

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Área Académica de Ingeniería Mecatrónica



**Diseño de prototipo de dispensador programable para el proceso de soldadura
brazing en la sección de hornos de la empresa Cooper Standard.**

**Informe de proyecto de graduación para optar por el título de Ingeniero en
Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura**

José Mario Castro Vásquez

2014089477

Cartago, noviembre de 2019

Declaratoria de Autenticidad

Declaro que el presente avance de Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios, así como del asesoramiento técnico de miembros de la empresa Cooper Standard.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo completa responsabilidad sobre el trabajo realizado y por el correspondiente contenido del avance generado.

Cartago, noviembre 2019

José Mario Castro Vásquez

Céd: 2-0752-0235

Acta de aprobación

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

El Profesor Asesor, da fe de que el presente Proyecto de Graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Carrera de 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: José Mario Castro Vásquez

Nombre del Proyecto: Diseño de prototipo de dispensador programable para el proceso de soldadura *brazing* en la sección de hornos de la empresa Cooper Standard.



Ing. Roger Meléndez Poltronieri

Profesor Asesor

Cartago, 25 de noviembre de 2019

Acta de evaluación

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

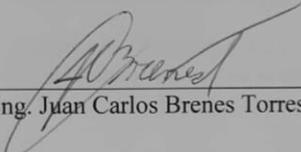
PROYECTO DE GRADUACIÓN
Jurado Evaluador
Acta de Evaluación

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.

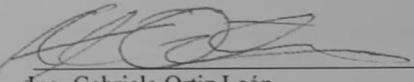
Estudiante: José Mario Castro Vásquez

Proyecto: Diseño de prototipo de dispensador programable para el proceso de soldadura *brazing* en la sección de hornos de la empresa Cooper Standard.

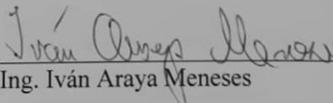
Miembros del Jurado


Ing. Juan Carlos Brenes Torres

Jurado


Ing. Gabriela Ortiz León

Jurado


Ing. Iván Araya Meneses

Jurado

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 noviembre de 2019

Resumen

El principal objetivo de este documento es desarrollar las diferentes etapas que permitieron realizar el diseño de un dispositivo dispensador de soldadura en la empresa transnacional *Cooper Standard*, y abarca aspectos como lo son el entorno del proyecto, la definición del problema, los objetivos planteados, la realización de un diagnóstico del proceso actual empleando la metodología de diseño de experimentos DoE así como el diseño tanto del mecanismo de dispensado como de la lógica programática para controlar y monitorizar el proceso de aplicación de soldadura.

El dispositivo fue diseñado basándose siempre en la implementación de diseño en ingeniería, debido al principio abierto de un problema de diseño y a la naturaleza iterativa que representan. Con base a los principios de dicha metodología se diseñó el dispositivo dispensador de soldadura, basándose en el principio mecánico de tornillo de potencia para convertir movimientos rotacionales a movimientos lineales y mediante el control de un motor a pasos.

Se creó un prototipo que permitió validar el funcionamiento del sistema, obteniendo resultados satisfactorios según la problemática encontrada en la empresa y las especificaciones definidas. Además de esto, se desarrolló toda la lógica programática para controlar el sistema del prototipo dispensador, acompañado de un sistema de monitoreo para definir las cantidades de soldadura que se necesitan depositar según el número de pieza que se desee tratar en la empresa, enfocándose en dos números de pieza en específico.

Se concluye que el sistema diseñado permite realizar depósitos de alta precisión de soldadura, en el rango de los miligramos, atacando directamente la problemática de repetibilidad en la aplicación de soldadura y mejorando la ergonomía del proceso.

Palabras clave: *Dispensador soldadura, diseño en ingeniería, soldadura brazing, dosificador programable, sistema monitorización, tornillo de potencia, tornillo sin fin, motores a pasos, VAN, TIR, IR.*

Abstract

The main objective of the present document is to detail the different stages developed in order to design a dispensing solution, specifically a soldering paste dispensing system for the transnational company Cooper Standard. These stages cover main points; from the project environment, the problem definition, the stated objectives, the diagnostic of the current productive process employing Design of Experiments methodology, as well as the design of the dispensing mechanism and the programming logic behind its control and the monitoring of the solder paste applying process.

The device was designed from the ground up employing the engineering design principle, mostly because of the open-ended nature of design problems and their iterative nature. Taking foundation on said methodology the design of the dispensing device was developed, utilizing concepts like the power screw in order to convert a rotary motion into a linear motion while controlling a stepper motor.

A prototype was manufactured in order to validate the systems operation, accomplishing satisfactory results according to the development specs as well as the problem definition. As stated before, the programmatic logic was developed in order to control the dispensing prototype system, alongside a monitoring program in which one can define the necessary amounts of solder paste according to the part number treated in the company, while focusing in two part numbers specifically.

In the end, the designed system is capable of dispensing high precision solder deposits, in the range of milligrams, directly attacking the problem of repeatability in the welding application and improving ergonomics of said application.

Keywords: *Welding dispenser, engineering design, welding, programmable dosing, monitoring system, power screw, worm, stepper motors, VAN, TIR, IR.*

Dedicatoria

El trabajo realizado se lo dedico a mis padres, a mi hermana, a mi familia cuyo apoyo incondicional es de las razones por las que llegué a este punto, y a mis amigos y colegas que acompañaron en todo el proceso para llegar hasta aquí.

Agradecimiento

Quiero agradecer a mi familia por todo el apoyo brindado en lo largo del desarrollo de mi carrera universitaria, también a todos los compañeros, profesores y personas que formaron parte de dicho proceso. Agradecimientos también para mi profesor asesor por el apoyo en el desarrollo del proyecto bajo su tutela y a Cooper Standard por la oportunidad de desarrollar el proyecto de graduación en su empresa.

Índice General

Declaratoria de Autenticidad	2
Acta de aprobación	3
Acta de evaluación.....	4
Resumen.....	5
Abstract.....	6
Dedicatoria	7
Agradecimiento	8
Índice General.....	9
Índice de figuras.....	12
Índice de tablas	13
1. Capítulo Introducción	15
1.1 Entorno del proyecto.....	15
1.2 Definición del problema	16
1.2.1 Generalidades	16
1.2.2 Justificación.....	17
1.2.3 Síntesis del problema	18
1.3 Enfoque de la solución.....	18
1.4 Objetivos.....	20
1.4.1 Objetivo General.....	20
1.4.2 Objetivos Específicos	20
2. Marco Teórico.....	21
2.1 Norma IATF 16949:2016.....	21
2.2 Proceso de soldadura <i>brazing</i>	22
2.2.1 Cálculos teóricos para cantidad de soldadura	23
2.3 Métodos de diagnóstico	25
2.3.1 Términos estadísticos.....	26
2.4 Proceso de diseño en ingeniería.....	28
2.4.1 Etapas del proceso de diseño	28
2.4.1.1 Definir el problema	29

2.4.1.2	Recopilar información pertinente:	29
2.4.1.3	Generar múltiples soluciones.....	30
2.4.1.4	Analizar y seleccionar una solución	30
2.4.1.5	Probar y validar la solución	30
2.5	Dispensación de pasta de soldadura	31
2.5.1	Sistema de aplicación neumático por válvula y presión del aire.....	31
2.5.2	Sistema por presión mecánica	32
2.5.3	<i>Auger Valve</i> o válvulas de barrena	33
2.6	Principios mecánicos	34
2.6.1	Cargas y esfuerzo mecánico	35
2.6.2	Normas y definiciones de tornillos de potencia y roscas	36
2.6.3	Motores a pasos	40
2.6.3.1	Principios de funcionamiento de motores a pasos	40
2.6.3.2	Motores unipolares.....	42
A.	Secuencia Normal	43
B.	Secuencia tipo wave drive.....	44
C.	Secuencia de medio paso	45
2.6.3.3	Motores bipolares.....	46
2.6.3.4	Controladores para motor a pasos.....	47
2.7	Diseño programático	48
2.7.1	Sistemas de control	48
2.7.2	Controladores	49
2.7.2.1	Sistema Operativo (OS).....	50
2.7.2.2	Lenguajes de programación.....	51
2.7.3	Sistema de monitorización e interfaz	52
2.8	Indicadores económicos	54
2.8.1	Valor Actual Neto (VAN)	55
2.8.2	Tasa Interna de Rentabilidad (TIR)	55
2.8.3	Índice de Rentabilidad (IR)	56
3.	Marco Metodológico.....	56
3.1	Diagnóstico	57

3.1.1	Delimitación de problema de estudio.....	57
3.1.2	Selección de variable respuesta.....	58
3.1.3	Definición de factores a investigar.....	58
3.1.4	Determinación de niveles para factores de tratamiento.....	59
3.1.5	Planeación del trabajo experimental.....	59
3.1.6	Ejecución del experimento.....	61
3.1.7	Análisis estadístico, interpretación de resultados, control y conclusiones.....	64
3.2	Diseño del mecanismo dispensador	64
3.2.1	Programa de modelado 3D.....	69
3.3	Diseño programático	69
3.3.1	Módulos y funciones de programación utilizadas	71
3.3.1.1	Instrucciones de temporizado o <i>timing</i>	71
3.3.1.2	Instrucciones de conteo o <i>counting</i>	72
4.	Marco Analítico	73
4.1	Análisis del diagnóstico.....	74
4.2	Estructura mecánica del dispensador	82
4.3	Programa de control de dosificación.....	88
4.3.1	Narrativa de control	91
4.4	Validación del sistema	92
4.4.1	Dispensador de soldadura.....	92
4.4.2	Validación programa de control y monitoreo para dosificador	98
4.5	Análisis económico	100
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	103
5.1	Conclusiones	103
	Conclusiones objetivo específico 1.....	103
	Conclusiones objetivo específico 2.....	103
	Conclusiones objetivo específico 3.....	104
	Conclusiones objetivo específico 4.....	104
5.2	Recomendaciones	104
	Al Departamento de Ingeniería de Cooper Standard	104
6.	Bibliografía	106

7.	Apéndices	110
7.1	Especificaciones de elementos roscados para diseño.....	110
7.2	Factores de conversión de unidades	112
8.	Anexos	114
8.1	Flujos de efectivo del proyecto.....	114

Índice de figuras

Figura 1.	Diagrama de bloques general del proyecto.	19
Figura 2.	Formas de aplicación de calor para el método de soldadura brazing.	22
Figura 3.	Proceso de brazing en horno continuo.	23
Figura 4.	Cálculo de masa de pasta de soldadura para unión de tubos.....	24
Figura 5.	Modelo de la metodología de aplicación para DoE.	26
Figura 6.	Etapas del proceso iterativo de diseño ingenieril.	29
Figura 7.	Sistema de aplicación por principio neumático.....	32
Figura 8.	Sistema de aplicación por principio empuje mecánico.	33
Figura 9.	Esquema general de dispositivo para aplicación mediante Auger Valve.	34
Figura 10.	Componentes del esfuerzo sobre la superficie normal a la dirección x.	36
Figura 11.	Terminología para las roscas de tornillo.....	37
Figura 12.	Representación de una parte de tornillo de potencia.	39
Figura 13.	Rotor de un motor a pasos de imán permanente	41
Figura 14.	Estator de 4 bobinas de un motor a pasos de imán permanente.	42
Figura 15.	Diagrama de cableado para motor a pasos unipolar de 6 cables.....	42
Figura 16.	Diagrama de cableado para motor a pasos bipolar de 4 cables.....	46
Figura 17.	Arreglo para puente H.	47
Figura 18.	Ciclo de funcionamiento típico de un PLC.....	51
Figura 19.	Ejemplo de utilización de una interfaz HMI.....	53
Figura 20.	Balanza analítica empleada para la medición de masa de pasta de soldadura.	60
Figura 21.	Piezas 6615 tratadas en horno de soldadura.	61
Figura 22.	Piezas 4768 tratadas en horno de soldadura.	61
Figura 23.	Medición experimental de masa para la pieza 4768.	62
Figura 24.	Identificación de piezas para ejecución de pruebas.	63
Figura 25.	Diagrama de flujo del dosificador.	70
Figura 26.	Instrucciones de temporizador.	72
Figura 27.	Instrucciones de contador.	73

Figura 28. Diagrama de Pareto para el análisis de significancia de factores para 6615.	76
Figura 29. Resultados obtenidos según nivel de factores para 6615.	77
Figura 30. Interacción entre factores y respuesta obtenida para 6615.	77
Figura 31. Diagrama de Pareto para el análisis de significancia de factores para 4768.	80
Figura 32. Resultados obtenidos según nivel de factores para 4768.	81
Figura 33. Interacción entre factores y respuesta obtenida para 4768.	81
Figura 34. Representación del volumen de la jeringa de dispensado.	85
Figura 35. Diseño de prototipo dispensador programable.	87
Figura 36. Diseño de prototipo dispensador programable.	87
Figura 37. Conexión para realizar control de motor a pasos con driver DRV8825.	89
Figura 38. Prototipo dispensador de soldadura.	92
Figura 39. Pruebas de dosificación del prototipo.	93
Figura 40. Gráfica de control para resolución de aplicación de soldadura del prototipo dispensador.	95
Figura 41. Preparación de muestras para prueba de validación del prototipo dispensador.	95
Figura 42. (a) Pruebas para validación prototipo dispensador. (b) Medición de muestras para validación prototipo dispensador.	96
Figura 43. Pantalla inicial sistema monitoreo dosificadora.	99
Figura 44. Pantalla de selección de pieza.	99
Figura 45. Pantalla donde se fijan los parámetros del PLC además de la lectura del contador para número de pieza 6615.	100
Figura 46. Indicadores económicos resultantes del proyecto.	102

Índice de tablas

Tabla 1. Secuencia normal de pasos para motores unipolares.	43
Tabla 2. Secuencia wave drive de pasos para motores unipolares.	44
Tabla 3. Secuencia de medio paso para motores unipolares.	45
Tabla 4. Secuencia para manejar motores bipolares a paso completo.	46
Tabla 5. Masa de soldadura aplicada en pieza 6615.	62
Tabla 6. Masa de soldadura aplicada en pieza 4768.	63
Tabla 7. Tabla comparativa para alternativas de diseño.	65
Tabla 8. Valores para los parámetros de elección de diseño.	66
Tabla 9. Listado de componentes para la elaboración de un prototipo de dispensador basado en el principio neumático.	67

Tabla 10. Listado de componentes para la elaboración de un prototipo de dispensador basado en el principio mecánico.	67
Tabla 11. Tabla morfológica para elección de diseño del dispensador.	68
Tabla 12. Resumen del diseño factorial de múltiples niveles 6615.....	74
Tabla 13. Información de los factores 6615.	74
Tabla 14. Análisis de Varianza 6615.....	75
Tabla 15. Resumen del diseño factorial de múltiples niveles 4768.....	78
Tabla 16. Información de los factores 4768.	78
Tabla 17. Análisis de Varianza 4768.....	79
Tabla 18. Asignación de variables en el PLC.	90
Tabla 19. Resolución práctica del prototipo dispensador.....	94
Tabla 20. Resultados prueba de validación del prototipo.	96
Tabla 21. Diámetros y áreas de roscas métricas de paso grueso y fino*.	110
Tabla 22. Diámetros y áreas de roscas unificadas de tornillo UNC y UNF*.....	111
Tabla 23. Factores de conversión de unidades.	112
Tabla 24. Constantes físicas de materiales.	113
Tabla 25. Coeficientes de fricción f de pares roscados.....	113
Tabla 26. Información general y costos directos asociados al proyecto	114
Tabla 27. Costos indirectos del proyecto y total de inversión	115
Tabla 28. Flujo neto de efectivo del proyecto	115

1. Capítulo Introducción

En esta sección del documento se detallarán los temas del entorno del proyecto y de la empresa en la que se llevó a cabo, la definición del problema, además del enfoque de solución y los objetivos planteados a partir de dicha problemática, con el fin de generar una perspectiva general del proyecto en sí, además, de la institución donde fue realizado.

1.1 Entorno del proyecto.

Hutchings Automotive Products (HAP), conocida originalmente como *S&H Automotive Products*, es una empresa multinacional fundada en Estados Unidos de América en el año 1986, por Jack Hutchings en una pequeña tienda en Pontiac, en el estado de Michigan. La empresa se dedicaba a manufacturar ensambles de tuberías, y vendría a marcar su dirección por los siguientes 50 años. Con el transcurso de los años, se consolidó como una de las principales suplidoras de conjuntos de tubos y mangueras de la más alta calidad, ofreciendo precios competitivos, además de la previsión en el desarrollo de productos de aluminio los han colocado como un líder en la industria de productos tubulares de aluminio de calidad, convirtiéndose de esa manera en líder de la industria automotriz y siendo galardonada por empresas como *General Motors* (GM) como empresa suplidora del año en 1996 así como en el 2008. (*Hutching Automotive Products*, 2019)

HAP comenzó a abrir sus puertas y establecerse en el mercado internacional en la década de los 90's abriendo instalaciones en E.E.U.U, México, Canadá e inclusive el Reino Unido, sin embargo, no fue hasta el año 2005 que abrió sus puertas en Costa Rica en la zona franca industrial ubicada en Cartago, donde se fabrican partes automotrices incluyendo partes de motor, de aires acondicionados (*air-conditioned* o *A/C*) y de la unidad de calentamiento, utilizando la más alta tecnología de proceso de fabricación, como tubo de corte, conformado de extremos, doblado de tubos (doblado de potencia, mano doblado y *Computer Numerical Control* - CNC), soldadura *brazing* o soldadura fuerte, soldadura, engaste y corrector de fugas. (*Hutching Automotive Products*, 2019)

Recientemente, a finales del 2018, HAP fue adquirida y asociada a la empresa transnacional Cooper Standard (Hutching Automotive Products, 2019), fundada igualmente en E.E.U.U. que posee la tradición de brindar soluciones innovadoras en el ámbito automovilístico, sobre sistemas de sellado, soluciones de administración de combustible y sistemas de frenado, así como sistemas de transmisión de fluidos. Se ha convertido en una empresa líder de abastecimiento de sistemas y componentes para la industria automovilística a nivel global con más de 32 000 empleados y operación en 21 países alrededor del mundo, galardonada los últimos dos años como empresa suplidora del año por parte de General Motors (GM). (Cooper Standard, 2019)

Actualmente se desarrollan todo tipo de tuberías para el trasiego de aceite, agua y aire para diferentes sistemas automotrices. El presente proyecto fue desarrollado en la sección de hornos de la empresa, específicamente en el proceso de unión de piezas mediante *brazing* o soldadura fuerte, en el cual se lleva a cabo la unión de metales por medio del uso de calor y de un metal de aporte basándose en el principio de capilaridad.

Se busca realizar una mejora en la aplicación de las pastas de soldadura en las piezas tratadas por la empresa, a las cuales se les aplica la soldadura previamente y son pasadas por hornos que se encargan de realizar el proceso de *brazing*, finalmente las piezas se obtienen soldadas al final del horno y se procede a realizar una inspección de calidad de estas.

1.2 Definición del problema

1.2.1 Generalidades

Primeramente, es necesario describir el método de aplicación de pasta de soldadura utilizada en el proceso actual, de esta manera se pueden enfocar diferentes causas de la problemática actual. El procedimiento actual se realiza de dos maneras, con una aplicación manual por medio de botellas plásticas con aberturas para el depósito de la soldadura, este equipo resulta rudimentario para el procedimiento y las jeringas o aberturas de la aplicación manual normalmente se llegan a estancar con la pasta de soldadura, al punto que es necesario desechar el envase y conseguir nuevos para su

aplicación. El otro método de aplicación se realiza con una máquina dispensadora de alta precisión Nordson EFD Ultimius I (Nordson EFD, 2019), la cual es accionada mediante un pedal operado por los usuarios que aplican la pasta de soldadura, se deben realizar calibraciones manuales mediante perillas para definir valores de presión deseados en la aplicación.

