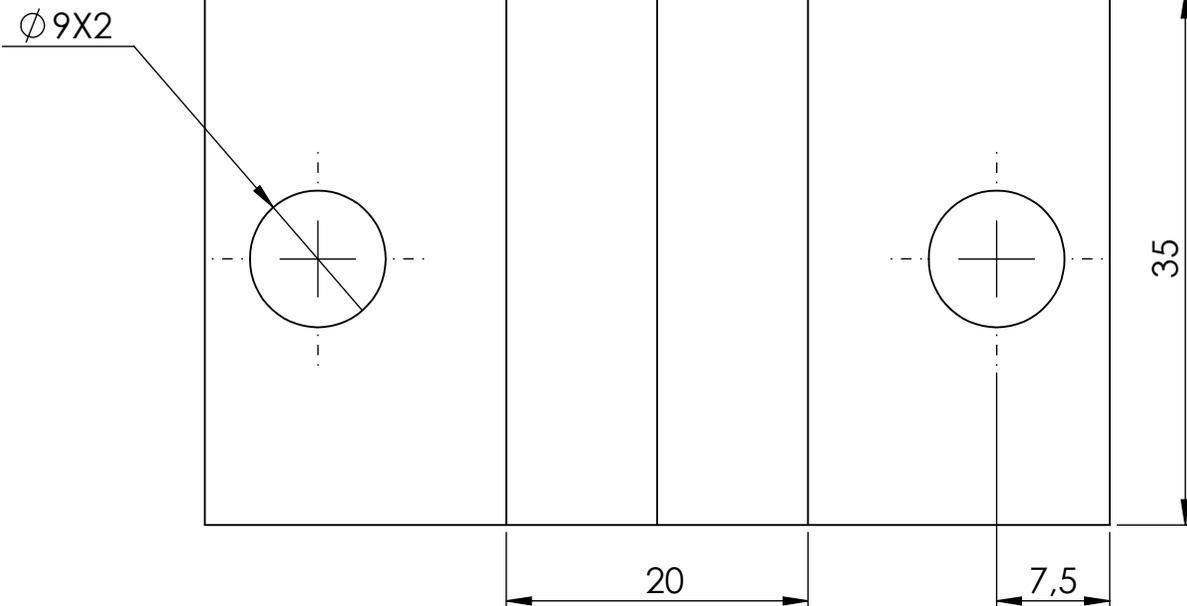
FECHA:02/10/21

DIBUJADO POR:

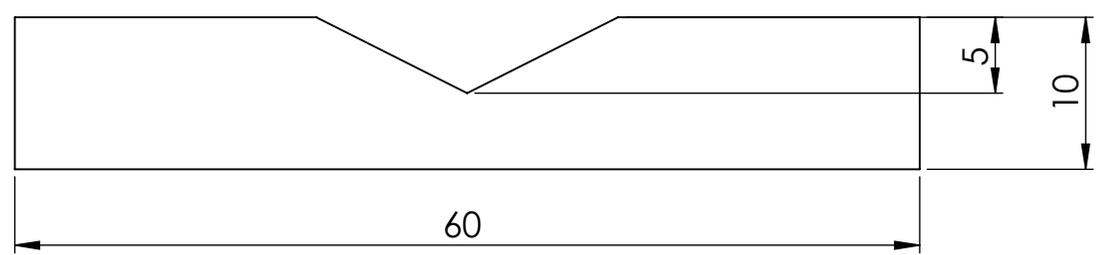
JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

SUBSISTEMA  
OSCILACIÓN

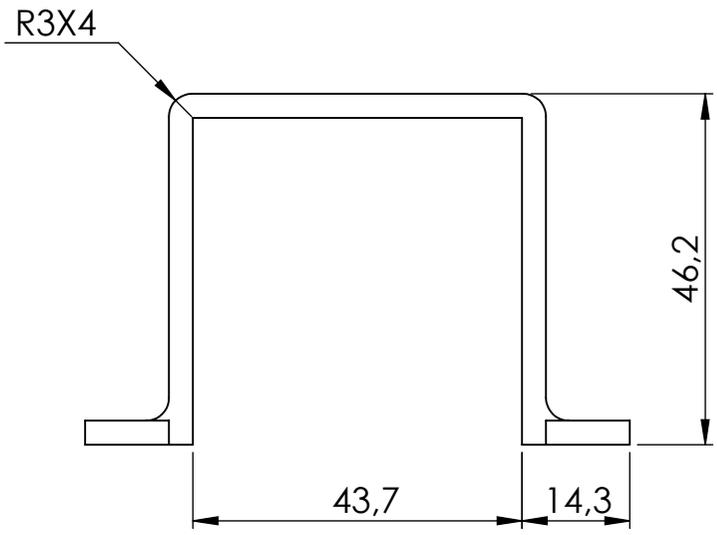
PL #14



ESCALA 1:1

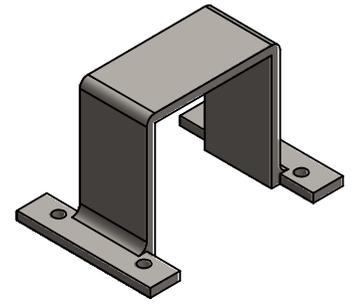


	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			SOPORTE ANTORCHA 2		PIEZA N° 9	MATERIAL: A36
	ESCALA: 2:1	MEDIDAS: mm	FECHA:02/10/21	DIBUJADO POR:	JA. ACEVEDO K. PORRAS	SUBSISTEMA OSCILACIÓN	PL #15

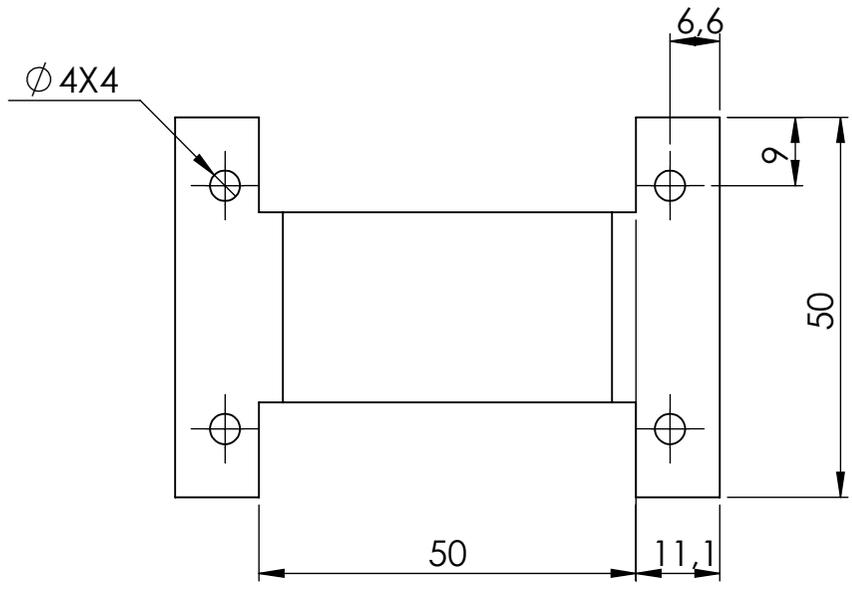


UNIONES REALIZADAS CON SOLDADURA

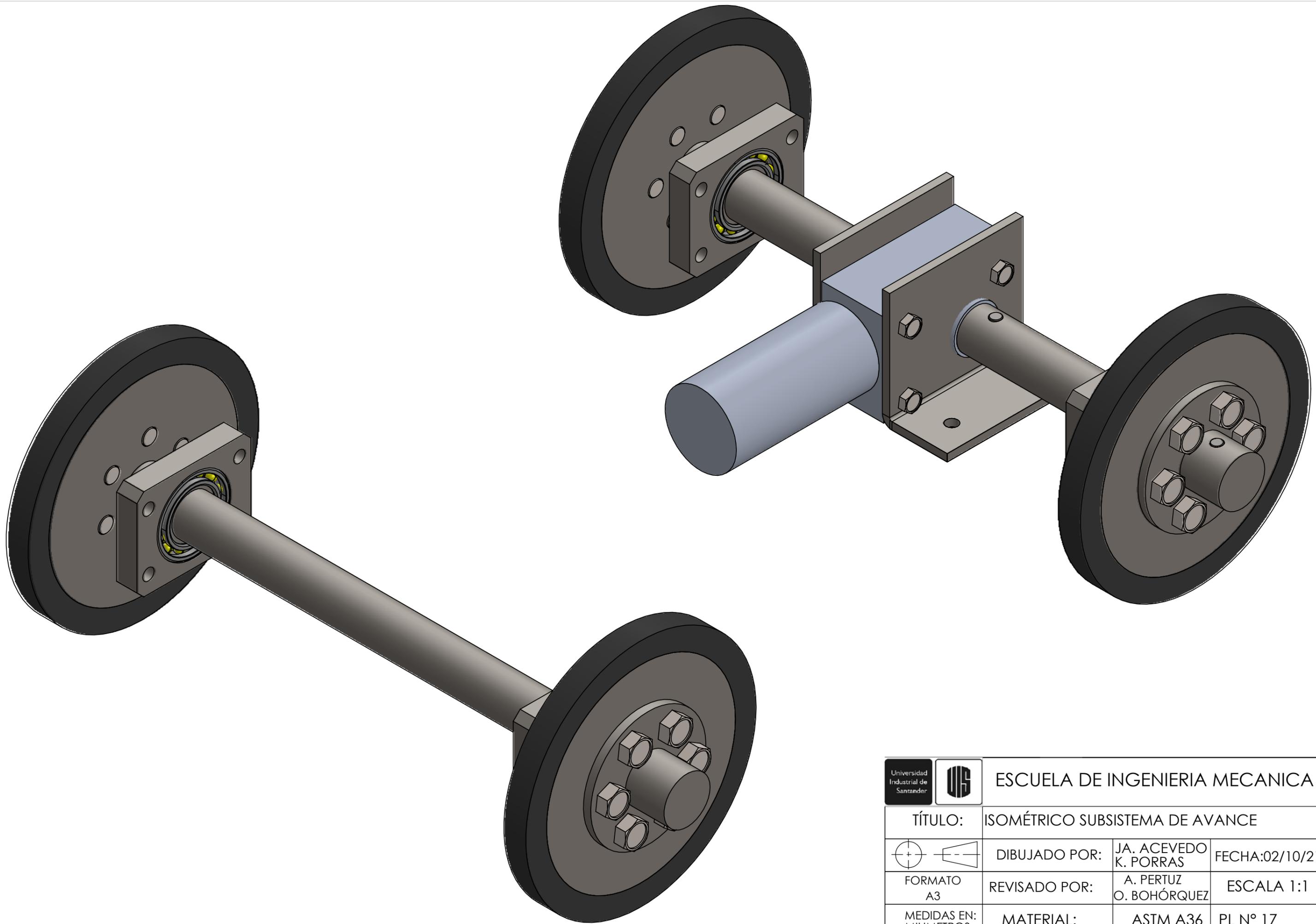
LAMINA DOBLADA DE  $\frac{1}{8}$ "



