



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE MECATRÓNICA

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE SOLDADURA PARA EL
ENSAMBLE DE PERFILES DE ACERO TIPO “I” EN DIMENSIONES NO
ESTANDARIZADAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTOR: ROBERTO CARLOS JÁCOME ARZA

TUTOR: EDWIN MARCELO CASA CASA

Quito – Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Roberto Carlos Jácome Arza con documento de identificación N° 1724616287 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 15 agosto de 2025

Atentamente,



Roberto Carlos Jácome Arza

1724616287

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Roberto Carlos Jácome Arza con documento de identificación N° 1724616287, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor de la Propuesta Tecnológica: “Diseño y simulación de un sistema de soldadura para el ensamble de perfiles de acero tipo “I” en dimensiones no estandarizadas”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia a lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 15 agosto de 2025

Atentamente,



Roberto Carlos Jácome Arza

1724616287

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Edwin Marcelo Casa Casa, con documento de identificación N° 0503405946 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE SOLDADURA PARA EL ENSAMBLE DE PERFILES DE ACERO TIPO “I” EN DIMENSIONES NO ESTANDARIZADAS, realizado por Roberto Carlos Jácome Arza con documento de identificación N° 1724616287, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 15 agosto de 2025

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Edwin Marcelo Casa Casa'.

Ing. Edwin Marcelo Casa Casa MSc.

0503405946

Índice de contenido

| | |
|---|------|
| CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN | II |
| CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA | III |
| CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN | IV |
| Índice de contenido | V |
| Índice de tablas | IX |
| Índice de figuras..... | X |
| RESUMEN | XIII |
| ABSTRACT..... | XIV |
| PROBLEMA..... | 1 |
| JUSTIFICACIÓN..... | 3 |
| OBJETIVOS | 4 |
| OBJETIVO GENERAL | 4 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 4 |
| METODOLOGÍA..... | 5 |
| Capítulo I | 6 |
| 1 Marco teórico..... | 6 |
| 1.1 Introducción | 6 |
| 1.2 Conceptos generales..... | 6 |
| 1.2.1 Fuerza..... | 6 |
| 1.2.2 Carga transversal..... | 6 |
| 1.2.3 Momento de una fuerza | 6 |
| 1.2.4 Vigas | 7 |
| 1.2.5 Flexión | 7 |
| 1.3 Soldadura | 7 |

| | | |
|---------|---|----|
| 1.4 | Parámetros de soldadura | 8 |
| 1.4.1 | Velocidad de avance..... | 8 |
| 1.4.2 | Corriente de Soldadura | 8 |
| 1.4.3 | Polaridad de la corriente de soldadura..... | 8 |
| 1.4.4 | Material de aporte | 9 |
| 1.4.5 | Ángulo de soldadura | 9 |
| 1.4.6 | Posición de soldadura | 10 |
| 1.5 | Métodos de soldadura más comunes para construcción de perfiles de acero | 11 |
| 1.5.1 | Soldadura por arco de metal blindado (SMAW)..... | 11 |
| 1.5.2 | Soldadura Mig/Mag | 11 |
| 1.5.3 | Soldadura por arco sumergido | 12 |
| 1.6 | Juntas soldadas..... | 12 |
| 1.6.1 | Junta soldada en T..... | 13 |
| 1.7 | Soldadura robotizada | 13 |
| 1.7.1 | Robot..... | 13 |
| 1.7.2 | Grados de libertad..... | 13 |
| 1.7.3 | Soldadura robotizada | 14 |
| 1.7.4 | Tipos de soldadura con Robot soldador..... | 14 |
| 1.8 | Perfil de acero estructural | 15 |
| 1.8.1 | Acero estructural..... | 15 |
| 1.8.2 | Perfil de acero | 15 |
| 1.8.3 | Perfiles de acero tipo “I” | 16 |
| 1.8.3.1 | Características dimensionales. | 16 |
| 1.8.4 | Perfiles de acero tipo “I” comerciales..... | 17 |
| 1.8.5 | Métodos de construcción | 17 |
| 1.8.5.1 | Perfiles de acero tipo “I” estandarizados. | 17 |
| 1.8.5.2 | Perfiles de acero tipo “I” no estandarizados. | 18 |

| | |
|--|----|
| Capítulo II..... | 19 |
| 2 Análisis de alternativas..... | 19 |
| 2.1 Sistema de calificación para Alternativas del Método de Soldadura..... | 19 |
| 2.2 Análisis de alternativas del método de soldadura..... | 19 |
| 2.2.1 Soldadura por arco de metal blindado (SMAW) (Alternativa 1)..... | 19 |
| 2.2.2 Soldadura MIG (Alternativa 2)..... | 21 |
| 2.2.3 Soldadura por arco sumergido (Alternativa 3)..... | 22 |
| 2.2.4 Cuadro comparativo de selección de alternativas..... | 23 |
| 2.3 Sistema de calificación para alternativas para el tipo de robot soldador..... | 26 |
| 2.4 Análisis de alternativas para tipo de robot soldador..... | 26 |
| 2.4.1 Robots Cartesianos (Alternativa 1)..... | 26 |
| 2.4.2 Robot SCARA (Alternativa 2)..... | 28 |
| 2.4.3 Robot antropomórfico (Alternativa 3)..... | 29 |
| 2.4.4 Cuadro comparativo de selección de alternativas..... | 30 |
| 2.5 Sistema de calificación para alternativas sobre el material de construcción..... | 31 |
| 2.6 Análisis de alternativas sobre el material de construcción..... | 31 |
| 2.6.1 Aluminio (Alternativa 1)..... | 31 |
| 2.6.2 Acero (Alternativa 2)..... | 32 |
| 2.6.3 Fibra de carbono (Alternativa 3)..... | 32 |
| 2.6.4 Cuadro comparativo de selección de alternativas..... | 32 |
| Capítulo III..... | 34 |
| 3 Diseño y simulación..... | 34 |
| 3.1 Diseño mecánico..... | 34 |
| 3.1.1 Dimensionamiento..... | 34 |
| 3.1.2 Diseño de las piezas..... | 35 |
| 3.1.3 Cinemática directa..... | 35 |
| 3.1.3.1 Parámetros de Denavit–Hartenberg..... | 35 |

| | | |
|---------|--|----|
| 3.1.4 | Cinemática inversa..... | 41 |
| 3.1.5 | Análisis mecánicos..... | 45 |
| 3.1.5.1 | Análisis estático | 45 |
| 3.1.5.2 | Análisis de cargas | 46 |
| 3.1.5.3 | Diseño de perfil para estructura del brazo | 52 |
| 3.1.5.4 | Análisis de velocidad de avance | 52 |
| 3.2 | Diseño eléctrico y de control | 56 |
| 3.2.1 | Diagrama de flujo del sistema..... | 56 |
| 3.2.2 | Actuadores | 57 |
| 3.2.3 | Diagrama de potencia | 61 |
| 3.2.4 | Elementos de control..... | 61 |
| 3.2.5 | Esquema de control..... | 64 |
| 3.3 | Simulación de trayectoria | 64 |
| | Resultados | 72 |
| | Conclusiones | 74 |
| | Recomendaciones | 76 |
| | Bibliografía | 77 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero A36 | 15 |
| Tabla 2. Sistema de calificación para Alternativas del Método de Soldadura | 19 |
| Tabla 3. Cuadro comparativo de selección de alternativas | 23 |
| Tabla 4. Sistema de calificación para Alternativas para el tipo de robot soldador..... | 26 |
| Tabla 5. Cuadro comparativo de selección de alternativas para tipo de robot soldador | 30 |
| Tabla 6. Sistema de calificación para alternativas sobre el material de construcción..... | 31 |
| Tabla 7. Cuadro comparativo de selección de alternativas para material de construcción del brazo robótico | 33 |
| Tabla 8. Límites de dimensiones para perfiles de acero tipo "I" no estandarizados | 34 |
| Tabla 9. Parámetros de Denavit-Hartenberg | 36 |
| Tabla 10. Parámetros de diseño sistema de transmisión piñón–cremallera | 56 |
| Tabla 11. Especificaciones técnicas del servomotor 1 | 58 |
| Tabla 12. Especificaciones técnicas del servomotor 2 | 59 |
| Tabla 13. Especificaciones técnicas del servomotor 4 | 60 |
| Tabla 14. Especificaciones técnicas PLC | 62 |
| Tabla 15. Especificaciones técnicas del Servodriver | 63 |
| Tabla 16. Especificaciones técnicas HMI | 63 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Representación carga transversal | 6 |
| Figura 2. Dimensiones de una viga..... | 7 |
| Figura 3. Deformación por flexión | 7 |
| Figura 4. Polaridad de corriente en soldadura | 9 |
| Figura 5. Ángulo de trabajo | 9 |
| Figura 6. Ángulo de arrastre | 10 |
| Figura 7. Posiciones de soldadura para ranuras. [15] | 11 |
| Figura 8. Junta soldada en T | 13 |
| Figura 9. Representación de ejes y articulaciones para los grados de libertad [21] | 14 |
| Figura 10. Nomenclatura de las dimensiones del perfil de acero tipo "I". [27]..... | 16 |
| Figura 11. Clases de perfiles de acero tipo "I". | 16 |
| Figura 12. Catálogo DIPAC de perfiles IPE. [26] | 17 |
| Figura 13. Representación sistema de soldadura SMAW [31] | 19 |
| Figura 14. Representación sistema de soldadura MIG [31]..... | 21 |
| Figura 15. Representación sistema de soldadura por arco sumergido [32] | 22 |
| Figura 16. Curva de enfriamiento para aceros de bajo contenido de carbono. [33] | 24 |
| Figura 17. Relación velocidad de avance y corriente de soldadura MIG. [35] | 25 |
| Figura 18. Esquema de un robot cartesiano [36] | 26 |
| Figura 19. Esquema de un robot SCARA [36] | 28 |
| Figura 20. Esquema de un robot antropomórfico de 3 ejes [36]..... | 29 |
| Figura 21. Características aluminio 6061 | 33 |
| Figura 22. Dimensionamiento del sistema de soldadura | 34 |
| Figura 23. Ensamble sistema de soldadura..... | 35 |
| Figura 24. Sistema de coordenadas móviles..... | 35 |
| Figura 25. Puntos de translación 0-1 | 36 |
| Figura 26. Puntos de traslación 1-2 | 37 |
| Figura 27. Puntos de traslación 2-3-4 | 38 |
| Figura 28. Cinemática directa en Matlab, Prueba 1 | 39 |
| Figura 29. Verificación cinemática directa en SolidWorks, Prueba 1..... | 40 |
| Figura 30. Cinemática directa en Matlab, Prueba 2..... | 40 |
| Figura 31. Verificación cinemática directa en SolidWorks, Prueba 2..... | 41 |
| Figura 32. Ángulo de trabajo para θ_4 | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 33. Análisis de Von Mises | 45 |
| Figura 34. Análisis de deformaciones unitarias | 45 |
| Figura 35. Distribución del factor de seguridad | 46 |
| Figura 36. Distribución para análisis de cargas | 46 |
| Figura 37. DCL C-D | 47 |
| Figura 38. Diagramas de cortantes y momentos sobre el soporte de la antorcha | 48 |
| Figura 39. DCL B-C | 48 |
| Figura 40. Diagramas de cortantes y momentos sobre el antebrazo del robot | 49 |
| Figura 41. DCL A-B | 50 |
| Figura 42. Diagramas de cortantes y momentos sobre el brazo del robot. | 51 |
| Figura 43. Dimensiones del perfil para estructura del brazo | 52 |
| Figura 44. Masa del ensamble del brazo robótico | 53 |
| Figura 45. Distancia del carro de riel al centro del eje | 54 |
| Figura 46. Diagrama de flujo del sistema de soldadura..... | 57 |
| Figura 47. Ubicación de servomotores | 58 |
| Figura 48. Ubicación servomotor de avance | 60 |
| Figura 49. Diagrama de potencia..... | 61 |
| Figura 50. Esquema de control | 64 |
| Figura 51. Ubicación de puntos para posicionamiento del P_f | 65 |
| Figura 52. Asignación del P_f para el perfil de prueba | 66 |
| Figura 53. Cinemática inversa | 66 |
| Figura 54. Verificación posicionamiento de servomotores..... | 67 |
| Figura 55. Desplazamiento del brazo robótico | 67 |
| Figura 56. Configuración dimensiones del brazo robótico..... | 68 |
| Figura 57. Ubicación de los puntos de trayectoria en RoboDK | 68 |
| Figura 58. Configuración trayectoria 1 | 69 |
| Figura 59. Configuración trayectoria 2..... | 69 |
| Figura 60. Configuración velocidad de Avance y longitud de la trayectoria..... | 70 |
| Figura 61. Configuración trayectoria 3..... | 70 |
| Figura 62. Simulación de trayectoria..... | 71 |
| Figura 63. Plano base del robot | 1 |
| Figura 64. Plano brazo y antebrazo del robot | 2 |
| Figura 65. Plano soporte de antorcha..... | 2 |
| Figura 66. Plano carro de riel..... | 4 |

| | |
|---|----|
| Figura 67. Plano del riel..... | 5 |
| Figura 68. Hoja técnica Servomotor 1 | 7 |
| Figura 69. Hoja técnica Servomotor 2 y 3 | 9 |
| Figura 70. Hoja técnica Servomotor 4 | 11 |
| Figura 71. Hoja técnica Controlador..... | 13 |
| Figura 72. Hoja técnica HMI | 14 |
| Figura 73. Características Anrorcha de soldadura | 15 |

RESUMEN

El presente trabajo propone el diseño y la simulación de un sistema de soldadura para el ensamblaje de perfiles de acero tipo “I” en dimensiones no estandarizadas, utilizados comúnmente en estructuras metálicas. La investigación surge ante las limitaciones del sector constructivo al no encontrar en el mercado perfiles con medidas específicas, lo que obliga al uso de perfiles sobredimensionados, incrementando el peso estructural y los costos del proyecto.

Mediante un análisis comparativo de métodos de soldadura, se seleccionó el proceso MIG por su continuidad, versatilidad y compatibilidad con sistemas automatizados. El diseño del sistema se desarrolló con base en los rangos dimensionales de perfiles estándar y personalizados, eligiéndose un brazo robótico antropomorfo por su alta precisión y capacidad para ejecutar trayectorias complejas de soldadura.

El diseño mecánico incluyó el análisis cinemático mediante parámetros de Denavit–Hartenberg, análisis de cargas estáticas y simulación de trayectorias de soldadura para diferentes configuraciones de perfiles. Además, se modeló virtualmente la arquitectura de control utilizando un PLC Siemens S7-1200 y una HMI KP700, permitiendo ingresar parámetros personalizados para las dimensiones del perfil.

Los resultados demuestran que el sistema simulado cumple con los requerimientos estructurales y operativos para generar cordones de soldadura continuos y confiables en perfiles tipo “I” no estandarizados, constituyéndose en una alternativa eficaz frente a procesos manuales. La simulación valida la factibilidad técnica del diseño y sienta las bases para el desarrollo futuro de sistemas flexibles y automatizados en la industria de la construcción metálica.

Palabras clave: soldadura robotizada, perfiles tipo “I”, dimensiones no estandarizadas, sistema automatizado, simulación cinemática, control con PLC.

ABSTRACT

The present work proposes the design and simulation of an welding system for the assembly of non-standardized steel "I" beams, commonly used in metal structures. The research arises from the limitations found in the construction sector when specific beam dimensions are not commercially available, often resulting in oversized structures and increased material costs.

Through a comparative analysis of welding methods, the MIG process was selected for its continuity, versatility, and compatibility with robotic automation. The system design was developed based on dimensional ranges obtained from standard and custom steel profiles, and a anthropomorphic robotic arm was chosen for its high flexibility and precision in welding trajectories.

The mechanical design included kinematic analysis using Denavit–Hartenberg parameters, static load analysis, and simulation of welding paths for different profile configurations. The control architecture was virtually modeled using a Siemens S7-1200 PLC and a KP700 HMI interface, enabling the system to receive customized input parameters for profile dimensions.

The results demonstrate that the simulated system meets the structural and operational requirements to produce continuous and reliable welds on customized "I" beams, offering an effective alternative to conventional manual processes. The simulation validates the design's technical feasibility and provides a foundation for future development of flexible and automated manufacturing systems in the steel construction industry.

Keywords: robotic welding, steel I-beams, non-standard profiles, automated system, kinematic simulation, PLC control.

PROBLEMA

Hoy en día las construcciones civiles han adoptado en su mayoría por cambiar su esquema de hormigón por un diseño estructural en acero, esto debido a diferentes factores como: velocidad de montaje, resistencia sísmica, estructuras más livianas, luces de piso mayores, entre otras. Estos factores han hecho que las estructuras en acero sean en su mayoría la primera opción a construir.

Sin embargo, se considera que realizar una estructura en acero representa un costo elevado, entonces el principal elemento que influye para decidir no construir en acero son los perfiles “I” utilizados como vigas, por lo que este elemento que es el encargado de soportar la loza y distribuir el peso a las columnas representa alrededor de 70% del peso total de la estructura y por consiguiente es el más influyente en la variación de costos [1].

Aumentar el peso de la estructura no solo afecta en el apartado de costos, sino que cambian totalmente el cálculo estructural, distribución de pesos, inercias de la construcción y todos los apartados físicos que representan una modificación en el esquema estructural y se pueden significar un riesgo de fallo. Además, el aumento de peso estructural que no está justificado para un aumento de cargas a soportar significaría que los perfiles de acero no estarán trabajando de manera óptima, ya que tendrán las mismas cargas a soportar con un perfil mayor dando un problema de sobredimensionamiento.

Entonces, al momento de realizar cotizaciones en las distribuidoras de acero se encuentran con que los perfiles “I” calculados en el diseño estructural no están disponibles en el mercado, por lo que se toma dos decisiones: tomar el perfil comercial que más se acerca al del cálculo estructural o construir los perfiles a partir de flejes de acero. Si se opta por tomar un perfil con dimensiones estándar en el mercado, el peso de la estructura aumenta y por ende el costo. Y por otro lado si se desea fabricar perfiles a partir de los flejes de acero, se compran los flejes y se sueldan, pero del mismo modo, al ser este un proceso manual el resultado no siempre son perfiles fiables y el costo de armado también representa un aumento de precio del proyecto por lo que en la mayoría de los casos se elige la opción de aumentar las dimensiones a perfiles estándar [2].

Los flejes hechos a dimensiones específicas se realizan de manera manual, generalmente con soldadora MIG, estos flejes al ser unidos se sueldan únicamente en cordones de longitudes entre 25 y 50 cm de acuerdo al criterio del soldador, pero al no estar los flejes soldados con un cordón continuo hace que los perfiles de acero de tipo “I” fabricados a dimensiones no

estandarizadas no sean tan fiables como los comerciales llevando nuevamente a un sobredimensionamiento ya que en el cálculo estructural se recomienda usar solo el 70% de la capacidad del perfil si este no tiene soldadura continua [1].

JUSTIFICACIÓN

Realizar perfiles de acero “I” en medidas no estandarizadas representa una disminución del peso de la estructura total, estos elementos son fabricados de flejes de acero donde se debe considera dos puntos. Primero el perfil fabricado no es un elemento compacto por lo que no se puede usar sus propiedades al 100%. Segundo, el costo de ensamble de los perfiles representa alrededor la mitad de su precio por kilogramo. Entonces lo que se debe lograr es que se puedan fabricar perfiles compactos y que su ensamble no supere el precio de los perfiles comerciales con dimensiones estándar. [3]

Cumplir con los dos requerimientos para la fabricación de perfiles tipo “I” representaría un ahorro significativo en costos y evitaría sobredimensionamientos de la estructura, haciéndola más accesible y liviana. La creación de un sistema para fabricar perfiles tipo “I” a diferentes dimensiones con soldadura continua automatizada ahorrará tiempo y material provocando que los costos de construcción disminuyan y que el perfil trabaje de acuerdo con los cálculos estructurales.

Para lograr tener soldaduras fiables en los perfiles comerciales se utilizan procesos de soldadura automatizada, pero estas están diseñadas para hacer las medidas estándares del mercado. Las máquinas soldadoras son usadas para la fabricación de los perfiles comerciales debido principalmente a su alta precisión. Los procesos autónomos de soldadura reemplazan las operaciones manuales por programables con el objetivo de optimizar los tiempos de procesamiento y aumentar la producción. [4]

La soldadura robotizada representa una evolución avanzada de la soldadura automatizada, caracterizada por su capacidad para ejecutar uniones en zonas de difícil acceso y realizar trayectorias de soldadura complejas y de alta precisión. Este proceso se lleva a cabo mediante brazos robóticos con múltiples ejes de movimiento, lo que permite una amplia flexibilidad operativa. Según las normas JIS, la soldadura robotizada se define como "un tipo de soldadura automatizada realizada mediante el uso de un robot industrial", siendo ejemplos típicos la soldadura por arco y la soldadura por puntos asistidas por robot. Asimismo, las mismas normas establecen que un robot industrial es una "máquina utilizada con fines industriales que cuenta con un manipulador controlado automáticamente o con capacidad de movimiento, y que puede ejecutar diversas tareas programadas". [5]

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y simular un sistema de soldadura para el ensamble de perfiles de acero tipo “I” en dimensiones no estandarizadas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los procesos de construcción con perfiles de acero comerciales y perfiles fabricados a medidas no estandarizadas mediante la observación de los distintos métodos de soldadura que se usan en el mercado para la obtención de parámetros de diseño.
- Realizar el diseño mecatrónico del sistema de soldadura de perfiles de acero tipo “I” no estandarizados con los datos obtenidos para la mejora del cordón de soldadura.
- Simular a través de distintos software el sistema de soldadura de perfiles de acero tipo “I” para la verificación de su correcto funcionamiento.

METODOLOGÍA

Fase teórica

Se parte con una metodología investigativa teórica donde se identifica el proceso de construcción de perfiles tipo “I” revisando indagación bibliográfica y basándose en la crítica de expertos de elaboración de perfiles comerciales y no estandarizados para obtener datos como peso, costos y propiedades mecánicas. En este apartado se indaga sobre las dimensiones comerciales, la disponibilidad y la facilidad de conseguir perfiles “I” estandarizados y la disponibilidad para elaborar flejes a medidas específicas.

También se analizan los distintos tipos de soldadura con los que se realiza este proceso para conocer cual resulta ser el óptimo para la elaboración de perfiles “I” no estandarizados

Fase de Diseño

Una vez que se tenga la información se procede con el diseño del sistema, se tomara en consideración los datos recopilados en la fase teórica y de este modo se realizará los cálculos de diseño del brazo robótico y la mesa de trabajo para obtener un sistema que pueda soldar perfiles de acero tipo “I” con diferentes dimensiones.

Fase de Simulación

Simulación, con el sistema de brazo robótico y mesa diseñado se somete a varias dimensiones de perfiles calibrando los elementos mecatrónicos de este modo se puede validar los cálculos y el diseño realizados.

Capítulo I

1 Marco teórico

1.1 Introducción

El presente capítulo desarrolla los fundamentos teóricos en el que se basa el diseño y simulación del proyecto propuesto. Se tratan conceptos generales y enfoques de la soldadura que se deben considerar para el diseño del sistema. Además, se analiza las dimensiones de los perfiles de acero estructural tipo “I” que se dispone en el mercado, sus métodos de construcción, tipo de soldadura, y especificaciones de construcción.

1.2 Conceptos generales

1.2.1 Fuerza

La fuerza es la magnitud responsable de cambios en la cantidad de movimiento de un cuerpo debido a la interacción con otros. Al presentarse interacciones se puede generar variaciones en la aceleración o cambios de dirección. La unidad de medida utilizada en el Sistema internacional (SI) para la fuerza es el newton (N). [6]

1.2.2 Carga transversal

La carga transversal hace referencia a una fuerza perpendicular al eje longitudinal de un elemento como se observa en la Figura 1. Este tipo de carga produce el fenómeno de flexión en el material que mediante la tensión interna de tracción y compresión se genera un cambio en su curvatura. [7]

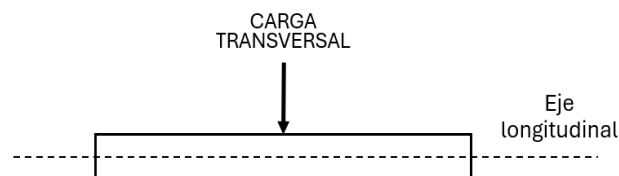


Figura 1. Representación carga transversal

1.2.3 Momento de una fuerza

El momento producido de una fuerza es magnitud que mide la capacidad de alterar la velocidad de giro de una fuerza sobre una partícula. El momento también es conocido como par de torsión y está relacionado directamente con la distancia a la que se ejerce la fuerza por lo que no puede generarse en la misma línea de acción. [8]

1.2.4 Vigas

La viga es una estructura que trabaja horizontalmente y está diseñada para soportar cargas transversales que son transmitidas a apoyos sin generar empujes laterales. Trabaja principalmente a flexión y como se representa en la Figura 2, la longitud l predomina sobre las otras dos dimensiones b y h . A. [9]

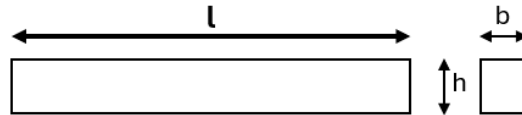


Figura 2. Dimensiones de una viga

1.2.5 Flexión

La flexión es la deformación que presenta un elemento estructural alargado (viga) en dirección perpendicular a su eje longitudinal. Las fuerzas aplicadas sobre el eje longitudinal generan momentos flectores, que tienden a curvar o doblar el elemento como se observa en la **Figura 3**. La flexión es uno de los tipos de esfuerzos más comunes que se analizan en el diseño y análisis de estructuras incluyendo elementos estructurales superficiales como placas o láminas. [7]

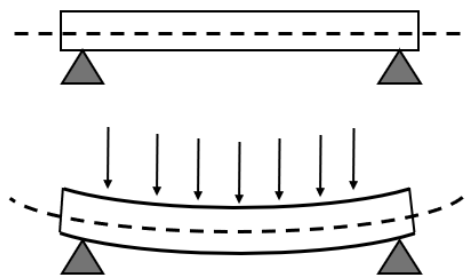


Figura 3. Deformación por flexión

1.3 Soldadura

La soldadura es un proceso en el cual dos o más piezas metálicas o no metálicas se fusionan de manera permanente, con o sin material de aporte. Durante el proceso de soldadura, el material se funde y forma un pequeño charco entre las superficies que, al solidificarse, crea una unión permanente conocida como cordón de soldadura. La soldadura se obtiene generalmente por aplicación de presión o calentando los materiales. [10]

1.4 Parámetros de soldadura

Dentro de la soldadura hay parámetros que deben ser controlados para que se logre una fusión adecuada.

1.4.1 Velocidad de avance

En soldadura la velocidad de avance se refiere al parámetro en el que la herramienta de soldadura se desplaza a lo largo de la junta soldada, esta velocidad de avance influye directamente en la penetración del cordón además de su forma y tamaño. [11]

1.4.2 Corriente de Soldadura

La corriente influye directamente en la Cantidad de calor que se aplica en el metal base. Si la corriente es alta se genera mayor penetración, así como un cordón de soldadura más ancho, esto puede producir sobrecalentamientos y perforación en materiales. Por otro lado, si la corriente es baja la penetración y el tamaño del cordón disminuyen, esto puede ser positivo en chapas finas, pero genera uniones débiles en materiales de gran espesor.

Corriente continua CC o DC: Es común en soldadura de arco, como en la soldadura con electrodo revestido (SMAW) y en TIG. Permite controlar mejor la estabilidad del arco y es adecuada para diferentes posiciones y tipos de metal.

Corriente alterna CA o AC: Se usa en aplicaciones como la soldadura de aluminio con TIG, ya que ayuda a limpiar la capa de óxido del metal y mejora la calidad de la unión. Sin embargo, el arco puede ser menos estable que en corriente continua. [12]

1.4.3 Polaridad de la corriente de soldadura

La polaridad en un circuito eléctrico hace referencia a la dirección del flujo de corriente. En el contexto de la soldadura, esta característica influye directamente en la distribución de la corriente y el calor dentro del circuito. Dependiendo donde se conecte los terminales, existen dos configuraciones de polaridad en la soldadura: corriente continua con electrodo de positivo (DCEP) y corriente continua con electrodo negativo (DCEN).