A partir de estos puntos, surgen problemáticas como la inexactitud o variación en el procedimiento manual debido la aplicación en exceso, o bien, uso insuficiente de soldadura que puede provocar que las piezas tratadas presenten errores una vez finalizado el proceso de *brazing* y que conlleva a su rechazo en la inspección de calidad. Otro aspecto importante es la fatiga de los usuarios que emplean el método manual, lo cual es un factor que atribuye a la variación en la aplicación de la soldadura.

1.2.2 Justificación

Debido al creciente mercado y competencia emergente en la realidad nacional, la búsqueda de soluciones eficientes es cada vez más esencial para mantener la competitividad en la actualidad. Es por esto que se propone un sistema capaz de aliviar diferentes problemas que provocan pérdidas en la empresa, debido a que el proceso de soldadura fuerte es utilizado constantemente, los hornos son utilizados en tres turnos diferentes por lo que la mayoría del tiempo se encuentran en funcionamiento. Además, este es un proceso esencial de la empresa, donde se llegan a tratar aproximadamente 55 piezas o modelos diferentes, cada uno con su propio método de aplicación e inclusive algunas de estas piezas repiten el proceso dos veces.

La realización de un sistema de automatización de la dosificación en la línea de producción de las piezas tratadas en la empresa para la soldadura tipo *brazing*, permitirá acortar tiempos de producción e incrementar la eficiencia, así como establecer un procedimiento que disminuya los errores tanto en el mismo proceso de aplicación, como en el mantenimiento de la maquinaria utilizada, y de esta manera crear oportunidades para el mejoramiento de la empresa, que mantenga su relevancia como una de las principales productoras de piezas automotrices a nivel internacional, disminuyendo a su vez la cantidad de piezas que no cumplen con los estándares de calidad y que deben de

ser tratadas en una etapa extra de corrección lo que implica reprocesos y por ende incremento de costos para la empresa.

1.2.3 Síntesis del problema

La escasez de un sistema automatizado para la aplicación de pasta de soldadura en el proceso de soldadura fuerte o *brazing*, provocan pérdidas en la productividad de la empresa, reflejado en la obtención de piezas que no cumplen los estándares de calidad establecidos en el proceso de inspección, debido a causas como el faltante o sobre aplicación de material de soldadura, para llevar a cabo el proceso de una manera efectiva, además de la problemática de ergonomía y variación en la aplicación manual debido a factores como fatiga del usuario o lesiones por uso extenso, por ejemplo.

1.3 Enfoque de la solución

En primera instancia, se propuso la realización de un diagnóstico formal y extenso de los diferentes componentes, procedimientos y maquinaria utilizada en el proceso de aplicación de pasta de soldadura, esto para detallar de manera precisa el sistema actualmente utilizado y encontrar factores claves que pudiesen ser mejorados implementando diseños mecatrónicos, generando de esta manera un reporte de pros y contras del procedimiento actual, así como para poder definir las variables que afectan la aplicación de la soldadura.

Una vez terminado el estudio del mecanismo, se procedió a la realización de un diseño apoyándose en la metodología de diseño en ingeniería, apoyándose de la documentación presente en la empresa para efectuar la aplicación de la pasta de soldadura, así como una investigación de fuentes externas sobre posibles soluciones al método de aplicación de la pasta. Se utilizó *software CAD* que permite realizar planos de elementos generados en el proceso de diseño.

Seguidamente, se realizó toda la parte programática para controlar el proceso, que permita establecer variables para una aplicación efectiva de la pasta de soldadura, y de esta manera establecer valores fijos de cantidad de material utilizado en la aplicación según el número de pieza y etapa específica que se desea efectuar.

Finalmente, se diseñó un sistema de monitorización tipo HMI, que permita al usuario seleccionar el número de parte, así como el proceso que se desea realizar, se planteó un accionador que permite dar inicio al proceso de aplicación, paso a paso. Además, se busca que este sistema pueda usarse como retroalimentación en la aplicación de la soldadura, es decir, si era necesario realizar tres cordones de soldaduras y sólo se realizaron dos, advertir al usuario acerca del percance.

En la Figura 1 se muestra la propuesta de los bloques principales que se desarrollaron a lo largo de la ejecución del proyecto.



Figura 1. Diagrama de bloques general del proyecto.

Fuente: *elaboración propia.*

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de monitorización y dosificación automático del proceso de aplicación de soldadura *brazing* para partes manufacturadas en la sección de hornos de la empresa Cooper Standard.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar el proceso productivo y equipo actual usado en la aplicación de soldadura para el proceso de *brazing* en horno continuo.

Entregable: Documento que dispone de los pros y contras de los recursos actuales disponibles, así como del procedimiento utilizado en la aplicación de soldadura.

- Generar el diseño del mecanismo para la aplicación de soldadura que permita estandarizar dicho proceso.

Entregable: Documentación de selección y creación de una propuesta de diseño que cumpla con las mejoras necesarias definidas para atacar la problemática del proceso actual.

- Establecer la lógica de programación necesaria para la automatización del proceso de aplicación de soldadura, así como la monitorización en tiempo real según la cantidad necesitada por pieza.

Entregable: Programación y sistema de monitorización de tipo HMI para facilitar el control del proceso.

- Validar la integración del sistema completo conjunto mecánico, programático y de monitorización.

Entregable: Simulaciones y/o pruebas de concepto que constaten el funcionamiento propuesto por el sistema completo de dispensación de soldadura.

2. Marco Teórico

En este capítulo se plantean las bases teóricas atinentes a los diferentes conceptos y elementos que fundamentan el proyecto en las diferentes áreas que este abordará. En este sentido, se tratarán conceptos respecto a lo que es la soldadura tipo *brazing* específicamente en hornos continuos, el diagnóstico y metodologías de aplicación, bases conceptuales de diseño ingenieril, tanto para su aplicación en el desarrollo mecánico como programático.

2.1 Norma IATF 16949:2016

La norma IATF 16949:2016, titulada “*Quality management system requirements for automotive production and relevant service part organizations*” se basa en la norma ISO 9001:2015 “*Quality management systems — Requirements*” y fue publicada en octubre de 2016. Esta norma une estándares de todo el mundo, sirviendo como base para la evaluación y certificación de procesos industriales automotrices establecidos por la *International Automotive Task Force (IATF)*, normalmente se abrevia la norma como QMS (*Quality Management System*). La empresa *Cooper Standard* rige sus operaciones bajo esta normativa, que dicta entre otros aspectos, los requerimientos en las siguientes áreas: (APB Consultants, 2017)

- El contexto de la organización, en términos del QMS planteado.
- Liderazgo y gerencia a nivel de responsabilidad corporativa.
- La planificación en niveles de auditoria, acciones preventivas y acciones correctivas para reparación y reproceso
- Apoyo para personas, infraestructura, ambiente de trabajo, monitorización y recursos de medición, conocimiento organizacional, comunicación, información documentada y competencia.
- Operación para aspectos de planificación y creación de un producto o servicio.
- Evaluación de rendimiento, incluyéndose satisfacción del cliente, auditorías internas, monitorización de productos y servicios, y revisión de gerencia.

- Mejora continua, con requisitos en no conformidades y acciones correctivas, solución de problemas, y validación de procesos.

Es esto por lo que el proyecto se desarrolló cobijado bajo los requerimientos presentes en dicha normativa, sobre todo tomando en cuenta los diferentes elementos para el desarrollo de actividades orientadas a la solución de problemas, es decir, a la mejora continua en los procesos y la validación de estos en la empresa.

2.2 Proceso de soldadura *brazing*

En el proceso de soldadura fuerte o *brazing*, los elementos por unir se llevan a una temperatura por encima de los 450 °C, aunque siempre por debajo del punto de fusión de los metales que se estén uniendo. El principio fundamental es el calentamiento extenso de los metales base hasta el punto donde el metal de aporte sea aplicado en el área de la junta y se derrita y esparza por acción capilar a través de dicha junta, uniéndose de esta manera las piezas del material base. (Lucas Mihaupt, 2014)

Existen diferentes métodos para llevar a cabo el proceso de soldadura *brazing*, entre ellos se encuentran soldadura por antorcha suplidada por un gas inflamable (a), por inducción eléctrica (b), horno continuo (c), por horno convencional (d) u horno al vacío (e). Dichos métodos se ejemplifican en la Figura 2. (Oerlikon Metco, n.d.)

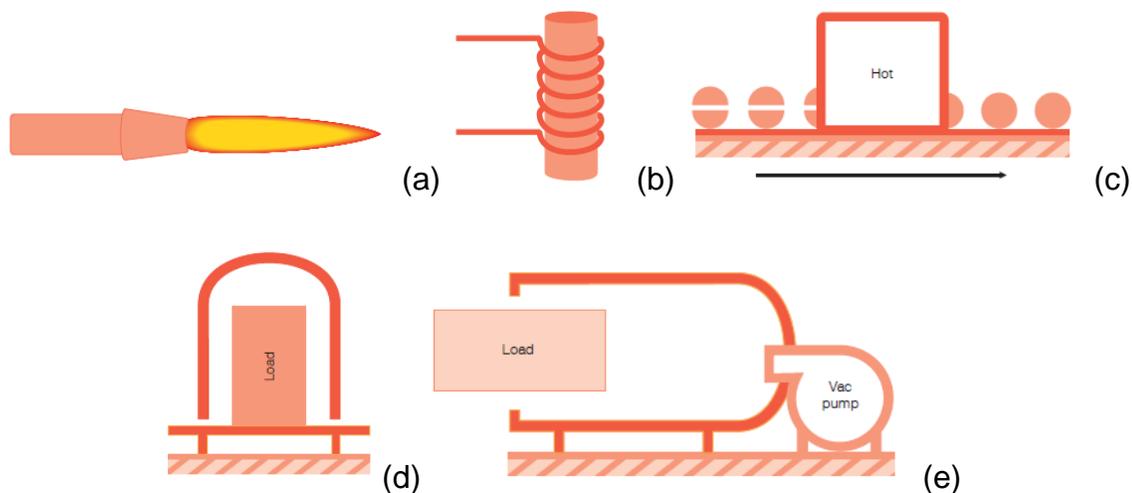


Figura 2. Formas de aplicación de calor para el método de soldadura *brazing*.
Fuente: (Oerlikon Metco, n.d.)

El proceso empleado en la empresa y al cual se hace énfasis en el desarrollo del proyecto es el de *brazing* en horno continuos. Este proceso presenta la particularidad de dividirse en diferentes zonas o subprocesos para llevar a cabo la unión de las piezas; las cuales son trasladadas por una banda transportadora a lo largo de las diferentes etapas de carga, precalentamiento, calentamiento donde la soldadura alcanza el punto de aleación por efecto de capilaridad y finalmente la etapa de enfriamiento y obtención de las piezas soldadas, cabe destacar que en este tipo de calentamiento no se utiliza fundente o *flux* debido a que se presenta una atmósfera controlada a lo largo del horno. Dicho proceso se aprecia en la Figura 3 donde se muestran las etapas principales de soldadura *brazing* mediante horno continuos. (Oerlikon Metco, n.d.)

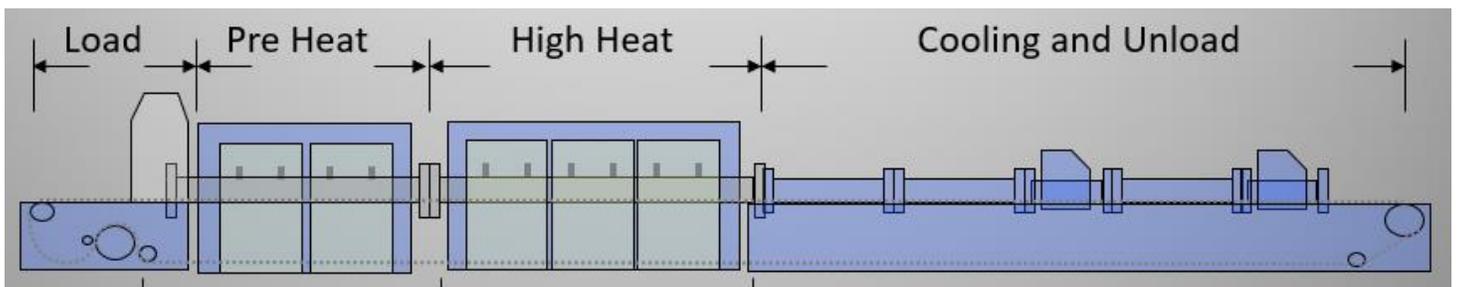


Figura 3. Proceso de *brazing* en horno continuo.

Fuente: (Abbott Furnace, 2018)

2.2.1 Cálculos teóricos para cantidad de soldadura

En cuanto al cálculo de las cantidades de soldadura necesarias para la unión según el diseño de esta, así como los diferentes materiales usados y la composición de la pasta en sí, se definen las variables para el cálculo: la distancia de superposición (L) y la brecha entre las piezas, el volumen de pasta necesaria para la unión (V_{br}), el porcentaje de metal presente en la pasta y la densidad de la pasta (ρ). A partir de estas variables es posible calcular la masa necesaria de pasta (m) utilizando las ecuaciones (1.1) y (1.2).

$$V_{br} = V_{exterior} - V_{interior} \quad (1.1)$$

$$m_{pasta} = \frac{V_{br} \cdot \rho_{pasta}}{\% \text{ de metal en la pasta}} \quad (1.2)$$

Se recomienda multiplicar la masa de pasta obtenida para la aplicación por un factor de 1,2 que permita asegurar un buen *fillet* o relleno en la unión por *brazing*. (Kymera International & Belman Melcor, 2019)

Estas ecuaciones son aplicables por ejemplo a uniones de tubo insertado en tubo, como se muestra en la Figura 4, y utilizado en los cálculos para las piezas analizadas en el proyecto.

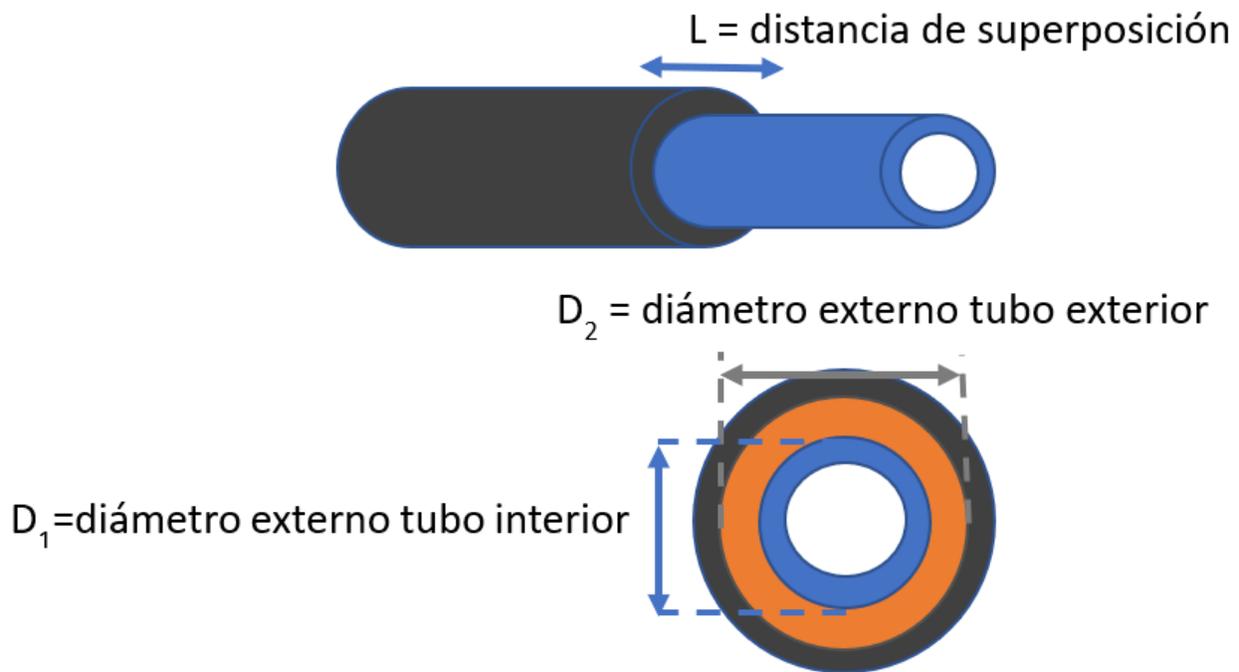


Figura 4. Cálculo de masa de pasta de soldadura para unión de tubos.

Fuente: (Kymera International & Belman Melcor, 2019)

Donde aplicando las ecuaciones (1.1) y (1.2) con los volúmenes presentados en la ecuación (1.3) se realizan los cálculos para los valores teóricos de cantidad de pasta de soldadura.

$$V = \pi \cdot L \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (1.3)$$

2.3 Métodos de diagnóstico

En el campo de la industria es frecuente hacer pruebas con la intención de resolver un problema o comprobar una idea o hipótesis para lograr mejoras o eliminar problemas en un proceso. La aplicación del Diseño de Experimentos o DoE por sus siglas en inglés, es de gran utilidad cuando se desea conocer el efecto que presentan distintas variables en una respuesta en específico, además de las relaciones presentes en dichas variables de interés y de esta manera realizar un análisis pertinente del proceso estudiado.

La elección de esta herramienta se debe principalmente a que a pesar de que la experimentación es una actividad frecuente en ingeniería, muchas veces se emplean herramientas o estrategias primitivas, con base en el ensayo y error; apelando a la experiencia o la intuición en lugar de seguir una planificación experimental adecuada que garantice una buena respuesta según la elaboración de pruebas para su posterior análisis. Aquí es donde el DoE se aplica como una herramienta robusta y eficiente para el diagnóstico en industrias de manufactura, (Tanco, Viles, Ilzarbe, & Álvarez, 2007) respaldándose en la estadística para medir el impacto de diferentes variables en un proceso de producción específico. Debido a lo anterior, se decidió implementar la herramienta en el proyecto, donde será de gran utilidad el diagnóstico de la línea productiva de soldadura fuerte o *brazing* de la empresa *Cooper Standard* en la sección de hornos.

Se utilizará la metodología descrita tanto en (Gutierrez & De la Vara, 2008) como en (Tanco et al., 2007) para definir los aspectos esenciales en la planificación, ejecución y análisis del DoE que permita atacar de manera eficaz uno de los objetivos específicos del proyecto en la sección de diagnóstico. En la Figura 5 se muestra un esquema general de la metodología.

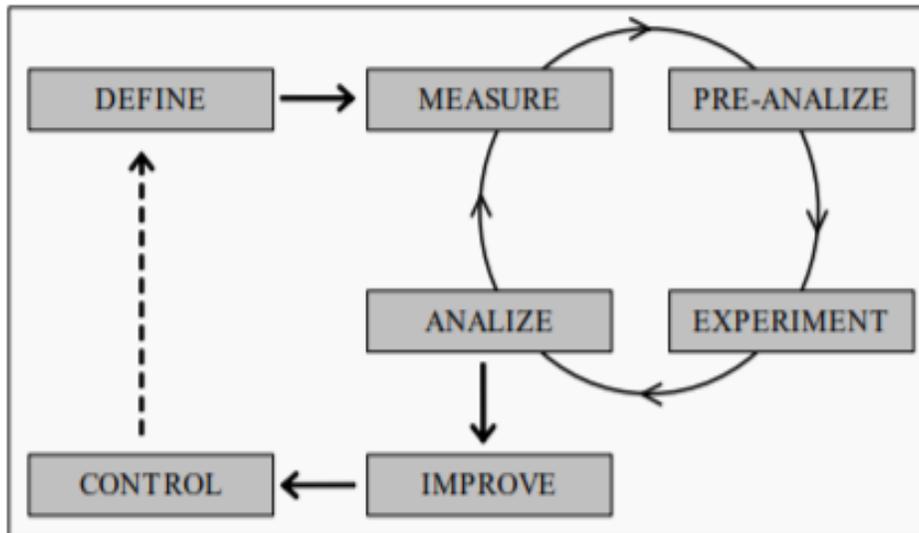


Figura 5. Modelo de la metodología de aplicación para DoE.