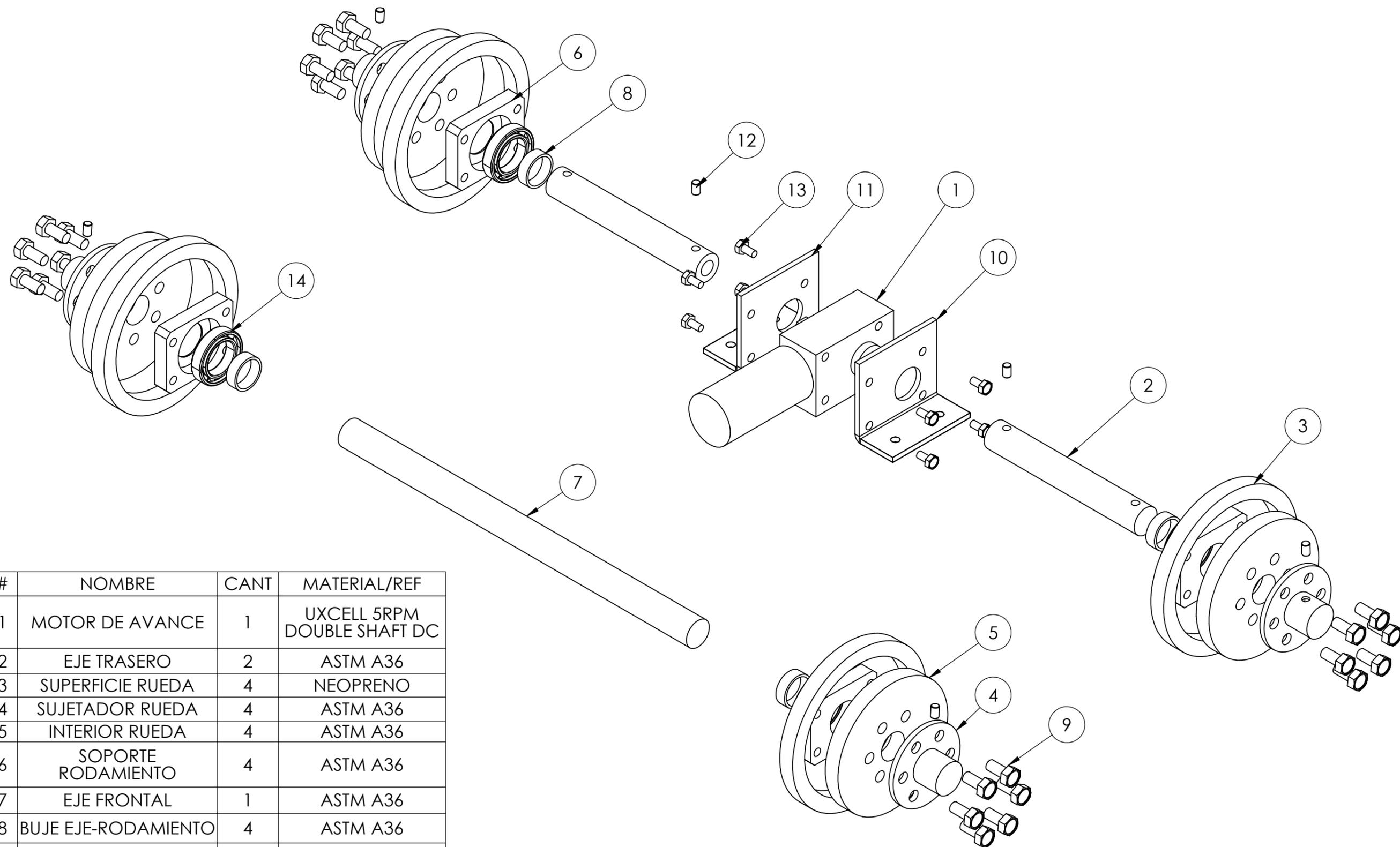
ESCALA 1:2



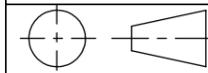
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			APOYO MOTOR		PIEZA N° 15	MATERIAL: A36
	ESCALA: 1:1	MEDIDAS: mm	FECHA: 2/10/21	DIBUJADO POR:	JA. ACEVEDO K. PORRAS	SUBSISTEMA OSCILACION	PL #16

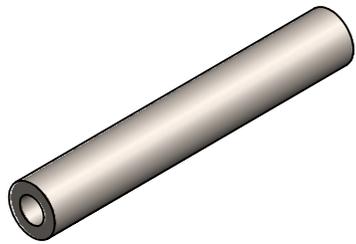


		<b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>	
<b>TÍTULO:</b> ISOMÉTRICO SUBSISTEMA DE AVANCE			
	<b>DIBUJADO POR:</b> JA. ACEVEDO K. PORRAS	<b>FECHA:</b> 02/10/21	
<b>FORMATO</b> A3	<b>REVISADO POR:</b> A. PERTUZ O. BOHÓRQUEZ	<b>ESCALA</b> 1:1	
<b>MEDIDAS EN:</b> MILIMETROS	<b>MATERIAL:</b> ASTM A36	<b>PL N°</b> 17	



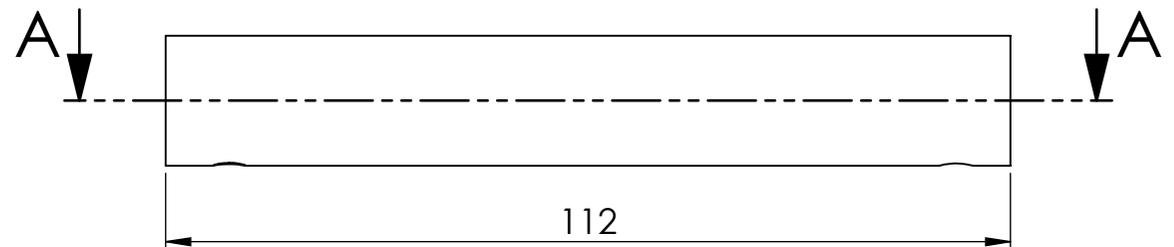
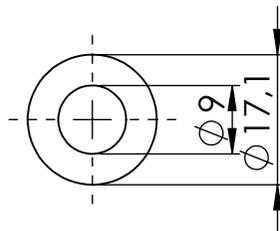
#	NOMBRE	CANT	MATERIAL/REF
1	MOTOR DE AVANCE	1	UXCELL 5RPM DOUBLE SHAFT DC
2	EJE TRASERO	2	ASTM A36
3	SUPERFICIE RUEDA	4	NEOPRENO
4	SUJETADOR RUEDA	4	ASTM A36
5	INTERIOR RUEDA	4	ASTM A36
6	SOPORTE RODAMIENTO	4	ASTM A36
7	EJE FRONTAL	1	ASTM A36
8	BUJE EJE-RODAMIENTO	4	ASTM A36
9	TORNILLO RUEDA	24	UNC 304-A2 BCC INOX 1/4 X 1/2
10	SOPORTE 2 MOTOR AVANCE	1	ASTM A36
11	SOPORTE 1 MOTOR AVANCE	1	ASTM A36
12	PRISIONERO TRANSMISION	6	DIN 913 BSC-10.9 5X6
13	TORNILLO FIJACIÓN MOTOR	8	ANSI B18.6.7 M4X0.7X8
14	RODAMIENTO	4	SKF 61804

 		<b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>	
<b>TÍTULO:</b>		EXPLOSIONADO SUBSISTEMA DE AVANCE	
	<b>DIBUJADO POR:</b>	JA. ACEVEDO K. PORRAS	<b>FECHA:</b> 02/10/21
<b>FORMATO</b> A3	<b>REVISADO POR:</b>	A. PERTUZ O. BOHÓRQUEZ	<b>ESCALA</b> 1:2
<b>MEDIDAS EN:</b> MILIMETROS	<b>MATERIAL:</b>	ASTM A36	PL N° 18



ESCALA 1:2

FABRICADO A PARTIR DE VARILLA CR



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

EJE TRASERO

PIEZA N° 2

MATERIAL: A36

ESCALA: 1:1

MEDIDAS: mm

FECHA: 02/10/21

DIBUJADO POR:

JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

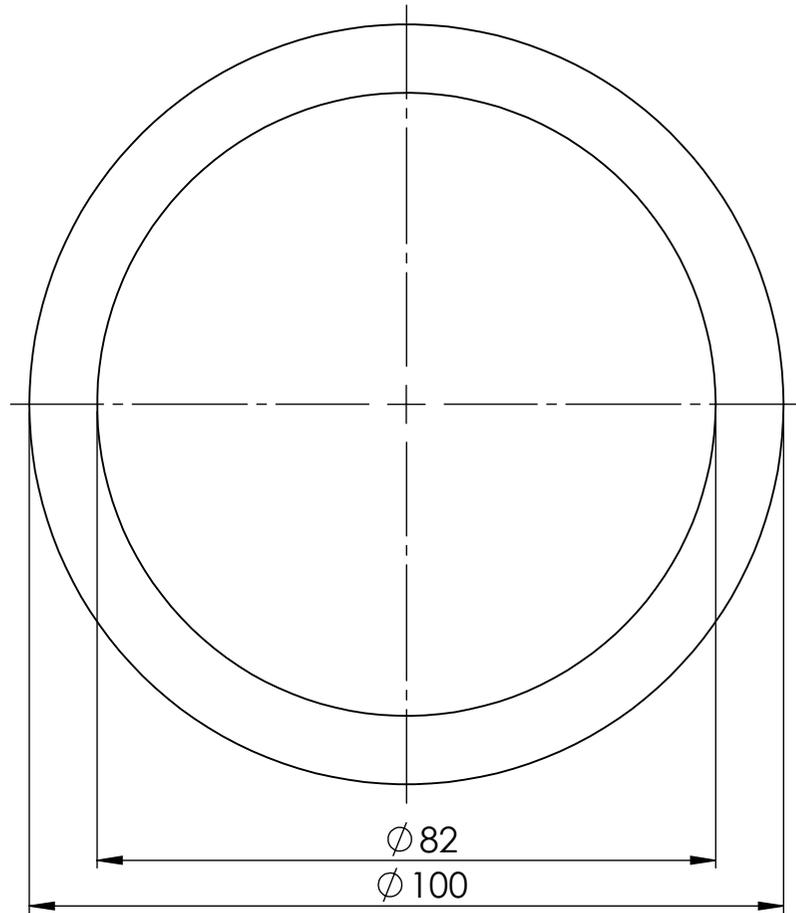
SUBSISTEMA  
AVANCE

PL # 19

# ANILLOS DE NEOPRENO



ESCALA 1:2



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

SUPERFICIE DE RUEDA

PIEZA N° 3

MATERIAL:NEOP

ESCALA: 1:1

MEDIDAS: mm

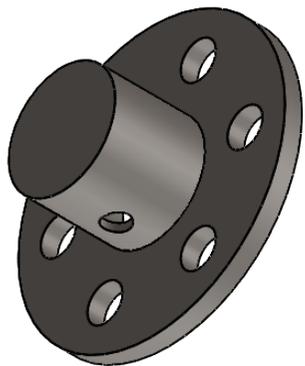
FECHA:02/10/21

DIBUJADO POR:

JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

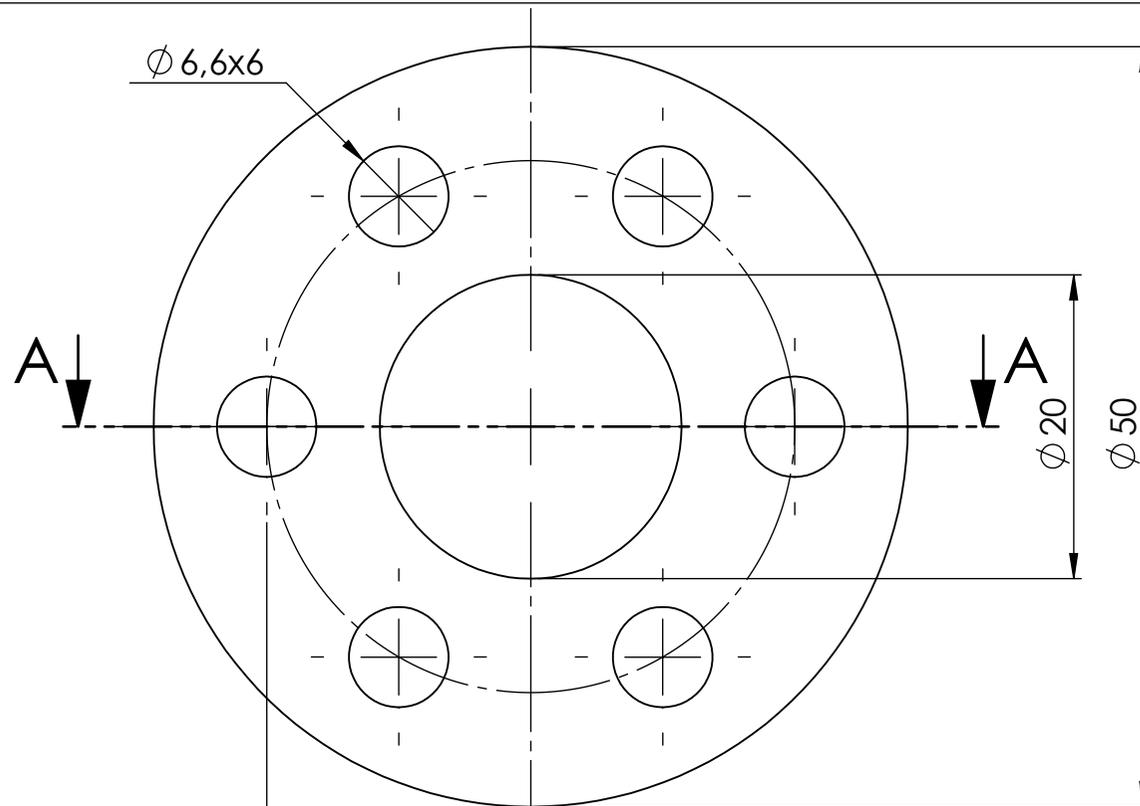
SUBSISTEMA  
AVANCE

PL #20

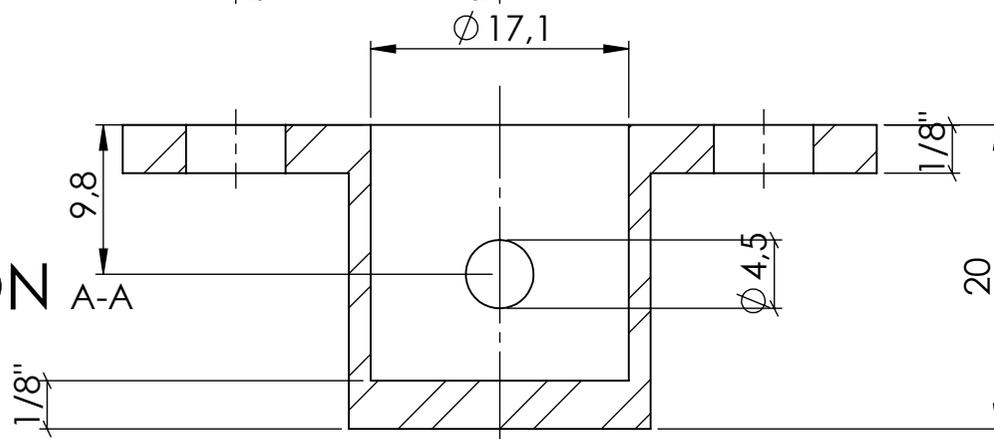


ESCALA 1:1

UNIONES REALIZADAS  
CON SOLDADURA



SECCIÓN A-A



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

SUJETADOR RUEDA

PIEZA N° 4

MATERIAL: A36

ESCALA: 2:1

MEDIDAS: mm

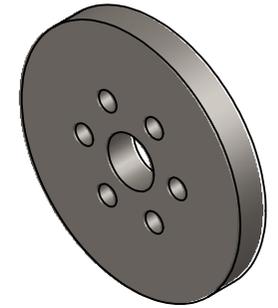
FECHA:02/10/21

DIBUJADO POR:

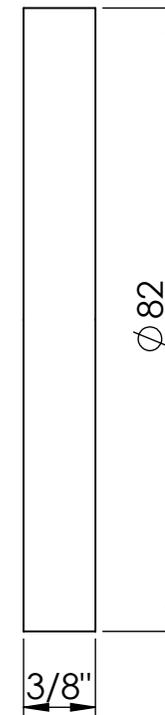
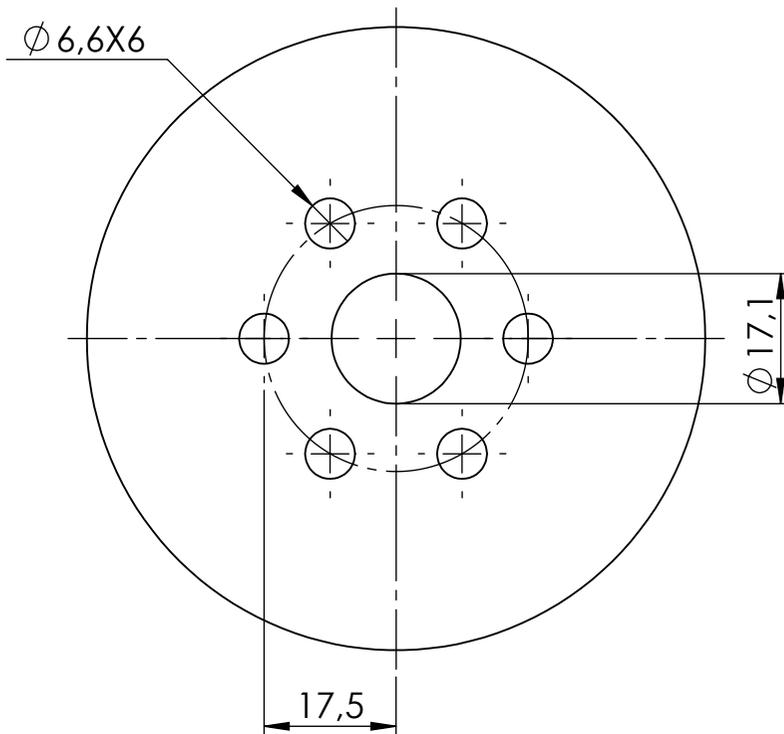
JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

SUBSISTEMA  
AVANCE

PL #21



ESCALA 1:2



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

INTERIOR RUEDA

PIEZA N° 5

MATERIAL: A36

ESCALA: 1:1

MEDIDAS: mm

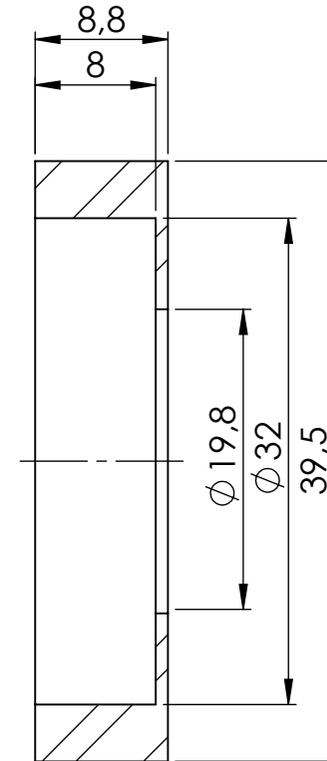
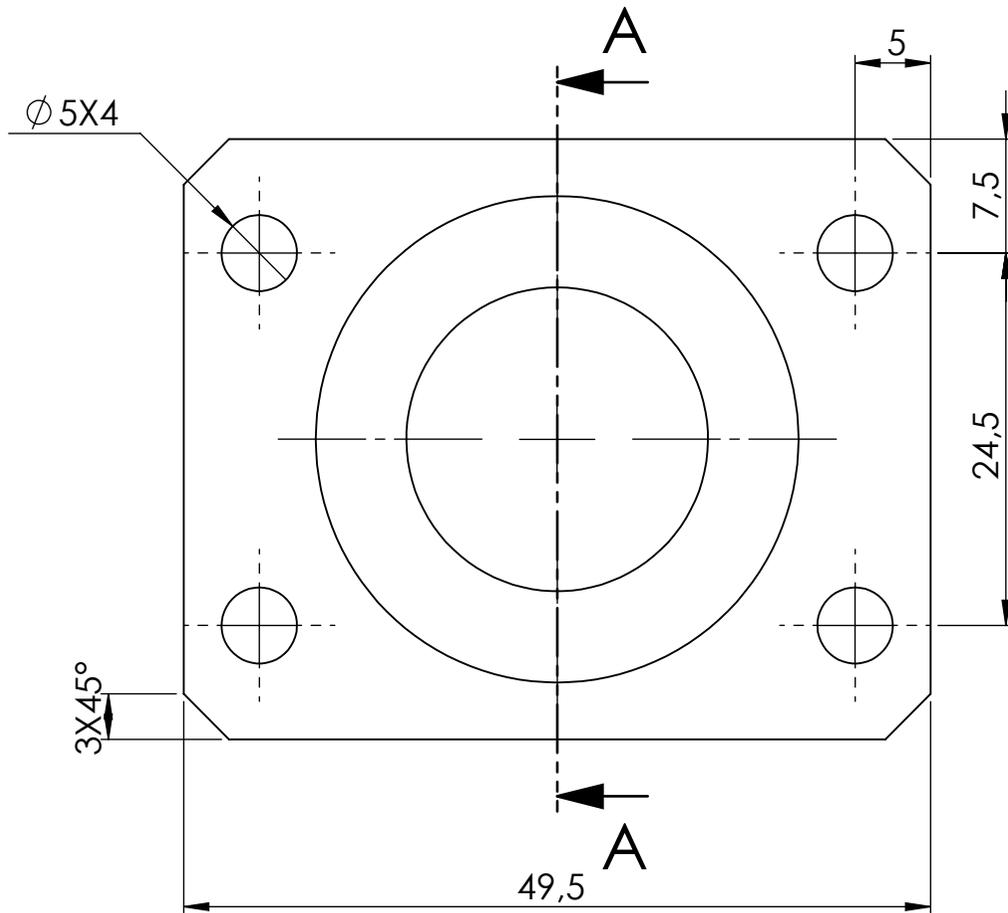
FECHA:02/10/21

DIBUJADO POR:

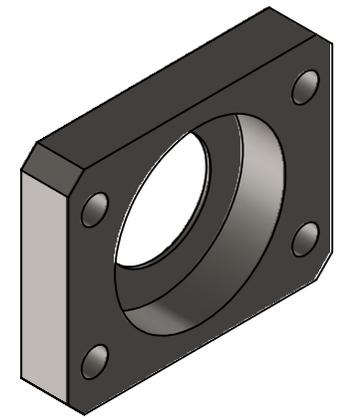
JA. ACEVEDO  
K.PORRAS

SUBSISTEMA  
AVANCE

PL #22



SECCIÓN A-A  
ESCALA 2 : 1



ESCALA 1:1



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

SOPORTE RODAMIENTO

PIEZA N° 6

MATERIAL: A36

ESCALA: 2:1

MEDIDAS: mm

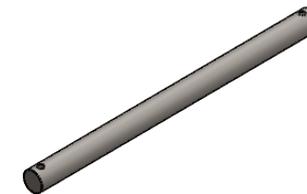
FECHA:02/10/21

DIBUJADO POR:

JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

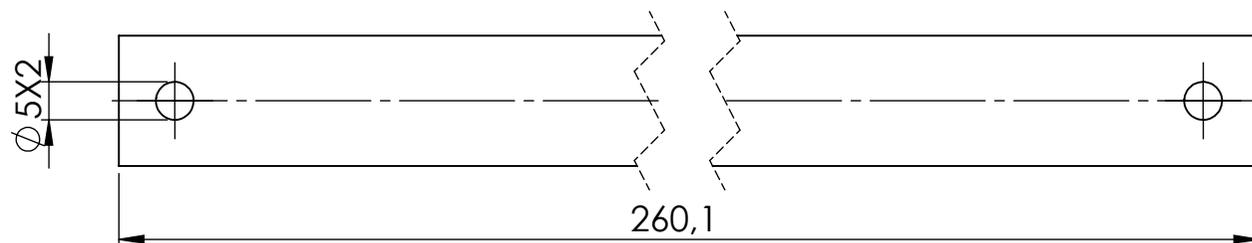
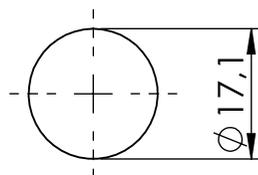
SUBSISTEMA  
AVANCE

PL #23



ESCALA 1:5

FABRICADO A PARTIR DE VARILLA CR



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

EJE TRASERO

PIEZA N° 7

MATERIAL: A36

ESCALA: 1:1

MEDIDAS: mm

FECHA:02/10/21

DIBUJADO POR:

JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

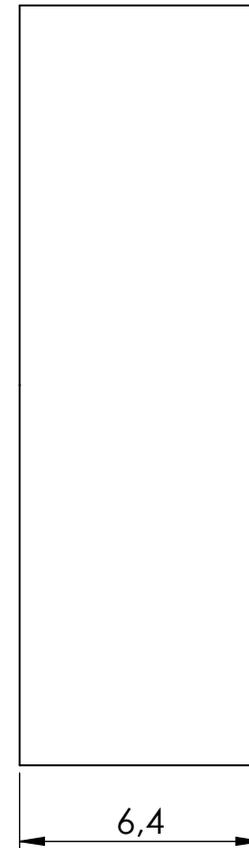
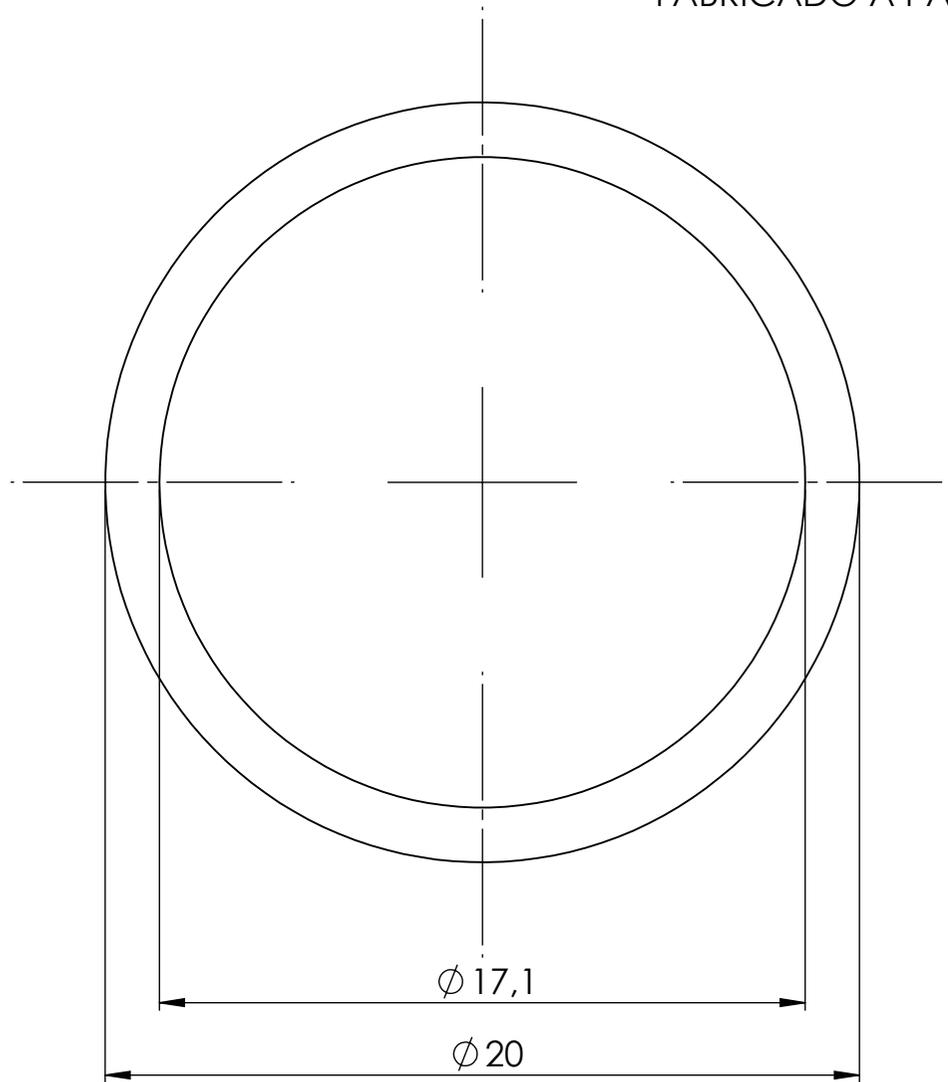
SUBSISTEMA  
AVANCE

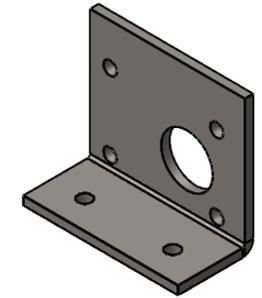
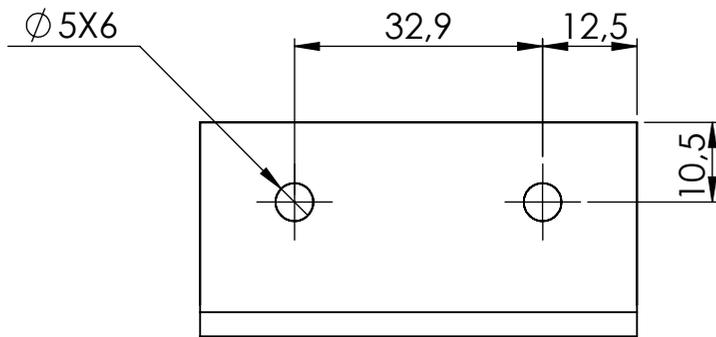
PL #24

FABRICADO A PARTIR DE TUBO SCH 40  $\frac{1}{2}$ "

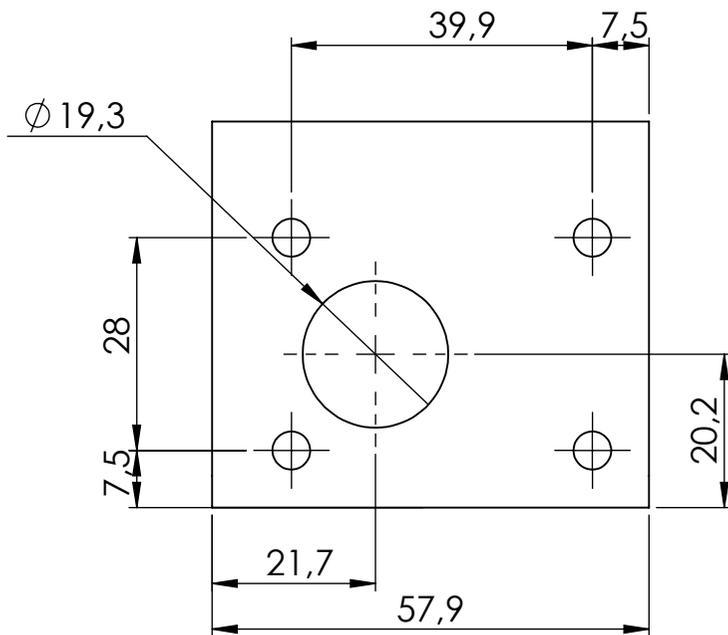


ESCALA 2:1

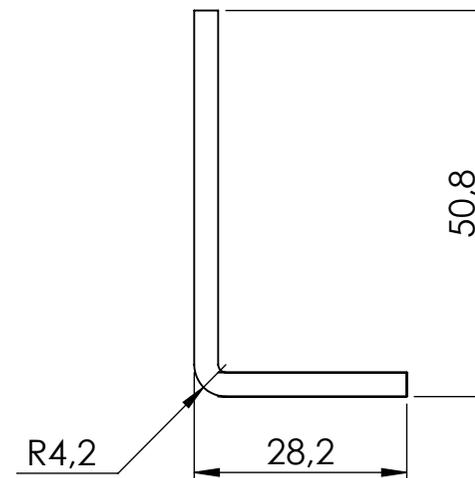




ESCALA 1:2



FABRICADO CON LAMINA DE 1/8"



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

SOPORTE 2 MOTOR AVANCE

PIEZA N° 10

MATERIAL:A36

ESCALA: 1:1

MEDIDAS: mm

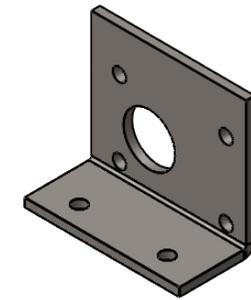
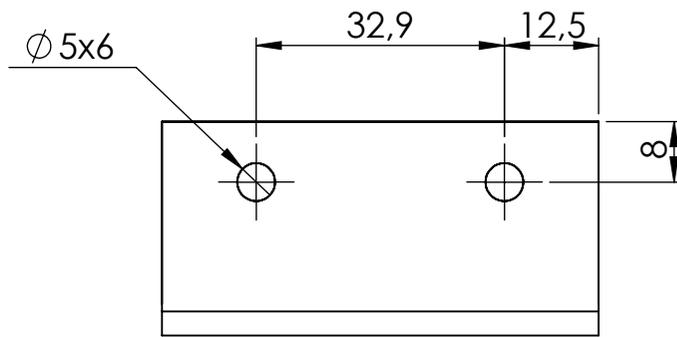
FECHA:02/10/21

DIBUJADO POR:

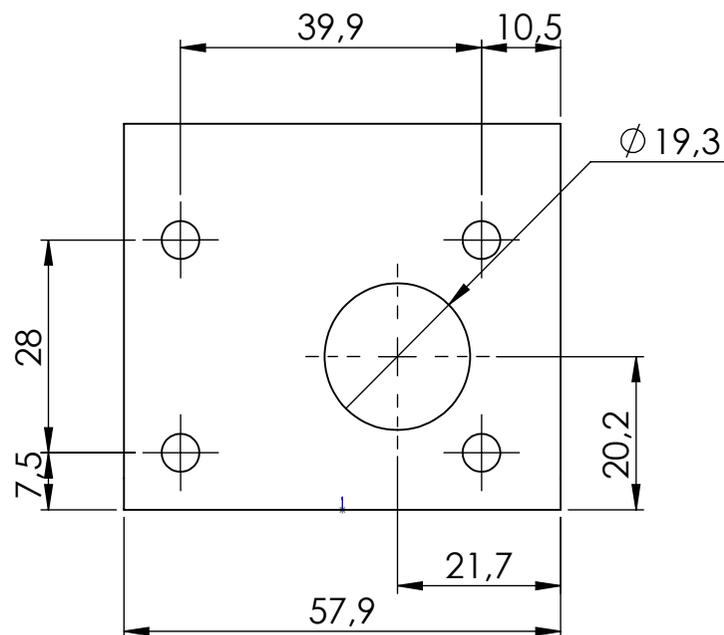
JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