Corriente continua con electrodo positivo (DCEP): En esta configuración se conecta el terminal positivo al electrodo y el terminal negativo al elemento base como se observa en la Figura 4. En este tipo configuración conocida como polaridad inversa el calor se concentra mayormente en el electrodo, por lo que proporciona mayor penetración.

Corriente continua con electrodo negativo (DCEN): Conocida como polaridad directa, se conecta el terminal negativo al electrodo y el terminal positivo al elemento base como se observa en la Figura 4. En este tipo configuración el calor se concentra mayormente en el elemento base, de modo que la penetración del electrodo es menor y se puede tener un mejor control de la superficie. [13]

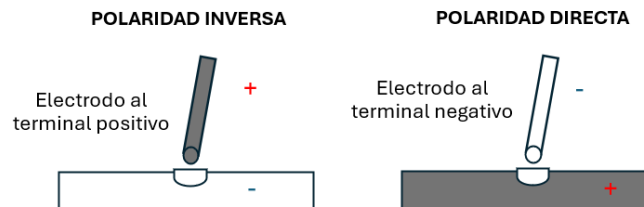


Figura 4. Polaridad de corriente en soldadura

1.4.4 *Material de aporte*

En soldadura corresponde al material introducido durante el proceso con el propósito de formar el cordón de soldadura y facilitar la unión entre los materiales base. Su composición puede ser igual o distinta a la del material base, dependiendo de los requerimientos específicos de la unión, tales como resistencia mecánica, ductilidad o resistencia a la corrosión.

1.4.5 *Ángulo de soldadura*

El ángulo de soldadura se refiere a la orientación de la herramienta de soldadura con respecto a la pieza de trabajo durante el proceso de soldadura. Este ángulo es fundamental porque influye en la calidad de la soldadura, la penetración, la formación del cordón y la capacidad para evitar defectos como inclusiones, porosidad o falta de fusión.

Existen dos consideraciones importantes en cuanto al ángulo de soldadura; el ángulo de trabajo y el ángulo de arrastre.

El ángulo de trabajo hace referencia al ángulo que se forma entre el electrodo y la superficie de la pieza como se observa en la Figura 5, este ángulo depende del tipo de junta que se realiza, si se trata de soldaduras en filete se recomienda que sea de 45° y para soldaduras planas el Angulo debe ser del 90° .

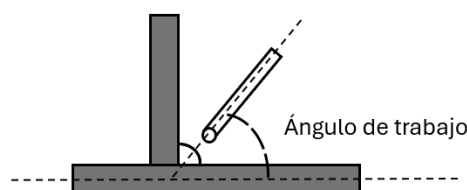


Figura 5. Ángulo de trabajo

El ángulo de arrastre o desplazamiento es aquel que se produce en el plano longitudinal de la soldadura, que se mide en dirección del avance de la herramienta como se observa en la Figura 6, el valor de este ángulo se encuentra entre 5° y 15° . [14]

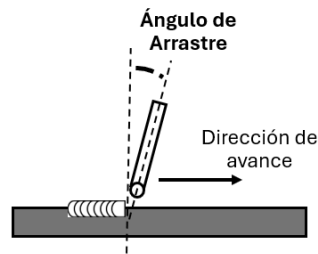


Figura 6. Ángulo de arrastre

1.4.6 Posición de soldadura

La posición de soldadura hace referencia a la orientación durante la ejecución del proceso. Estas posiciones comúnmente son: plana, horizontal, vertical, sobre cabeza o inclinada.

La American Welding Society (AWS), presenta 6 tipos de posiciones, a las que nombra posiciones de prueba de soldadura:

1. Prueba de soldadura en posición plana 1G, 1F.
2. Prueba de soldadura en posición horizontal 2G, 2F.
3. Prueba de soldadura en posición vertical 3G, 3F.
4. Prueba de soldadura en posición sobre cabeza 4G, 4F.
5. Prueba de soldadura posiciones múltiples con anillo de restricción 5G, 5F.
6. Prueba de soldadura posiciones múltiples 6G, 6F.

Las posiciones 5G, 5F, 6G y 6F hacen referencia únicamente a posiciones de soldadura en tubería.

Cuando se trata de soldaduras de ranura las posiciones reciben la asignación de G y si son soldaduras de filete reciben la asignación de F. En la Figura 7 se puede diferenciar las distintas posiciones en las que se puede trabajar.

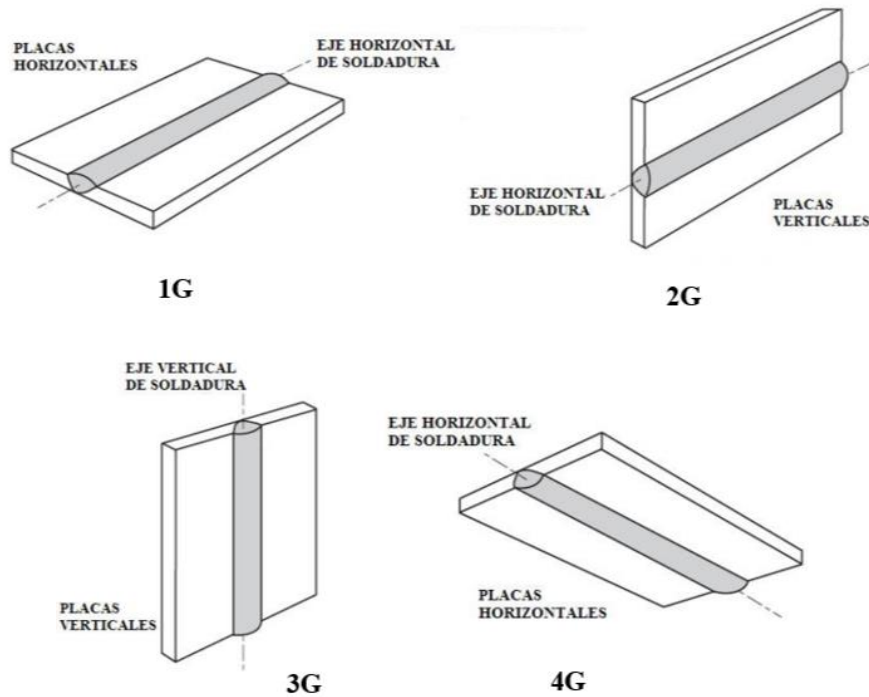


Figura 7. Posiciones de soldadura para ranuras. [15]

1.5 Métodos de soldadura más comunes para construcción de perfiles de acero

1.5.1 Soldadura por arco de metal blindado (SMAW)

La soldadura SMAW (por sus siglas en inglés Shielded Metal Arc Welding), también denominada soldadura manual por arco metálico (MMAW) o más comúnmente, soldadura con electrodo revestido, es uno de los procesos de soldadura por arco más utilizados. Este método emplea un electrodo consumible compuesto por una varilla metálica recubierta de fundente. Durante la soldadura, el recubrimiento se descompone por acción del calor y genera gases protectores, principalmente dióxido de carbono (CO_2), que aíslan la zona de fusión frente a la oxidación y la contaminación atmosférica. El metal de aporte provisto por la varilla debe ser químicamente compatible con el material base, generalmente con una composición similar. La formación del arco eléctrico entre el electrodo y el metal base proporciona el calor necesario para fundir ambos materiales y formar la unión. [16]

1.5.2 Soldadura Mig/Mag

La soldadura MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas) es un proceso por arco con protección de gas que emplea un electrodo consumible continuo. Durante la soldadura, el arco se establece entre el alambre y las piezas a unir, mientras que el baño de fusión se protege de

la atmósfera mediante un gas. Dependiendo del tipo de gas utilizado, el proceso se clasifica como MIG (gas inerte, como argón) o MAG (gas activo, como una mezcla de dióxido de carbono y argón). Este procedimiento se caracteriza por su alta productividad y versatilidad, permitiendo la deposición de material en todas las posiciones de soldadura a velocidades altas. Es especialmente adecuado para la unión de materiales con espesores delgados a medios, como estructuras de acero al carbono y aleaciones de aluminio, y se utiliza frecuentemente en aplicaciones donde se requiere una alta tasa de deposición y facilidad de operación manual.[17]

1.5.3 Soldadura por arco sumergido (SAW)

La soldadura SAW (por sus siglas en inglés Submerged Arc Welding) se basa en la fusión de un electrodo consumible continuo, macizo o tubular, bajo una capa de fundente granular aplicado de manera separada. Este fundente durante la soldadura forma una escoria protectora cuya función es cubrir el baño de fusión, aislándolo del ambiente para contribuir con la estabilidad del arco y calidad del cordón.

Este proceso permite la deposición de grandes volúmenes de material de aporte con alta calidad, alcanzando tasas de deposición de hasta 50 kg/h. Este sistema puede operar de forma completamente automática, lo cual resulta ideal para entornos de producción en serie con altos requerimientos de rendimiento. También es posible su implementación en modalidad semiautomática, mediante el uso de una pistola manual similar a la empleada en procesos MIG/MAG, aunque utilizando electrodos de mayor diámetro (hasta 2,4 mm). En lugar de un gas protector, el proceso emplea un fundente granular (flux) que se suministra desde un depósito presurizado, proporcionando la protección necesaria para el arco y el baño de fusión. Como electrodos, pueden emplearse uno o varios alambres simultáneos, así como flejes o bandas metálicas, dependiendo de los requerimientos específicos de la unión. [18]

1.6 Juntas soldadas

Una junta soldada se define como la conexión entre dos o más piezas de material mediante un proceso de soldadura, en el cual las piezas se unen para formar una unión permanente. La junta puede ser diseñada para cumplir con requisitos específicos de resistencia, hermeticidad o funcionalidad dependiendo de su aplicación.

La American Welding Society (AWS) presenta 5 tipos de juntas: de solape, de borde, en T, y de esquina [15]

1.6.1 Junta soldada en T

Una junta en T se presenta cuando dos elementos se unen formando un ángulo recto (90°), tal como se observa en la Figura 8. En esta disposición, el borde de una de las piezas se posiciona perpendicularmente sobre la superficie plana de la otra, generando una geometría similar a la letra “T”. Este tipo de junta presentan una elevada resistencia mecánica, particularmente cuando se aplica soldadura en ambos lados de la unión.[19]

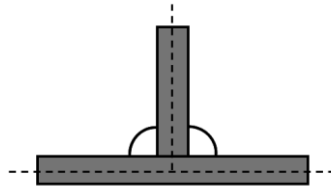


Figura 8. Junta soldada en T

1.7 Soldadura robotizada

1.7.1 Robot

Un robot es un sistema mecánico automatizado y programable, diseñado para ejecutar tareas específicas de forma autónoma o semi-autónoma, sin intervención humana directa durante su operación. [20]

1.7.2 Grados de libertad

Los grados de libertad representan la cantidad de movimientos independientes que un robot es capaz de realizar en un espacio tridimensional, ya sea mediante desplazamientos lineales o rotacionales asociados a una junta o articulación como se observa en la Figura 9.

El número de grados de libertad determina su nivel de accesibilidad y la capacidad para posicionar y orientar con precisión su herramienta. En el ámbito de la robótica, este concepto se emplea para describir las capacidades motrices de robots y androides, y se encuentra directamente relacionado con la cantidad de articulaciones y ejes de movimiento presentes en su estructura.

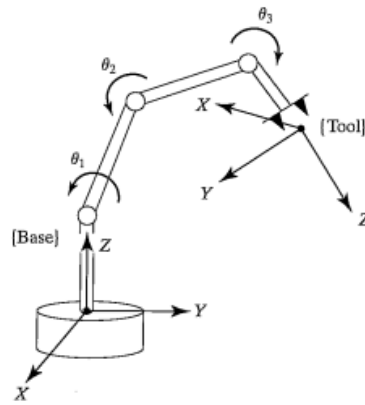


Figura 9. Representación de ejes y articulaciones para los grados de libertad [21]

1.7.3 Soldadura robotizada

La soldadura robotizada consiste en la automatización del proceso de unión mediante el uso de robots industriales de soldadura o robots colaborativos. La elección del tipo de robot dependerá de diversos factores, como el tiempo de ciclo, el volumen y cantidad de cordones de soldadura, las características del producto a unir y el peso de las herramientas involucradas, entre otros. Este proceso se lleva a cabo, en la mayoría de los casos, de forma totalmente automática, por lo que la intervención del operario es mínima. Los sistemas utilizados suelen tener una configuración similar a un brazo humano, pero con una mayor cantidad de ejes de rotación, lo que les permite alcanzar altos niveles de precisión y operar de manera continua durante extensas jornadas de trabajo.[22]

1.7.4 Tipos de soldadura con Robot soldador

En la industria actual la mayoría de los procesos de soldadura se han logrado adaptar a procesos robotizados, esto debido a las ventajas que representa sobre el producto final. Los procesos más comunes realizados con robot soldador son:

Soldadura por puntos es un proceso que combina presión, intensidad eléctrica, temperatura y tiempo para lograr la unión de piezas metálicas. Esta técnica se basa en la aplicación de corriente eléctrica a través de electrodos, generando una temperatura cercana al punto de fusión en la zona de contacto. Simultáneamente, se ejerce presión sobre las piezas para consolidar la soldadura. Es especialmente utilizada en la unión de chapas metálicas delgadas.

Soldadura por arco: La generación de calor se da mediante un arco eléctrico establecido entre un electrodo y las piezas, provocando la fusión localizada del material base y, en muchos casos, del material de aporte, para formar la unión permanente. [23]

1.8 Perfil de acero estructural

1.8.1 Acero estructural

Los aceros estructurales son un conjunto de materiales de acero especialmente desarrollados para emplearse en la construcción de diversas estructuras, edificios y componentes de maquinaria industrial. También conocido como acero de construcción, se caracteriza por contar con una forma, composición química y resistencia específicas que lo hacen apto para estos fines. Su producción y almacenamiento están regidos por normas específicas.

El acero estructural se obtiene a partir de una aleación de hierro y carbono, a la que se incorporan pequeñas proporciones de elementos como azufre, fósforo, magnesio, silicio. Estos componentes adicionales modifican la microestructura del acero y le confieren propiedades mecánicas específicas según su aplicación. Un mayor contenido de carbono en la aleación incrementa la resistencia del material, aunque reduce su ductilidad, lo que implica una menor capacidad de deformación plástica antes de fracturarse. Por lo general el acero estructural llega a tener como máximo cantidades de carbono de hasta 2.1% de su peso. [24]

Uno de los aceros estructurales más utilizados es el A36, recibe esta designación según la norma ASTM y dentro de su composición el contenido de carbono es de máximo 0.29%, además, posee pequeñas cantidades de minerales como magnesio (Máx. 1.2%) y silicio (Máx. 0.4%) para mejorar sus propiedades.

En la Tabla 1, se presenta las propiedades mecánicas más importantes dentro del diseño de estructuras que se encuentran en la ficha técnica del acero A36. [25]

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero A36

| Propiedad mecánica | | | Observaciones |
|----------------------------------|-------------|-----------|-------------------------------|
| Límite elástico | 250 MPa | 36 ksi | Espesores \leq 200mm |
| | 220 MPa | 32 ksi | Espesores de placas $>$ 200mm |
| Módulo de elasticidad | 200 GPa | 29000 ksi | |
| Resistencia a la tracción | 400-550 Mpa | 58-80 ksi | |

1.8.2 Perfil de acero

Un perfil de acero es un elemento estructural que se usa principalmente como viga, su denominación depende de la forma que presenta que puede ser: H, U, T, I, C, etc.

Además, hay otros aspectos como sus propiedades mecánicas, composición, precio y aplicación que son consideradas para la selección del perfil.

1.8.3 Perfiles de acero tipo "I"

También conocido como perfil doble T, es uno de los perfiles más utilizados en la construcción como elemento de viga. Su forma de la letra I le brinda como principal característica una muy buena resistencia a la flexión y capacidad de carga. [26]

1.8.3.1 Características dimensionales.

En la Figura 10 se presenta una nomenclatura general para reconocer los perfiles de acero tipo "I".

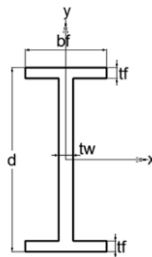


Figura 10. Nomenclatura de las dimensiones del perfil de acero tipo "I". [27]

Donde:

- d : Peralte
- bf : Ancho de base o patin
- tf : Espesor de la base o patin
- tw : Espesor del alma

En la Figura 11 se observa las tres clases de perfiles de acero tipo "I" que existen dependiendo de sus dimensiones: IPN, IPE, HEB;

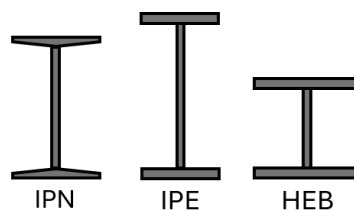


Figura 11. Clases de perfiles de acero tipo "I".

La principal diferencia en las tres clases de perfiles está en las alas del patín, tanto los perfiles IPN y los perfiles IPE tienen un patín más corto que los perfiles HEB. Los perfiles que se usan

más comúnmente como vigas en las construcciones metálicas son las vigas tipo IPE, debido que por su forma son las que mayor rendimiento prestan.

1.8.4 Perfiles de acero tipo “I” comerciales

Para tener una referencia de los perfiles de acero tipo “I” disponible en el mercado se puede guiar de los catálogos de los distribuidores, en la Figura 12 se tiene un ejemplo en el que además de las dimensiones, también presenta características técnicas y propiedades mecánicas.

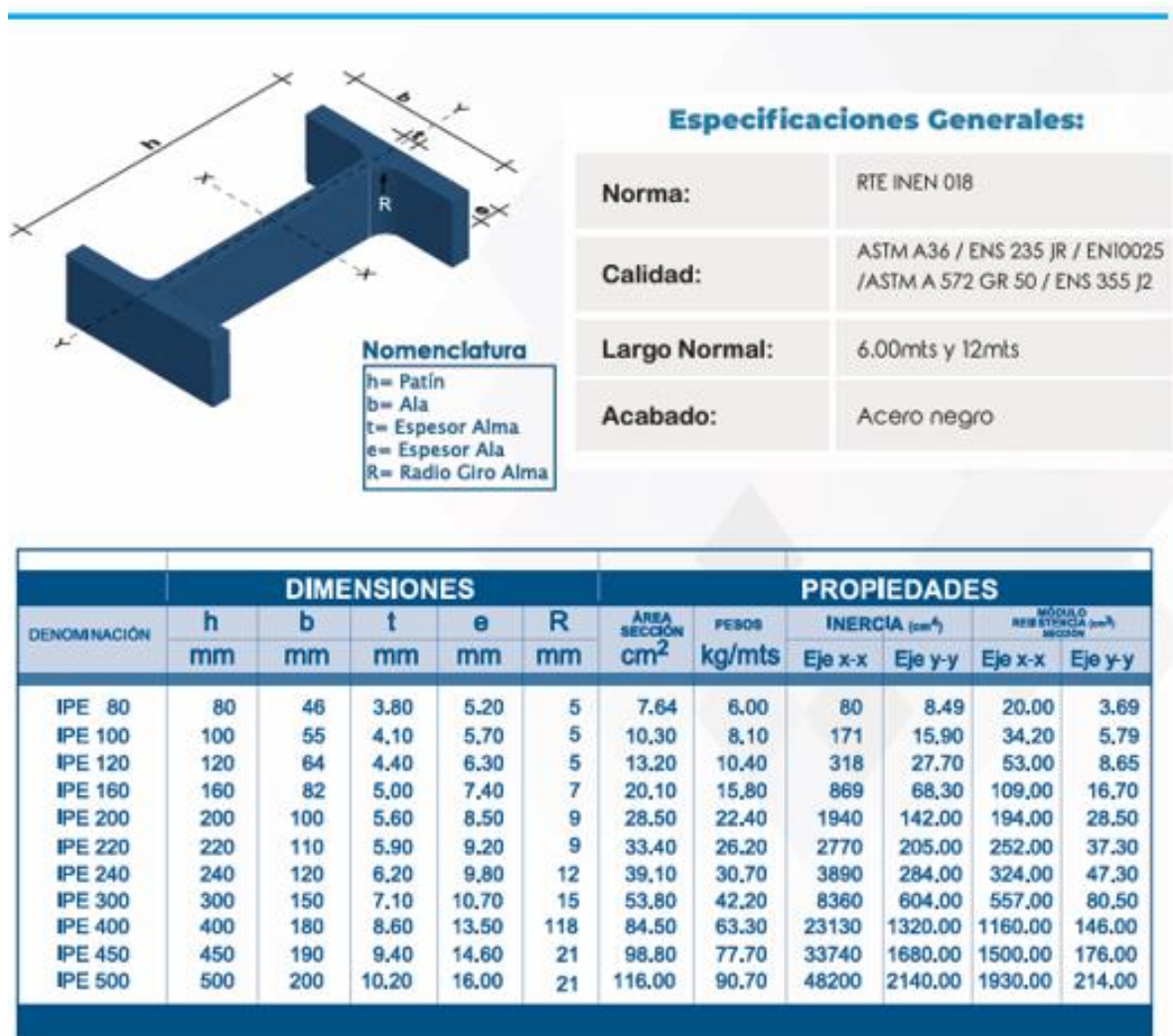


Figura 12. Catálogo DIPAC de perfiles IPE. [26]

1.8.5 Métodos de construcción

1.8.5.1 Perfiles de acero tipo “I” estandarizados.

Para la fabricación de estos perfiles a nivel industrial se realiza por dos procesos de soldadura. Primero se realiza una soldadura de puntos, es decir se colocan los flejes estandarizados en las

mesas se sujeción y mediante soldadura MIG se realiza un primer punteo de los perfiles para asegurar su posición.

Una vez terminado el proceso de punteo se sujeta a una máquina rotatoria que suelda los flejes en sus dos posiciones, para este proceso se usa soldadura por arco sumergido (SAW), a través de otra máquina que va controlando el avance y caída del flux para la soldadura, al terminar de realizar los cordones de soldadura el perfil gira 180 grados para realizar nuevamente la soldadura por arco sumergido completando las cuatro líneas de soldadura que necesita un fleje. Finalmente se pasa por una cámara de chorros a presión que limpian las líneas de soldadura. [28]

Todo este proceso es verificado a través del “Código de Soldadura Estructural – Acero” de la American Welding Society (AWS) y para el caso de Ecuador se toma consideraciones específicas del Código: Soldadura de Estructuras de Acero, del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). [29]

1.8.5.2 Perfiles de acero tipo “I” no estandarizados.

La construcción de perfiles tipo “I” no estandarizados, parte de la unión de flejes de dimensiones que se requieran, estos si se encuentran en el mercado. Este proceso se lo realiza manualmente en talleres de armado y montaje de estructuras metálicas. Del mismo modo parte de una soldadura por puntos para fijar los flejes que se van a soldar.

Una vez que se tenga fijadas las piezas se realiza una soldadura con cordones de longitudes que varían de acuerdo con el criterio del soldador, generalmente los cordones de soldadura van entre los 25 y 50 centímetros con una distancia entre cordón de la mitad de la longitud del cordón. Este concepto solamente es empírico y depende del soldador o técnico encargado de la fabricación del perfil. [30]

Para las dos partes del proceso, tanto punteo como soldadura de cordones se usa en su mayoría soldadura MIG, aunque si hay ocasiones que se realiza con soldadura por arco con electrodo metálico revestido (SMAW) pero para este caso no se puede controlar totalmente las longitudes del cordón por lo que están dependen de material de aporte.

Capítulo II

2 Análisis de alternativas

2.1 Sistema de calificación para Alternativas del Método de Soldadura

La Tabla 2 muestra los criterios para la selección del método de soldadura que se va a usar, considerando parámetros que son importantes para la fabricación de perfiles de acero tipo “I”.

Tabla 2. Sistema de calificación para Alternativas del Método de Soldadura

| Parámetros | Equivalencia de indicadores | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|----------------|--------------|
| | 1-3 | 4-7 | 8-10 |
| Continuidad del cordón de soldadura | Baja | Mediana | Alta |
| Tamaño del equipo | Nada compacto | Compacto | Muy compacto |
| Manejo de posiciones de soldadura | Bajo | Medio | Alto |
| Velocidad del proceso | Baja | Media | Alta |
| Precio | Alto costo | No tan costoso | Bajo costo |
| Acabado | Malo | Bueno | Muy bueno |

2.2 Análisis de alternativas del método de soldadura

2.2.1 Soldadura por arco de metal blindado (SMAW) (Alternativa 1)



Figura 13. Representación sistema de soldadura SMAW [31]

Ventajas:

- *Versatilidad de materiales:* Este proceso puede aplicarse a la unión de una amplia variedad de materiales, como aceros al carbono, aceros inoxidables, y algunos metales no ferrosos.

- *Equipo simple y económico:* El equipo es relativamente sencillo, portátil y menos costoso en comparación con otros procesos de soldadura como MIG o TIG.
- *Uso en exteriores:* Es adecuado para soldar en condiciones al aire libre, ya que no necesita gas de protección externo, lo cual es ventajoso en ambientes con viento.
- *Aplicable en posiciones difíciles:* La técnica es flexible y permite soldar en todas las posiciones (plana, horizontal, vertical, sobre cabeza).
- *Preparación mínima de superficies:* Requiere menos limpieza o preparación de la superficie en comparación con otros métodos, lo que ahorra tiempo en algunas aplicaciones.
- *Alto control del operador:* La habilidad manual permite controlar mejor el tamaño, la forma y la velocidad de avance del cordón, lo que ayuda a hacer ajustes en el momento.

Desventajas:

- *Velocidad de soldadura baja:* Es un proceso más lento comparado con métodos automáticos o semiautomáticos como MIG y FCAW.
- *Cambios de electrodo frecuentes:* Los electrodos revestidos tienen una longitud limitada, lo cual requiere detener el proceso de soldadura para cambiarlos con frecuencia, reduciendo la eficiencia.
- *Mayor generación de humo y salpicaduras:* La soldadura SMAW puede producir una mayor cantidad de humo y salpicaduras, lo que puede afectar la calidad del ambiente de trabajo y requerir más limpieza.
- *Dependiente del operador:* la calidad de la soldadura va de la mano con la habilidad y experiencia del soldador, lo que puede resultar en inconsistencias si el operador no tiene la capacitación adecuada.
- *Limitaciones en materiales delgados:* No es ideal para soldar materiales delgados, ya que el arco puede perforarlos o deformarlos.
- *Escoria residual:* Al terminar la soldadura se produce una capa de escoria que requiere tiempo adicional para ser retirada y puede afectar la apariencia y calidad si no se elimina completamente. [31]

2.2.2 Soldadura MIG (Alternativa 2)



Figura 14. Representación sistema de soldadura MIG [31]

Ventajas:

- *Alta velocidad de soldadura:* La alimentación continua del alambre permite realizar la soldadura de manera rápida, lo que mejora el tiempo de trabajo.
- *Facilidad de uso:* Este proceso es menos complejo en comparación con otros métodos, lo cual la hace adecuada para soldadores principiantes y para trabajos que requieren menos habilidades avanzadas.
- *Cordones de soldadura limpios:* Produce cordones de soldadura uniformes, suaves y estéticamente agradables, con mínimas salpicaduras y escoria.
- *Versatilidad de materiales:* Se puede utilizar para soldar una gran variedad de materiales, incluyendo acero al carbono, aluminio, acero inoxidable y otros metales no ferrosos.
- *Mayor productividad:* Al no necesitar detenerse para cambiar electrodos, se reduce el tiempo de interrupción en comparación con procesos como la soldadura SMAW.
- *Menos postratamiento:* Debido a la baja generación de escoria, la soldadura MIG requiere menos limpieza después de la soldadura, lo que ahorra tiempo en el acabado.

Desventajas:

- *Necesidad de gas protector:* La soldadura MIG requiere un gas protector, lo que limita su uso en exteriores o en lugares con viento fuerte, ya que el gas puede dispersarse.
- *Equipo más costoso y menos portátil:* El equipo MIG es generalmente más caro y menos portátil que el de soldadura SMAW, ya que incluye un sistema de alimentación de alambre y cilindros de gas.
- *No ideal para posición sobre cabeza:* La soldadura MIG es menos adecuada ya que la alimentación continua de alambre puede dificultar el control en esta posición.