Fuente: (Tanco et al., 2007)

Los pasos principales para la planificación y elaboración de un DoE se enlistan a continuación, basándose en la metodología estudiada.

1. Delimitar el problema de estudio, así como el objetivo de realización del DoE.
2. Seleccionar la variable o factor respuesta que se desea analizar.
3. Definir los diferentes factores que se estudiarán en el diagnóstico.
4. Determinar los diferentes niveles para los factores de tratamiento definidos.
5. Planeación del trabajo experimental.
6. Ejecución de un plan piloto o bien del experimento.
7. Realizar el análisis estadístico, interpretación de resultados, control y conclusiones del experimento realizado. Además, proponer mejoras al experimento de ser necesario.

2.3.1 Términos estadísticos

Se definirán algunos conceptos básicos para poder analizar de una mejor manera los resultados obtenidos en el diagnóstico mediante DoE.

La inferencia estadística se refiere a la realización de afirmaciones válidas acerca de la población o proceso con base en la información contenida en una muestra, es decir,

tiene el objetivo de coadyuvar en la toma de decisiones. Por lo general se divide en estimaciones y pruebas de hipótesis, apoyándose en los datos estadísticos obtenidos de las observaciones realizadas en las muestras. (Gutierrez & De la Vara, 2008)

Ahora bien, con el fin de cumplir dicho objetivo de estudio, el investigador debe poseer ciertas creencias o hipótesis *a priori* que se deseen confirmar, de esta manera se puede definir una hipótesis estadística como aquella afirmación sobre los valores de los parámetros de una población o proceso, que resulta susceptible a probarse a partir de la información contenida en dicha población o proceso. Así, se define la hipótesis nula H_0 como aquella donde el supuesto se plantea como una igualdad y la estrategia a seguir para probar una hipótesis es suponer que dicha hipótesis nula es verdadera, en caso que sea rechazada por la evidencia de los datos se aceptará la hipótesis alternativa H_A . (Gutierrez & De la Vara, 2008)

En el proceso de prueba de hipótesis estadísticas, se deben tomar decisiones probabilísticas, por lo que existe riesgo de cometer un error tipo I o error tipo II. El primero se debe cuando se rechaza H_0 al ser verdadera, mientras que el error tipo II es cuando se acepta H_0 cuando esta es falsa. Se denotan con los símbolos alfa (α) y beta (β) respectivamente. (Gutierrez & De la Vara, 2008) A α también se le conoce como la significancia dada de la prueba, el valor más común utilizado es de $\alpha=0,05$ el cual indica un riesgo de 5% de concluir que existe una asociación entre la variable estudiada y la variable respuesta cuando no hay una asociación real, en el caso de análisis por DoE. (Minitab LLC, 2019)

Para analizar un diseño factorial en DoE, se deben analizar algunas salidas claves incluyendo el diagrama de Pareto, los valores p, los coeficientes utilizados, los estadísticos de resumen de modelo y las gráficas de residuo.

Mediante el diagrama de Pareto, es posible determinar de los efectos (tanto principales como de interacción) la magnitud relativa y la significancia estadística. La línea de significancia α marca el límite para determinar cuáles factores son estadísticamente significativos según su valor p, si $p \leq \alpha$ la asociación es estadísticamente

significativa, mientras que si $p > \alpha$ la asociación no es estadísticamente significativa. (Minitab LLC, 2019)

2.4 Proceso de diseño en ingeniería

El diseño ingenieril busca generar soluciones mediante la incorporación de tecnologías e invenciones creativas; es el proceso de materializar ideas abstractas en representaciones físicas, llámense productos o sistemas. De esta manera los diseños ingenieriles se pueden clasificar como dispositivos o sistemas creados para responder a necesidades o problemas encontrados por las personas, la actividad del diseño se da en un período determinado de tiempo y requiere de una metodología bien establecida.

Los problemas de diseño son usualmente más abiertos en definición y ejecución respecto a problemas de análisis, de esta manera las soluciones para problemas de diseño suelen ser más abiertas y requieren de una actividad de diseño cíclica o iterativa en su naturaleza a diferencia de una estructura secuencial para las soluciones de problemas analíticos. Con base en esto se establece una estructura general para la buena solución de problemas, con fases bien definidas. (Khandani, 2005)

Esta metodología engloba el proyecto desarrollado y forma la base con la que se abarca la realización de este.

2.4.1 Etapas del proceso de diseño

Como se mencionó, la naturaleza abierta de los problemas de diseño provoca que soluciones múltiples puedan responder a la problemática encontrada, o bien requerir de iteración en la generación de la solución. Se definen 5 pasos típicos para el desarrollo del proceso de diseño en ingeniería, enumerados a continuación y mostrados en la Figura 6.

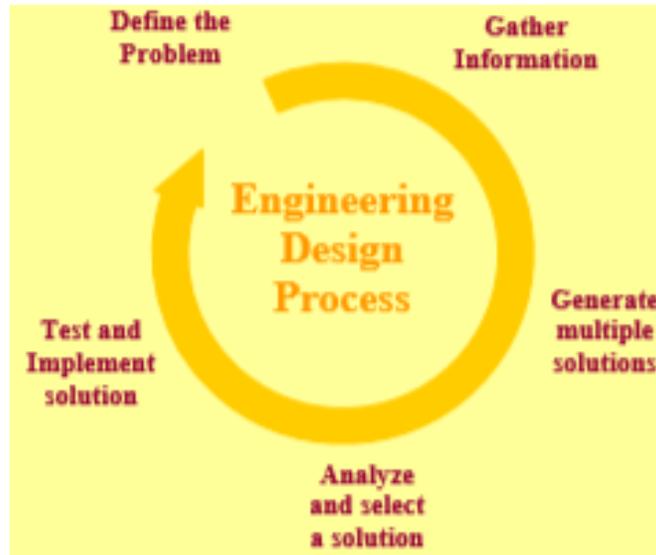


Figura 6. Etapas del proceso iterativo de diseño ingenieril.

Fuente: (Khandani, 2005)

2.4.1.1 Definir el problema

Se necesita identificar y establecer una necesidad, la cual puede ir evolucionando y desarrollándose conforme se entiende mejor el problema a tratar y su entorno, esta necesidad puede manifestarse como un nuevo producto, sistema o máquina que ataque directamente la problemática encontrada. Es a partir de la identificación de dicha necesidad que se formula un problema conciso y bien definido, sin ambigüedades en los términos para plantearlo, como se realizó en la sección 1.2 de definición del problema. Finalmente, en esta etapa se definen diferentes atributos necesarios para corroborar el funcionamiento de la solución planteada, basándose en conocimientos previos en el área del problema y ampliándose conforme se avanza en el desarrollo del diseño propuesto.

2.4.1.2 Recopilar información pertinente:

En esta etapa se busca adentrarse en el área específica del problema y recolectar toda la información disponible que permita abarcarlo de mejor manera y consecuentemente las propuestas de solución al mismo. Esta etapa puede revelar datos que lleven a una redefinición del problema, conforme a la naturaleza iterativa del proceso de diseño.

2.4.1.3 Generar múltiples soluciones

En la siguiente etapa del proceso de diseño se comienzan a generar ideas creativas para atacar directamente la problemática encontrada, se puede comenzar con soluciones existentes adaptarlas a la necesidad actual, encontrar fortalezas y deficiencias en dichas soluciones y enfocarse en el mejoramiento de estas. Además de esto se pueden combinar nuevas ideas, métodos y propuestas para producir una nueva solución única para el problema. En esta etapa resulta crítico ser abierto en la generación de ideas y estar dispuesto a tomar riesgos en las propuestas generadas en la lluvia de ideas.

2.4.1.4 Analizar y seleccionar una solución

Con las diferentes propuestas de solución generadas, el siguiente paso corresponde al análisis y evaluación de cada una de dichas soluciones, con base en los conocimientos técnicos del problema y utilizando herramientas que permitan definir cuál de las soluciones es la más adecuada para su implementación. El proceso de decisión debe de ser documentado y justificado de manera objetiva, un método comúnmente utilizado es la elaboración de tablas morfológicas que permiten calificar los diferentes diseños y compararlos con base en criterios y requerimientos críticos definidos para la solución del problema, de esta manera se especifica y justifica la selección de la mejor solución.

2.4.1.5 Probar y validar la solución

Representa una de las etapas más importantes dentro del proceso del diseño en general, la evaluación representa la manera de corroborar el funcionamiento exitoso del diseño propuesto, y se puede lograr con diferentes métodos de implementación como pruebas de concepto, prototipos, ingeniería concurrente, documentación del trabajo realizado. Además de esto pruebas y verificación son partes importantes del proceso de diseño y permiten encontrar puntos donde la solución potencial pueda tener problemas.

2.5 Dispensación de pasta de soldadura

En la actualidad, en la industria existen diversas maneras y métodos que se implementan para la dispensación de pasta de soldadura para la soldadura por *brazing*., Especialmente en la manufacturera como es el caso de Cooper Standard, algunos de los métodos utilizados son impresión por capas o plantillas “*stencil*”, aplicadores de tipo aerosol que pueden lograr capas con gruesos de 0,03 mm a 0,05 mm, revestimiento por rodillos para partes selectivas de piezas como lo son aletas flexibles o turbuladores, y dispensación. Este último es el método más utilizado para intercambiadores de calor como es el caso de las piezas tratadas en la empresa, y se ve ejemplificado en los métodos de dispensación que son utilizados en la empresa. (Höganäs AB, 2019) El tipo de material que se desea dispensar y sus propiedades son de suma importancia en la selección del método o bien mecanismo de dispensación.

Un aspecto del diseño que se debe tomar en cuenta es que no se pueden realizar depósitos con diámetros menores a aproximadamente 1,5 veces el tamaño del diámetro interior de la aguja o punta utilizada para dispensar el material, lo cual resulta de mucha importancia para lograr el depósito de cantidades específicas de pasta de soldadura. (Nordson EFD, 2003) (Integrated Dispensing Solutions Inc., 2019a)

Algunos de los métodos empleados en la industria se enumeran a continuación, tomando en cuenta los principios básicos que estos emplean para la aplicación de pasta de soldadura.

2.5.1 Sistema de aplicación neumático por válvula y presión del aire

Principio de deposición por aumento en la presión de aire, el tiempo en que se abre la válvula de entrada o se aplica aire presurizado determina la cantidad o volumen de pasta dispensada, además de esto se dispone de una segunda válvula de escape, la cual se encuentra normalmente cerrada en el momento de aplicar y al terminar la aplicación se acciona para abrir el paso del aire y funcionar como una especie de vacío para evitar derrames de pasta en la jeringa de aplicación. Se deben considerar aspectos como alimentación de aire presurizado, el controlador para las válvulas. Es un sistema

de dosificador muy semejante al utilizado actualmente en la empresa, se ejemplifica en la Figura 7.

Además, estos equipos son programables mediante un controlador externo por un puerto I/O disponibles en ambos dispensadores Ultimus I y Performus X de Nordson EFD. (Nordson EFD, 2019)(Nordson EFD, 2018)



Figura 7. Sistema de aplicación por principio neumático.

Fuente: (Kymera International & Belman Melcor, 2019)

2.5.2 Sistema por presión mecánica

Se empuja físicamente un émbolo a una distancia determinada que resulta en la cantidad de pasta entregada, similar al principio de una jeringa médica, puede utilizar un actuador tipo motor a pasos que pueda ser controlado. En este método la pasta nunca toca el mecanismo de dispensación y puede resultar más preciso que la aplicación por aire ya que se puede establecer una relación directa entre la acción del motor/émbolo con la cantidad de flujo de pasta de soldadura. Un esquema del sistema se muestra en la Figura 8.

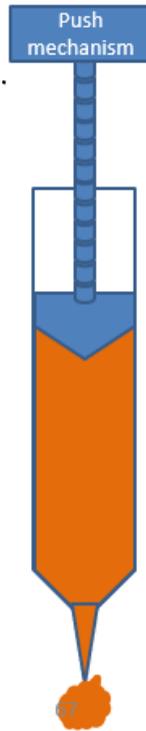


Figura 8. Sistema de aplicación por principio empuje mecánico.

Fuente: (Kymera International & Belman Melcor, 2019)

2.5.3 Auger Valve o válvulas de barrena

Es un dispositivo que combina las acciones neumática y mecánica para conseguir la dispensación de la pasta. Emplea un depósito de pasta alimentado siempre por aire a presión para facilitar su dispensado, además de usar el principio alimentación por tornillo accionado por un motor controlable para realizar la deposición de la pasta de soldadura. Puede llegar a ser muy preciso, pero a su vez muy costoso y se emplea principalmente en la industria electrónica.

Algunos de los principios importantes con este método de aplicación es que la presión se debe mantener constante, y la cantidad de soldadura dispensada se regula a partir de las roscas del tornillo, así como con la velocidad del motor. De esta manera se tiene que con mayor rosca se disminuye la salida, pero se aumenta la precisión de

cantidad dispensada y viceversa. Se muestra un sistema de este tipo en la Figura 9. (Jennings, 2017)

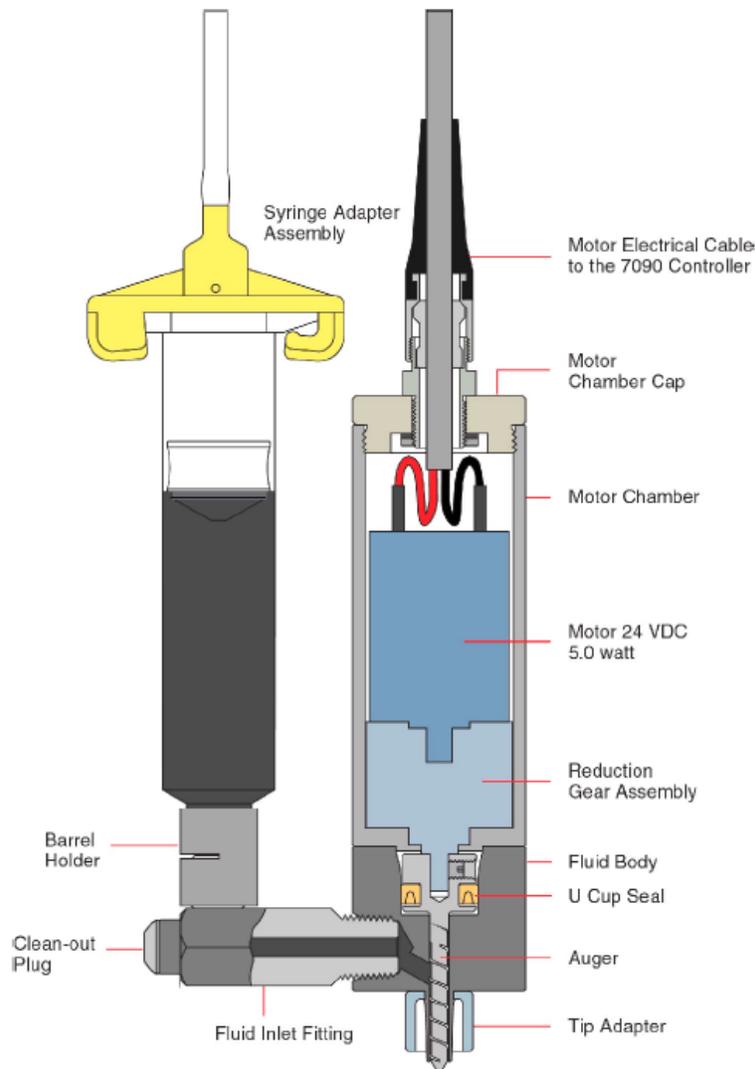


Figura 9. Esquema general de dispositivo para aplicación mediante Auger Valve.

Fuente: (Nordson EFD, 2003)

2.6 Principios mecánicos

En esta subsección se detallarán los diferentes principios de funcionamiento, terminología y relaciones existentes en los sistemas mecánicos o electromecánicos que se trataron como parte del desarrollo del proyecto.

2.6.1 Cargas y esfuerzo mecánico

Los componentes de un sistema mecánico transmiten fuerza y movimiento de un punto a otro, según esto se generan esfuerzos de los cuales es importante definir si la estructura en el proceso de diseño será capaz de soportar. Por tal motivo es importante la revisión de conceptos como equilibrio estático, esfuerzos y resistencia de los materiales a los cuales estará sometido el dispositivo.

Un sistema se encuentra en equilibrio estático cuando se encuentra en reposo (no posee movimiento) o bien se mueve a una velocidad constante, es decir, su aceleración es igual a cero. En el caso de que exista dicho equilibrio, la sumatoria de las fuerzas y momentos que actúan sobre el sistema se igualan a cero, como se muestran en las ecuaciones (2.1) y (2.2) respectivamente. (Budynas & Nisbett, 2009)

$$\sum F = 0 \quad (2.1)$$

$$\sum M = 0 \quad (2.2)$$

El esfuerzo se puede definir como la distribución de fuerza que actúa en un punto sobre la superficie que es única y tiene componentes en las direcciones normal y tangencial, a lo que se le conoce como esfuerzos normales y esfuerzos cortantes respectivamente. Los esfuerzos normales se identifican mediante el símbolo σ o sigma, mientras que los esfuerzos cortantes se identifican mediante el símbolo τ o tau. En el Sistema Internacional de Unidades o SI, se representa esfuerzo como Newton por metro cuadrado (N/m^2) lo cual es equivalente a un Pascal (P), para un esfuerzo normal uniformemente distribuido se define la ecuación (2.3) donde F representa la fuerza normal a la superficie con área A, y para un esfuerzo cortante uniformemente distribuido se define la ecuación (2.4) donde V representa la fuerza cortante a la superficie con área A. (Budynas & Nisbett, 2009)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (2.4)$$

Dichos esfuerzos muestran en la Figura 10.

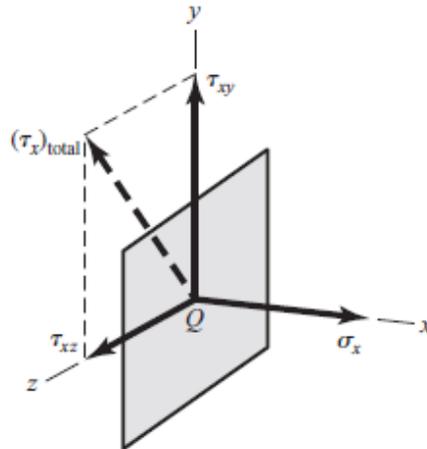


Figura 10. Componentes del esfuerzo sobre la superficie normal a la dirección x.

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2009)

2.6.2 Normas y definiciones de tornillos de potencia y roscas

A continuación, se desarrolla la terminología utilizada en roscas de tornillo, debido a que el tornillo de potencia funcionará como la base para el desarrollo del sistema dispensador mecánico. (Budynas & Nisbett, 2009) Los términos desarrollados en esta subsección se encuentran ejemplificados en la Figura 11.

El paso p , corresponde a la distancia entre dos cuerdas o hilos adyacentes, medida paralela al eje de las roscas. Los hilos se componen por una cresta que decae hacia dos valles, el del hilo anterior y el posterior. Por su parte la cresta corresponde al punto más elevado del hilo mientras que la raíz es la parte que forma el valle entre hilos. En el sistema inglés, el paso corresponde al recíproco de número de hilos por pulgada N .

El diámetro mayor d , corresponde al diámetro más grande presente en la rosca del tornillo, caso contrario con el diámetro menor o raíz d_r que indica el diámetro más

pequeño en la rosca del tornillo. A su vez, el diámetro de paso d_p es un diámetro teórico entre los diámetros menor y mayor.

