

Tecnológico de Costa Rica  
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica



**Optimización del proceso de manufactura de un sensor para la  
medición de  $C0_2$  en un paciente médico para la empresa Philips  
Costa Rica**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de  
Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Oswaldo Vélez Danel

Cartago, 25 de enero 2021



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el correspondiente informe final.



---

Oswaldo Vélez Danel

Cartago, 27 de enero de 2021

Céd: 148400354519

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
INGENIERÍA MECATRÓNICA  
PROYECTO DE GRADUACIÓN  
ACTA DE APROBACIÓN DEL INFORME FINAL**

La Profesora Asesora del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Oswaldo Vélez Danel

Proyecto: Optimización del proceso de manufactura de un sensor para la medición de  $CO_2$  en un paciente médico para la empresa Philips Costa Rica.

ARYS INDIRA  
CARRASQUILLA  
BATISTA  
(FIRMA)

Firmado digitalmente  
por ARYS INDIRA  
CARRASQUILLA  
BATISTA (FIRMA)  
Fecha: 2021.01.22  
09:50:51 -06'00'

---

Dra. -Ing. Arys Carrasquilla Batista

Asesora

Cartago, 25 de enero 2021

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
PROYECTO DE GRADUACIÓN  
ACTA DE APROBACIÓN**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Jurado Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Oswaldo Vélez Danel

Proyecto: Optimización del proceso de manufactura de un sensor para la medición de  $CO_2$  en un paciente médico para la empresa Philips Costa Rica.

**Miembros del Jurado**

CARLOS ADRIAN  
SALAZAR  
GARCIA

Firmado digitalmente  
por CARLOS ADRIAN  
SALAZAR GARCIA  
Fecha: 2021.01.25  
15:17:36 -06'00'

JAIME ALONSO  
MORA MELENDEZ  
(FIRMA)

Digitally signed by JAIME  
ALONSO MORA MELENDEZ  
(FIRMA)  
Date: 2021.01.26 16:14:27  
-06'00'

---

MSc. -Ing. Carlos Adrián Salazar García

Jurado 1

---

MSc. -Ing. Jaime Mora Meléndez

Jurado 2

ANA MARIA  
MURILLO  
MORGAN (FIRMA)

Firmado digitalmente por  
ANA MARIA MURILLO  
MORGAN (FIRMA)  
Fecha: 2021.01.25 15:44:30  
-06'00'

---

Ing. Ana María Murillo Morgan

Jurado 3

Los miembros de este Jurado dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 25 de enero 2021



# Resumen

El proceso de ensamblaje de sensores de tipo capnográfico dentro de la empresa Philips, se desarrolla de manera completamente manual. En consecuencia, la compañía solamente es capaz de producir 2566 unidades mensuales de una meta productiva de 6664 sensores, cantidad que ha venido en crecimiento como consecuencia de un aumento en la demanda por la situación sanitaria actual.

Como una solución a dicho problema planteado, en este proyecto se propuso un sistema automatizado para la primera etapa del proceso productivo y, además, se diseñó la subetapa de soldadura del mismo, consistente en la alimentación y corte de cable además de la actividad propia de unión. Para ello se planteó el uso de un PLC y una interfaz HMI, así como el uso de varios actuadores neumáticos.

**Palabras clave:** Automatización, HMI, PLC, Sensor Capnográfico, Soldadura.



# Abstract

The assembly process for capnographic-type sensors within the Philips company is completely manual. Consequently, the company is only capable of producing 2,566 units per month out of a production goal of 6664 sensors, an amount that has been growing as a result of an increase in demand due to the current health situation.

As a solution to that problem, in this project an automated system was proposed for the first stage of the production process and, in addition, the welding sub-stage that belongs to that process was designed, consisting of feeding and cutting the cable in addition to the welding activity. For this project, the use of a PLC and an HMI interface was considered, as well as the use of several pneumatic actuators.

**Keywords:** Automation, Capnography Sensor, HMI, PLC, Welding

*a mis queridos padres*

# Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres y a mi hermana, pues sin su apoyo incondicional y sus consejos desde el comienzo de mis estudios, el resultado de este trabajo no hubiese sido posible.

De igual manera, quiero extenderle un especial agradecimiento a la Dra. Ing. Arys Carrasquilla Batista, por haberme guiado y apoyado durante la realización del proyecto.

Al Ing. Luis Sánchez, por darme la oportunidad de realizar mi proyecto dentro de las instalaciones de Philips y, también, por brindarme sus valiosos consejos durante la ejecución del mismo.

A toda mi familia y amigos de México quienes, a pesar de la distancia, siempre se mantuvieron presentes a lo largo de todo este recorrido, alentándome a seguir esforzándome hasta el final.

Finalmente, agradezco a todos los profesores que estuvieron presentes durante mis estudios en la carrera de ingeniería mecatrónica y que aportaron muchos aspectos valiosos a mi formación.



# Índice general

Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Entorno del proyecto	1
1.2 Definición del problema	1
1.2.1 Generalidades	1
1.2.2 Justificación	2
1.2.3 Síntesis del problema	2
1.3 Enfoque de la solución	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo General	3
1.4.2 Objetivos específicos	3
<b>2 Marco teórico</b>	<b>5</b>
2.1 Descripción	5
2.2 Sensores Capnográficos	5
2.2.1 Funcionamiento y configuraciones	6
2.2.2 Etapas de fabricación	7
2.3 Diseño Mecánico	8
2.3.1 Motores a pasos	8
2.3.2 Motores CD	11
2.3.3 Servomotores	11
2.3.4 Mecanismo de alimentación tipo <i>pinch roller</i>	12
2.3.5 Mecanismo de transmisión por bandas	13
2.3.6 Mecanismo de piñón y cremallera	14
2.4 Automatización	14
2.4.1 Controlador Lógico Programable (PLC)	15
2.4.2 Interfaz Humano-Máquina (HMI)	15
2.4.3 Sensores y Actuadores	16
2.4.3.1 Sensores de presencia/ausencia	16
2.4.3.2 Válvulas 5/2 vías monoestables	16
2.4.3.3 Cilindros de doble efecto	17

2.4.3.4	Actuadores giratorios neumáticos de doble émbolo . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Generación y evaluación de conceptos</b>	<b>19</b>
3.1	Descripción . . . . .	19
3.2	Caracterización de las etapas de la operación <i>Detector with wires</i> . . . . .	19
3.3	Etapas en las que se pueden realizar mejoras con base en diseños mecatrónicos	23
3.4	Establecimiento de las necesidades y especificaciones del sistema . . . . .	24
3.5	Generación de conceptos . . . . .	28
3.5.1	Descomposición funcional . . . . .	28
3.5.2	Planteamiento de los Conceptos . . . . .	30
3.5.2.1	Concepto 1 . . . . .	31
3.5.2.2	Concepto 2 . . . . .	32
3.5.2.3	Concepto 3 . . . . .	33
3.5.3	Evaluación y selección de conceptos . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Diseño del sistema para el subproceso de soldadura</b>	<b>39</b>
4.1	Descripción . . . . .	39
4.2	Diseño del alimentador del cable . . . . .	39
4.2.1	Selección del material para los rodillos de alimentación . . . . .	39
4.2.2	Selección del motor para la movilización del mecanismo . . . . .	41
4.3	Diseño de la automatización del proceso . . . . .	48
4.3.1	Replanteamiento de la subetapa de soldadura . . . . .	49
4.3.2	Selección de los sensores y actuadores del proceso . . . . .	49
4.3.2.1	Movimiento vertical . . . . .	51
4.3.2.2	Movimiento horizontal . . . . .	51
4.3.2.3	Movimiento giratorio . . . . .	52
4.3.2.4	Selección final de actuadores para el proceso . . . . .	53
4.3.2.5	Selección de sensores . . . . .	54
4.3.3	Selección del tipo de controlador a utilizar . . . . .	55
4.3.4	Consideraciones sobre la soldadora Miyachi Unitek UB25 . . . . .	56
4.3.4.1	Conexiones entre el PLC y la soldadora . . . . .	57
4.3.4.2	Configuración de la soldadora . . . . .	59
4.3.4.3	Elemento para soldar LT-050B-F . . . . .	60
4.3.5	Configuración de la Programación . . . . .	62
4.3.5.1	Definición de entradas y salidas del sistema . . . . .	62
4.3.5.2	Diagrama de flujo del sistema . . . . .	63
4.3.6	Consideraciones importantes del programa implementado . . . . .	64
4.3.6.1	Control del motor a pasos del alimentador . . . . .	64
4.3.6.2	Tiempo requerido para operaciones de soldadura y corte . . . . .	67
4.3.7	Configuración de la interfaz HMI . . . . .	68
4.3.7.1	Pantalla de modo manual . . . . .	68
4.3.7.2	Pantalla de modo automático . . . . .	69
4.3.8	Sistema final diseñado . . . . .	70

---

<b>5</b>	<b>Resultados y análisis</b>	<b>73</b>
5.1	Descripción . . . . .	73
5.2	Funcionamiento manual y automático del PLC . . . . .	73
5.2.1	Funcionamiento manual . . . . .	74
5.2.2	Funcionamiento automático . . . . .	75
5.3	Análisis de esfuerzos sobre elementos diseñados . . . . .	76
5.3.1	Análisis de soporte para deslizadera de corte . . . . .	76
5.3.2	Análisis de soporte para deslizadera de sistema de alimentación de cable . . . . .	78
5.4	Análisis del sistema de alimentación de cable . . . . .	80
5.5	Análisis económico . . . . .	81
<b>6</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>85</b>
6.1	Conclusiones . . . . .	85
6.2	Recomendaciones . . . . .	86
	<b>Bibliografía</b>	<b>87</b>
<b>A</b>	<b>Diagrama de programación GRAFCET</b>	<b>89</b>
<b>B</b>	<b>Planos mecánicos</b>	<b>91</b>



# Índice de figuras

1.1	Enfoque de la solución . . . . .	3
2.1	Funcionamiento de un sensor de capnografía . . . . .	6
2.2	Configuración LoFlo del sensor de $CO_2$ . . . . .	7
2.3	Configuración Mainstream del sensor de $CO_2$ . . . . .	7
2.4	Etapas del ensamblaje de un sensor capnográfico . . . . .	8
2.5	Tipos de motores a pasos . . . . .	9
2.6	Control de onda . . . . .	9
2.7	Control de paso completo . . . . .	10
2.8	Control de medio paso . . . . .	10
2.9	Partes del motor DC . . . . .	11
2.10	Control de la posición de un servomotor . . . . .	12
2.11	Mecanismo de alimentación tipo pinch roller . . . . .	13
2.12	Configuración tradicional de un mecanismo de transmisión con bandas . . . . .	14
2.13	Mecanismo de piñón y cremallera . . . . .	14
2.14	Partes del PLC . . . . .	15
2.15	Símbolo de válvula de 5/2 vías monoestable . . . . .	17
2.16	Cilindro doble efecto . . . . .	17
2.17	Esquema de la estructura interna de un actuador giratorio . . . . .	18
3.1	Soporte especial utilizado para soldadura . . . . .	20
3.2	Ejemplo de soldadura y adhesivo aplicados adecuadamente sobre el detector . . . . .	21
3.3	Diagrama de flujo del proceso actual . . . . .	22
3.4	Esquemático del procedimiento actual . . . . .	22
3.5	Modelo de caja negra . . . . .	28
3.6	Descomposición funcional de sistema . . . . .	29
3.7	Boceto del concepto 1 planteado . . . . .	32
3.8	Boceto del concepto 2 planteado . . . . .	33
3.9	Boceto del concepto 3 planteado . . . . .	34
4.1	Esquema del alimentador diseñado . . . . .	40
4.3	Diagrama de cuerpo libre de los rodillos del sistema de alimentación . . . . .	43
4.4	Diagrama de cuerpo libre para el carrete de cable . . . . .	43
4.5	Rediseño del concepto seleccionado . . . . .	49
4.6	Esquema de puertos de conexión de soldadora UB25 . . . . .	57

4.7	Configuración de activación del switch con pedal por medio del PLC . . . . .	58
4.8	Conexiones del PLC al foot switch input . . . . .	59
4.9	Partes principales de un schedule para soldar . . . . .	60
4.10	Weldhead con la cuenta la empresa actualmente . . . . .	60
4.11	Conexión del Air Kit al Weldhead . . . . .	61
4.12	Partes principales del Air Kit . . . . .	61
4.13	Diagrama de flujo del subsistema de soldadura automatizado . . . . .	63
4.14	Conexiones del PLC al driver M542 . . . . .	65
4.15	Generación de tren de pulsos con temporizadores . . . . .	66
4.16	Temporizador para finalizar envío de pulsos a driver M542 . . . . .	66
4.17	Temporizador generado para control de la operación de soldadura . . . . .	67
4.18	Temporizador para control de la operación de corte . . . . .	67
4.19	Imagen raíz de la interfaz HMI desarrollada . . . . .	68
4.20	Imagen de operación manual de la interfaz HMI desarrollada . . . . .	69
4.21	Imagen de operación automática de la interfaz HMI desarrollada . . . . .	70
4.22	Imagen del sistema diseñado (1) . . . . .	71
4.23	Imagen del sistema diseñado (2) . . . . .	72
5.1	Funcionamiento en modo manual del sistema diseñado (1) . . . . .	74
5.2	Funcionamiento en modo manual del sistema diseñado (2) . . . . .	74
5.3	Funcionamiento en modo automático del sistema diseñado (1) . . . . .	75
5.4	Funcionamiento en modo automático del sistema diseñado (2) . . . . .	75
5.5	Resultado gráfico de la prueba de esfuerzos para el soporte de las pinzas de corte . . . . .	77
5.6	Resultado gráfico de la prueba de factor de seguridad para el soporte de las pinzas de corte . . . . .	78
5.7	Resultado gráfico de la prueba de esfuerzos para el soporte del sistema de alimentación . . . . .	79
5.8	Resultado gráfico de la prueba de factor de seguridad para el soporte del sistema de alimentación de cable . . . . .	79
5.9	Prueba de concepto para comprobar funcionamiento del sistema de ali- mentación de cable . . . . .	80
5.10	Costos directos del proyecto . . . . .	82
5.11	VAN, TIR e ID resultantes para el proyecto . . . . .	83

# Índice de tablas

3.1	Identificación de las actividades que serán automatizadas . . . . .	23
3.2	Necesidades expresadas por el cliente y su importancia correspondiente . .	25
3.3	Listado de métricas propuestas para las necesidades identificadas . . . . .	26
3.4	Especificaciones del sistema que se pretende estructurar . . . . .	27
3.5	Matriz de selección de conceptos . . . . .	34
4.1	Comparación entre el neopreno y el poliuretano . . . . .	41
4.2	Características de los rodillos y el carrete del sistema de alimentación . . .	44
4.3	Características generales de los modelos de motores a pasos para su com- paración . . . . .	48
4.4	Matriz de selección de motor a pasos para el sistema de alimentación de cable . . . . .	48
4.5	Matriz de selección de mecanismo para movimiento vertical . . . . .	51
4.6	Matriz de selección de mecanismo para movimiento horizontal . . . . .	52
4.7	Matriz de selección de mecanismo para movimiento rotacional . . . . .	53
4.8	Actuadores elegidos para la automatización del subsistema de soldadura . .	54
4.9	Distribución de los sensores de proximidad en cada actuador . . . . .	55
4.10	Comparación de tres modelos diferentes de PLCs . . . . .	56
4.11	Características del Schedule 1 para la operación de soldadura . . . . .	59
4.12	Definición de las entradas y salidas del sistema para el código de control . .	62
5.1	Resultados de la prueba de esfuerzo sobre el soporte para la deslizadera de corte . . . . .	77
5.2	Resultados de la prueba de esfuerzo sobre el soporte para la deslizadera del sistema de alimentación . . . . .	79
5.3	Resultados de la pruebas experimentales realizadas con el alimentador con- struido . . . . .	81



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Entorno del proyecto

El proyecto que se plantea a lo largo del presente informe, fue desarrollado dentro de las instalaciones de la empresa Philips Costa Rica, ubicada en la zona franca del Coyol de Alajuela. Dicha compañía enfoca sus operaciones en la manufactura y ensamblaje de una amplia variedad de productos y dispositivos médicos en el país, dentro de los que destacan los catéteres, las máscaras para el tratamiento de la apnea del sueño, los oxímetros de pulso y los sensores capnográficos o medidores de concentración de  $CO_2$  en el organismo de un paciente médico.

Debido a la crítica situación sanitaria global que se está viviendo actualmente, los productos que desarrolla la empresa han experimentado un aumento en su demanda, sobre todo aquellos que resultan ser fundamentales para conocer el estado de salud de una persona que permanece hospitalizada y que se encuentran representados por los oxímetros de pulso y los sensores de  $CO_2$ . Para afrontar y suplir dicho incremento, la organización está en un proceso de análisis continuo para establecer aquellas operaciones manuales que pueden ser mejoradas, optimizadas e, inclusive, automatizadas. Por consiguiente, atendiendo a dicho objetivo, el presente proyecto se encuentra directamente delimitado dentro del área de los sensores capnográficos.

### 1.2 Definición del problema

#### 1.2.1 Generalidades

El proceso utilizado para el ensamblaje del sensor de  $CO_2$ , se realiza, en cada una de sus cinco etapas, de manera completamente manual. Debido a dicha característica particular, la operación resulta ser sumamente lenta, impidiendo que la compañía perciba un incremento en el número mensual de unidades ensambladas y que, en consecuencia, no se

pueda alcanzar la meta productiva que la empresa ha establecido para posibilitar la satisfacción de la demanda global. Asimismo, otro resultado negativo de la instauración de una metodología totalmente manual, corresponde a la poca o nula estandarización que los ensambles contienen pues, a pesar de que todas las actividades están reguladas por medio de un instructivo que el operario debe de seguir para la fabricación de los productos, el error humano puede influir, en cualquier momento, sobre la elaboración del conjunto.

### 1.2.2 Justificación

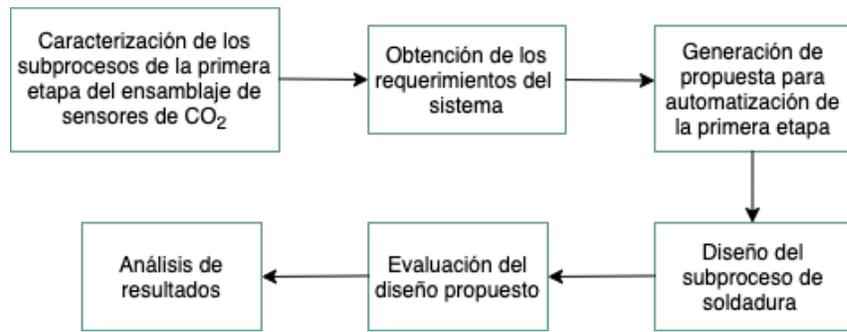
Como consecuencia de la implementación de un procedimiento completamente manual, en lugar de uno de tipo automático o, en su defecto, semiautomático, para la ejecución del ensamblaje de los sensores capnográficos, la empresa únicamente es capaz de generar 2566 unidades de dicho dispositivo, muy por debajo del valor objetivo mensual igual a 6664 sensores para posibilitar la satisfacción de la demanda. Por lo tanto, se observa que existe la necesidad real de estudiar y analizar el procedimiento que se utiliza actualmente, para identificar oportunidades de mejora que permitan la instauración de un sistema más automatizado, comenzando con dicho estudio, en la primera etapa del proceso de ensamblaje, misma que se compone de actividades como soldadura, colocación de epoxy e inspección visual, permitiendo que de manera paulatina, se presente la estandarización del proceso, disminuyendo los errores o defectos de fabricación.

### 1.2.3 Síntesis del problema

El actual proceso de tipo manual, utilizado para el ensamblaje de los sensores de  $CO_2$ , no permite que la empresa alcance la meta de producción mensual requerida para satisfacer la demanda actual del dispositivo. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis profundo del mismo comenzando con la primera etapa, para la identificación y proposición de cambios a ser ejecutados.

## 1.3 Enfoque de la solución

De manera general, para otorgar una solución al problema planteado, se siguieron diversas etapas, tal y como se puede evidenciar en la figura 1.1. Como primer paso, se realizó un estudio detallado de las características y procedimientos que son llevados a cabo en la primera etapa del proceso de ensamblaje, para la obtención de los requerimientos del sistema. Acto seguido, con en base en esta última, se planteó una propuesta para la ejecución de la automatización de dicha etapa. Posteriormente, tomando como punto de partida la propuesta realizada, se procedió con el diseño, específicamente, de la subetapa de soldadura de la misma para, finalmente, proceder con la evaluación del diseño y el consecuente análisis de resultados.



**Figura 1.1:** Enfoque de la solución (elaboración propia)

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General

Diseñar un sistema mecatrónico que minimice el tiempo de ensamblaje de los sensores de CO<sub>2</sub> desarrollados por la empresa Philips.

### 1.4.2 Objetivos específicos

1. Identificar las operaciones individuales que se llevan a cabo durante la primera etapa del proceso de manufactura, para el establecimiento de los requerimientos del sistema.
2. Proponer un sistema mecatrónico que posibilite la estandarización de la primera etapa del proceso de ensamblaje del sensor de CO<sub>2</sub>.
3. Diseñar el sistema del subproceso de soldadura aplicando la estandarización del proceso de ensamblaje del sensor de CO<sub>2</sub>.
4. Evaluar el diseño propuesto para el subproceso de soldadura en el ensamblaje de los sensores de CO<sub>2</sub>.



# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1 Descripción

En el presente capítulo se describe la información teórica importante para comprender lo aspectos fundamentales referentes a la solución planteada, que será presentada en los capítulos posteriores del documento. Por consiguiente, considerando el diseño que se ha establecido, a continuación se plantean características referentes al diseño mecánico y computacional, tales como motores a pasos, motores CD, sensores y actuadores neumáticos y los controladores lógicos programables o PLCs. Adicionalmente, se procede a explicar las generalidades de los sensores de capnografía, tales como su funcionamiento y las diferentes configuraciones existentes en el mercado, según sea la condición del paciente que los vaya a utilizar.

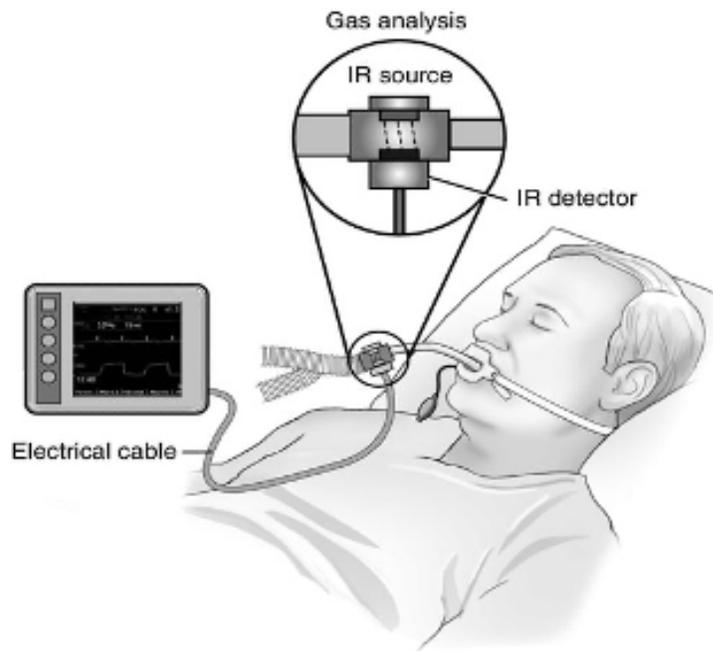
### 2.2 Sensores Capnográficos

La capnografía puede ser definida como la medición de la concentración de  $CO_2$  en el organismo de un ser vivo. Para el caso específico de los seres humanos, dicha medición toma mayor relevancia dado que el dióxido de carbono es el gas que más se produce en el cuerpo, por lo que se puede considerar a dicho gas como el motor de la respiración y, por consiguiente, aquel que indica si un paciente médico requerirá respiración de tipo artificial o mecánica [1].

Para posibilitar la medición de la concentración de  $CO_2$ , la capnografía hace uso de los llamados sensores capnográficos, mismos que corresponden a pequeños dispositivos que se sincronizan de manera externa con el sistema respiratorio a través de mangueras, para garantizar que durante el proceso de exhalación, dicha masa de aire se encuentre en contacto directo con el dispositivo de medición [1].

### 2.2.1 Funcionamiento y configuraciones

Fundamentalmente, un sensor de capnografía se encuentra constituido por un elemento emisor de luz infrarroja y un dispositivo capaz de detectar dicha emisión luminosa. Se utiliza esta configuración debido a que para posibilitar la medición de  $CO_2$ , el sensor aprovecha la característica que presenta la luz infrarroja de modificar su longitud de onda dependiendo de la concentración que exista de dicho gas durante la exhalación del paciente [2]. De manera gráfica el funcionamiento se puede observar en la figura 2.1.



**Figura 2.1:** Funcionamiento de un sensor de capnografía[2]

Dentro la sección de la empresa en donde se ensamblan esta clase de sensores, fundamentalmente se contienen dos tipos de configuraciones diferentes, que son utilizadas dependiendo del estado de salud que presente el paciente durante su hospitalización, y que se denominan como LoFlo y Mainstream [2]. La variedad LoFlo, que se puede observar en la figura 2.2, generalmente es utilizada cuando el usuario se encuentra en condición estable y no es necesario la instalación de un sistema de respiración automático. Por su parte, la configuración Mainstream, es más empleada cuando es necesaria la intubación del paciente. La imagen de dicho modelo se presenta en la figura 2.3



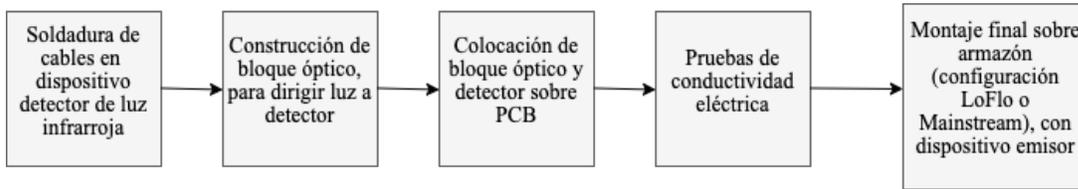
**Figura 2.2:** Configuración LoFlo del sensor de  $CO_2$ [2]



**Figura 2.3:** Configuración MAstream del sensor de  $CO_2$ [2]

### 2.2.2 Etapas de fabricación

De manera general, para posibilitar la fabricación de estos dispositivos de medición, se ejecuta un proceso de cinco etapas principales, a saber [2], según se puede observar en la figura 2.4



**Figura 2.4:** Etapas del ensamblaje de un sensor capnográfico (elaboración propia)

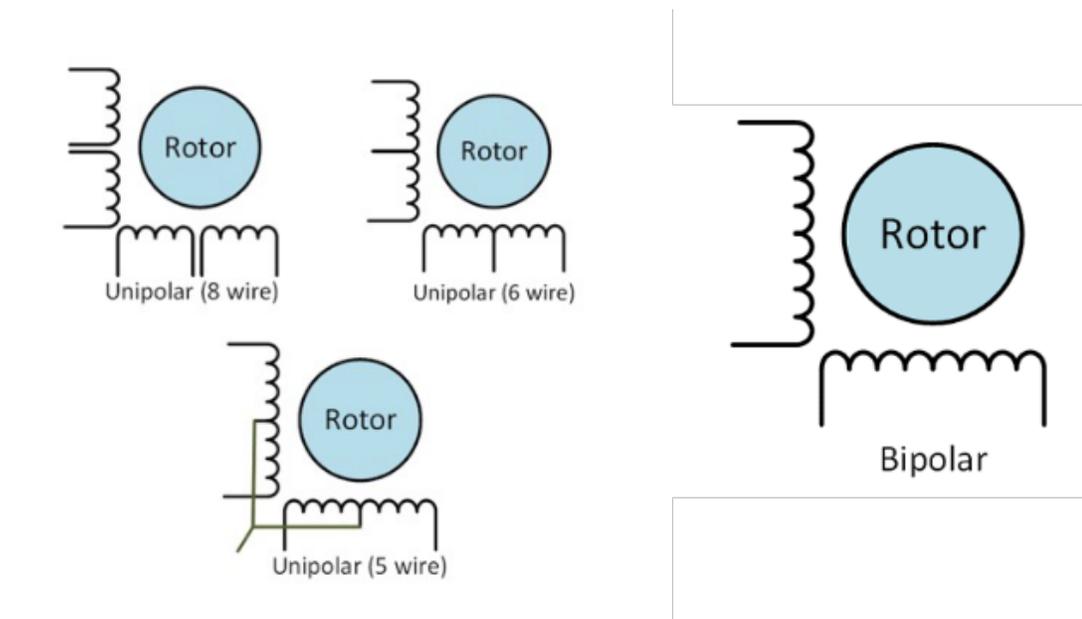
Según el esquema anterior, la primera fase del proceso completo, corresponde a la soldadura de dos segmentos de cable en un dispositivo detector de luz infrarroja, más específicamente, en los extremos de dicho dispositivo. Por su parte, durante la segunda etapa, se construye un bloque óptico mismo que permitirá dirigir la luz infrarroja directamente a la zona de detección del elemento detector. Acto seguido, tanto el bloque como el detector se colocan en una PCB, que ya se encuentra prefabricada para realizar la tarea indicada. Después, a todo el conjunto anterior se le realizan pruebas de conductividad eléctrica y, en caso de que las mismas arrojen el resultado esperado, se ejecuta el montaje final del dispositivo dentro de un armazón que puede variar físicamente, según la configuración del sensor (LoFlo o Mainstream) que se esté llevando a cabo.

## 2.3 Diseño Mecánico

### 2.3.1 Motores a pasos

Los motores a pasos, también conocidos como motores de velocidad gradual, movilizan su eje a través de pasos discretos como consecuencia de la aplicación de pulsos a uno de sus devanados del estator. Lo anterior sugiere que, por consiguiente, la velocidad a la que se suministren los pulsos se traducirá, igualmente, en una mayor o menor velocidad de rotación según corresponda, siendo ésta inversamente proporcional al par que puede entregar la máquina en cuestión. Además, estas máquinas también presentan la propiedad denominada como torque de detención y que se refiere a la capacidad que presentan estos motores para mantener una posición de manera firme, cuando no se encuentran rotando [3].

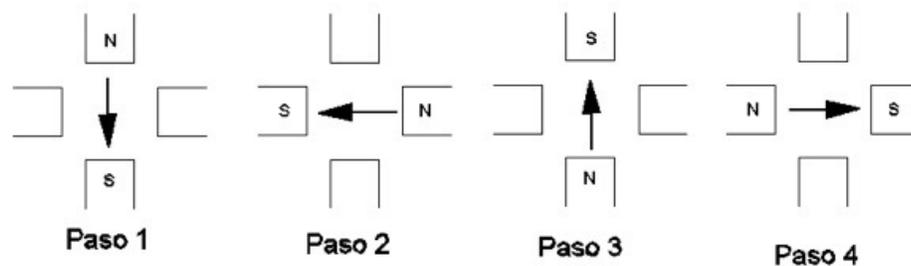
De manera general, dependiendo de la configuración de los devanados del estator de los motores a pasos, los mismos pueden clasificarse como bipolares o unipolares [3], según se puede observar en la figura 2.5. Los motores bipolares, presentan la particularidad de contener únicamente un juego de devanados por cada par de polos en el estator. Dicha característica tiene como consecuencia que para conseguir la rotación del eje, la dirección de la corriente que fluye por sus bobinados debe invertirse periódicamente. Por su parte, a diferencia de configuración bipolar, los motores unipolares presentan dos inductores por cada par de polos presentes en el estator, por lo que para conseguir la rotación de su eje, la corriente fluye en la misma dirección en todos los devanados, facilitándose el control de estos últimos [3].



**Figura 2.5:** Tipos de motores a pasos (elaboración propia)

Tal y como se estableció anteriormente, para posibilitar la movilización de los motores a pasos, es necesario aplicar los pulsos correspondientes en sus devanados, siguiendo una secuencia específica para conseguir dicho objetivo. La secuencias más comunes de excitación, se enlistan a continuación [4]:

- **Control de onda.** La corriente fluye por una de las bobinas cada vez, lo que produce que el flujo generado por la corriente en los devanados gire  $90^\circ$ , con cada paso dado. Dado que se activa un devanado en cada ocasión el torque de detención es menor, en comparación con otros tipos de control. La descripción anterior se puede observar de manera gráfica en la figura 2.6



**Figura 2.6:** Control de onda[4]

- **Control de paso completo.** Para este caso, los dos juegos de bobinas del estator se energizan al mismo tiempo, aspecto que ocasiona que el flujo generado por las corrientes en los devanados, se ubique en medio de los polos y gire  $90^\circ$  con cada uno de los pasos. Con esta configuración se potencia el torque de detención del motor

aunque se duplica el consumo del mismo. La descripción anterior se presenta de manera gráfica en la figura 2.7.

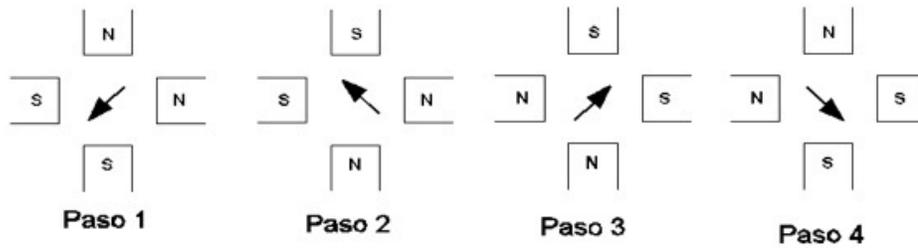


Figura 2.7: Control de paso completo [4]

- Control de medio paso.** Esta forma de energización, corresponde a una combinación entre los dos tipos descritos anteriormente, pues en un primer momento se alimentan dos juegos de bobinas para que el flujo se ubique en medio de los polos, y posteriormente, se desenergiza una de ellas para permitir que la orientación del flujo se coloque, directamente, sobre alguno de los polos, de manera que el rotor girará medio paso por cada pulso aplicado. Con este método se obtiene un funcionamiento suave y al mismo tiempo se obtiene un torque de detención más elevado y una mayor precisión en el movimiento del motor, sin embargo, también genera un consumo mayor al existir momentos en los que ambos juegos de devanados se encuentran energizados. El funcionamiento anterior, se puede visualizar en la figura 2.8.

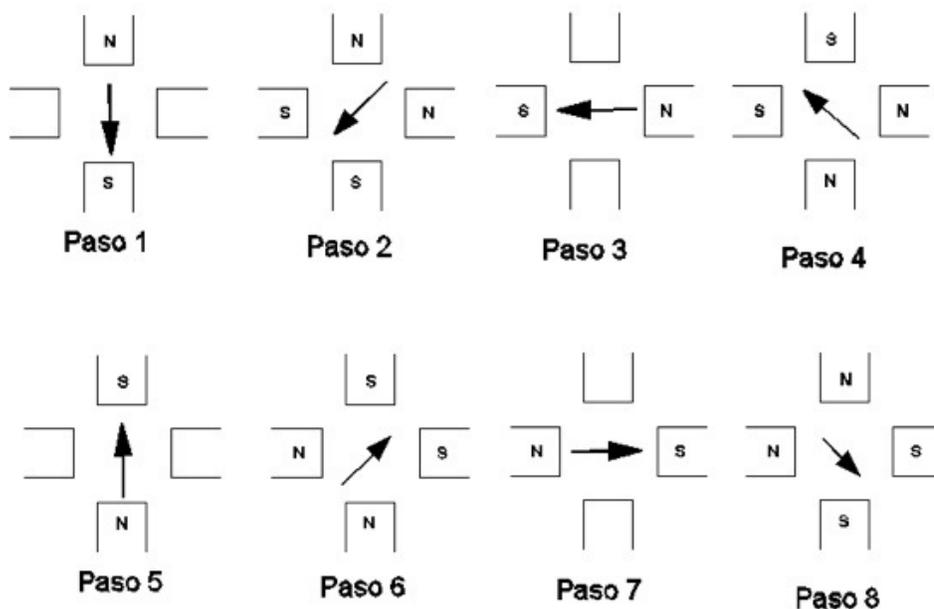


Figura 2.8: Control de medio paso [4]

### 2.3.2 Motores CD

Un motor de corriente directa, tal y como su nombre lo establece, es una máquina eléctrica que para su funcionamiento requiere, exclusivamente, de corriente directa. Los elementos principales de un motor de esta clase son el estator, el rotor, el colector de delgas y las escobillas. El primero de ellos corresponde a un elemento fijo que está compuesto por un número par de polos. Las bobinas que los arrollan se encargan de producir el campo inductor [5]. Por su parte, el rotor corresponde a una pieza giratoria constituida por un núcleo magnético, alrededor del cual se coloca el bobinado del inducido, sobre el que actúa el campo generado por el estator. En cuanto al colector de delgas, su composición corresponde a un anillo de láminas de cobre llamadas delgas y se encuentra ubicado sobre el eje del rotor. Su función se centra en proporcionar un método de conexión para las bobinas del rotor con el circuito exterior a través de las escobillas [5]. Estas últimas, corresponden unos elementos compuestos de grafito y se colocan sobre el anillo colector para posibilitar la interconexión mencionada anteriormente. Las partes mencionadas anteriormente, se muestran en la figura 2.9. La principal ventaja que presentan estas máquinas, corresponde al fácil control de velocidad que ofrecen por medio del uso de la modulación por ancho de pulso o PWM como método de control.