- *Materiales limitados en grosor:* Aunque puede trabajar con una amplia gama de materiales, es menos efectiva para materiales extremadamente delgados o gruesos sin una configuración específica.
- *Mayor riesgo de defectos de porosidad:* Si el gas protector no cubre adecuadamente el área de soldadura, pueden aparecer defectos de porosidad en el cordón, lo que afecta la calidad de la soldadura. [31]

2.2.3 Soldadura por arco sumergido (Alternativa 3)



Figura 15. Representación sistema de soldadura por arco sumergido [32]

Ventajas:

- *Alta eficiencia de deposición:* La soldadura SAW tiene una alta tasa de deposición de material, lo que permite soldar grandes cantidades de material en un corto tiempo, mejorando la productividad.
- *Calidad y limpieza del cordón:* La capa de fundente protege el arco y evita salpicaduras y formación de escoria. Esto resulta en un cordón de soldadura limpio y estéticamente uniforme, con mínima necesidad de tratamiento posterior.
- *Profunda penetración:* SAW permite una excelente penetración, lo que lo hace ideal para soldaduras en materiales gruesos, como en la fabricación de estructuras de acero y tuberías.
- *Bajo nivel de humo y radiación:* El fundente cubre completamente el arco, lo que reduce significativamente la exposición a humos, radiación ultravioleta e infrarroja, creando un ambiente de trabajo más seguro.
- *Eficiencia energética:* El proceso es eficiente en términos de consumo de energía y permite soldar a corrientes altas sin comprometer la calidad de la soldadura.

Desventajas:

- *Limitado a posiciones planas o horizontales:* SAW es difícil de aplicar en posiciones verticales o sobre cabeza, ya que el fundente y el metal fundido tienden a escurrirse.
- *Aplicación limitada a materiales gruesos:* Es menos eficaz en materiales delgados, ya que la penetración profunda puede perforarlos o causar deformaciones.
- *Equipo voluminoso y menos portátil:* El equipo de SAW es pesado y requiere grandes cantidades de fundente, lo que hace que sea menos práctico para aplicaciones en campo.
- *Necesidad de remover el fundente no fundido:* Una vez terminado el proceso, es necesario recolectar y reutilizar o desechar el fundente no fundido, lo que puede requerir equipo adicional y más tiempo.
- *Costo inicial elevado:* Los equipos y materiales, como el alambre y el fundente especializado, pueden tener un costo inicial alto, lo cual es una inversión significativa.

[32]

2.2.4 Cuadro comparativo de selección de alternativas

En la Tabla 3 se realiza una evaluación de las alternativas de los métodos de soldadura para seleccionar la opción que mejor se adapte al diseño.

Tabla 3. Cuadro comparativo de selección de alternativas

| N° | Parámetros | Alternativas | | |
|--------------------|-------------------------------------|--------------|------|------|
| | | SMAW | MIG | SAW |
| 1 | Continuidad del cordón de soldadura | 2 | 8 | 10 |
| 2 | Tamaño del equipo | 10 | 7 | 3 |
| 3 | Manejo de posiciones de soldadura | 10 | 7 | 1 |
| 4 | Velocidad del proceso | 5 | 9 | 7 |
| 5 | Precio | 8 | 6 | 2 |
| 6 | Acabado | 4 | 8 | 10 |
| Sumatoria | | 39 | 45 | 33 |
| Índice porcentual | | 0.65 | 0.75 | 0.55 |
| Orden de selección | | 65% | 75% | 55% |

Para el sistema de soldadura propuesta se evidencia en la Tabla 3 que el método de soldadura seleccionado es el MIG principalmente porque se puede realizar soldaduras continuas sin tener equipos tan robustos y costosos.

El tipo de soldadura MIG permite realizar un cordón soldadura continua, sin restricciones de la longitud del cordón. Sin embargo, para lograrlo se tiene dos consideraciones respecto a la configuración de los parámetros que debe tener la soldadura para el control de la temperatura según el documento de la AWS: “Welding Handbook: Science & Technology”. [33]

- **La temperatura máxima** que soportan, sin que se vean afectadas sus propiedades mecánicas, las aleaciones de acero con bajo contenido de carbono es de 732 °C. De este modo propone en la Figura 16, una curva de enfriamiento que sirve para determinar el tiempo optimo que debería descansar la junta para que se pueda volver a someter al calor de soldadura.

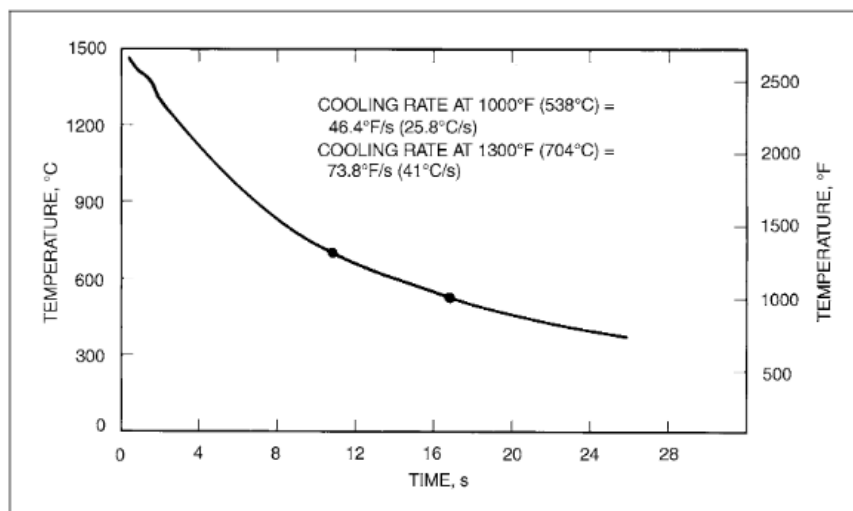


Figura 16. Curva de enfriamiento para aceros de bajo contenido de carbono. [33]

Así pues, si la soldadura llega a una temperatura de 732 °C debería descansar hasta llegar por lo menos a los 300°C, que con un promedio de enfriamiento de 41°C/s equivaldría a:

$$\text{Tiempo de enfriamiento} = \frac{732 - 300}{41}$$

$$\text{Tiempo de enfriamiento} = 10.54 \text{ s}$$

- **El aporte de calor**, para que no se produzcan deformaciones no debe exceder los 1.5 kJ/mm. Paralo cual la normativa AWS A5.18 establece que:

$$heat\ input = \frac{V * A * 60}{Travel\ Speed * 1000}$$

donde:

V: Voltaje entrada

A: Corriente de entrada

Travel Speed: Velocidad de avance de la antorcha [*mm/min*] [34]

La velocidad de avance y el amperaje se seleccionan de acuerdo con el diámetro del hilo como se observa en la Figura 17.

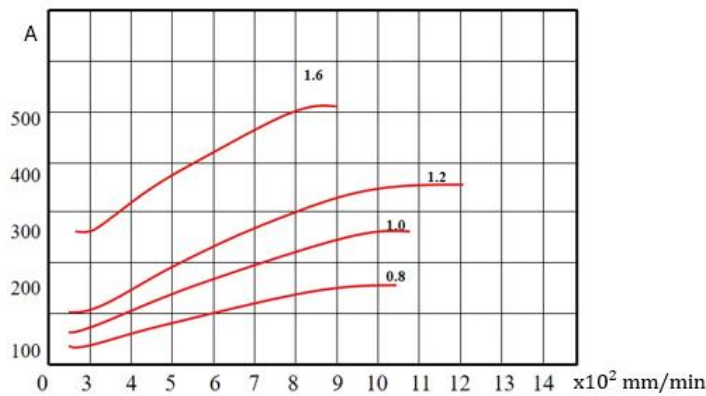


Figura 17. Relación velocidad de avance y corriente de soldadura MIG. [35]

Para obtener el voltaje de soldadura se selecciona la corriente y se aplica la formula:

$$V_{soldadura} = 0.05 * A + 16$$

Mientras esas dos consideraciones se cumplan la soldadura puede realizarse de manera continua. También, hay configuraciones del gas protector y diferentes tipos de electrodos que pueden ayudar a que se cumpla con el requerimiento de soldadura. [34]

Modo de transferencia. Spray transfer es el modo que recomienda la norma para aceros al carbono, y se obtiene con una mezcla de dióxido de carbono con un máximo de 15%. Este modo de transferencia permite trabajar con electrodos de hasta 1.6 mm con corrientes elevadas y con una velocidad de depósito del material de aporte mayor.

Electrodos. De los distintos tipos electrodos que existen, los electrodos ER70S-7 son ideales para soldadura de una sola pasada y son lo que manejan mayores rangos de corriente y velocidad. [34]

2.3 Sistema de calificación para alternativas para el tipo de robot soldador

La Tabla 4 muestra los parámetros que serán tomados en cuenta para la selección del tipo de robot soldador.

Tabla 4. Sistema de calificación para Alternativas para el tipo de robot soldador

| Parámetros | Equivalencia de indicadores | | |
|----------------------------|-----------------------------|-------|-----------|
| | 1-3 | 4-7 | 8-10 |
| Flexibilidad de movimiento | Bajo | Medio | Alto |
| Velocidad de movimiento | Baja | Media | Alta |
| Control de la velocidad | Malo | Bueno | Muy bueno |
| Precisión | Media | buena | Muy buena |
| Control de trayectoria | Medio | Bueno | Muy bueno |

2.4 Análisis de alternativas para tipo de robot soldador

2.4.1 Robots Cartesianos (Alternativa 1)

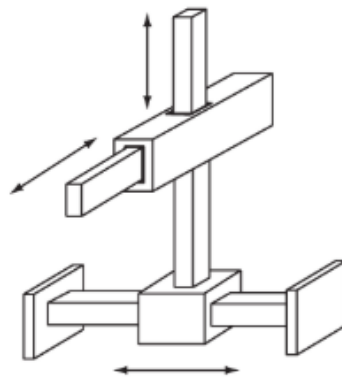


Figura 18. Esquema de un robot cartesiano [36]

Ventajas:

- *Alta precisión y repetibilidad:* Gracias a sus movimientos lineales en cada eje, los robots cartesianos ofrecen una precisión y repetibilidad altas, lo cual es ideal para tareas como el ensamblaje, el corte, la inspección y el manejo de materiales.

- *Estructura simple y fácil de programar:* Su estructura es sencilla y su programación suele ser más fácil en comparación con robots de otros tipos, como los robots de articulación, lo que facilita su uso y mantenimiento.
- *Costo relativamente bajo:* Los robots cartesianos suelen ser más económicos que otros tipos de robots, tanto en costos de adquisición como en costos de mantenimiento, ya que su estructura es menos compleja.
- *Mayor rigidez:* La estructura de pórtico permite que el robot soporte cargas pesadas con estabilidad, lo cual es ideal para aplicaciones de precisión y manipulación de cargas.
- *Espacio de trabajo rectangular:* Al operar en un sistema de coordenadas cartesianas, estos robots pueden cubrir espacios de trabajo amplios y rectangulares, lo que los hace útiles para trabajos en áreas de producción y almacenamiento amplias.

Desventajas:

- *Limitación en la variedad de movimientos:* Solo pueden moverse en tres ejes lineales, lo que limita su capacidad para realizar movimientos complejos o en ángulos, a diferencia de robots de brazo articulado o robots SCARA.
- *Espacio requerido para instalación:* Su estructura suele ser grande y ocupa más espacio que otros tipos de robots, lo que puede ser un problema en instalaciones pequeñas o en plantas con espacio limitado.
- *Dificultad para adaptarse a diferentes tareas:* Son ideales para tareas repetitivas en entornos específicos, pero su flexibilidad es limitada. Cambiar a una tarea diferente o modificar la aplicación puede requerir rediseño del sistema.
- *Velocidad limitada:* Aunque son precisos, la velocidad de los robots cartesianos puede ser inferior a la de otros robots, especialmente en aplicaciones de alta velocidad como el ensamblaje rápido o el pick-and-place.
- *Menor capacidad de alcance:* Su alcance depende del tamaño del pórtico y de la estructura en cada eje, lo cual puede ser una limitación en aplicaciones que requieren llegar a puntos complejos o lejanos dentro del espacio de trabajo.
- *Costos de instalación iniciales elevados:* Aunque los robots cartesianos son económicos en términos de operación, los costos iniciales de instalación y diseño del pórtico pueden ser altos, especialmente si se requiere una estructura personalizada. [37]

2.4.2 Robot SCARA (Alternativa 2)

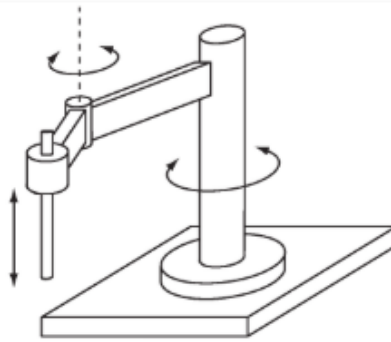


Figura 19. Esquema de un robot SCARA [36]

Ventajas:

- *Alta velocidad y precisión:* Los robots SCARA están diseñados para realizar movimientos horizontales rápidos, por lo que son ideales para tareas de alta velocidad, como ensamblaje y pick-and-place, con una gran precisión en sus movimientos.
- *Coste relativamente bajo:* En comparación con otros tipos de robots, como los de brazo articulado de seis ejes, los robots SCARA suelen ser más económicos, lo que los hace una opción viable para empresas que buscan automatizar tareas específicas sin una gran inversión.
- *Espacio de trabajo reducido:* Los robots SCARA tienen un diseño compacto y no requieren de mucho espacio, lo que permite integrarlos fácilmente en entornos de fabricación con limitaciones de espacio.

Desventajas:

- *Movimiento limitado:* Los robots SCARA tienen un rango de movimiento restringido al plano horizontal, por lo que no son ideales para tareas que requieren flexibilidad en todos los ejes, como manipulación tridimensional o trabajos fuera de su plano de acción.
- *Poca adaptabilidad a tareas complejas:* Están diseñados para tareas específicas y repetitivas, y su flexibilidad es limitada. Esto significa que pueden no ser adecuados para aplicaciones que requieran adaptabilidad o movimientos complejos.
- *Menor versatilidad en aplicaciones fuera del ensamblaje:* Los robots SCARA están optimizados para tareas de ensamblaje y pick-and-place. En aplicaciones que requieren más variedad de movimientos o que se desarrollan en múltiples planos, su utilidad es limitada.

- *Difícil de reubicar para tareas distintas:* Debido a su especialización en un área de trabajo específica, adaptarlos o reubicarlos en tareas muy diferentes puede ser complicado y poco eficiente en comparación con otros robots más versátiles. [38]

2.4.3 Robot antropomórfico (Alternativa 3)

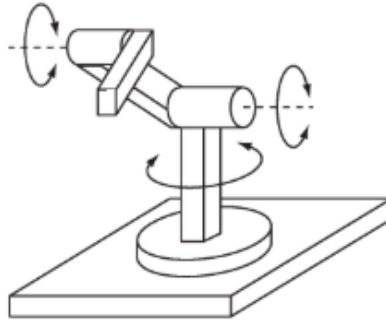


Figura 20. Esquema de un robot antropomórfico de 3 ejes [36]

Ventajas:

- *Gran flexibilidad de movimiento:* Estos robots pueden moverse en cualquier dirección, lo que les permite realizar tareas complejas en entornos tridimensionales. Son ideales para aplicaciones que requieren movimientos detallados o en ángulos difíciles, como el ensamblaje, soldadura y pintura.
- *Adaptabilidad a múltiples tareas:* Los robots antropomórficos pueden adaptarse a una amplia variedad de aplicaciones, desde manipulación y paletización hasta ensamblaje y corte. Su versatilidad los convierte en una buena inversión para empresas que requieren flexibilidad en la línea de producción.
- *Capacidad de trabajar en espacios confinados:* La estructura articulada permite a estos robots acceder a espacios estrechos o confinados, alcanzando posiciones complejas y zonas de difícil acceso.
- *Alta precisión y repetitividad:* Estos robots ofrecen una excelente precisión y repetitividad en sus movimientos, lo cual es esencial en tareas de alta precisión, como el ensamblaje electrónico o la inspección de calidad.

Desventajas:

- *Costo elevado:* Suelen tener un precio más alto que otros tipos de robots, como los robots cartesianos o SCARA, debido a su complejidad y movimientos

- *Mayor complejidad de programación y control:* Su capacidad de moverse en múltiples direcciones y su estructura articulada hacen que la programación sea más compleja, ya que requiere conocimientos avanzados para aprovechar al máximo su potencial.
- *Mantenimiento más complejo:* La estructura articulada y los múltiples motores en cada eje aumentan la probabilidad de desgaste y fallos, lo que requiere un mantenimiento más especializado y costoso en comparación con robots.
- *Mayor espacio de instalación:* los robots antropomórficos en ambientes industriales suelen requerir más espacio en la planta de producción debido a sus movimientos amplios. Además, se necesita asegurar un área de trabajo despejada para evitar colisiones con otros equipos o personal.
- *Consumo de energía más alto:* Debido a la cantidad de motores y el control en múltiples ejes, los robots antropomórficos pueden consumir más energía que otros robots, lo cual puede aumentar los costos de operación. [39]

2.4.4 Cuadro comparativo de selección de alternativas

En la Tabla 5 se realiza una evaluación de las alternativas de los tipos de robot soldador para seleccionar la opción que mejor se adapte al diseño.

Tabla 5. Cuadro comparativo de selección de alternativas para tipo de robot soldador

| N° | Parámetros | Alternativas | | |
|--------------------|----------------------------|--------------|-------|----------------|
| | | Cartesiano | SCARA | Antropomórfico |
| 1 | Flexibilidad de movimiento | 4 | 4 | 10 |
| 2 | Velocidad de movimiento | 3 | 7 | 8 |
| 3 | Control de la velocidad | 8 | 8 | 10 |
| 4 | Precisión | 8 | 9 | 7 |
| 5 | Control de trayectoria | 8 | 5 | 10 |
| Sumatoria | | 31 | 33 | 45 |
| Índice porcentual | | 0.62 | 0.66 | 0.9 |
| Orden de selección | | 62% | 66% | 90% |

Para la selección de alternativa del robot, se ha considera al robot antropomórfico como la opción más adecuada debido a su flexibilidad de movimiento, este tipo de robot se desempeña muy bien en entornos tridimensionales y maneja una alta precisión en sus grados de libertad que es fundamental para lograr una soldadura continua.

2.5 Sistema de calificación para alternativas sobre el material de construcción

La Tabla 6 muestra los parámetros que son tomados en cuenta para la selección del material de construcción del robot soldador.

Tabla 6. Sistema de calificación para alternativas sobre el material de construcción

| Parámetros | Equivalencia de indicadores | | |
|---------------------|-----------------------------|-------|----------|
| | 1-3 | 4-7 | 8-10 |
| Costo | Alto | Medio | Bajo |
| Peso | Alto | Medio | Bajo |
| Maleabilidad | Baja | Alta | Muy Alta |
| Resistencia térmica | Baja | Media | Alta |

2.6 Análisis de alternativas sobre el material de construcción

2.6.1 *Aluminio (Alternativa 1)*

Ventajas:

- El aluminio es un metal ligero.
- Fácil mecanizado y conformado, se puede cortar, fresar, perforar con facilidad por lo que reduce los costos de fabricación y facilita el ensamble.
- Presenta una elevada resistencia a la corrosión, lo que lo hace especialmente adecuado para su uso en entornos expuestos a la intemperie.
- Excelente conductividad térmica, el aluminio es uno de los elementos más usados como disipador de calor.

Desventajas:

- Baja resistencia al desgaste por fricción.
- Pierde resistencia mecánica a temperaturas elevadas.
- Módulo de elasticidad mucho menor que el acero, no puede soportar cargas elevadas.
- El precio es mayor que el acero. [40]

2.6.2 Acero (Alternativa 2)

Ventajas:

- El costo del acero común es menor que otros metales que se usan generalmente en la industria con propiedades similares como el aluminio y el titanio.
- Alta resistencia a la tracción, compresión impacto por lo que es ideal para soportar cargas elevadas y esfuerzos continuos.
- El acero es uno de los metales que más variedad tiene en el mercado, presenta distintos tipos de aleaciones que se adaptan a cada tipo de aplicación.
- Fácil de mecanizar.

Desventajas:

- Densidad elevada, complica el montaje y movilidad de los componentes.
- Baja resistencia a la corrosión.
- Baja maleabilidad.

2.6.3 Fibra de carbono (Alternativa 3)

Ventajas:

- Su relación resistencia - peso es muy buena con relación al acero, incluso con algunas componentes adicionales supera la resistencia sin comprometer el peso.
- Es ideal para partes móviles donde se necesita velocidad o eficiencia energética.
- Buena resistencia a la corrosión.
- Alta resistencia a la temperatura. Este material tiene un coeficiente de expansión térmica casi nula, lo que garantiza alta estabilidad dimensional.

Desventajas:

- Costo demasiado elevado.
- Difícil de mecanizar, necesita herramientas especiales para cortar o perforar.
- Baja resistencia a impactos.
- Una vez dañada la pieza es complicada de reparar. [41]

2.6.4 Cuadro comparativo de selección de alternativas

En la Tabla 7 se realiza una evaluación de las alternativas del material de construcción del brazo robótico para seleccionar la opción que mejor se adapte al diseño.

Tabla 7. Cuadro comparativo de selección de alternativas para material de construcción del brazo robótico

| N° | Parámetros | Alternativas | | |
|--------------------|---------------------|--------------|-------|------------------|
| | | Aluminio | Acero | Fibra de carbono |
| 1 | Costo | 5 | 8 | 1 |
| 2 | Peso | 8 | 3 | 10 |
| 3 | Maleabilidad | 8 | 7 | 1 |
| 4 | Resistencia térmica | 5 | 5 | 9 |
| Sumatoria | | 26 | 23 | 21 |
| Índice porcentual | | 0.65 | 0.575 | 0.525 |
| Orden de selección | | 65% | 57.5% | 52.5% |

Para la selección del material de construcción del robot se busca un equilibrio entre el peso y el costo. Se descarta la opción de la fibra de carbono o alguna de sus aleaciones debido a que, a pesar de ser un material con excelentes características mecánicas, su costo es muy elevado y la tarea que va a realizar no busca tiempos de respuesta excesivamente pequeños, que es la principal razón para usar el material. Por otro lado, las aleaciones de aluminio permiten tener la relación de peso y costo perfecto, aliviana la estructura sin comprometer sus propiedades mecánicas.

La aleación con la que se realizará el diseño del brazo robótico será de aluminio 6061, que es usada mayormente en la construcción de máquinas industriales, en la Figura 21 se detallan algunas de las características mecánicas de la aleación.

| | | |
|-----------------|--|--|
| Nombre: | <input type="text" value="Aleación 6061"/> | |
| Descripción: | <input type="text"/> | |
| Origen: | <input type="text"/> | |
| Sostenibilidad: | <input type="text" value="Definido"/> | |

| Propiedad | Valor | Unidades |
|-----------------------------------|---------|-------------------|
| Módulo elástico | 69000 | N/mm ² |
| Coefficiente de Poisson | 0.33 | N/D |
| Módulo cortante | 26000 | N/mm ² |
| Densidad de masa | 2700 | kg/m ³ |
| Límite de tracción | 124.084 | N/mm ² |
| Límite de compresión | | N/mm ² |
| Límite elástico | 55.1485 | N/mm ² |
| Coefficiente de expansión térmica | 2.4e-05 | /K |

Figura 21. Características aluminio 6061

Capítulo III

3 Diseño y simulación

3.1 Diseño mecánico

3.1.1 Dimensionamiento

Considerando como punto de partida las dimensiones estándar que existen en el mercado se plantea en la Tabla 8 las medidas máximas y mínimas de los perfiles de acero tipo “I” que se podrán fabricar con el sistema de soldadura.

Tabla 8. Límites de dimensiones para perfiles de acero tipo "I" no estandarizados

| | Mínimo (mm) | Máximo (mm) |
|--------------------------|-------------|-------------|
| Longitud | 4 | 9 |
| Peralte | 100 | 400 |
| Ancho del patín | 50 | 250 |
| Espesor del patín | 3 | 20 |
| Espesor del alma | 3 | 15 |

En la Figura 22 se muestra un dimensionamiento previo con el que se logra cumplir con los requerimientos del diseño. Este dimensionamiento permite conocer las medidas aproximadas que tendrá en robot y obtener un modelo matemático. Para establecer las medidas referenciales de los elementos del sistema se considera los parámetros de construcción de perfiles de acero tipo “I” no estandarizados establecidos en la Tabla 8. Además, se considera parámetros importantes para una buena interacción humano – máquina como lo es la altura de la mesa de trabajo.

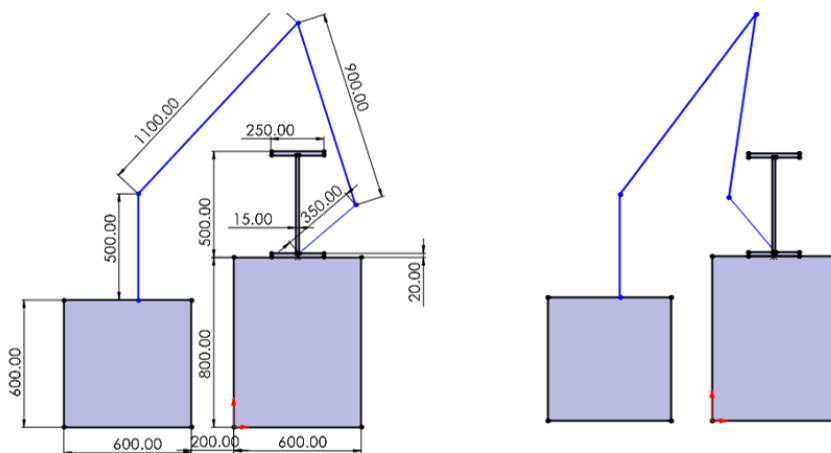


Figura 22. Dimensionamiento del sistema de soldadura

3.1.2 Diseño de las piezas

A partir del dimensionamiento del robot se diseñan las piezas y la mesa de sujeción, dando como resultado un primer ensamble como se muestra en la Figura 23.

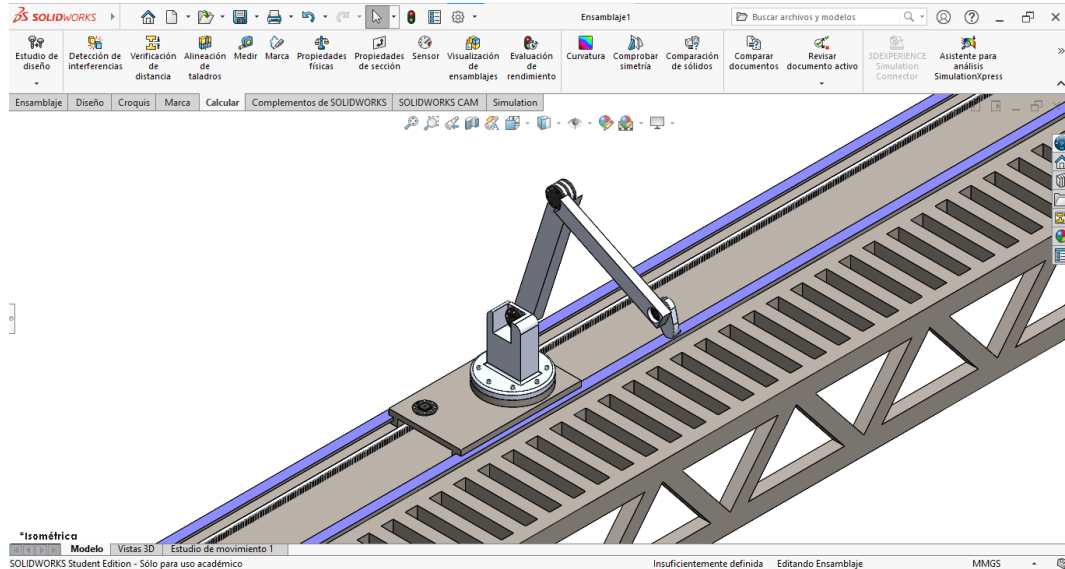


Figura 23. Ensamble sistema de soldadura.