El avance l es la distancia que se desplaza una tuerca en forma paralela al eje del tornillo cuando se da una vuelta a la misma, en el caso de las roscas simples, el avance resulta igual que al paso. Existen también roscas múltiples donde se tienen dos o más roscas cortadas lado a lado, en este tipo de rosca el avance resulta igual al doble del paso para roscas dobles o el triple del paso para roscas triples, y así sucesivamente. Todas las roscas funcionan con la regla de la mano derecha, es decir, giran hacia la derecha a menos que no se indique lo contrario.

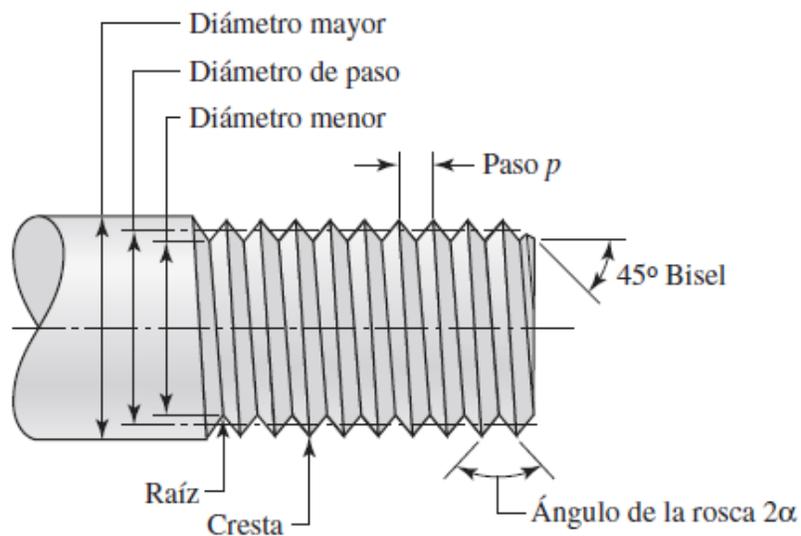


Figura 11. Terminología para las roscas de tornillo.

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2009)

Existen normas unificadas para la representación de tornillos y roscas, tanto en el sistema inglés por parte de la *American National Unified*, como en el SI (o roscas métricas). Para el sistema inglés se utiliza la designación UN (UNC para la serie gruesa y UNF para la serie fina) donde se especifica la rosca enunciando el diámetro mayor nominal, el número de rosca por pulgada y la serie de la rosca, por ejemplo 5/8 pulgada-18 UNC. Por su parte las roscas métricas son especificadas utilizando el diámetro y el

paso en milímetros, acompañados por una M que representa la clave de designación, por ejemplo, M12x1,75mm.

El tamaño de rosca se determina por el número de roscas en el sistema inglés, mientras que el paso se utiliza para tamaños métricos. En la sección de Apéndices, específicamente el subapartado 7.1 Especificaciones de elementos roscados para diseño, se encuentran las tablas que muestran datos importantes de gran utilidad cuando se deben especificar o diseñar partes roscadas.

En cuanto a los dispositivos de tornillos de potencia, se definen como maquinaria para cambiar el movimiento angular de un sistema a movimiento lineal, y por lo general, para transmitir potencia. Entre sus aplicaciones familiares se encuentran los tornillos de tornos, tornillos de prensas de banco, prensas de sujeción y gatos. (Budynas & Nisbett, 2009)

Para el desarrollo del proyecto, el mayor interés de la utilización de estos dispositivos es para la transformación del movimiento rotacional de un motor controlado, en un movimiento lineal del sistema de empuje de la pasta mediante un émbolo, por lo que es de gran importancia conocer los conceptos referentes al uso de estos elementos mecánicos.

En cuanto a los cálculos para el diseño de tornillos de potencia, se pueden realizar observaciones con base a la Figura 12.

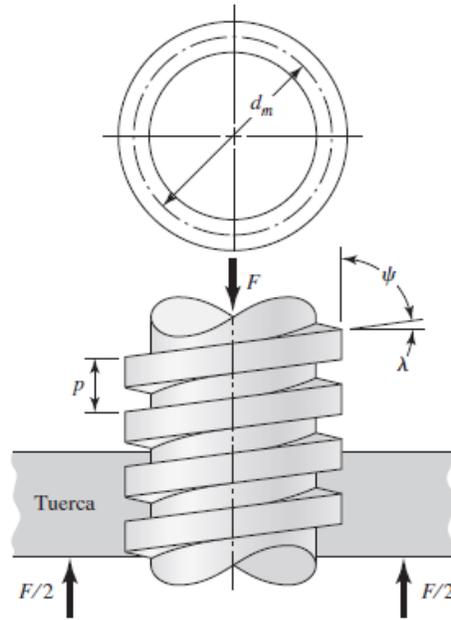


Figura 12. Representación de una parte de tornillo de potencia.

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2009)

Para asegurarse que el tornillo pueda levantar la carga, en este caso, el peso de la soldadura, se tiene la ecuación (2.5)

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi d_m}{\pi d_m - fl} \right) \quad (2.5)$$

Donde T_R representa el par de torsión para superar la fricción de la rosca y elevar la carga, F es la fuerza aplicada por la carga, d_m el diámetro medio del tornillo, l el avance y f el coeficiente de fricción entre la rosca y el tornillo.

A su vez, el diámetro medio del tornillo se puede calcular a partir de la ecuación (2.6) y el avance del tornillo se puede calcular mediante la ecuación (2.7)

$$d_m = d - \frac{p}{2} \quad (2.6)$$

$$l = p * \text{número de roscas} \quad (2.7)$$

En cuanto a los esfuerzos nominales en el cuerpo de tornillos de potencia, el esfuerzo cortante nominal se puede expresar mediante la ecuación (2.8)

$$\tau = \frac{16 T_R}{\pi d_r^3} \quad (2.8)$$

Por su parte, el esfuerzo axial nominal en el cuerpo por la carga F está indicado en la ecuación (2.9) (Budynas & Nisbett, 2009)

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{16 F}{\pi d_r^2} \quad (2.9)$$

2.6.3 Motores a pasos

Los motores a pasos o *stepper motors* poseen una amplia gama de aplicaciones; esto gracias a la gran precisión que poseen, que resulta además una de las características más determinantes para su elección en el desarrollo del proyecto. En este apartado se describirán los principios de funcionamiento general de los motores paso a paso, el manejo de las corrientes de las bobinas y el diseño de control para estos.

2.6.3.1 Principios de funcionamiento de motores a pasos

La gran precisión que poseen los motores a pasos se puede explicar debido a que poseen la cualidad especial de poderlos mover desde un paso hasta una secuencia determinada de pasos dependiendo de la cantidad de pulsos que se les aplique. Estos pasos pueden variar desde 90° hasta movimientos pequeños de 1,8° según la caracterización del motor y su resolución, requiriendo de esta manera una diferente cantidad de pasos para completar una revolución o 360°. Es por esto que este tipo de motores son muy utilizados, pueden moverse con alta precisión según la secuencia indicada por el usuario a través del controlador utilizado. (Hernández Bello & Ochoa Luna, 2004)

Existen dos variedades de motores a pasos según su construcción, de imán permanente y de reluctancia variable, también existen los motores híbridos que resultan indistinguible de los de imán permanente desde el punto de vista del controlador.

Los motores paso a paso de reluctancia variable no contienen imanes permanentes. El estator es similar a un motor de corriente continua de escobillas, sin embargo, el rotor sólo consta de hierro laminado. El par se produce como resultado de la atracción entre las bobinas y el rotor férrico. El rotor forma un circuito magnético con el polo del estator. La reluctancia de un circuito magnético es el equivalente magnético a la resistencia de un circuito eléctrico. Cuando el rotor está alineado con el estator el hueco entre ambos es muy pequeño y en este momento la reluctancia está al mínimo. La inductancia del bobinado también varía cuando el rotor gira. Cuando el rotor está fuera de la alineación, la inductancia es muy baja, y la corriente aumentará rápidamente. Cuando el rotor se alinea con el estator, la inductancia será muy grande. Esta es una de las dificultades de manejar un motor de esta clase. (González Fernández, 2002)

Por su parte, los motores paso a paso de imán permanente básicamente se encuentran constituidos por un rotor sobre el que se aplican distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras, bobinadas en el estator. Las bobinas forman parte del estator y el rotor es un imán permanente, toda la conmutación o excitación de las bobinas debe ser manejada externamente por un controlador. En la Figura 13 se muestra el rotor y en la Figura 14 se muestra el estator de 4 bobinas de un motor de imán permanente a pasos.



Figura 13. Rotor de un motor a pasos de imán permanente

Fuente: (González Fernández, 2002)

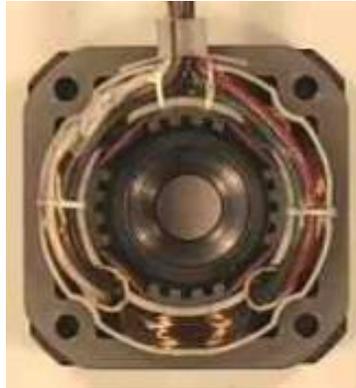


Figura 14. Estator de 4 bobinas de un motor a pasos de imán permanente.

Fuente: (González Fernández, 2002)

Este tipo de motor es de los más utilizados en sistemas de robótica y mecanismos de movimiento mecánico, y existen dos tipos principales: unipolares y bipolares, de los cuales se detallará a continuación (Bertomeu, Garcia, Gardonio, Gomez, & Granados, 2015)

2.6.3.2 Motores unipolares

Estos motores pueden tener de 5 a 8 cables de salida según su conexión interna, comúnmente se utilizan 4 cables para la recepción de pulsos e indicación de secuencia y duración de los pasos y los cables restantes para la alimentación del motor. (Hernández Bello & Ochoa Luna, 2004) En la Figura 15 se muestra el diagrama de conexión para uno de 6 cables.

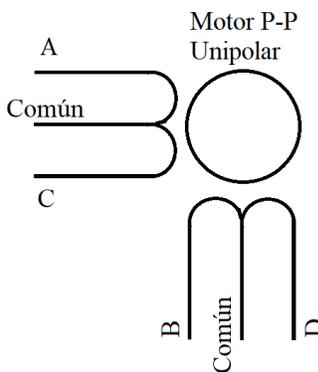


Figura 15. Diagrama de cableado para motor a pasos unipolar de 6 cables.

Fuente: (Bertomeu et al., 2015)

El control de estos motores se realiza mediante secuencias en la alimentación de las bobinas A, B, C y D; existen tres tipos de secuencias posibles para el control del movimiento: secuencia normal, secuencia tipo *wave drive*, y secuencia de medio paso. Todas estas secuencias comienzan nuevamente en el primer paso una vez que han sido finalizadas, y para revertir el sentido de giro basta con ejecutar las secuencias en modo inverso, las cuales son detalladas a continuación. (Hernández Bello & Ochoa Luna, 2004)

A. Secuencia Normal

También se conoce como secuencia de paso completo doble, consiste en activar dos bobinas a la vez, siempre consecutivas, para que el eje del motor se oriente hacia el punto medio de ambas bobinas. Debido a lo anterior se obtiene un alto torque de paso y de retención. En la Tabla 1 se muestran los valores de tensión o excitación que deben suministrarse al motor para la realización de los pasos.

Tabla 1. Secuencia normal de pasos para motores unipolares.

Fuente: (González Fernández, 2002)

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	ON	OFF	OFF	
2	OFF	ON	ON	OFF	
3	OFF	OFF	ON	ON	
4	ON	OFF	OFF	ON	

B. Secuencia tipo wave drive

También se le conoce como secuencia de paso completo básica, consiste en activar cada una de las bobinas secuencialmente y de manera independiente, provocando la orientación del eje hacia la bobina activada. En algunos motores esto brinda un funcionamiento más suave, sin embargo, el torque de paso y retención suelen ser menores al tener solo una bobina activada. La Tabla 2 muestra los valores que se deben suministrar al motor para obtener este accionamiento.

Tabla 2. Secuencia *wave drive* de pasos para motores unipolares.

Fuente: (González Fernández, 2002)

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	OFF	ON	OFF	OFF	
3	OFF	OFF	ON	OFF	
4	OFF	OFF	OFF	ON	

C. Secuencia de medio paso

En esta secuencia se activan las bobinas de tal forma que se realice un movimiento igual a la mitad del paso real o mecánico del motor. Para lograrlo se accionan primeramente dos bobinas, seguidamente una bobina y se repite el ciclo sucesivamente. La secuencia consta de 8 etapas en lugar de 4, como se evidencia en la Tabla 3.

Tabla 3. Secuencia de medio paso para motores unipolares.

Fuente: (González Fernández, 2002)

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	ON	ON	OFF	OFF	
3	OFF	ON	OFF	OFF	
4	OFF	ON	ON	OFF	
5	OFF	OFF	ON	OFF	
6	OFF	OFF	ON	ON	
7	OFF	OFF	OFF	ON	
8	ON	OFF	OFF	ON	

2.6.3.3 Motores bipolares

En general, estos motores poseen 4 cables de salida y necesitan manipulaciones para ser controlados, esto debido a que requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de sus bobinas en una secuencia adecuada para generar el movimiento del rotor. Es necesario además disponer de un puente H por cada bobina del motor, la Figura 16 muestra un diagrama de conexión común para un motor bipolar de 4 cables. (Hernández Bello & Ochoa Luna, 2004)

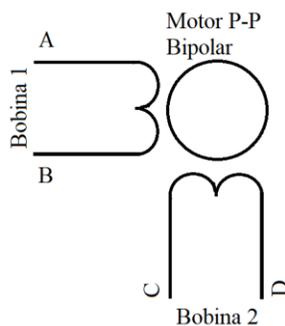


Figura 16. Diagrama de cableado para motor a pasos bipolar de 4 cables.

Fuente: (Bertomeu et al., 2015)

Como se mencionó, estos motores requieren una inversión en la corriente que circula por sus bobinas en una secuencia determinada, cada inversión de polaridad provoca el movimiento del eje en un paso, que además determina el sentido de giro por la secuencia seguida. En la Tabla 4 se muestra la secuencia necesaria para controlar este tipo de motor bipolar, donde +V o -V indica la excitación en las bobinas especificadas. (Hernández Bello & Ochoa Luna, 2004) Cabe mencionar, si se cumple la secuencia según los pasos descritos, el motor girará en sentido horario, si se realiza la secuencia de manera inversa el motor girará en el sentido antihorario.

Tabla 4. Secuencia para manejar motores bipolares a paso completo.

Fuente: elaboración propia.

Paso	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D
1	+V	-V	+V	-V
2	+V	-V	-V	+V
3	-V	+V	-V	+V
4	-V	+V	+V	-V

2.6.3.4 Controladores para motor a pasos

Como se mencionó en la sección anterior, para generar el movimiento deseado en un motor a pasos es necesario cumplir con una secuencia de pulsos en sus bobinas. Existen diferentes métodos para lograr dicho cometido, entre estos se pueden mencionar los puentes H que permiten el cambio de la dirección del flujo del corriente, es decir, permiten el flujo bidireccional de corriente invertida. Un arreglo para puente H se encuentra en la Figura 17, representado en los interruptores S1, S2, S3 y S4.

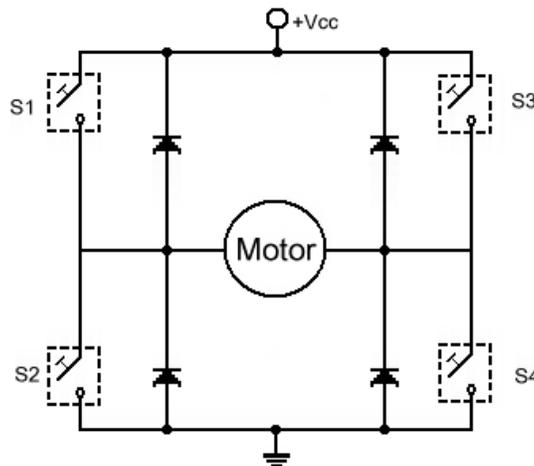


Figura 17. Arreglo para puente H.

Fuente: (García, 2016)

En este caso, los interruptores pueden representarse como transistores bipolares, *mosfets*, *jfets*, relevadores o cualquier combinación de elementos, se utilizan normalmente para hacer funcionar el elemento central del puente en dos sentidos sin tener que utilizar tensiones negativas. Al cerrarse los contactos S1 y S4 la corriente circula a través del motor en un sentido, si se cierran los contactos S2 y S3 la corriente circula en un sentido contrario al anterior.

Existen circuitos integrados, controladores o *drivers* que permiten controlar motores a pasos que ya poseen en su interior puentes H necesarios para manejar las bobinas de los motores a pasos. La cantidad de puentes, características específicas y disponibilidad, varían entre diversos dispositivos. Debido a la facilidad que representa en

el control de motor a pasos, se optó por el uso de uno de estos controladores, del cual se detallará su funcionamiento en la sección 4.3 programa de control del dosificador.

2.7 Diseño programático

En cuanto al control del sistema propuesto y el proceso de dispensación de soldadura, se utilizaron componentes electrónicos que permiten el establecimiento de variables para definir cantidades específicas de soldadura a depositar, según la selección del mecanismo de dispensación.

En esta sección se detallan los aspectos teóricos de los componentes electrónicos utilizados para lograr dicho objetivo.

2.7.1 Sistemas de control

Los sistemas, algoritmos y esquemas de control representan un sistema importante en el desarrollo de soluciones mecatrónicas, se encargan de manejar variables específicas de un proceso para optimizar o mejorar las operaciones industriales en que se utilizan.

Se definen como un conjunto de componentes que regulan su propia conducta o la de otro sistema con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado, de manera que se reduzcan las posibilidades de fallo y se obtengan los resultados buscados, en la actualidad son sistemas de control o de mando que permiten mejorar gran cantidad de procesos, donde la acción del hombre es insuficiente para gobernarlos, (Pilaguano Gavilanez, 2016) en el caso del actual proyecto se ve relacionado con la regulación de las cantidades de pasta de soldadura necesarias para la aplicación en las piezas de la empresa.

Estos sistemas se pueden llevar a cabo utilizando distintos elementos como lo son microcontroladores, computadoras industriales, controladores lógico-programables (PLC), entre otros. La lógica de programación se puede ver respaldada por diagramas de flujos o narrativas de control (*process control narratives* o PCN); herramientas para describir como los componentes de sistemas basados en procesadores deben ser

configurados, además de describir su funcionamiento y monitorización en la aplicación para un proceso en específico. (NEORS, 2013)

2.7.2 Controladores

Los controladores lógico-programables PLC son computadoras utilizadas para la automatización de procesos electromecánicos, típicamente en la industria; por ejemplo, en líneas de montaje, juegos mecánicos, artefactos de iluminación y maquinaria de procesos industriales en general. Los PLC están diseñados para múltiples arreglos de entradas tanto digitales como analógicas de señales eléctricas, además de salidas, cuentan con sistemas de protección para rangos de temperatura extendidos, inmunidad a ruido eléctrico, resistencia a la vibración y el impacto (Pilaguano Gavilanez, 2016); es decir, están condicionados para resistir ambientes adversos y se favorece su utilización en el ámbito industrial debido a la robustez que presentan, en relación por ejemplo con un microcontrolador común o computadoras industriales.