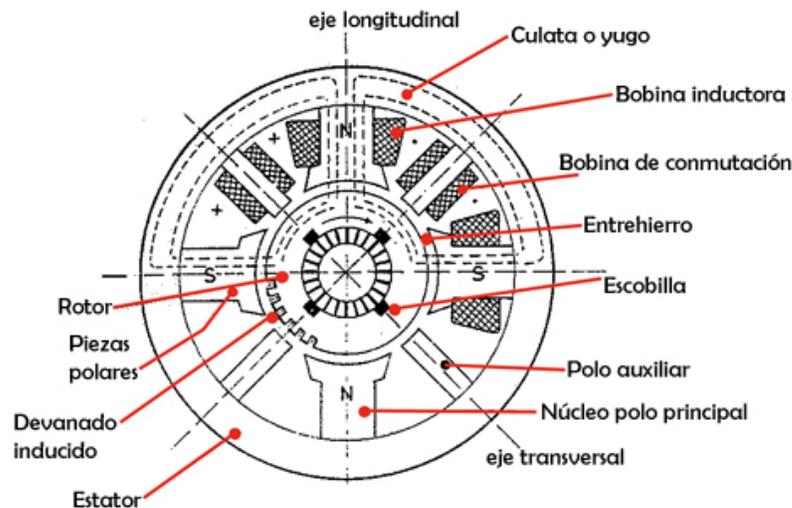


Figura 2.9: Partes del motor DC[5]

### 2.3.3 Servomotores

Un servomotor, puede ser considerado como una máquina eléctrica, capaz de mantener una posición angular específica, como consecuencia del envío de una señal de control de tipo PWM (Pulse Width Modulation) [6] o un pulso cuya duración es específica. De manera general, un motor de este tipo se encuentra conformado por un amplificador de error, un motor de corriente directa, un sistema reductor formado por engranajes, un circuito de control y un potenciómetro que se acopla directamente al eje del motor [6]. El

primer elemento se encarga de determinar el error de la posición del eje, que se determina mediante una resta de tensiones entre la referencia y la resultante por la posición actual del elemento. Por su parte, el segundo componente, es decir, el motor de CD, es el encargado de otorgarle movilidad a la máquina completa, mientras que el sistema reductor, regula su velocidad y par.

En cuanto al sistema de control, el mismo se encarga de recibir los pulsos o la señal eléctrica de control para posibilitar el movimiento del servomotor y, finalmente, el potenciómetro, se utiliza como medio para conocer, en todo momento, la posición angular del eje del servomotor.

Por consiguiente, para conseguir que un servomotor se pueda movilizar (girar) hasta una posición determinada, basta con enviarle un pulso con una duración y frecuencia determinadas, según se puede observar en el esquema que se presenta en la figura 2.10

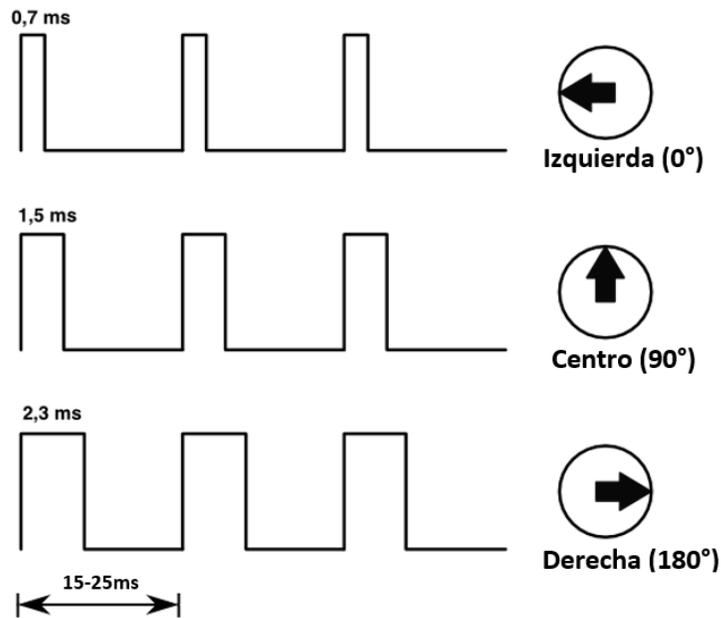


Figura 2.10: Control de la posición de un servomotor [6]

### 2.3.4 Mecanismo de alimentación tipo *pinch roller*

Se le denomina pinch roller a un rodillo de goma que se utiliza para realizar la alimentación de cable o cinta magnética para el caso de algunos equipos de audio [7]. En los sistemas de esta índole, generalmente se colocan dos tipos de rodillos, uno que se fija directamente a un eje, mejor conocido como conductor y otro que se monta sobre un soporte fijo pero que permite su movilización alrededor de éste, como consecuencia de la acción directa del rodillo motorizado [7]. De igual manera, una propiedad importante de este mecanismo es la característica de adherencia entre el material de alimentación y el rodillo, fenómeno que promueve la adecuada funcionalidad del sistema. No obstante, es necesario garantizar que la presión que existente entre ambos rodillos, es decir, en el punto de contacto, sea la suficiente para que la alimentación se ejecute de manera continua [7]. En la figura 2.11,

se puede observar el mecanismo tipo pinch roller, configurado para la alimentación de materiales con diferentes grosores (adición de resorte).

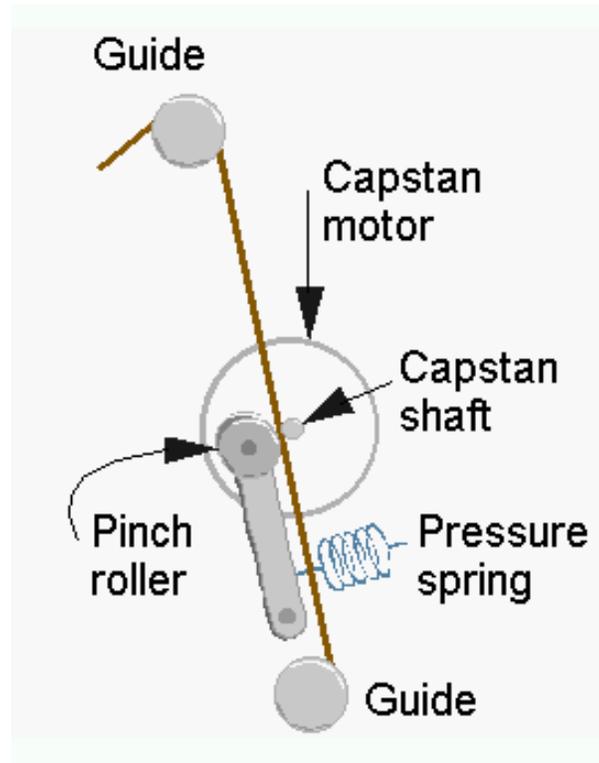


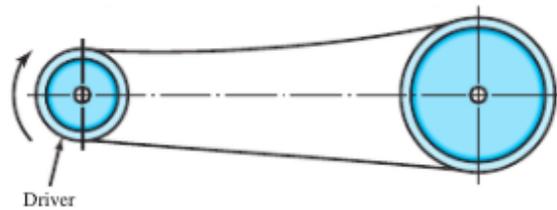
Figura 2.11: Mecanismo de alimentación tipo pinch roller [7]

### 2.3.5 Mecanismo de transmisión por bandas

De manera general, se puede establecer que existen cuatro tipos diferentes de bandas a saber [8] : plana, redonda, en forma de V y de sincronización. La elección de un estilo u otro depende enteramente de las características de la operación que se desea ejecutar con la misma, considerando aspectos como la velocidad, la tensión a la que estará sometida y la carga, si aplica, que transportará.

Para el caso de las bandas planas, las mismas se encuentran fabricadas generalmente de uretano y proveen un funcionamiento silencioso, son eficientes a altas velocidades y son capaces de transmitir una gran potencia aún a largas distancias. En contraposición, las poleas tipo V, generalmente elaboradas con nylon, son más utilizadas para la transmisión de potencia a distancias cortas [8].

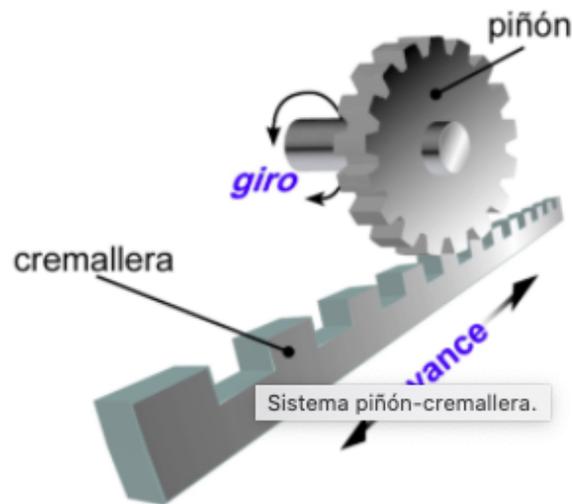
Finalmente, en cuanto a las bandas de sincronización, las mismas se encuentran comúnmente elaboradas con uretano y en su estructura presentan una serie de dientes que se ajustan a las poleas dentadas. Poseen la ventaja de que no estiran ni se deslizan, permitiendo una transmisión de potencia con una relación velocidad-ángulo constante [8]. En la figura 2.12, se muestra una configuración clásica de un mecanismo de bandas.



**Figura 2.12:** Configuración tradicional de un mecanismo de transmisión con bandas [8]

### 2.3.6 Mecanismo de piñón y cremallera

El mecanismo de piñón y cremallera, se encuentra compuesto por una rueda dentada de dientes rectos que engrana con una barra dentada a la que se denomina cremallera [9]. La particularidad del mecanismo, es que transforma el movimiento giratorio de un eje en un desplazamiento horizontal y, además, es completamente reversible, es decir, responde al sentido de giro del motor. Para que el movimiento anterior sea posible, tanto el piñón como la cremallera deben poseer el mismo módulo. En la figura 2.13, se observa el mecanismo anteriormente descrito.



**Figura 2.13:** Mecanismo de piñón y cremallera [9]

## 2.4 Automatización

La automatización y, más específicamente, la automatización de tipo industrial, se puede definir como el monitoreo y el control de diferentes equipos a través del empleo de diferentes dispositivos que otorgan información del medio, como lo son los sensores [10]. Las ventajas de la automatización se centran principalmente en una mayor calidad de producción, la reducción de costos, un incremento en la seguridad de los operarios, un uso eficiente de la energía y de la materia prima, así como también, una producción flexible

y escalable.

### 2.4.1 Controlador Lógico Programable (PLC)

Un controlador lógico programable o PLC por sus siglas en inglés, se puede definir como un dispositivo electrónico que emplea memoria programable para la construcción e implementación de una amplia variedad de funciones, tales como operaciones booleanas, procesamiento de bits, temporización y conteo, entre otras. Utiliza sus módulos integrados de entradas y salidas, tanto analógicos como digitales, para permitir el control de las máquinas y de los procesos [11].

Las partes principales de un PLC, se pueden observar directamente en la figura 2.14. De la misma se puede decir que el elemento principal de estos dispositivos, corresponde al CPU o unidad central de procesamiento en donde se llevan a cabo las funciones solicitadas por el código de programación. Por su parte, el segundo componente primordial de un PLC, corresponde a su memoria, misma que se divide en permanente (PM) en operacional, comúnmente conocida como RAM. En la primera se ejecuta el sistema de operación del autómatas, mientras que en la segunda es en donde se almacena y ejecuta el programa que se esté utilizando [11].

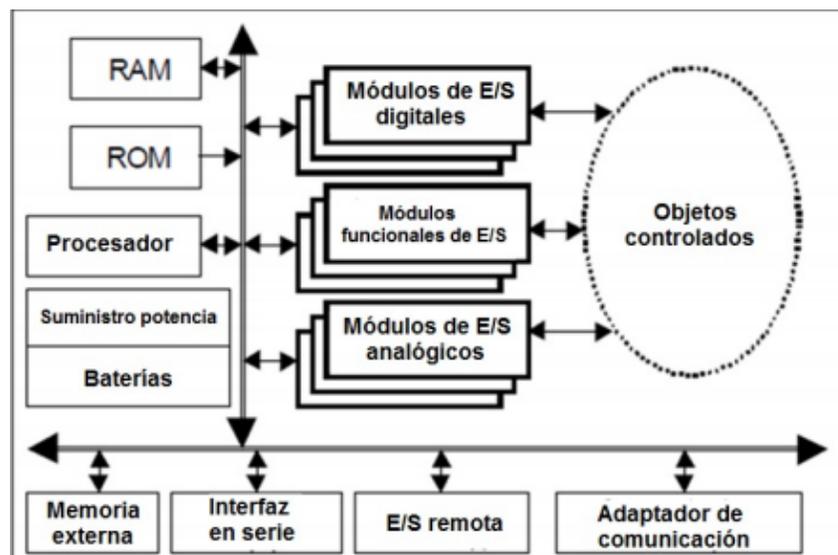


Figura 2.14: Partes del PLC [11]

### 2.4.2 Interfaz Humano-Máquina (HMI)

La Interfaz Humano-Máquina o HMI por sus siglas en inglés, corresponde a la plataforma que existe entre el operario y el proceso. Corresponde a la principal herramienta utilizada para realizar la coordinación y el control de los diferentes procesos industriales y de fabricación [12].

La funcionalidad del HMI estriba en la muestra de información operativa en tiempo real, utilizando gráficos de procesos visuales que le facilitan la tarea al operario, de la supervisión del proceso. Además de las características anteriores, también hacen posible la interacción directa con la operación, pues mediante la utilización de botones táctiles, el usuario puede activar o desactivar los diferentes equipos y herramientas empleadas [12].

### 2.4.3 Sensores y Actuadores

Tal y como se estableció anteriormente, los sensores resultan imprescindibles para la automatización de cualquier proceso, debido a que otorgan información del mismo que puede ser utilizada, a nivel de programación, como parámetros para la realización de las diferentes actividades. Un sensor, puede definirse como un dispositivo capaz de transformar una variable física de entrada en una señal eléctrica. Como ejemplo de lo anterior, se puede plantear aquellos que transforman la temperatura, la presión o PH en electricidad [13].

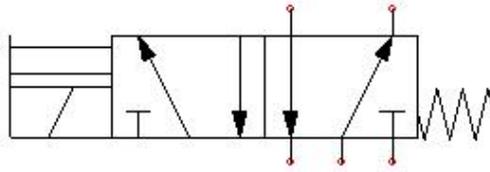
Respecto a los actuadores, los mismos, a partir de una señal eléctrica, generan en respuesta una variable de tipo físico. Al igual que los sensores, los actuadores representan componentes fundamentales de los sistemas automáticos, debido a que permiten la movilización y el accionamiento del proceso en sí [14].

#### 2.4.3.1 Sensores de presencia/ausencia

Los sensores de presencia/ausencia representan una clase específica de dichos dispositivos y, como su nombre lo sugiere, son utilizados para determinar la existencia o no de un determinado objeto o material [15]. El funcionamiento de estos sensores varía según el tipo de elemento que se desea detectar, sin embargo, todos otorgan una salida de tensión directa cuando el objeto ha sido correctamente localizado. Algunos ejemplos de estos sensores son los inductivos, empleados para detectar metales; los capacitivos, utilizados para la detección de diferentes materiales dependiendo de la constante dieléctrica de los mismos; y los sensores fotoeléctricos, mismos que, a partir de la interrupción de la luz que emiten, son capaces de descubrir elementos de diferentes características [15].

#### 2.4.3.2 Válvulas 5/2 vías monoestables

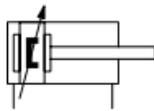
Las válvulas electroneumáticas de 5/2 vías monoestables, tiene la característica particular de que, al recibir una señal eléctrica en el solenoide que posee en uno de sus extremos, se modifica momentáneamente la posición o el sobre que se encuentra actualmente activo. Dado que el elemento posee un comportamiento monoestable, si se retira la señal de conmutación, el dispositivo retorna a su posición original debido a la acción de un resorte de recuperación [16]. El símbolo que representa a dicha válvula, se presenta en la figura 2.15.



**Figura 2.15:** Símbolo de válvula de 5/2 vías monoestable [16]

### 2.4.3.3 Cilindros de doble efecto

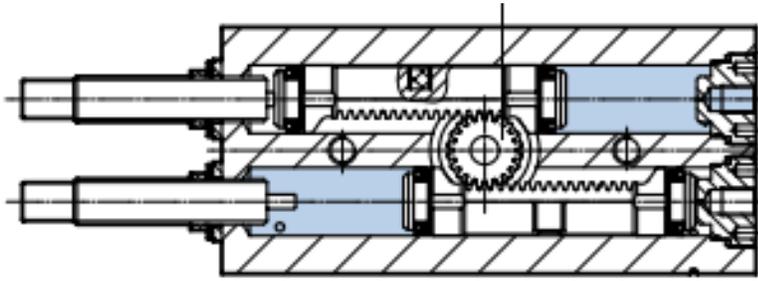
Un cilindro de doble efecto, corresponde a un actuador de tipo neumático. El vástago del cilindro, tiene la característica de poder alternar su movimiento, cuando se aplica aire comprimido en uno de sus dos extremos. Para producir el movimiento deseado, es necesario que se suprima la alimentación de aire del lado opuesto. Cabe destacar que existen cilindros cuyos émbolos se encuentran provistos de un imán permanente para aprovechar el campo magnético de éste y posibilitar la activación de sensores de posición [17]. El símbolo que representa a dicho actuador, se presenta en la figura 2.16.



**Figura 2.16:** Cilindro doble efecto [17]

### 2.4.3.4 Actuadores giratorios neumáticos de doble émbolo

Los actuadores giratorios neumáticos, como su nombre lo sugiere, son elementos que transforman el aire comprimido que reciben en su entrada, en un movimiento de tipo giratorio. Para ejecutar dicha transformación en el movimiento deseado, este tipo de actuadores internamente poseen un mecanismo de piñón y cremallera. Lo anterior posibilita que cuando ingresa aire comprimido al actuador, éste empuja la cremallera haciendo rotar al piñón, produciendo el giro requerido [18]. Generalmente, estos dispositivos poseen dos cremalleras para permitir la rotación del piñón hasta  $180^\circ$  en ambos sentidos. En la figura 2.17, se presenta un esquema de los componentes internos de un actuador de este tipo.



**Figura 2.17:** Esquema de la estructura interna de un actuador giratorio [18]

# Capítulo 3

## Generación y evaluación de conceptos

### 3.1 Descripción

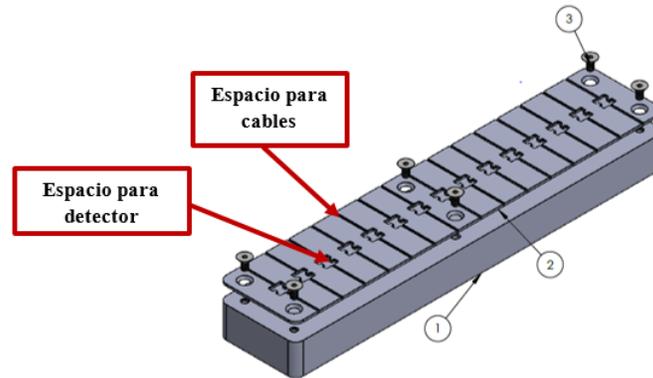
En este capítulo, se presenta el desarrollo de las primeras etapas utilizadas para el diseño del sistema mecatrónico, correspondientes a la caracterización de cada una de las fases de la primera etapa del proceso de ensamblaje actual utilizado por la empresa; la identificación de las operaciones en las que se pueden realizar mejoras con base en sistemas mecatrónicos, la determinación de las necesidades y de las especificaciones que contendrá el sistema que se planea implementar, y el planteamiento de diferentes conceptos de solución, para su posterior comparación y evaluación, con la finalidad de seleccionar solamente uno de ellos para proseguir con el desarrollo del proyecto y, más específicamente, de la subetapa de soldadura consistente tanto en el corte y medición de los segmentos de cable, como en la operación propia de soldadura, según el diagrama de flujo presentado en la figura 3.3.

### 3.2 Caracterización de las etapas de la operación *Detector with wires*

La operación denominada como *Detector with wires*, también conocida como *Detector Welding* hace alusión a la actividad realizada por parte de los operarios para soldar un par de cables de 0.5 in de longitud a un dispositivo detector de radiación infrarroja, que conforma una de las partes principales del sensor de  $CO_2$ . Dicho elemento está compuesto por dos regiones, una de color dorado en donde se genera el contacto eléctrico con los demás elementos del conjunto, y una de coloración azul que se encarga directamente de la detección de la luz infrarroja.

La **primera** etapa que debe ser desarrollada, corresponde al desempaque de los detectores

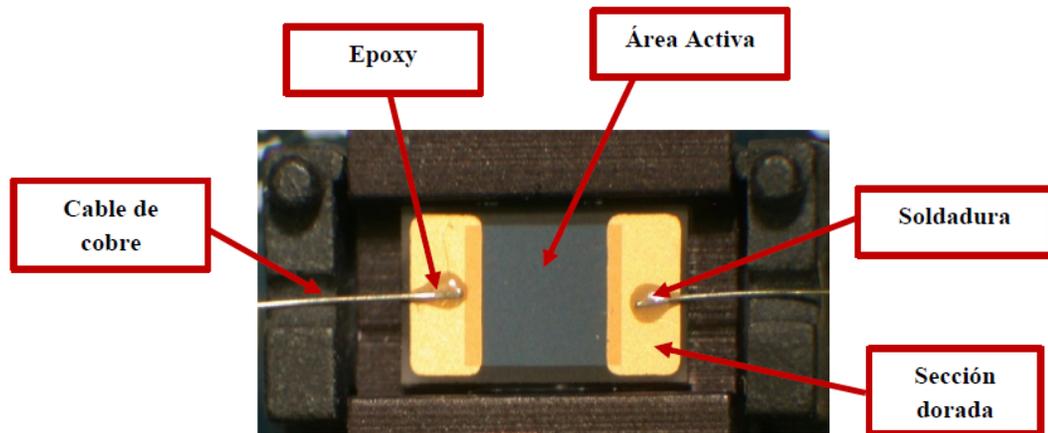
con ayuda de unas pinzas con punta de carbón, evitando tocar el área activa de los mismos para prevenir rasguños o golpes sobre ésta. Los dispositivos se colocan sobre un soporte especial (fixture), para permitir la ejecución de las actividades posteriores. Como parte esta fase es importante mencionar que el empaque individual de los elementos detectores, no se descarta ni se desecha por ningún motivo, puesto que al finalizar con la operación completa, el ensamblaje final se guarda en el mismo. Para posibilitar la identificación de cada detector con su respectiva bolsa, el soporte posee un número inscrito en cada posición de alojamiento, por lo que el operario escribe dicho número sobre la etiqueta ubicada en cada una de las bolsas, a un lado del número de serie. En la figura 3.1, se presenta el soporte que es utilizado.



**Figura 3.1:** Soporte especial utilizado para realizar la soldadura de los detectores [19]

Una vez que se ha completado la colocación de un lote sobre los soportes correspondientes, la **segunda** fase del procedimiento, corresponde a la colocación de dos cables de cobre estañado de calibre 40 AWG sobre los espacios del soporte destinados para tal fin, para realizar la operación de soldadura correspondiente. Para ello, primeramente se debe cortar segmentos de cable cuya longitud sea de, aproximadamente, 0.5 in. Posteriormente, con ayuda de unas pinzas de precisión y un microscopio, el operario procede a tomar las secciones correspondientes y ubicarlas en el soporte, de manera que el extremo que se encuentra en contacto con la sección dorada del detector, esté correctamente centrado con respecto a ésta. Una vez que se ha colocado todos los cables necesarios, por medio de una máquina soldadora por puntos de la marca Miyachi Unitek modelo UB25 y con accionamiento por pedal, se realiza la unión de los elementos. Acto seguido, durante la **tercera** etapa de la operación, se coloca una gota de adhesivo Epoxy sobre cada una de las uniones soldadas, para otorgarles una mayor resistencia mecánica. Para posibilitar la realización de dicha actividad, el operario mezcla, en primer lugar, el pegamento dentro de una jeringa que posteriormente es conectada a un dispensador EFD Ultimus I mismo que, al ser accionado a través de un pedal, empuja el contenido de la jeringa al exterior, permitiendo el depósito del adhesivo sobre las ubicaciones correspondientes. La presión realizada sobre el accionamiento, así como el tiempo de duración de la misma, deben ser tales que únicamente desplieguen una pequeña gota del producto para evitar interferen-

cias con la zona activa del detector, que se producirían si el adhesivo se extendiera hasta dicha locación. En la figura 3.2, se puede apreciar un ejemplo de un detector con la soldadura y el adhesivo correctamente aplicados.



**Figura 3.2:** Ejemplo de soldadura y adhesivo correctamente aplicados sobre el detector (elaboración propia)

Durante la **cuarta** fase del procedimiento, el operario debe completar un proceso de horneado para que el pegamento seque completamente. Para ello, antes de proceder con la introducción de las piezas al horno, las mismas se dejan reposar durante 15 minutos a temperatura ambiente. Después de dicho tiempo, en el horno marca Memmert modelo UF110, se configura una temperatura de  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  y se introducen los ensamblajes durante un tiempo de 40 minutos. Completado el período anterior, los elementos se retiran del horno y se dejan enfriar a temperatura ambiente.

Finalmente, en la **quinta** etapa de la operación, se realiza una inspección visual del ensamble completo de cada uno de los detectores, para verificar que los mismos cumplan con los requerimientos básicos buscados. Por lo tanto, mediante el uso del microscopio, el operario evalúa las piezas en búsqueda de rasguños, golpes visibles o residuos de Epoxy en la región activa del detector. En caso de que exista alguna de estas condiciones, el colaborador procede a desechar, automáticamente, la pieza completa. Aquellos ensamblajes que se encuentren adecuadamente ejecutados, según la percepción del empleado, son retirados de los soportes y almacenados dentro de su empaque respectivo, según el número que tenían asignado.

A manera de resumen, en la figura 3.3, se presenta el diagrama de flujo completo de todo el proceso de manufactura, anteriormente descrito. Además, en la figura 3.4, se puede observar un esquema que ilustra las herramientas y el equipo, en conjunto con su disposición en el área de trabajo, que actualmente se utiliza para llevar a cabo toda la operación de ensamblaje.

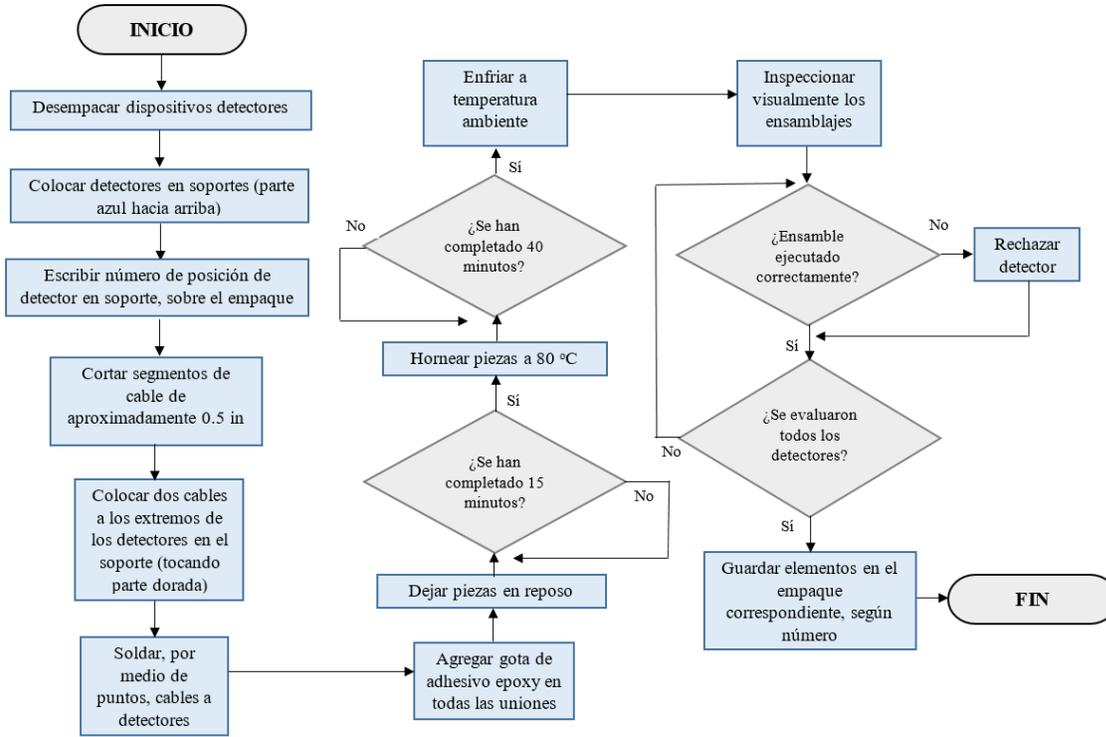


Figura 3.3: Diagrama de flujo del proceso de ensamblaje actual (elaboración propia)

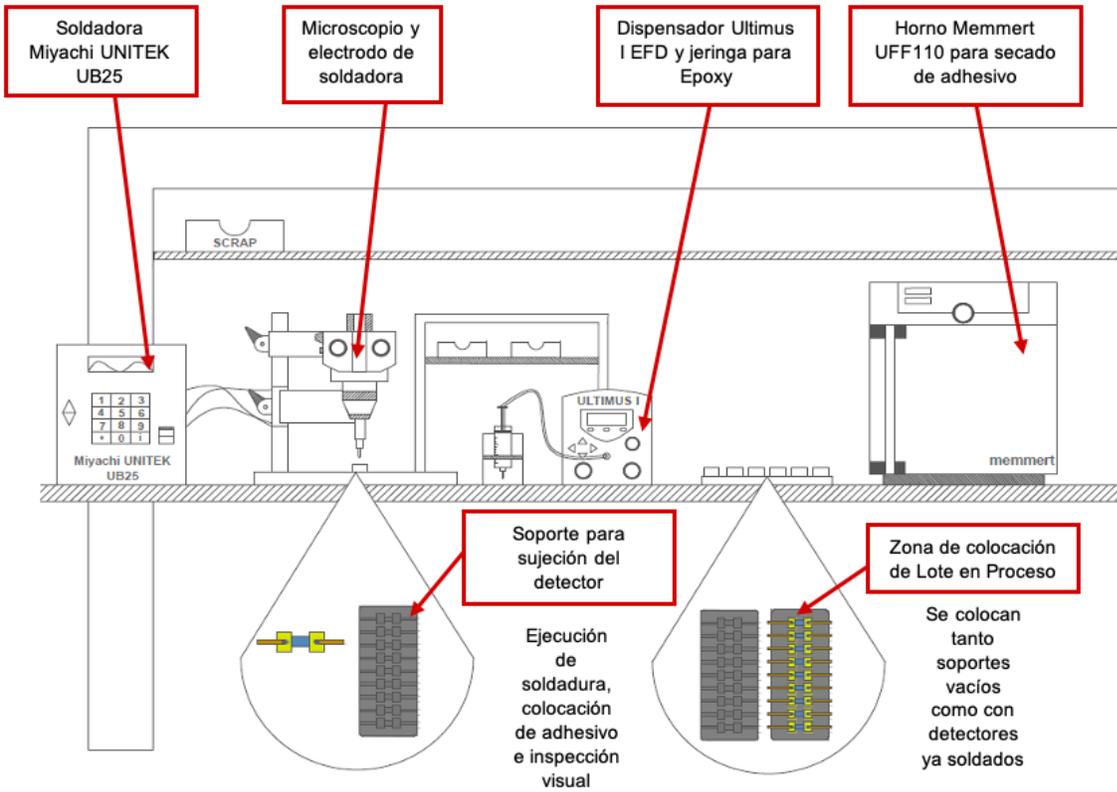


Figura 3.4: Esquemático del procedimiento actual (elaboración propia)

### 3.3 Etapas en las que se pueden realizar mejoras con base en diseños mecatrónicos

Tal y como se logra apreciar de la descripción anterior, las operaciones que componen a todo el proceso de *Detector Welding*, se ejecutan de manera completamente manual, por lo que se buscará realizar la automatización del proceso para posibilitar un aumento en la productividad de manufactura. Por consiguiente, en este punto, es de suma importancia determinar las actividades en las que se puede intervenir automatizándolas, a través de diseños mecatrónicos, para suplir las necesidades expresadas por la empresa así como optimizar, de manera general, todo el proceso productivo. En la tabla 3.1, se presenta el desglose de las actividades que se llevan a cabo durante el procedimiento y aquellas que en las que se plantea su automatización. Cabe destacar que, aunque en una determinada operación se indique que ésta no será intervenida con el sistema que se propondrá, lo anterior no implica que no pueda ejecutarse de manera automática.

**Tabla 3.1:** Identificación de las actividades que serán automatizadas

Actividad	¿Actividad será automatizada?
Desempaque de detectores	No
Colocación de detectores en soportes	No
Escritura de número de posición de detector sobre soporte, en su empaque	No
Cortar segmentos de cable de 0.5 in	Sí
Soldadura de cables	Sí
Colocación de adhesivo sobre soldadura	Sí
Curado de pegamento	Sí
Inspección visual	Sí
Guardado de piezas en empaque, según numeración previa	No

Como se aprecia en la tabla 3.1, se tiene un total de cinco operaciones que son susceptibles a ser automatizadas de manera individual y que, por consiguiente, presentan oportunidades de mejora que pueden ser abordadas desde el campo de la mecatrónica. Primeramente, se encuentra la acción de cortar las secciones de cable con una longitud de 0.5 in, misma que representa una operación que posee las características para desarrollarse de manera automática puesto que los parámetros sus parámetros se encuentran completamente

definidos como para poder ser implementados a través de un sistema mecatrónico. Lo anterior implicaría que el operario sólo tendría la responsabilidad de colocar un nuevo carrete de cable cuando sea necesario, disminuyendo el tiempo de exposición del mismo a objetos punzocortantes.

En cuanto a la soldadura de cables, la operación, igualmente, puede ser mejorada al implementar un sistema mecatrónico que automatice la actividad, de manera que se disminuya la cantidad de sobrecalentamientos en el detector y en el cable y, por consiguiente, el número de ensambles que se desechan como consecuencia de estos inconvenientes. El implementar un sistema automático implicaría que la soldadura se realizaría de la misma manera en cualquier turno laboral sin importar el colaborador que se encuentre supervisando la estación. Al igual que con el procedimiento de soldadura, la generación de un sistema mecatrónico mejoraría la aplicación de adhesivo sobre cada una de las uniones, debido a que con la automatización que se plantea, el flujo y la cantidad de dicha sustancia siempre serían los mismos, evitando que exista presencia de esta sustancia sobre la sección activa del detector y estandarizando, al mismo tiempo, la producción de los ensamblajes.

Por su parte, con respecto a la operación de curado, la misma también puede ser mejorada como consecuencia de la aplicación de un sistema automatizado, dado que, adquiriendo un equipo que se pueda acoplar de una mejor manera al funcionamiento del mismo, el sistema colocaría la temperatura adecuada y sería capaz de controlar el tiempo, sin necesidad de que el operario tenga que hacerlo manualmente por medio de un cronómetro, posibilitando un aumento en la eficiencia.

Finalmente, respecto a la inspección visual de los ensambles, la operación también es susceptible a presentar mejoras si se instaura un sistema de tipo mecatrónico. Puesto que se conocen bien las características de los detectores que deben ser desechados, el sistema puede estar en capacidad de integrar este conocimiento para realizar la decisión por sí mismo, evitando que el operario tenga que atravesar largas jornadas evaluando todos los ensambles que, en consecuencia, pueden producirle cansancio e impedir, después de un tiempo, que sea incapaz de detectar aquellas piezas que deben ser apartadas del lote.

### 3.4 Establecimiento de las necesidades y especificaciones del sistema

Para posibilitar el establecimiento de las necesidades que debe suplir el sistema que se diseñará, se empleó como método principal, el de la observación del sistema actual en uso a través de los operarios de la línea. A partir de la realización de este procedimiento y de la ejecución de algunas preguntas a los empleados, al supervisor de producción y al asesor asignado de la empresa para este proyecto, se determinaron las características con las que debe contar el sistema que se propondrá. Las necesidades identificadas, se presentan en la tabla 3.2 con su respectiva importancia que se califica con un número ubicado entre 1 y 5, en donde 1 implica que es una necesidad no importante, mientras que el número 5,

cataloga a la misma como de vital importancia.