3.1.3 Cinemática directa

3.1.3.1 Parámetros de Denavit–Hartenberg

La parte que tiene movimiento del sistema de soldadora es el brazo robótico, de modo que en esos elementos se realiza el análisis para obtener los parámetros de Denavit–Hartenberg.

Como primer paso se reconoce los sistemas de coordenadas, las distancias y las rotaciones que tendrá el robot antropomórfico, así, se destaca que tiene 4 grados de libertad, 3 grados de rotación y uno de traslación como se observa en la Figura 24.

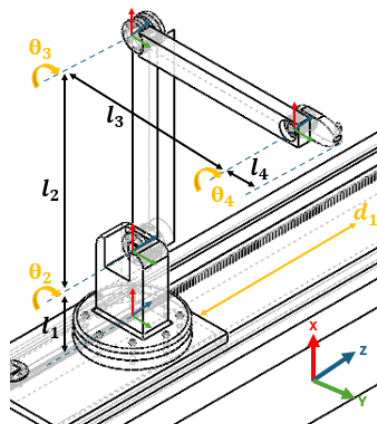


Figura 24. Sistema de coordenadas móviles

Los parámetros de Denavit–Hartenberg se colocan en la Tabla 9, esta distribución permite ordenar los datos y obtener las matrices de transformación a las que responde cada una de las articulaciones del robot

Tabla 9. Parámetros de Denavit-Hartenberg

| No | z | | x | |
|----|------------|-------|-------|----------|
| | θ | d | a | α |
| 1 | 0 | d_1 | l_1 | 0 |
| 2 | θ_2 | 0 | l_2 | 0 |
| 3 | θ_3 | 0 | l_3 | 0 |
| 4 | θ_3 | 0 | l_4 | 0 |

Matrices de transformación

Matriz A_0^1

La matriz A_0^1 da como resultado la posición del punto 1 con respecto al origen (punto 0) como se observa en la Figura 25.

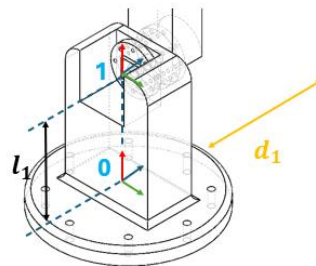


Figura 25. Puntos de translación 0-1

El movimiento representa dos traslaciones; una con respecto al eje x y otra al eje z, de modo que la matriz da como resultado:

$$A_0^1 = T(z, d_1) * T(x, l_1)$$

$$A_0^1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_0^1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Matriz A_1^2

La matriz A_1^2 da como resultado la posición del punto 2 con respecto al punto 1 como se observa en la Figura 26.

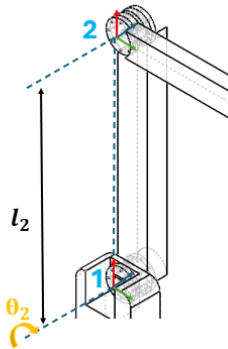


Figura 26. Puntos de traslación 1-2

El movimiento representa una traslación y una rotación, de modo que la matriz da como resultado:

$$A_1^2 = R(z, \theta_2) * T(x, l_2)$$

$$A_1^2 = \begin{pmatrix} C(\theta_2) & -S(\theta_2) & 0 & 0 \\ S(\theta_2) & C(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 S(\theta_2) \\ 0 & 1 & 0 & l_2 C(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_1^2 = \begin{pmatrix} C(\theta_2) & -S(\theta_2) & 0 & l_2 S(\theta_2) \\ S(\theta_2) & C(\theta_2) & 0 & l_2 C(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Matriz A_2^3

La matriz A_2^3 da como resultado la posición del punto 3 con respecto al punto 2 como se observa en la Figura 27.

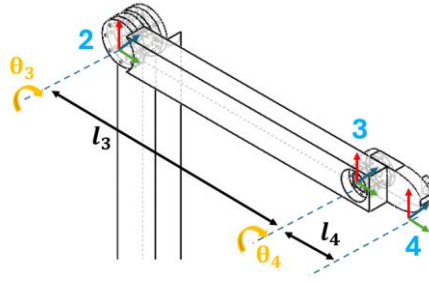


Figura 27. Puntos de traslación 2-3-4

El movimiento representa una traslación y una rotación, de modo que la matriz da como resultado:

$$A_2^3 = R(z, \theta_3) * T(x, l_3)$$

$$A_2^3 = \begin{pmatrix} C(\theta_3) & -S(\theta_3) & 0 & 0 \\ S(\theta_3) & C(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 S(\theta_3) \\ 0 & 1 & 0 & l_3 C(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_2^3 = \begin{pmatrix} C(\theta_3) & -S(\theta_3) & 0 & l_3 S(\theta_3) \\ S(\theta_3) & C(\theta_3) & 0 & l_3 C(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Matriz A_3^4

La matriz A_3^4 da como resultado la posición final (punto 4) con respecto al punto 3 como se observa en la Figura 27.

El movimiento representa una traslación y una rotación, de modo que la matriz da como resultado:

$$A_3^4 = R(z, \theta_4) * T(x, l_4)$$

$$A_3^4 = \begin{pmatrix} C(\theta_4) & -S(\theta_4) & 0 & 0 \\ S(\theta_4) & C(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_4 S(\theta_4) \\ 0 & 1 & 0 & l_4 C(\theta_4) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_3^4 = \begin{pmatrix} C(\theta_4) & -S(\theta_4) & 0 & l_4 S(\theta_4) \\ S(\theta_4) & C(\theta_4) & 0 & l_4 C(\theta_4) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Matriz A_0^4

La matriz A_0^4 es la que representa la posición y orientación final del eje con respecto al origen y es el resultado de la multiplicación de las matrices de transformación en cada punto.

$$A_0^4 = A_0^1 * A_1^2 * A_2^3 * A_3^4$$

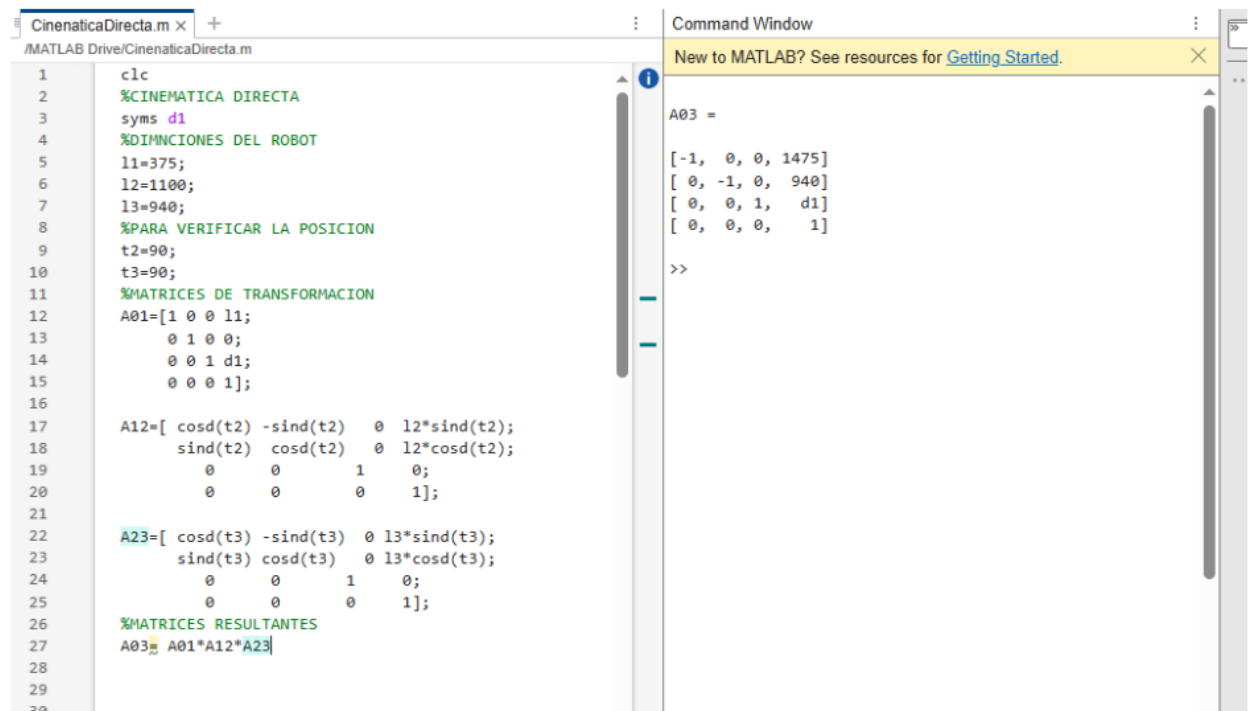
$$A_0^4 = \begin{pmatrix} C(\theta_4) & -S(\theta_4) & 0 & l_4 S(\theta_4) \\ S(\theta_4) & C(\theta_4) & 0 & l_4 C(\theta_4) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Comprobación

La cinemática directa permite conocer la posición final de un punto, conocido los valores de posición de los elementos. Por lo tanto, se asignan los siguientes valores de prueba:

Prueba 1

Para $\theta_2 = 90, \theta_3 = 90, d = 0$, se obtiene en la Figura 28:



```
CinematicaDirecta.m x +
/MATLAB Drive/CinematicaDirecta.m
1 clc
2 %CINEMATICA DIRECTA
3 syms d1
4 %DIMNCIONES DEL ROBOT
5 l1=375;
6 l2=1100;
7 l3=940;
8 %PARA VERIFICAR LA POSICION
9 t2=90;
10 t3=90;
11 %MATRICES DE TRANSFORMACION
12 A01=[1 0 0 l1;
13      0 1 0 0;
14      0 0 1 d1;
15      0 0 0 1];
16
17 A12=[ cosd(t2) -sind(t2) 0 l2*sind(t2);
18      sind(t2)  cosd(t2) 0 l2*cosd(t2);
19      0 0 1 0;
20      0 0 0 1];
21
22 A23=[ cosd(t3) -sind(t3) 0 l3*sind(t3);
23      sind(t3)  cosd(t3) 0 l3*cosd(t3);
24      0 0 1 0;
25      0 0 0 1];
26 %MATRICES RESULTANTES
27 A03 = A01*A12*A23
28
29
30
```

```
Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
A03 =
[-1, 0, 0, 1475]
[ 0, -1, 0, 940]
[ 0, 0, 1, d1]
[ 0, 0, 0, 1]
>>
```

Figura 28. Cinemática directa en Matlab, Prueba 1

Considerando el eje de referencia con el que se realizó la cinemática directa la posición final vendría dada por el vector $Pf = (940, 1475, 0)$; como se puede verificar en la Figura 29.

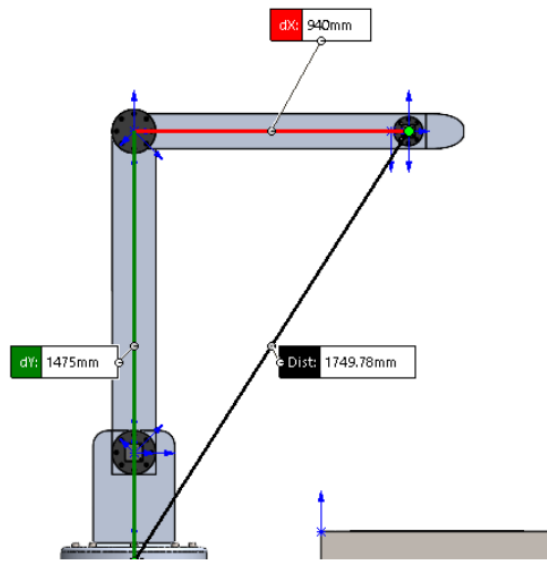


Figura 29. Verificación cinemática directa en SolidWorks, Prueba 1

Prueba 2

Para $\theta_2 = 90, \theta_3 = 180, d = 0$, se obtiene en la Figura 30:

```

CinenaticaDirecta.m x +
/MATLAB Drive/CinenaticaDirecta.m
1      clc
2      %CINEMATICA DIRECTA
3      syms d1
4      %DIMENSIONES DEL ROBOT
5      l1=375;
6      l2=1100;
7      l3=940;
8      %PARA VERIFICAR LA POSICION
9      t2=90;
10     t3=180;
11     %MATRICES DE TRANSFORMACION
12     A01=[1 0 0 l1;
13          0 1 0 0;
14          0 0 1 d1;
15          0 0 0 1];
16
17     A12=[ cosd(t2) -sind(t2)  0  l2*sind(t2);
18           sind(t2)  cosd(t2)  0  l2*cosd(t2);
19           0         0         1   0;
20           0         0         0   1];
21
22     A23=[ cosd(t3) -sind(t3)  0  l3*sind(t3);
23           sind(t3)  cosd(t3)  0  l3*cosd(t3);
24           0         0         1   0;
25           0         0         0   1];
26     %MATRICES RESULTANTES
27
28     A03= A01*A12*A23
29
Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
A03 =
[ 0, 1, 0, 2415]
[-1, 0, 0,  0]
[ 0, 0, 1,  d1]
[ 0, 0, 0,  1]
>>

```

Figura 30. Cinemática directa en Matlab, Prueba 2

Considerando el eje de referencia con el que se realizó la cinemática directa la posición final vendría dada por el vector $Pf = (0, 2415, 0)$; como se puede verificar en Figura 31.

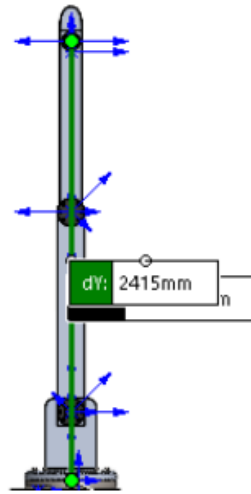


Figura 31. Verificación cinemática directa en SolidWorks, Prueba 2

3.1.4 Cinemática inversa

Las matrices de transformación permiten conocer la posición y dirección del punto final a partir de los parámetros de Denavit–Hartenberg. Del mismo modo se puede obtener los parámetros de Denavit–Hartenberg a partir de la posición final. Esto permite conocer los valores a los que deben llegar cada uno de los elementos para tener una posición deseada.

Los parámetros que se debe conocer son: d_1, θ_2, θ_3 y θ_4 ; que representan las ubicaciones que se deben generar con los servomotores.

Encones se parte de la matriz de transformación general que se representa de la siguiente manera:

$$T = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Se iguala la matriz de transformación general con la matriz A_0^3 :

$$T = A_0^3 = A_0^1 * A_1^2 * A_2^3$$

Para obtener los parámetros que se desea conocer, se requiere la inversa de A_0^1 .

$$(A_0^1)^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Entonces:

$$(A_0^1)^{-1} * T = A_1^2 * A_2^3$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} C(\theta_2) & -S(\theta_2) & 0 & l_2 S(\theta_2) \\ S(\theta_2) & C(\theta_2) & 0 & l_2 C(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C(\theta_3) & -S(\theta_3) & 0 & l_3 S(\theta_3) \\ S(\theta_3) & C(\theta_3) & 0 & l_3 C(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} C(\theta_2 + \theta_3) & -S(\theta_2 + \theta_3) & 0 & l_2 C(\theta_2) + l_3 C(\theta_2 + \theta_3) \\ S(\theta_2 + \theta_3) & C(\theta_2 + \theta_3) & 0 & l_2 S(\theta_2) + l_3 S(\theta_2 + \theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Iguando los componentes 1:4, 2:4, y 3:4 de la matriz $A_1^2 * A_2^3$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} C(\theta_2 + \theta_3) & -S(\theta_2 + \theta_3) & 0 & l_2 C(\theta_2) + l_3 C(\theta_2 + \theta_3) \\ S(\theta_2 + \theta_3) & C(\theta_2 + \theta_3) & 0 & l_2 S(\theta_2) + l_3 S(\theta_2 + \theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Entonces:

- Ecuación 1:

$$p_x - l_1 = l_2 C(\theta_2) + l_3 C(\theta_2 + \theta_3)$$

- Ecuación 2:

$$p_y = l_2 S(\theta_2) + l_3 S(\theta_2 + \theta_3)$$

o Ecuación 3:

$$p_z - d_1 = 0$$

Resolviendo 1 y 2:

$$\begin{aligned} \frac{p_x^2 - 2p_x l_1 + l_1^2}{p_y^2} &= \frac{l_2^2 C^2(\theta_2) + 2l_2 l_3 C(\theta_2) C(\theta_2 + \theta_3) + l_3^2 C^2(\theta_2 + \theta_3)}{l_2^2 S^2(\theta_2) + 2l_2 l_3 S(\theta_2) S(\theta_2 + \theta_3) + l_3^2 S^2(\theta_2 + \theta_3)} \\ \frac{p_x^2 - 2p_x l_1 + l_1^2 + p_y^2}{p_y^2} &= \frac{l_2^2 + 2l_2 l_3 (C(\theta_2) C(\theta_2 + \theta_3) + S(\theta_2) S(\theta_2 + \theta_3)) + l_3^2}{p_y^2} \end{aligned}$$

$$p_x^2 - 2p_x l_1 + l_1^2 + p_y^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2l_2 l_3 C(\theta_2 - \theta_2 + \theta_3)$$

$$p_x^2 - 2p_x l_1 + l_1^2 + p_y^2 - l_2^2 - l_3^2 = 2l_2 l_3 C(\theta_3)$$

$$\cos(\theta_3) = \frac{p_x^2 - 2p_x l_1 + l_1^2 + p_y^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3}$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{p_x^2 - 2p_x l_1 + l_1^2 + p_y^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3} \right)$$

Despejando θ_2 de ecuación 2:

$$p_y = l_2 S(\theta_2) + l_3 S(\theta_2 + \theta_3)$$

$$p_y = l_2 S(\theta_2) + l_3 S(\theta_2) C(\theta_3) + l_3 S(\theta_3) C(\theta_2)$$

$$p_y = (l_2 + l_3 C(\theta_3)) S(\theta_2) + l_3 S(\theta_3) C(\theta_2)$$

$$p_y = (l_2 + l_3 C(\theta_3)) S(\theta_2) + l_3 S(\theta_3) C(\theta_2)$$

Remplazando los valores de las constantes:

$$l_2 + l_3 C(\theta_3) = E$$

$l_3 S(\theta_3) = F$

Entonces:

$$p_y = E \cdot S(\theta_2) + F \cdot C(\theta_2)$$

$$(-F \cdot C(\theta_2))^2 = (E \cdot S(\theta_2) - p_y)^2$$

$$F^2(1 - S^2(\theta_2)) = E^2 S^2(\theta_2) - 2p_y \cdot E \cdot S(\theta_2) + p_y^2$$

$$F^2(1 - S^2(\theta_2)) = E^2 S^2(\theta_2) - 2p_y E \cdot S(\theta_2) + p_y^2$$

Resolviendo la ecuación cuadrática de tipo $ax + bx + c = 0$ mediante la formula general:

$$(E^2 + F^2)S^2(\theta_2) - (2p_y E) S(\theta_2) + (p_y^2 - F^2) = 0$$

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} ; x = \text{sen}(\theta_2)$$

$$\text{sen}(\theta_2) = \frac{2p_y E \pm \sqrt{-2p_y E - 4(E^2 + F^2)(p_y^2 - F^2)}}{2(E^2 + F^2)}$$

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{2p_y E \pm \sqrt{-2p_y E - 4(E^2 + F^2)(p_y^2 - F^2)}}{2(E^2 + F^2)} \right)$$

Despejando de Ecuación 3:

$$d_1 = p_z$$

Y para el θ_4 cómo se observa en la Figura 32, se considera que el ángulo de trabajo por la posición que debe tener la antorcha siempre será de 45° .

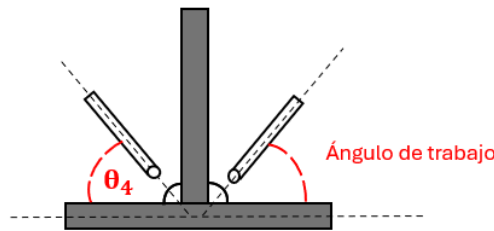


Figura 32. Ángulo de trabajo para θ_4

De este modo se obtiene que los parámetros para posicionar los servomotores son los siguientes:

- $d_1 = p_z$
- $\theta_2 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{2p_y E \pm \sqrt{-2p_y E - 4(E^2 + F^2)(p_y^2 - F^2)}}{2(E^2 + F^2)} \right)$
- $\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{p_x^2 - 2p_x l_1 + l_1^2 + p_y^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3} \right)$
- $\theta_4 = 45^\circ$

3.1.5 Análisis mecánicos

3.1.5.1 Análisis estático

Se plantea un estudio de análisis estático mediante el software SolidWorks

Análisis de Von Mises. La Figura 33 indica el resultado del análisis de deformaciones al aplicar las cargas, y se evidencia que no se supera el límite de deformación del material.

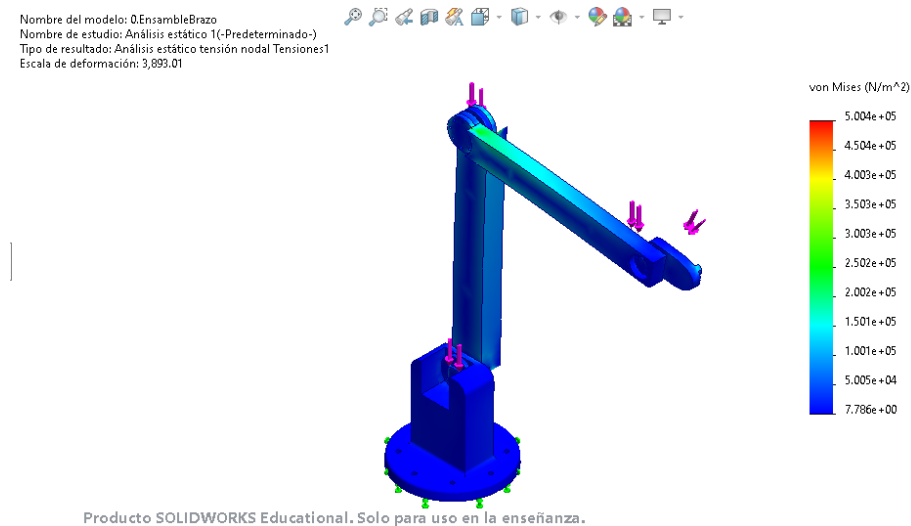


Figura 33. Análisis de Von Mises

Análisis de deformaciones unitarias. Las deformaciones unitarias están en el rango de e-6 como se observa en la Figura 34, entonces se puede considerar que no existen deformaciones en el material por efecto de las cargas.

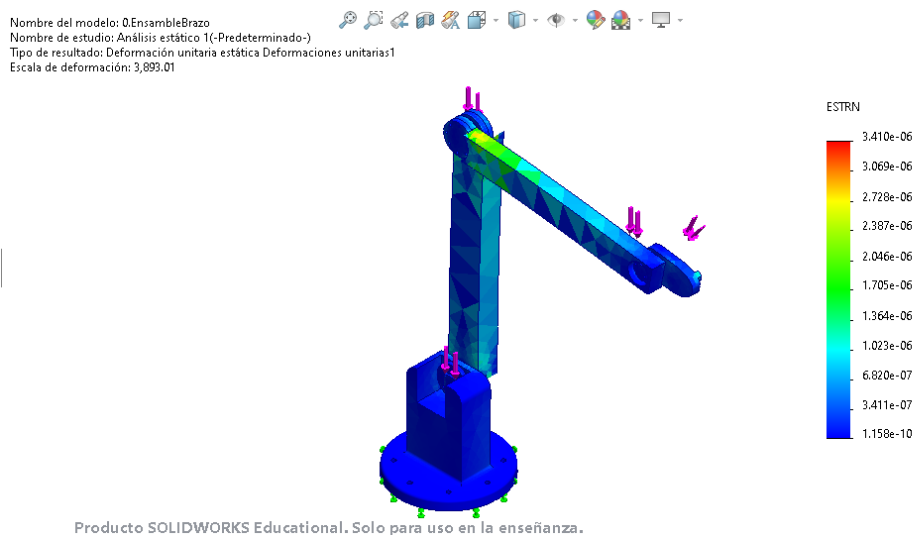


Figura 34. Análisis de deformaciones unitarias

Factor de seguridad

El análisis estático de tensiones y deformaciones indica que el diseño es óptimo, y tiene un factor de seguridad de 5.2 como se observa en la Figura 35, por lo tanto, el diseño es funcional.

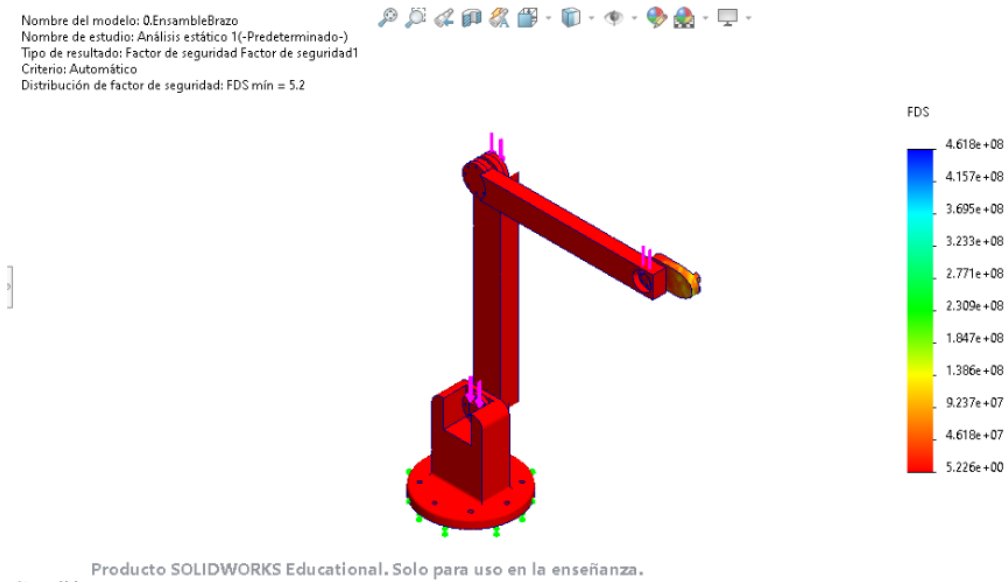


Figura 35. Distribución del factor de seguridad

3.1.5.2 Análisis de cargas

Para determinar el torque de los servomotores y dimensionamiento de los elementos mecánicos se requiere conocer las fuerzas y toques que se generan en cada uno de los puntos que se observa en la Figura 36.

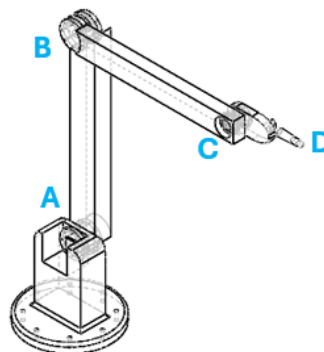


Figura 36. Distribución para análisis de cargas

Para el punto C:

En la Figura 37 se realiza un diagrama de cuerpo libre para el análisis en el punto C.

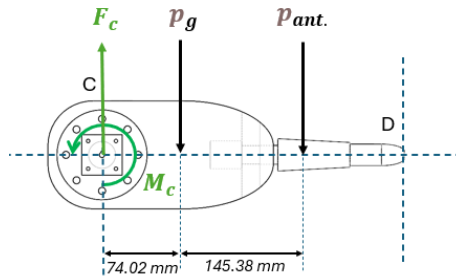


Figura 37. DCL C-D

Fuerza resultante en el punto C es igual a:

$$F_c = p_g + p_{ant}$$

Las fuerzas p_g y p_{ant} representan los pesos de los componentes, considerando la masa del soporte de la antorcha $m_g = 2.59kg$, masa de la antorcha de la soldadora MIG $m_{ant} = 3kg$, y la gravedad $g = 9.81$, se obtiene:

$$F_c = (m_g + m_{ant}) * g$$

$$F_c = (2.59 + 3)9.81$$

$$F_c = 58.8379 [N]$$

Momento resultante en el punto C es igual a:

$$M_c = M_g + M_{ant}$$

$$M_c = P_g(0.07402) + P_{ant}(0.07402 + 0.14538)$$

$$M_c = m_g * g(0.07402) + m_{ant} * g(0.2194)$$

$$M_c = 8.3376[Nm]$$

El diagrama de cortantes y momentos generados se evidencian en la Figura 38 y el M_c es el momento máximo que se soportar entre los puntos C-D que corresponden al soporte de la antorcha.