Algunas de las características que diferencian los PLC de otras opciones para el control industrial se enumeran a continuación: (Unitronics, 2019)

- Flexibilidad en la configuración de entradas-salidas (*inputs-outputs* o I/O) que permiten adaptar los sistemas que brindan la información al *Central Processing Unit* (CPU) donde se realizan los diferentes cálculos y operaciones para obtener los resultados deseados. De esta manera se tiene mucha flexibilidad para adaptar el uso de los PLC según los requerimientos de la aplicación.
- Comunicación con otros dispositivos mediante protocolos, lo que facilita la extracción de información de procesos, o bien la intercomunicación con otros sistemas.
- La posibilidad de utilizar interfaces hombre máquina o HMI (*Human Machine Interfaces*) que permiten monitorizar información del proceso y variables importantes del PLC.
- La mayoría de controladores son programables mediante diagramas de escalera LD (*Ladder Diagram*) que presentan una implementación gráfica muy universal

entre diferentes tipos de controladores, o recientemente con la programación mediante lenguajes de programación como lo son C y sus derivados.

El *software* de un PLC se compone principalmente de dos elementos: el sistema operativo o *Operative System* (OS), y el entorno de programación que puede llegar a soportar uno o más lenguajes de programación. Muy a menudo, los PLC contienen bibliotecas con módulos de programación suplementarios en su memoria para otro tipo de operaciones más específicas.

2.7.2.1 Sistema Operativo (OS)

El OS se trata de un programa o conjunto de estos que permite, para un determinado sistema informático, gestionar los recursos de *hardware* y *software*, además de proveer los servicios a los programas de aplicación. En el caso de los PLCs, las principales funciones de un OS son:

- Inicialización del sistema y del PLC.
- Escaneo o lectura de las entradas digitales y actualización de las tablas de estado.
- Escaneo de entradas y salidas analógicas.
- Ejecución del programa de usuario.
- Mantenimiento de temporizadores, contadores y otras funciones.
- Actualización de las salidas de control.
- Diagnóstico del sistema.
- Comunicación en el entorno de red.

El programa se puede definir como una secuencia de instrucciones que terminan con una orden de finalización de proceso, devolviendo el control al monitor del OS. Este puede ejecutarse de manera síncrona o asíncrona según las configuraciones de CPU del PLC. El ciclo operativo de un PLC se compone de dos fases principales: la fase de lectura y actualización de entradas y salidas, y la fase de usuario relacionada con el procesamiento de los datos. (UNED, 2011) Un ciclo típico para el funcionamiento de un PLC se muestra en la Figura 18.

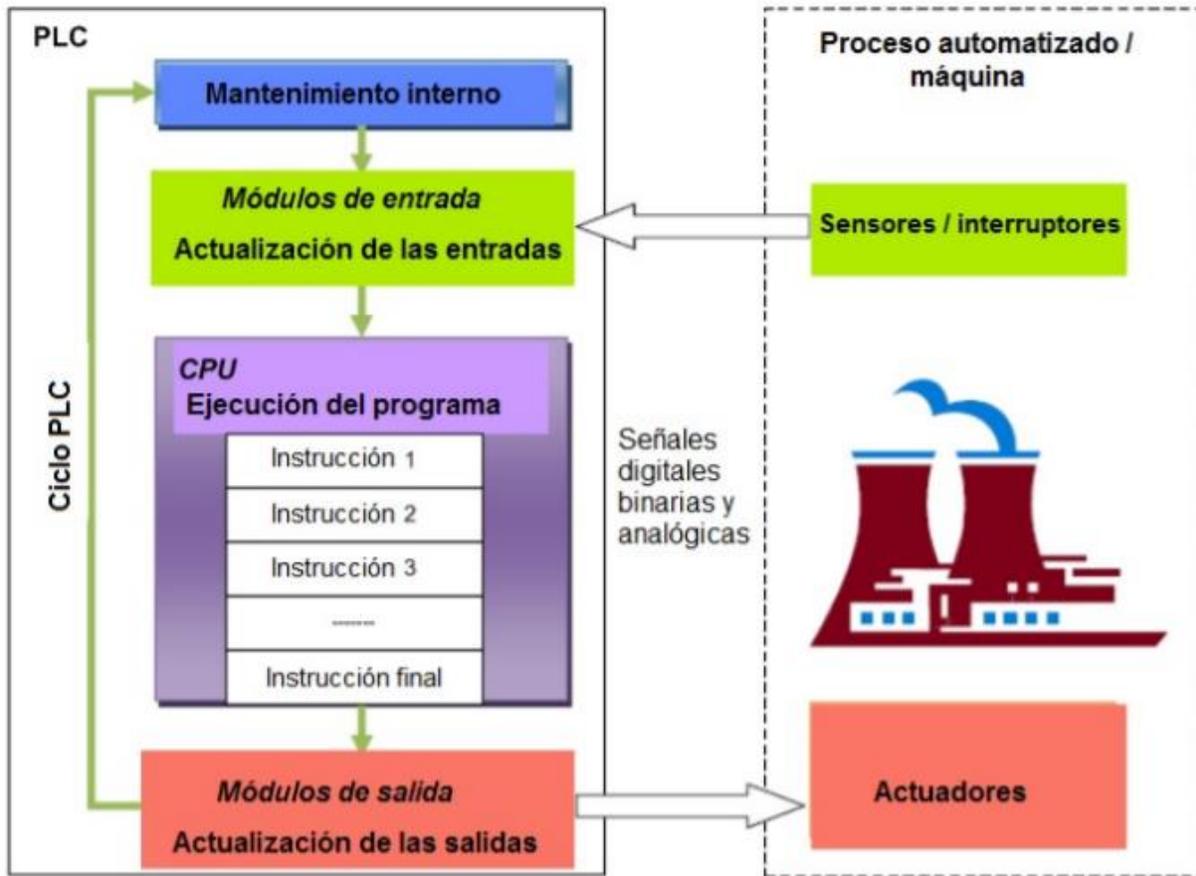


Figura 18. Ciclo de funcionamiento típico de un PLC

Fuente: (UNED, 2011)

2.7.2.2 Lenguajes de programación

Un lenguaje de programación es un lenguaje formal diseñado para expresar procesos que pueden ser llevados a cabo por máquinas, por ejemplo, ordenadores. En el caso de los PLC, los lenguajes surgieron al mismo tiempo que la aparición del primer PLC en 1968. Es por esto que no utilizan lenguajes de alto nivel como Pascal o C (y sus variantes), en su lugar, se emplearon lenguajes más simples y fáciles de entender. Es a partir de la tercera parte del estándar IEC 61131, designado como IEC 61131-3 que se definen los siguientes cinco lenguajes: (UNED, 2011)

- Diagrama de funciones secuenciales (SFC): método gráfico de modelado y descripción de sistemas de automatismos secuenciales, en los que el estado que

adquiere el sistema ante el cambio de una entrada depende de los estados anteriores. Representa un lenguaje de bloques para funciones secuenciales.

- Diagrama de bloques de funciones (FBD): también es un método gráfico que permite al usuario programar rápidamente, tanto en expresiones como en lógica booleana. Se trata entonces de un lenguaje de alto nivel que permite resumir funciones básicas en bloques de modo que el usuario se preocupa por la programación funcional de su rutina. Ideal para procesos de baja complejidad.
- Diagrama de tipo escalera (LAD): el tercer tipo de lenguaje gráfico, lo soportan la mayoría de los PLCs. Básicamente representa una conexión gráfica entre variables de tipo Booleano, comparable a controladores de tipo relé, representando el flujo del programa mediante diagramas de circuitos eléctricos.
- Texto estructurado (ST): como su nombre lo indica, es un lenguaje no gráfico, es un listado de sentencias que describen las funciones a ejecutar. Es muy similar a lenguajes de alto nivel conocidos como PASCAL, BASIC y C.
- Lista de instrucciones (IL o STL): al igual que el lenguaje anterior, se trata de un lenguaje de texto, en este caso similar a ensamblador. Es conveniente para programas de poca extensión.

2.7.3 Sistema de monitorización e interfaz

Las interfaces representan los conjuntos de dispositivos a través de los cuales una persona tiene acceso a interactuar con un objeto que realiza una determinada tarea. Estas herramientas han ido desarrollándose en conjunto con los avances tecnológicos y en la ingeniería, buscando facilitar al ser humano el interactuar con los diferentes objetos que habitualmente lo rodean, que tienen unas expectativas de cómo deben comportarse, basándose en experiencias anteriores con ellos, en información relevante de tal forma que sé que de paso a la elaboración de sistemas que le sirvan de ayuda en sus actividades cotidianas. (Pilaguano Gavilanez, 2016)

La interfaz hombre máquina, que puede ser referida con las siglas HMI; corresponden a un sistema que permite a operadores visualizar y monitorear un proceso o una máquina. Como tal, los *HMI* se encargan de tomar un grupo de variables y

transformarlas en información útil y comprensible para aquellas personas que tengan relación directa con el proceso y así poder aprovechar dicha información en realizar ajustes de ser necesario o llevar un control del estado del sistema. Se trata básicamente de aplicaciones gráficas que se encuentran en paneles de operación o computadoras industriales.

Un *HMI* forma parte del programa informático que se comunica con el usuario. En la norma ISO 9241-110 “*Ergonomics of human-system interaction — Part 110: Dialogue principles*”, el término interfaz de usuario se define como todas las partes de un sistema interactivo (*software* o *hardware*) que proporcionan la información y el control necesarios para que el usuario lleve a cabo una tarea con el sistema interactivo. (Pilaguano Gavilanez, 2016)

En la actualidad se utilizan para representar de forma gráfica la realidad de los procesos controlados, lo cual permite a los operadores la interrelación de equipos físicos en la planta con equipos virtuales en las interfaces gráficas de usuario o GUI. (José Carlos, Ernesto, Víctor, & Jorge, 2014) En la Figura 19, se muestra un ejemplo del funcionamiento de un HMI, donde se realizan intercambios de escritura y lectura entre el programa del PLC y HMI para controlar un proceso determinado, con funciones de monitorización, supervisión, alarmas, control e históricos.

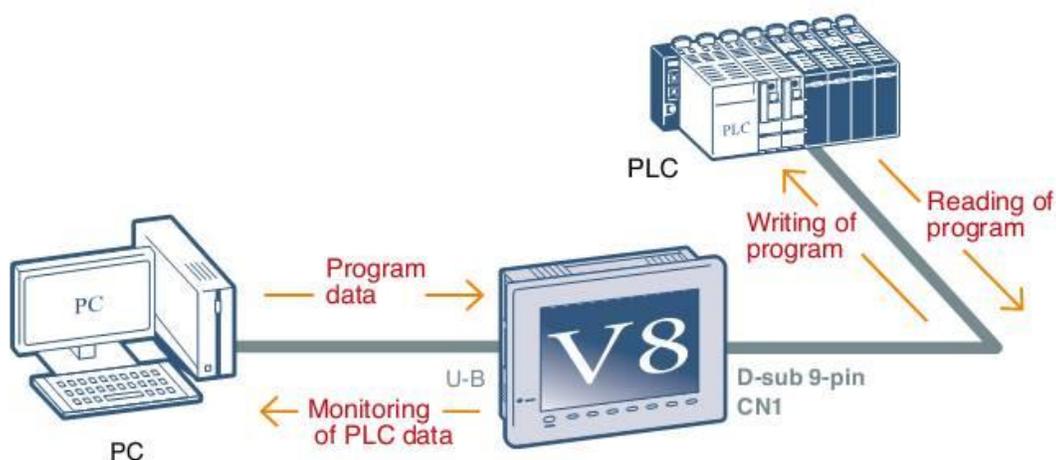


Figura 19. Ejemplo de utilización de una interfaz HMI.

Fuente: (Universidad de la Costa C.U.C, 2015)

Además de esto, es importante considerar aspectos ergonómicos y de funcionalidad a la hora de diseñar y programar HMI, para este fin existen normas como lo son la ANSI/ISA-101.01-2015 “*Human Machine Interfaces for Process Automation Systems*” que presentan la filosofía, guía de estilos y diseños que se deben aplicar a una pantalla de monitorización para garantizar su usabilidad y buen funcionamiento. (Hawrylo, 2015).

Entre los puntos más destacados, es que las pantallas deben contener colores consistentes, objetos y botones provenientes de un mismo *toolkit* o fuente en común; esto siempre considerando en cómo una nueva HMI se deberá operar. Es decir, el diseño de las pantallas debe respaldar el funcionamiento deseado, considerando aspectos tanto de diseño como de implementación y utilización por los usuarios finales. Algunos consejos que se mantienen en línea con lo expuesto en la norma es la utilización de fondos con tonos opacos o grises que reduzcan el deslumbramiento y proporcionen una representación de bajo contraste, además de reservar el uso de colores muy brillantes para la identificación de alarmas y situaciones anormales que no deberán ser utilizados en cualquier otra parte de la pantalla. (Hawrylo, 2015)

2.8 Indicadores económicos

Los indicadores económicos o financieros son utilizados para tomar decisiones sobre los gastos de capital propuestos para la realización de proyectos, estas decisiones se manifiestan en la clasificación de proyectos y realizar un análisis del rendimiento económico actual y la utilización de flujos de efectivo relevantes, por lo que funcionan incluso para el análisis de la evolución del proyecto en términos económicos. (Gitman & Zutter, 2012).

Cinco de los indicadores económicos de rentabilidad más utilizados en la evaluación para proyectos de inversión corresponden al valor presente neto (o valor actual neto), tasa interna de retorno (o tasa interna de rentabilidad), relación beneficio costo, índice de rentabilidad y el método de período de recuperación de inversión (Meléndez Poltronieri, 2019)

2.8.1 Valor Actual Neto (VAN)

También conocido como Valor Presente Neto (VPN) según Gitman & Zutter, (2012) corresponde al método utilizado por la mayoría de las grandes empresas para evaluar proyectos de inversión. Este método toma en cuenta el valor del dinero en el tiempo, es decir, descuenta los flujos de efectivo de la empresa en una tasa específica del costo de capital. Dicha tasa representa el rendimiento mínimo que se debe ganar en un proyecto para satisfacer los inversionistas de la empresa.

El VPN se obtiene restando la inversión inicial de un proyecto (FE_0) del valor presente de sus flujos de entrada de efectivo (FE_t) descontando una tasa (k) equivalente al costo de capital de la empresa, como se observa en la ecuación (3.1)

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FE_t}{(1+k)^t} - FE_0 \quad (3.1)$$

En otras palabras, el VAN corresponde al valor presente de las entradas de efectivo menos la inversión inicial. Se utiliza para aceptar o rechazar un proyecto según los siguientes criterios.

- Para valores $VAN > 0$, se acepta el proyecto.
- Para valores $VAN < 0$, se rechaza el proyecto.

El valor del VAN aumenta el valor del mercado de la empresa según la moneda en que se calcula, es decir, representa los ingresos por la realización del proyecto.

2.8.2 Tasa Interna de Rentabilidad (TIR)

El TIR representa la tasa de descuento al igualar el VAN de una oportunidad de inversión con 0 (debido a que el valor presente de las entradas de efectivo es igual a la inversión inicial). Esta es la tasa de rendimiento que ganará la empresa si invierte en el proyecto y recibe las entradas de efectivo esperadas. Matemáticamente se obtiene de la expresión k de la ecuación (3.1) al igualarse a cero, como se muestra en la ecuación (3.2a) y (3.2b). (Gitman & Zutter, 2012)

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FE_t}{(1 + TIR)^t} - FE_0 \quad (3.2a)$$

$$FE_0 = \sum_{t=1}^n \frac{FE_t}{(1 + TIR)^t} \quad (3.2b)$$

De igual manera que el VAN, el TIR se utiliza para aceptar o rechazar un proyecto a partir de los siguientes criterios:

- Para valores de $TIR > FE_0$, se acepta el proyecto.
- Para valores de $TIR < FE_0$, se rechaza el proyecto.

Estos criterios garantizan a la empresa ganar por lo menos su rendimiento requerido, aumentando de esa manera el valor de mercado de esta.

2.8.3 Índice de Rentabilidad (IR)

El índice de rentabilidad; también conocido como índice de deseabilidad, corresponde a una variación de la regla del VAN, para un proyecto que tiene una salida inicial de efectivo seguida de entradas de efectivo, el IR corresponde al valor presente de las entradas dividido entre las salidas iniciales.

De esta manera, en la mayoría de los casos si el IR es mayor a 1, entonces el VAN es positivo y el valor presente de las entradas de efectivo es mayor que las salidas de efectivo, caso contrario, si el IR es menor a 1, el VAN es negativo. Entonces, si el IR es igual o mayor a 1 el proyecto se acepta. (Gitman & Zutter, 2012)

3. Marco Metodológico

En este capítulo se define la metodología empleada para la solución del problema; desde la adquisición de información utilizada en las diferentes etapas del proyecto, el diagnóstico del proceso actual, hasta el diseño del mecanismo de aplicación de pasta de soldadura y la programación de la dosificación de dichos mecanismos de aplicación.

3.1 Diagnóstico

El *DoE* planificado se realizó en piezas específicas de la línea de producción de hornos para soldadura fuerte, se tomaron en cuenta aspectos como volumen de producción, cantidad de *scrap* generado y otros aspectos de importancia para la empresa implementando un análisis factorial.

Para la realización del diagnóstico fue necesario coordinar con los departamentos de Ingeniería, Calidad y los supervisores de planta de hornos, para delimitar las piezas a tratar. En concreto se realizó la aplicación del diagnóstico en dos números de pieza en específico: pieza número 4768 que forma parte de soldadura en baja temperatura y utiliza pasta de soldadura C-699 de *Kymera International* utilizada para *brazing* de aleaciones no ferrosas y aceros al bajo a medio carbono (Kymera International, 2018a) , así como la pieza número 6615 que forma parte del proceso de soldadura en alta temperatura y se utiliza pasta de soldadura C-715 de *Kymera International* utilizada para aleaciones de acero y aceros de bajo a medio carbono. (Kymera International, 2018b)

Se utilizó la metodología descrita en el capítulo anterior, subapartado 2.2 métodos de diagnóstico y presentada a continuación.

3.1.1 Delimitación de problema de estudio.

Tal cuál se mencionó en el Capítulo 1, en el subapartado 1.; definición del problema; la aplicación en exceso o material de soldadura insuficiente en las piezas tratadas por soldadura fuerte o *brazing* en el sector de hornos, delimita la problemática de obtención de piezas que no cumplen con los estándares de calidad y deben ser descartadas o corregidas/reprocesadas, lo cual implica costos y pérdidas para la empresa en la línea de producción.

Objetivo: Comparar escenarios teóricos y prácticos de cantidad de pasta de soldadura aplicada, así como el método de aplicación para generar un escenario optimizado de aplicación en piezas clave de producción.

3.1.2 Selección de variable respuesta.

Obtención de piezas aceptables o no, al terminar el proceso de soldadura fuerte en hornos según inspección y pruebas de calidad aplicables; como lo son inspección visual, prueba de fugas, prueba de penetración y prueba de tensión (en caso de 4768). Se aplicó un nivel binario de calificación donde 1 es una pieza aceptable que pasa las pruebas y 0 indica una pieza defectuosa según inspección realizada.

3.1.3 Definición de factores a investigar.

Debido al problema y objeto de estudio, los factores de tratamiento principales para mejorar la repetibilidad en el proceso de soldadura en el sector de hornos fueron definidos como:

- A. Método de aplicación.
- B. Cantidad de pasta aplicada en gramos.

Además de los factores de tratamiento principales, se anotaron covariables según fue necesario, entre las cuales se enlistan las siguientes junto con sus posibles niveles:

- a) Posición de soldadura en pieza: se realiza según lo establecido en la norma de trabajo (IT) o de otra manera (ejemplo, horizontal o vertical).
- b) Posición de la pieza en horno: se realiza según lo establecido en la IT o de otra manera.
- c) Tratamiento de la pieza: lavado o no antes del proceso de soldadura en el horno.
- d) Corrido o turno en que se realiza: definido en niveles según la cantidad de turnos realizados en el día de la prueba. En esta variable se puede considerar además el cansancio o fatiga por aplicación continua de los operadores.
- e) Los parámetros utilizados en la configuración del dosificador. Variable relacionada con repetibilidad del experimento.
- f) Los parámetros del horno en el tratamiento de las piezas. Este aspecto es para poder definir un tipo de *checklist* inicial, relacionada con la repetibilidad de las

pruebas que permite a su vez validar las condiciones del proceso a la hora de realizarse el diagnóstico.