**Tabla 3.2:** Necesidades expresadas por el cliente y su importancia correspondiente

Clasificación	Núm.	Necesidad	Imp.
Funcionalidad	1	El sistema identifica a los detectores cuando ingresan a éste	5
	2	El sistema manipula a los detectores sin generar alteraciones en la zona activa	5
	3	El sistema realiza el corte de los cables para soldadura con las dimensiones requeridas	4
	4	El sistema realiza la soldadura de los cables sin dañarlos	5
	5	El sistema suelda los cables en el centro de la región dorada del detector	4
	6	El sistema aplica la cantidad necesaria de epoxy sobre las uniones soldadas	5
	7	El sistema aplica la misma cantidad de adhesivo en las uniones soldadas de todas las piezas	4
	8	El sistema identifica a los detectores que se encuentran rayados o quebrados	4
	9	El sistema identifica los residuos de Epoxy presentes en la zona activa del detector	4
Productividad	10	El sistema ejecuta las operaciones de manera rápida	5
	11	El sistema cumple con la meta diaria de producción	5
	12	El sistema otorga seguimiento de los parámetros de producción	3
	13	El sistema aumenta la capacidad productiva	4
	14	El sistema posee un mantenimiento sencillo	4
	15	El sistema estandariza el proceso de ensamblaje	4
Interacción con el usuario	16	El sistema es seguro con los operarios	5
	17	El sistema muestra al usuario las magnitudes de las variables más importantes del proceso.	3
	18	El sistema posee sus operaciones bien definidas e identificadas	4
	19	El sistema puede ser operado manualmente desde una interfaz externa	4
	20	El sistema limita la intervención humana en el proceso productivo	3

Una vez establecida la agrupación anterior de las necesidades, se determinaron las métricas a ser utilizadas para evaluar a cada una de ellas. En la tabla 3.3, se presentan las métricas propuestas, según la necesidad correspondiente.

**Tabla 3.3:** Listado de métricas propuestas para las necesidades identificadas

Métrica Núm.	Núm. de necesidad	Métrica	Unidades
1	1	Identificación de detectores en el sistema	Binarias
2	2, 8, 9	Identificación de la presencia de rasguños, golpes y adhesivo en zona activa del detector	Binarias
3	3, 15	Longitud de los segmentos de cable	in
4	4, 15	Continuidad eléctrica entre cables y región dorada de detectores	$\Omega$
5	5, 15	Posición de la unión soldada	in
6	6, 7, 15	Cantidad de pegamento aplicado	mL
7	10	Tiempo de ciclo	s/unidad
8	11	Cantidad de piezas ensambladas diariamente	Piezas
9	12, 17	Actualización y muestra de datos en el sistema	s
10	13	Unidades producidas en una hora por el operario	UHH
11	14	Tiempo de ensamble/deseñable del sistema para mantenimiento	s
12	16	Aprobación de evaluación de departamento de SSO (Seguridad y Salud Ocupacional) de la empresa	Binarias
13	18	Operaciones definidas e identificadas	Binarias
14	19	Incluye funcionamiento manual	Binarias
15	20	Cantidad de operaciones realizadas por los operarios	Operaciones

Indicadas las métricas, se procedió a realizar el planteamiento de las especificaciones, es decir, la determinación de los valores marginalmente aceptables y de las magnitudes objetivo del sistema. Dado que se está siguiendo la metodología planteada en [20], la siguiente fase para la definición de los valores buscados, corresponde a la ejecución de una comparación con la competencia, es decir, realizar la búsqueda de empresas que contengan un tipo de sistema automático, como el que se plantea construir, para la operación de soldadura de un sensor. Lo anterior, con el objetivo de que el sistema que se presente características favorables o comparables frente a los modelos externos. Sin embargo, debido a que los datos requeridos son demasiado específicos y no es posible obtener información de otras empresas por cuestiones de confidencialidad, las magnitudes estipuladas fueron directamente establecidas a partir de los datos de producción de esta primera etapa del proceso de manufactura del sensor. En la tabla 3.4, se presentan los valores resultantes, según la métrica correspondiente.

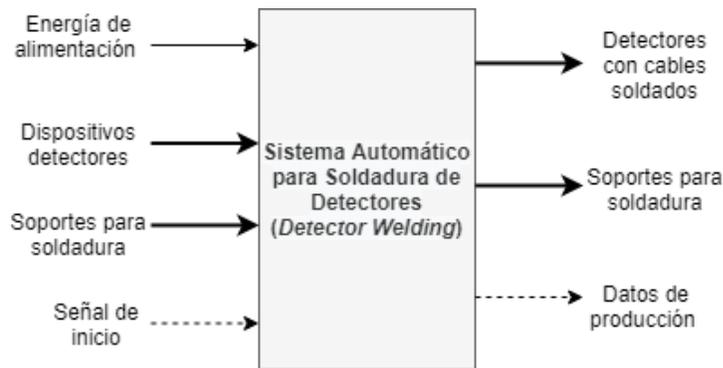
**Tabla 3.4:** Especificaciones del sistema que se pretende estructurar

Métrica Núm.	Núm. de necesidad	Métrica	Unidades	Valor Marginal	Valor Objetivo
1	1	Identificación de detectores en el sistema	Binarias	Sí	Sí
2	2, 8, 9	Identificación de la presencia de rasguños, golpes y adhesivo en zona activa del detector	Binarias	Sí	Sí
3	3, 15	Longitud de los segmentos de cable	in	0.5-0.7	0.5
4	4, 15	Continuidad eléctrica entre cables y región dorada de detectores	$\Omega$	0 - 50	
5	5, 15	Posición de la unión soldada	in	X: 0.03-0.06 Y: 0.08-0.12	X: 0.04 Y: 0.10
6	6, 7, 15	Cantidad de pegamento aplicado	mL	0.01-0.03	0.01-0.02
7	10	Tiempo de ciclo	s/unidad	112.1	< 112.1
8	11	Cantidad de piezas ensambladas diariamente	Piezas	1131	> 1131
9	12, 17	Actualización y muestra de datos en el sistema	s	< 8	$\leq 5$
10	13	Unidades producidas en una hora por el operario	UHH	27.29	> 27.29
11	14	Tiempo de ensamble/deseñable del sistema para mantenimiento	s	< 1200	< 900
12	16	Aprobación por parte del departamento de SSO (Seguridad y Salud Ocupacional) de la empresa	Binarias	Cumple	Cumple
13	18	Operaciones definidas e identificadas	Binarias	Sí	Sí

## 3.5 Generación de conceptos

### 3.5.1 Descomposición funcional

Tras la determinación de las especificaciones para el sistema, el siguiente paso en la metodología de diseño, corresponde al establecimiento de diferentes conceptos que posibilitarán el cumplimiento de los valores objetivo o, en su defecto, de las magnitudes marginalmente aceptables, planteados anteriormente. Para posibilitar la ejecución de este procedimiento, según lo establecido en [20], primeramente se procedió a realizar un modelo de caja negra del sistema que se propone, para permitir una descomposición funcional del mismo en subproblemas más pequeños. El modelo generado se presenta en la figura 3.5.

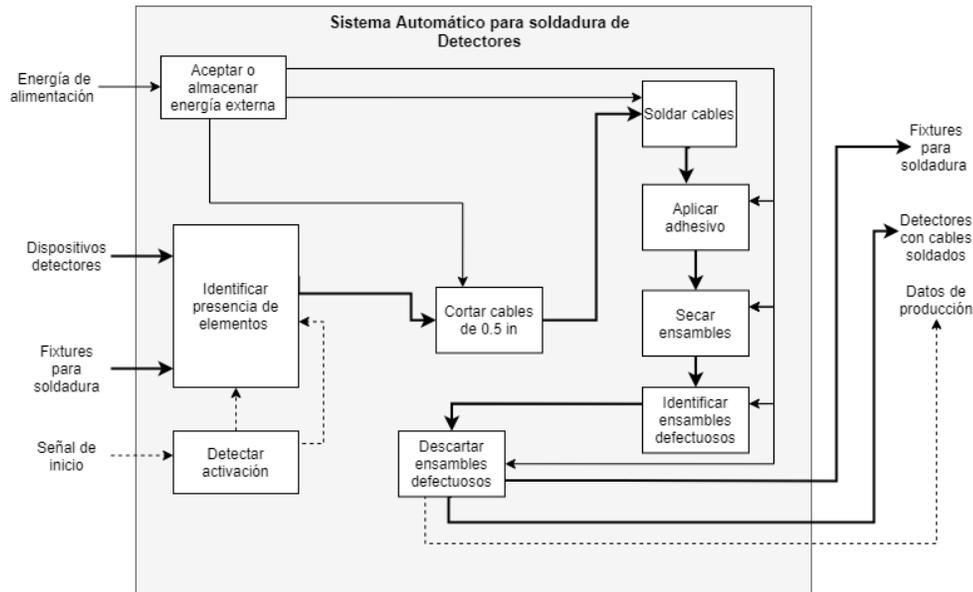


**Figura 3.5:** Modelo de caja negra para la identificación de entradas y salidas del sistema (elaboración propia)

Según lo que se puede observar de la figura 3.5, las entradas identificadas para el sistema corresponden a: la energía de alimentación, necesaria para que los elementos que lo compondrán funcionen de manera correcta; los dispositivos detectores, que corresponden a los dispositivos sobre los cuales se ejecutarán las diferentes tareas; los soportes para soldadura, utilizados como soporte para los detectores y posibilitar la realización de las operaciones de una manera más sencilla; y la señal de inicio para indicarle al sistema el momento en el que debe iniciar a operar. Como salidas del sistema, se tiene a los detectores con los cables soldados, es decir, el ensamble final solicitado; los soportes para soldadura, debido a que, evidentemente, acompañarán a los detectores durante todo el procedimiento; y los datos de producción, que deben mostrarse a los operarios para que estos puedan verificar el adecuado funcionamiento de todo el sistema, así como para generar un histórico sobre los ensamblajes producidos y descartados de manera automática, sin necesidad de que el empleado escriba los datos de manera manual.

Finalmente, con base en el modelo de caja negra presentado anteriormente, se ejecutó la división de la misma en subfunciones, con el objetivo de obtener una descripción más detallada del sistema y caracterizar aquellas actividades que debe llevar a cabo para realizar el planteamiento de los diferentes conceptos que posteriormente serán evaluados para la selección del diseño que, finalmente, será desarrollado con una mayor profundidad.

El diagrama funcional del sistema automático para soldadura de detectores, incorporando todas las subetapas indicadas, se presenta en la figura 3.6



**Figura 3.6:** Descomposición funcional del modelo de caja negra para el sistema de estudio (elaboración propia)

Del esquema presentado en la figura anterior, se observa que se tienen las siguientes subfunciones, a saber:

- **Aceptar o almacenar energía externa.** Es sumamente necesario que el sistema sea capaz de captar la energía para la alimentación de todos los elementos componentes del mismo.
- **Identificar presencia de elementos.** Se refiere a la capacidad del sistema para detectar la presencia o ausencia de los detectores y de los soportes en la entrada de éste. Dicha señal de control se vuelve necesaria para que el funcionamiento comience únicamente cuando existe la materia prima requerida para tal fin.
- **Detectar activación.** Para posibilitar el funcionamiento del proyecto, es necesario enviar una señal de inicio desde el exterior. Por consiguiente, el sistema debe estar en capacidad de responder ante dicho estímulo y comenzar con la operación de todas las partes funcionales.
- **Transportar soportes con detectores.** Incluye el mecanismo que será utilizado para movilizar los soportes, en conjunto con los detectores, a lo largo de las diferentes estaciones o partes del sistema automático.
- **Cortar cables de 0.5 in.** El objetivo principal que motiva el desarrollo de este sistema automático, corresponde a la ejecución de la soldadura de los cables. Por lo tanto, resulta indispensable que el mecanismo sea capaz de realizar el corte de los

cables al mismo tiempo que los ubica sobre la región del fixture destinada para tal fin.

- **Soldar cables.** Dada la naturaleza del procedimiento, es indispensable que el sistema se encuentre en la capacidad de realizar esta operación de manera automática, disminuyendo los errores generados por un calentamiento excesivo o por una mala ubicación del electrodo de la máquina para soldar con respecto al detector.
- **Aplicar adhesivo.** Esta característica es deseable que sea incluida como parte del sistema automatizado, para permitir que la aplicación del pegamento se lleve a cabo de manera uniforme, depositando la misma cantidad en todas las uniones, sin generar afectaciones sobre la zona activa del dispositivo detector.
- **Secar ensambles.** Tras la aplicación del pegamento sobre las uniones soldadas, es necesario realizar un procedimiento de secado para asegurar la firmeza del mismo. Por consiguiente, esta función también debe ser considerada como parte del diseño automático, buscando disminuir el tiempo de 40 minutos que actualmente demora dicho procedimiento.
- **Identificar ensambles defectuosos.** Dado que es requerido el realizar una inspección visual en los ensambles finales para descartar aquellos cuyo detector presente afectaciones en su correspondiente área activa, el sistema también debe ser capaz de ejecutar esta tarea de manera automática, para evitar que el operario genere un cierto tipo de fatiga como consecuencia de la realización repetitiva de esta actividad, que le impida ejecutar la discriminación de los ensambles de manera correcta.

### 3.5.2 Planteamiento de los Conceptos

Con base en el diagrama funcional previamente establecido, se posibilitó la identificación de una serie de subfunciones o subproblemas para el sistema planteado. Dichos subproblemas pueden ser abordados de manera individual con el objetivo de encontrar segmentos de solución que finalmente puedan ser combinados para conformar cada uno de los conceptos buscados, según lo presentado en [20]. Por lo tanto, para guiar el procedimiento de identificación de soluciones, se ejecutó una búsqueda tanto externa como interna, utilizando como insumos o fuentes de información para la primera de ellas, artículos científicos, patentes y consultas a los asesores que fueron asignados al presente proyecto. Tras la combinación de diferentes soluciones encontradas, mismas que fueron preseleccionadas según la manera en la que ejercían correctamente las tareas de una determinada subfunción, se obtuvieron finalmente tres conceptos distintos, que funcionan como propuestas para la automatización del proceso de soldadura en su totalidad. A continuación se describe cada uno de ellos.

### 3.5.2.1 Concepto 1

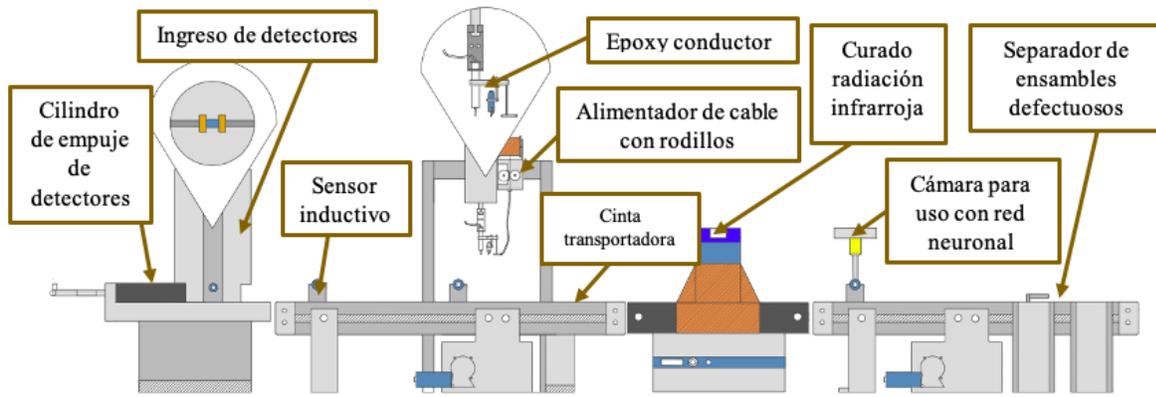
El primer concepto permite la recepción de energía eléctrica a partir del uso de un cable o, en su defecto, múltiples de ellos conectados a un tomacorriente. Por su parte, tanto los detectores como los soportes, son monitoreados en las diferentes estaciones del sistema a partir del uso de sensores de tipo inductivo, aprovechando las propiedades metálicas de ambos elementos. Después de que el operario ha colocado a los detectores en sus respectivas posiciones en los soportes, anotado las posiciones que utilizan estos a un lado del número de serie de los empaques y se encuentran en la entrada del sistema automático dentro de un magazine, el operario debe presionar un botón de marcha para activar todo el sistema. Habiendo cumplido con la tarea anterior, se activa un cilindro de empuje que moviliza al primer soporte hasta un sensor ubicado sobre una banda transportadora. Cuando se ejecuta la detección, la cinta se activa y moviliza al conjunto hasta la estación de soldadura en donde se emplea un epoxy conductor de electricidad que permite simplificar la ejecución de tareas dentro del proceso de manufactura, eliminando la actividad de dispensado de adhesivo.

Por su parte el cable requerido para la soldadura, es alimentado al sistema por medio de un mecanismo de rodillos y, posteriormente, una vez que se ha aplicado el epoxy sobre el mismo, se realiza el corte a través de unas pinzas con activación de tipo neumático. Cabe aclarar que para la realización de la operación sobre el otro extremo del detector, el sistema de dispensado se encuentra sujeto a un eje con capacidad de rotar, por lo que una vez que se ha finalizado con uno de la colocación de uno de los cables, se hace girar al sistema para repetir la actividad.

Posteriormente, todo el ensamble resultante se somete a un procedimiento de curado con radiación de tipo infrarroja, con el objetivo de que el epoxy conductor adquiera las propiedades de resistencia mecánica requeridas que aumenten la durabilidad de las uniones. La radiación infrarroja se aplica a las piezas de manera continua por un tiempo ubicado entre 5 y 30 s, dependiendo del tipo de epoxy utilizado.

Finalmente, cuando el soporte se aproxima al siguiente sensor de tipo inductivo, se realiza la operación de inspección visual tomando una fotografía del conjunto y analizándola con una red neuronal de tipo convolucional capaz de identificar aquellos ensamblajes que no cumplen con las condiciones requeridas para continuar dentro del proceso productivo. Estos últimos elementos son separados del resto del grupo gracias a una etapa tipo *sorting*.

En la figura 3.7 se presenta un boceto del concepto anteriormente descrito.



**Figura 3.7:** Boceto del concepto 1 planteado (elaboración propia)

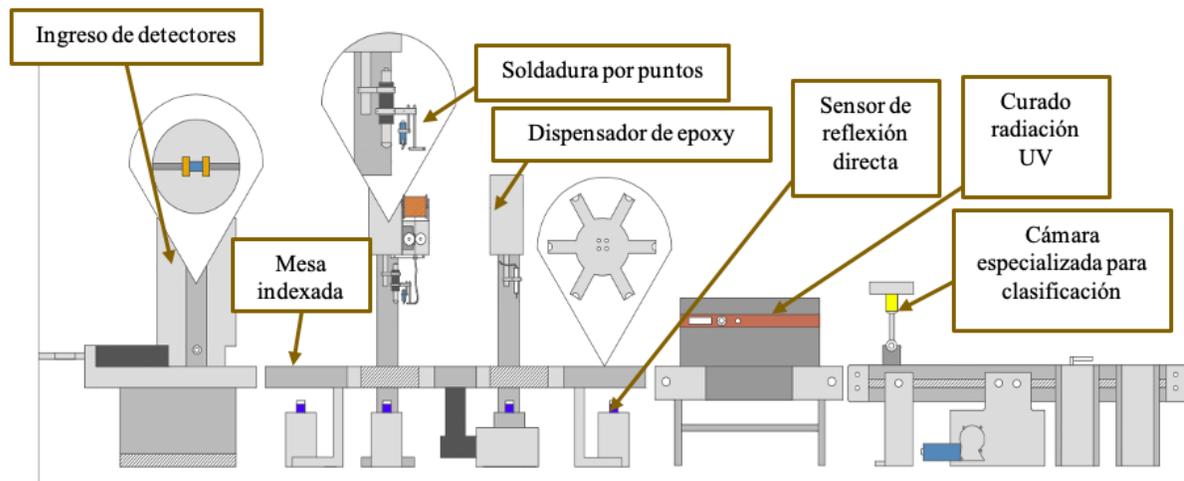
### 3.5.2.2 Concepto 2

El segundo concepto permite la recepción de energía eléctrica a partir del uso de cables conectados directamente al tomacorriente. Por su parte, para identificar a los detectores y al soporte en las diferentes secciones del sistema, se utilizan sensores de tipo óptico de reflexión directa. Los soportes, en conjunto con los detectores, se agrupan dentro de un magazine. Cuando el operario ha presionado el botón de inicio del sistema y hay presencia de materia prima dentro del magazine, se activa un cilindro de empuje que moviliza a los elementos hasta una de las posiciones de una mesa giratoria indexada, en donde son detectados por un sensor como el que se indicaba anteriormente. Acto seguido, la mesa rota hasta que el soporte se ubique debajo de la estación de soldadura, en donde, utilizando el electrodo de la soldadora Miyachi Unitek con la que se cuenta actualmente dentro de la empresa, se realiza la unión de los cables sobre los extremos del detector. En este caso, la alimentación de los mismos se ejecuta por medio de un sistema de rodillos y el corte, a través de pinzas con accionamiento neumático.

Una vez que se ha finalizado el procedimiento anterior, la mesa giratoria traslada a la pieza hasta la zona de aplicación de pegamento. En dicha locación, se realiza la deposición de las gotas de epoxy sobre cada una de las uniones, mismo que proviene desde un cartucho o jeringa conectado a un dispensador neumático igual al que se utiliza en la operación actualmente. Acto seguido, los detectores son movilizadas hasta la estación de curado, compuesta por una banda transportadora con lámparas de radiación UV, en donde los elementos permanecen un tiempo aproximado ubicado entre 5 y 30 segundos, dependiendo del tipo de las características del epoxy que se haya utilizado.

Posteriormente, los soportes son trasladados hasta la sección de análisis e inspección, en donde una cámara especializada se encarga de determinar aquellos detectores que presentan alteraciones en su zona activa o algún otro tipo de imperfección, según las características de un ensamble bien ejecutado, para posteriormente, a partir de un mecanismo tipo *sorting* realizar la separación de aquellos detectores con defectos y entregar a la salida del sistema sólo los dispositivos que sean funcionales para que puedan volver a

ser almacenados, por parte de los operarios, en sus respectivos empaques. En la figura 3.8, se presenta el boceto del concepto descrito.



**Figura 3.8:** Boceto del concepto 2 planteado (elaboración propia)

### 3.5.2.3 Concepto 3

El tercer concepto, es alimentado directamente a partir de una conexión cableada a la corriente eléctrica. Por su parte, para identificar la presencia de detectores con su respectivo soporte en las diferentes etapas del sistema automático, se utilizan sensores de tipo inductivo. Todos los dispositivos que serán modificados dentro del sistema, se agrupan inicialmente dentro de un magazine. Cuando el sensor ubicado en esta posición detecta la presencia de los soportes, se activa un cilindro de empuje que comienza a movilizarlos, uno a la vez, hasta la estación de soldadura, misma que se realiza con láser y con el cable que es alimentado por medio de un sistema de oruga. Acto seguido, a través de un brazo robótico, se moviliza al soporte con su respectivo detector hasta la siguiente etapa del procedimiento, correspondiente a la deposición de epoxy sobre las uniones soldadas, en donde se emplea un sistema de dispensado con una bomba tipo pistón.

Una vez finalizada la tarea correspondiente a la colocación de adhesivo, los detectores son sometidos a un procedimiento de curado por medio de un horno de convección con una configuración de tipo *conveyor* o de cinta transportadora, en donde se regula la velocidad de la misma para permitir que el epoxy se solidifique adecuadamente, al permanecer dentro de esta sección del sistema por un tiempo de alrededor de 15 minutos.

Finalmente, los ensamblajes se movilizan hasta la estación de inspección visual, en donde mediante el uso de una cámara programada con un sistema de visión se determina si los detectores cumplen con los requerimientos para ser considerados como válidos. Caso contrario, aquellos que presenten defectos serán separados del resto de ensamblajes, a través de un mecanismo de tipo *sorting*. La descripción anterior, se puede representar gráficamente a partir de la figura 3.9.

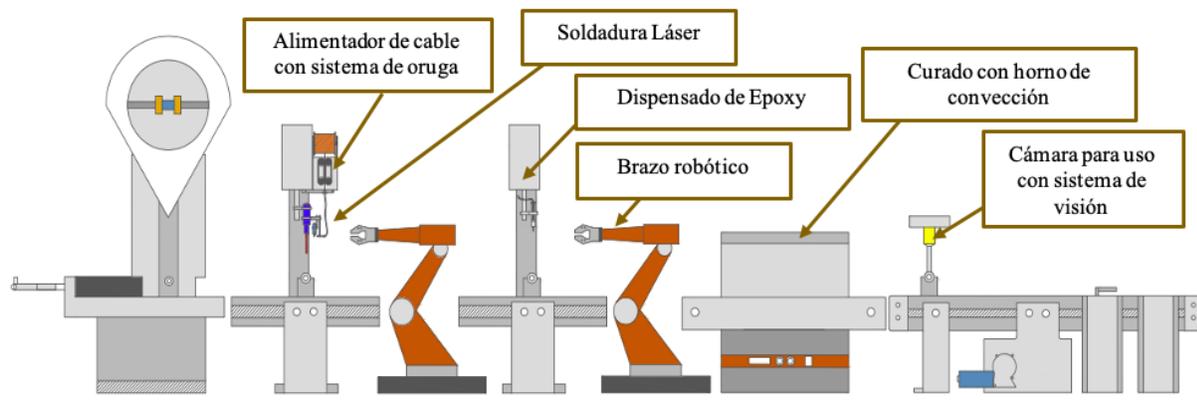


Figura 3.9: Boceto del concepto 3 planteado (elaboración propia)

### 3.5.3 Evaluación y selección de conceptos

A partir de las tres propuestas generadas y presentadas anteriormente, se construyó una matriz de selección con diferentes criterios y pesos asociados para evaluar a cada una de ellas, a través de una calificación ubicada entre 1 y 5, en donde 1 significa que el concepto presenta un bajo desempeño con respecto al rubro evaluado y 5, por su parte, que la propuesta es altamente adecuada para satisfacer al mismo. Cabe mencionar que los criterios colocados dentro de la matriz engloban a las necesidades identificadas anteriormente. La matriz resultante, se presenta en la tabla 3.5.

Tabla 3.5: Matriz de selección de conceptos

Criterios de Selección	Peso	Conceptos					
		Propuesta 1		Propuesta 2		Propuesta 3	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Costo de implementación	20.00%	4	0.800	5	1.000	2	0.400
Frecuencia de mantenimiento	18.50%	2	0.370	4	0.740	2	0.370
Velocidad de operación	18.00%	5	0.900	3	0.540	4	0.720
Afectación en las especificaciones finales del ensamble	14.50%	2	0.290	4	0.580	3	0.435
Repetitividad en la producción	14.50%	3	0.435	4	0.580	5	0.725
Confiabilidad de los ensambles generados	14.50%	2	0.290	4	0.580	3	0.435
<b>Total</b>	100.00%	3.085		4.020		3.085	
Lugar:		2		1		2	
¿Continuar?		No		Desarrollar		No	

Según se observa de la tabla 3.5, se tienen definidos seis criterios de selección. En primer lugar, con el mayor peso de todos, se encuentra el costo de implementación. El mismo presenta esta última característica debido a que para la empresa es de suma importancia que el costo del sistema no sea demasiado elevado, buscando como objetivo principal que

se optimice el procedimiento, es decir, utilizar elementos que ya se encuentren presentes en las instalaciones para conformar un sistema que sea capaz de aumentar las unidades producidas durante la primera etapa de ensamblaje. En este rubro se observa que a la propuesta 2 se le ha otorgado una calificación de 5, mientras que las propuestas 1 y 3 fueron calificadas con 4 y 2, respectivamente. Dicha asignación se decidió ejecutar de la manera anterior, debido a que la propuesta 2 emplea el equipo utilizado actualmente por la empresa para realizar la soldadura y la deposición de epoxy, aprovechando la característica que presentan ambos dispositivos para poder operar de manera automática y ahorrando, por consiguiente, recursos al no tener necesidad de invertir en equipos nuevos. Por su parte a la propuesta 1 se le colocó la calificación indicada, puesto que con ésta se estaría eliminando una de las operaciones del proceso (la de soldadura), disminuyendo los costos de mantenimiento asociados que surgirían como consecuencia de tener un dispositivo o máquina adicional. Finalmente, la propuesta 3 se evaluó con dicho valor debido a que, de manera general, los brazos robóticos tienen un costo más elevado como consecuencia de su precisión y de las diferentes tareas que se pueden ejecutar con los mismos.

En segundo lugar, se tiene a la frecuencia de mantenimiento, entendida como la cantidad de veces que será necesario revisar el equipo y, por lo tanto, realizar paros en la producción. Dado que se requiere aumentar la productividad de manufactura del sensor, se le ha asignado un peso de 18.5% puesto que si se tiene una alta frecuencia, dicha variable se observaría afectada. Dentro de este rubro, a la propuesta 1 se le otorgó una calificación de 2, debido a que al incorporar motores, poleas y bandas para las diferentes cintas transportadoras, es evidente que requerirá de una mayor cantidad de inspecciones para verificar el correcto funcionamiento de sus componentes. Por su parte, en cuanto al concepto 3, igualmente se le asignó una calificación de 2, como consecuencia de los múltiples elementos que conforman a un brazo robótico, dificultando el procedimiento de mantenimiento y aumentando la frecuencia del mismo. Finalmente, la propuesta 2 fue evaluada con un 4, debido a que no presenta elementos con una gran cantidad de piezas internas en la mayor parte de su composición, evitando aumentar las sesiones de mantenimiento sobre el sistema que se propone.

El tercer rubro que se presenta en la matriz es la velocidad de operación, es decir, una consideración respecto a la capacidad del sistema para poder ensamblar los componentes del detector en el menor tiempo posible. La propuesta 1 es la mejor evaluada (con calificación de 5) al eliminar una de las operaciones gracias al empleo del epoxy conductor. Por su parte, con una calificación de 4, se tiene a la propuesta 3 que, a pesar de mantener a las operaciones de manera individual, el uso de brazos robóticos para el desplazamiento de los detectores le otorga una mayor velocidad al procedimiento. Finalmente, con una nota de 3 se posiciona la propuesta 2 debido a que en la misma permanece la separación de actividades y, además, el transporte de los detectores a lo largo del sistema no puede ocurrir a una velocidad muy alta para permitir que los sensores detecten la posición de los soportes correspondientes y se permita la realización de las diferentes tareas.

El cuarto criterio de selección, corresponde a la afectación en las especificaciones finales del ensamble. Dicho criterio se refiere al grado de afectación en la funcionalidad del

ensamble final que podría resultar como consecuencia de la implementación de los conceptos propuestos. Tomando en cuenta la característica anterior, a la propuesta 1 se le calificó con un 2, debido a que el uso de un epoxy conductor para unificar las operaciones de soldadura y colocación de adhesivo, podría resultar en el incremento de la resistencia del elemento (afectando la señal medida) o en una conductividad limitada que evitaría el funcionamiento dentro del ámbito médico buscado. Por su parte, al concepto 3, se le otorgó un 3 puesto que se mantienen las actividades individuales, sin embargo, el uso de un láser para la ejecución de la operación de soldadura podría resultar muy agresivo para el dispositivo detector, sobrecalentándolo innecesariamente hasta que el mismo no sea capaz de responder ante la presencia de luz infrarroja. La propuesta 2, por otro lado, recibe una evaluación de 4, como consecuencia del uso del equipo de soldadura empleado actualmente en el procedimiento manual, lo que implica que no se inducirán cambios en el ensamble dentro de este rubro. No obstante, dado que se plantea el uso de radiación UV para el curado del pegamento, lo que implica modificar el epoxy que se usa actualmente por otro que reaccione ante la presencia de este tipo de luz, podrían existir ciertas diferencias de índole mecánica entre el ensamble generado manualmente y uno producido a partir del sistema automático.

En quinto lugar se tiene a la repetividad en la producción, rubro que evalúa la capacidad del sistema para producir ensambles con características similares entre sí, sin importar el operador en turno que se encuentre haciendo uso del sistema. Para este caso, el concepto mejor evaluado corresponde al número 3, como consecuencia del uso de plataformas estáticas para la realización de las actividades del procedimiento así como también, por la colocación de robots industriales cuyos movimientos pueden presentar una alta precisión dependiendo del modelo y del fabricante de los mismos. Posteriormente, con una nota de 4 puntos, se ubica la propuesta 2 misma que, al emplear una mesa giratoria indexada, posiciona al detector de una manera adecuada en cada una de las etapas del proceso con bajas posibilidades de generar corrimientos que pudiesen afectar tanto la soldadura de cables (al no ubicarse cerca del centro), como la colocación de epoxy, al caer dicha sustancia sobre la zona activa del dispositivo detector. En cuanto a la propuesta 1, la misma obtuvo una puntuación de 3 debido a la utilización de bandas transportadoras que, al ser movilizadas a través de motores, pueden producir corrimientos en la ubicación de los detectores con sus respectivos soportes como consecuencia de la inercia que tiende a conservar el movimiento de la cinta aunque se realice el apagado de esta última, existiendo la posibilidad de generar ensambles con características distintas entre sí.

El último criterio de selección corresponde a la confiabilidad de los ensambles generados. Este rubro se refiere a que si el detector funcionará según lo esperado, es decir, entregando las mediciones realizadas de concentración de CO<sub>2</sub> sin alteraciones y, por consiguiente, indicando de manera correcta el estado del paciente en este ámbito. Lo anterior también considera la capacidad que tiene el sistema para poder separar los ensambles que poseen las características requeridas para seguir formando parte del proceso de manufactura, de aquellos que no cumplen con los parámetros previamente establecidos. Tomando en consideración la información anterior, la propuesta mejor evaluada, con una calificación

de 4, corresponde a la número 2, debido a la presencia de una cámara especializada para la clasificación de los ensambles que no requiere de un entrenamiento especializado, como una red neuronal convolucional (propuesta 1), y es capaz de detectar todos aquellos detectores con características distintas al ensamblaje buscado, en contraposición con un sistema de visión tradicional (propuesta 3), en donde únicamente es posible la detección de algunos defectos presentes en el dispositivo. Adicionalmente, se decidió asignar una mayor puntuación a la propuesta 2, debido a que la misma mantiene una mayor parte de las características del procedimiento original (con excepción del tipo de epoxy) que permite, prácticamente, asegurar que el ensamble presentará las condiciones para funcionar de manera adecuada.

Habiendo considerado todos los criterios anteriores, se puede apreciar que el concepto mejor evaluado, de manera general, corresponde al número 2 según los razonamientos planteados anteriormente. Por lo tanto, este último es el sistema que se propone para la automatización del procedimiento actual y sobre el cual se realiza el desarrollo específico de la etapa de soldadura, según los objetivos planteados.



# Capítulo 4

## Diseño del sistema para el subproceso de soldadura

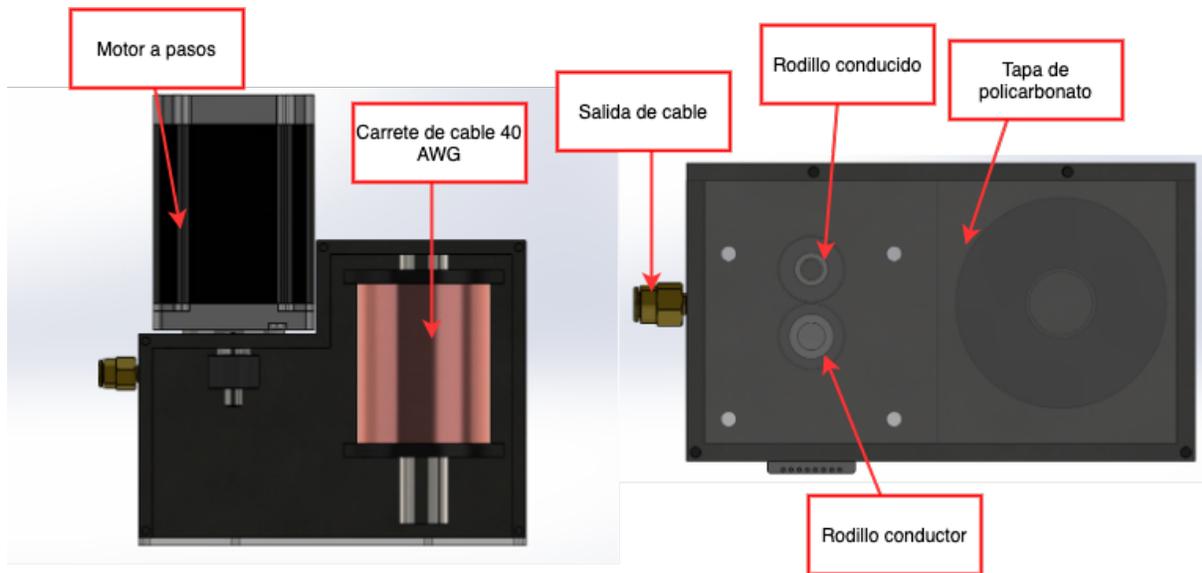
### 4.1 Descripción

En este capítulo se plantea, de manera detallada, las características del diseño propuesto para el subproceso de soldadura correspondiente a la primera etapa del ensamblaje de los sensores de medición de  $CO_2$ , tomando como base el concepto seleccionado para la estandarización de dicha etapa, presentado en el capítulo anterior. Cabe mencionar que a lo largo del contenido de esta sección del informe, se muestran todos los cálculos y algoritmos, así como las decisiones que fueron tomadas para la obtención del sistema en cuestión.