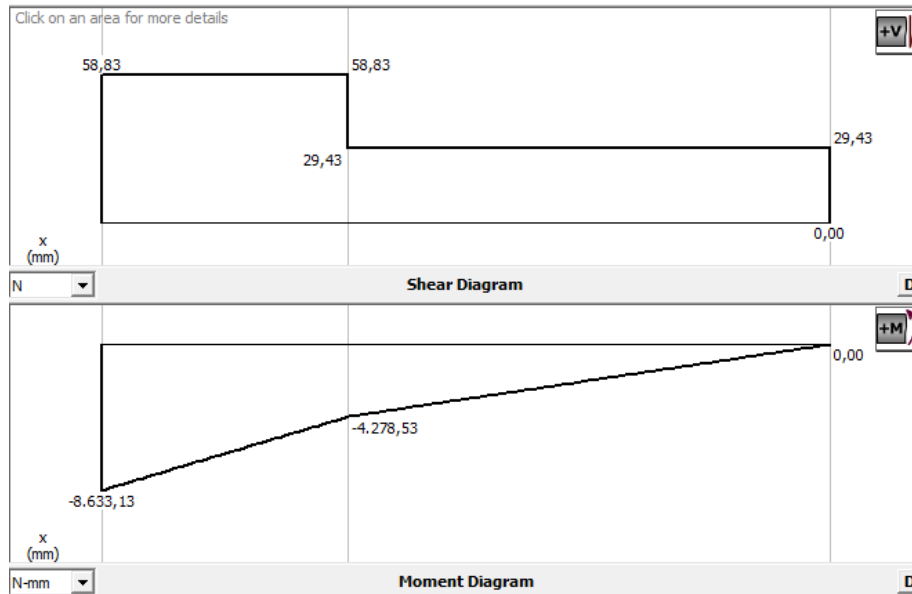


Figura 38. Diagramas de cortantes y momentos sobre el soporte de la antorcha

Para el punto B:

En la Figura 39 se realiza un diagrama de cuerpo libre para el análisis en el punto B.

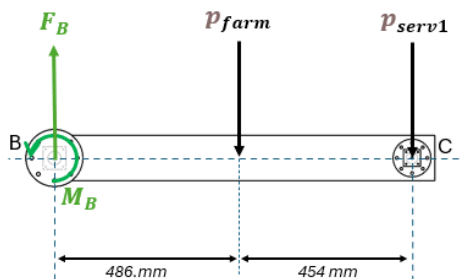


Figura 39. DCL B-C

Fuerza resultante en el punto B es igual a:

$$F_B = p_{farm} + p_{serv1}$$

Las fuerzas p_{farm} y p_{serv1} representan los pesos de los componentes, considerando la masa del antebrazo $m_{farm} = 21.24 \text{ kg}$, y la masa del servomotor $m_{serv1} = 8 \text{ kg}$.

Se obtiene:

$$F_B = (m_{farm} + m_{serv1}) * g$$

$$F_B = (21.24 + 8)9.81$$

$$F_B = 286.4444 \text{ [N]}$$

Momento resultante en el punto B es igual a:

$$M_B = M_{farm} + M_{serv1}$$

$$M_B = P_{farm}(0.486) + P_{serv1}(0.486 + 0.454)$$

$$M_B = m_{farm} * g(0.486) + m_{serv1} * g(0.940)$$

$$M_B = 175.0363[Nm]$$

El diagrama de cortantes y momentos generados se evidencian en la Figura 40 y el M_B es el momento máximo que debe soportar entre los puntos B-C que corresponden al antebrazo.

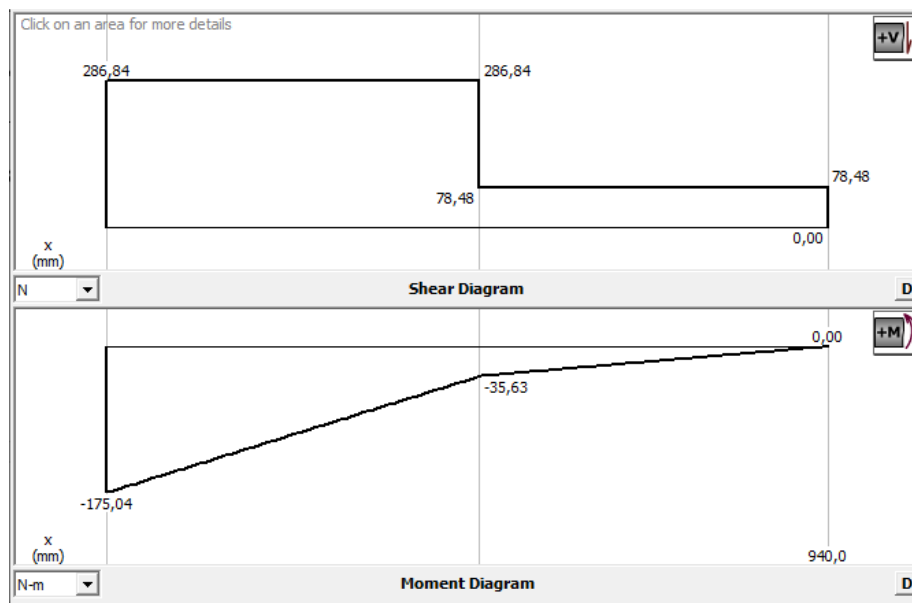


Figura 40. Diagramas de cortantes y momentos sobre el antebrazo del robot

Para el punto A:

Se considera que este elemento nunca alcanza una posición completamente horizontal, por lo que en la se observa que para su análisis se toma un ángulo de 45° como un valor máximo y de seguridad pues con la cinemática inversa se obtuvo que los valores de este ángulo no superan los 34° en la posición de soldadura.

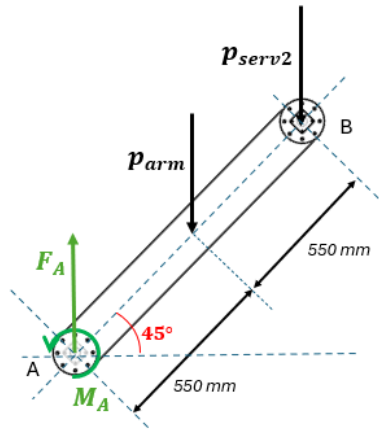


Figura 41. DCL A-B

Fuerza resultante en el punto A es igual a:

$$F_A = p_{serv2} + p_{arm}$$

Las fuerzas p_{arm} y p_{serv2} representan los pesos de los componentes, considerando la masa del brazo $m_{arm} = 30.02 \text{ kg}$, y la masa del servomotor $m_{serv1} = 10 \text{ kg}$.

Se obtiene:

$$F_A = (m_{arm} + m_{serv2}) * g$$

$$F_A = (30.02 + 10)9.81$$

$$F_A = 392.5962 \text{ [N]}$$

Momento resultante en el punto B es igual a:

$$M_A = M_{arm} + M_{serv2}$$

$$M_A = P_{arm} \cos(45^\circ) (0.55) + P_{serv2} \cos(45^\circ) (1.1)$$

$$M_A = 190.836 \text{ [Nm]}$$

El diagrama de cortantes y momentos generados se evidencian en la Figura 42 y el M_A es el momento máximo que debe soportar entre los puntos A-B que corresponden al brazo del robot.

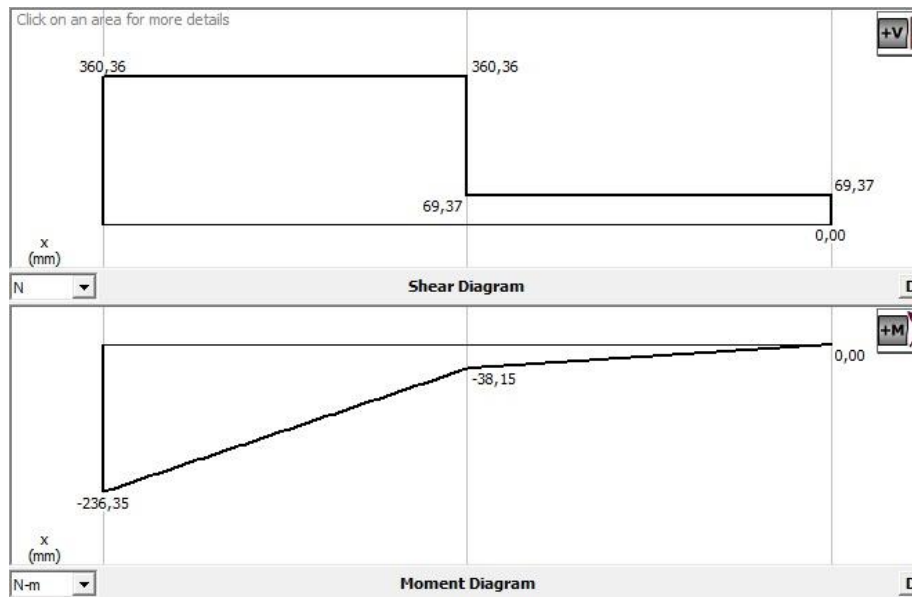


Figura 42. Diagramas de cortantes y momentos sobre el brazo del robot.

Análisis de esfuerzos

El esfuerzo máximo que soporta el sistema depende del material. Para el caso del brazo robótico se tiene un aluminio 6061 y su límite elástico es de $Sy_{Al6061} = 55.1485 [MPa]$

Entonces se obtiene:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 0.6 Sy$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 33.0889 [MPa]$$

Para que el sistema funcione el esfuerzo máximo debe ser mayor o igual al esfuerzo generado por el Momento máximo, que sería igual al momento en el punto A del análisis de cargas, es decir:

$$\sigma_{m\acute{a}x} \geq \sigma_{Ma}$$

El σ_{Ma} depende del momento máximo y del módulo de sección del material, por lo que:

$$\sigma_{Ma} = \frac{M_A}{S}$$

Y el módulo de sección entonces debe ser igual a:

$$S = \frac{M_A}{\sigma_{Ma}}$$

$$S = 5767.38 [mm^3]$$

Entonces, este es el módulo de sección mínimo requerido para que esa sección soporte $190.836[Nm]$ sin superar los $33.0889[MPa]$ de esfuerzo.

3.1.5.3 Diseño de perfil para estructura del brazo

Con el módulo de sección mínimo requerido, se verifica si las dimensiones de la Figura 43 del perfil establecido cumplen:

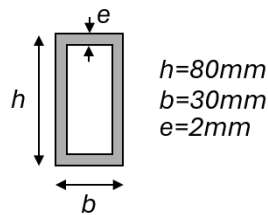


Figura 43. Dimensiones del perfil para estructura del brazo

$$S_{perfil} = \frac{bh^2 - (b - 2e)(h - 2e)^2}{6}$$

$$S_{perfil} = \frac{30 * 80^2 - 26 * 76^2}{6}$$

$$S_{perfil} = 6970.67 [mm^3]$$

El módulo de sección del perfil propuesto es mayor que el módulo de sección mínimo $S_{perfil} > S$ por lo que se cumple con la selección.

3.1.5.4 Análisis de velocidad de avance

Para los servomotores que son las articulaciones del brazo robótico se puede considerar que los rangos de movimiento de 90° se logren con una velocidad de respuesta de entre 2 y 3 segundos.

Entonces para un tiempo de 2 segundos:

$$w = \left| \frac{90^\circ}{2s} \right| \left| \frac{1vuelta}{360^\circ} \right| \left| \frac{60s}{1min} \right|$$

$$w = 7.5 [rpm]$$

El brazo robótico debe realiza una trayectoria lineal con una velocidad constante entre los 300 y 700 [mm/min]. Para lo cual se debe realizar el diseño de un sistema de transmisión en el riel capaz de mover todo el robot dentro de esos rangos de velocidad y con una alta presión para lograr una soldadura continua.

Sistema piñón – cremallera

La masa total del brazo robótico es de 466 kg como se observa en la Figura 44.

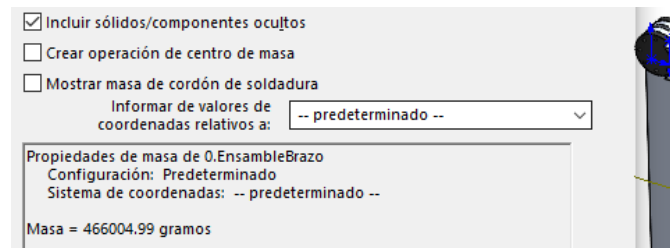


Figura 44. Masa del ensamble del brazo robótico

Adicionalmente se debe considerar que sobre el carro del riel se pondrá una soldadora MIG que tiene un peso aproximado entre 50 y 80 kg. [42]

Considerando algún peso adicional, el sistema piñón-cremallera se diseña para transportar 600kg.

- Fuerza de tracción

$$F = \mu_r * W$$

Donde:

F : fuerza de tracción requerida

μ_r : coeficiente de rodadura (0.02)

W : peso total

$$F = \mu_r * m_{total} * g$$

$$F = 0.02 * 600 * 9.8$$

$$F = 0.02 * 600 * 9.8$$

$$F = 117.6 [N]$$

Considerando un factor de seguridad de 1.5, la fuerza requerida para el diseño seria:

$$F_{diseño} = 117.6 * 1.5$$

$$F_{diseño} = 176.4 [N]$$

- Selección del piñón y cremallera

La distancia al centro del eje es de 75 mm como se observa en Figura 45. Adicionalmente se considera que la cremallera tendrá una altura de paso de 30 mm, por lo que la distancia al eje será de 45mm y el módulo para el diseño del sistema de transmisión será de $m = 2$.

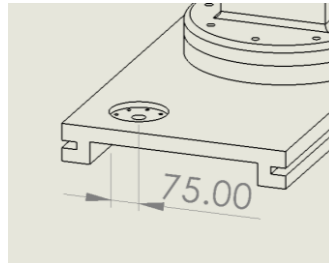


Figura 45. Distancia del carro de riel al centro del eje

El módulo (m) es la relación entre el diámetro primitivo (D_p) y el número de dientes del engrane (z), de modo que se puede hallar el número de dientes a partir de la formula:

$$m = \frac{D_p}{z}$$

$$z = \frac{D_p}{m}$$

$$z = \frac{90}{2}$$

$$z = 45 \text{ dientes}$$

- Paso circular

Es la distancia a lo largo del círculo primitivo desde un punto en un diente hasta el punto correspondiente en el siguiente diente. Este depende del módulo seleccionado por lo que sería igual a:

$$p_c = \pi * m$$

$$p_c = \pi * 2$$

$$p_c = 6.283 \text{ [mm]}$$

- **Ancho de cara**

El ancho de la cara está relacionado directamente con el módulo, debe estar entre 8 y 14 veces su valor para funcionar de manera óptima. De manera estándar se selecciona la relación de 9.5 dando como resultado:

$$b = 9.5 * m$$

$$b = 19 [mm]$$

- **Velocidad nominal de entrada**

La velocidad del motor que impulsa el riel debe generar una velocidad lineal entre los los 300 y 700 mm/min, por lo que la velocidad máxima que debe entregar el motor (N) es igual:

$$N = \frac{w * 60}{2\pi}$$

Y la velocidad lineal (v) se relaciona con la velocidad angular (w) mediante el radio de giro (r), entonces:

$$v = w * r$$

Remplazando y resolviendo se tiene que:

$$N = \frac{60 * v}{2\pi * r}$$

$$N = \frac{60 * 700}{2\pi * 45}$$

$$N = 148.54 [rpm]$$

- **Torque requerido**

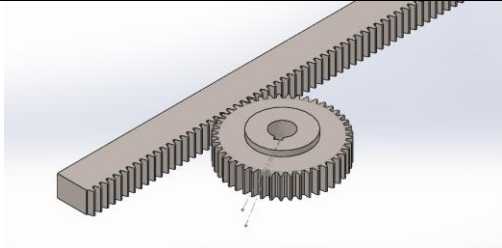
$$T = F_{Diseño} * \frac{Dp}{2}$$

$$T = 176.4 * \frac{0.09}{2}$$

$$T = 7.93 [Nm]$$

En la Tabla 10 se resume los parámetros del sistema de transmisión piñón–cremallera diseñada.

Tabla 10. Parámetros de diseño sistema de transmisión piñón–cremallera

| DATOS DE TRANSMISIÓN | | |
|-----------------------------------|--|--------|
| Velocidad de entrada | 148.54 | rpm |
| Fuerza de tracción requerida | 176.4 | N |
| Torque | 7.93 | Nm |
| Velocidad lineal de salida máxima | 700 | mm/min |
| DATOS DE LOS COMPONENTES | | |
| Imagen referencial |  | |
| Módulo | 2 | |
| Ancho de la cara | 19 | mm |
| Piñón | | |
| Diámetro primitivo | 90 | mm |
| Numero de dientes | 45 | |
| Paso circular | 6.28 | mm |
| Cremallera | | |
| Altura de paso | 30 | mm |
| Longitud | 9000 | mm |

3.2 Diseño eléctrico y de control

3.2.1 Diagrama de flujo del sistema

En la Figura 46 se plantea el diagrama de flujo de la soldadura.

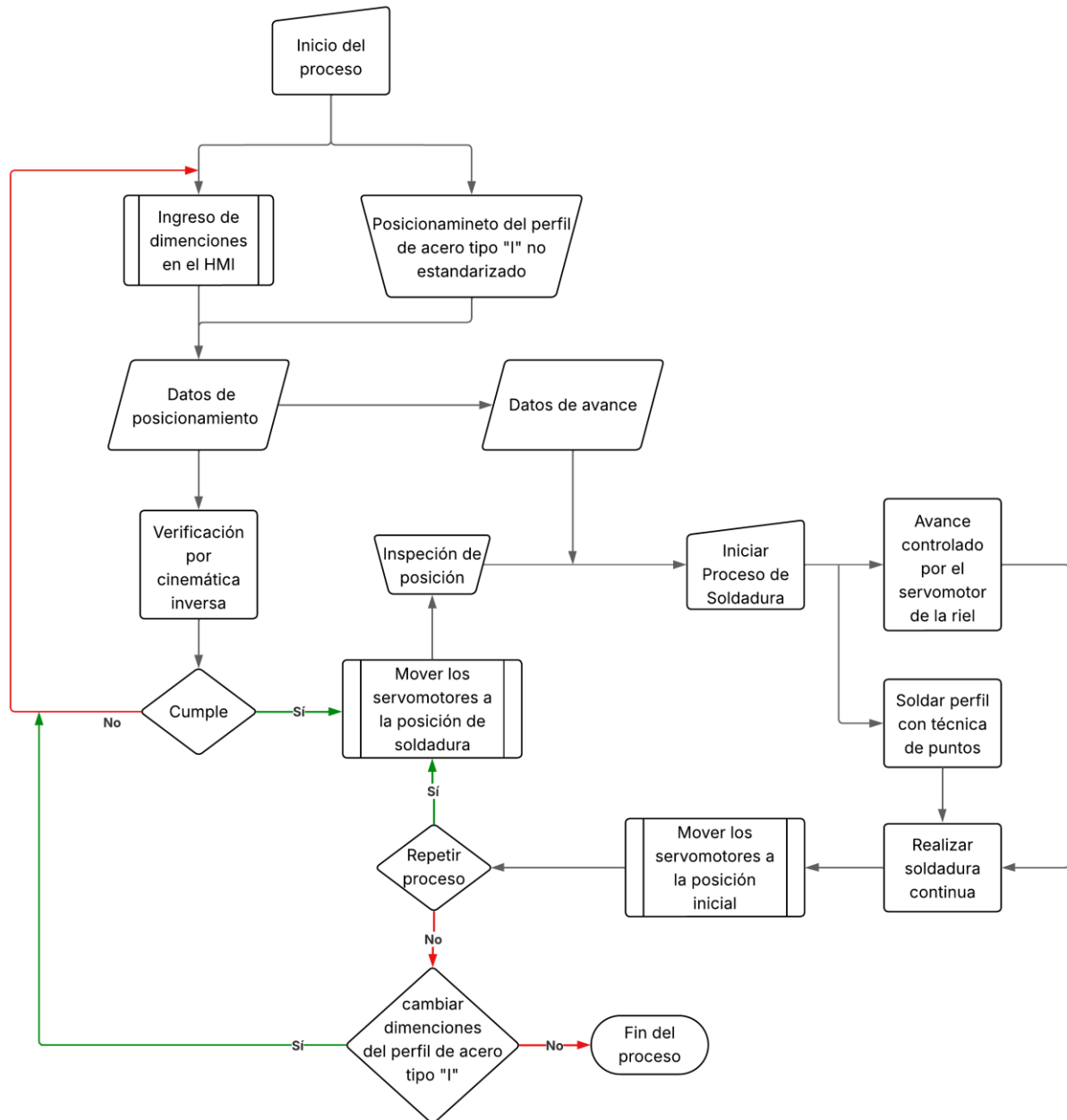


Figura 46. Diagrama de flujo del sistema de soldadura

3.2.2 Actuadores

Selección de servomotores

Considerando los valores encontrados en el diseño mecánico para los torques se selección el servomotor que más se adapte a los requerimientos. Se necesita colocar tres servomotores como se indica en la Figura 47.

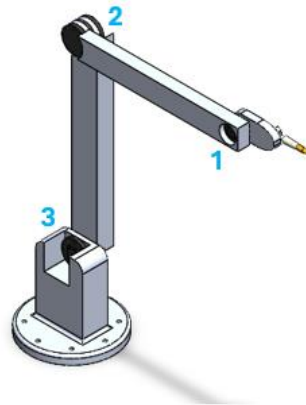


Figura 47. Ubicación de servomotores

Para el servomotor 1, se requiere un motor con un torque nominal de $M_c = 8.3376[Nm]$ y con una velocidad nominal de $N = 7.5 [rpm]$.

Por lo tanto, el servomotor debe tener una potencia mínima de:

$$P_{serv1} = N * M_c$$

$$P_{serv1} = 62.532 [W]$$

En la Tabla 11 se coloca algunos detalles de un servomotor que cumple parámetros de selección

Tabla 11. Especificaciones técnicas del servomotor 1

| Modelo de Servomotor: AM8033-wEyz Servomotor 3.20 Nm (Mo), F3 (72 mm) | |
|--|--|
| Proveedor | Beckhoff |
| Imagen referencial |  |
| Tipo de motor | síncrono - trifásico |
| Voltaje nominal | 100-480 V AC |
| Par nominal | 2.98 Nm |
| Par máximo | 17.19 Nm |
| Velocidad nominal | 3000 rpm |
| Potencia nominal | 0.94 kW |
| Corriente nominal | 2.10 A |
| Corriente Máxima | 12.9 A |

Para el servomotor 2, se requiere un motor con un torque nominal de $M_B = 175.0363[Nm]$ y con una velocidad nominal de $N = 7.5 [rpm]$.

Por lo tanto, el servomotor debe tener una potencia mínima de:

$$P_{serv2} = N * M_B$$

$$P_{serv2} = 1312.7722 [W]$$

En la Tabla 12 se coloca algunos detalles de un servomotor que cumple parámetros de selección.

Tabla 12. Especificaciones técnicas del servomotor 2

| Modelo de Servomotor: AM8073-wNyz Servomotor 72.6 Nm (Mo), F7 (194 mm) | |
|---|---|
| Proveedor | Beckhoff |
| Imagen referencial |  |
| Tipo de motor | síncrono - trifásico |
| Voltaje nominal | 100-480 V AC |
| Par nominal | 58.5 Nm |
| Par máximo | 275 Nm |
| Velocidad nominal | 1000 rpm |
| Potencia nominal | 6.13 kW |
| Corriente nominal | 14.7 A |
| Corriente Máxima | 51.3 A |

Para el servomotor 3, se requiere un motor con un torque nominal de $M_A = 190.836[Nm]$ y con una velocidad nominal de $N = 7.5 [rpm]$.

Por lo tanto, el servomotor debe tener una potencia mínima de:

$$P_{serv3} = N * M_B$$

$$P_{serv3} = 1431.27 [W]$$

El par nominal máximo del servomotor 2 seleccionado es de 275 [Nm], por lo tanto, puede ser usado uno igual para el servomotor 3.

Para el servomotor 4 que se observa en la Figura 48, responsable de transportar el brazo robótico por el riel, se considera los parámetros de transmisión del sistema piñón-cremallera, así, se requiere un motor con un torque nominal de $M = 7.93[Nm]$ y una velocidad nominal de $N = 148.54 [rpm]$.

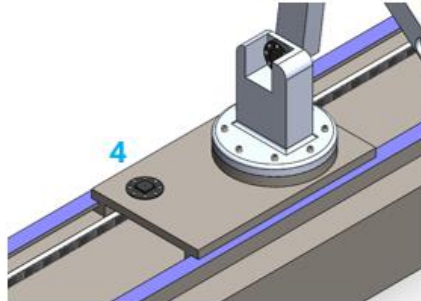


Figura 48. Ubicación servomotor de avance

Por lo tanto, el servomotor debe tener una potencia mínima de:

$$P_{serv4} = N * M$$

$$P_{serv4} = 1177.922 [W]$$

En la Tabla 13 se coloca algunos detalles de un servomotor que cumple parámetros de selección.

Tabla 13. Especificaciones técnicas del servomotor 4

| Modelo de Servomotor: AM8033-wFyz Servomotor 3.22 Nm (M0), F3 (72 mm) | |
|--|--|
| Proveedor | Beckhoff |
| Imagen referencial |  |
| Tipo de motor | síncrono - trifásico |
| Voltaje nominal | 100-480 V AC |
| Par nominal | 2.7 Nm |
| Par máximo | 17.71 Nm |
| Velocidad nominal | 6000 rpm |
| Potencia nominal | 1.7 kW |
| Corriente nominal | 4.10 A |
| Corriente Máxima | 24.6 A |

3.2.3 Diagrama de potencia

En la Figura 49 se puede observar el diagrama eléctrico de potencia para los elementos más importantes del sistema de soldadura.

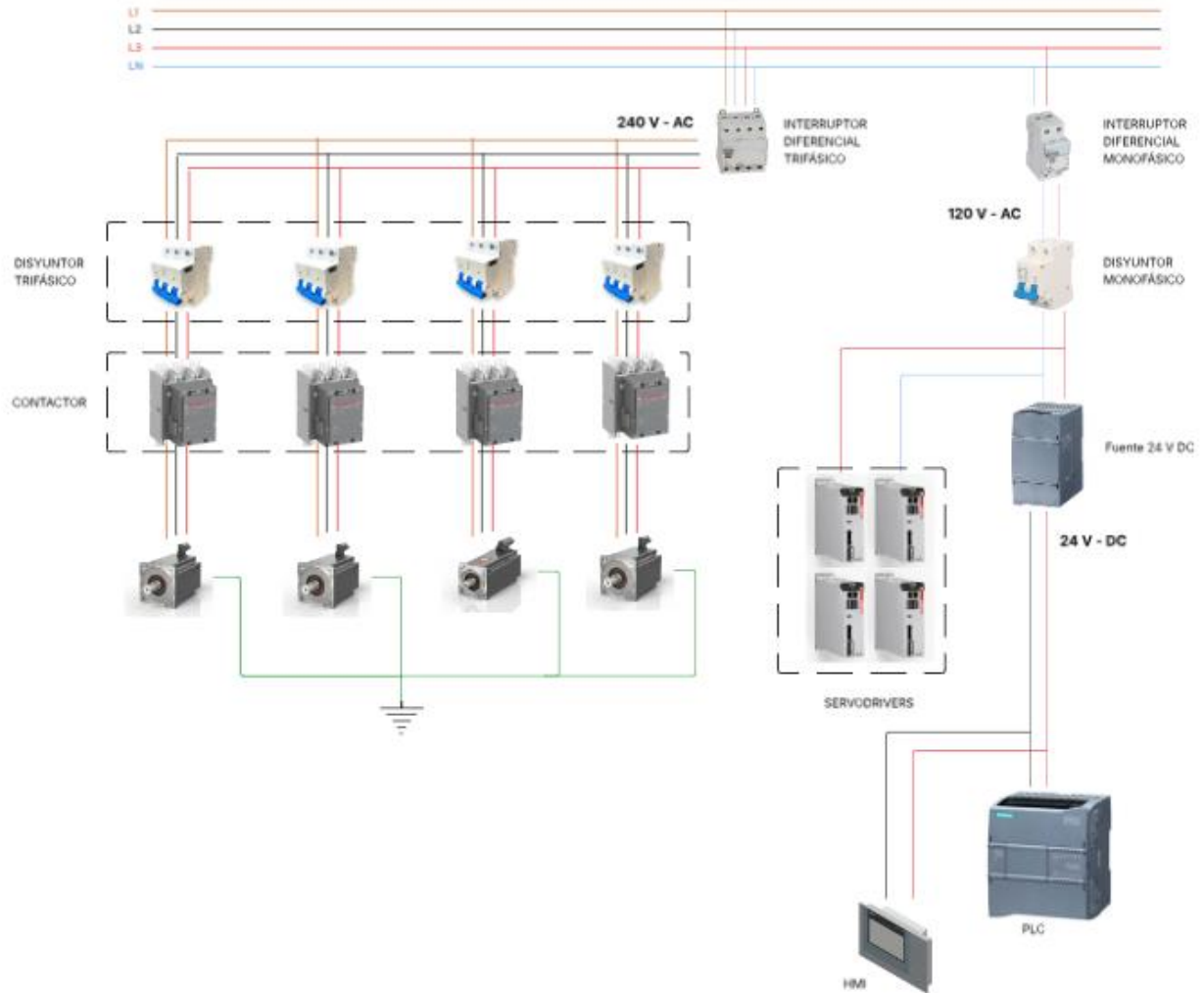



Figura 49. Diagrama de potencia

3.2.4 Elementos de control

PLC

Para realizar el control del sistema de soldadura se propone usar PLC, que para que funcione de manera más fluida y no tenga problemas de comunicación se selecciona uno de la misma marca de los servomotores que encontramos disponibles. En la Tabla 14, se describen las características principales del PLC seleccionado.