Cabe destacar que estos elementos fueron seleccionados con base en observación detallada en la planta y el proceso en el sector de hornos, así como recomendaciones de los asesores en la empresa, esto último mediante la técnica / herramienta de juicio experto.

3.1.4 Determinación de niveles para factores de tratamiento.

Con base en los factores definidos, se determinaron los siguientes niveles:

1. Método de aplicación, definido en dos niveles: manual y dosificado.

2. Cantidad de pasta aplicada en gramos. Definida en diversos niveles: 2 a 6 niveles. Se toma como nivel inferior el valor teórico calculado para la aplicación y valor superior la cantidad aplicada en práctica, según se desarrollen los casos de la(s) pieza(s) a analizar.

En cuanto a las covariables mencionadas, se midieron las del número de corrida o turno con dos niveles, y se midieron los parámetros del horno para que cumplieran con lo establecidos con el IT de su configuración.

3.1.5 Planeación del trabajo experimental.

Primeramente, fueron definidos los niveles a utilizar para el factor de cantidad de pasta. Esto fue realizado mediante mediciones experimentales de masa o la cantidad de soldadura aplicada en una pieza, empleando una balanza analítica del laboratorio de la empresa Mettler Toledo AB54; y un papel o cinta adhesiva el cual fue pesado previamente, los cuales se colocarán en las uniones a soldar de la pieza. Se aplicó la soldadura en dichos puntos y se comprobó su peso empleando la misma balanza analítica, mostrada en la Figura 20. Se valoraron los resultados de las mediciones y a partir de estas se establecieron los niveles pertinentes para cantidad de soldadura, tomando como puntos de partida la cantidad teórica calculada con anterioridad y la cantidad usual aplicada a la pieza en el proceso por los operarios.



Figura 20. Balanza analítica empleada para la medición de masa de pasta de soldadura.

Fuente: elaboración propia.

Una vez definida la cantidad de niveles, se realizaron las réplicas necesarias para cumplir con un mínimo estadístico de 30 piezas, considerando que la cantidad de corridas base depende de los niveles establecidos para el factor de cantidad de soldadura aplicada. Se identificaron y numeraron debidamente cada una de las piezas a utilizar en el experimento para su inspección y consecuente recolección de resultados, utilizando un marcador de pintura en base de aceite para que no se eliminaran las marcas de identificación de las piezas cuando pasaran por el horno. Además de esto se diferenciaron las piezas en las que se realizó una aplicación manual con botella o bien con el uso de la dosificadora.

Se anotarán todas las variables medibles y disponibles para la futura evaluación del experimento, estas se considerarán como covariables que pueden afectar los resultados, pero no las principales para cumplir con el objetivo determinado y atacar la problemática definida.

3.1.6 Ejecución del experimento.

Primeramente, se realizaron las mediciones de masa de las piezas a estudiar, identificadas en la empresa como pieza número 6615 y pieza número 4768, mostradas en las Figuras 21 y 22 respectivamente.



Figura 21. Piezas 6615 tratadas en horno de soldadura.

Fuente: Cooper Standard.



Figura 22. Piezas 4768 tratadas en horno de soldadura.

Fuente: Cooper Standard.

Las mediciones se realizaron tal y como se describió en la sección de planeación del experimento, se muestra el proceso en la pieza 4768 en la Figura 23.



Figura 23. Medición experimental de masa para la pieza 4768.

Fuente: elaboración propia.

A partir de estas mediciones se promediaron las cantidades de soldadura para niveles establecidos en cada pieza. Para la pieza 6615 se establecieron 3 niveles, el nivel práctico usual empleado el cual es mayor, el nivel teórico calculado que es menor y un nivel intermedio entre ambas cantidades, estos valores se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Masa de soldadura aplicada en pieza 6615.

Fuente: elaboración propia.

	Masa medida ($\pm 0,1$ mg)		
	Valor Práctico	Valor Intermedio	Valor Teórico
Promedio	1120,8	635,0	375,5
Mínimo	859,6	411,0	326,0
Máximo	1398,3	913,8	441,4

En cuanto a la pieza 4768 se establecieron dos niveles, el práctico empleado usualmente y un nivel teórico calculado, de igual manera estos representan el límite superior e inferior en masa de soldadura respectivamente y se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Masa de soldadura aplicada en pieza 4768.

Fuente: elaboración propia.

Valor Práctico	Masa medida ($\pm 0,1$ mg)		
	Tubo	Nipple Pequeño	Nipple Grande
Ángulo A	156,3	89,0	-
Ángulo B	178,8	97,7	275,8
Valor Teórico	Tubo	Nipple Pequeño	Nipple Grande
Ángulo A	31,5	53,4	-
Ángulo B	45,1	22,8	39,4

Se identificaron las piezas candidatas para la ejecución del experimento como se muestra en la Figura 24 y se solicitó la aplicación de soldadura según los niveles establecidos para cada pieza, tanto de manera manual con la botella como con el uso del dosificador.



Figura 24. Identificación de piezas para ejecución de pruebas.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente se obtuvieron las piezas soldadas en la salida del horno, y se anotaron los resultados del estado de soldadura a partir de las pruebas de inspección visual. A partir de los datos obtenidos de las pruebas, así como el número de corrida de las pruebas, se realizó el análisis estadístico con el método de *DoE* detallados en la siguiente sección.

3.1.7 Análisis estadístico, interpretación de resultados, control y conclusiones.

Se realizó un análisis respectivo de los resultados obtenidos con ayuda de *Software Minitab18*, con el fin de determinar cuáles factores tienen efectos estadísticamente significativos en la respuesta, si existe relación o no entre ellos y también proponer un modelo ideal con base a dicho análisis en el control de dichos factores que influyan en el diseño del mecanismo dispensador. Dicho análisis se detallará en la sección 4.1 del marco analítico del documento.

3.2 Diseño del mecanismo dispensador

La selección del método de dispensación en este tipo de mecanismo es de las más importantes de tratar ya que se debe adecuar al tipo de tarea y aplicación que se requiere en el proceso, en este caso soldadura *brazing*. Es aquí donde se debe de resaltar el problema que se desea atacar con el diseño y los elementos principales a mejorar a partir de dicho planteamiento del problema.

Con base en la observación realizada en planta en la empresa, conociendo la manera en que trabajan la aplicación de soldadura en las piezas tratadas en el horno y a partir de las conclusiones obtenidas del diagnóstico realizado, se establecieron consideraciones o especificaciones iniciales del diseño:

Permite dispensación de 20 mg a 400 mg en soldadura en bajo con pasta de soldadura C-699 con una viscosidad de 64000 cP y una densidad de 29,4 lb/gal, es decir 3,5228 g/cm³. (Kymera International, 2018a) Además, el diseño permite la dispensación de 200 mg a 2 g en soldadura en alta temperatura con pasta de soldadura C-715 con una densidad de 62000 cP y 26,3 lb/gal o su equivalente 3,1514 g/cm³. (Kymera International, 2018b)

Esta es la base de rangos que debería cubrir el diseño según las pruebas y diagnóstico realizado en las piezas estudiadas en la empresa, respaldando la decisión de diseño para estas cantidades y que la aplicación sea lo más consistente posible con un bajo rango de variación.

También debido a la naturaleza del proyecto se consideró desde el comienzo del diseño la capacidad de controlar la cantidad de soldadura dispensada a partir de un controlador electrónico ya sea un controlador lógico programable (PLC) o bien un sistema por microcontrolador, como se mencionó en el planteamiento del proyecto. El tipo de diseño afecta directamente las variables que se deberán controlar en el proceso de aplicación desde el apartado programático como se mostró en los diferentes tipos de métodos de aplicación en el capítulo anterior.

Con base a los métodos más comunes empleados para dispensar pasta para soldadura, así como información de diferentes distribuidoras y empresas que realizan equipo comercial para dispensación, (Kymera International & Belman Melcor, 2019) (Nordson EFD, 2019) así como precios comerciales comunes de equipo (Integrated Dispensing Solutions Inc., 2019b) y artículos de los métodos de dispensación; (Jennings, 2017) (Integrated Dispensing Solutions Inc., 2019a) se generó una tabla resumen con las principales ventajas y desventajas de los diferentes tipos de diseño, mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7. Tabla comparativa para alternativas de diseño.
Fuente: Elaboración propia

	Pros	Contras
Dispensador Neumático	Menos caro. Estaciones comerciales \$ 600	Se debe tener cuidado con burbujas de aire insertadas.
	Se dispone de equipo en la empresa automatizable.	Diferentes niveles de compresión de aire pueden afectar la repetibilidad.
	Facilidad de manejo.	Permite depósitos cercanos a 0,762 mm de diámetro.
Dispensador Mecánico	Se pueden realizar depósitos muy precisos.	Precio intermedio. Estaciones comerciales cercanas a \$ 1000.
	La pasta nunca toca el mecanismo de dispensación. Fácil manejo y limpieza.	-
Dispensador Auger Valve	Pueden generar depósitos menores a los miligramos con una variabilidad aproximada al 5 %.	El método más caro, estaciones comerciales de hasta \$ 5000.
	Presenta la mayor precisión de los métodos investigados.	Difícil implementación para aplicación manual; se utiliza en proceso automatizados.
	Permite depósitos menores a 0,762 mm de diámetro.	Se debe limpiar el mecanismo completo para hacer intercambio de pastas.

Para la selección del diseño a generar se consideraron distintos puntos de evaluación que permiten definir cuál de las alternativas anteriores resulto ser la más deseable o viable, dichos puntos de evaluación son características que el diseño debe desempeñar para poder cumplir con las especificaciones deseadas de la máquina y se presentan a continuación. A partir de lo anterior se generó una serie de tablas para una comparación y selección del mejor candidato de diseño conceptual. (Moreno Tolentino & Velázquez Goyri, 2007)

1. Controlabilidad y precisión: la precisión que pueda poseer el sistema para la aplicación de cantidades similares de soldadura en cada aplicación.
2. Ergonomía y compatibilidad: que tan cómodo y eficiente puede ser el manejo del dispositivo para los operarios de este y el diseño se debe de acoplar a la línea de producción en que se desea utilizar.
3. Costo: estimación por costo de componentes a utilizar y costo total del mecanismo.
4. Disponibilidad: facilidad de adquisición de los componentes para el diseño.

Para cada criterio anterior se utilizó una escala que permite la calificación de cada característica, mostradas en la Tabla 8. Cabe destacar que cada calificación está elaborada de manera que las características que sean positivas para la empresa tengan mayor puntuación.

Tabla 8. Valores para los parámetros de elección de diseño.

Fuente: elaboración propia.

Controlabilidad	0. Buena precisión.
	1. Precisión mejorada.
	2. Mejor precisión.
Ergonomía	0. Difícil manejo y acople a línea.
	1. Fácil uso y acople a línea.
Costos	0. Alto.
	1. Intermedio.
	2. Bajo.
Disponibilidad	0. No disponible en la empresa.
	1. Disponible en la empresa.

Se realizó un levantamiento de materiales y componentes necesarios para el diseño de los métodos propuestos, para poder realizar una comparación de disponibilidad de componentes, así como de precio y poder tomar una decisión tomando en cuenta estos puntos importantes, como se muestra en la Tabla 9 y 10 para el método neumático y el mecánico respectivamente, con precios encontrados en la web y de diferentes distribuidores.

Tabla 9. Listado de componentes para la elaboración de un prototipo de dispensador basado en el principio neumático.

Fuente: elaboración propia.

Método Neumático			
Nombre	Cantidad	Precio (\$)	Subtotal (\$)
Válvula solenoide bronce ½ NPS	2	37.9	75.8
2W-025-08 Válvula solenoide	2	28.75	57.5
Paquete jeringas y agujas	1	10	10
Set relés 24 V DC	4	1.65	6.6
Microcontrolador	1	12.95	12.95
Acople entrada neumática	1	12.79	12.79
Tubería 1/2 (25')	1	12.36	12.36
Contenedor dispensador	1	27.56	27.56
Contenedor dispositivo	1	15	15
Costos envió/impuestos	1	50	50
Cables y componentes varios	1	25	25
Regulador presión aire	1	40	40
Switch tipo pedal	1	16.34	16.34
		Total:	361.9

Tabla 10. Listado de componentes para la elaboración de un prototipo de dispensador basado en el principio mecánico.

Fuente: elaboración propia.

Método Mecánico			
Nombre	Cantidad	Precio (\$)	Subtotal (\$)
Paquete jeringas y agujas	1	10	10
Microcontrolador	1	12.95	12.95
Contenedor dispensador.	1	27.56	27.56
Set relés 24V DC	4	1.65	6.6
Protector circuito	1	10	10
Stepper Nema 17	1	18.9	18.9
Driver Stepper	1	5	5
Fixtures motor/jeringa	1	15	15

Costos envió/impuestos	1	50	50
Cables y componentes varios	1	25	25
Acople motor eje	1	5.95	5.95
Tornillo M8x250mm	1	8.49	8.49
Tuerca M8	1	8.29	8.29
Switch tipo pedal	1	16.34	16.34
		Total	220.08

De esta manera se utiliza una tabla morfológica para evaluar los diseños propuestos, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Tabla morfológica para elección de diseño del dispensador.

Fuente: elaboración propia.

Característica	Diseño		
	Neumático	Mecánico	<i>Auger Valve</i>
Controlabilidad	0	1	2
Ergonomía	1	1	0
Costos	1	2	0
Disponibilidad	1	0	0
Total	3	4	2

Para la selección del diseño que mejor se ajusta se realizó la suma de las columnas representando cada tipo de diseño propuesto. Como se puede observar, la mejor solución a partir del análisis de los datos es el diseño mecánico, seguido muy cerca por el diseño neumático. A partir de estos resultados se descarta la opción del *Auger Valve* y se propuso la mejor opción a diseñar el método mecánico según las disposiciones presentadas.

Es importante mencionar que, de toda la estructura del dispositivo, algunas piezas son las que serán sometidas a mayores cargas que otras, por esta razón más adelante se procederá al análisis de dichas piezas únicamente, específicamente el sistema de tornillo de potencia empelado, ya que las otras piezas funcionan como simple soporte para el ensamble del motor y el sistema dispensador.

3.2.1 Programa de modelado 3D

El programa utilizado para la representación de los modelos de las piezas generadas para el dosificador se seleccionó tomando como criterios la disposición del programa, tanto en la empresa como para el trabajo personal ya sea en los laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica o bien en ordenadores personales. Otro punto importante son las herramientas disponibles para la elaboración de las piezas a diseñar, por lo que se decidió la utilización de *Autodesk Inventor Profesional 2019*, que además de ser *software* utilizado en la empresa, es de fácil acceso gracias al programa estudiantil presentado por *Autodesk* que habilita el uso de la licencia del programa en computadoras personales para estudiantes, acá se desarrollaron los modelos 3D para las piezas que luego fueron impresas en 3D.

3.3 Diseño programático

Se realizó un diagrama lógico del proceso general que debe cumplir el sistema dosificador, el cual funciona como la base para el desarrollo del algoritmo de control. Se muestra en la Figura 25.

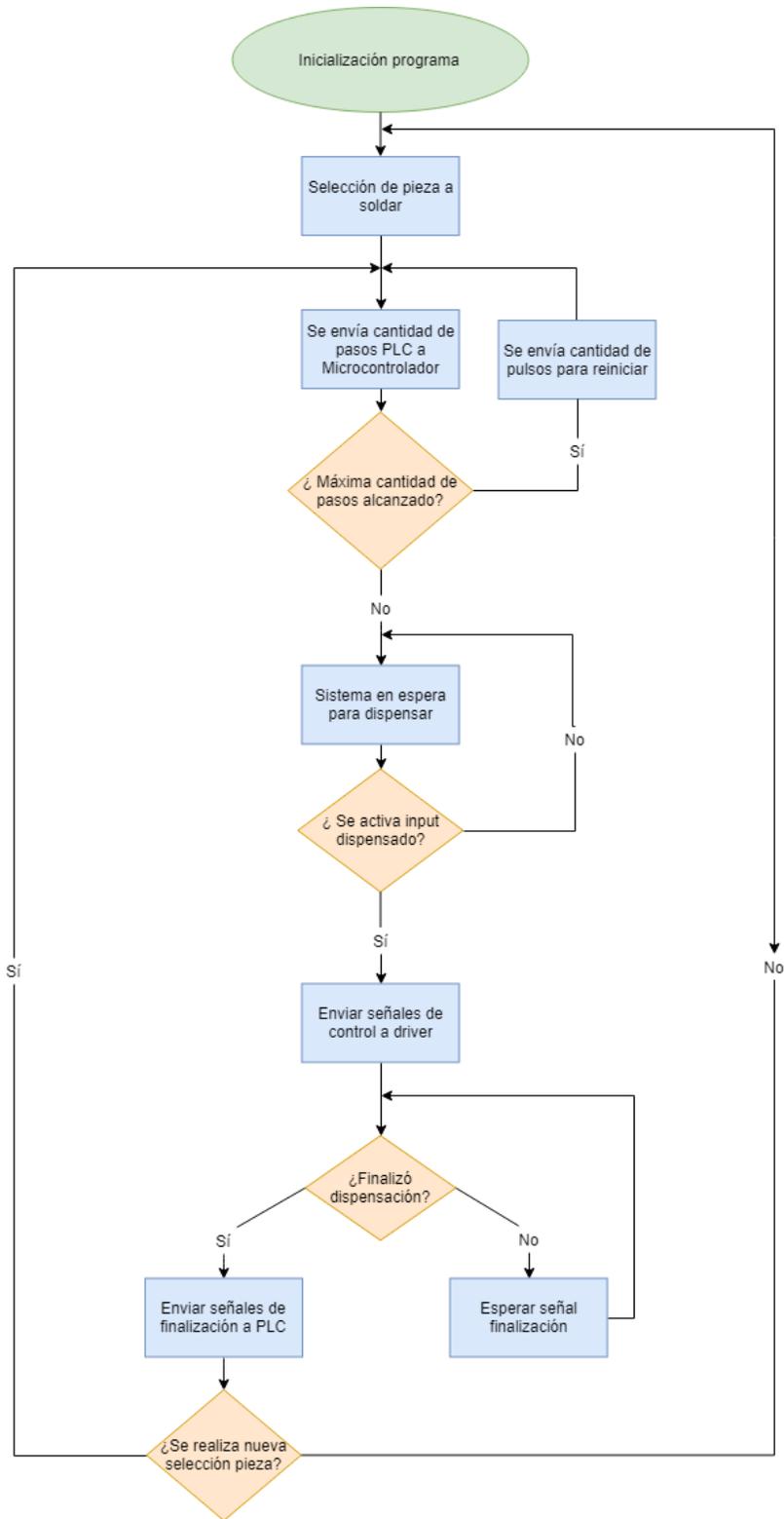


Figura 25. Diagrama de flujo del dosificador.

Fuente: elaboración propia

En cuanto a la plataforma de desarrollo, se coordinó con el departamento de *Tool Room* el empleo de un PLC debido a la robustez en la aplicación. Se consideraron opciones de *Allen Bradley*, así como de *Schneider Electronics*, tomando en cuenta la adquisición del *software* para la programación de los controladores, así como la compatibilidad con pantallas HMI disponibles en la empresa y su *software* de programación.

Debido a esto se optó por realizar el desarrollo del sistema de control en la plataforma Allen Bradley, con PLC de la línea *MicroLogix 1000-1500* programables en el *software RSLogix500* y pantallas *HMI Weintek* programables en el *software* libre *EasyBuilder Pro*.

3.3.1 Módulos y funciones de programación utilizadas

A continuación, se hace una breve explicación de algunas de las funciones utilizadas para realizar el control de dispensado del sistema, tomando como base el lenguaje de programación en escalera o *LD* que se detalló en la sección 2.7.2.2 Lenguajes de programación.