### 4.2 Diseño del alimentador del cable

#### 4.2.1 Selección del material para los rodillos de alimentación

Tal y como se estableció anteriormente, dentro del subproceso de soldadura correspondiente a la primera etapa del ensamble de los sensores de  $CO_2$ , una de las operaciones fundamentales se observa representada en la alimentación cable que se coloca en los dos extremos del dispositivo detector. Según el concepto seleccionado y presentado en el capítulo anterior (figura 3.8), se plantea la ejecución de esta tarea a partir de un sistema de rodillos. La ilustración del alimentador final diseñado, se presenta en la figura 4.1.



**Figura 4.1:** Esquema del alimentador diseñado (elaboración propia)

Según se puede observar de la figura anterior, el alimentador propuesto consta de tres elementos fundamentales, a saber: un motor, que genera el movimiento del mecanismo completo; un rodillo conductor, que se acopla directamente al eje del motor; y un rodillo conducido que rota gracias a la fuerza de fricción generada como consecuencia de la interacción entre los dos últimos elementos, tal y como se estableció anteriormente. Dicha fuerza, además, permite que la alimentación del cable se lleve a cabo de manera continua posibilitando que se suministre la cantidad necesaria de dicho elemento al sistema. Debido a esta característica, se hace imprescindible la selección adecuada del material a utilizarse como recubrimiento de los rodillos, con el objetivo de generar la fricción estática suficiente para impedir el deslizamiento entre ambos elementos mientras se encuentran girando y, a su vez, permitir que el motor movilice al mecanismo sin que la operación le exija el uso de una potencia muy elevada como consecuencia de la presencia de una magnitud de fricción alta que restrinja la rotación.

Considerando las condiciones anteriores, se encontró que existen dos materiales ampliamente utilizados en el ámbito industrial para la fabricación de rodillos, mismos que son el neopreno y el poliuretano. En la tabla 4.1, se presenta una comparación de algunas de las propiedades de ambos elementos.

**Tabla 4.1:** Comparación entre algunas de las propiedades del neopreno y el poliuretano

Propiedad	Neopreno	Poliuretano
Densidad ( $g/cm^3$ )	1.55	1.25
Coefficiente de fricción estático entre superficies iguales	1.16	0.2-2.5 (según la dureza)
Esfuerzo de tracción (MPa)	28	25-51
Temperatura máxima de servicio ( $^{\circ}C$ )	100	80
Temperatura mínima de servicio ( $^{\circ}C$ )	-30	-20
Alargamiento a la rotura (%)	300	552

Según la información presentada en la tabla anterior, se puede decir que, de manera general, ambos materiales contienen propiedades sumamente similares, diferenciándose, fundamentalmente, en los rubros de resistencia mecánica a la tensión y el alargamiento a la rotura. Dado que la aplicación para la cual se utilizarán los rodillos no implica que los materiales estarán sometidos a tensión, se decidió utilizar el neopreno como recubrimiento para la ejecución del mecanismo. Dicha decisión se fundamentó, además, en el costo de dichos componentes, siendo más elevado el correspondiente al poliuretano como consecuencia del complejo proceso de producción para su obtención.

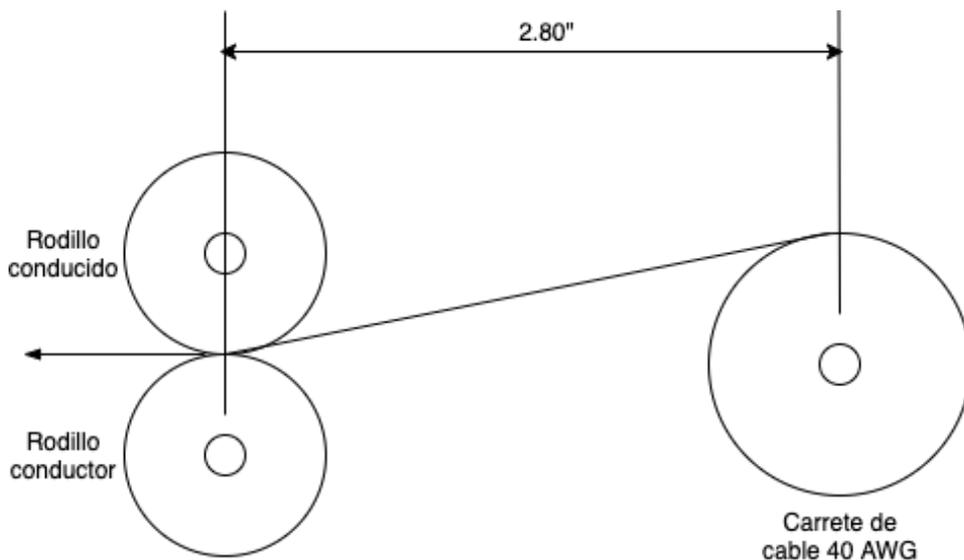
#### 4.2.2 Selección del motor para la movilización del mecanismo

Habiendo seleccionado el material para los rodillos del sistema de alimentación de cable, la siguiente etapa del proceso de diseño correspondió a la escogencia del dispositivo que le otorgará movilidad al sistema. Para la realización de dicha decisión, se consideró, fundamentalmente, la naturaleza de la tarea que el alimentador debe ejecutar. Se sabe que la longitud de los cables que el sistema de alimentación debe otorgar para la posterior ejecución de la soldadura, corresponde a una magnitud de aproximadamente 0.5 in, por lo que, en realidad, es necesario contar con un dispositivo cuya rotación pueda controlarse efectivamente para posibilitar un adecuado despliegue del cable.

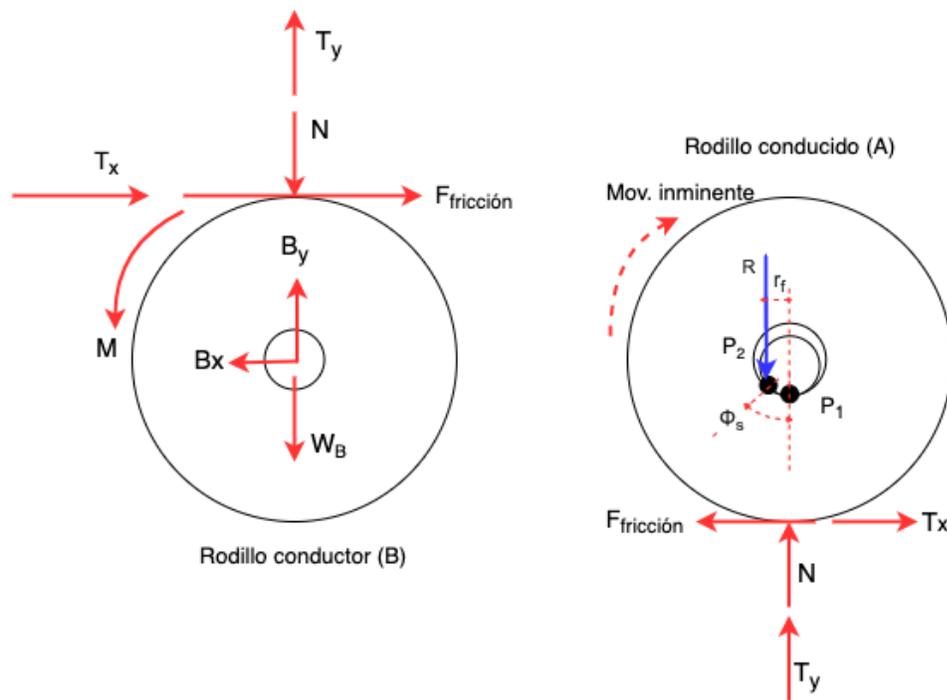
Por lo tanto, tomando en consideración el requerimiento anterior, se observa que la mejor alternativa para la generación del movimiento corresponde a un motor a pasos dadas sus características de funcionamiento por pulsos que, a su vez, se traducen en una rotación angular específica en su eje permitiendo un mayor control sobre la cantidad de cable que se alimentará al sistema, en contraposición con otro tipo de dispositivos como lo es el caso de un motor DC, en donde únicamente es posible controlar la velocidad de rotación de su eje, sin capacidad de establecer de manera sencilla el número de revoluciones requerido para la extracción del cable.

Dado que existe una gran cantidad de modelos de motores a pasos en el mercado, para

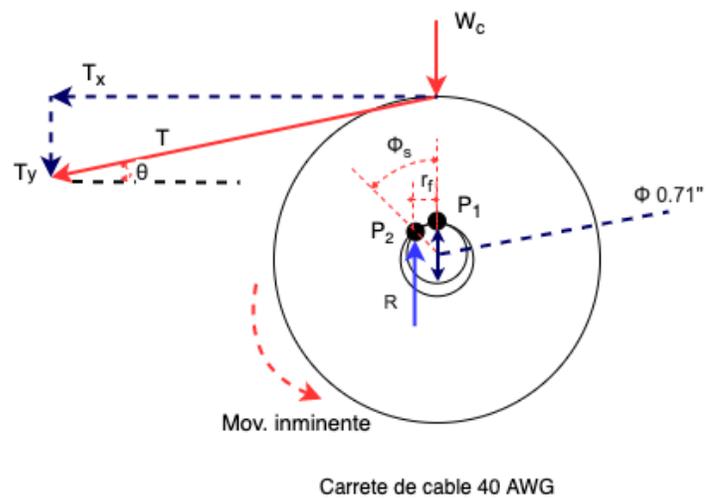
posibilitar la selección de uno de ellos para la aplicación planteada, fue necesario determinar el par mínimo necesario que éste debía otorgar con el objetivo de garantizar la movilización del sistema. Para posibilitar el cálculo de dicho parámetro, se consideró el esquema presentado en la figura 4.2, que muestra la disposición de los elementos del sistema de alimentación, así como también, el diagrama de cuerpo libre de cada rodillo y del carrete de cable de manera individual, según se puede observar en la figuras 4.3 y 4.4, respectivamente. De igual modo, se emplearon las características referentes a los coeficientes de fricción estática, masa y diámetro que se presentan en la tabla 4.2, obtenidas directamente del catálogo en línea de McMaster-Carr (códigos 60885K38 y 60885K81) para los rodillos de alimentación y para el caso del carrete de cable, se consultaron en línea las características del mismo, tomando como base el utilizado por la empresa.



**Figura 4.2:** Esquema del sistema de alimentación de cable (elaboración propia)



**Figura 4.3:** Diagrama de cuerpo libre para cada uno de los rodillos del sistema de alimentación de cable (elaboración propia)



**Figura 4.4:** Diagrama de cuerpo libre para el carrete de cable 40 AWG del sistema de alimentación (elaboración propia)

**Tabla 4.2:** Características de los rodillos y el carrete utilizados para el sistema de alimentación de cable

Característica	Magnitud
Coefficiente de fricción estática neopreno-neopreno	1.16
Coefficiente de fricción estática bronce-acero	0.35
Coefficiente de fricción estática plástico-metal (carrete)	0.4
Diámetro externo de los rodillos (in)	0.75
Diámetro interno de los rodillos (in)	0.25
Diámetro externo del carrete (in)	2.36
Diámetro interno del carrete (in)	0.787
Masa de cada rodillo (lb)	0.01
Masa del carrete de cable (lb)	0.25

Según lo presentado en las figuras 4.2 a 4.4, para la ejecución de los cálculos correspondientes, se operó de la siguiente manera. Para el caso del rodillo conductor que se encuentra firmemente sujetado al motor a pasos, se aplicó la sumatoria de momentos alrededor del centro del rodillo con la finalidad de obtener una expresión para la determinación del par  $M$ , otorgado por la acción del motor, según como se muestra a continuación:

$$\circlearrowleft \Sigma M_{CB} = M - F_{friccion} \cdot 0.375 - T_x \cdot 0.375 = 0 \quad (4.1)$$

A partir de la expresión anterior se tiene, por consiguiente:

$$M = \mu_{s-neopreno} \cdot N \cdot 0.375 + T \cdot \cos(\theta) \cdot 0.375 \quad (4.2)$$

De donde además se conoce que:

$$\theta = \arctan\left(\frac{1.18}{1.4}\right) = 40.13^\circ \quad (4.3)$$

En cuanto al carrete de cable, presentado en la figura 4.4, al realizar el estudio de las fuerzas que actúan sobre el eje que soporta a dicho elemento, se debe considerar, además de la tensión generada por los rodillos de alimentación y el peso propio del objeto, la fricción que existe entre el eje metálico y el recubrimiento plástico del carrete, debido a que entre ambos se encuentra la presencia de un pequeño espacio que posibilita la rotación del carrete. Se observa que cuando éste último se encuentra bajo la acción de la fuerza de tensión  $T$ , el punto de la posición  $P1$  comienza a movilizarse hasta alcanzar la posición  $P2$  y, posteriormente, la rotación del elemento se hace inminente, generándose, además, una fuerza reactiva  $R$  que se opone a la dirección de la carga a la que se somete al eje.

Ambas posiciones  $P1$  y  $P2$ , a su vez, conforman una distancia  $r_f$  que corresponde al radio del círculo de fricción y definen un ángulo denominado como  $\phi_s$ .

Para la obtención de la longitud  $r_f$ , se operó de la manera siguiente, partiendo de los datos presentados en la tabla 4.2:

$$r_f = \text{radio}_{eje} \cdot \text{sen}(\phi_s) \quad (4.4)$$

Aplicando la simplificación siguiente, válida para desplazamientos pequeños:

$$\text{sen}(\phi_s) \approx \tan(\phi_s) \approx \mu_{s-\text{metal plástico}} \quad (4.5)$$

Por lo tanto:

$$r_f = \frac{0.71}{2} \cdot 0.4 = 0.142 \text{ in}$$

Aplicando el resultado anterior y ejecutando la sumatoria de momentos alrededor del punto  $P2$ , se obtuvo la magnitud de la fuerza de tensión  $T$  correspondiente, considerando la aceleración de la gravedad igual a  $386.22 \text{ in/s}^2$

$$\circlearrowleft \Sigma M_{P_2} = -W_c \cdot 0.142 - T \text{ sen}(\theta) \cdot 0.142 + T \text{ cos}(\theta) \cdot (0.0297 + 0.7865) = 0 \quad (4.6)$$

Sustituyendo los valores conocidos en la expresión anterior:

$$-0.25 \cdot 386.22 \cdot 0.142 - T \text{ sen}(40.13^\circ) \cdot 0.142 + T \text{ cos}(40.13^\circ) \cdot 0.8162 = 0$$

Despejando la fuerza de tensión  $T$ :

$$T = 25.74 \text{ lb} \quad (4.7)$$

Con respecto al rodillo conducido (A), al analizar el diagrama de cuerpo libre de la figura 4.3 es necesario tomar en consideración sus características particulares. Dicho elemento se encuentra constituido por un cojinete de deslizamiento de bronce SAE 841 que se encuentra directamente en contacto con un eje de acero 4140. Debido al funcionamiento propio de un rodamiento de esta índole, existe un pequeño espacio entre ambos elementos que posibilita la rotación del rodillo sobre el eje estático. En consecuencia, para que se genere el movimiento deseado, es necesario que la fricción presente entre los dos metales sea vencida a partir del par generado por el motor, tal y como sucedía con el caso del carrete anteriormente analizado.

Según se observa en la figura 4.3, cuando el rodillo conducido se encuentra sometido a la fuerza de fricción  $F_{fricción}$ , el rodamiento se encuentra en contacto, con el eje de acero, en

el punto  $P_1$ . Conforme la fuerza de fricción aumente como consecuencia de la acción del motor, dicho punto se moverá hasta una posición  $P_2$ , hasta que la rotación sea inminente, generándose, además, una fuerza reactiva de apoyo  $R$ . Ambos puntos conforman una distancia  $r_f$  que corresponde al radio del círculo de fricción y definen, igualmente, un ángulo denominado como  $\phi_s$ .

Para el cálculo de dicha longitud se procedió de la siguiente manera, considerando la ecuación (4.4):

$$r_f = \text{radio}_{\text{interno-rodillo}} \cdot \text{sen}(\phi_s)$$

Aplicando la simplificación mostrada en la ecuación (4.5):

$$\text{sen}(\phi_s) \approx \tan(\phi_s) \approx \mu_{s-\text{bronce-acero}}$$

Por lo tanto, se obtiene:

$$r_f = 0.125 \cdot 0.35 = 0.0437 \text{ in}$$

Utilizando el resultado anterior y aplicando la sumatoria de momentos alrededor del punto  $P_2$ , se determinó la magnitud de la fuerza normal  $N$ :

$$\begin{aligned} \circlearrowleft \Sigma M_{P_2} = & -F_{\text{friccion}}(0.25 + 0.008) + T \cos(40.13^\circ)(0.25 + 0.008) + \\ & N \cdot 0.04375 + T \text{sen}(40.13^\circ) \cdot 0.04375 = 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Simplificando la expresión anterior y utilizando el resultado para  $T = 25.74 \text{ lb}$ :

$$-1.16 \cdot N \cdot (0.258) + 25.74 \cos(40.13^\circ)(0.258) + N \cdot 0.04375 + 25.74 \text{sen}(40.13^\circ)(0.04375) = 0$$

Finalmente, despejando la magnitud de la fuerza  $N$ :

$$N = 22.71 \text{ lb} \quad (4.9)$$

Sustituyendo (4.8) y (4.9), correspondientes a  $T$  y a  $N$  respectivamente, en la ecuación (4.2), finalmente se obtiene la magnitud del par necesario para que el sistema pueda movilizarse:

$$M = 1.16 \cdot 22.71 \cdot 0.375 + 25.74 \cos(40.13^\circ) \cdot 0.375 = 17.25 \text{ lb} \cdot \text{in} \approx 1.95 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Considerando el cálculo anterior, se observa que existe una gran cantidad de motores a pasos que entrega el par requerido para la tarea solicitada. Por lo tanto, para realizar

la selección final de aquel dispositivo que fue utilizado para el diseño, fue necesaria la consideración de otras características propias de los mismos. Para ello, se seleccionó tres diferentes estilos de estos motores, se obtuvieron sus especificaciones generales y, posteriormente, se evaluaron utilizando una matriz de selección, empleando como base los siguientes criterios y otorgando una calificación del 1 al 5 para cada uno de ellos, en donde 5 representa la calificación máxima que se puede obtener:

- **Costo de adquisición.** Se refiere a la búsqueda de un dispositivo que implique una menor inversión inicial.
- **Durabilidad.** Dado que en las necesidades expresadas por la empresa se establece que el mantenimiento del sistema debe ser sencillo, se debe buscar una opción que requiera poco mantenimiento y presente la robustez adecuada para la generación del trabajo solicitado
- **Precisión.** Debido a que el alimentador del cable requiere otorgar una cantidad determinada de dicho producto al sistema de soldadura, es requerido que el movimiento de los motores a pasos sea lo suficientemente preciso, es decir, que la relación pulso-ángulo (ángulo de paso) de rotación, permita ejecutar una adecuada tarea de automatización.
- **Tamaño.** El tamaño del sistema automático para la subetapa de soldadura debe de reducir o, al menos, igualar las dimensiones del espacio utilizado actualmente para dicho procedimiento. Por consiguiente, es necesario que los componentes que se elijan posean una magnitud para esta propiedad que sea adecuada.
- **Operación a diferentes velocidades.** Se refiere a la capacidad del motor para entregar el par necesario para la movilización del sistema, a pesar de un aumento en las revoluciones por minuto del mismo.

En la tabla 4.3, se presentan las características generales de los tres motores a pasos seleccionados, mientras que en la tabla 4.4, se plantea la matriz de selección correspondiente.

**Tabla 4.3:** Características generales de los modelos de motores a pasos para su comparación

Modelo de motor	Características generales
NEMA 23 (triple stack)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fases: 2</li> <li>- Ángulo de paso: <math>1.8^\circ</math></li> <li>- Dimensiones: 56.4 x 56.4 x 77 mm</li> <li>- Tensión: 24 V</li> <li>- Torque a 100 rpm: <math>2 N \cdot m</math></li> <li>- Costo: \$ 63.20</li> </ul>
NEMA 24	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fases: 2</li> <li>- Ángulo de paso: <math>1.8^\circ</math></li> <li>- Dimensiones: 60 x 60 x 88 mm</li> <li>- Tensión: 24 V</li> <li>- Torque a 100 rpm: <math>2.25 N \cdot m</math></li> <li>- Costo: \$ 89.10</li> </ul>
NEMA 34	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fases: 2</li> <li>- Ángulo de paso: <math>1.8^\circ</math></li> <li>- Dimensiones: 86 x 86 x 96 mm</li> <li>- Tensión: 24 V</li> <li>- Torque a 100 rpm: <math>3 N \cdot m</math></li> <li>- Costo: \$ 134.80</li> </ul>

**Tabla 4.4:** Matriz de selección de motor a pasos para el sistema de alimentación de cable

Modelo de motor	Criterios					Total
	Costo	Durabilidad	Precisión	Tamaño	Operación a diferentes velocidades	
NEMA 23	5	3	5	4	2	19
NEMA 24	4	4	5	3	4	<b>20</b>
NEMA 34	1	5	5	2	5	18

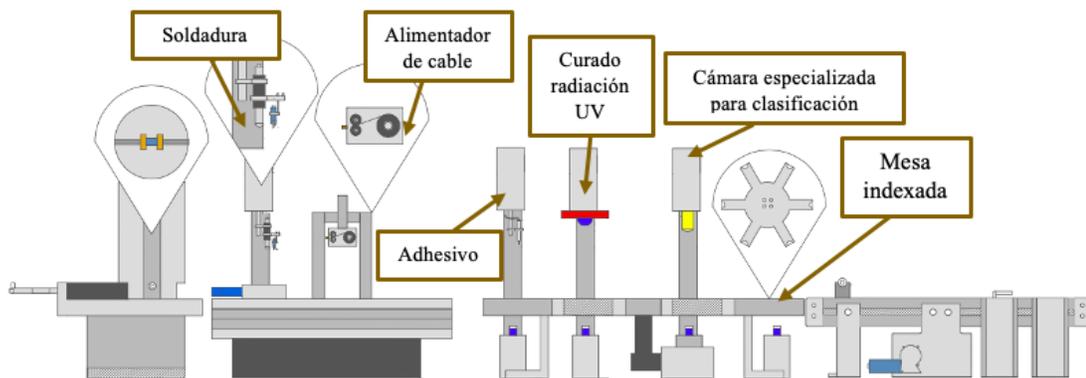
Tal y como se observa, de la tabla 4.4, la mejor opción de motor a pasos corresponde al modelo tipo NEMA 24, según los criterios utilizados para su evaluación y selección.

### 4.3 Diseño de la automatización del proceso

Habiendo generado el diseño del alimentador de cable para el sistema automático del subproceso de soldadura, la siguiente etapa de este procedimiento corresponde al diseño de la automatización, como tal, del sistema.

### 4.3.1 Replanteamiento de la subetapa de soldadura

Según lo presentado en el capítulo 3 y más específicamente en la figura 3.8, se había planteado que la subetapa de soldadura formaría parte de las operaciones presentes en la mesa indexada, sin embargo tras la ejecución de un análisis más profundo referente a las dimensiones del espacio presente en las subdivisiones de la mesa, en comparación con el tamaño del equipo de soldadura con el que cuenta la empresa, así como también, los diferentes movimientos que se deben realizar para completar la soldadura de los cables en sus respectivas posiciones, se decidió separar dicha operación para garantizar que la misma tuviese el espacio suficiente para su ejecución. Asimismo, tras la aplicación de esta modificación en el concepto propuesto, se incorporaron las operaciones de curado por radiación UV y de inspección visual sobre la mesa indexada, además de la correspondiente a la colocación de pegamento. En la figura 4.5, se presenta de esquema del concepto propuesto con los cambios anteriormente mencionados.



**Figura 4.5:** Esquema del rediseño del concepto seleccionado (elaboración propia)

### 4.3.2 Selección de los sensores y actuadores del proceso

Según el concepto replanteado y presentado anteriormente, el funcionamiento automático del subproceso de soldadura, es decir, la operación de interés para este proyecto, quedó expresado de la siguiente manera. Cuando se han detectado soportes con detectores en el área del magazine, éste los empuja hasta una pinza de sujeción. Dicho componente se cierra para sujetar a los elementos y mediante un mecanismo de giro se posiciona a los mismos, directamente, sobre una plataforma debajo del electrodo de soldadura para realizar dicha operación, ubicada a 90°. Acto seguido, se traslada al alimentador hasta la posición en donde se llevará a cabo la actividad mediante un movimiento vertical y, posteriormente, se hace lo propio con la pinzas de corte con accionamiento neumático. Una vez que todo el equipo del sistema está en posición, el alimentador de cable se activa para proveer la longitud requerida de este material y, seguidamente, se ejecuta la operación de soldadura, desplazando al electrodo hasta el área de trabajo y energizándolo, para después realizar la activación de las pinzas de corte y finalizar la tarea.

Cuando se ha completado la unión de uno de los extremos del detector, se hace girar a la plataforma que lo soporta un ángulo de  $180^\circ$ , de manera que el extremo de dicho elemento que aún no ha sido soldado, se ubique por debajo del electrodo y se repitan las actividades anteriormente descritas. Finalizado todo el procedimiento, tanto las pinzas de corte como el alimentador, se devuelven a sus posiciones originales y la pinza de sujeción, vuelve a tomar al soporte y, a través del mismo mecanismo giratorio anteriormente mencionado, se rota a la misma  $90^\circ$ . Acto seguido, se moviliza horizontalmente a todo el conjunto (pinza de sujeción, soporte y dispositivo detector) hasta la primera posición de la mesa indexada, en donde el detector es depositado para la ejecución de las operaciones siguientes. Finalmente, todo los elementos del subsistema de soldadura, son retornados a sus posiciones originales para la repetición de toda la operación.

Según lo que se observa de la descripción anterior del funcionamiento del subsistema de soldadura, se hace necesaria la presencia de una serie de sensores y actuadores que permitan la correcta ejecución y regulación de cada uno de los movimientos del proceso. En general, para posibilitar la selección de dichos elementos, se subdividió el movimiento en tres subgrupos, a saber: vertical, horizontal y rotacional. Para cada uno de estos últimos, se plantearon de dos a tres alternativas para compararlas por medio de matrices de selección y realizar la escogencia de aquella que resultara mejor evaluada, según la calificación global total recibida en cada uno de los criterios que se enlistan a continuación.

- **Repetibilidad.** Dado que todos los elementos del sistema deben ser posicionados en el mismo punto de trabajo en cada una de las ocasiones con la finalidad de que la soldadura resulte de manera similar en todos los detectores, el mecanismo de movilización debe ser capaz de realizar dicha tarea de manera efectiva, buscando que el punto de posicionamiento de las herramientas y detector sea igual o muy próximo durante todos los ciclos de trabajo.
- **Costo de la implementación.** Se refiere, en general, a los costos de los componentes y otros asociados, para posibilitar la implementación de una clase específica de movimiento.
- **Durabilidad.** Es deseable que el tipo de movilización elegido posea la mayor durabilidad posible debido a las diferentes cargas a las cuales se encontrará sometido.
- **Frecuencia de mantenimiento.** En general el mecanismo debe ser de bajo mantenimiento y éste, a su vez, debe ser lo más sencillo posible para que pueda ser desarrollado, inclusive, por los operarios a cargo del proceso.
- **Velocidad de operación.** Debido a que con la ejecución de este proyecto se plantea afectar, de manera global, al tiempo requerido para la finalización del proceso de ensamblaje de los sensores de  $CO_2$ , es necesario que los elementos se movilicen de manera rápida y que la velocidad de éstos sea controlable por el usuario.

### 4.3.2.1 Movimiento vertical

En cuanto al movimiento vertical del sistema, necesario para posicionar al sistema de alimentación de cable y las pinzas de corte con accionamiento neumático sobre la zona de soldadura, se consideraron tres alternativas de solución: una deslizadera de tipo neumático, un sistema de piñón y cremallera y un mecanismo implementado a partir de un tornillo de avance. La evaluación de cada una de estas propuestas, se presenta en la tabla 4.5, correspondiente a una matriz de decisión.

**Tabla 4.5:** Matriz de selección de mecanismo para movimiento vertical

Tipo de mecanismo	Criterios					Total
	Repetibilidad	Costo de la implementación	Durabilidad	Frecuencia de mantenimiento	Velocidad de operación	
Deslizadera neumática	5	4	4	4	5	<b>22</b>
Sistema piñón-cremallera	3	3	2	2	4	14
Tornillo de avance	4	2	3	3	2	14

Según lo que se observa de la tabla 4.5, la alternativa mejor evaluada corresponde a la de tipo neumático. En términos generales, se puede decir que este tipo de actuadores presentan una mejor repetibilidad, en comparación con los métodos mecánicos, debido a que se trabaja con una distancia o carrera fija, sobre la que se extiende o retrae el dispositivo, evitando la utilización de distancias intermedias que pueden afectar el posicionamiento efectivo de los elementos. Además, posee un costo adecuado dado que en la empresa ya se cuenta con una instalación neumática y, de igual manera, como consecuencia de una baja frecuencia de mantenimiento, al existir un menor desgaste entre sus partes en comparación con un sistema meramente mecánico. Por su parte, si se evalúa el ámbito de la velocidad de operación, la deslizadera neumática también posibilita un adecuado control de dicha propiedad, al poder emplear válvulas reductoras de caudal con antirretorno, permitiendo la operación con diferentes velocidades, según la necesidad, sin pérdida de precisión en los movimientos.

### 4.3.2.2 Movimiento horizontal

Para el caso del movimiento horizontal, requerido para el transporte del soporte en conjunto con el detector hasta la primera posición de la mesa indexada según lo indicado anteriormente, se consideraron, nuevamente, tres alternativas de solución: un actuador li-

neal, una banda transportadora y un mecanismo de piñón en conjunto con una cremallera. Analizando cada una de las propuestas a partir de los criterios planteados anteriormente, en la tabla 4.6, se presenta la matriz de selección correspondiente.

**Tabla 4.6:** Matriz de selección de mecanismo para movimiento horizontal

Tipo de mecanismo	Criterios					Total
	Repetibilidad	Costo de la implementación	Durabilidad	Frecuencia de mantenimiento	Velocidad de operación	
Actuador lineal neumático	5	4	5	4	5	<b>23</b>
Banda transportadora	3	2	4	2	2	13
Sistema piñón-cremallera	3	3	2	2	4	14

Según lo indicado en la tabla 4.6, se observa que el elemento mejor evaluado resulta ser el actuador lineal neumático. Lo anterior, debido a la serie de ventajas, mencionadas para el movimiento vertical, que los sistemas neumáticos presentan en comparación con los sistemas puramente mecánicos y electromecánicos. En primer lugar, dado que el actuador lineal presenta una carrera limitada (extensión y retracción), las posiciones final e inicial siempre serán las mismas, garantizando que el conjunto soporte-detector soldado, se coloque sobre la mesa indexada. En segundo lugar, respecto al costo, a pesar de que los materiales para la fabricación de equipo neumático generalmente son más caros, dado que ya se cuenta con la instalación neumática en la compañía y la frecuencia de mantenimiento de estos equipos es menor, la inversión inicial se recuperará más fácilmente y se contará con herramientas con una amplia durabilidad, en comparación con el sistema piñón-cremallera, por ejemplo, en donde se debe tener especial cuidado con los elementos dentados, realizando revisiones de manera más frecuente para verificar el desgaste sobre los mismos.

#### 4.3.2.3 Movimiento giratorio

En cuanto al movimiento rotacional requerido por el subsistema de soldadura para colocar al soporte, en conjunto con el detector, sobre la plataforma para la realización de la actividad, así como también, para garantizar que ambos extremos del detector resulten soldados, para realizar su ejecución se consideraron las siguientes alternativas: un actuador giratorio neumático, un servomotor y un motor a pasos. En la tabla 4.7, se presenta la matriz de selección correspondiente para dichas alternativas, según los criterios que fueron definidos anteriormente

**Tabla 4.7:** Matriz de selección de mecanismo para movimiento rotacional

Tipo de mecanismo	Criterios					Total
	Repetibilidad	Costo de la implementación	Durabilidad	Frecuencia de mantenimiento	Velocidad de operación	
Actuador giratorio neumático	5	3	5	4	5	<b>22</b>
Servomotor	4	4	3	3	3	17
Motor a pasos	3	3	5	4	3	18

Según la evaluación realizada y presentada en la tabla anterior, el elemento mejor calificado corresponde al actuador giratorio neumático. Gracias a que las posiciones angulares se encuentran bien definidas a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $180^\circ$ , con un actuador giratorio de tipo neumático es posible ubicar a los soportes y detectores de manera adecuada, en todas las ocasiones, pues únicamente es suficiente con introducir aire comprimido en una entrada específica para alcanzar el posicionamiento deseado, a diferencia de los servomotores y motores a pasos en donde se debería de tener una mayor precaución al momento de generar sus respectivas señales de control para alcanzar la rotación angular requerida.

A pesar de que esta clase de actuador posee un costo más elevado en comparación con los motores propuestos, su alta durabilidad en, conjunto con una frecuencia baja de mantenimiento, permiten que la inversión en el equipo pueda ser recuperada una vez que se haya puesto en marcha la automatización del proceso.

Finalmente, en cuanto al rubro de velocidad de operación, el actuador neumático nuevamente se observa que resulta ser bien evaluado, debido a que estos dispositivos, generalmente, operan a velocidades altas y que pueden ser reguladas físicamente por medio del uso de válvulas antirretorno con reducción de caudal.

#### 4.3.2.4 Selección final de actuadores para el proceso

Habiendo seleccionado el tipo de actuadores a utilizar para la generación de los diferentes movimientos del proceso, se escogieron los modelos específicos de dichos componentes, tomando en consideración la carga soportada y que sus dimensiones permitieran el posicionamiento del conjunto soporte-detector, en cada una de las etapas del subproceso de soldadura, buscando mantener las dimensiones generales de todo el proceso lo más reducidas posible. Cabe mencionar que todos los actuadores neumáticos seleccionados pertenecen a la marca FESTO, tomando como base la recomendación dada por la empresa para su utilización, así como también, por la amplia variedad de configuraciones y tamaños presentes en su catálogo, que se adecúan, de una mejor manera, a los requerimientos del sistema. En la tabla 4.8, se presentan los modelos de los actuadores

seleccionados, en conjunto con sus características principales.

**Tabla 4.8:** Actuadores elegidos para la automatización del subsistema de soldadura

Modelo	Función	Características							
		Carrera (in)	Presión operativa (bar)	Ángulo de giro (°)	Velocidad máxima (in/s)	Precisión de repetición (in)	Fuerza de retracción a 6 bar (lb)	Fuerza de extensión a 6 bar (lb)	Par a 6 bar (lb · in)
DRRD-16-180-FH-Y9A-PS1	Rotación de plataforma de soldadura	NA	2-10	180	NA	NA	NA	NA	14.07
DGST-10-80-PA	Desplazamiento vertical de alimentador de cable	3.15	1-8	NA	19.69	<= 0.012	17.76	21.13	NA
SLG-12-400-PA	Movimiento lineal del soporte y detector a mesa indexada	15.75	2-8	NA	NA	NA	15.29	15.29	NA
DRRD-8-180-FH-PA	Rotación de pinzas de agarre para colocación del detector en zona de soldadura	NA	3-8	180	NA	NA	NA	NA	1.77
DHWS-16-A	Pinzas de sujeción para transporte de soporte y detector	NA	2-8	NA	NA	NA	NA	NA	11.42 (al abrir) 10.09 (al cerrar)
SLS-10-15-P-A	Movimiento vertical de pinzas de corte neumáticas	0.59	1-10	NA	NA	NA	8.77	10.57	NA

#### 4.3.2.5 Selección de sensores

Dado que los actuadores elegidos se encuentran ya adaptados para su uso en conjunto con sensores de proximidad inductivos modelo SMT-10G, mismos que son igualmente fabricados y distribuidos por la empresa FESTO, para determinar la posición de los diferentes elementos móviles de los actuadores, se decidió emplear dicha clase de sensor, con la finalidad de facilitar el montaje sobre los diferentes equipos y garantizar una adecuada determinación de las posiciones de los actuadores. Por lo tanto, considerando la información anterior, en la tabla 4.9 se presenta la cantidad de sensores requerida para cada uno de los actuadores anteriormente indicados.

**Tabla 4.9:** Distribución de los sensores de proximidad en cada actuador

Modelo Actuador	Función	Cantidad de sensores SMT-10G requerida
DRRD-16-180-FH-Y9A-PS1	Rotación de plataforma de soldadura	Total 2: 1- Posición a 0° 2- Posición a 180°
DGST-10-80-PA	Desplazamiento vertical de alimentador de cable	Total 2: 1- Posición retraída 2- Posición extendida
SLG-12-400-PA	Movimiento lineal del soporte y detector a mesa indexada	Total 2: 1- Posición a 0 in 2- Posición a 15.75 in
DRRD-8-180-FH-PA	Rotación de pinzas de agarre para colocación del detector en zona de soldadura	Total 3: 1- Posición a 0° 2- Posición a 180° 3- Posición a 90°
DHWS-16-A	Pinzas de sujeción para transporte de soporte y detector	Total 2: 1- Apertura de pinza 2- Cierre de pinza
SLS-10-15-P-A	Movimiento vertical para pinzas de corte neumáticas	Total 2: 1- Posición retraída 2- Posición extendida

### 4.3.3 Selección del tipo de controlador a utilizar

Habiendo seleccionado los actuadores y sensores para la operación especificada, la siguiente etapa del proceso de diseño, correspondió a la escogencia de un controlador, para posibilitar la automatización de la operación. Para realizar dicha tarea, se partió del hecho de que la activación de los diferentes actuadores del sistema deben realizarse por medio de válvulas electroneumáticas, cuya tensión de activación es de +24 VDC. Además, considerando igualmente que se plantea el uso de la soldadora con la que la empresa cuenta actualmente y que los puertos destinados para posibilitar su automatización también requieren de una tensión de +24 VDC, se determinó que el uso de un PLC era la decisión más adecuada, dado que sus salidas ya proveen la magnitud de tensión necesaria para la activación de los diferentes elementos, así como también, es capaz de recibir en sus entradas la señal de activación de un sensor cuando el mismo se encuentra activo.