SUBSISTEMA  
AVANCE

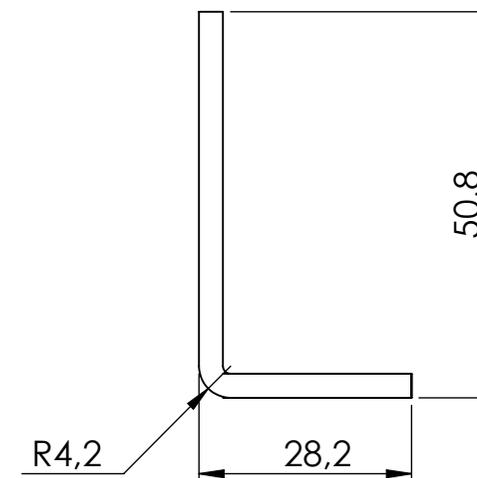
PL #26

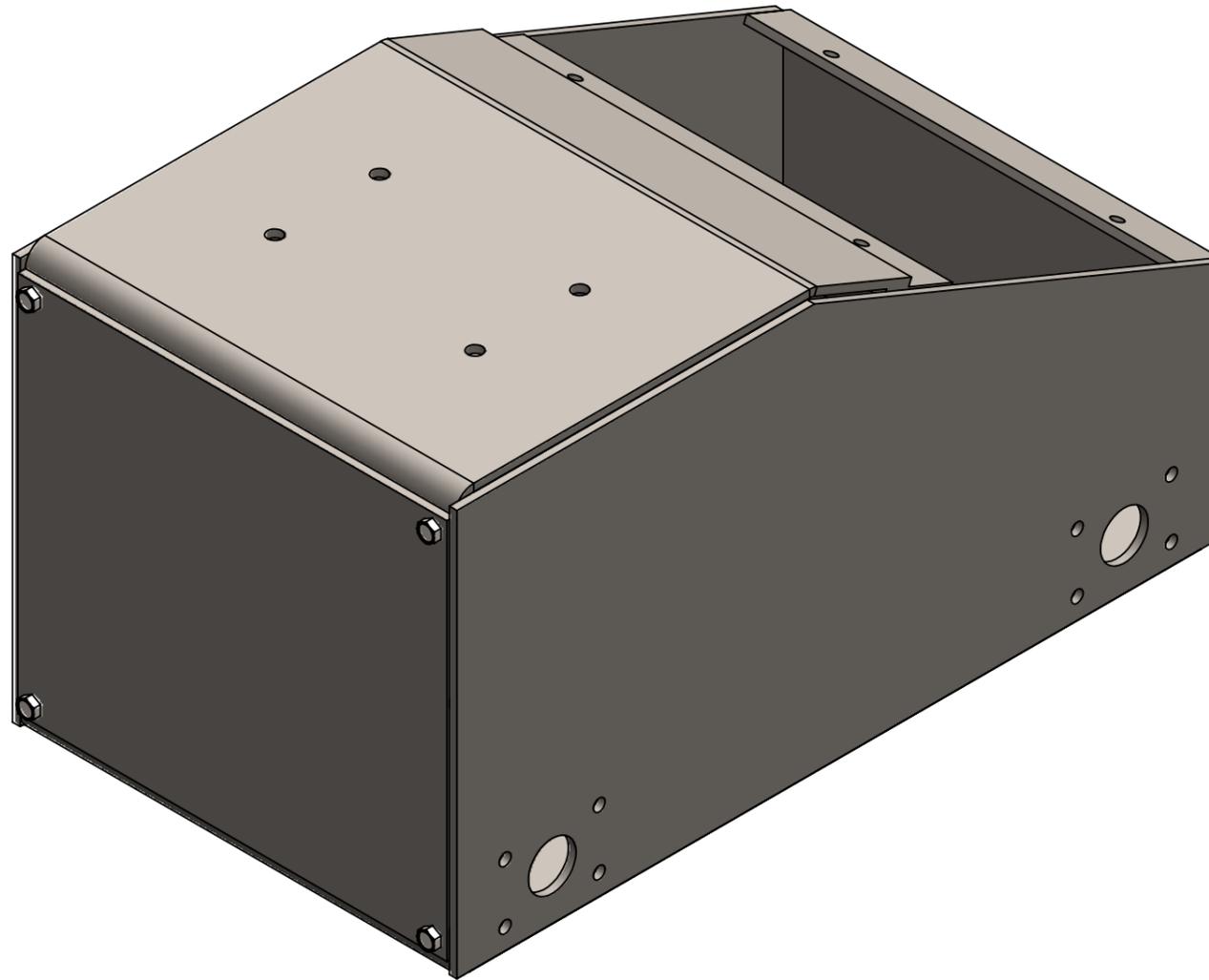


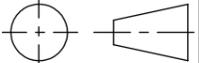
ESCALA 1:2



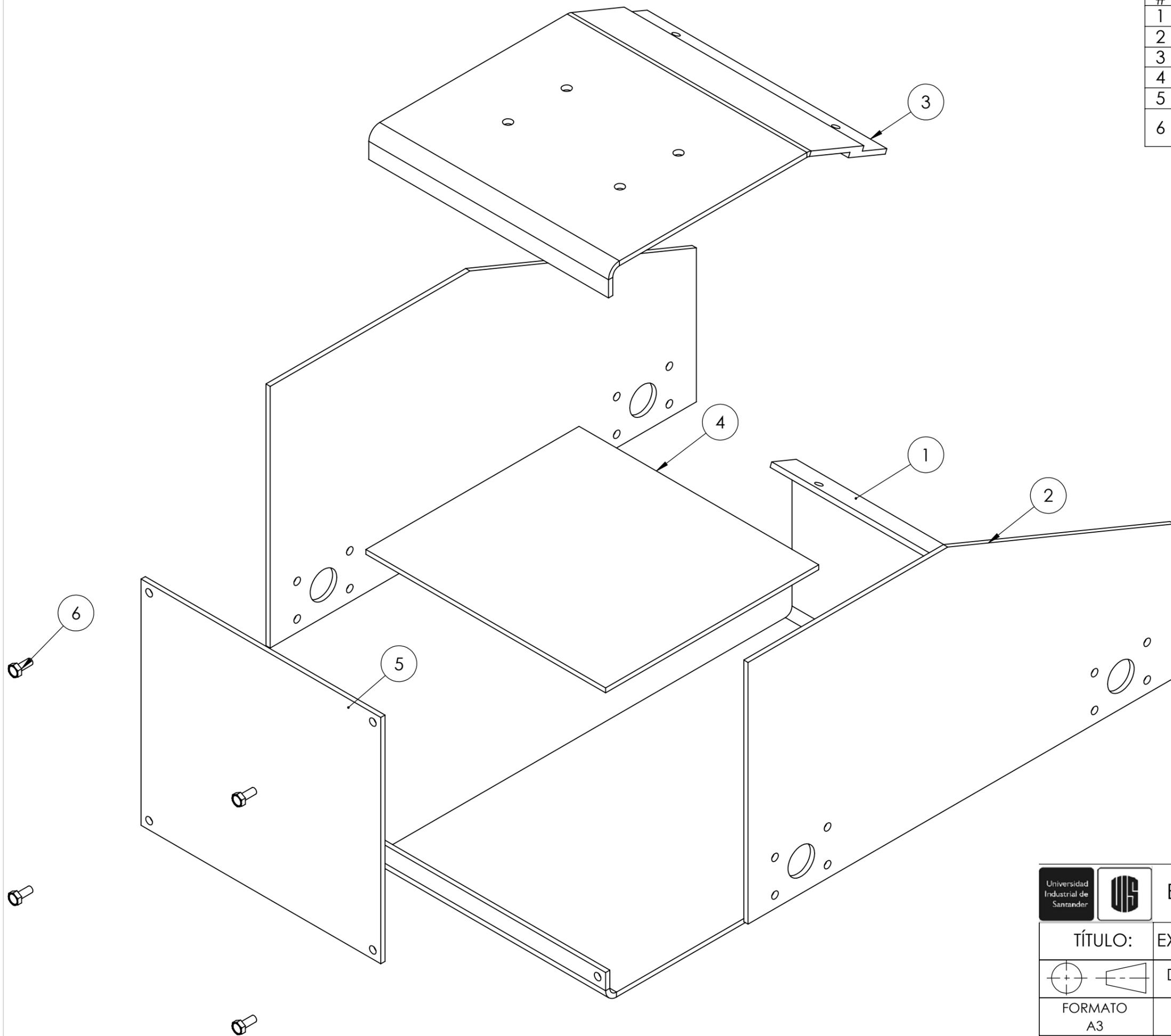
FABRICADO CON LAMINA DE 1/8"





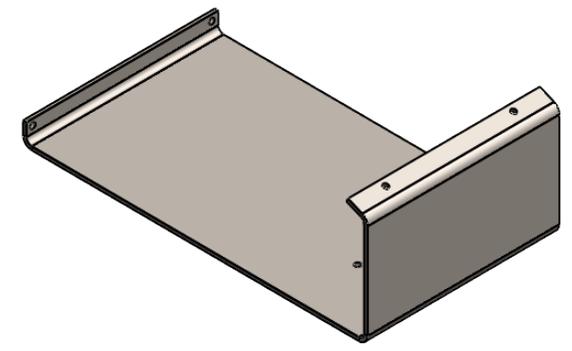
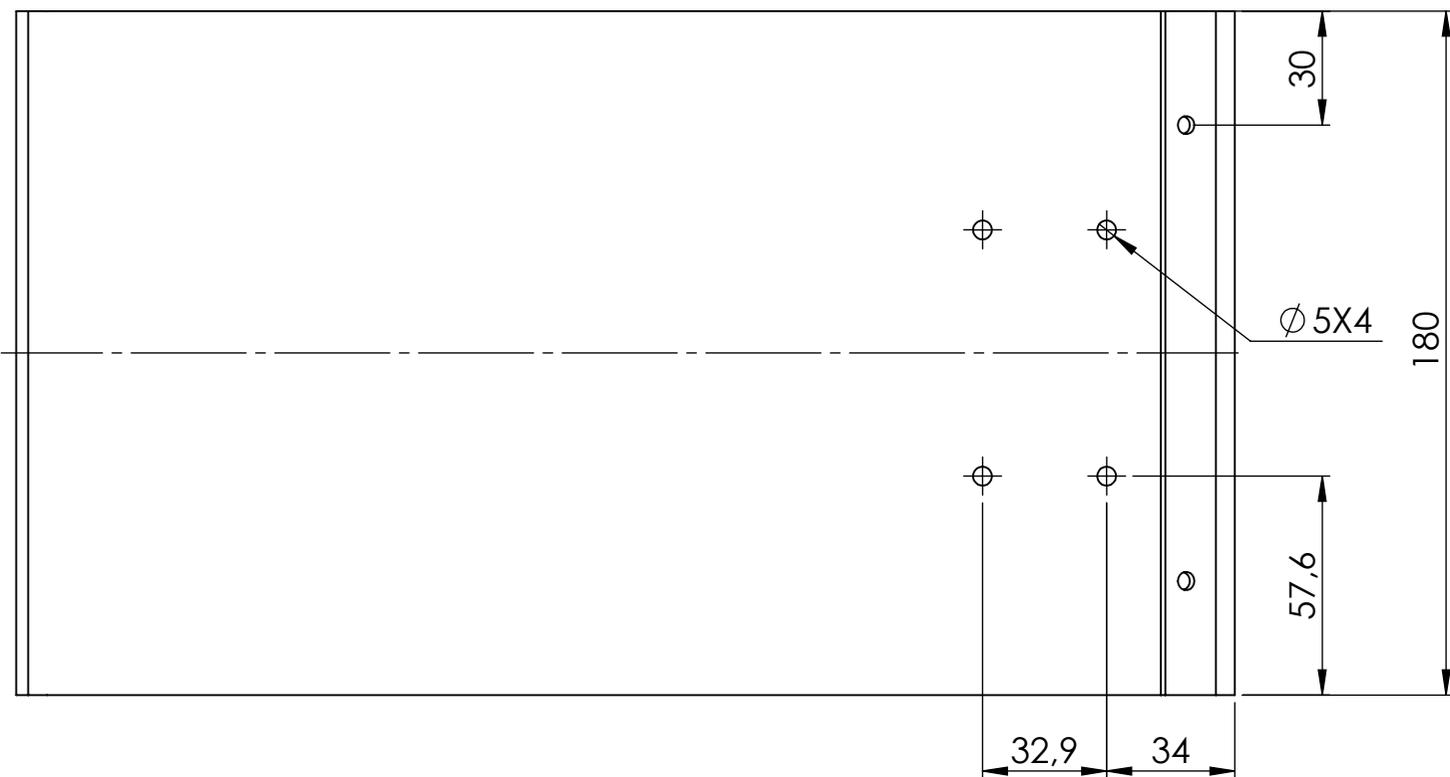
 		<b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>	
<b>TÍTULO</b>		<b>ISOMÉTRICO BASTIDOR</b>	
		<b>DIBUJADO POR:</b>	JA. ACEVEDO K. PORRAS
<b>FORMATO</b> A3		<b>REVISADO POR:</b>	A. PERTUZ O. BOHÓRQUEZ
<b>MEDIDAS EN:</b> MILIMETROS		<b>MATERIAL:</b>	ASTM A36
		<b>FECHA:</b>	02/10/21
		<b>ESCALA:</b>	1:2
		<b>PL N°</b>	28

#	NOMBRE	CANT	MATERIAL/REF
1	LAMINA INFERIOR	1	ASTM A36
2	LAMINA LATERAL	2	ASTM A36
3	LAMINA SUPERIOR	1	ASTM A36
4	PLACA INTERMEDIA	1	ASTM A36
5	COMPUERTA	1	ASTM A36
6	TORNILLOS COMPUERTA	4	ANSI B18.6.7 M4 X 0.7 X 10