3.3.1.1 Instrucciones de temporizado o *timing*

Las instrucciones de temporizado o *timer* en programación permiten reemplazar temporizadores electromecánicos en sistemas de control, ya que realizan la misma función, pero son más exactos y menos costosos, a la vez que ahorran espacio.

En la plataforma de desarrollo las instrucciones *timer* presentan tres valores importantes asociadas a su estructura: tiempo base (*time base*), valor predefinido (*preset value*), y valor acumulado (*accumulated value*). De esta manera la dirección de un *timer* se compone de 3 palabras o *words*, *word 0* de control, *word 1* para guardar el *preset value* y *word 2* para guardar el *accumulated value*.

El *time base* representa la unidad de tiempo utilizada para que un *timer* cuente un evento, por ejemplo, 1s o 0,01s. De esta manera, la instrucción *timer* realiza su función contando el número de veces que el *time base* ha ocurrido desde que la instrucción fue activada. El *preset value* representa el valor que debe alcanzar el *timer* para que el

controlador active el bit de finalizado. El *accumulator value* es la palabra donde se guarda el conteo de tiempo desde la última vez que el *timer* fue reiniciado, es decir, se actualiza continuamente cuando el *timer* se encuentra activo. (Rockwell Automation, 2015) La estructura de los datos del temporizador (a) y la manera de direccionarse (b) se muestran en la Figura 26.

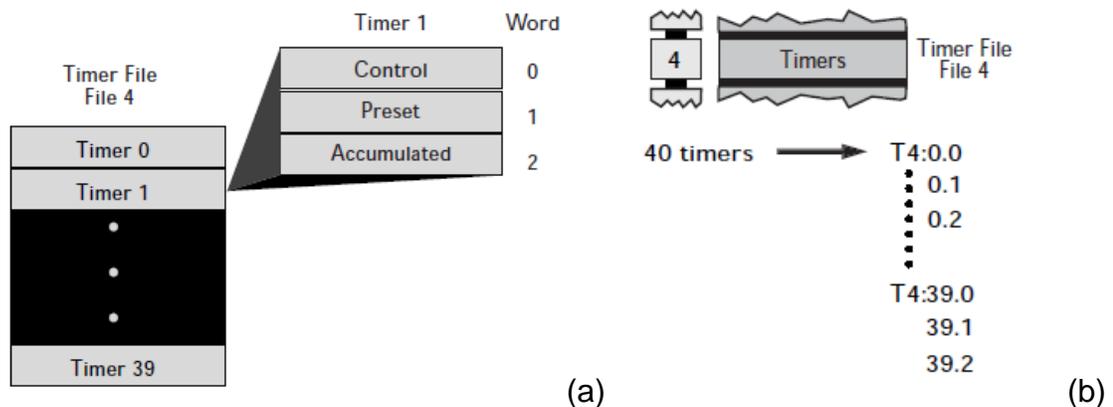


Figura 26. Instrucciones de temporizador.

Fuente: (Rockwell Automation, n.d.)

Se utilizaron las funciones de *timer* del controlador para generar los trenes de impulsos necesarios para controlar el movimiento del motor a pasos.

3.3.1.2 Instrucciones de conteo o *counting*

Las instrucciones de conteo o *counters* permiten realizar, como su nombre lo indica, operaciones de conteo en el controlador. En el caso de la plataforma de desarrollo, se tiene una estructura muy similar al de los *timers*, con un *accumulated value* y un *preset value*. Las direcciones de *counters* están conformadas por 3 *words*, *Word 0* de control, *word 1* para guardar el *accumulated value* y *word 2* para guardar el *preset value*. Al igual que con los *timers*, el *preset value* especifica el valor que debe alcanzar el controlador para que active el bit de finalizado de conteo, mientras que el *accumulated value* representa el número de transiciones booleanas de verdadero a falso ocurridas desde el último reinicio del contador. (Rockwell Automation, 2015) La estructura de los datos del contador (a) y la manera de direccionarse (b) se muestran en la Figura 27.

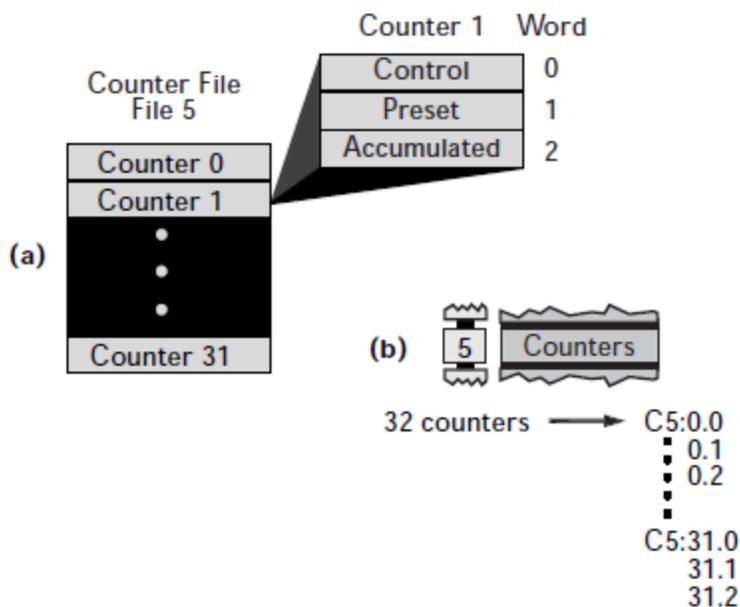


Figura 27. Instrucciones de contador.

Fuente: (Rockwell Automation, n.d.)

Los contadores se utilizaron para definir la cantidad de pulsos necesarios para enviar al controlador de los motores a pasos, que se traducen en pasos del motor y por lo tanto a una cantidad específica de soldadura como se explicará en la sección 4.2 estructura mecánica del dispensador.

4. Marco Analítico

Como se mencionó en la metodología de diseño en ingeniería, la verificación del funcionamiento del sistema diseñado y de las partes que lo conforman resulta de las etapas más importantes en el proceso de diseño y en la realización del proyecto. En esta sección del documento se detallan las etapas para llegar hasta el diseño final del dispositivo dispensador y los resultados para la posterior validación del sistema.

4.1 Análisis del diagnóstico

En esta sección se discutirá el ajuste de los modelos empleados para el desarrollo del diagnóstico por DoE, que validan el método utilizado, además de los resultados obtenidos.

Primeramente, se analizaron los resultados obtenidos para el número de pieza 6615. Se realizó la prueba definida con dos factores, cantidad de soldadura y método de aplicación, tomando también la covariable de número de corrida realizada. A partir de ello se genera el diseño factorial para el *DoE* resumido en la Tabla 12 y Tabla 13, donde se resalta que la muestra final fue de 36 piezas en este caso, donde una corrida base necesitaba de 6 piezas y se realizaron 6 réplicas en total.

Tabla 12. Resumen del diseño factorial de múltiples niveles 6615.

Fuente: elaboración propia.

Factores:	2	Réplicas:	6
Corridas base:	6	Total de corridas:	36
Bloques base:	1	Total de bloques:	1

Tabla 13. Información de los factores 6615.

Fuente: elaboración propia.

Factor	Niveles	Valores
Cantidad Soldadura	3	Practico, Intermedio, Teórico
Método Aplicación	2	Manual, Dosificadora

Con base en el modelo anterior, se obtuvo como resultado que la cantidad de soldadura empleada es el principal factor estadísticamente significativo para la respuesta obtenida, tomando en cuenta el análisis de varianza con una significancia α de 0,05. Con

este valor, se tiene que $p < \alpha$ solamente para la cantidad de soldadura, como se demuestra en la Tabla 14 así como en el diagrama de Pareto mostrado en la Figura 28.

Tabla 14. Análisis de Varianza 6615.

Fuente: elaboración propia.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	3.04663	0.50777	2.94	0.024
Covariables	1	0.29425	0.29425	1.70	0.203
Corrida	1	0.29425	0.29425	1.70	0.203
Lineal	3	2.49425	0.83142	4.81	0.008
Cantidad Soldadura	2	2.49246	1.24623	7.21	0.003
Método Aplicación	1	0.01277	0.01277	0.07	0.788
Interacciones de 2 términos	2	0.19139	0.09569	0.55	0.581
Cantidad Soldadura x Método Aplicación	2	0.19139	0.09569	0.55	0.581
Error	28	4.83908	0.17282		
Falta de ajuste	5	0.83908	0.16782	0.96	0.460
Error puro	23	4.00000	0.17391		
Total	34	7.88571			

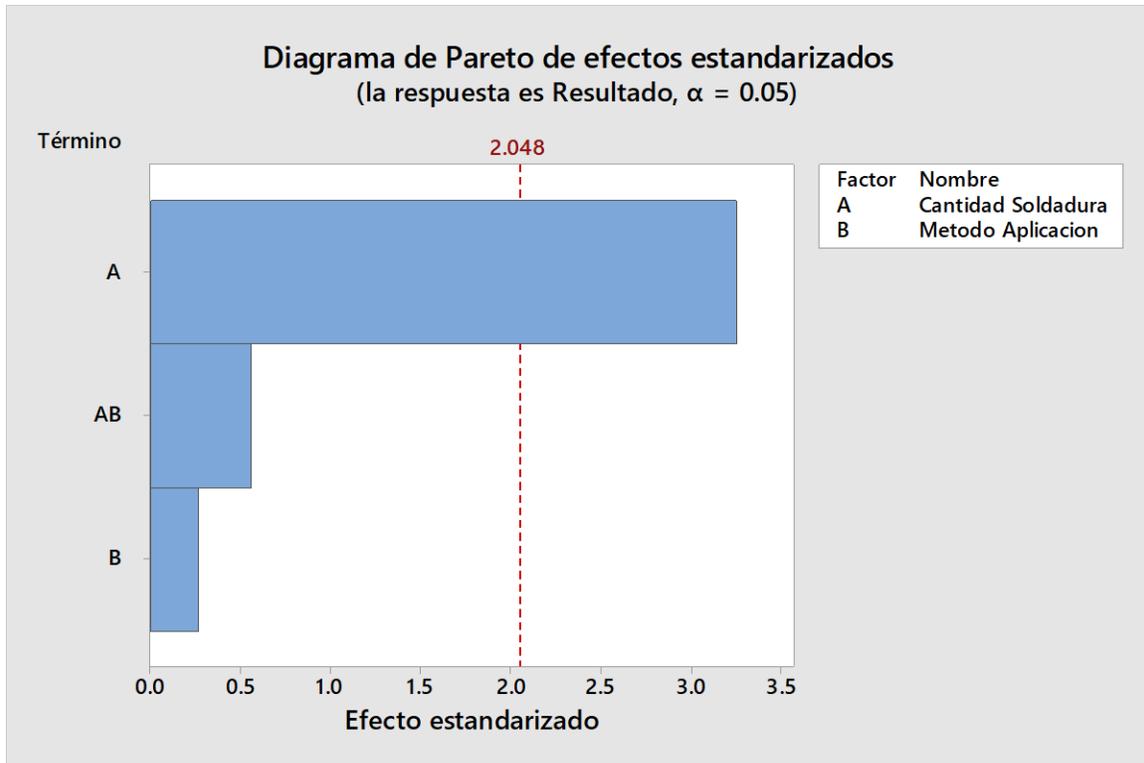


Figura 28. Diagrama de Pareto para el análisis de significancia de factores para 6615.

Fuente: elaboración propia.

Se tiene que la variable que más afecta el resultado es la cantidad de soldadura empleada. Se buscó entonces una solución que permita asegurar la reproducibilidad/repetibilidad de la cantidad de soldadura aplicada al valor usual empleado en la fábrica. Aspectos como el método de aplicación no son significativos, sin embargo, si puede observarse como el turno en que se realiza el proceso de soldadura si afecta los resultados, aunque en menor medida. Los resultados se pueden denotar de mejor manera apoyándose en la Figura 29 donde se muestran las configuraciones que presentan mejor resultado indicado por un puntaje mayor o más cercano a la unidad, así como en la Figura 30 donde se ve la interacción entre ambos factores estudiados y denota la tendencia que la cantidad de soldadura es la que afecta más las piezas con defectos, mientras que el método de aplicación no es tan significativo.

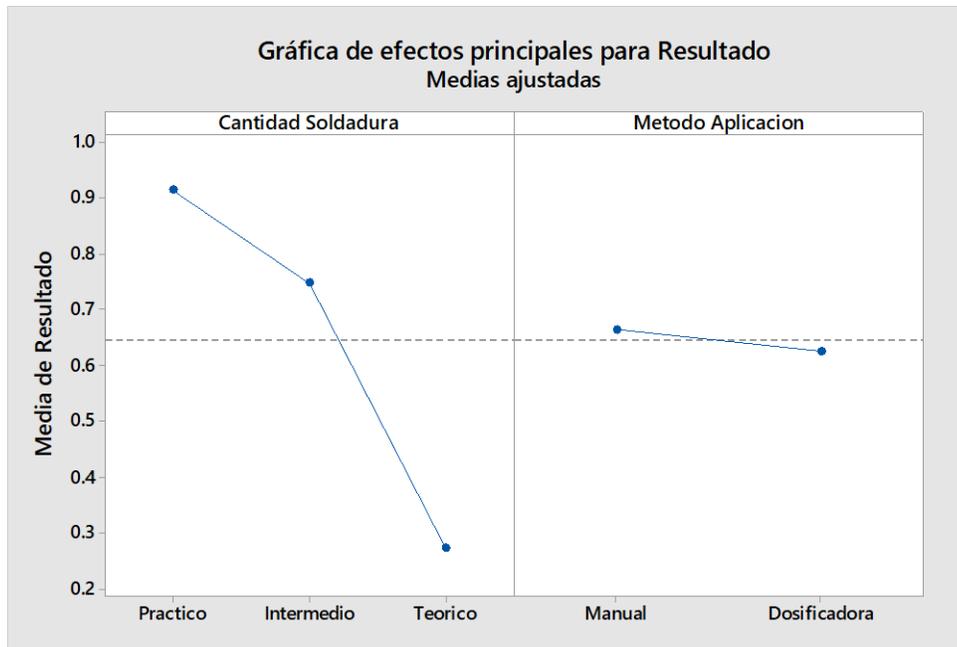


Figura 29. Resultados obtenidos según nivel de factores para 6615.

Fuente: elaboración propia.

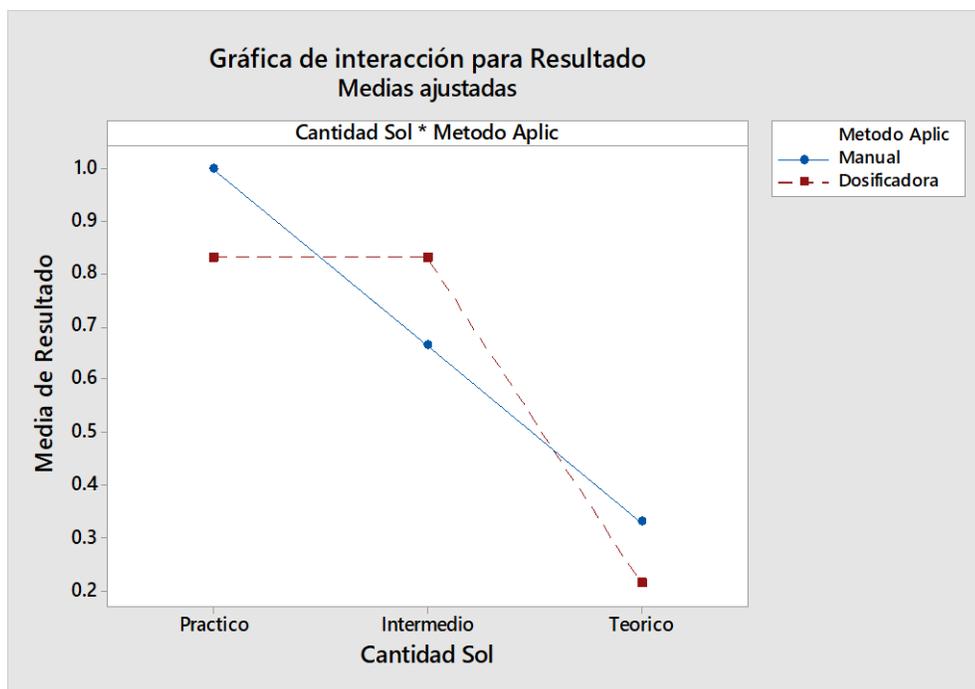


Figura 30. Interacción entre factores y respuesta obtenida para 6615.

Fuente: elaboración propia.

Seguidamente, se muestra el análisis realizado para el número de pieza 4768. Como se mencionó anteriormente, se realizó la prueba para analizar los mismos factores de cantidad de soldadura y método de aplicación. De igual manera se tomó la corrida en que se realizó la prueba como covariable, se puede detallar un resumen del modelo en las Tablas 15 y 16 respectivamente.

Tabla 15. Resumen del diseño factorial de múltiples niveles 4768.

Fuente: elaboración propia.

Factores:	2	Réplicas:	8
Corridas base:	4	Total de corridas:	32
Bloques base:	1	Total de bloques:	1

Tabla 16. Información de los factores 4768.

Fuente: elaboración propia.

Factor	Niveles	Valores
Cantidad Soldadura	2	Práctico, Teórico
Método Aplicación	2	Manual, Dosificador

Nuevamente se realizó el análisis con una significancia igual al de la prueba anterior, sin embargo, no se puede concluir estadísticamente que los factores afecten significativamente los resultados. Lo anterior se evidencia en el resultado del análisis de varianza, así como la gráfica de Pareto de los factores, mostrados en la Tabla 17 y la Figura 31 respectivamente. Esto se puede explicar también por qué a diferencia del estudio de la pieza anterior, se obtuvieron faltas tanto por faltante de pasta de soldadura como por exceso aplicado en ambos métodos de aplicación.

Tabla 17. Análisis de Varianza 4768.

Fuente: elaboración propia.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	0.87500	0.21875	0.83	0.516
Covariables	1	0.03125	0.03125	0.12	0.733
Corrida	1	0.03125	0.03125	0.12	0.733
Lineal	2	0.81250	0.40625	1.55	0.231
Cantidad Soldadura	1	0.03125	0.03125	0.12	0.733
Método Aplicación	1	0.78125	0.78125	2.97	0.096
Interacciones de 2 términos	1	0.03125	0.03125	0.12	0.733
Cantidad Soldadura x Método Aplicación	1	0.03125	0.03125	0.12	0.733
Error	27	7.09375	0.26273		
Falta de ajuste	3	0.34375	0.11458	0.41	0.749
Error puro	24	6.75000	0.28125		
Total	31	7.96875			

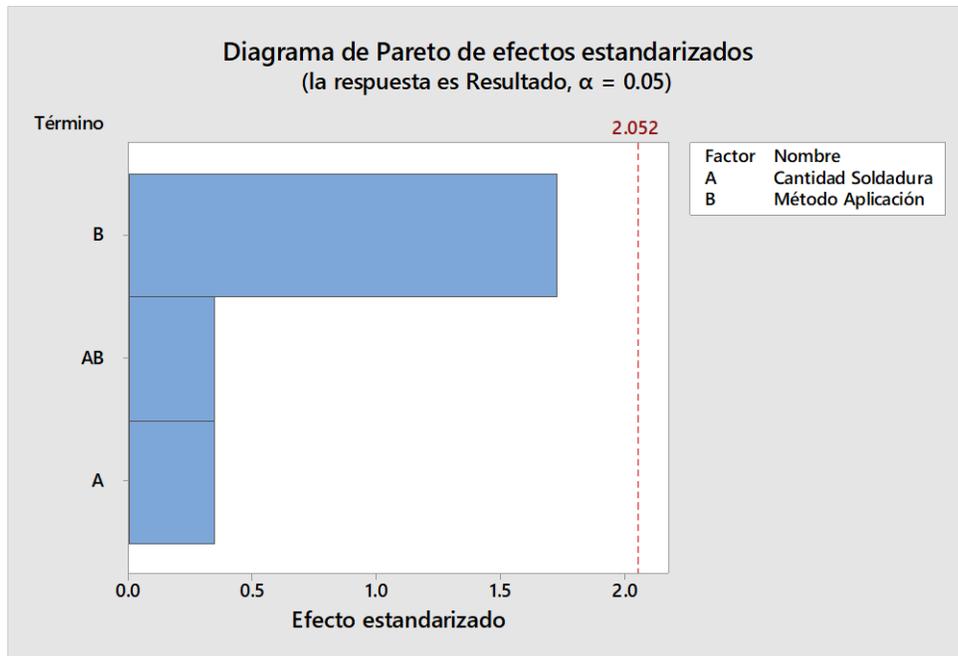


Figura 31. Diagrama de Pareto para el análisis de significancia de factores para 4768.