Tabla 14. Especificaciones técnicas PLC

| Modelo de PLC: CX5120 Embedded PC | |
|--|---|
| Proveedor | Beckhoff |
| Imagen referencial |  |
| CPU | Intel® Atom™ E3815, 1 núcleo, 1.46 GHz |
| Voltaje de alimentación | 24 V DC |
| Consumo de corriente nominal | 2 A |
| Potencia nominal | 11 W |
| Comunicación | 2 puertos Ethernet RJ45 (1 para EtherCAT, 1 libre o como backup) |
| Puertos Adicionales | 1x DVI-D, 4x USB 2.0, 1x microSD, 1x interfaz multibús para I/O Beckhoff |

La serie CX5100 del proveedor no incluye entradas ni salidas integradas por lo que se debe colocar módulos adicionales:

EL1008: 8 entradas digitales

EL2008: 8 salidas digitales

EL3002: 2 entradas analógicas

EL4002: 2 salidas analógicas


Para las Digital I/O se necesitaría solo un módulo de cada uno, pero para las Analógicas I/O se necesita dos para obtener las 4 entradas para los servomotores.

SERVODRIVER

Del mismo modo que el PLC se puede seleccionar servodriver de la misma marca para tener una buena comunicación e interacción entre elementos. En la

Tabla **15** se describen las características principales del servodriver seleccionado.


Tabla 15. Especificaciones técnicas del Servodriver

| Modelo de Servodriver: AX5206 Digital Compact Servo Drives | |
|---|---|
| Proveedor | Beckhoff |
| Imagen referencial |  |
| Channel | 2 |
| Voltaje de alimentación | 100 – 480 V AC |
| Consumo de corriente nominal | 12 A |
| Potencia nominal (sin motor) | 10 W |
| Comunicación | EtherCAT |

HMI

Las dimensiones que se desean para los perfiles de acero tipo “I” no estandarizados deben ser ingresados por el operador. En la Tabla 16 se describen las características principales del HMI seleccionado.

Tabla 16. Especificaciones técnicas HMI

| Modelo de HMI: CP66xx-xxxx-0020 | |
|--|---|
| Proveedor | Beckhoff |
| Imagen referencial |  |
| Display | 5.7”, color |
| Voltaje de alimentación | 24 V DC |
| Consumo de corriente nominal | 0.5 A |
| Potencia nominal | 8 W |
| Comunicación | EtherCAT |

Tomando como referencia el diagrama de flujo del sistema, el HMI debe permitir ingresar los datos de las dimensiones de los perfiles tipo “I” a fabricar y mensajes de interacción para continuar y terminar el proceso.

3.2.5 Esquema de control

En la Figura 50 se planea el esquema de control del sistema de soldadura.

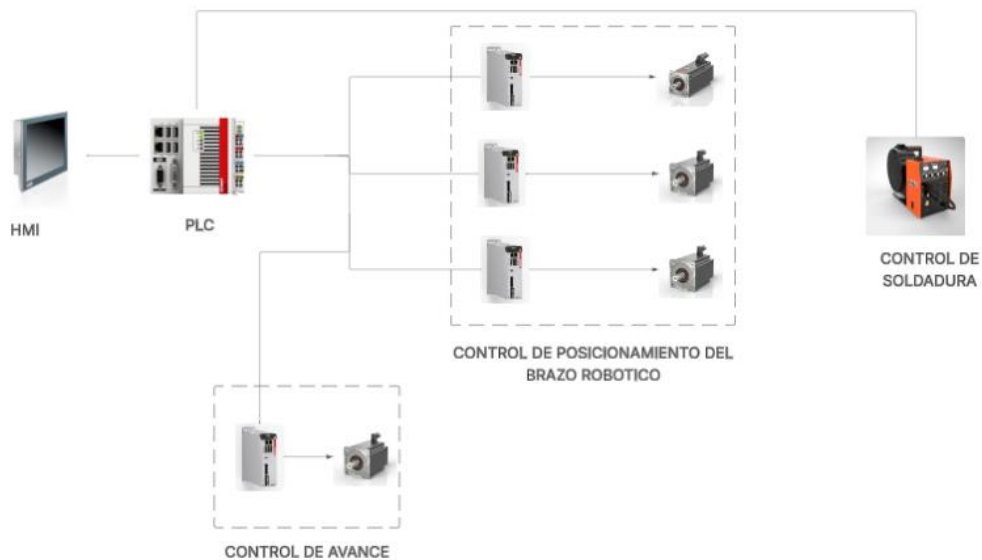


Figura 50. Esquema de control

3.3 Simulación de trayectoria

Para la simulación de la trayectoria se requiere conocer los valores de la posición de soldadura y las dimensiones del robot evaluadas en la cinemática inversa del robot para lograr determinar la posición a la que deben llegar los servomotores.

El $P_f = (p_x, p_y, p_z)$ que representa la posición de soldadura, depende de las dimensiones del perfil de acero tipo “I” de dimensiones no estandarizadas como se observa en la Figura 51.

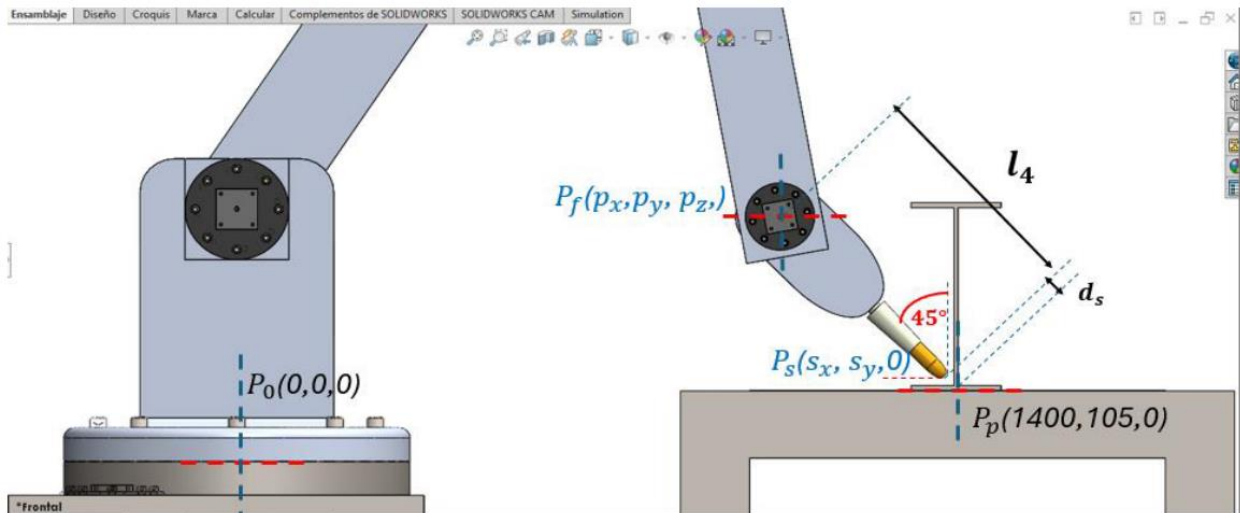


Figura 51. Ubicación de puntos para posicionamiento del P_f

El punto p_s representa la distancia a la que se debe colocar la antorcha para realizar la soldadura.

Para p_x :

$$p_x: 1400 - \frac{t_w}{2} - d_s \cos(45) - l_4 \cos(45)$$

Para p_y :

$$p_y: 105 + t_f + d_s \cos(45) + l_4 \cos(45)$$

Si se desea obtener una posición de soldadura, se debe remplazar los valores de las dimensiones del perfil de acero tipo “I” no estandarizado. De modo que se plantea un perfil de prueba con las siguientes dimensiones:

- $d = 280 \text{ mm}$
- $b_f = 130 \text{ mm}$
- $t_f = 8 \text{ mm}$
- $t_w = 4.5 \text{ mm}$

Entonces, resolviendo P_f con las dimensiones del perfil de prueba y del brazo robótico se tiene los siguientes resultados en la Figura 52.

```

1  clc
2  format short
3  %CINEMATICA INVERSA
4  %-----
5
6  %DIMNCIONES DEL ROBOT
7  l1=375; l2=1100; l3=940;l4=335;
8  %DIMENSIONES DEL PERFIL
9  d=280; bf=130; tf=8; tw=6;
10 longitud=4500;
11 %DISTANCIA DE SOLDADURA
12 ds=20;
13
14 %POSICION DE SOLDADURA
15 px=1400-(tw/2)-ds*cosd(45)-l4*cosd(45)
16 py=105+tf+ds*cosd(45)+l4*cosd(45)
17 pz=0
18

```

```

New to MATLAB? See resources for Getting Started.
px =
    1.1460e+03
py =
    364.0229
pz =
     0
>>

```

Figura 52. Asignación del P_f para el perfil de prueba

Con el P_f definido para el perfil de prueba se procede a realizar la cinemática inversa del robot para obtener parámetros de posicionamiento de los servomotores como se observa en la Figura 53

```

1  clc
2  format short
3  %CINEMATICA INVERSA
4  %-----
5
6  %DIMNCIONES DEL ROBOT
7  l1=375; l2=1100; l3=940;l4=335;
8  %DIMENSIONES DEL PERFIL
9  d=280; bf=130; tf=8; tw=6;
10 longitud=4500;
11 %DISTANCIA DE SOLDADURA
12 ds=20;
13
14 %POSICION DE SOLDADURA
15 px=1040-(tw/2)-ds*cosd(45)-l4*cosd(45)
16 py=105+tf+ds*cosd(45)+l4*cosd(45)
17 pz=0
18
19 %ECUACIONES DE CINEMATICA INVERSA
20 t3=acosd((px*px-2*px*l1+l1*l1+py*py-l2*l2-l3*l3)/(2*l2*l3))
21 E=l2+l3*cosd(t3);
22 F=l3*sind(t3);
23 t2=asin((2*py*E+sqrt(4*py*E*py*E-4*(E*E+F*F)*(py*py-F*F)))/(2*(E*E+F*F)))
24 t21=asin((2*py*E-sqrt(4*py*E*py*E-4*(E*E+F*F)*(py*py-F*F)))/(2*(E*E+F*F)))

```

```

New to MATLAB? See resources for Getting Started.
px =
    785.9771
py =
    364.0229
pz =
     0
t3 =
    150.0690
t2 =
     79.7851
t21 =
    -17.1490

```

Figura 53. Cinemática inversa

Se ingresa los valores de los ángulos para los servomotores del brazo robótico. En la Figura 54 se verifica que se cumpla con la posición de soldadura $px = (785.9771, 364.02, 0)$.

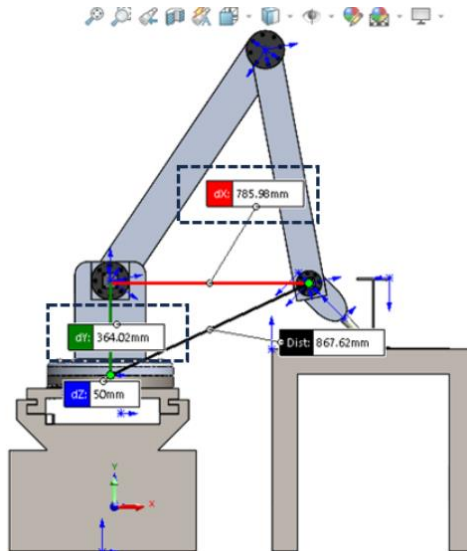


Figura 54. Verificación posicionamiento de servomotores

Cuando el brazo robótico se coloca en la posición de soldadura y realiza su trayectoria a lo largo del perfil hasta llegar a una posición final como se evidencia en la Figura 55.

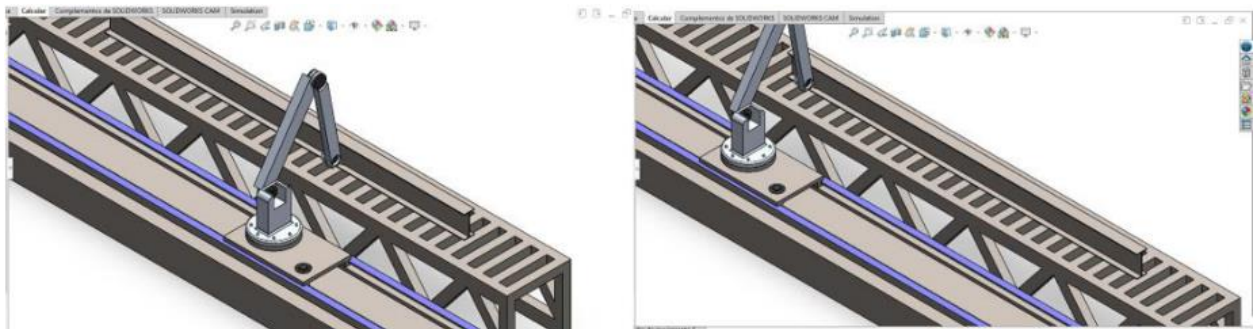


Figura 55. Desplazamiento del brazo robótico

Con todos los puntos definidos, se puede trasladar a otro Software donde se puede evidenciar la trayectoria que tendrá el brazo robótico.

Simulación en RoboDK

Como primer paso, se importan los elementos de SolidWorks a RoboDK. Con todas las piezas, se configura el ensamble del brazo robótico con sus dimensiones como se observa en la Figura 56.

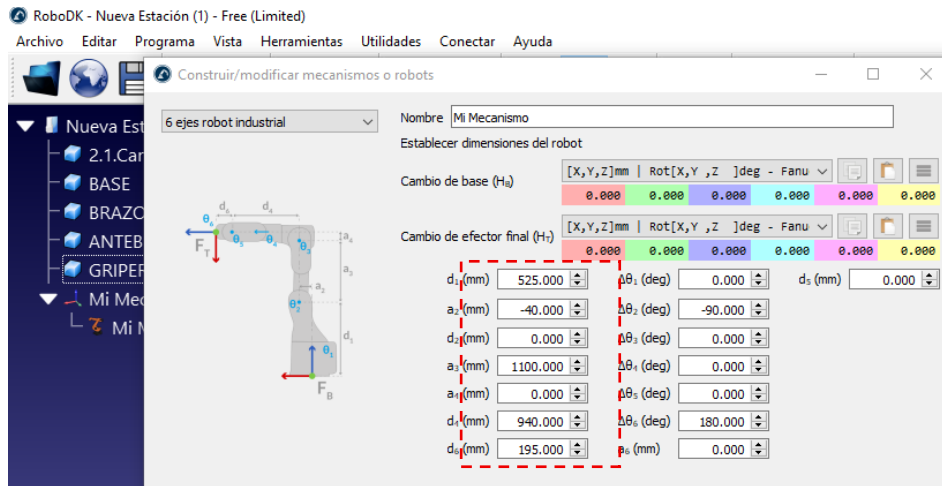


Figura 56. Configuración dimensiones del brazo robótico.

Con el ensamble completo, se trasladan todos los puntos verificados en el SolidWorks a la trayectoria como se observa en la Figura 57.

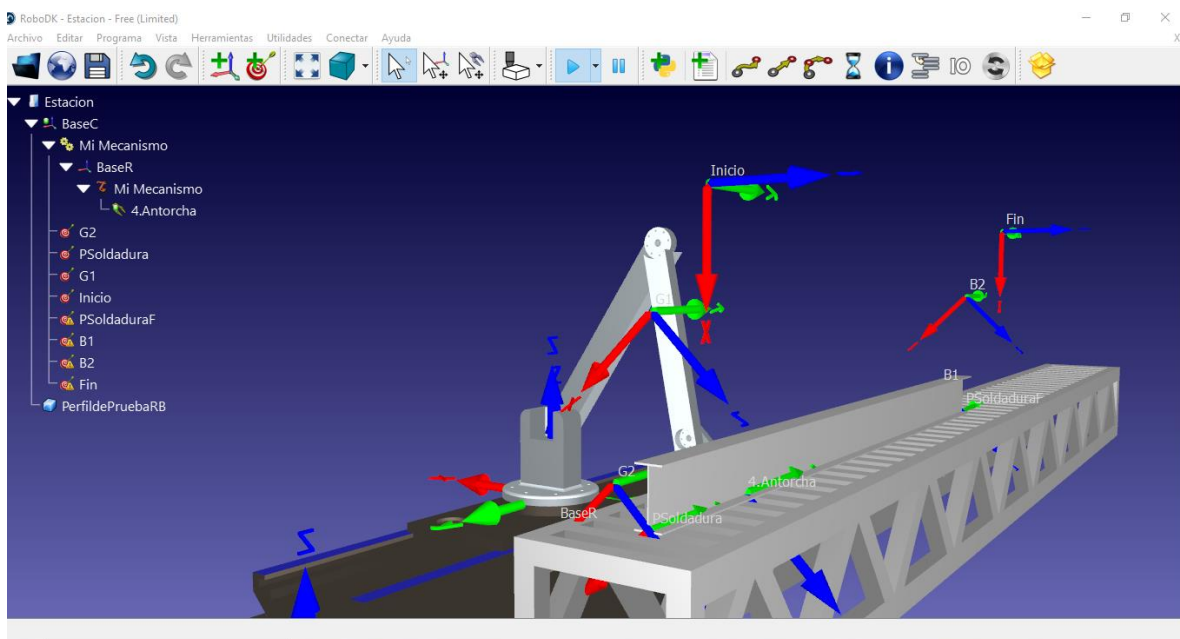


Figura 57. Ubicación de los puntos de trayectoria en RoboDK

Se programa las trayectorias tanto para posicionamiento y avance del robot. La programación puede realizarse en subtrayectos que debe ir cumpliendo el robot. De modo que se obtiene las siguientes trayectorias:

Trayectoria 1: “posición inicio-posición de soldadura”, como se observa en la Figura 58 la posición inicio es donde el brazo robótico arranca, y la trayectoria que debe realizar es hacia la posición de soldadura. También se añade dos puntos de acercamiento G1 y G2 antes de llegar a la posición de soldadura para evitar colisiones con el perfil de acero tipo “I”.

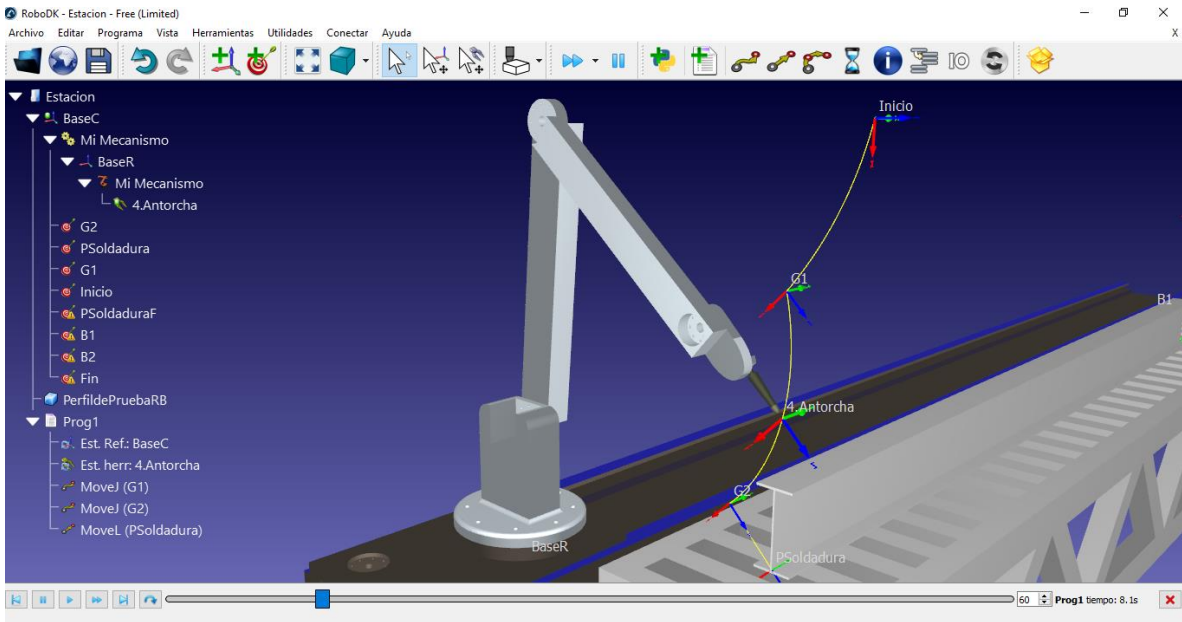


Figura 58. Configuración trayectoria 1

Trayectoria 2: “avance”, una vez que el brazo llego a la posición de soldadura se realiza un avance realizando una trayectoria recta como se observa en la Figura 59.

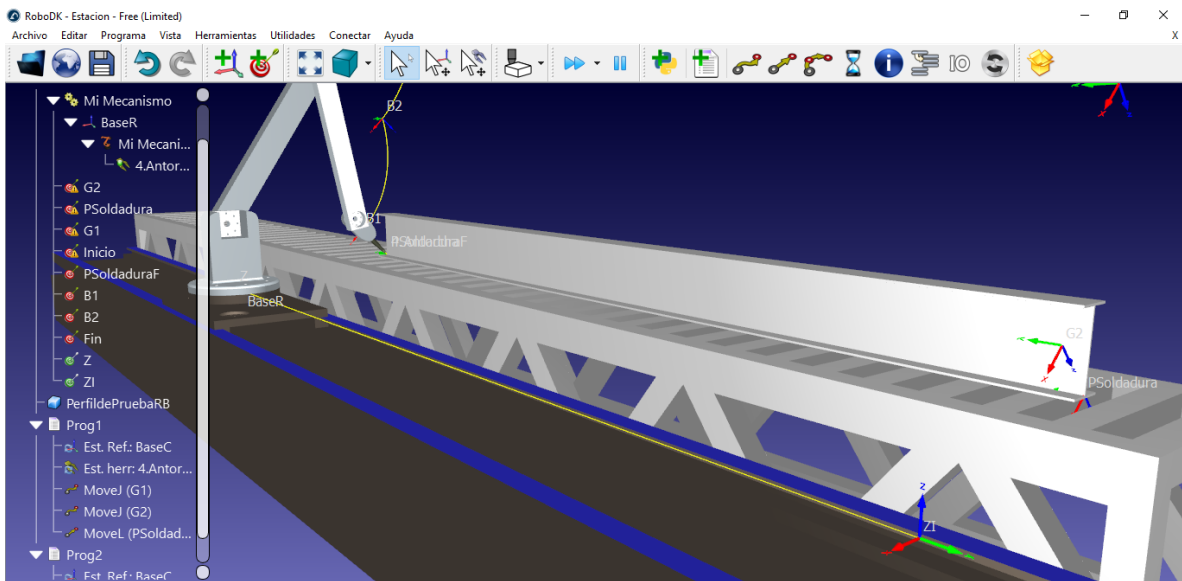


Figura 59. Configuración trayectoria 2

La trayectoria 2 se debe realizar con una velocidad constante para garantizar un cordón de soldadura uniforme. Para esta simulación, como se evidencia en la Figura 60, se ingresa el valor de 500 mm/min que equivale a 8.33mm/s; adicionalmente, se añade la longitud de la trayectoria que sería equivalente a la longitud del perfil de prueba, es decir, 4500 mm.

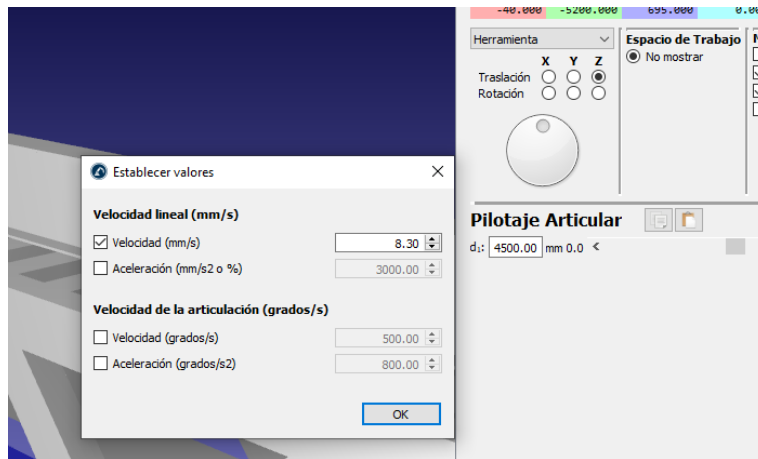


Figura 60. Configuración velocidad de Avance y longitud de la trayectoria

Trayectoria 3: “posición de soldadura final-posición fin” el brazo se aleja nuevamente de la posición de soldadura y se coloca en la posición fin. La trayectoria que se genera se puede visualizar en la Figura 61.

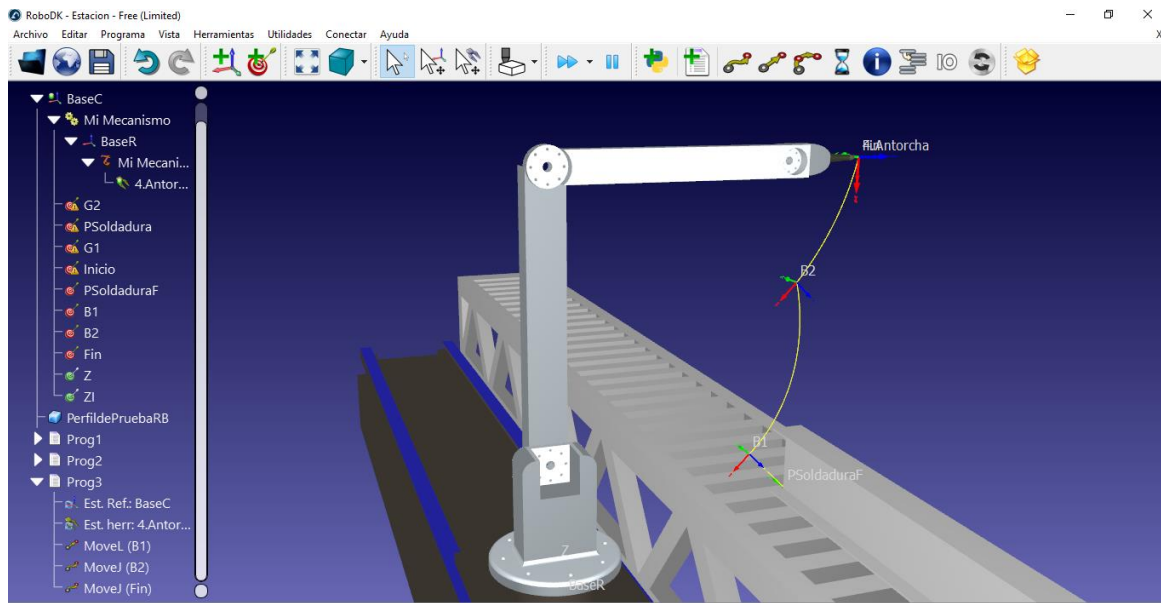


Figura 61. Configuración trayectoria 3

Se unen las tres trayectorias configuradas en un solo programa, se ejecuta, y el robot realiza la trayectoria. La simulación no tiene ningún tipo de colisión y se cumple de manera adecuada en un tiempo de 9 minutos 2.3 segundos como se observa en la Figura 62.