Dado que existen muchos modelos y marcas de PLC diferentes presentes en el mercado, también fue necesario determinar exactamente el dispositivo a ser utilizado. Para

ello, primeramente, se decidió la marca del autómeta a ser empleada para delimitar la búsqueda, misma que correspondió a SIEMENS, principalmente por su amplia integración con el software y hardware de FESTO, (facilitando la simulación, comprobación del funcionamiento y puesta en marcha del sistema), así como por su amplia presencia en el mercado de la automatización industrial que se traduce en un vasto catálogo de opciones para buscar un dispositivo que se ajuste a las características de las tareas que llevará a cabo.

Para establecer el modelo específico de PLC, se contemplaron, primeramente, tres tipos diferentes, con el objetivo de hacer una comparación entre sus características y, con base en esta última, llevar a cabo la selección final. En la tabla 4.10, se presenta la comparación anteriormente mencionada.

**Tabla 4.10:** Comparación de tres modelos diferentes de PLCs

Modelo	Características					
	Tiempo de procesamiento para operaciones de bit ( $\mu s$ )	Lenguajes de Programación Soportados	Canales Digitales I/O	Protocolos de Comunicación Compatibles	Contadores Disponibles	Timers Disponibles
S7-300 (CPU 314C-2)	0.2 a 0.4	LAD, FBD, STL SCL, GRAPH	Máx. 992/992	MPI, Profibus, Ethernet	256	256
S7-1200 (CPU 1214C)	0.08	LAD, FBD, STL SCL	14 integrados (extendibles con módulos adicionales)	Ethernet (se requieren módulos adicionales para otros protocolos)	Limitado a la cantidad de memoria disponible	Limitado a la cantidad de memoria disponible
S7-1500 (CPU 1512C-1 PN)	0.05	LAD, FBD, STL SCL	Capacidad para 2048 módulos de I/O (de 16 o 32 canales cada uno)	Profibus, Ethernet	2048	2048

Considerando la información presentada anteriormente, se decidió que el dispositivo a ser empleado para la aplicación planteada, corresponde al PLC S7-300, por los siguientes motivos. En primer lugar, se descarta el uso del modelo 1200, debido a que presenta especificaciones técnicas muy limitadas y, en general, si se desea mejorar a las mismas se deben adquirir módulos individuales que elevan el costo de adquisición. En segundo lugar, considerando el modelo 1500, aunque éste último presenta una amplia posibilidad de crecimiento en cuanto a canales digitales de entradas y salidas que cubrirían sin ningún impedimento los requerimientos para la automatización de las operaciones restantes de la primera etapa del proceso de ensamblaje de los sensores de  $CO_2$ , según lo presentado en el capítulo 3, el modelo S7-300 puede expandirse hasta un número adecuado de entradas y salidas digitales para cumplir, igualmente, con dicha tarea con un menor costo de implementación (costo de \$531, en comparación con \$804 para el modelo 1500).

#### 4.3.4 Consideraciones sobre la soldadora Miyachi Unitek UB25

Tal y como se mencionó durante el planteamiento del concepto a ser desarrollado para la automatización del subproceso de soldadura de la primera etapa del ensamblaje de los sensores de  $CO_2$ , para la realización de la operación de soldadura de los cables a ambos extremos del detector, se plantea el uso de la misma máquina soldadora, diseñada

específicamente para tareas de microsoldadura. Para garantizar que la misma pueda operar de manera automática, siguiendo las instrucciones del autómat programable, se deben de tomar en cuenta las siguientes consideraciones.

#### 4.3.4.1 Conexiones entre el PLC y la soldadora

En la figura 4.6, se presenta un esquema de los puertos de conexión de la máquina para soldar a ser utilizada, ubicados en la parte trasera de la misma.

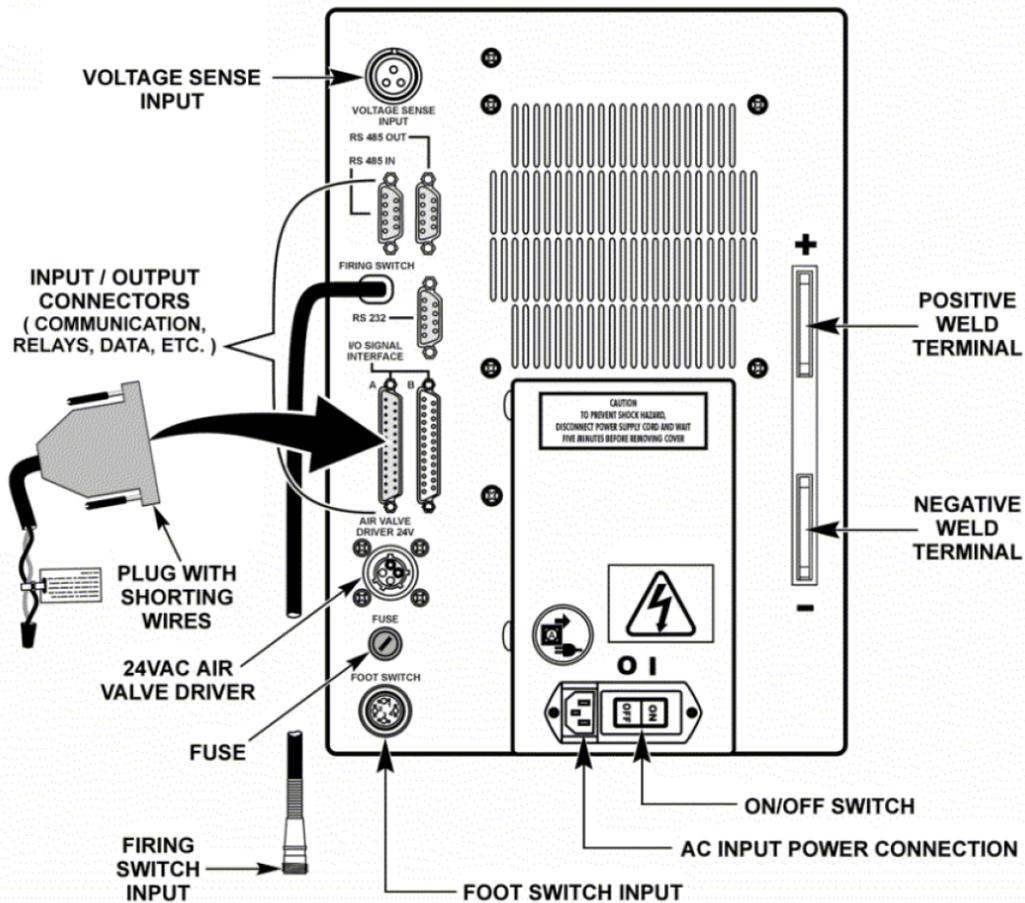
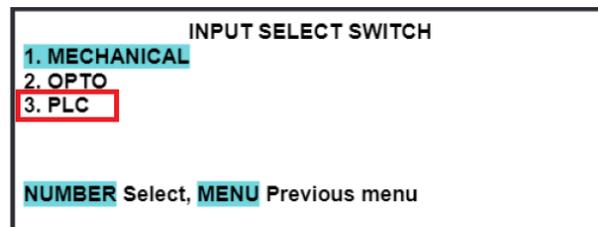


Figura 4.6: Esquema de puertos de conexión de soldadora UB25 [21]

De la figura anterior, los puertos que presentan especial interés para posibilitar el funcionamiento automático de la soldadora, corresponden al *Firing switch*, el *Foot input switch* y el *24 VAC air valve driver*. El primero de ellos, se conecta directamente al weldhead o elemento para soldar que, a su vez, sostiene el electrodo para realizar la operación de soldadura. La activación de dicho interruptor, ocurre cuando la fuerza de presión que ha sido configurada en el weldhead para ejecutar la operación, se alcanza como consecuencia directa del contacto entre el electrodo y el material en cuestión. Cuando la soldadora detecta la activación del elemento, provee la corriente requerida para soldar las partes.

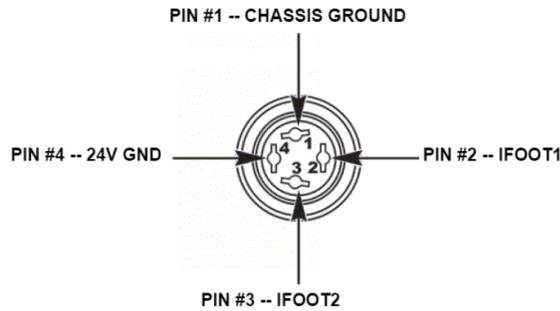
Por su parte, el interruptor por pedal (Foot input switch), controla el movimiento vertical del electrodo (weldhead) y, en conjunto con el firing switch, es decir, cuando ambos se encuentran activados, el sistema provee la corriente de soldadura. Para posibilitar que el electrodo se movilece por medio del pedal, se utiliza un controlador para la válvula de aire que se conecta directamente al weldhead y cuya tensión otorgada es de 24 VAC.

Tal y como se observa de la información anterior, para conseguir que la máquina opere de manera automática, es necesario modificar la configuración del interruptor operado por pedal (Foot input switch), de manera que el PLC mediante sus salidas, pueda realizar las mismas funciones. Para ello, el equipo provee ya una opción para cumplir con el objetivo anterior, pues en el software interno del mismo, más específicamente en el menú de *Input Switch Select*, existe la posibilidad de seleccionar a un PLC como dispositivo de activación de dicho switch, según se aprecia en la figura 4.7.



**Figura 4.7:** Configuración de activación del switch con pedal por medio del PLC [21]

Tras realizar la configuración anterior, la conexión física entre las salidas del PLC y el foot switch input, deben ejecutarse según lo indicado en la figura 4.8. Tal y como se puede apreciar, se requieren en total dos salidas del PLC para suplir las funciones del interruptor tipo pedal, de manera que una de ellas controle el movimiento vertical del Weldhead y la otra, en conjunto con el interruptor de disparo, proporcionen la corriente necesaria para el proceso de soldadura.



FOOT SWITCH CONNECTOR SPECIFICATIONS						
PIN NO.	SIGNAL		VOLTAGE	MAX CURRENT	I/O	COMMENTS
	NAME	TYPE				
1	CGND	--	--	--	--	Chassis ground
2	IFOOT1	Digital	+24V	10mA	I	Foot switch SW1 (Level 1) normally open
3	IFOOT2	Digital	+24V	10mA	I	Foot switch SW2 (Level 2) normally open
4	24V GROUND	Digital	SGND	20mA	I	Foot switch signal ground

Figura 4.8: Conexiones del PLC al foot switch input [21]

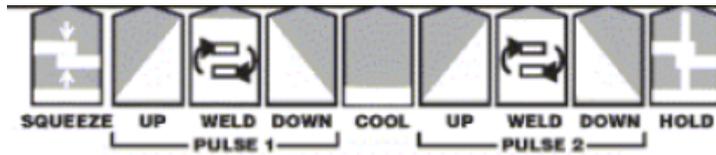
#### 4.3.4.2 Configuración de la soldadora

En términos generales la soldadora Miyachi UB25, provee la corriente para soldar al electrodo, a partir de una serie de esquemas o calendarios (schedule), que son creados y almacenados en el software del equipo. Por lo tanto, basta con ingresar a la configuración de la máquina y seleccionar aquel que se ajuste, de una mejor manera, a las necesidades de la operación que se planea ejecutar. Para el caso específico de la suboperación de soldadura sobre los extremos del dispositivo detector de los sensores de  $CO_2$ , la compañía como tal, en el documento [19], establece que la configuración a utilizar corresponde al *Schedule 1*, cuyas características están configuradas como se indica en la tabla 4.11.

Tabla 4.11: Características del Schedule 1 para la operación de soldadura

Squeeze	Up	Weld 1	Down	Cool	Up	Weld 2	Down	Hold	Pulse 1	Pulse2	Limit 1	Limit 2
150 ms	2.5 ms	0	0	1 ms	3.5 ms	0.8 ms	0	50 ms	0.050 kW	0.075 kA	0.075 kA	1.2 V

De la tabla anterior, *squeeze* hace referencia al tiempo en el que el electrodo ejerce presión sobre el elemento a soldar; *Up* el tiempo de subida del pulso de corriente para la operación de soldadura; *Weld* el período que dura la actividad de soldadura; *Down*, el tiempo de bajada del pulso de corriente; *Cool*, el período de tiempo que no se aplica calor sobre el material que se está soldando; y *Hold* la duración del período en el que se mantiene la presión del electrodo sobre el elemento en cuestión. La descripción anterior presentada de manera gráfica, se puede apreciar en la figura 4.9



**Figura 4.9:** Partes principales de un schedule para soldar [21]

#### 4.3.4.3 Elemento para soldar LT-050B-F

Como se estableció anteriormente, uno de los componentes fundamentales del sistema de soldadura, corresponde al Weldhead o elemento para soldar, que se encuentra conectado a la máquina soldadora y cuya función es movilizar y otorgar la corriente necesaria al electrodo para que se pueda completar la operación de manera correcta. El equipo con el que cuenta la empresa actualmente, corresponde al modelo LT-050B-F, mismo que se puede visualizar en la figura 4.10.

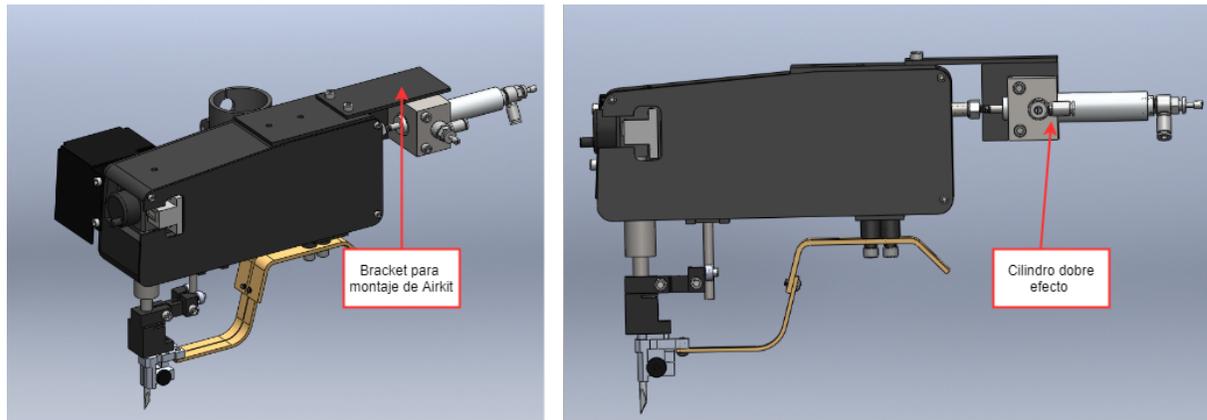


**Figura 4.10:** Weldhead con la cuenta la empresa actualmente [22]

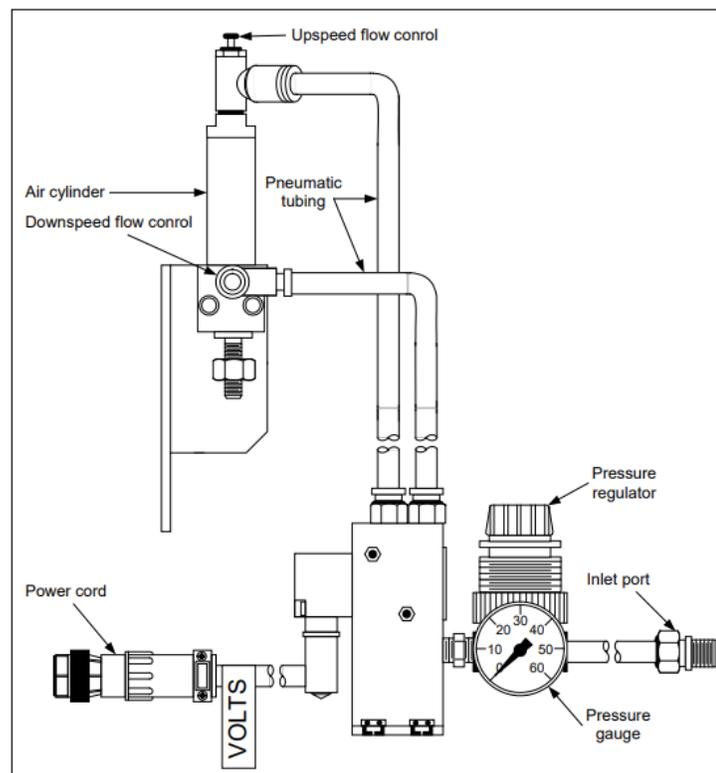
Dicho elemento, según se comprueba en la figura anterior, presenta la particularidad de que es operado directamente mediante un pedal, es decir, el movimiento del electrodo es controlado a partir del uso de dicho elemento. Sin embargo, tal y como se explicó en la información referente a la soldadora, para que el sistema pueda funcionar de manera automática, es necesario que la movilización del Weldhead, se ejecute por medio del controlador de 24 VAC.

Para conseguir la realización de la actividad anteriormente mencionada, la empresa fabricante de estos productos de soldadura, contiene dentro de su catálogo de productos un módulo de reconversión que permite eliminar el uso del pedal y sustituirlo por una válvula

solenóide de 24 VAC (que se conecta directamente al puerto destinado para tal fin en la soldadora), en conjunto con un cilindro de doble efecto de 3/4 in. Dicho conjunto recibe el nombre de *50AK/24, 24 VAC Air Kit*, y se conecta en la parte trasera del Weldhead. En las figuras 4.11 y 4.12, se presenta un dibujo del módulo montado sobre el Weldhead y las partes principales del mismo, respectivamente.



**Figura 4.11:** Conexión del Air Kit al Weldhead (elaboración propia)



**Figura 4.12:** Partes principales del Air Kit [22]

### 4.3.5 Configuración de la Programación

Habiendo definido los actuadores, sensores y la manera en la que el equipo de soldadura con el se cuenta actualmente puede integrarse al sistema, de manera que su activación y funcionamiento sea completamente automático, la siguiente actividad ejecutada para el desarrollo del presente proyecto, correspondió a la programación del PLC. Dado que la operación a ejecutar resulta ser bastante lineal, es decir, con cada una de sus tareas bien definidas y divididas, el código del programa se llevó a cabo por medio del lenguaje tipo GRAFCET. Para ello, primeramente se determinaron todas las entradas y salidas del sistema y, seguidamente, se elaboró un diagrama de flujo del procedimiento para facilitar la implementación en el software de programación de TIA Portal.

#### 4.3.5.1 Definición de entradas y salidas del sistema

En la tabla 4.12, se presentan las entradas y salidas del sistema, que fueron identificadas.

**Tabla 4.12:** Definición de las entradas y salidas del sistema para el código de control

Elemento	Entradas	Salidas de control
DRRD-16-180-FH-Y9A-PS1	-Sensor de proximidad: 0°	-Posición a 0°
	-Sensor de proximidad: 90°	-Posición a 90°
	-Sensor de proximidad: 180°	-Posición a 180°
DGST-10-80-PA	-Sensor de proximidad: posición extendida	- Extensión de deslizadera para alimentador
	-Sensor de proximidad: posición retraída	
SLG-12-400-PA	- Sensor de proximidad: posición a 400 mm (15.75 in)	-Extensión de actuador lineal
	- Sensor de proximidad: posición a 0 mm (0 in)	
DRRD-8-180-FH-PA	-Sensor de proximidad: 0°	-Posición a 0°
	-Sensor de proximidad: 180°	-Posición a 180°
DHWS-16-A	-Sensor de proximidad: pinzas abiertas	- Cerrar pinzas
	-Sensor de proximidad: pinzas cerradas	
SLS-10-15-P-A	-Sensor de proximidad: posición extendida	- Extensión de deslizadera para corte de cable
	- Sensor de proximidad: posición retraida	
Motor a pasos NEMA 24	-	-Dirección
		-Step
Pinzas de corte JIAWANSHUN AM-10	-	-Activación pinzas de corte
Soldadora Miyachi Unitek UB25	- Firing Switch del Weldhead	- Foot Switch L1
		- Foot Switch L2
		- Firing Switch PLC-soldadora

Cabe destacar que el PLC interactúa con todos los actuadores por medio de la activación de válvulas electro neumáticas, que para el caso de los actuadores giratorios corresponden a válvulas de 3/2 vías monoestables según la cantidad de posiciones angulares que se contengan, así como también, para la activación de las pinzas de corte. Para el resto de los dispositivos que poseen dos estados (extensión y retracción), una válvula de 5/2 vías monoestable es empleada para cada uno de ellos.

#### 4.3.5.2 Diagrama de flujo del sistema

Habiendo identificado las entradas y salidas para el sistema automático en cuestión, se planteó el siguiente diagrama de flujo del proceso, para facilitar su implementación en el software, tal y como se estableció anteriormente. El diagrama se puede observar, directamente, en la figura 4.13.

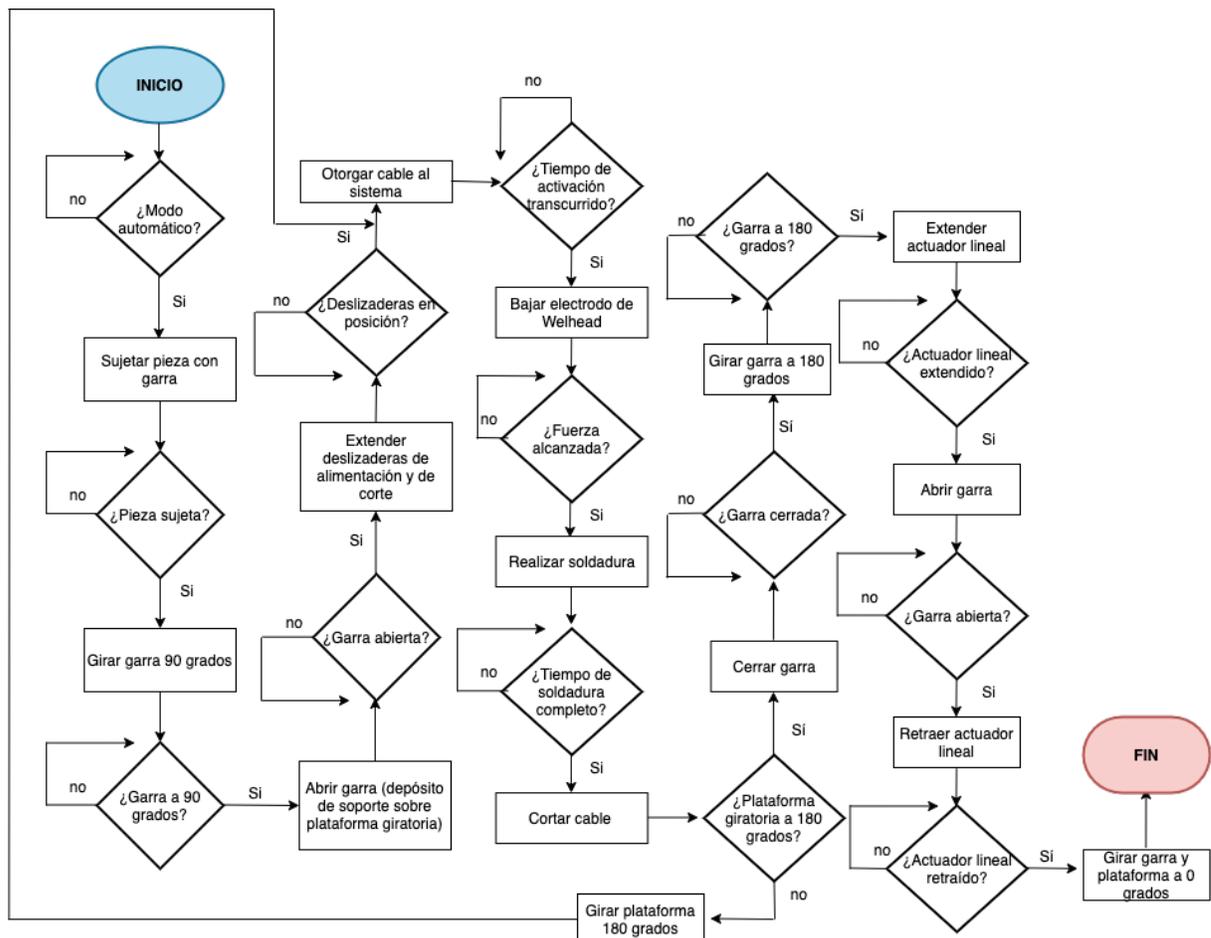


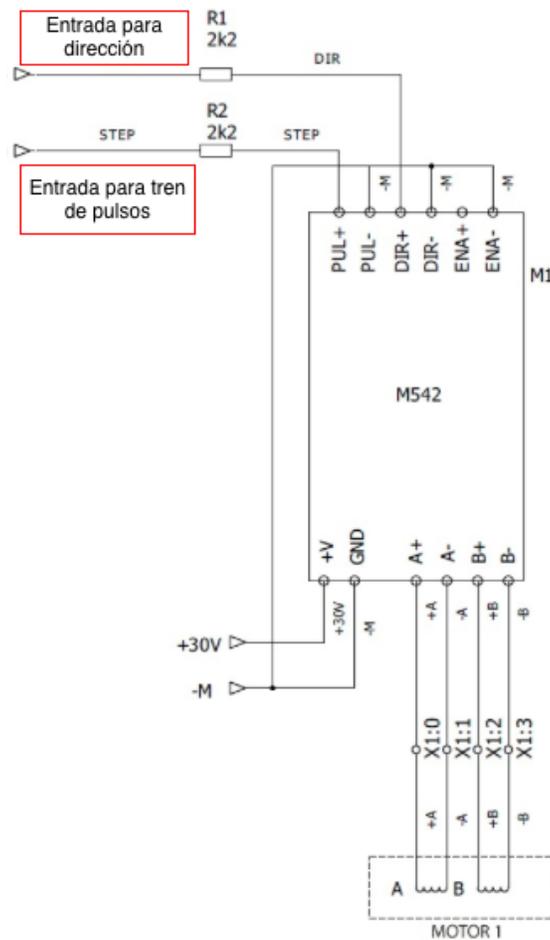
Figura 4.13: Diagrama de flujo del subsistema de soldadura automatizado (elaboración propia)

### 4.3.6 Consideraciones importantes del programa implementado

Según se indicó anticipadamente, la programación principal del PLC en cuestión, se llevó a cabo directamente mediante el lenguaje tipo GRAFCET. Sin embargo, fue necesaria la construcción de un bloque de programación adicional tipo FC, para posibilitar la determinación de la señal de control para el motor a pasos del alimentador, así como también, para establecer el tiempo de duración requerido para las operaciones de soldadura y de corte. A continuación se explica con mayor detalle las operaciones contenidas dentro de dicho bloque funcional.

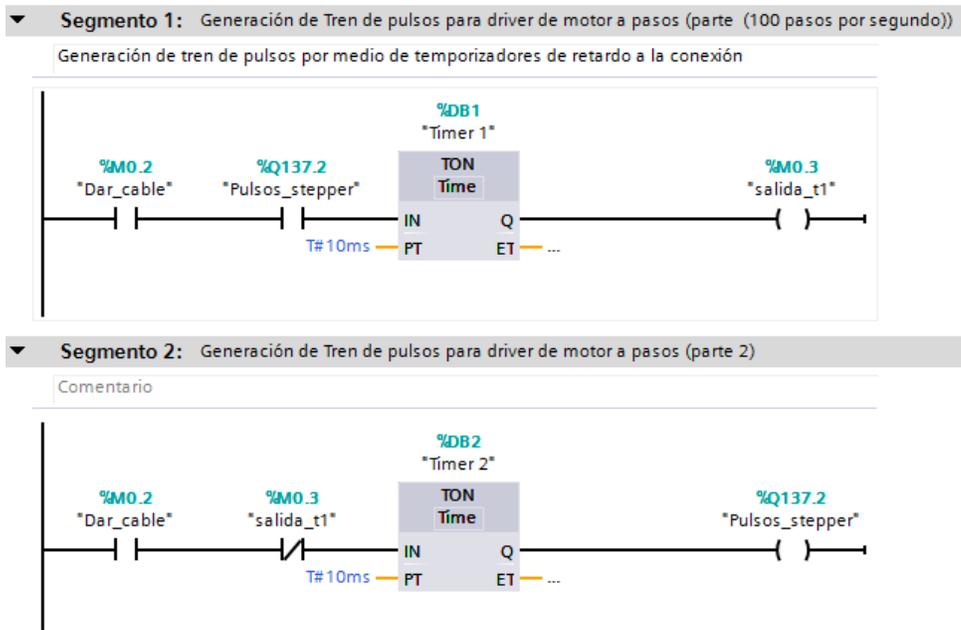
#### 4.3.6.1 Control del motor a pasos del alimentador

Para posibilitar la interconexión entre el PLC y el motor a pasos NEMA 24, presente en la configuración del alimentador de cable propuesto, se propone el uso del controlador M542. Dicho dispositivo corresponde a un elemento de bajo costo, capaz de controlar motores a pasos de dos y cuatro fases, así como de diferentes tamaños (desde NEMA 17 hasta NEMA 34). Para poder enviar la señal de control del PLC hasta el motor, el controlador requiere que en una de sus entradas se envíe un tren de pulsos y en otra, una señal de tipo binaria para indicar el sentido de rotación del eje de la máquina. Lo anterior, puede observarse de manera gráfica en la figura 4.14.

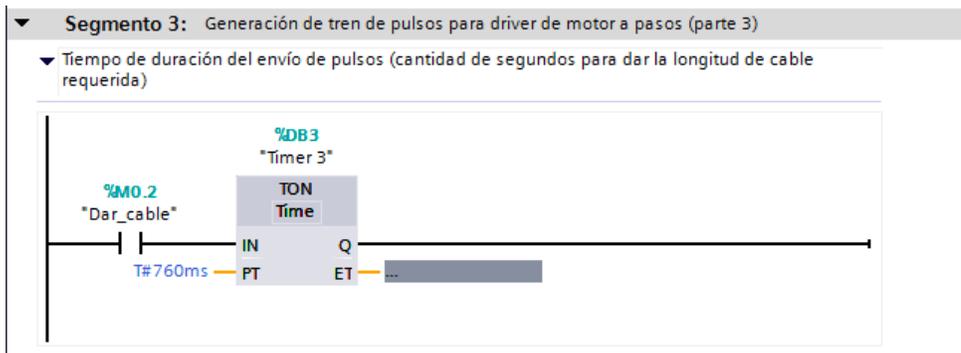


**Figura 4.14:** Conexiones del PLC al driver M542 (elaboración propia)

Por lo tanto, dentro de la programación del PLC, se aprecia que es necesaria la implementación de un tren de pulsos y una función que se encargue de detener el envío de dicha señal al driver, una vez que se ha alimentado la longitud de cable requerida para la aplicación de soldadura. Para la ejecución de ambas tareas, se emplearon temporizadores con retardo a la conexión, según se puede apreciar en las figuras 4.15 y 4.16



**Figura 4.15:** Generación de tren de pulsos con temporizadores de retardo a la conexión (elaboración propia)



**Figura 4.16:** Temporizador para finalizar envío de pulsos a driver M542 (elaboración propia)

En la figura 4.15, se observa que cuando una de las salidas de los temporizadores está encendida, se activa el temporizador contrario y, al finalizar con el conteo del tiempo, se procede a apagar a la salida que se encontraba activa y, consecuentemente, se obtiene el tren de pulsos buscado, al colocar el mismo tiempo en ambos temporizadores, dado que uno controla el tiempo de encendido y el restante el tiempo de apagado. Para la aplicación en particular del proceso de soldadura, se nota que los tiempos se colocaron en 10 ms, implicando que por cada segundo se tienen 100 pulsos que alimentan al driver.

Por su parte, si se aprecia la figura 4.16, la salida del temporizador presente en dicho segmento, es utilizada en el programa principal para finalizar la alimentación de cable. Según se puede observar, el tiempo colocado en dicho elemento corresponde a 760 ms. Para la obtención de dicha magnitud, se operó de la manera siguiente. En primer lugar, de las características del motor, se conoce que el ángulo de paso corresponde a  $1.8^\circ$ , por

lo que para que el eje del dispositivo gire una vuelta completa, es requerida una cantidad total de 200 pasos ( $1.8^\circ * 200 = 360^\circ$ ). Se sabe, además, que la distancia existente entre el alimentador y la zona de soldadura es de 0.8937 in. Por lo tanto, considerando que sobre el eje del motor existe un rodillo de 3/4 in de diámetro se tiene:

$$200 \text{ pasos} = \pi \cdot \text{diámetro}_{\text{rodillo}} = \pi \cdot 0.75 \text{ in} = 2.3562 \text{ in}$$

Por lo tanto:

$$\text{Pasos requeridos} = \frac{0.8937 \text{ in} \cdot 200 \text{ pasos}}{2.3562 \text{ in}} = 76 \text{ pasos}$$

Finalmente:

$$\text{Tiempo requerido} = \frac{76 \text{ pasos} \cdot 1 \text{ s}}{100 \text{ pasos}} = 0.76 \text{ s} = 760 \text{ ms}$$

#### 4.3.6.2 Tiempo requerido para operaciones de soldadura y corte

Dentro del bloque de temporización generado, además del programa principal en GRAFCET, fue necesario establecer, mediante el uso de temporizadores, el tiempo de duración de las operaciones de corte y soldadura, dado que las mismas no ofrecen alguna salida que pueda ser utilizada como transición dentro de las etapas del GRAFCET. En las figuras 4.17 y 4.18, se observan los fragmentos de código generados para dichas operaciones.

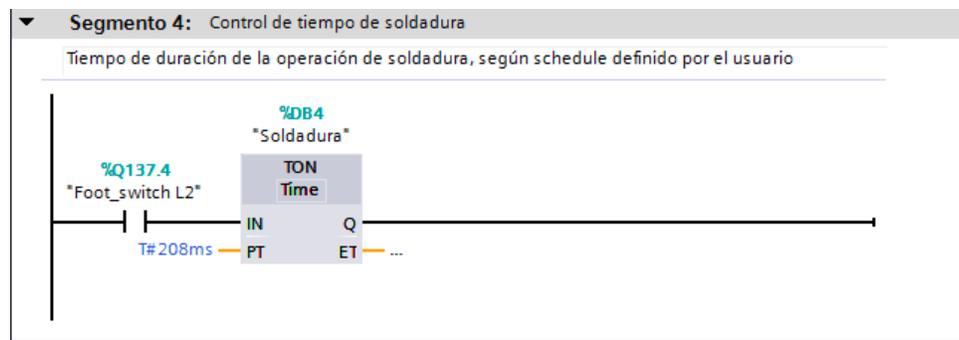


Figura 4.17: Temporizador generado para control de la operación de soldadura (elaboración propia)

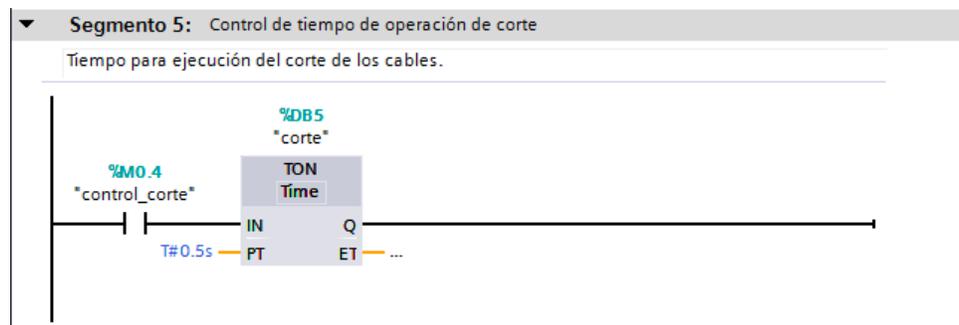


Figura 4.18: Temporizador para control de la operación de corte (elaboración propia)

En la figura 4.17, se aprecia que el temporizador con retardo a la conexión empleado, y cuya salida funge como un mecanismo para realizar una transición de una etapa a otra dentro del GRAFCET, contiene un tiempo de 208 ms, valor que fue calculado directamente de la tabla de tiempos del schedule 1 para la soldadura, presentada en la tabla 4.11. Por su parte, en la figura 4.18, el valor de tiempo otorgado a la operación de corte, únicamente corresponde a una magnitud arbitraria para garantizar la ejecución correcta de la operación.

### 4.3.7 Configuración de la interfaz HMI

Dado que la programación implementada en GRAFCET, involucra dos modos operativos, es decir, uno de tipo manual y otro automático, las pantallas que muestra el HMI, fueron construidas para adaptarse a dicha funcionalidad. En la figura 4.19, se presenta la imagen raíz de dicha interfaz, mostrando los botones para acceder al funcionamiento manual o al funcionamiento automático, según se requiera.