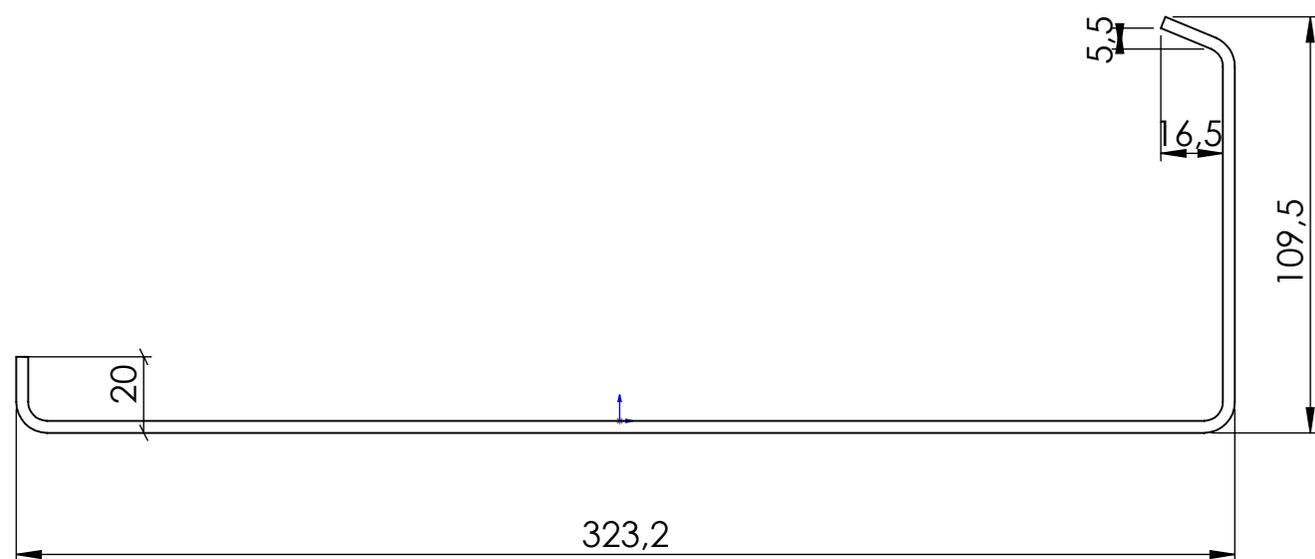
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

TÍTULO:	EXPLOSIONADO BASTIDOR		
DIBUJADO POR:	J.A. ACEVEDO K. PORRAS	FECHA:02/10/21	
FORMATO A3	REVISADO POR:	A. PERTUZ O. BOHÓRQUEZ	ESCALA 1:2
MEDIDAS EN: MILIMETROS	MATERIAL:	ASTM A36	PL N° 29



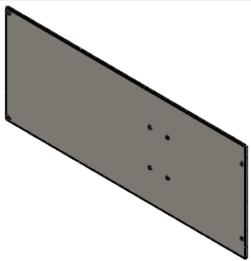
ESCALA 1:5

ORIFICIOS SUPERIORES DE 3/16" DE DIAMETRO



REDONDEOS DE 5mm DE RADIO  
LAMINA 1/8"

	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			LAMINA INFERIOR		PIEZA N° 1	MATERIAL: A36
	ESCALA: 1:2	MEDIDAS: mm	FECHA: 02/10/21	DIBUJADO POR:	JA. ACEVEDO K. PORRAS	BASTIDOR	PL #30



ESCALA 1:10

LAMINA DE 1/8" DE ESPESOR



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

DESARROLLO LAMINA INFERIOR

PIEZA N° 1

MATERIAL: A36

ESCALA: 1:2

MEDIDAS: mm

FECHA:02/10/21

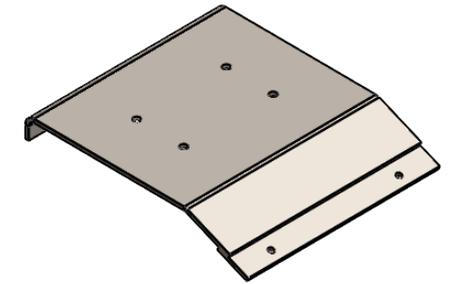
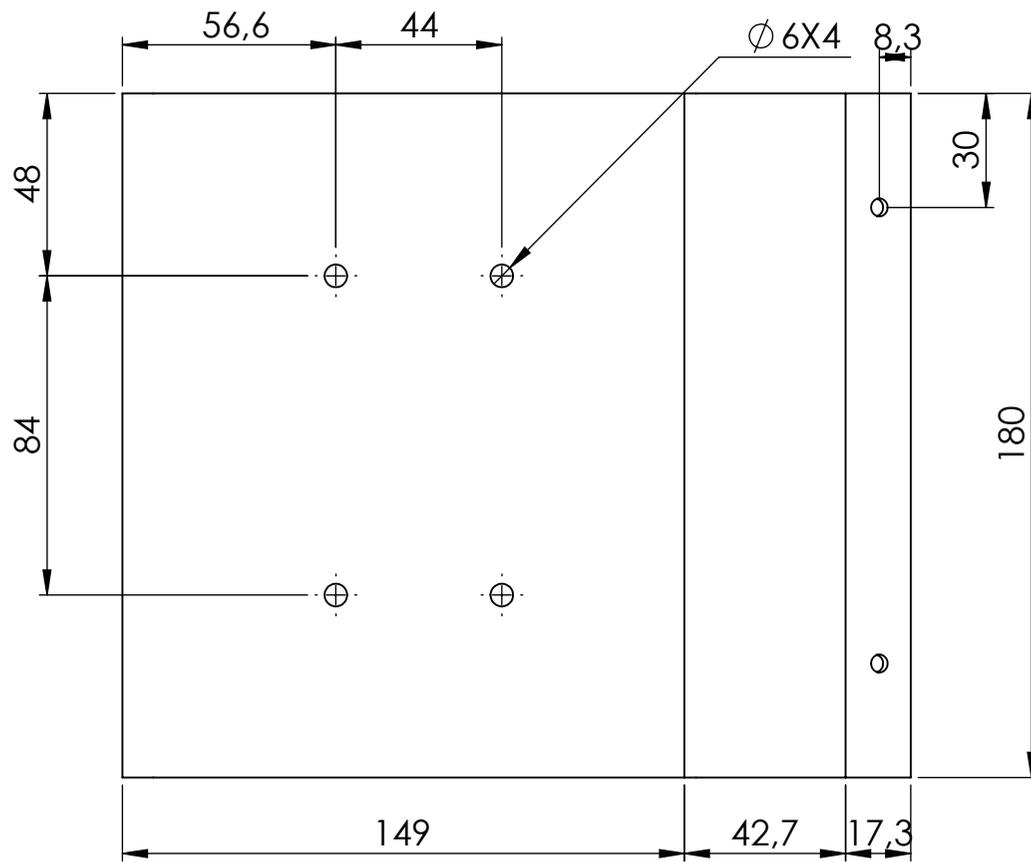
DIBUJADO POR:

JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

BASTIDOR

PL #31





ESCALA 1:5

ORIFICIOS DE CHAPA DIAGONAL  
CON DIÁMETRO DE 3/16"



LÁMINA DE 1/8" DE ESPESOR



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

LAMINA SUPERIOR

PIEZA N° 3

MATERIAL: A36

ESCALA: 1:2

MEDIDAS: mm

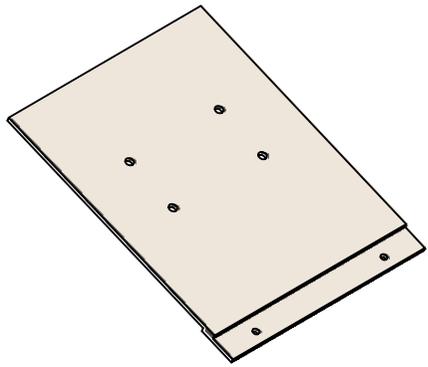
FECHA: 2/10/21

DIBUJADO POR:

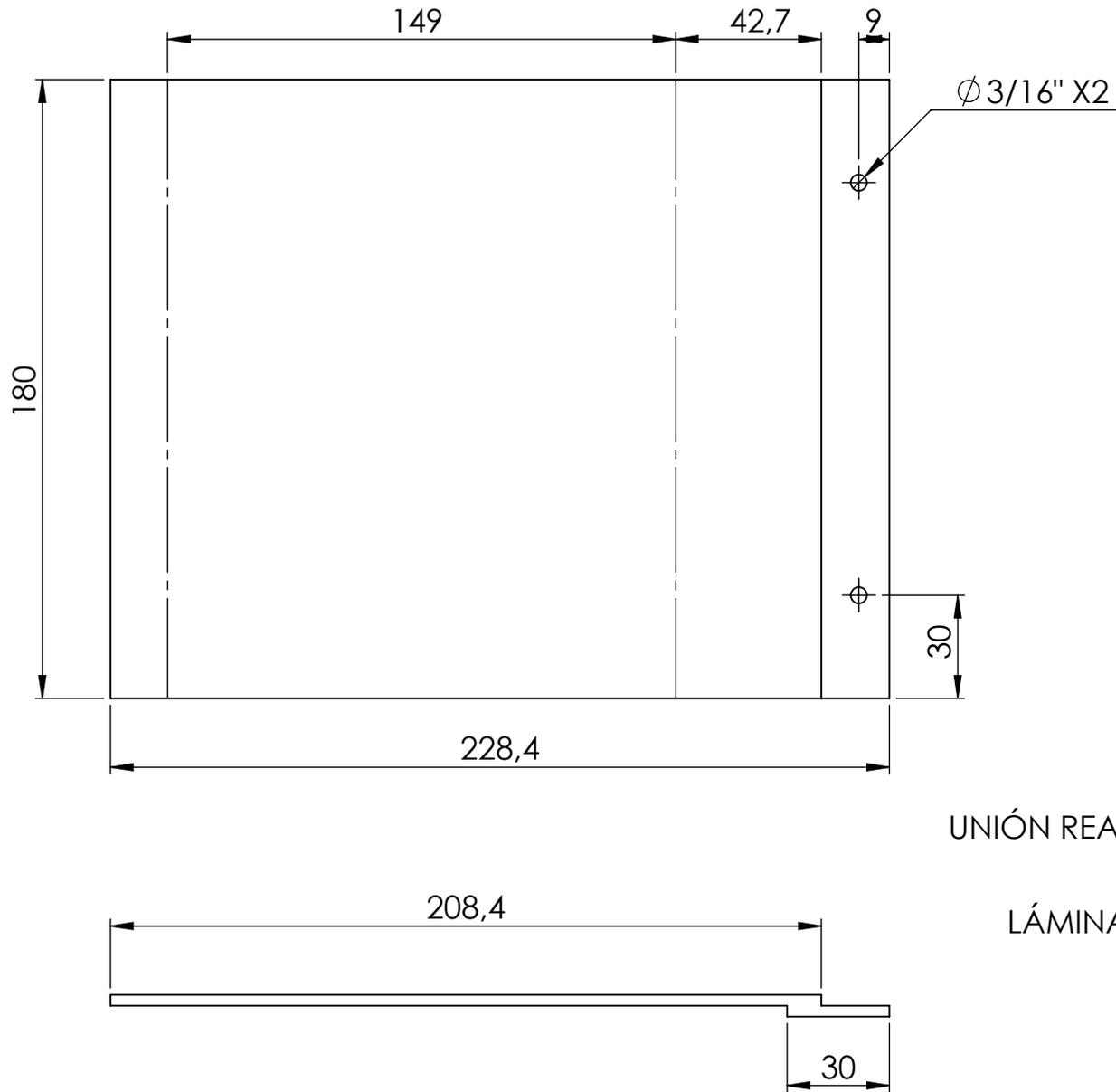
JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

BASTIDOR

PL #33



ESCALA 1:5



UNIÓN REALIZADA CON SOLDADURA

LÁMINA DE 1/8" DE ESPESOR



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

DESARROLLO  
LAMINA SUPERIOR

PIEZA N° 3

MATERIAL: A36

ESCALA: 1:2

MEDIDAS: mm

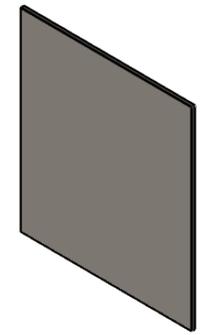
FECHA: 2/10/21

DIBUJADO POR:

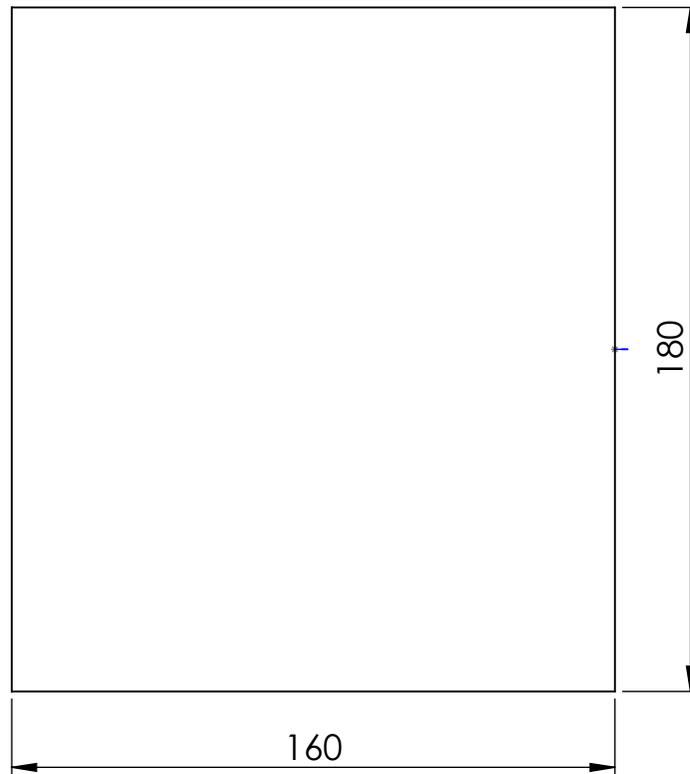
JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

BASTIDOR

PL # 34



ESCALA 1:5



LAMINA DE 1/8"



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

PLACA INTERMEDIA

PIEZA N° 4

MATERIAL: A36

ESCALA: 1:2

MEDIDAS: mm

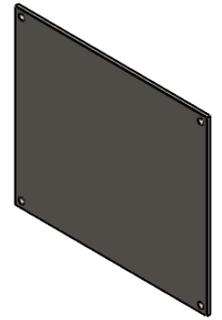
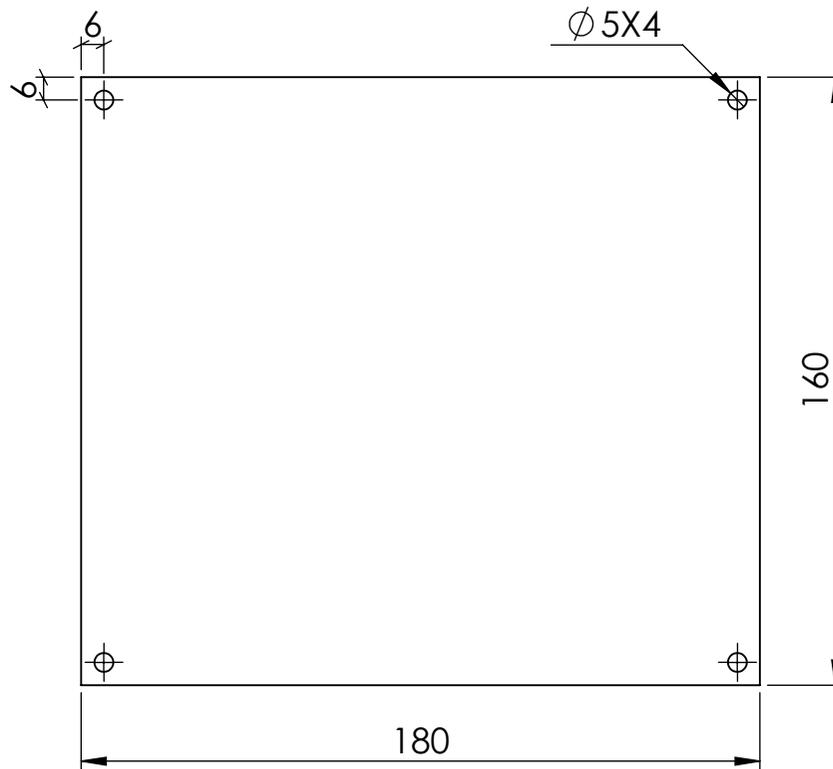
FECHA:02/10/21

DIBUJADO POR:

JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

BASTIDOR

PL # 35



ESCALA 1:5

LAMINA DE 1/8" DE ESPESOR



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

COMPUERTA

PIEZA N° 5

MATERIAL: A36

ESCALA: 1:2

MEDIDAS: mm

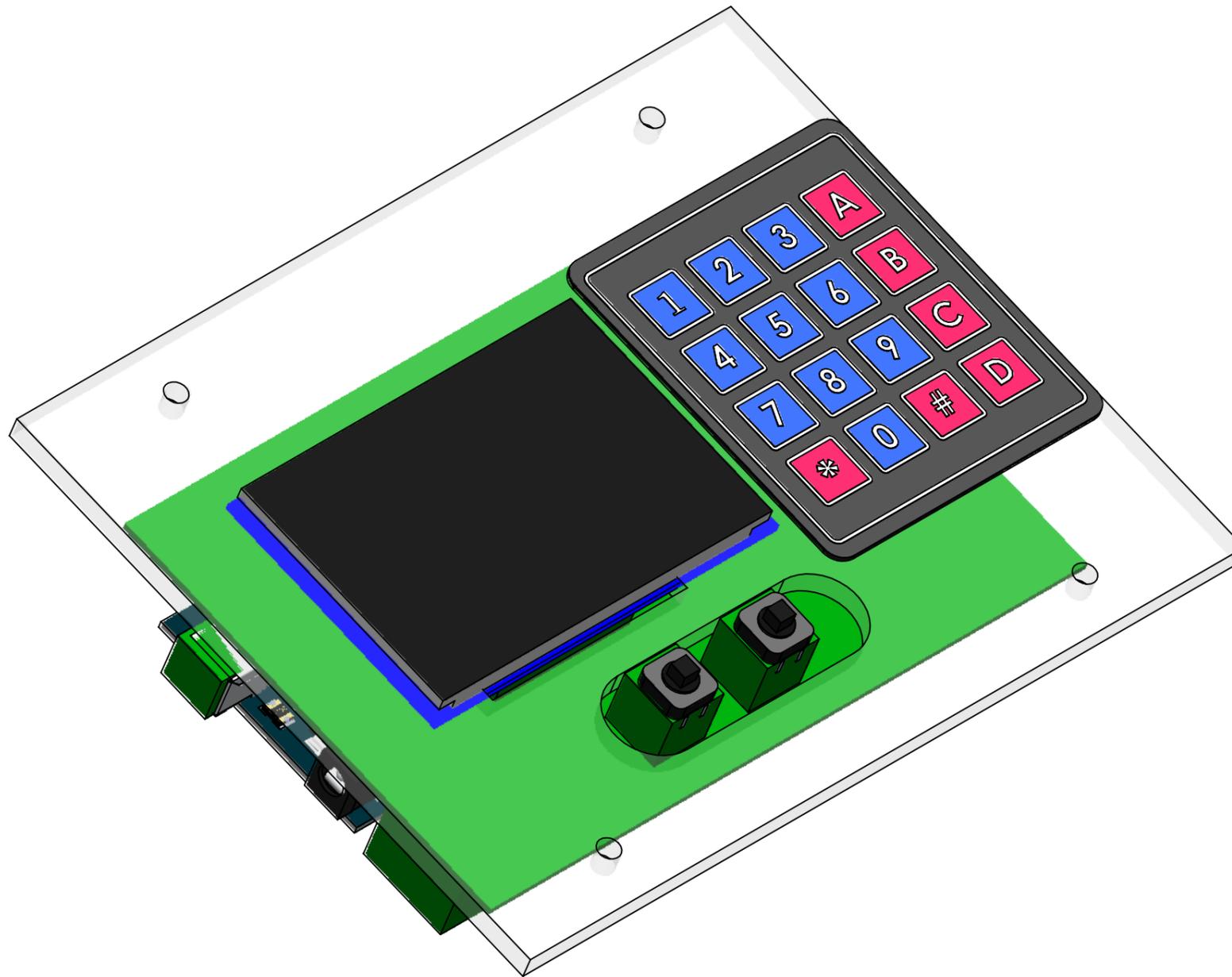
FECHA:02/10/21

DIBUJADO POR:

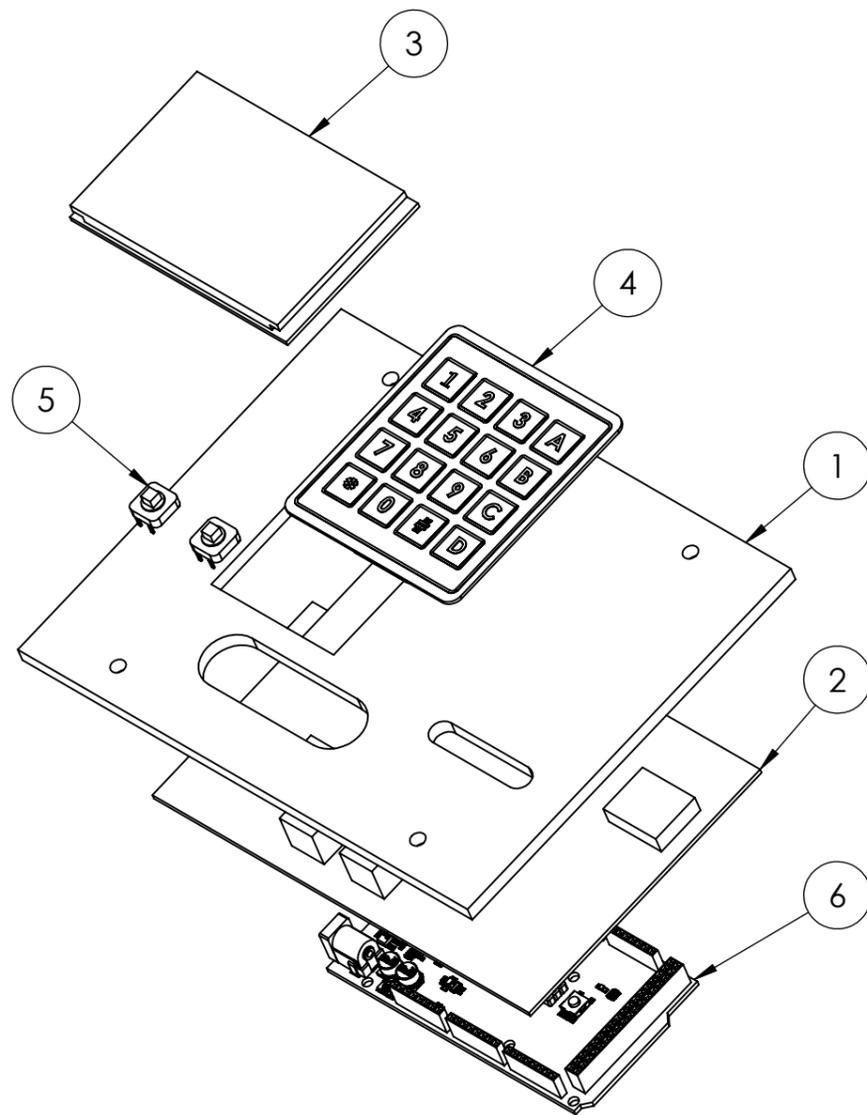
JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