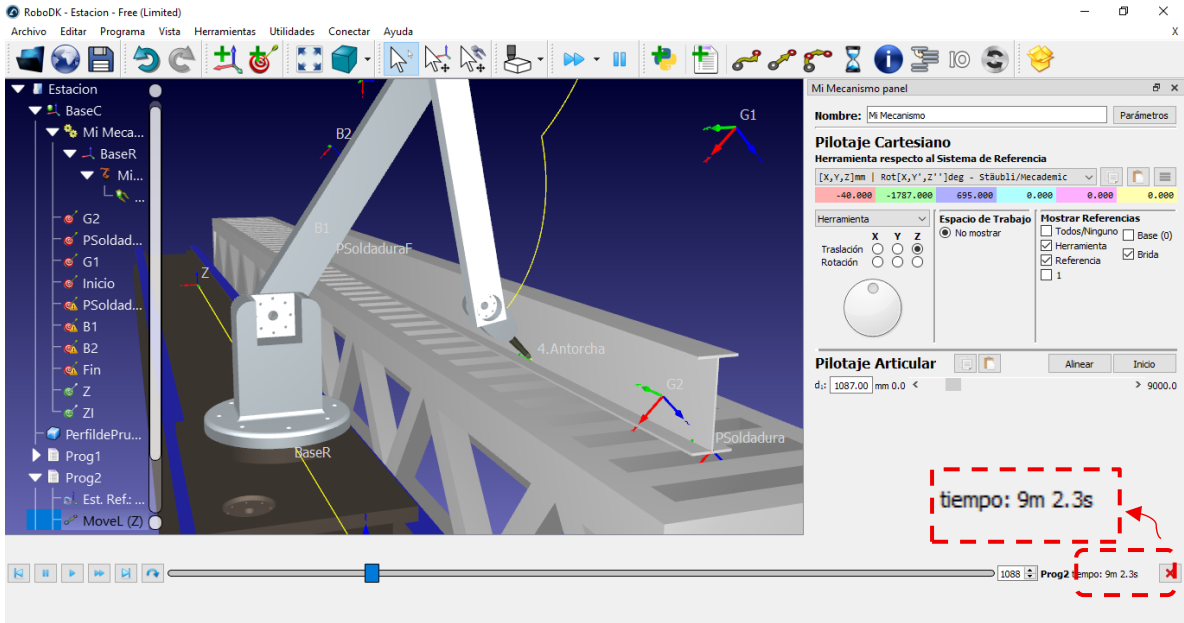


Figura 62. Simulación de trayectoria

Resultados

Selección del método de soldadura

A través de un análisis comparativo de criterios técnicos como continuidad del cordón, velocidad del proceso, y costos, se determinó que el método más adecuado para el proceso es la soldadura MIG. Se toma en consideración principalmente que, mediante la facilidad de configuración de parámetros de corriente, voltaje, y velocidad de avance en la soldadura se logra controlar que aporte de la entrada de calor (heat input) no sea superior a $1.5 [kJ/mm]$ y así evitar deformación en el material base. Es importante destacar que mientras el valor del aporte de calor no sea superado y la temperatura de la pieza no llegue a los $732^{\circ}C$, el proceso de soldadura puede continuar de forma continua.

Selección del tipo de robot soldador

Entre las alternativas evaluadas —robots cartesianos, SCARA y antropomórfico— se determinó que el robot antropomórfico es el más adecuado para el sistema. Su capacidad de movimiento en entornos tridimensionales y su alta precisión lo convierten en la mejor opción para realizar trayectorias complejas. Para el caso específico del sistema de soldadura, se diseñó un robot de 4 ejes fijando el eje de la base sobre un riel para remplazar su movimiento rotacional por uno traslacional, de modo que se pueda controlar de manera más precisa el desplazamiento del robot a largo longitudes variables de 4 a 9 [m] y con velocidades constantes recomendadas para tipo de soldadura MIG entre 300 y 700 [mm/min].

Diseño mecánico y simulación cinemática

Se desarrolló un modelo mecánico detallado del sistema de soldadura, incluyendo el brazo robótico y la mesa de sujeción. A través del análisis de cinemática directa e inversa, se establecieron los parámetros de movimiento necesarios para posicionar la antorcha de soldadura en las ubicaciones requeridas para cada perfil. Se efectuaron análisis estáticos y de esfuerzos en SolidWorks, donde se obtuvo como resultado un factor de seguridad de $FDS = 5.3$ que indica que diseño mecánico es funcional. Se terminaron los valores de torque necesarios en cada articulación del robot y con base en estos resultados, se seleccionaron servomotores industriales (marca Beckhoff) con capacidades de torque y velocidad acordes a los requerimientos de diseño.

Diseño del sistema eléctrico y de control

Se diseñó un sistema de control basado en un PLC CX5120 Embedded PC, complementado con una HMI CP66xx-xxxx-0020. Este sistema permite al operador ingresar las dimensiones deseadas del perfil y gestionar de forma intuitiva el proceso de soldadura. Cada uno de los elementos de control fueron seleccionados del mismo proveedor Beckhoff y todos cuentan con una comunicación EtherCAT garantizando que la interacción entre los dispositivos de control funcione de manera adecuada.

Validación del sistema mediante simulaciones

Se realizaron simulaciones en software especializado para verificar la precisión de los movimientos del brazo robótico. Se comprobó que el sistema puede adaptarse a una variedad de perfiles con dimensiones mínimas y máximas definidas en el diseño (peraltes entre 100 [mm] y 400[mm], y anchos de patín entre 50 [mm]y 250 [mm]).

Optimización de tiempo y precisión del proceso

El sistema propuesto garantiza una reducción significativa del tiempo de ensamblaje respecto a métodos manuales, al tiempo que mejora la calidad y fiabilidad de las uniones soldadas, permitiendo que los perfiles trabajen a su capacidad estructural completa sin sobredimensionamientos innecesarios. En la prueba de simulación final se obtuvo que el tiempo que el robot soldador le tomará hacer la trayectoria de soldadura será de 9 minutos y 2.3 segundos.

Además, se puede considerar que si dentro de algún punto de la trayectoria el perfil excede la temperatura permitida de 732°C solamente se necesitaría un tiempo de 10.54 segundos para continuar con la soldadura. De modo que si el perfil de prueba se soldará por tramos de 400 [mm] cómo se realiza generalmente en el proceso manual le tomará 11 paradas y el tiempo de soldadura de toda la trayectoria sería de 10 minutos y 58.2 segundos

Conclusiones

- La obtención de los parámetros de diseño se puede dividir en dos partes: por un lado, las dimensiones de trabajo del perfil de soldadura; y por otro, los parámetros de soldadura que permitan una mejor adaptación al sistema. En primer lugar, las dimensiones del perfil de acero tipo “I” deben ajustarse a las necesidades específicas del proyecto para evitar sobredimensionamientos. Las longitudes de los perfiles dependen principalmente de las distancias entre columnas y, según la encuesta realizada para la obtención de parámetros para la fabricación de perfiles de acero tipo “I”, se determinó que las longitudes típicas preferidas oscilan entre 3 y 9 metros. De hecho, el 100 % de los encuestados eligieron rangos dentro de este intervalo, descartando perfiles menores a 3 metros o mayores a 9 metros de longitud. La segunda consideración corresponde al proceso de soldadura. Según los resultados obtenidos, cuando los perfiles se fabrican a medidas específicas, usualmente no se realiza una soldadura continua, lo cual requiere el uso de factores de seguridad más altos, en el orden de 3 a 5. Sin embargo, al aplicar una soldadura continua, se logra una mayor confiabilidad estructural en los perfiles fabricados de medidas no estandarizadas, permitiendo reducir el factor de seguridad a valores convencionales, como 1.5.
- El diseño mecatrónico desarrollado cumple satisfactoriamente con los parámetros dimensionales establecidos y se ajusta a las recomendaciones de la American Welding Society (AWS) para el proceso de soldadura MIG. En el diseño mecánico del ensamblaje del brazo robótico, se empleó una simulación utilizando la aleación de aluminio 6061. Los resultados de las pruebas estáticas arrojaron un factor de seguridad elevado de 5.3 y una deformación unitaria mínima de 3.41×10^{-6} , lo que permite considerar al diseño como estructuralmente confiable. Asimismo, la selección de los componentes eléctricos y de control permite la ejecución de un cordón de soldadura continuo. Para lograrlo, se definieron los parámetros óptimos del proceso MIG, estableciendo velocidades de avance entre 300 y 700 mm/min. Según la norma AWS A5.18, en ese rango de velocidades la corriente no debe superar los 270 A, lo cual es esencial para garantizar que el aporte de calor no exceda los 1.5 kJ/mm. Estos parámetros son fundamentales para asegurar una soldadura continua, eficiente y dentro de los márgenes de seguridad térmica permitidos.

- Mediante el uso del software MATLAB, se logró obtener la cinemática directa e inversa del brazo robótico. Posteriormente, utilizando SolidWorks, se verificaron los valores de $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ y d , obtenidos en la cinemática inversa, los cuales corresponden al posicionamiento de los motores. De esta manera, se garantiza que el sistema de soldadura es capaz de alcanzar los puntos establecidos y realizar la trayectoria requerida de manera precisa. Para el perfil de prueba, la trayectoria fue ejecutada sin ningún tipo de colisión y con una soldadura continua a una velocidad constante de 500 mm/min. A esta velocidad, y de acuerdo con la curva de relación entre velocidad y corriente de soldadura, es posible utilizar electrodos con diámetros de hilo de 1.0 mm y 1.2 mm, sin que la corriente supere los 270 A establecidos por la norma AWS A5.18. Bajo estos parámetros, y con un voltaje de soldadura de 29.5 V, se obtuvo un aporte de calor de 0.956 kJ/mm, lo cual garantiza que no se exceda el límite térmico del perfil, permitiendo una soldadura continua segura.

La simulación de la trayectoria de prueba arrojó un tiempo total de 9 minutos y 2.3 segundos. Además, se estimó que, en caso de que en algún punto de la trayectoria la temperatura del perfil alcance su límite de 732 °C, sería suficiente una pausa de 10.54 segundos para retomar la soldadura sin comprometer la integridad del material. Si se decidiera realizar la soldadura en tramos de 400 mm, como se hace comúnmente en el proceso manual, el sistema requeriría 11 pausas, y el tiempo total de soldadura sería de 10 minutos y 58.2 segundos. En ambos casos, ya sea mediante soldadura continua o por tramos, se obtienen tiempos de ejecución muy eficientes

Recomendaciones

- Ampliar los escenarios de simulación con distintas combinaciones de dimensiones de perfiles tipo “I”, lo que permitirá validar la versatilidad y adaptabilidad del sistema ante una gama más amplia de requerimientos estructurales no estandarizados.
- Lograr simular la junta soldada con la trayectoria encontrada para verificar la calidad de la soldadura, o a su vez, llevar a cabo la soldadura con esos parámetros para evidenciar que se cumple con una soldadura adecuada.
- Al obtener una implementación se debería realizar pruebas sobre los perfiles de acero tipo “I” no estandarizados de modo que se pueda comparar sus propiedades mecánicas con los perfiles comerciales.
- Una vez que se realicen las pruebas sobre los perfiles de acero tipo “I”, se puede ampliar la programación para ir modificando parámetros de soldadura de acuerdo con los resultados, como podría ser, encontrar una velocidad de avance en la soldadura real que se adapte de mejor manera al sistema que la velocidad teórica.

Bibliografía

- [1] R. D, «DocZ,» Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.udocz.com/apuntes/45189/relacion-de-resistencia-de-vigas-y-columnas>.
- [2] DIPAC, «Catálogo Digital DIPAC,» [En línea]. Available: <https://dipacmanta.com/producto/vigas/ipe/ipe/>.
- [3] H. S. Bueno, «Manual para el proceso de estructuras de acero A-36,» p. 12.
- [4] C. E. Official, *PEB System Line Process (English Version.)*, 2020.
- [5] I. D. 360, «Soldadura robotizada,» DIGIXEM, 12 Octubre 2022 . [En línea]. Available: <https://www.innovaciondigital360.com/i-a/robots-que-son-como-funcionan-y-los-modelos-disponibles/>.
- [6] H. D. y R. A. F. YOUNG, *Física Universitaria*, Decimo segunda ed., vol. 1, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2009, p. 108.
- [7] F. P. J. E. R. D. J. T. & M. D. F. Beer, *Mecánica de materiales*, New York: McGraw-Hill Education, 2015, pp. 302-306.
- [8] M. Figueroa, «Física,» Miami,FL: Firmas Press 2010. [En línea]. Available: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/ereader/bibliotecaups/36340?page=19>.
- [9] A. Kassimali, «Análisis estructural,» Cengage Learning 2015. [En línea]. Available: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/ereader/bibliotecaups/40027?page=26>.
- [10] A. Nieto Vigil, «Soldadura,» Grupo Editorial Éxodo 2012. [En línea]. Available: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/ereader/bibliotecaups/128559?page=12>.
- [11] M., Martinez, «Procesos de soldadura manuales: conociendo la velocidad de avance y sus efectos,» MILLER, 4 2023. [En línea]. Available: <https://millerweldslatam.com/articulos/procesos-de-soldadura-manuales-conociendo-la-velocidad-de-avance-y-sus-efectos/>.

- [12] G., Jose, «Corriente Alterna vs Corriente Directa en Soldadura,» Materiales Alicante, [En línea]. Available: <https://materialesalicante.com/corriente-alterna-vs-corriente-directa-en-soldadura/>.
- [13] TECNOLOGÍAS EN SOLDADURA, «Terminales en una soldadora,» 26 03 2021. [En línea]. Available: <https://tecnologiasensoldadura.com.mx/lo-que-deben-saber-sobre-la-polaridad-directa-e-inversa-en-soldadoras-inverter/>.
- [14] BF México, «Soldadura - Automatización- Robotica,» 2024. [En línea]. Available: <https://bfmx.com/soldadura-por-resistencia/parametros-de-soldadura-que-debes-regular/>.
- [15] A. W. Society, *Norma de Términos y Definiciones de Soldadura*, Miami, Florida, 2001.
- [16] O, Lorenzo, *Estudio de los procesos de soldadura GTAW y SMAW en la industria naval: Análisis casos prácticos*, Barcelona, 2019.
- [17] Instituto Técnico Catalán de la Soldadura, «Soldadura MIG/MAG,» 02 Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://www.itsoldadura.org/es/noticia/articulos/soldadura-migmag>.
- [18] A, Lazaro, «SOLDEO POR ARCO SUMERGIDO,» Madrid.
- [19] O. R. Pérez, «METALURGIA DE LA SOLDADURA,» La Habana: Editorial Universitaria, 2013. [En línea]. Available: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/ereader/bibliotecaups/100767?page=22>.
- [20] C. Álvarez, «Introducción a la robótica,» Primera Edición. Madrid: Dextra Editorial, 2017. [En línea]. Available: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/ereader/bibliotecaups/258081?page=23>.
- [21] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Cuarta ed., United Kingdom: Pearson Education Limited, 2022.
- [22] ADS Robotics, «Soldadura robotizada,» 20 Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://www.edsrobotics.com/blog/soldadura-robotizada/>.
- [23] TECNOLOGÍA PARA LA INDUSTRIA, «Robot de soldadura industrial: Tipos, usos, funciones, ejemplos, fabricantes y beneficios,» Ventas de alto Octanaje, 2024. [En línea].

Available: <https://tecnologiaparalaindustria.com/robot-de-soldadura-industrial-tipos-usos-funciones-ejemplos-fabricantes-y-beneficios/#pp-toc-5oban4eqwrvc-anchor-5>.

- [24] Aceropedia, «Acero Estructural,» 2023. [En línea]. Available: <https://aceropedia.com/tipos-de-acero/acero-estructural/>.
- [25] Acero Grado Estructural, *Aceros especiales para aplicaciones industriales*, Bogotá: Lámina A36, 2024.
- [26] DIPAC MANTA, «Catalogo general de productos,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.dipacmanta.com/Catalogos-descargas/catalogo-2020.pdf>.
- [27] R. Aguiar, J. Vielma y E. Mora, «DISEÑO Y ANÁLISIS DE VIGAS DE ACERO CON SECCIÓN TIPO "I",» *Ciencia*, vol. 1, p. 24, 2017.
- [28] Channakorn Engineering, «PEB System Line Process (English Version.),» 2020. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=Gw1Y3YUZ2Io>.
- [29] A. W. Society, *Codigo de Soldadura Estructural - Acero*, Miami, Florida, 2010.
- [30] Global Invent, «Perfiles W, Vigas H, Vigas I. Queretaro México,» 15 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=tv6vE5bjvM8&t=342s>.
- [31] Soldadores inverter, «Tipos de soldadura,» [En línea]. Available: <https://soldadores-inverter.com/tipos-de-soldadura/>.
- [32] Acindec S.A., «PROCESO DE SOLDADURA (SAW) - ARCO SUMERGIDO,» 08 10 2020. [En línea]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=rxGpO3Hu_mA&t=7s.
- [33] A. W. Society, *Welding Handbook: Science & Technology*, Miami, Florida, 2001.
- [34] A. W. Society, *SPECIFICATION FOR CARBON STEEL ELECTRODES AND RODS FOR GAS SHIELDED ARC WELDING*, Miami, Florida, 2021.
- [35] Shane, «MachineMFG, Welding voltage and current,» 05 Diciembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.machinemfg.com/es/welding-voltage-and-current/>.
- [36] B. A, *Fundamentos de robótica*, 2 ed., España: McGraw-Hill, 2012.

- [37] AMS LATAM, «Handling - Robots Cartesianos,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.ams-latam.com/es/robots-cartesianos/>.
- [38] Revista de Robots, «¿Qué es un robot Scara? Aplicaciones, fabricantes y ejemplos,» 23 5 2023. [En línea]. Available: <https://revistaderobots.com/robots-y-robotica/robot-scara-articulados-caracteristicas-y-marcas/>.
- [39] MakeBlock, «Robots de 6 ejes para la automatización industrial,» 2025. [En línea]. Available: <https://makeblock.com.ar/robotica-ejes-principales/>.
- [40] H. Rodríguez, «TUTORIAL No. 110: Propiedades Mecánico-Químicas del Aluminio,» Inge Mecanica, [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn110.html>.
- [41] Tasuns Compuesto Technology Co., Ltd, «Aplicación de materiales de fibra de carbono en brazos robóticos,» 13 02 2019. [En línea]. Available: <https://www.t-composites.net/info/application-of-carbon-fiber-materials-on-robot-32484415.html>.
- [42] Carbone, «Maquinas de Soldadura,» 2022. [En línea]. Available: <https://carbonestore.com/pages/catalogos-carbone-total>.

Anexos

Anexo 1. Planos

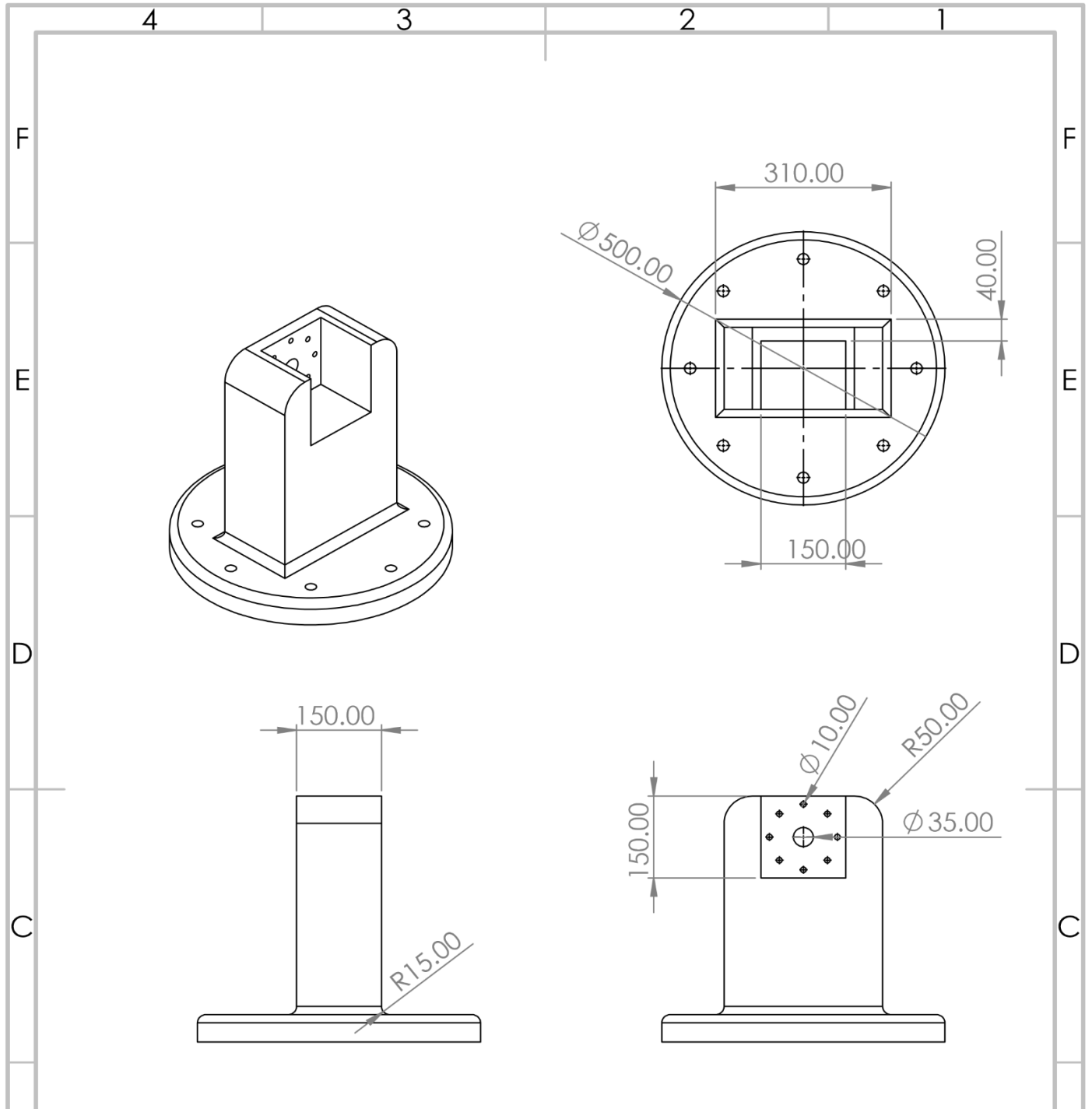
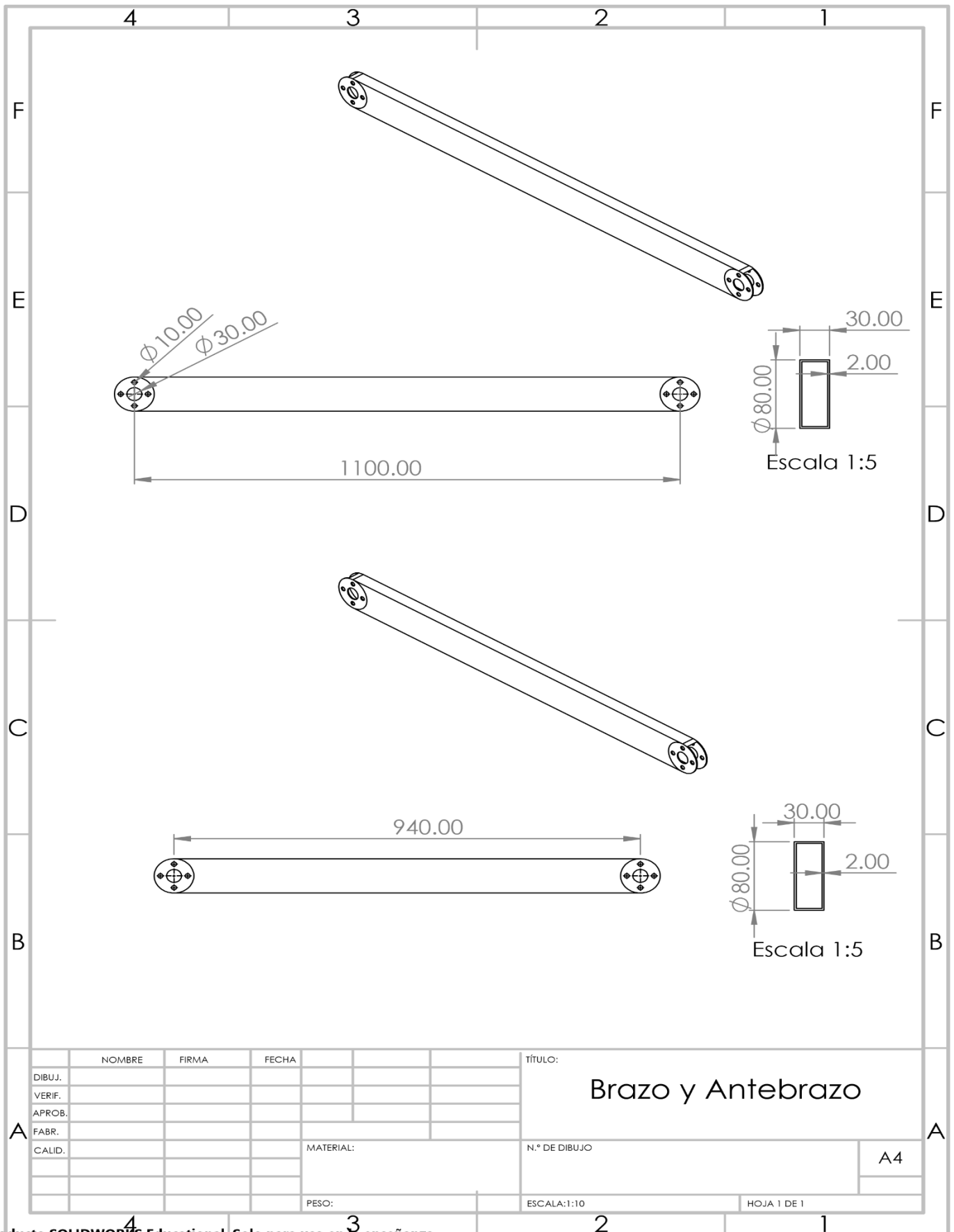
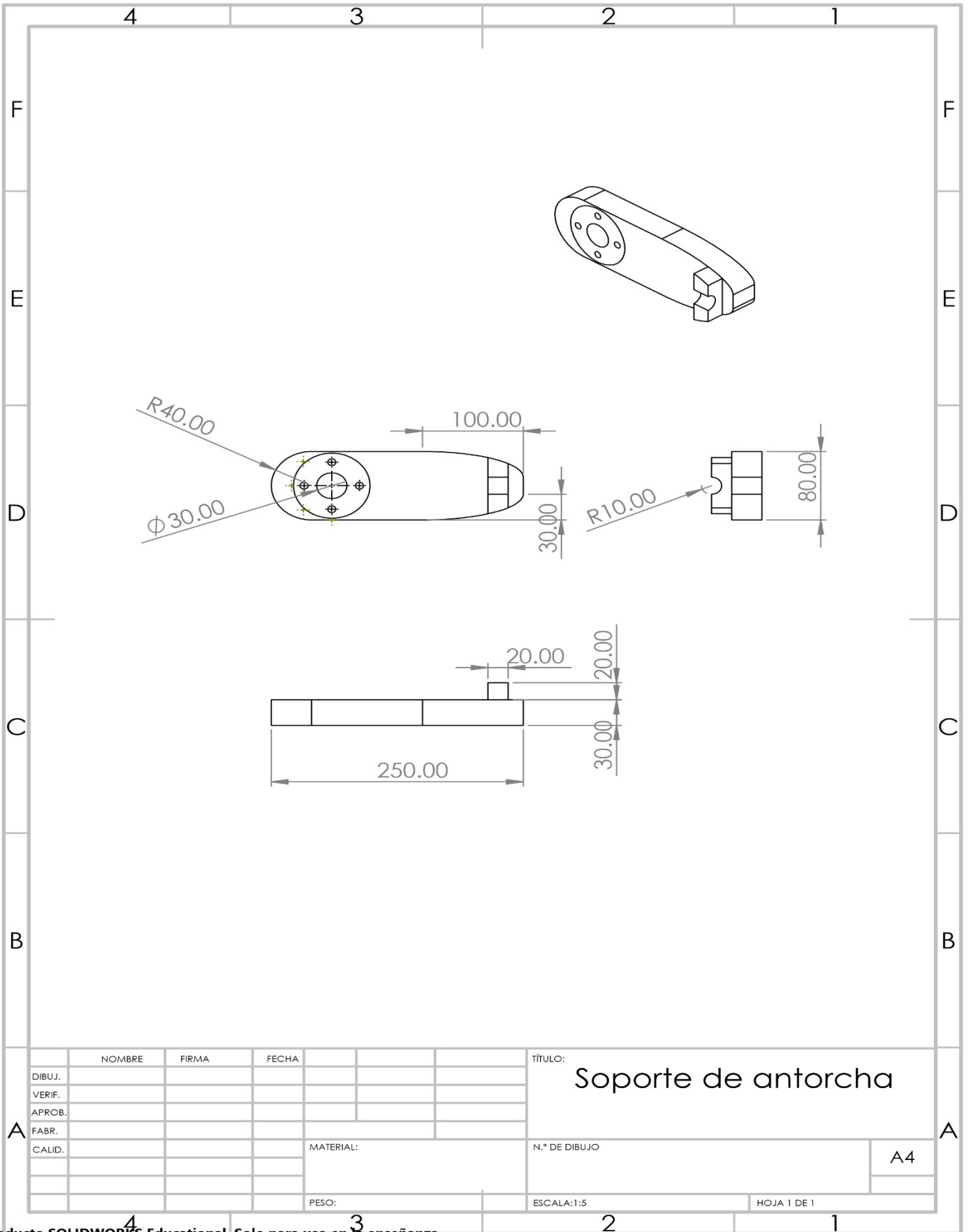