Figura 4.19: Imagen raíz de la interfaz HMI desarrollada (elaboración propia)

#### 4.3.7.1 Pantalla de modo manual

Para la realización de la pantalla de la interfaz en modo de operación manual, se asignaron memorias directamente a los botones de la interfaz, para que el usuario tenga la posibilidad de encender los equipos de manera individualizada. Cuando se decide activar algún dispositivo, para realizar el apagado del mismo, es necesario que el usuario presione

el botón asociado a dicho elemento, para invertir su estado. De manera adicional, se colocaron indicadores circulares en la imagen conceptual del equipo, con la finalidad de que el operario pueda visualizar, de una mejor manera, cuál parte del sistema se encuentra operando. En la figura 4.20, se presenta la interfaz para este modo operativo.

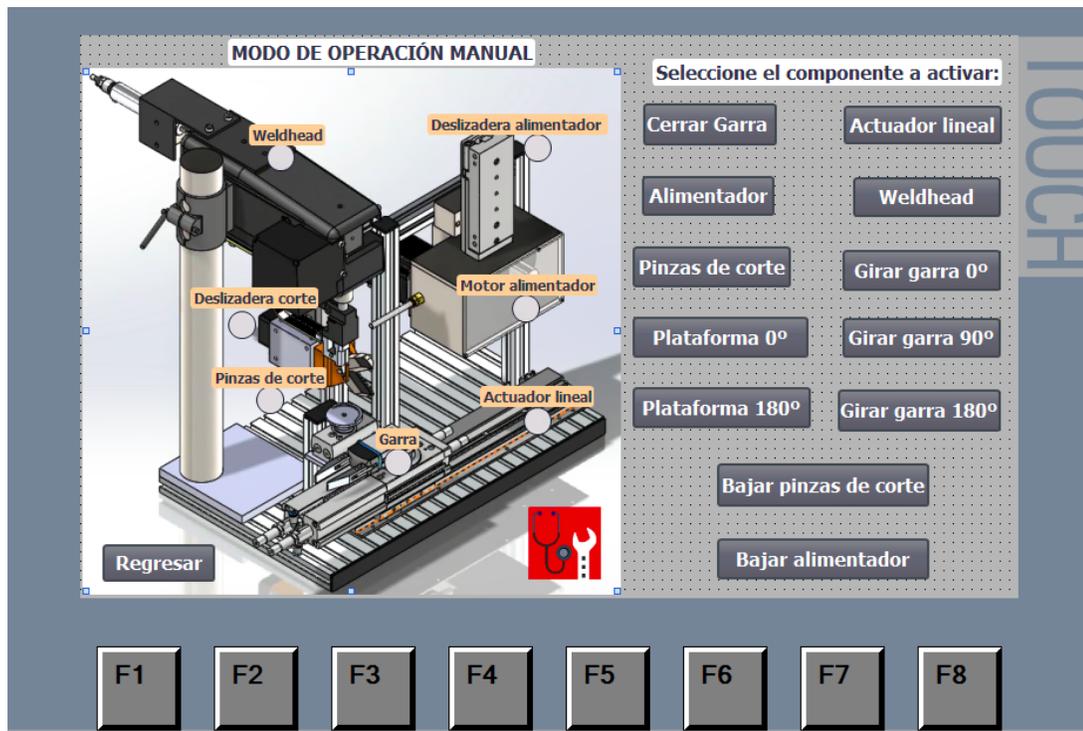
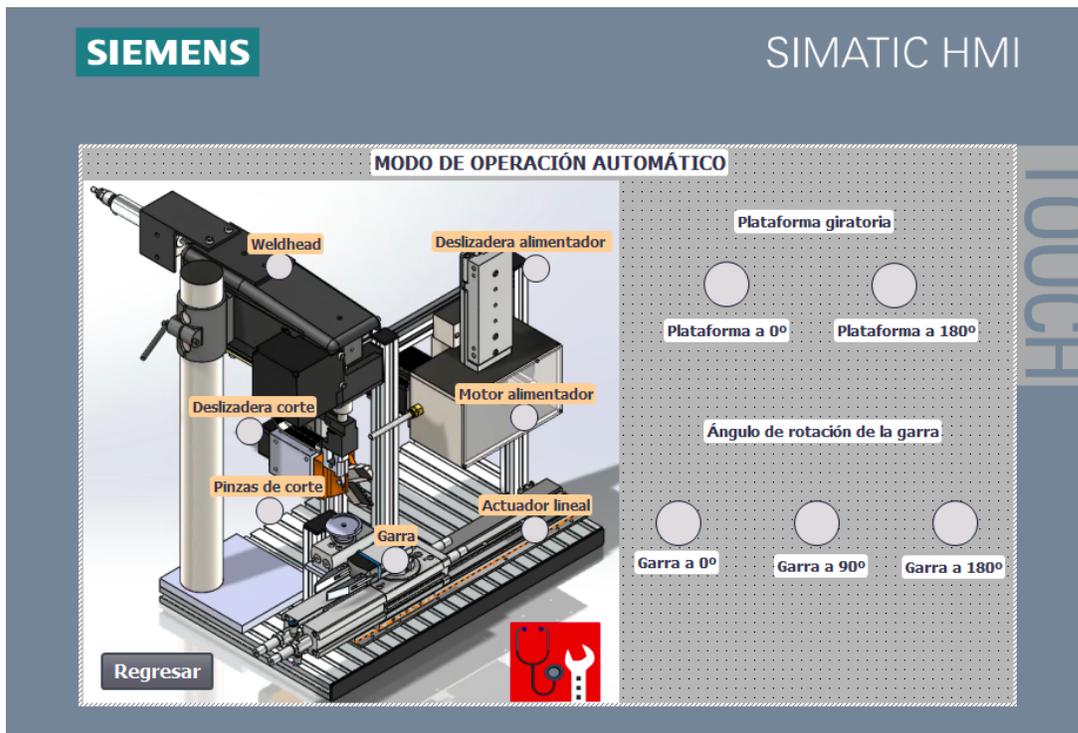


Figura 4.20: Imagen de operación manual de la interfaz HMI desarrollada (elaboración propia)

#### 4.3.7.2 Pantalla de modo automático

Con respecto a la pantalla de la interfaz en modo de operación automático, la misma es bastante similar a la presentada para la funcionalidad manual. Sin embargo, en lugar de contener botones para la activación de los equipos, únicamente presenta indicadores circulares para mostrar los dispositivos o salidas que se encuentran operando en un momento determinado. En la figura 4.21, se puede apreciar, de una mejor manera, la pantalla creada para dicho fin.



**Figura 4.21:** Imagen de operación automática de la interfaz HMI desarrollada (elaboración propia)

#### 4.3.8 Sistema final diseñado

Tras la información presentada anteriormente, en donde se detallan todos los pormenores del diseño planteado para la subetapa de soldadura, en las figuras 4.22 y 4.23, se presenta un dibujo tridimensional del sistema.

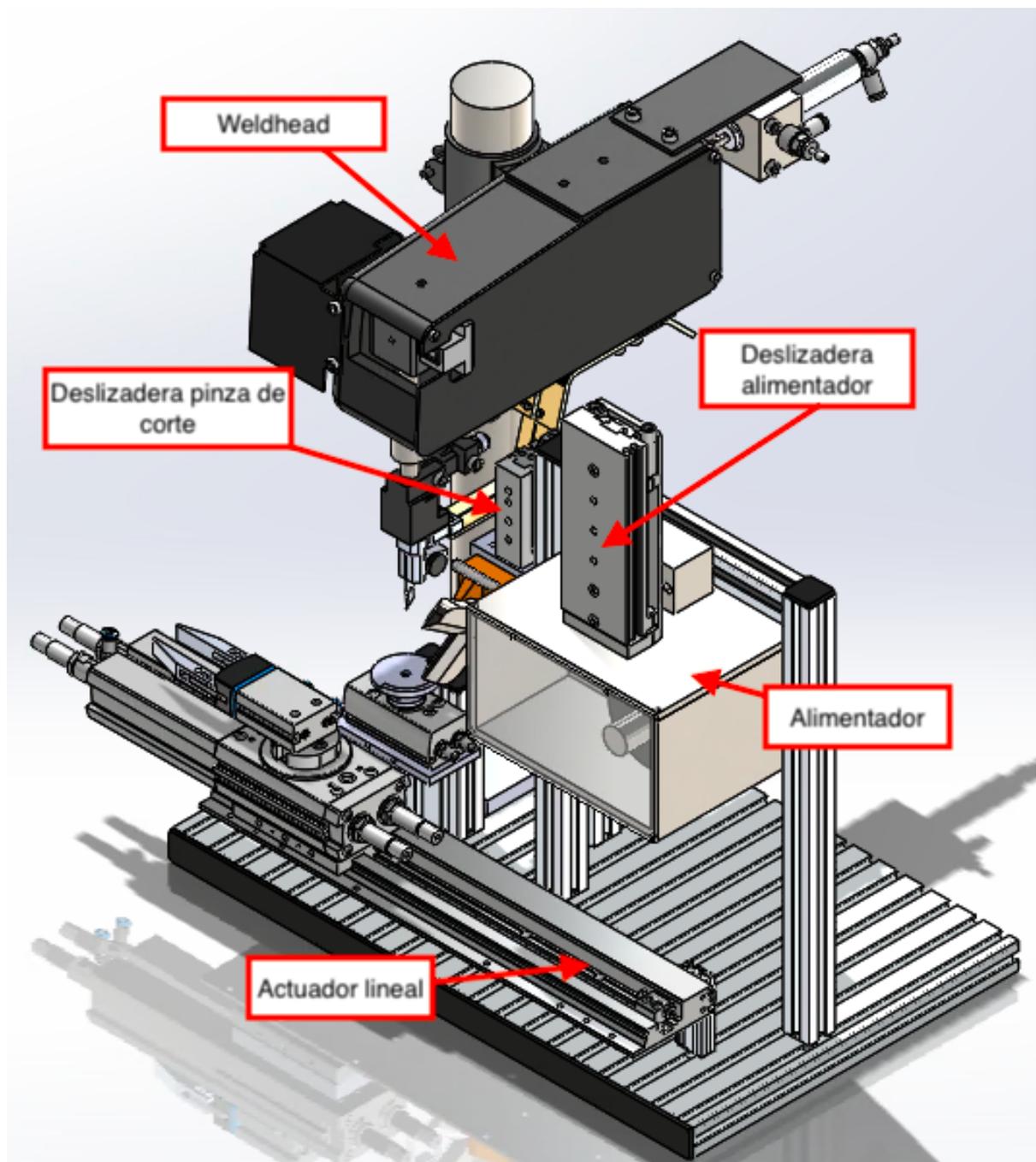
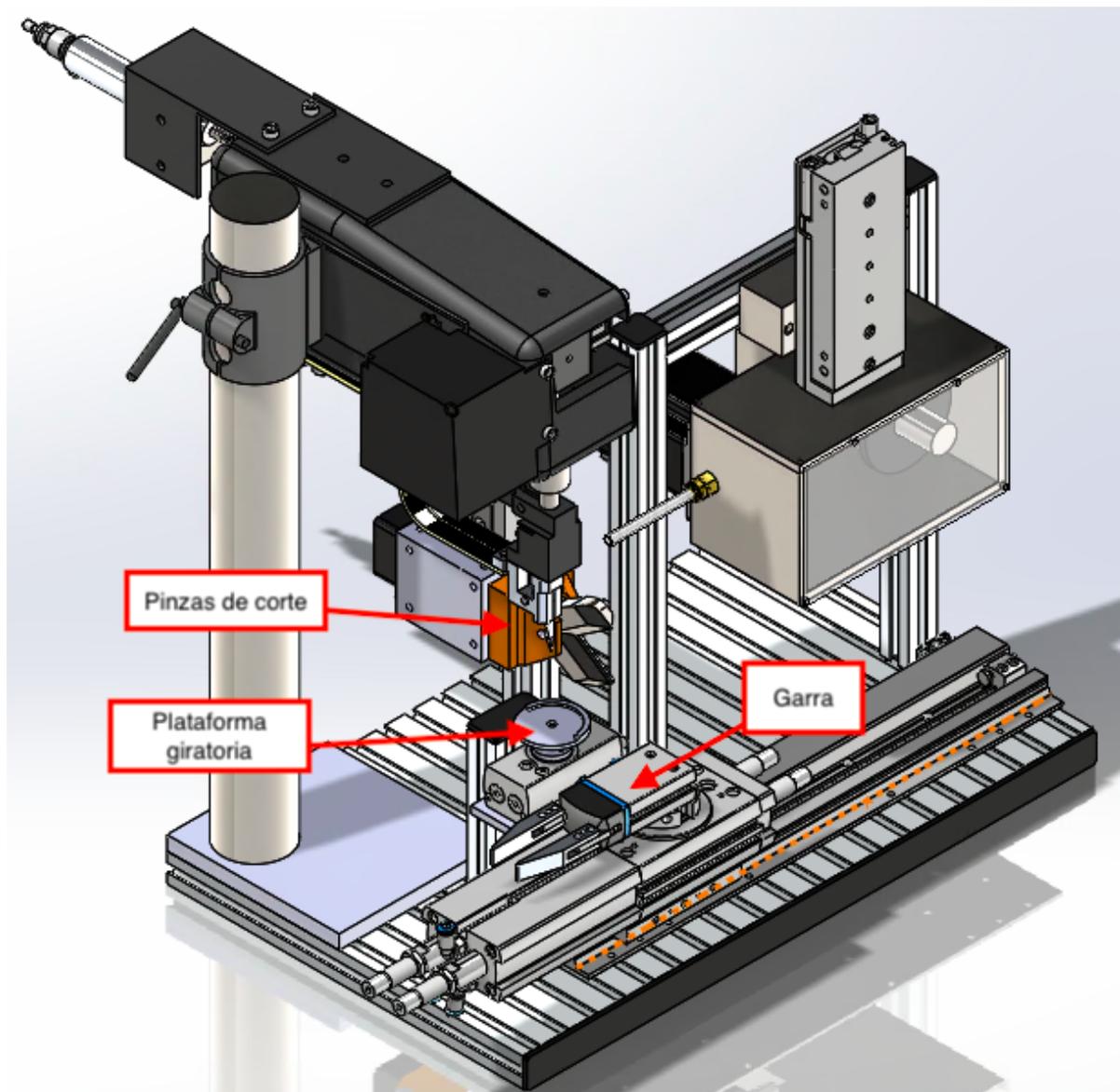


Figura 4.22: Imagen del sistema diseñado (1) (elaboración propia)



**Figura 4.23:** Imagen del sistema diseñado (2) (elaboración propia)

# Capítulo 5

## Resultados y análisis

### 5.1 Descripción

En este capítulo se realiza un análisis respecto al sistema diseñado durante el capítulo anterior para el subproceso de soldadura de la primera etapa del procedimiento de ensamblaje de los sensores de  $CO_2$ . Más específicamente, se presentan los resultados de la simulación realizada para los dos tipos de control (manual y automático) implementados en el autómata programable. De igual manera, con respecto a aquellas piezas que fueron diseñadas de manera propia, se presentan los resultados de la simulación de esfuerzos sobre las mismas, para determinar si es posible que dichos elementos soporten las cargas a las que estarán sometidas. Además, en cuanto al alimentador de cable diseñado, partiendo de una prueba de concepto construida con materiales de bajo costo, se presentan los datos obtenidos y el análisis respectivo para demostrar si las ideas planteadas en el diseño funcionarían de manera adecuada en la realidad, con los componentes que fueron previamente seleccionados. Finalmente, se plantea un análisis económico referente a la propuesta de automatización presentada en el capítulo 3, para establecer si la idea planteada es económicamente viable o no.

### 5.2 Funcionamiento manual y automático del PLC

Para la comprobación del funcionamiento de la programación diseñada para el PLC, se hizo uso de la herramienta PLCSIM para posibilitar la simulación de un autómata virtual y verificar que la interacción entre la interfaz HMI y el dispositivo funcionara de manera adecuada.

### 5.2.1 Funcionamiento manual

En las figuras 5.1 y 5.2, se demuestra la interacción entre el PLC y la interfaz HMI en configuración manual.



Figura 5.1: Funcionamiento en modo manual del sistema diseñado (1) (elaboración propia)

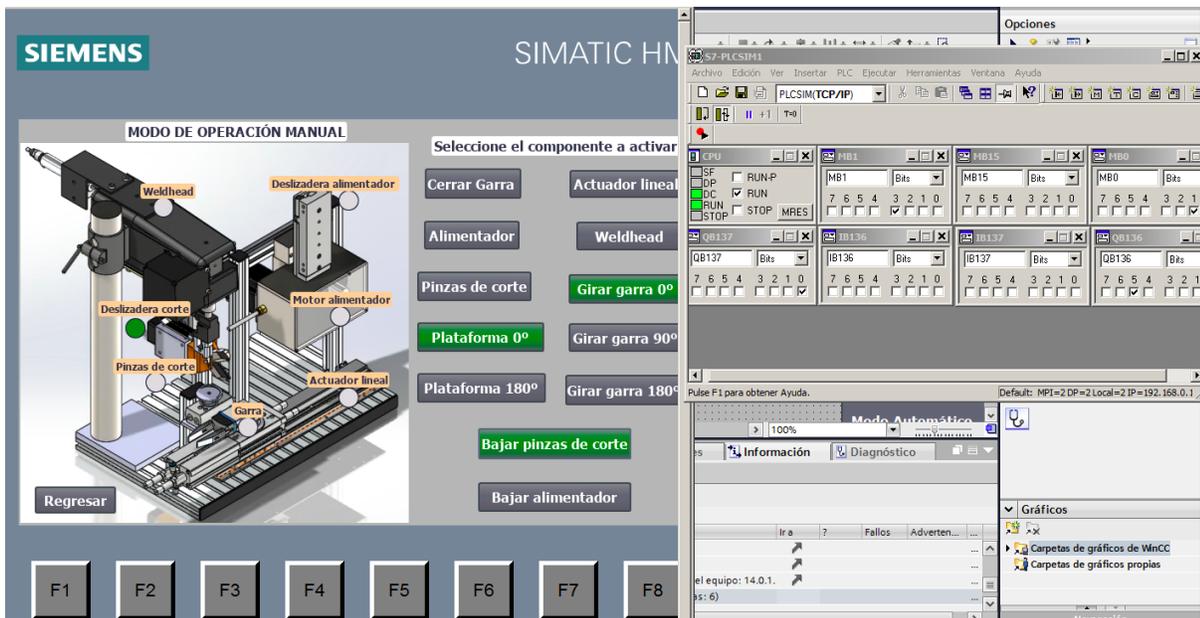


Figura 5.2: Funcionamiento en modo manual del sistema diseñado (2) (elaboración propia)

De las figuras anteriores, se observa que la interacción entre la interfaz y el PLC virtual construido, funcionan de manera adecuada según lo esperado, dado que el usuario es capaz de presionar los botones y encender, de manera individual, cada una de las salidas

correspondientes visualizándose el cambio, igualmente, en los indicadores colocados a lo largo del sistema.

## 5.2.2 Funcionamiento automático

En las figuras 5.3 y 5.4, se demuestra la interacción entre el PLC y la interfaz HMI en la configuración de tipo automático.

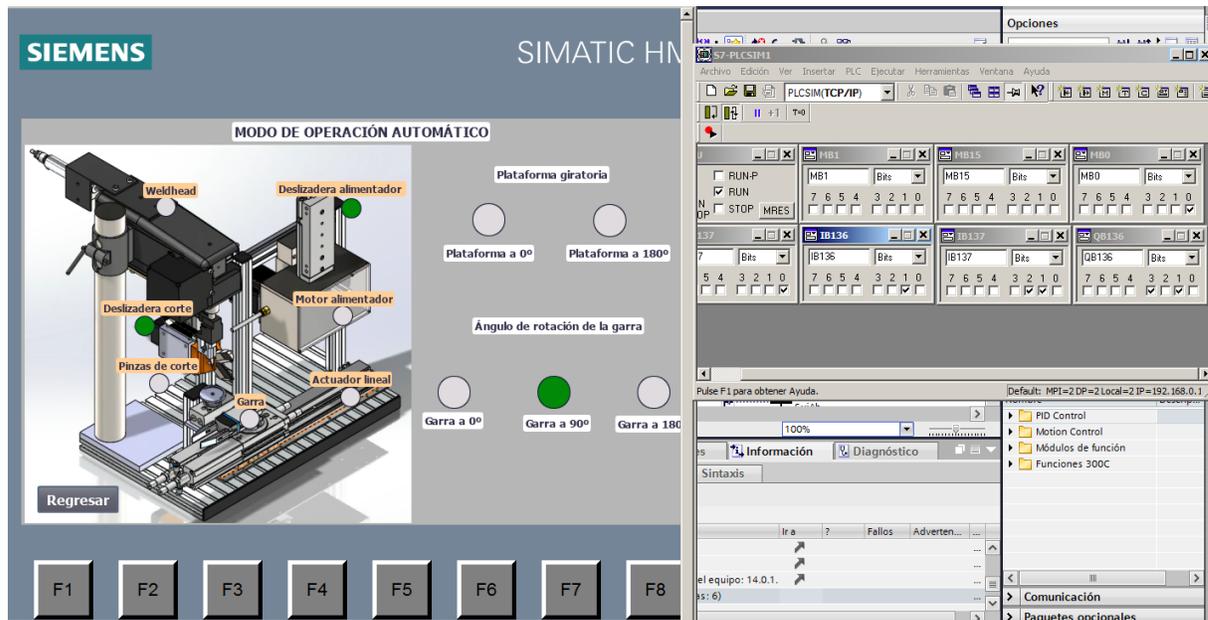


Figura 5.3: Funcionamiento en modo automático del sistema diseñado (1) (elaboración propia)

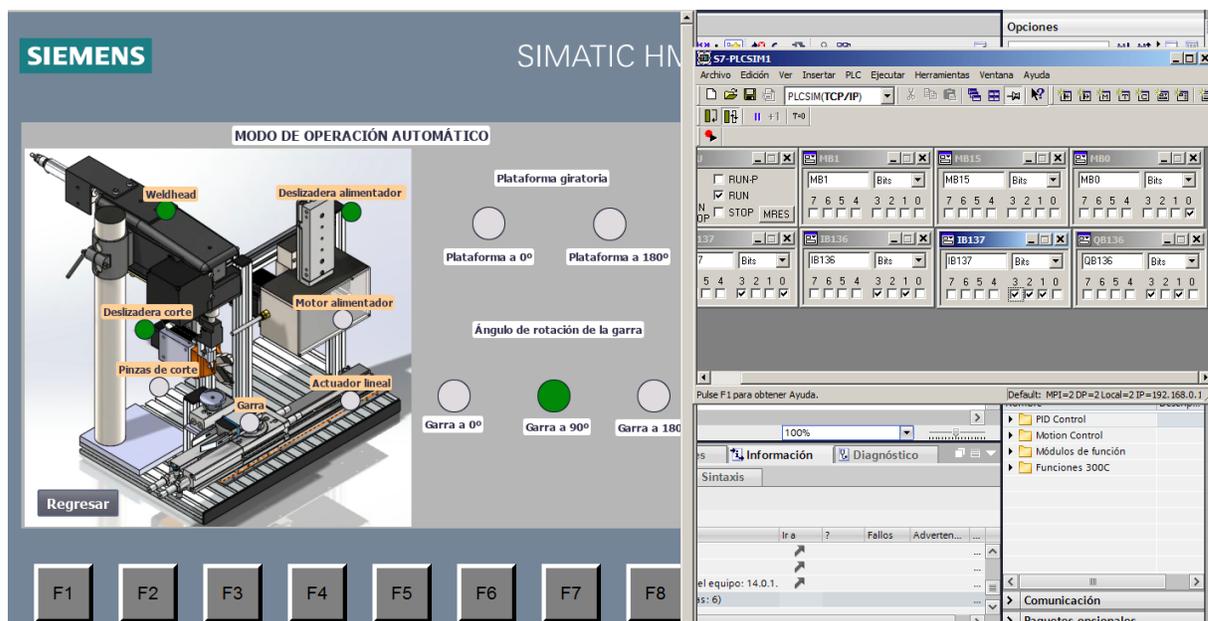


Figura 5.4: Funcionamiento en modo automático del sistema diseñado (2) (elaboración propia)

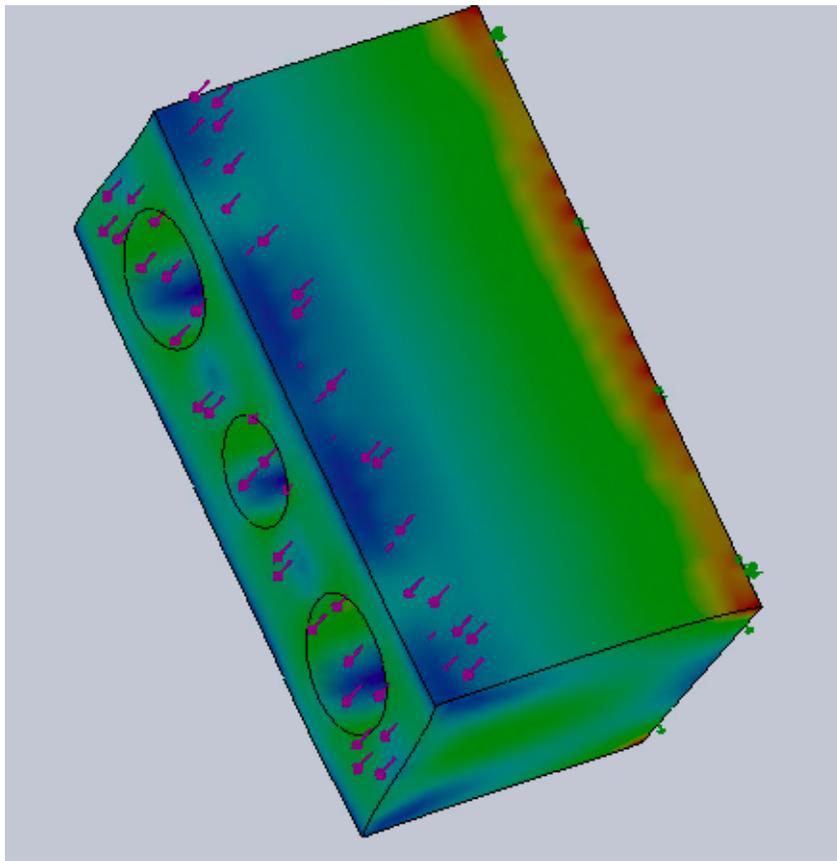
De las figuras anteriores se observa, al igual que para el caso observado con el funcionamiento manual, que el modo automático funciona de manera adecuada al existir comunicación efectiva entre el PLC y el HMI, en función de las entradas y salidas del primero. De igual forma, se aprecia que las animaciones y eventos implementados, hacen su aparición de manera correcta de acuerdo con la salida a la que están asociados.

## 5.3 Análisis de esfuerzos sobre elementos diseñados

Según el diseño presentado anteriormente, dadas las cargas a las que se encuentran sometidos los elementos en cuestión, se determinó que los elementos más susceptibles a fallar corresponden a aquellos soportes que conectan a las deslizaderas que movilizan al sistema de alimentación de cable así como a las pinzas de corte. Para analizar los esfuerzos presentes en las mismas, se utilizó la herramienta de Solidworks Simulation, para visualizar el esfuerzo máximo al que estarán sometidos estos elementos, considerando como material para su construcción el acero inoxidable AISI 304, que corresponde a un metal ampliamente utilizado dentro de la industria médica.

### 5.3.1 Análisis de soporte para deslizadera de corte

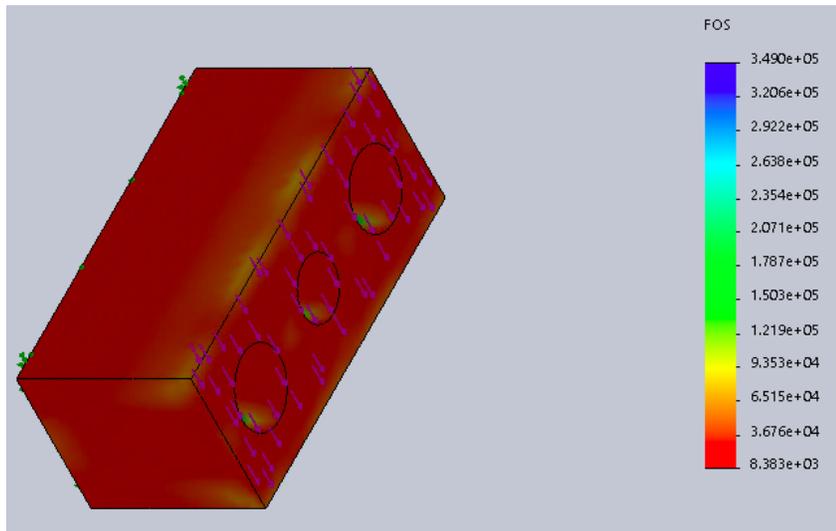
En la figura 5.5, se presenta el resultado de la prueba de análisis para el soporte correspondiente a la deslizadera de corte y, por su parte, en la tabla 5.1 se establecen las especificaciones de la prueba y los resultados numéricos arrojados por el software de simulación. De igual manera en la figura 5.6, se presenta un estudio respecto al factor de seguridad de la pieza.



**Figura 5.5:** Resultado gráfico de la prueba de esfuerzos para el soporte de las pinzas de corte (elaboración propia)

**Tabla 5.1:** Resultados de la prueba de esfuerzo sobre el soporte para la deslizadera de corte

Material	Carga a la que estará sometido (N)	Esfuerzo de Fluencia ( $N/m^2$ )	Esfuerzo Máximo ( $N/m^2$ )
AISI 304	3.43	$350 \times 10^6$	$74 \times 10^3$

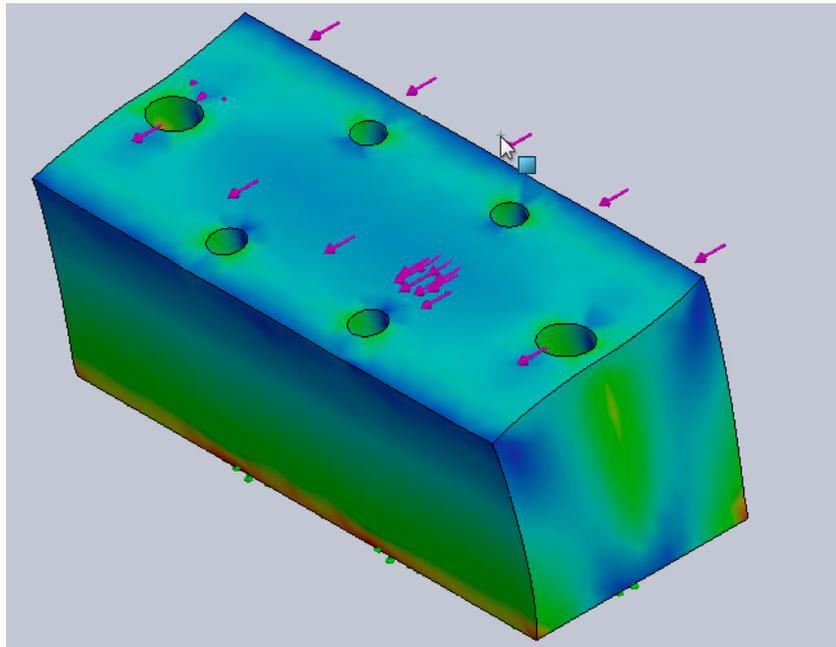


**Figura 5.6:** Resultado gráfico de la prueba de factor de seguridad para el soporte de las pinzas de corte (elaboración propia)

Según se puede observar en la tabla 5.1, la pieza diseñada no fallará al estar sometida a un esfuerzo menor que el esfuerzo de fluencia obteniéndose, igualmente, un factor de seguridad mayor a la unidad cuya magnitud es de 8383.

### 5.3.2 Análisis de soporte para deslizadera de sistema de alimentación de cable

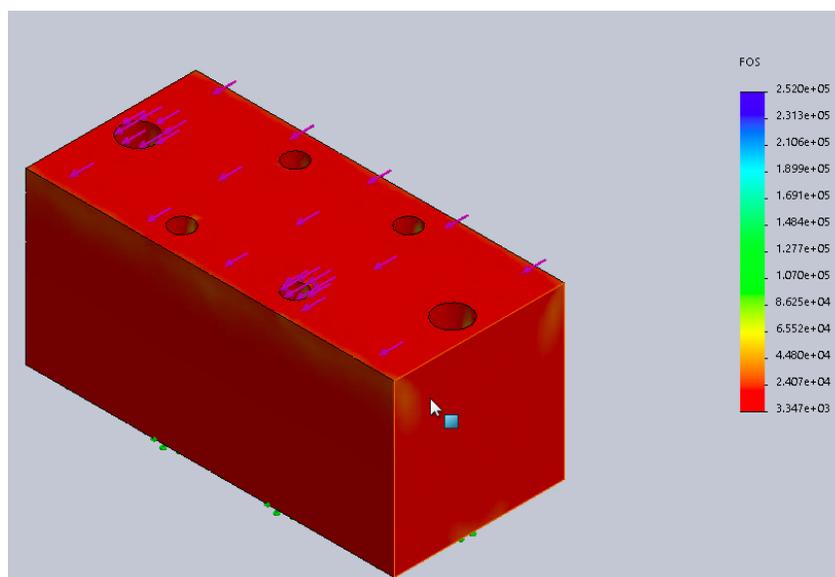
En la figura 5.7, se presenta el resultado de la prueba de análisis para el soporte correspondiente a la deslizadera del sistema de alimentación y, por su parte, en la tabla 5.2 se establecen las especificaciones de la prueba y los resultados numéricos arrojados por el software de simulación. De igual manera en la figura 5.8, se presenta un estudio respecto al factor de seguridad de la pieza.



**Figura 5.7:** Resultado gráfico de la prueba de esfuerzos para el soporte del sistema de alimentación (elaboración propia)

**Tabla 5.2:** Resultados de la prueba de esfuerzo sobre el soporte para la deslizadera del sistema de alimentación

Material	Carga a la que estará sometido (N)	Esfuerzo de Fluencia ( $N/m^2$ )	Esfuerzo Máximo ( $N/m^2$ )
AISI 304	22.23	$350 \times 10^6$	$104.6 \times 10^3$



**Figura 5.8:** Resultado gráfico de la prueba de factor de seguridad para el soporte del sistema de alimentación de cable (elaboración propia)

Al igual que para el caso del otro soporte analizado, se observa que el correspondiente al sistema de corte tampoco fallará, pues presenta un Factor de Seguridad mayor a la unidad y que es igual a 3347.

## 5.4 Análisis del sistema de alimentación de cable

Para comprobar el principio de funcionamiento del sistema de alimentación de cable, se elaboró una prueba de concepto utilizando materiales de bajo costo. Los elementos utilizados para la prueba fueron los siguientes:

1. Dos ruedas de neopreno de 2 in de diámetro, con un grosor de 0.2 in cada una.
2. Un motor a pasos NEMA 17 marca OUKEDA modelo: OK42STH22-0804AC
3. Un módulo controlador L298N
4. Cable de cobre común.

El sistema construido se observa directamente en la figura 5.9.



**Figura 5.9:** Prueba de concepto para comprobar funcionamiento del sistema de alimentación de cable (elaboración propia)

El motor se controló mediante el uso de un dispositivo Arduino UNO y en total se ejecutaron seis pruebas para verificar el funcionamiento del sistema. Dichas pruebas consistieron

en la excitación del motor a pasos de manera que el sistema fuera capaz de alimentar 0.5 in de cable (12.7 mm). Para ello, se colocaron marcas en el cable de cobre y, mediante el uso de un Vernier, se verificó la magnitud de la longitud existente entre cada una de las marcas. Los resultados de las pruebas se presentan en la tabla 5.3

**Tabla 5.3:** Resultados de la pruebas experimentales realizadas con el alimentador construido

Prueba	Longitud medida ( $\pm 0.05$ mm)	Porcentaje de Error (%)
1	9.45	25.5
2	10.15	20.1
3	11.65	8.6
4	8.15	35.8
5	12.05	5.1
6	11.35	10.6

De la tabla anterior se observa que, en general, se obtuvieron porcentajes de error elevados en algunos casos y, en algunas situaciones, se consiguió un valor bastante similar al buscado. Esta diferencia se presentó principalmente a que la prueba construida, al ser elaborada completamente a mano, no es capaz de mantener la presión necesaria entre las dos ruedas como para facilitar una alimentación de cable continua, pues durante la experimentación, se notó que la rueda conductora en momentos giraba sola, deteniendo momentáneamente la operación de alimentación, generando longitudes más pequeñas a la buscada. Por consiguiente, se concluye que la presión entre las ruedas juega un papel fundamental para garantizar la alimentación continua, y, en consecuencia, cuando se implemente el modelo final se deberá prestar especial atención a este aspecto. Sin embargo, es importante mencionar que el principio de funcionamiento por medio de rodillos de neopreno y un motor a pasos resulta ser adecuado, al permitir el transporte de cable hacia el sistema, tal y como se pudo comprobar durante la experimentación.