BASTIDOR

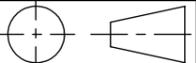
PL # 36

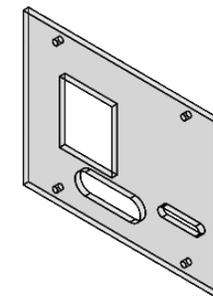
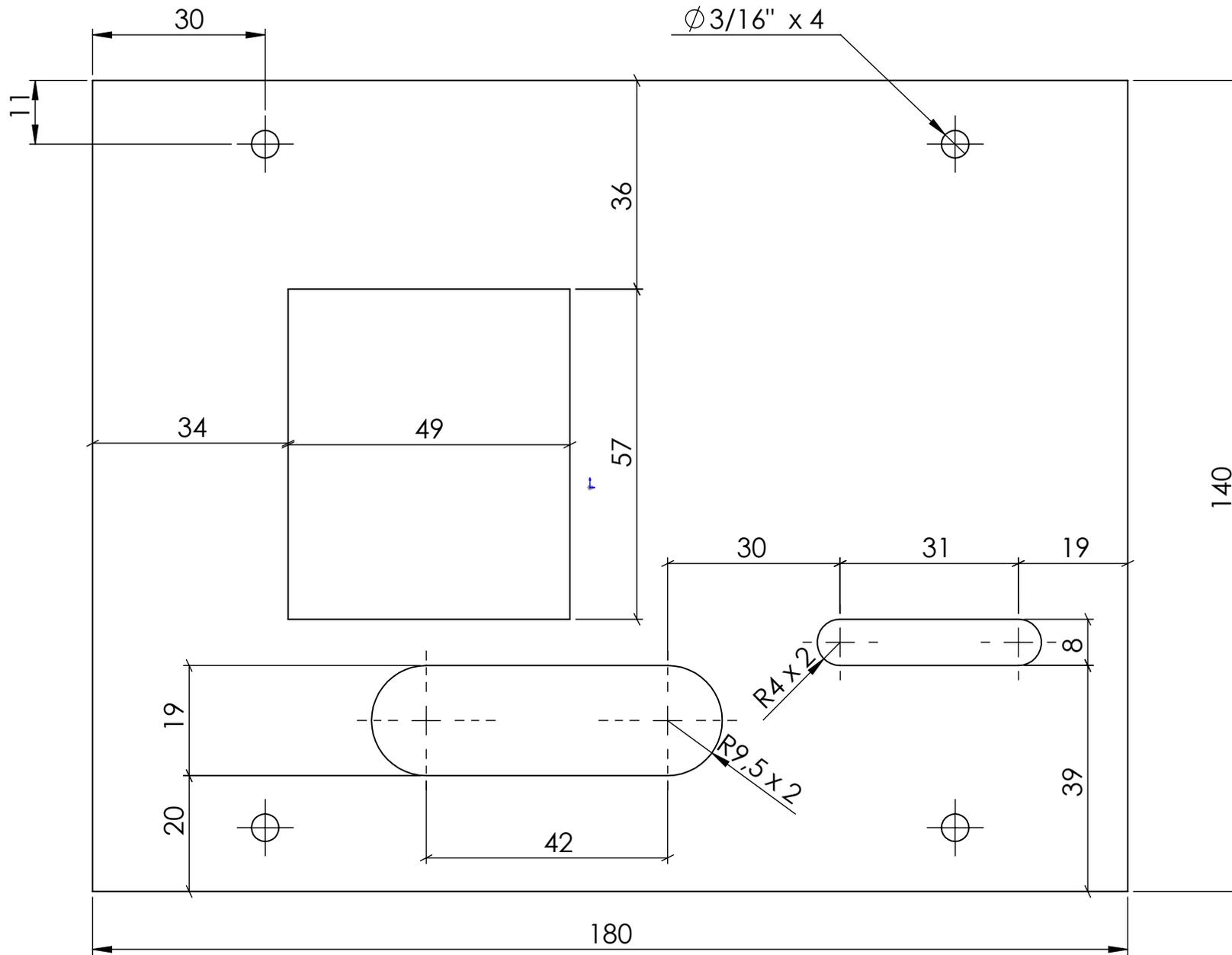


		<b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>	
<b>TÍTULO:</b>		<b>ISOMÉTRICO INTERFAZ</b>	
		<b>DIBUJADO POR:</b>	JA. ACEVEDO K. PORRAS <b>FECHA:</b> 02/10/21
<b>FORMATO</b> A3	<b>REVISADO POR:</b>	A. PERTUZ O. BOHÓRQUEZ	<b>ESCALA</b> 1:1
<b>MEDIDAS EN:</b> MILIMETROS	<b>MATERIAL:</b>	VARIOS	PL N° 37



#	NOMBRE	CANT	MATERIAL/REF
1	PANEL DE INTERFAZ	1	ACRÍLICO
2	PLACA PCB	1	PCB
3	PANTALLA LCD 3.5"	1	ARDUINO SHIELD
4	TECLADO MATRICIAL 4X4	1	ARDUINO
5	BOTÓN	2	ARDUINO
6	ARDUINO MEGA	1	ARDUINO

 	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		
TÍTULO:	EXPLOSIONADO INTERFAZ		
	DIBUJADO POR:	JA. ACEVEDO K. PORRAS	FECHA:02/10/21
FORMATO A3	REVISADO POR:	A. PERTUZ O. BOHÓRQUEZ	ESCALA 1:2
MEDIDAS EN: MILIMETROS	MATERIAL:	VARIOS	PL N° 38



ESCALA 1:5

ACRÍLICO DE  
5 mm DE ESPESOR



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

PANEL DE INTERFAZ

PIEZA N° 1

MATERIAL: ACR

ESCALA: 1:1

MEDIDAS: mm

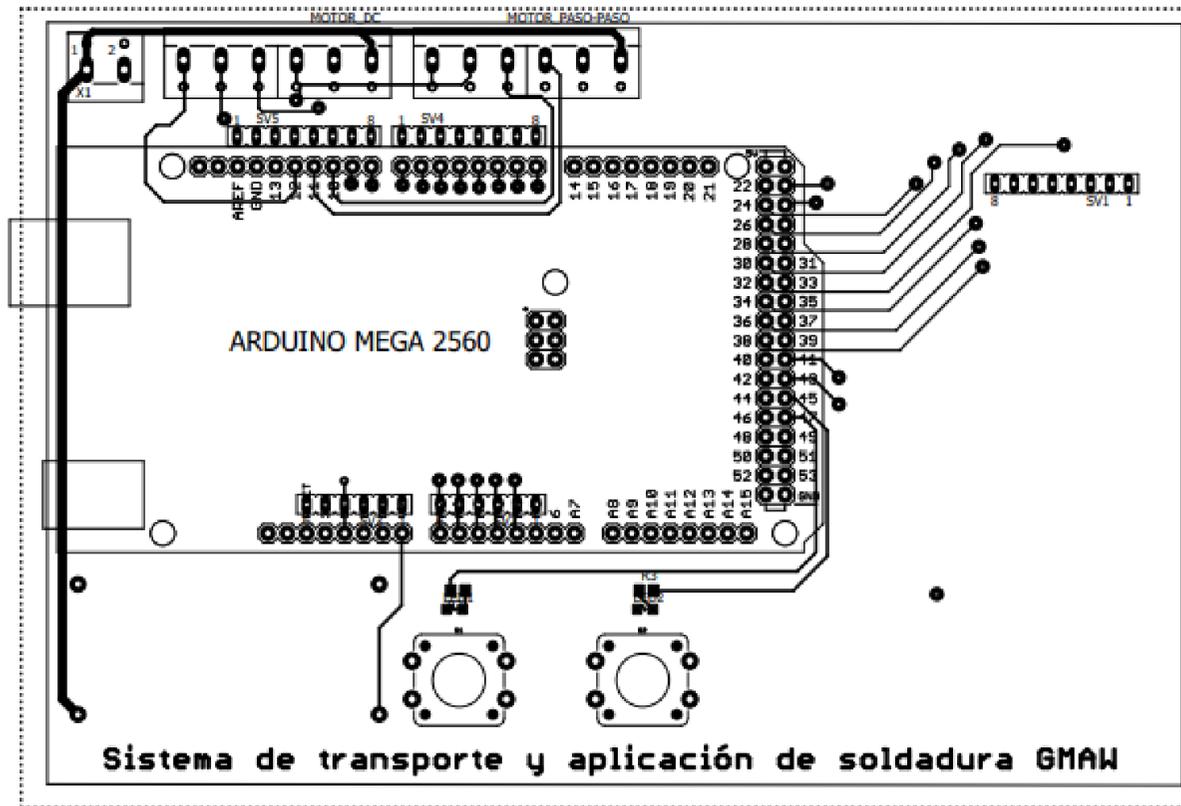
FECHA:02/10/21

DIBUJADO POR:

JA. ACEVEDO  
K. PORRAS

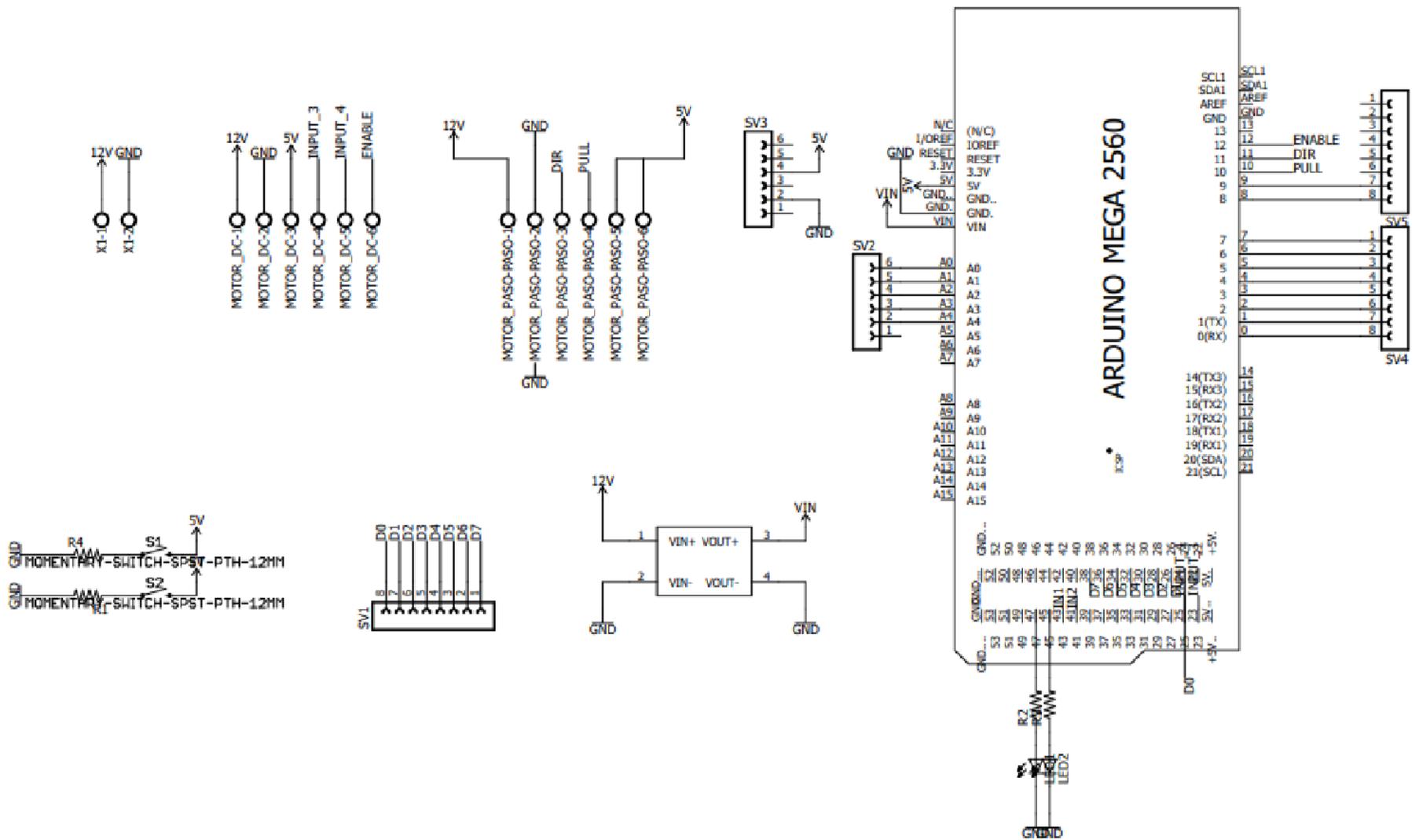
INTERFAZ

PL #39



FABRICADO APARTIR DE FIBRA DE VIDRIO  
CON UNA CAPA DELGADA DE COBRE

	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			PLACA PCB		PIEZA N° 2	MATERIAL: PCB
	ESCALA: 1:1	MEDIDAS: mm	FECHA: 02/10/21	DIBUJADO POR:	JA. ACEVEDO K. PORRAS	INTERFAZ	PL # 40



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

ESCALA: 1:1    MEDIDAS: mm    FECHA: 02/10/21

PLACA PCB: ESQUEMA

DIBUJADO POR: JA. ACEVEDO K. PORRAS

PIEZA N° 2

INTERFAZ

MATERIAL: PCB

PL # 40