Figura 63. Plano base del robot

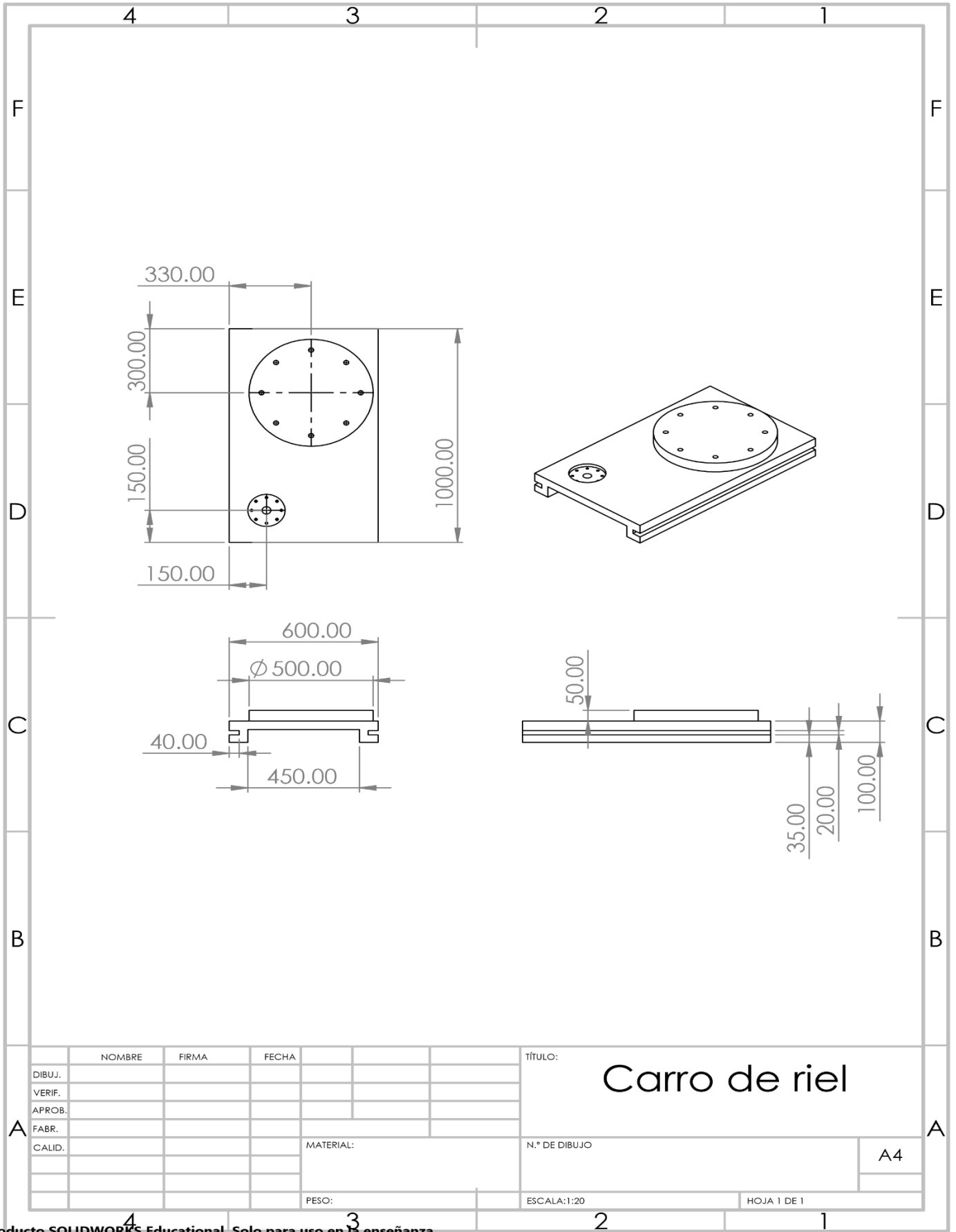


Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Figura 64. Plano brazo y antebrazo del robot

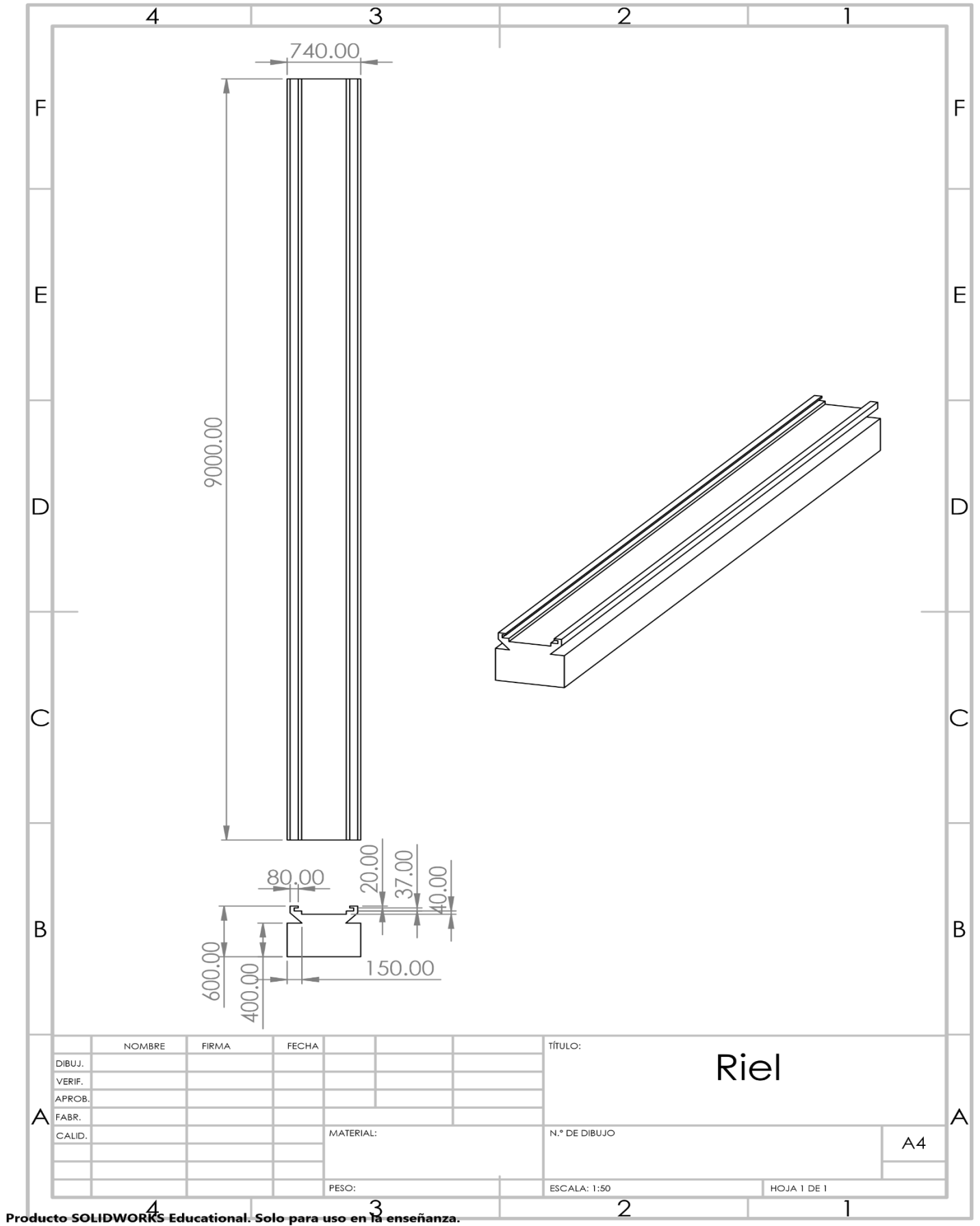


| | | | | | | | | |
|--------|--------|-------|-------|--|-----------|---------------|---------------------|----|
| | NOMBRE | FIRMA | FECHA | | | TÍTULO: | Soporte de antorcha | |
| DIBUJ. | | | | | | | | |
| VERIF. | | | | | | | | |
| APROB. | | | | | | | | |
| FABR. | | | | | | | | |
| CALID. | | | | | MATERIAL: | N.º DE DIBUJO | | A4 |
| | | | | | PESO: | ESCALA:1:5 | HOJA 1 DE 1 | |



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Figura 66. Plano carro de riel



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Figura 67. Plano del riel

Anexo 2.

AM8033-wEyz

<http://www.beckhoff.com/am8033-weyz>

AM8033-wEyz | Servomotor 3.20 Nm (M₀), F3 (72 mm)

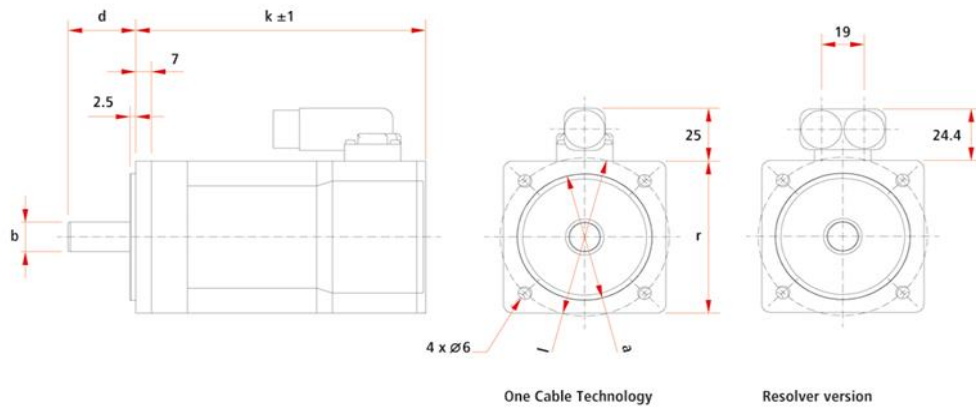


Technical data

| Data for 400 V AC | AM8033-wEyz |
|---------------------------------|--|
| Motor type | permanent magnet-excited three-phase synchronous motor |
| Nominal voltage | 100...480 V AC |
| Standstill torque | 3.20 Nm |
| Rated torque | 2.98 Nm |
| Peak torque | 17.19 Nm |
| Rated speed | 3000 min ⁻¹ |
| Rated power | 0.94 kW |
| Standstill current | 2.10 A |
| Peak current | 12.9 A |
| Torque constant | 1.52 Nm/A |
| Rotor moment of inertia | 1.23 kgcm ² |
| Motor feedback | resolver, single-turn absolute encoder OCT, 18 bit, single-turn or multi-turn absolute encoder, electronic nameplate OCT, 24 bit, SIL 2-capable, single-turn or multi-turn absolute encoder, electronic nameplate OCT, 24 bit, SIL 2-capable, single-turn or multi-turn absolute encoder, electronic nameplate, B/SSD OCT, EnDat [®] 3, 19 bit, SIL 3-capable, single-turn or multi-turn absolute encoder, electronic nameplate |
| Cooling | convection |
| Connection technology | itec [®] plug |
| Ambient temperature (operation) | 5...40°C |
| Approvals/markings | CE, cURus |

All electric quantities are RMS values.

| Housing data | AM80xx |
|-------------------|--|
| Protection rating | IP54, IP65 (shaft seal) |
| Design form | flange-mounted according to IM B5, IM V1, IM V3 |
| Material | aluminum |
| Coating/surface | acrylic powder-coated, dark gray, similar to RAL7016 |



| Dimensions | AM8033-wEyz |
|-------------------|-------------|
| a | 60 j6 |
| b | 14 k6 |
| d | 30 mm |
| l | 75 mm |
| r | 72 mm |
| k (without brake) | 180 mm |
| k (with brake) | 229 mm |

Figura 68. Hoja técnica Servomotor 1

Anexo 3

AM8073-wNyz

<https://www.beckhoff.com/am8073-wnyz>

AM8073-wNyz | Servomotor 72.6 Nm (M₀), F7 (194 mm)

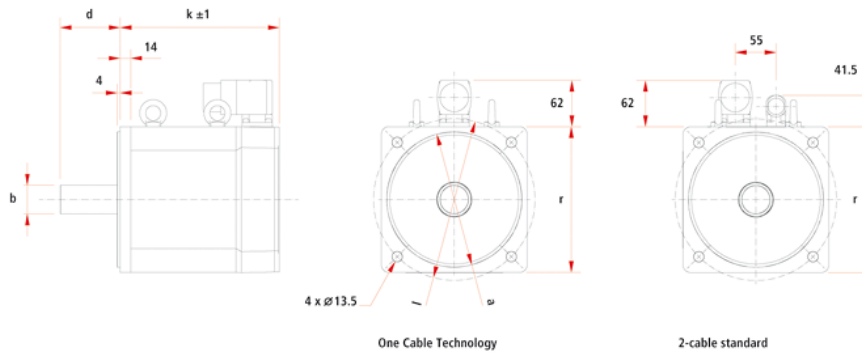


Technical data

| Data for 400 V AC | AM8073-wNyz |
|---------------------------------|--|
| Motor type | permanent magnet-excited three-phase synchronous motor |
| Nominal voltage | 100...480 V AC |
| Standstill torque | 72.6 Nm |
| Rated torque | 58.5 Nm |
| Peak torque | 275 Nm |
| Rated speed | 1000 min ⁻¹ |
| Rated power | 6.13 kW |
| Standstill current | 14.7 A |
| Peak current | 51.3 A |
| Torque constant | 4.93 Nm/A |
| Rotor moment of inertia | 135 kgcm ² |
| Motor feedback | resolver, single-turn absolute encoder HIPERFACE [®] , multi-turn absolute encoder OCT, 18 bit, single-turn or multi-turn absolute encoder, electronic nameplate OCT, 24 bit, SIL 2-capable, single-turn or multi-turn absolute encoder, electronic nameplate OCT, 24 bit, SIL 2-capable, single-turn or multi-turn absolute encoder, electronic nameplate, B/SSD OCT, EnDat [®] 3, 19 bit, SIL 3-capable, single-turn or multi-turn absolute encoder, electronic nameplate |
| Cooling | convection |
| Connection technology | M40 speedtec [®] plug |
| Ambient temperature (operation) | 5...40°C |
| Approvals/markings | CE, cURus |

All electric quantities are RMS values.

| | |
|--------------------------|--|
| Housing data | AM80xx |
| Protection rating | IP54, IP65 (shaft seal) |
| Design form | flange-mounted according to IM B5, IM V1, IM V3 |
| Material | aluminum |
| Coating/surface | acrylic powder-coated, dark gray, similar to RAL7016 |



| Dimensions | AM8073-wNyz |
|--------------------------|-------------|
| a | 180 j6 |
| b | 38 k6 |
| d | 80 mm |
| l | 215 mm |
| r | 194 mm |
| k (without brake) | 326 mm |
| k (with brake) | 398.5 mm |

Figura 69. Hoja técnica Servomotor 2 y 3

Anexo 4

AM8033-wFyz

<https://www.beckhoff.com/am8033-wfyz>

AM8033-wFyz | Servomotor 3.22 Nm (M₀), F3 (72 mm)

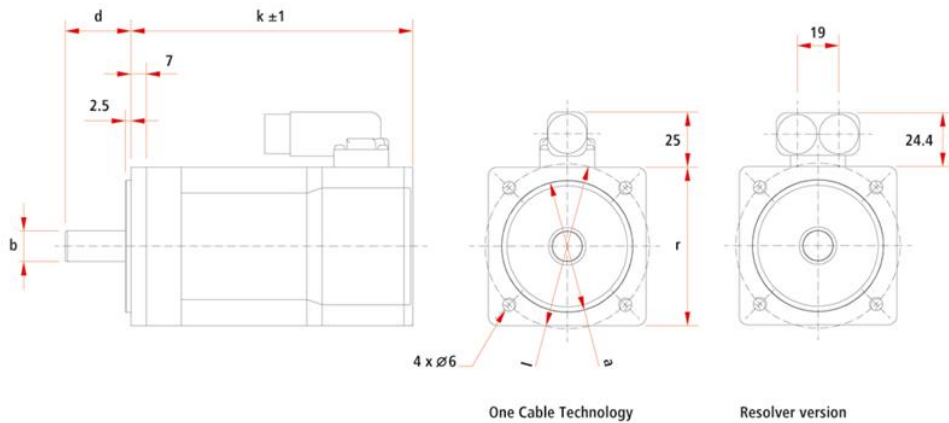


Technical data

| Data for 400 V AC | AM8033-wFyz |
|---------------------------------|--|
| Motor type | permanent magnet-excited three-phase synchronous motor |
| Nominal voltage | 100...480 V AC |
| Standstill torque | 3.22 Nm |
| Rated torque | 2.70 Nm |
| Peak torque | 17.71 Nm |
| Rated speed | 6000 min ⁻¹ |
| Rated power | 1.70 kW |
| Standstill current | 4.10 A |
| Peak current | 24.6 A |
| Torque constant | 0.78 Nm/A |
| Rotor moment of inertia | 1.23 kgcm ² |
| Motor feedback | resolver, single-turn absolute encoder OCT, 18 bit, single-turn or multi-turn absolute encoder, electronic nameplate OCT, 24 bit, SIL 2-capable, single-turn or multi-turn absolute encoder, electronic nameplate OCT, 24 bit, SIL 2-capable, single-turn or multi-turn absolute encoder, electronic nameplate, B/SSD OCT, EnDat [®] 3, 19 bit, SIL 3-capable, single-turn or multi-turn absolute encoder, electronic nameplate |
| Cooling | convection |
| Connection technology | itec [®] plug |
| Ambient temperature (operation) | 5...40°C |
| Approvals/markings | CE, cURus |

All electric quantities are RMS values.

| | |
|-------------------|--|
| Housing data | AM80xx |
| Protection rating | IP54, IP65 (shaft seal) |
| Design form | flange-mounted according to IM B5, IM V1, IM V3 |
| Material | aluminum |
| Coating/surface | acrylic powder-coated, dark gray, similar to RAL7016 |



| Dimensions | AM8033-wFyz |
|-------------------|-------------|
| a | 60 j6 |
| b | 14 k6 |
| d | 30 mm |
| l | 75 mm |
| r | 72 mm |
| k (without brake) | 180 mm |
| k (with brake) | 229 mm |

Figura 70. Hoja técnica Servomotor 4

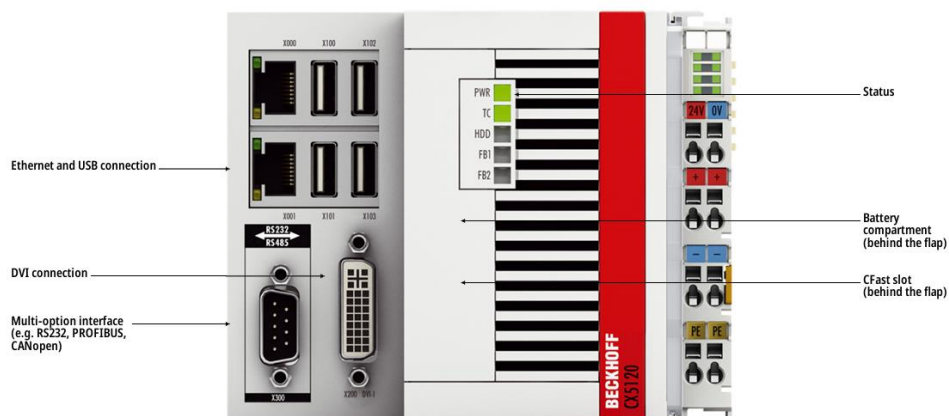
Anexo 5

CX5120

<https://www.beckhoff.com/cx5120>



CX5120 | Embedded PC with Intel Atom® E3815



Technical data

| Technical data | CX5120 |
|----------------------------|---|
| Processor | Intel Atom® E3815, 1.46 GHz |
| Number of cores | 1 |
| Flash memory | slot for CFast card and microSD card, cards not included |
| Main memory | 2 GB DDR3 RAM (not expandable) |
| 1-second UPS | integrated (1 MB on CFast card) |
| Interfaces | 2 x RJ45 10/100/1000 Mbit/s, 1 x DVI-I, 4 x USB 2.0, 1 x optional interface |
| Cooling | passive |
| Diagnostics LED | 1 x power, 1 x TC status, 1 x flash access, 2 x bus status |
| Clock | internal battery-backed clock for time and date (battery exchangeable) |
| Operating system | Windows Embedded Compact 7, Windows Embedded Standard 7, Windows 10 IoT Enterprise 2016 LTSB, Windows 10 IoT Enterprise 2019 LTSC, Windows 10 IoT Enterprise 2021 LTSC, TwinCAT/BSD |
| Control software | TwinCAT 2 runtime TwinCAT 3 runtime (XAR) |
| I/O connection | E-bus or K-bus, automatic recognition |
| Power supply | 24 V DC (-15%/+20%) |
| Current supply E-bus/K-bus | 2 A |

| | |
|---|---|
| Max. power consumption | 11 W |
| Max. power consumption (with loading UPS) | 18 W |
| Max. power consumption E-bus/K-bus | 10 W (5 V/max. 2 A) |
| Weight | approx. 975 g |
| Dimensions (W x H x D) | 122 mm x 100 mm x 92 mm |
| Relative humidity | 95%, no condensation |
| Operating temperature | -25...+60°C |
| Storage temperature | -40...+85°C |
| Vibration/shock resistance | conforms to EN 60068-2-6/EN 60068-2-27 |
| EMC immunity/emission | conforms to EN 61000-6-2/EN 61000-6-4 |
| Protection rating | IP20 |
| Approvals/markings | CE, UL, with CX2900-0107 ordering option: ATEX, IECEx, cFMus |
| Ex marking | <p>ATEX: II 3 G Ex nA IIC T4 Gc II 3 D Ex tc IIIC T135 °C Dc</p> <p>IECEx: Ex nA IIC T4 Gc Ex tc IIIC T135 °C Dc</p> <p>cFMus: Class I, Division 2, Groups A, B, C, D Class I, Zone 2, AEx ec IIC T4 Gc</p> |
| TwinCAT 3 platform level | Performance (40); please see here for an overview of all the TwinCAT 3 platform level |

Ordering information

| | |
|--|---|
| <p>S = operating system options</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 = no operating system 1 = Windows Embedded Compact 7 2 = Windows Embedded Standard 7 P 32 bit 3 = Windows Embedded Standard 7 P 64 bit 4 = Windows 10 IoT Enterprise 2016 LTSC 32 bit 5 = Windows 10 IoT Enterprise 2016 LTSC 64 bit 6 = Windows 10 IoT Enterprise 2019 LTSC 32 bit 7 = Windows 10 IoT Enterprise 2019 LTSC 64 bit 8 = TwinCAT/BSD 9 = Windows 10 IoT Enterprise 2021 LTSC 64 bit | <p>T = TwinCAT software licenses</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 = no TwinCAT 1 = equipped with TwinCAT 2 PLC runtime 2 = equipped with TwinCAT 2 NC PTP runtime 3 = equipped with TwinCAT 2 NC I runtime 5 = equipped with TwinCAT 3 runtime (XAR), no licenses included |
|--|---|

CX51x0-01ST

Figura 71. Hoja técnica Controlador

Anexo 6

CP66xx-xxxx-0020

<https://www.bedkhoff.com/cp66ix-xxxx-0020>

CP66xx-xxxx-0020 | Panel PC with Arm® Cortex®-A8



Technical data

| Technical data | CP66xx-xxxx-0020 | Options |
|---------------------------|---|--|
| Device type | Built-in Panel PC | |
| Housing | aluminum front with sheet-steel rear cover | stainless steel housing with flush mounted touch screen at 12", 15" and 19" display without front keyboard |
| Slots for hard disk/flash | 1 slot for microSD | |
| Installation | pull-out clamping levers for fast installation without loose parts | |
| Protection rating | front side IP65, rear side IP20 | |
| Operating temperature | 0...55°C | |
| Display size/resolution | 5.7" 640 x 480, 6.5" 640 x 480, 12" 800 x 600, 15" 1024 x 768 or 19" 1280 x 1024 | |
| Touch screen | single-finger touch screen or touch pad | |
| Front keyboard | alphanumeric or numerical PC keyboard in US layout or only function keys, each variant with 10 PLC special keys and LEDs or front laminate without keys, only display | |
| Processor | Arm® Cortex®-A8, 1 GHz (TC2, TC3: 30) | |
| Motherboard | 3½-inch motherboard | |
| Memory | 1 GB DDR3 RAM | |
| Graphic | integrated in the processor | |
| Ethernet | 1 x 10/100BASE-T on-board | |
| EtherCAT | 1 x on-board | |
| Hard disks/flash | 512 MB microSD card | up to 16 GB microSD card |
| NOVRAM | 128 kB | |
| Interfaces | 2 x USB 2.0, 1 x RS232 | |
| Power supply | 24 V DC | 1-second UPS |
| Operating system | Windows Embedded Compact 7, English | |

Figura 72. Hoja técnica HMI

MDX™ Series

Antorchas para soldadura MIG (GMAW) refrigeradas por aire



Resumen de características

Aplicaciones industriales

Carrocerías de automóviles
Fabricación
Pasatiempos
Mantenimiento y reparación

Procesos

MIG (GMAW)
MIG pulsada (GMAW-P)
Núcleo fundente (FCAW)

Salida nominal MDX-100: 100 A, MDX-250: 250 A

Ciclo de trabajo 100 % con gas CO₂,
60 % con gas mezclado

Peso neto 2,9–7,6 lb (1,3–3,4 kg)

La mejor antorcha de soldadura es aquella por la que no debe preocuparse, ya que es cómoda, duradera y cumple su objetivo. Las antorchas para soldadura MIG son exactamente eso. El nuevo mango ergonómico fabricado con sobremoldeado mejora el agarre, y el prensaestopas trasero giratorio reduce el cansancio del soldador. Los consumibles AccuLock™ de la antorcha con tubo de doble cierre y carga frontal garantizan una llama suave y uniforme para lograr un funcionamiento fiable.



Compatibilidad con productos Miller



Alimentación de alambre superior



Mango duradero y ergonómico

Figura 73. Características Anrorcha de soldadura