## 5.5 Análisis económico

Para la ejecución del análisis económico del proyecto, se consideró la propuesta presentada para automatizar toda la primera etapa del proceso de ensamblaje de los sensores de  $CO_2$ . Primeramente se obtuvo un costo estimado de inversión inicial, visitando varias páginas de proveedores de componentes en internet y obteniendo un valor promedio entre las cantidades halladas. Una vez conseguido dicho costo inicial, se procedió con la estimación de tres indicadores económicos: el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Rendimiento (TIR), y el Índice de Deseabilidad (ID). Se le asignó un valor umbral a los indicadores para determinar si el proyecto representa una buena inversión. Para el caso

del VAN, se desea que sea mayor a cero, la TIR debe ser mayor a la tasa de descuento y el ID mayor a unidad.

En la figura 5.10, se presentan los costos directos (inversión inicial) estimados que la empresa tendría que otorgar para desarrollar el proyecto.

### COSTOS DIRECTOS

Item	Detalle	Subtotal (U\$)
13	Sensores de proximidad	260.00
3	Sensores Inductivos	24.87
3	Mesa giratoria de indexación	150.00
1	Stack Magazine	120.00
1	Lámpara de curado UV	160.00
1	Cámara para inspección visual	2,430.00
1	PLC s7-300	2,085.00
1	HMI KTP700	682.00
1	Motor NEMA 24	89.10
1	Módulo sorting	140.00
2	Deslizaderas	80.00
2	Actuador giratorio	120.00
1	Actuador lineal	70.00
5	Válvulas electroneumáticas 5/2 vías monoestables	175.00
6	Válvulas electroneumáticas 3/2 vías monoestables	186.00
1	Mano de obra de ingeniería	1,870.79
1	Diseño del sistema	2,294.48
1	Puesta en marcha (instalación)	1,500.00
1	Licencia Solidworks	1,295.00
1	Air Kit	2,140.00
<b>A. TOTAL</b>		<b>15,872.24</b>

### COSTOS INDIRECTOS

Item	Detalle	Subtotal (U\$)
1	Administración (juicio experto 3 %)	476.17
2	Operación y Mantenimiento (juicio experto 1 %)	158.72
<b>B. TOTAL</b>		<b>634.89</b>
<b>TOTAL INVERSION (A+B)</b>		<b>16,507.13</b>

**Figura 5.10:** Costos directos del proyecto (elaboración propia)

Al finalizar la implementación del presente proyecto, se espera que de los dos operarios que forman parte de esta primera etapa del proceso, únicamente permanezca uno de ellos, representando, según la empresa, un beneficio por año igual a, aproximadamente, 5042 USD. Definiendo una tasa de descuento del 24 %, para esta inversión, se tienen los resultados mostrados en la figura 5.11. Dado que todos los indicadores se encuentran dentro de los umbrales definidos, el proyecto resulta ser económicamente viable.

AÑOS	Automatización de Operación Detector Welding EVALUACION DE PROYECTOS FLUJOS NETOS DE EFECTIVO (\$)						
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
<b>INVERSION INICIAL</b>							
Equipamiento	16,507.13						
Total Inversion Inicial	16,507.13						
<b>BENEFICIOS</b>							
Reducción de costos operativos		5,042.00	5,042.00	5,042.00	5,042.00	5,042.00	5,042.00
<b>GASTOS VARIABLES INCREM</b>		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>DEPRECIACION INCREM.</b>							
Soldadora Miyachi		1,750.00	1,750.00	1,750.00	1,750.00	1,750.00	1,750.00
Total de gastos		1,750.00	1,750.00	1,750.00	1,750.00	1,750.00	1,750.00
<b>UTILIDAD ANTES DE IMP.</b>		3,292.00	3,292.00	3,292.00	3,292.00	3,292.00	3,292.00
<b>IMPUESTO DE RENTA</b>		987.60	987.60	987.60	987.60	987.60	987.60
<b>UTILIDAD DES/IMPUES.</b>		2,304.40	2,304.40	2,304.40	2,304.40	2,304.40	2,304.40
<b>DEPRECIACION INCREM.</b>							
Soldadora Miyachi		1,750.00	1,750.00	1,750.00	1,750.00	1,750.00	1,750.00
<b>VALORES DE RESCATE</b>							
Activos Fijos							30,000.00
Impacto en Renta							-9,000.00
<b>FLUJO NETO EFECTIVO</b>	-16,507.13	4,054.40	4,054.40	4,054.40	4,054.40	4,054.40	25,054.40
FNE descontados (24%)	<b>\$18,023.02</b>						
VALOR ACTUAL NETO (VAN)	<b>\$1,515.89</b>						
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	<b>26.869%</b>						
INDICE DE DESEABILIDAD (ID)	<b>1.09</b>						

Figura 5.11: VAN, TIR e ID resultantes para el proyecto (elaboración propia)



# Capítulo 6

## Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

Según la información presentada anteriormente, se pueden plantear las siguientes conclusiones:

- Se consiguió determinar las características de la primera etapa del proceso de ensamblaje de los sensores de  $CO_2$ . Información que permitió la determinación de las necesidades y requerimientos del sistema para el establecimiento de una propuesta de automatización que posibilite el aumento de las unidades producidas, al reducir el tiempo de la operación en 55 minutos, al evitar el uso del horno como método de curado.
- Se permitió el diseño profundo del subproceso de soldadura para la primera etapa del ensamblaje de estos dispositivos, gracias al adecuado entendimiento del proceso y de los parámetros del mismo.
- El diseño mecánico generado, correspondiente a los diferentes soportes generados para la sujeción de las deslizaderas de corte y alimentación, es robusto al presentarse, en ambos casos un factor de seguridad mayor a la unidad (magnitudes iguales a 8383 y 3347, respectivamente).
- La programación del PLC y el HMI cumplieron con los requerimientos de contar con un modo de operación manual y otro automático.
- Según el análisis económico general desarrollado, considerando los costos de los componentes y otros asociados al proyecto, se observa que el mismo resulta ser viable, puesto que el índice de deseabilidad es superior a la unidad (1.09), el valor actual neto es mayor a cero (\$1,515.89) y la tasa interna de retorno es mayor a la tasa de descuento (26.869% > 24%).

## 6.2 Recomendaciones

- Resulta imprescindible analizar las otras etapas del proceso de ensamblaje de los sensores para garantizar que, efectivamente, la producción de estos dispositivos se eleve al diseñar la automatización de los procesos restantes, generándose una solución de tipo integral.
- Aunque se considera que el alimentador de cable diseñado, cumplirá correctamente su función en el diseño propuesto, según lo observado durante la prueba de concepto realizada, resulta recomendable colocar un encoder en el eje de la rueda conducida, para tener un mejor control sobre la cantidad de cable que se otorga al sistema y, además, a nivel de programación del PLC, permitir que se le indique al usuario cuando el cable está próximo a agotarse.
- Se propone la inclusión de contadores dentro de la programación del PLC para que se pueda comenzar a almacenar datos de producción relevantes en el modo de funcionamiento automático, que después puedan ser enviados a la nube y accedidos desde cualquier dispositivo, mejorando, sustancialmente, la distribución de los mismos.
- Se recomienda realizar la simulación conjunta del sistema (automatización y elementos mecánicos), para verificar que los movimientos sean los esperados y no se presenten interferencias entre los diferentes elementos. Dado que se ha propuesto el uso de actuadores de la compañía FESTO, dicha simulación puede llevarse a cabo en una plataforma como CYROS, por ejemplo.

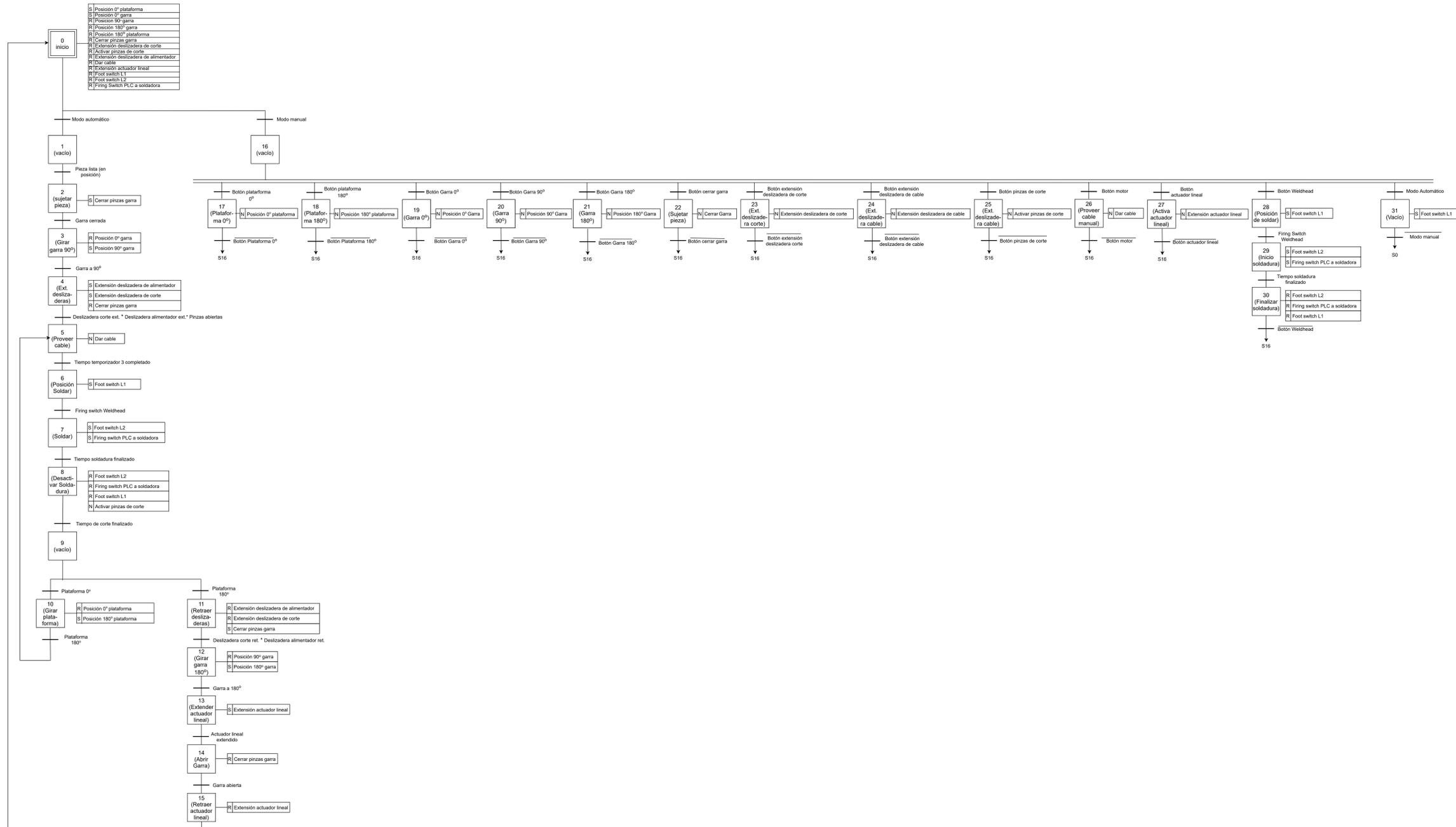
# Bibliografía

- [1] H. Medical, “Capnografía volumétrica,” 2018. [Online]. Available: <https://www.hamilton-medical.com/dam/jcr:f2a4afef-1b49-4bcf-9500-acbb718d5c8c/Volumetric-Capnography-ebook-es-ELO20181001N.00.pdf>
- [2] Philips. (2020) Capnography sensor. [Online]. Available: <https://www.philips.com/static/oem-respironics/default.html>
- [3] T. Wildi, *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. Pearson Education, 2007.
- [4] S. Chapman, *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill, 2012.
- [5] N. de Anda. (2018) Motor dc. [Online]. Available: <https://www.factor.mx/portal/base-de-conocimiento/motor-dc/>
- [6] D. Patrick and S. Fardo, *Rotating Electrical Machines and Power Systems (2nd Edition)*. Fairmont Press, Inc, 1997.
- [7] A. Shenoy, “Design and development of microwire feeder for laser for laser applications,” 2010. [Online]. Available: [https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5994&context=masters\\_theses](https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5994&context=masters_theses)
- [8] R. Budynas and J. Keith, *Shigley’s Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill, 2015.
- [9] J. Lozano and F. Soria. (2017) Piñón-cremallera. [Online]. Available: [https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/51\\_pincremallera.html](https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/51_pincremallera.html)
- [10] oasys. (2019) Qué es la automatización industrial y sus beneficios en la empresa. [Online]. Available: <https://oasys-sw.com/que-es-automatizacion-industrial-beneficios/>
- [11] e. y. d. c. Departamento de ingeniería eléctrica, “Controladores lógicos programables (plcs),” 2010. [Online]. Available: [http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion\\_de\\_referencia\\_ISE6\\_1\\_1.pdf](http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE6_1_1.pdf)
- [12] Wonderware. (2020) Interfaz hombre-máquina (hmi). [Online]. Available: <https://www.wonderware.es/hmi-scada/que-es-hmi/>

- [13] C. de estudios cervantinos. (2015) Qué es un sensor. [Online]. Available: <https://www.centroestudioscervantinos.es/que-es-un-sensor/>
- [14] E. Vildósola, “Actuadores,” 2010. [Online]. Available: <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/actuadores.pdf>
- [15] Allen-Bradley. (2020) Dispositivos de detección de presencia. [Online]. Available: <https://www.rockwellautomation.com/es-ar/products/hardware/allen-bradley/sensors-and-switches/presence-sensors.html#>
- [16] F. Didactic, “Válvula neumática de 5/2 vías,” 2005. [Online]. Available: <https://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/00085950001135162508.pdf>
- [17] —, “Cilindro de doble efecto,” 2005. [Online]. Available: <https://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/00631997001135156831.pdf>
- [18] —, “Actuadores giratorios drrd, de doble émbolo,” 2020. [Online]. Available: [https://www.festo.com/cat/en-gb\\_gb/data/doc\\_ES/PDF/ES/DRRD\\_ES.PDF](https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ES/PDF/ES/DRRD_ES.PDF)
- [19] Philips, *Manufacturing Process Instruction: Detector Welding CAPNOSTAT 5*. Philips, 2020.
- [20] K. Ulrich and S. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*. McGraw Hill, 2013.
- [21] A. M. AMERICA, *UB25 Technical Manual*. Amada Miyachi, 2014.
- [22] —, *Light Force LT-050B-F/M Metric Weld Head*. Amada Miyachi, 2020.

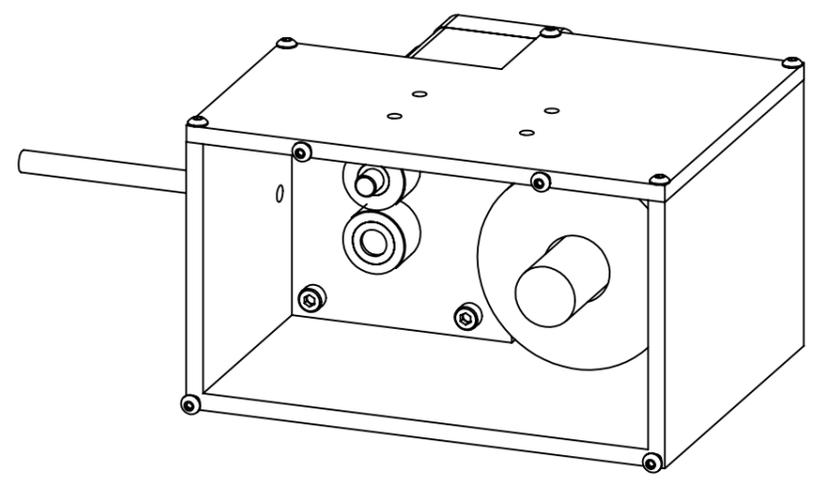
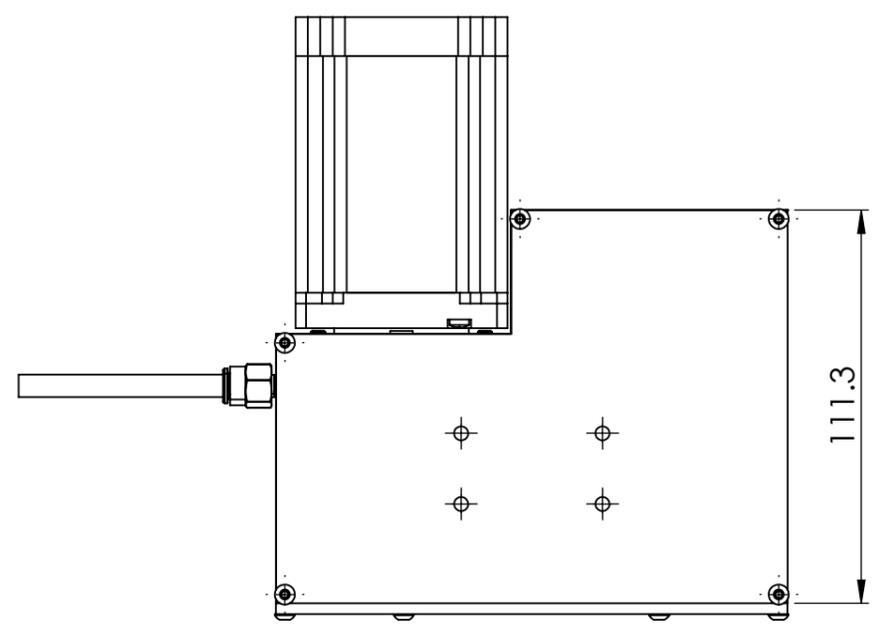
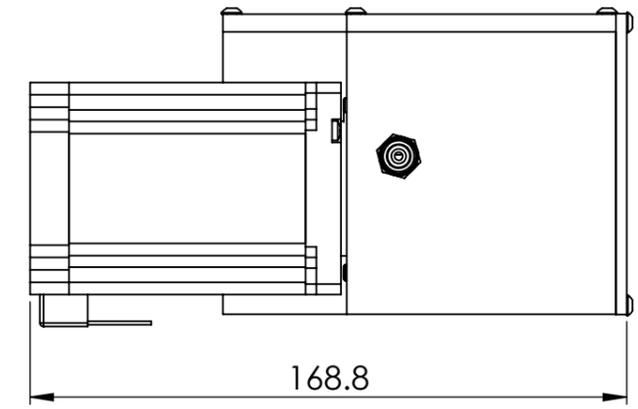
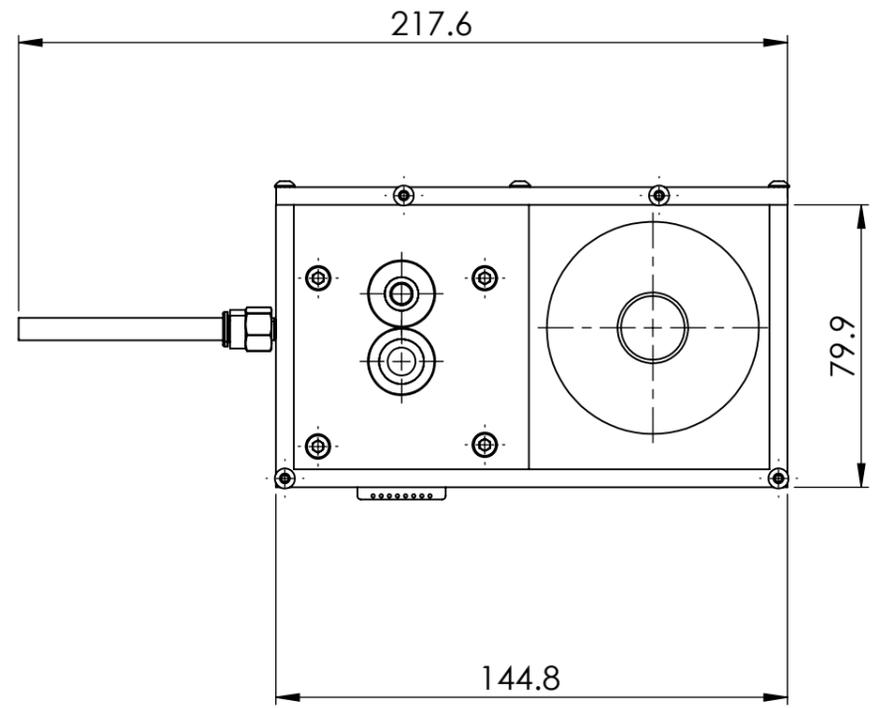
# Apéndice A

## Diagrama de programación GRAFCET

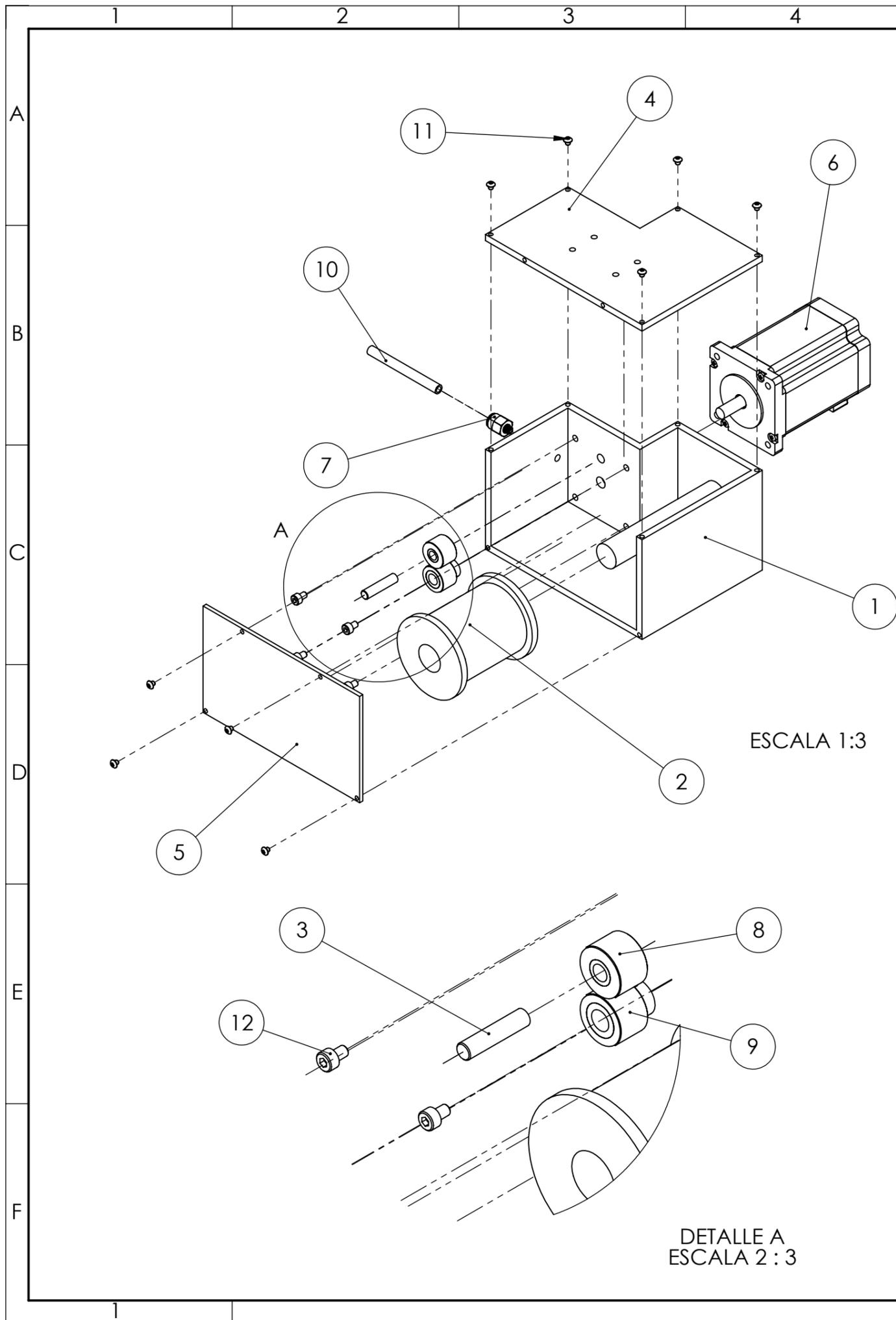


# Apéndice B

## Planos mecánicos

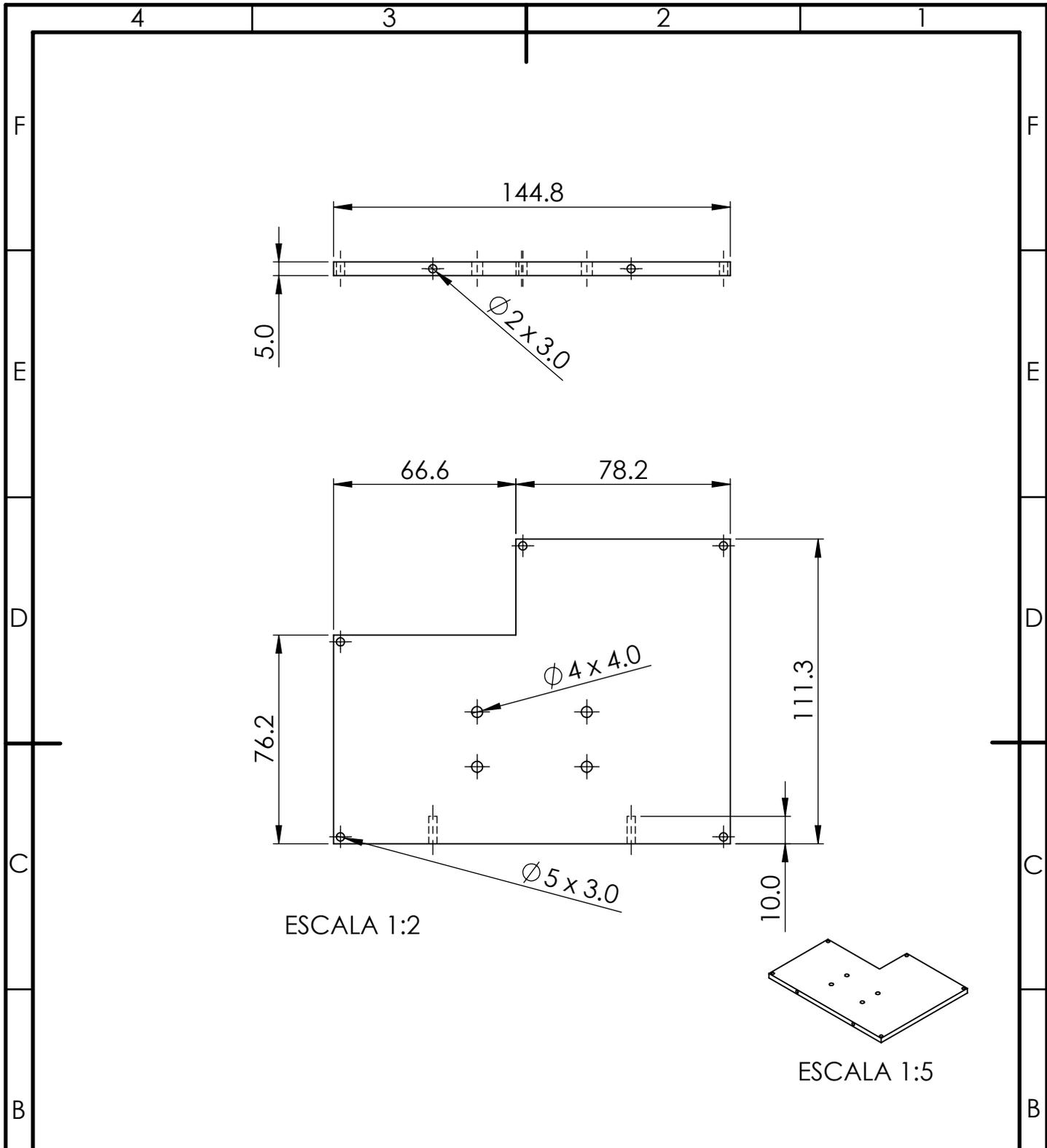


<h1>TEC</h1>		<b>TECNOLÓGICO DE COSTA RICA</b>		ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:	
				CURSO: PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN		<b>A</b>	
NOMBRE: O. VELEZ				ACABADO GENERAL:		PARTE: <b>ENSAMBLE GENERAL DEL ALIMENTADOR</b>	
FIRMA:				--			
FECHA: 18/12/20				MATERIAL:			
VERIF. xxxxxxxx				d/m/año			
APROB. xxxxxxxx				d/m/año		PROYECTO:	
FABR. xxxxxxxx				d/m/año		ESCALA:	
SISTEMA:		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.1 .X ±0.05 .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±0.1°		TOLERANCIA EN: mm		FORMATO:	
				PESO: gramos		<b>A 3</b>	
UNIDADES:				HOJA 1 DE 14			



PIEZA	DESIGNACIÓN	DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
		<u>DOCUMENTACIÓN</u>		
	OVD 00.01.00.00 MONT	DIBUJO DE MONTAJE		
		<u>PIEZAS</u>		
1	OVD 00.01.00.01	CARCAZA		1
3	OVD 00.01.00.02	EJE ALIMENTADOR		1
4	OVD 00.01.00.03	TAPA CARCAZA		1
5	OVD 00.01.00.03	TAPA FRONTAL		1
		<u>ARTÍCULOS ESTANDARIZADOS</u>		
2		CARRETE DE CABLE 40 AWG		1
6		STEPPER MOTOR NEMA 24		1
7		CONECTOR DE MANGUERA	GRAINGER 36X0.25	1
8		RUEDA CONDUCTIVA DE NEOPRENO	3/4" x 1/2"	1
9		RUEDA CONDUCTORA DE NEOPRENO (3/4")	3/4" x 1/2"	1
10		MANGUERA DE 1/4"		1
11		TORNILLO SBHCS #5 x 40 UNC		9
12		TORNILLO SHCS #8 X 32 UNC		4

<b>TEC</b>		TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				CURSO: PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN		<b>A</b>
				PARTE: <b>DIBUJO EXPLOSIONADO DEL ALIMENTADOR</b>		
SISTEMA:		TOLERANCIAS: LINEAL: X ± .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±°		TOLERANCIA EN:		PROYECTO:
		PESO: gramos		UNIDADES:		ESCALA: INDICADA
						FORMATO <b>A 3</b>
						HOJA 2 DE 14



ESCALA 1:2

ESCALA 1:5

**TEC**

TECNOLOGICO DE COSTA RICA

ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

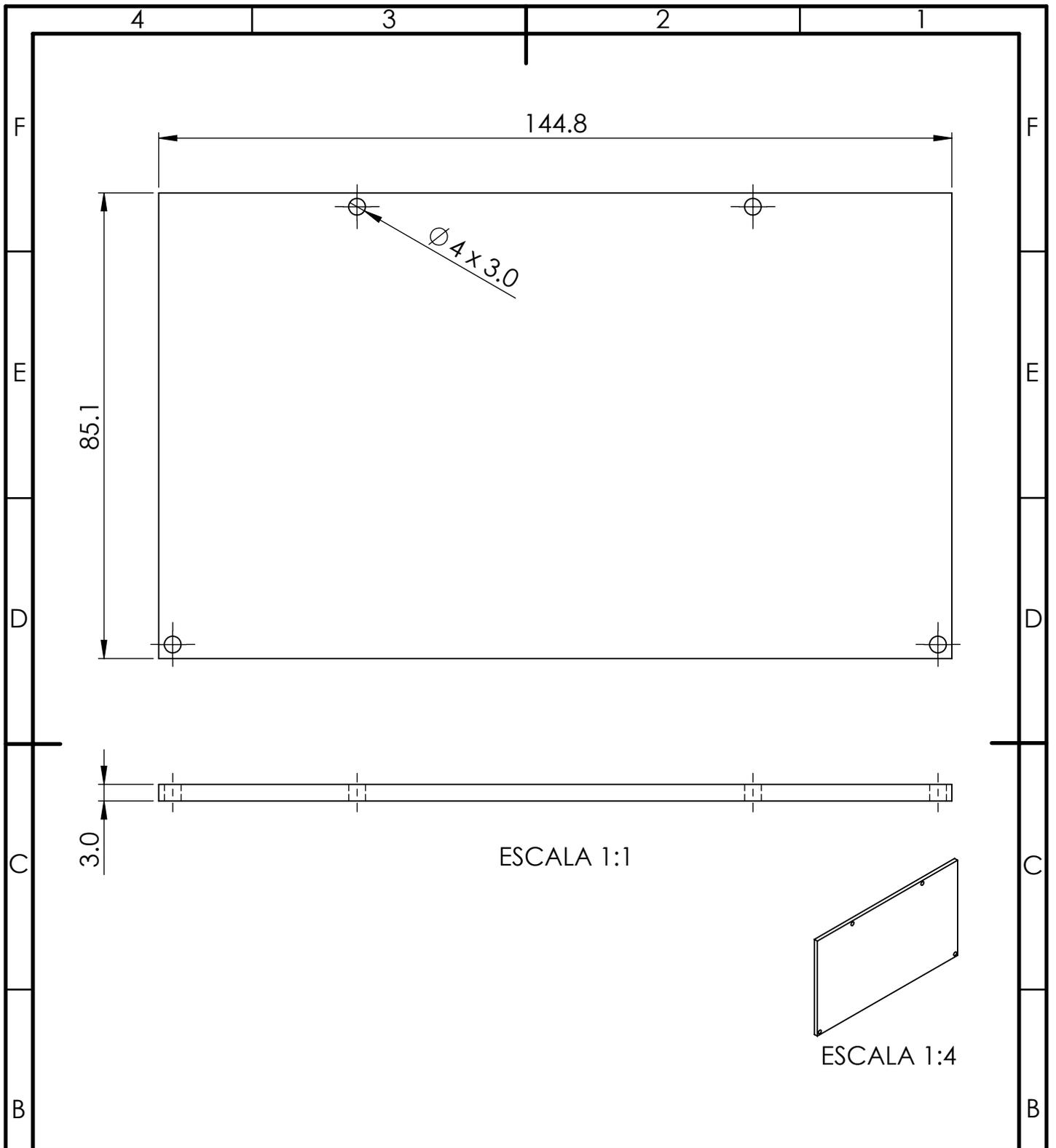
CURSO: Proyecto Final de Graduación

**A**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: <b>N8</b>
DIBUJ.	O.Velez		18/12/20	MATERIAL: AISI 304
VERIF.	XXXXX		d/m/año	
APROB.	XXXXX		d/m/año	
FABR.	XXXXX		d/m/año	

PARTE:  
**TAPA CARCAZA**

SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.1 .X ±0.05 .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±0.1°	TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO:	ESCALA: Indicada	FORMATO ANSI A
	PESO: gramos		UNIDADES: mm	HOJA 3 DE 14	



**TEC**

TECNOLOGICO  
DE COSTA RICA

Área Académica Ingeniería Mecatrónica

REVISIÓN:

CURSO: Proyecto Final de Graduación

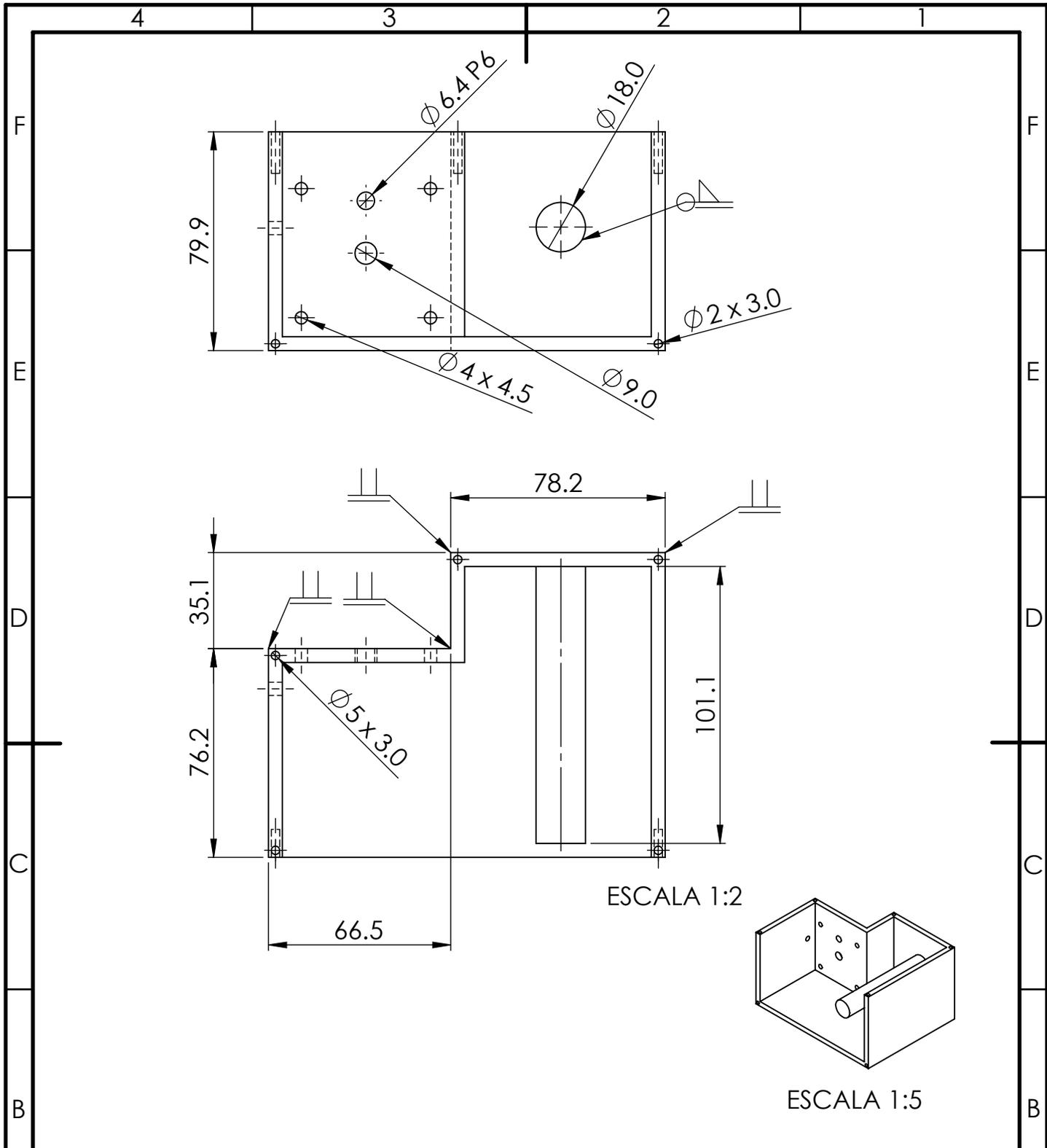
**A**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	O.Velez		18/12/20	N8
VERIF.	XXXXX		d/m/año	MATERIAL: Policarbonato
APROB.	XXXXX		d/m/año	
FABR.	XXXXX		d/m/año	

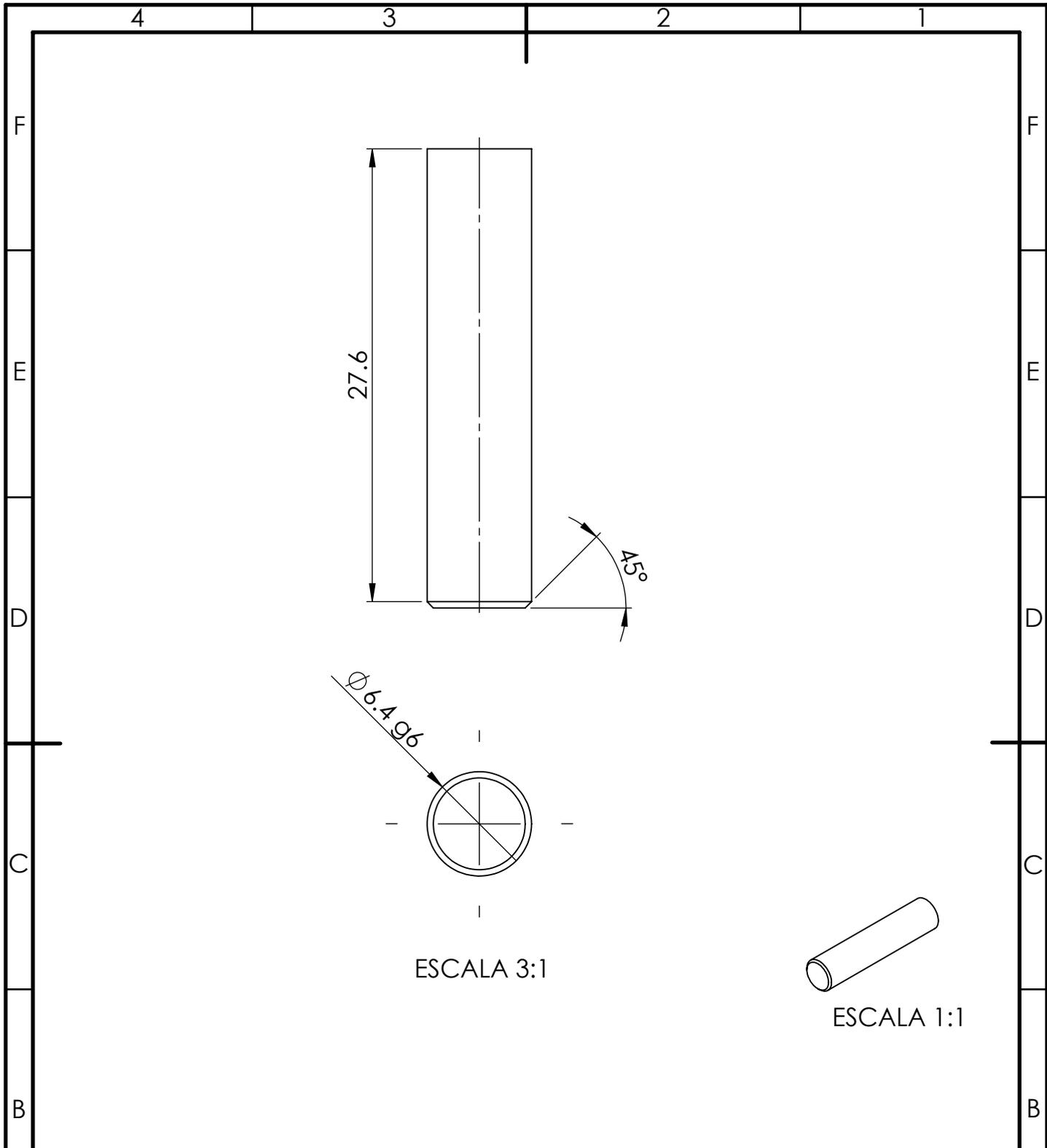
PARTE:

**TAPA FRONTAL**

SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: X $\pm 0.1$ .X $\pm 0.05$ .XX $\pm$ .XXX $\pm$ ANGULAR: $\pm 0.1^\circ$	TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO:	ESCALA: indicada	FORMATO ANSI A
	PESO: gramos		UNIDADES: mm	HOJA 4 DE 14	



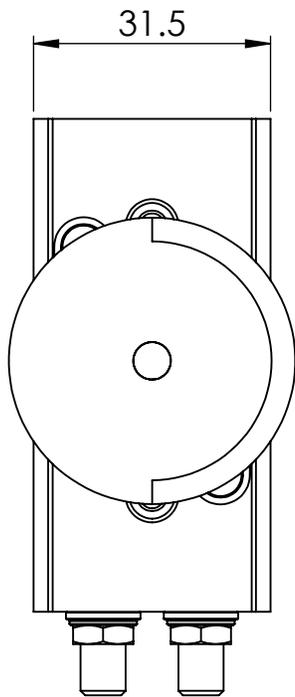
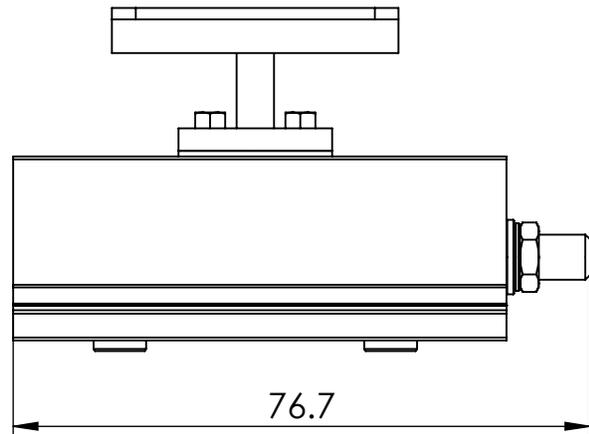
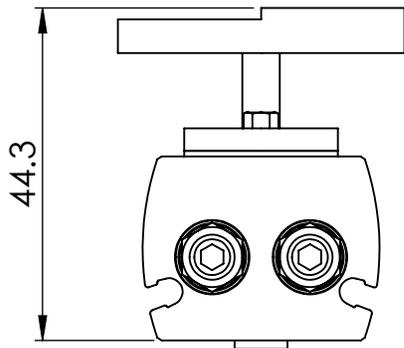
<h1>TEC</h1>		<b>TECNOLOGICO DE COSTA RICA</b>		ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>
NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: <b>N8</b>	<b>CARCAZA</b>		
DIBUJ. O.Velez		18/12/20	MATERIAL: AISI 304			
VERIF. XXXXX		d/m/año				
APROB. XXXXX		d/m/año				
FABR. XXXXX		d/m/año		PROYECTO:	ESCALA: indicada	FORMATO ANSI A
SISTEMA:		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.1 .X ±0.05 .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±0.1°	TOLERANCIA EN: mm	UNIDADES: mm	HOJA 5 DE 14	
			PESO: gramos			



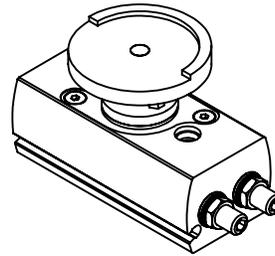
ESCALA 3:1

ESCALA 1:1

<h1>TEC</h1>		<b>TECNOLOGICO DE COSTA RICA</b>		ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:	
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
DIBUJ.	NOMBRE O.Velez	FIRMA	FECHA 18/12/20	ACABADO GENERAL: N8	<b>PARTE:</b>  EJE ALIMENTADOR		
VERIF.	XXXXX	d/m/año	MATERIAL: AISI 304				
APROB.	XXXXX	d/m/año					
FABR.	XXXXX	d/m/año					
SISTEMA:		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.1 X ±0.05 XX ± XXX ± ANGULAR: ±0.1°		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA: indicada	FORMATO ANSI A
		PESO: gramos		UNIDADES: mm	HOJA 6 DE 14		



ESCALA 1:1



ESCALA 1:2

**TEC**

TECNOLOGICO  
DE COSTA RICA

ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO: Proyecto Final de Graduación

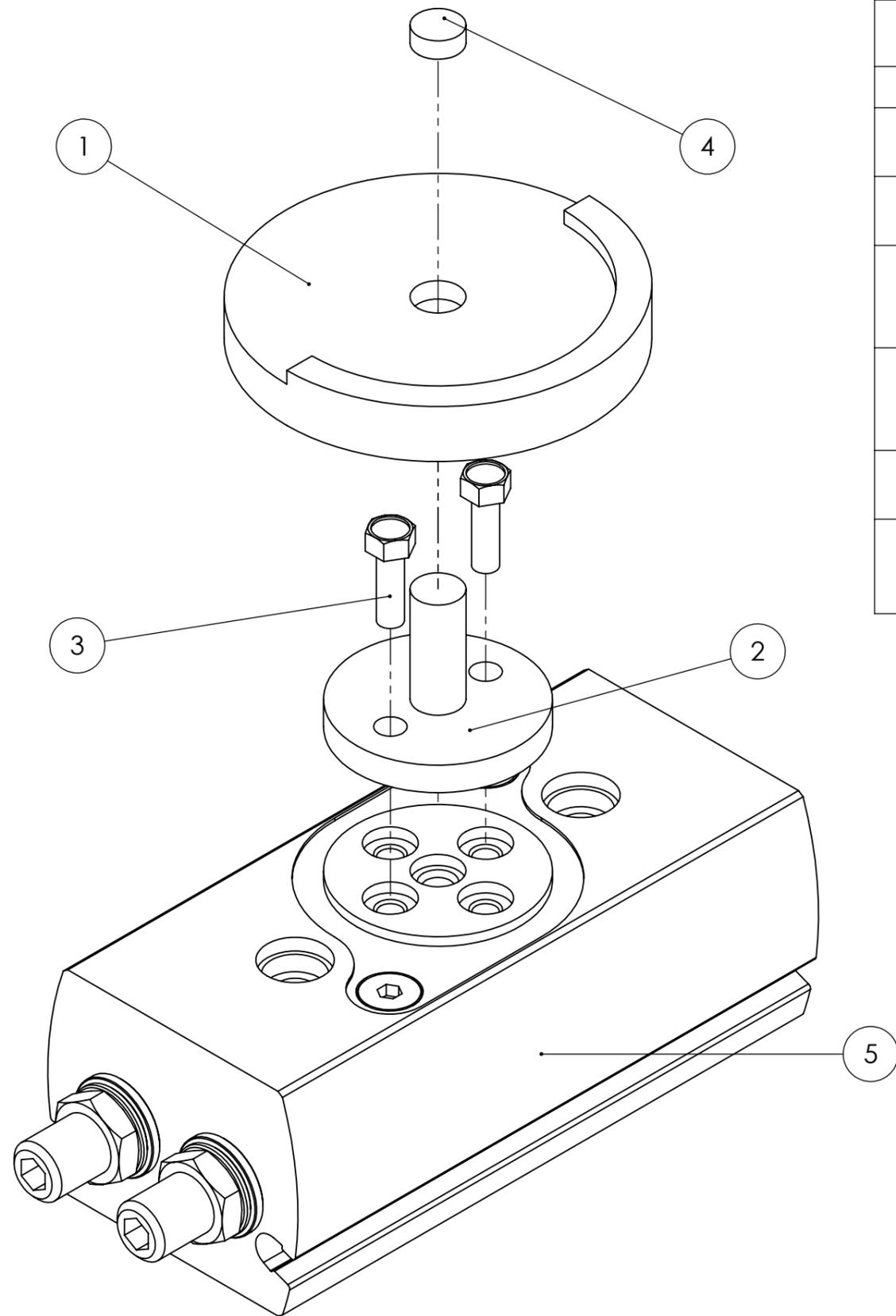
**A**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	O.Vélez		18/12/20	--
VERIF.	XXXXX		d/m/año	MATERIAL:
APROB.	XXXXX		d/m/año	
FABR.	XXXXX		d/m/año	

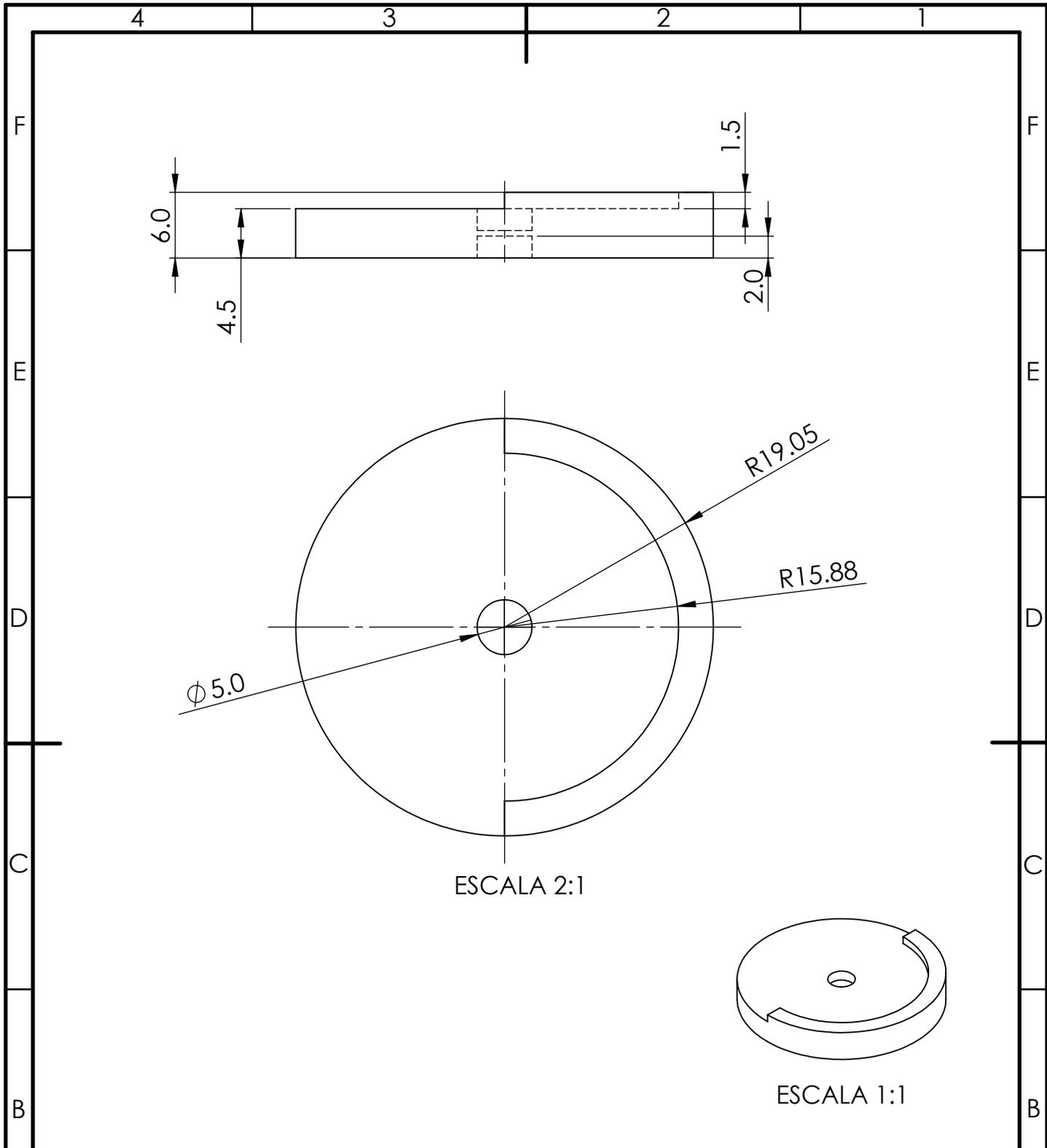
PARTE:  
**ENSAMBLE GENERAL DE MESA GIRATORIA**

SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.1 .X ±0.05 .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±0.1°	TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO:	ESCALA: indicada	FORMATO ANSI A
	PESO: gramos		UNIDADES: mm	HOJA 7 DE 14	

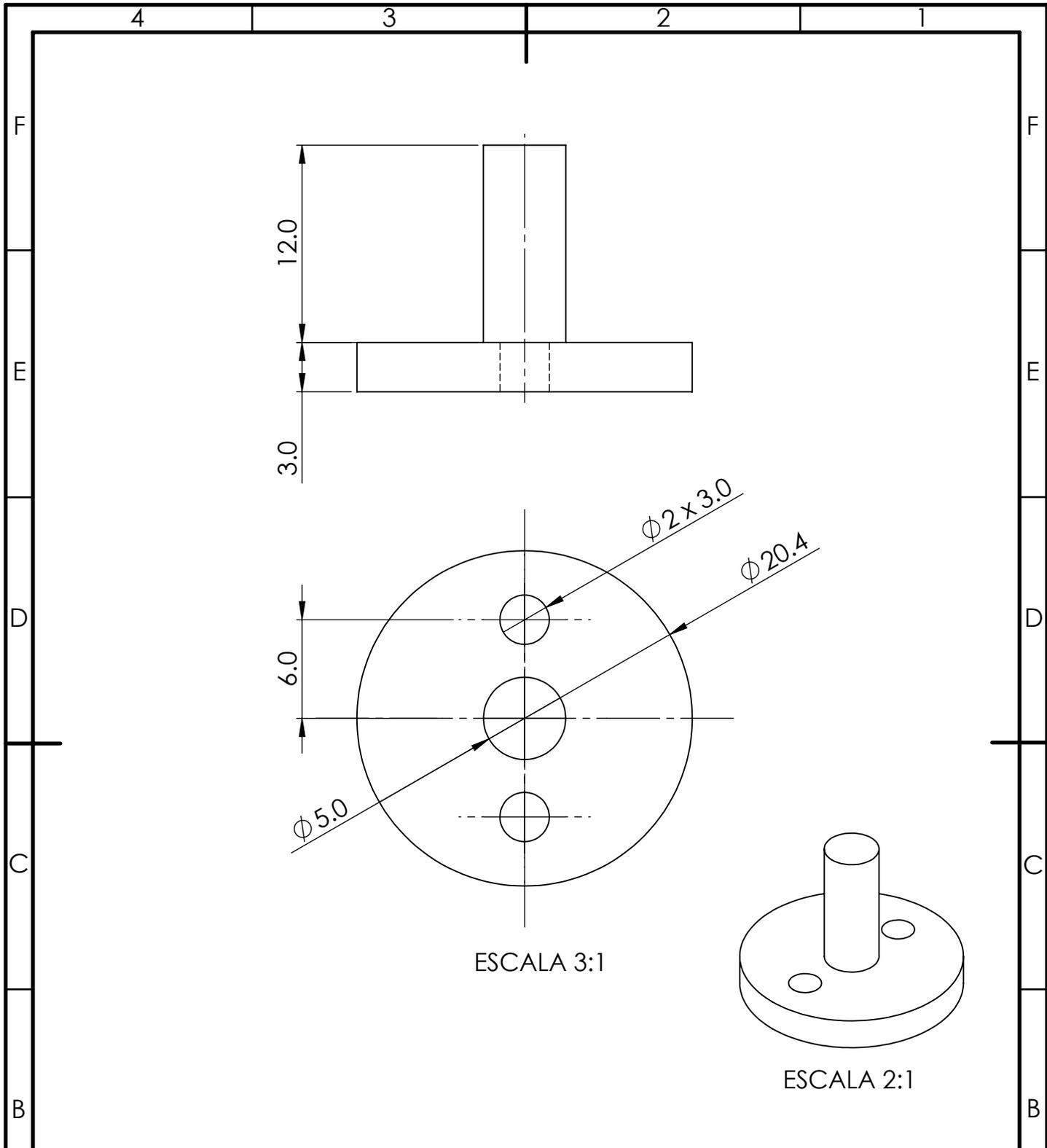
PIEZA	DESIGNACIÓN	DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
		<u>DOCUMENTACIÓN</u>		
	OVD 00.02.00.00 MONT	DIBUJO DE MONTAJE		
		<u>PIEZAS</u>		
1	OVD 00.02.00.01	PARTE SUPERIOR DE MESA GIRATORIA		1
2	OVD 00.02.00.02	BASE MESA GIRATORIA		1
		<u>ARTÍCULOS ESTANDARIZADOS</u>		
3		TORNILLO HEXAGONAL	ANSI M2.5 X 8 mm	2
4		IMÁN DE NEODIMIO	∅5 X 2 mm	1
5		ACTUADOR GIRATORIO	FESTO DRRD-8-180-FH-PA	1



<b>TEC</b>		<b>TECNOLÓGICO DE COSTA RICA</b>		ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA	REVISIÓN:
				CURSO: Proyecto Final de Graduación	<b>A</b>
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	PARTE: DIBUJO EXPLOSIONADO DE MESA GIRATORIA
DIBUJ.	O.Velez		18/12/20	--	
VERIF.	xxxxxxx		d/m/año		
APROB.	xxxxxxx		d/m/año	MATERIAL:	
FABR.	xxxxxxx		d/m/año		
SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: X ± . X ± . XX ± . XXX ± ANGULAR: ±°		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA: <b>2:1</b>
			PESO: gramos	UNIDADES: mm	FORMATO <b>A 3</b>
				HOJA 8 DE 14	

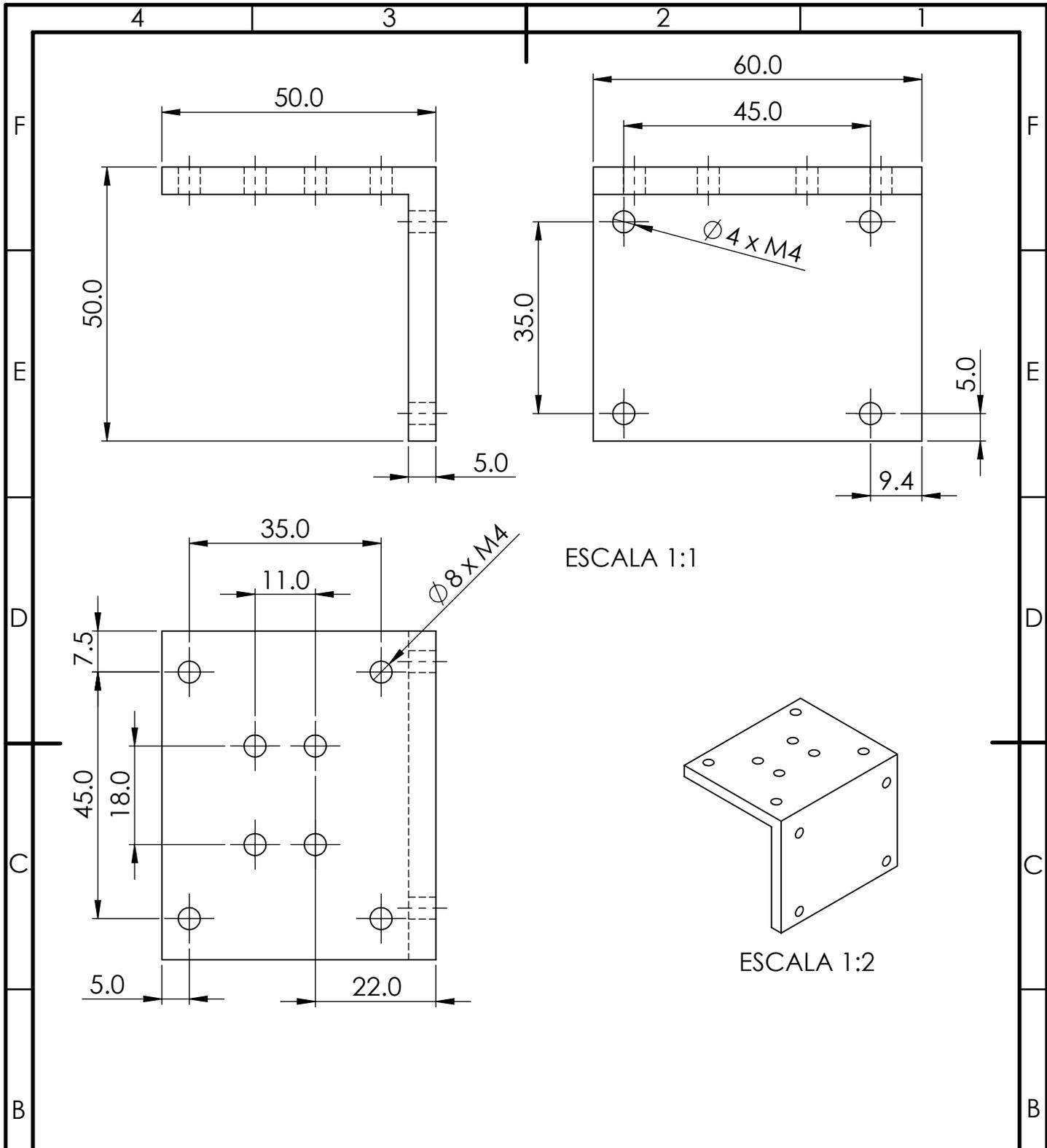


<h1>TEC</h1>		<b>TECNOLÓGICO DE COSTA RICA</b>		ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:	
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
DIBUJ.	NOMBRE O. Velez	FIRMA	FECHA 18/12/20	ACABADO GENERAL: N8	PARTE:  <b>PARTE SUPERIOR DE MESA GIRATORIA</b>		
VERIF.	XXXXX	d/m/año	MATERIAL: AISI 304				
APROB.	XXXXX	d/m/año					
FABR.	XXXXX	d/m/año					
SISTEMA:		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.1 .X ±0.05 .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±0.1°		TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO:	ESCALA: indicada	FORMATO ANSI A
		PESO: gramos		UNIDADES: mm		HOJA 9 DE 14	



<h1>TEC</h1>		<b>TECNOLOGICO DE COSTA RICA</b>		ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				CURSO: Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>
NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: <b>N8</b>	PARTE: <b>BASE PARA MESA GIRATORIA</b>		
DIBUJ. O.Velez		18/12/20	MATERIAL: AISI 304			
VERIF. XXXXX		d/m/año				
APROB. XXXXX		d/m/año				
FABR. XXXXX		d/m/año		PROYECTO:	ESCALA: indicada	FORMATO ANSI A
SISTEMA:		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.1 X ±0.05 XX ± XXX ± ANGULAR: ±0.1°	TOLERANCIA EN:	PESO: gramos	UNIDADES: mm	HOJA 10 DE 14





**TEC** | TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

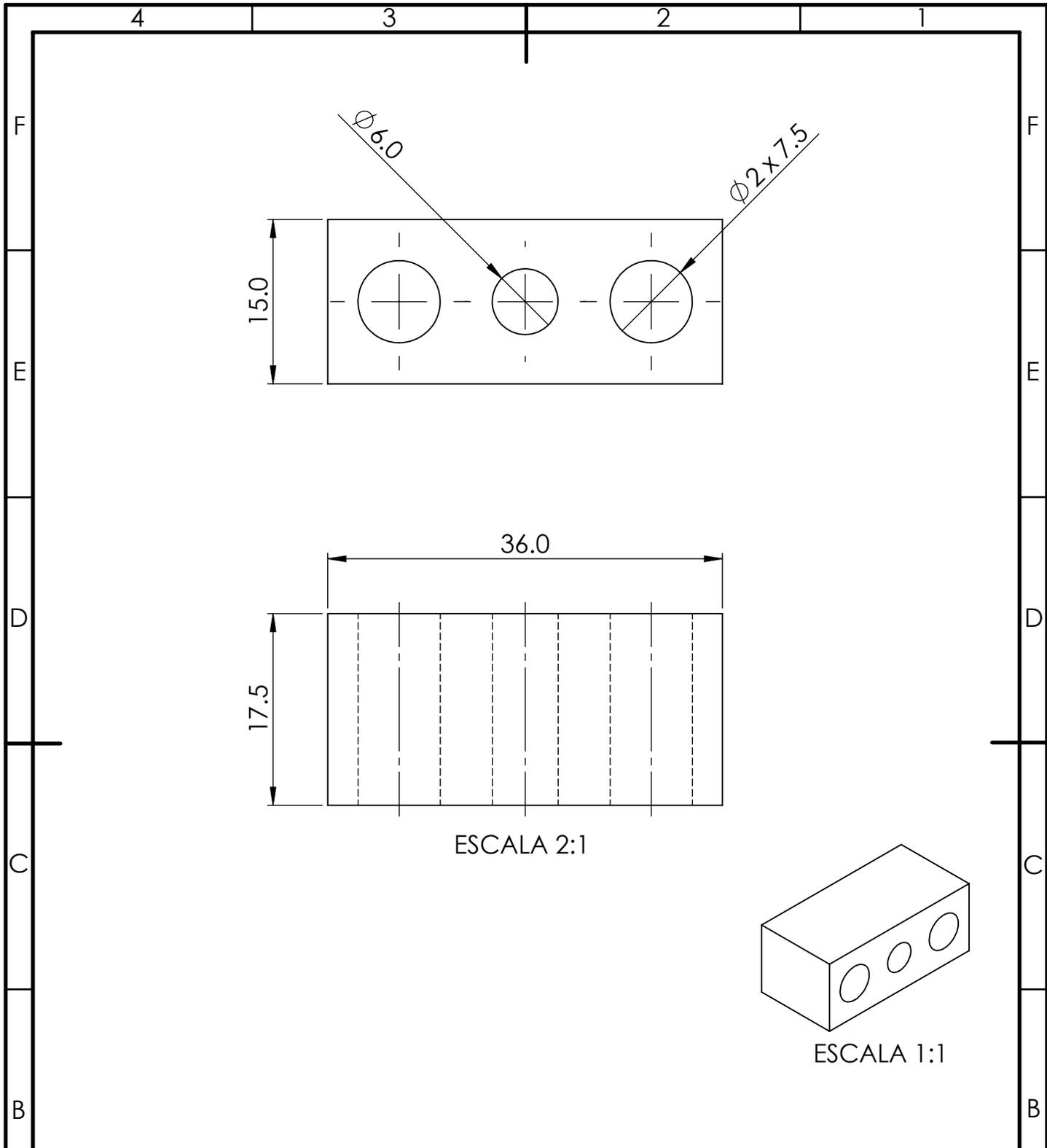
CURSO: Proyecto Final de Graduación

**A**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	O.Velez		18/12/20	<b>N8</b>
VERIF.	XXXXX		d/m/año	MATERIAL:
APROB.	XXXXX		d/m/año	
FABR.	XXXXX		d/m/año	

PARTE: **SOPORTE DE TIJERAS DE CORTE**

SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.1 .X ±0.05 .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±0.1°	TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO:	ESCALA: indicada	FORMATO ANSI A
	PESO: gramos		UNIDADES: mm	HOJA 12 DE 14	



ESCALA 2:1

ESCALA 1:1

**TEC** | TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

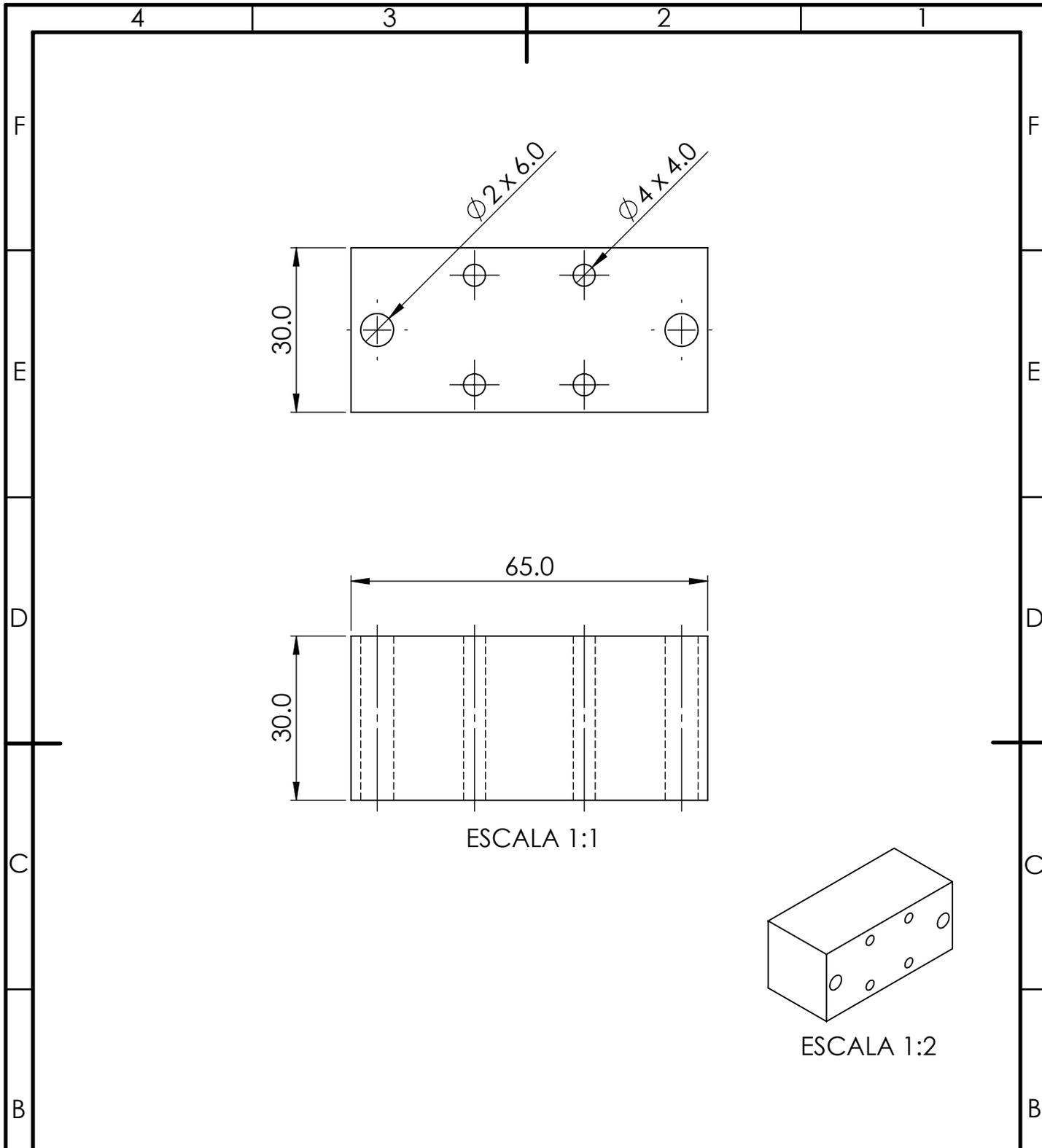
ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA  
CURSO: Proyecto Final de Graduación

REVISIÓN:  
**A**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: <b>N8</b>
DIBUJ.	O.Velez		18/12/20	MATERIAL: AISI 304
VERIF.	XXXXX		d/m/año	
APROB.	XXXXX		d/m/año	
FABR.	XXXXX		d/m/año	

PARTE:  
ADAPTADOR PARA PINZAS DE CORTE

SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.1 .X ±0.05 .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±0.1°	TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO:	ESCALA: indicada	FORMATO ANSI A
	PESO: gramos		UNIDADES: mm	HOJA 13 DE 14	



ESCALA 1:1

ESCALA 1:2

**TEC** | TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO: Proyecto Final de Graduación

**A**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	PARTE: ADAPTADOR PARA ALIMENTADOR DE CABLE
DIBUJ.	O.Velez		18/12/20	N8	
VERIF.	XXXXX		d/m/año	MATERIAL:	
APROB.	XXXXX		d/m/año	AISI 304	
FABR.	XXXXX		d/m/año		

SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.1 .X ±0.05 .XX ± .XXX ±	TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO:	ESCALA: indicada	FORMATO ANSI A
	ANGULAR: ±0.1°	PESO: gramos	UNIDADES: mm	HOJA 14 DE 14	