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, a partir de la observación detallada, y realizada en el proceso de aplicación para dicha pieza en específico, se recolectó información muy importante, como que los operarios normalmente aplican soldadura C-699 de manera manual ya que se les dificulta mucho la aplicación con dosificador en el sentido de repetibilidad, ya que se aplica en exceso o bien faltante, lo cual evidencia la problemática definida con anterioridad. Lo anterior se puede ver en los resultados del experimento con respecto a los factores, como se muestra en la Figura 32; así como la relación entre los factores mostrados en la Figura 33.

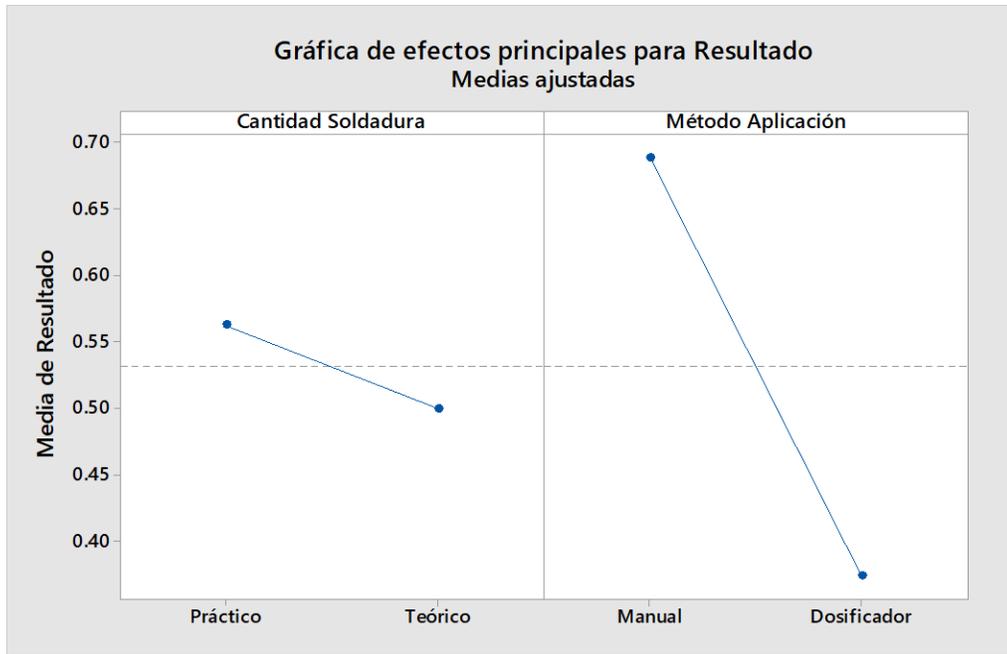


Figura 32. Resultados obtenidos según nivel de factores para 4768.

Fuente: elaboración propia.

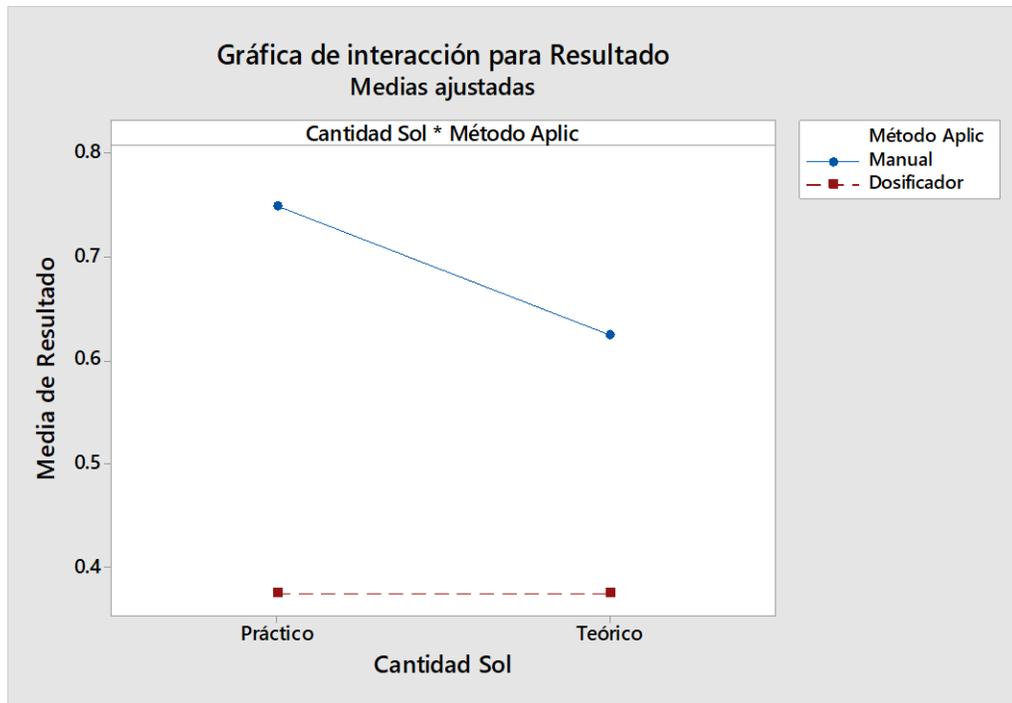


Figura 33. Interacción entre factores y respuesta obtenida para 4768.

Fuente: elaboración propia.

A partir de estos datos se cumplen las predicciones de la problemática principal que se desea atacar con el proyecto, que es la aplicación con falta de soldadura en ambas piezas estudiadas y exceso de soldadura en algunos casos de la pieza 4768.

El otro problema es el aspecto ergonómico ya que en la pieza 4768 normalmente no se utiliza el dosificador para la aplicación ya que se dificulta la reproducibilidad de cantidad de soldadura, un comentario por parte de los operarios es que les resulta difícil aplicar con este método debido a que se aplica en exceso o bien muy poco, lo cual se ve respaldado en los resultados obtenidos de las pruebas. En este mismo factor se ve como las propiedades de la pasta de soldadura pueden afectar la efectividad del método de aplicación empleado, por tanto, era de suma importancia que el mecanismo a diseñar posibilitara el empleo tanto de la pasta de soldadura C-699, como de la pasta de soldadura C-715 para los procesos en baja y alta temperatura respectivamente.

Se debía procurar que el diseño a realizar dispusiera de repetibilidad en la cantidad de soldadura que se desea aplicar, ya que a partir del estudio es el factor que más afecta los resultados en las piezas estudiadas.

4.2 Estructura mecánica del dispensador

Para el diseño de la estructura mecánica del dispensador, se utilizaron elementos comúnmente utilizados en dispensadores, por ejemplo, jeringas *Nordson Optimum 55 cc* (cm³) ya utilizadas en la empresa para el dispensado de la pasta y los pistones que acompañan dichas jeringas.

El principio general del funcionamiento se basó en el de un tornillo de potencia, como se detalló en la sección 2.5.4 Normas y definiciones de tornillos de potencia y roscas. Por disponibilidad en la empresa y acople al sistema, se decidió utilizar una barra roscada de 5/16-24 UNF en conjunto a una tuerca de la misma designación, ambas de acero. Debido a que el paso p es recíproco a las roscas por pulgadas $N = 24$, se tiene un paso $p = (1 / 24)$ pulgadas.

De esta manera se calculó el avance del sistema, convirtiendo el valor del paso de pulgadas a milímetros mediante la igualdad 1 pulgada = 25,4 mm obtenida del

Apéndice 7.2. Por lo que se tiene un paso $p = (25,4 / 24) \text{ mm}$ ó $p = 1,0583 \text{ mm}$. Como se trata de una barra de rosca simple, el avance corresponde al paso, por lo que $l = p$. De igual manera el diámetro nominal de 0,3125 pulgadas para ese tipo de rosca según la Tabla 2, se tiene un valor de diámetro nominal convertido a milímetros $d = 7,9375 \text{ mm}$. Por su parte, el diámetro menor d_r según la tabla 2 corresponde a 0,2584 pulgadas o bien su correspondiente en milímetros $d_r = 6,5627 \text{ mm}$

Ahora bien, según (Nordson EFD, 2018) el sistema de jeringas debería utilizarse a no más de 3/4 de su capacidad, considerando que la pasta con mayor densidad es de $\rho = 3,5228 \text{ g/cm}^3$ se tiene que la cantidad máxima a rellenar por jeringa sería la presentada en el siguiente cuadro resultado:

$$m_{\text{máxima}} = 55 \text{ cm}^3 \cdot \frac{1}{3} \cdot 3,5228 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 64,58 \text{ g}$$

Considerando la gravedad estándar de aproximadamente $9,81 \text{ m/s}^2$, entonces se calculó el peso de la masa máxima a rellenar en una jeringa, lo que se traduciría en la fuerza que debe vencer el tornillo de potencia. (Budynas & Nisbett, 2009)

$$F = m \cdot a = 0,06458 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0,6335 \text{ N}$$

A partir de la ecuación (2.6) se encontró entonces el diámetro medio para su utilización en el cálculo del par de torsión mínimo para vencer dicha fuerza.

$$d_m = 7,9375 \text{ mm} - \frac{1,0583 \text{ mm}}{2} \cong 7,41 \text{ mm}$$

De esta manera, a partir de la ecuación (2.5) se calculó el par mínimo de torsión para vencer la fuerza y levantar la carga, tomando como referencia la fricción entre acero-acero para uniones tornillo-tuerca encontrados en el Anexo 7.2 en la Tabla 22.

$$T_R = \frac{0,6335 \text{ N} \cdot 7,41 \times 10^{-3} \text{ m}}{2} \left(\frac{1,0583 \times 10^{-3} \text{ m} + \pi \cdot 7,41 \times 10^{-3} \text{ m}}{\pi \cdot 7,41 \times 10^{-3} \text{ m} - 0,25 \cdot 7,41 \times 10^{-3} \text{ m}} \right) = 2,666 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$

Es con base en este resultado que se calculan los esfuerzos nominales presentes en el dispositivo, utilizando las ecuaciones (2.8) y (2.9),

$$\tau = \frac{16 \cdot 2,666 \times 10^{-3} \text{ Nm}}{\pi \cdot (6,5627 \times 10^{-3} \text{ m})^3} = 48 \text{ kPa}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{16 \cdot 0,6335 \text{ N}}{\pi (6,5627 \times 10^{-3} \text{ m})^2} = 74,9 \text{ kPa} \cong 75 \text{ kPa}$$

Según la Tabla 21 encontrada en la sección 7.2 de Apéndices, el módulo de elasticidad del acero es de 207,0 GPa por lo que no existe problema alguno en el diseño o que llegue a fallar por carga mecánica.

Como se mencionó en la sección 4.1 Diagnóstico, se debe cumplir una dispensación en el orden de los miligramos para cada aplicación de pasta de soldadura, debido a la alta precisión de los motores a paso, se decidió utilizar dichos elementos para la realización del prototipo dispensador. Debido a la disponibilidad y costo se optó por usar un *Stepper* Nema 17, con una resolución de 1,8° por paso, además cumple con la suposición de fuerza necesaria ya que su torque es de 0,23 Nm. (Mercury Motor, n.d.)

Con base en las premisas establecidas, se continuó con el cálculo de la masa que el sistema deposita en el accionamiento del sistema. Como se mencionó, la resolución del motor es de 1,8° por paso, es decir de 200 pasos por revolución o 360° de rotación, considerando además el paso de la rosca $p = 0,10583 \text{ cm}$ que corresponde de igual manera al avance $l = 0,10583 \text{ cm}$, se puede definir la distancia lineal recorrida por el émbolo de empuje con la ecuación (4.1)

$$\text{movimiento émbolo} = \text{cantidad pasos} \cdot \frac{1 \text{ revolución}}{200 \text{ pasos}} \cdot l \quad (4.1)$$

Debido a la forma cilíndrica de las jeringas se pudo calcular el volumen dispensado como el volumen trasladado en la jeringa, recordando la definición de volumen para un cilindro con la ecuación (4.2)

$$V_{\text{cilindro}} = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (4.2)$$

Donde r es el radio del cilindro y h la altura, en el caso del cálculo, dicha altura representaría la distancia recorrida por el émbolo, como se muestra en la Figura 34.

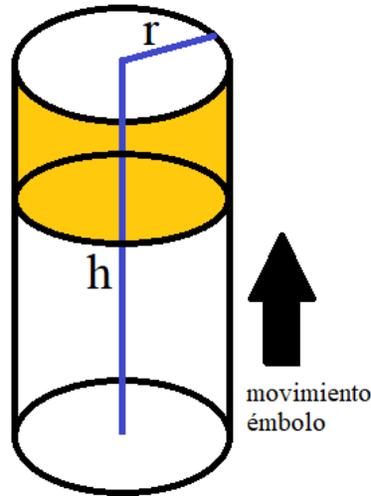


Figura 34. Representación del volumen de la jeringa de dispensado.

Fuente: elaboración propia.

Considerando el diámetro interior de las jeringas de 22,50 mm, es decir, un radio de 1,125 cm y aplicando las ecuaciones (4.1) y (4.2), se define la ecuación (4.3) para el cálculo del volumen depositado de soldadura según el accionamiento del motor.

$$V_{Depositado} = \pi \cdot (1,125\text{cm})^2 \cdot \text{cantidad pasos} \cdot \frac{1 \text{ revolución}}{200 \text{ pasos}} \cdot (0,10583 \text{ cm}) \quad (4.3)$$

Es así como, con el valor de densidad de la pasta de soldadura tanto para el tipo C-715 y C-699, se puede calcular la cantidad de pasta, con la relación entre densidad, volumen y masa, como se muestra en la ecuación (4.4) (Çengel, Cimbala, & Turner, 2017)

$$m = V \cdot \rho \quad (4.4)$$

Para la obtención de la resolución de masa dispensable, entendiéndose resolución como la mínima cantidad de soldadura que se puede controlar a la hora de dispensar, se obtuvo el volumen depositado a partir de la ecuación (2.3) al aplicar solamente un paso, obteniendo el siguiente resultado.

$$V_{\text{Depositado}} = \pi \cdot (1,125\text{cm})^2 \cdot 1 \cdot \frac{1 \text{ revolución}}{200 \text{ pasos}} \cdot (0,10583 \text{ cm}) \cong 0,002 \text{ cm}^3$$

Recordando la densidad de la pasta C-699 de $\rho = 3,5228 \text{ g/cm}^3$ y para la pasta C-715 de $\rho = 3,1514 \text{ g/cm}^3$, con el resultado anterior para el volumen depositado, se calculó la resolución de dispensado de pasta de soldadura del sistema, en gramos. Aplicando la ecuación (4.4) se muestran los resultados en los siguientes recuadros.

$$m_{C-699} = 0,002 \text{ cm}^3 \cdot 3,5228 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m_{C-699} = 0,007 \text{ g}$$

$$m_{C-715} = 0,002 \text{ cm}^3 \cdot 3,1514 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m_{C-715} = 0,006 \text{ g}$$

De esta manera los cálculos teóricos respaldan que el diseño cumple con las necesidades y requerimientos establecidos para el dispensado de la pasta de soldadura.

Como datos del diseño del prototipo final para dispensado, el acople entre la jeringa y el motor, así como el émbolo para el dispensado de la pasta, se diseñaron conforme a las medidas de la jeringa para tener un ajuste y ensamble práctico y eficiente; estos dos elementos fueron impresos en 3D. Los elementos de unión funcionan a la vez como tope mecánico para que la jeringa no se salga de posición. En la Figura 35 se detalla el modelado del dispositivo dispensador, mientras que en la Figura 36 se encuentra un explosionado de los diferentes componentes del dispositivo.

Por su parte, en la sección 8 Anexos, se adjuntan los planos del mecanismo, incluyéndose el plano de montaje del sistema, el explosionado a detalle con la tabla de materiales y el plano de manufactura de los elementos generados.



Figura 35. Diseño de prototipo dispensador programable.

Fuente: elaboración propia.

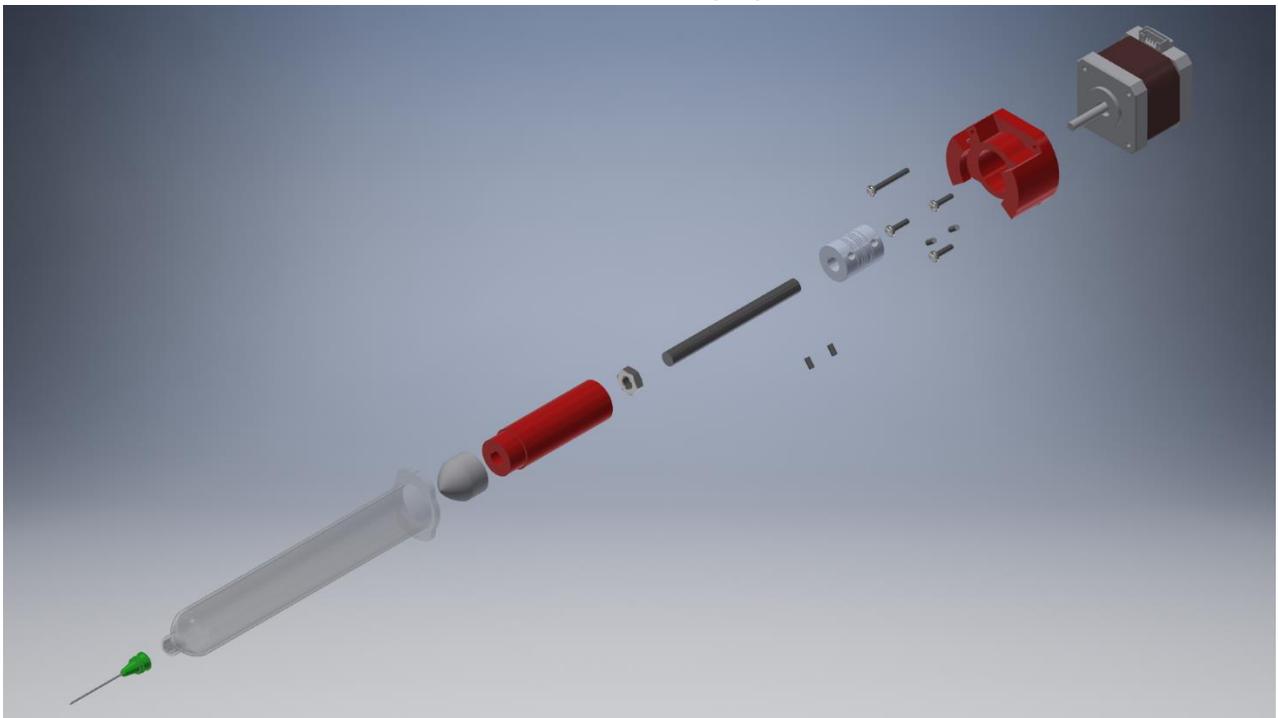


Figura 36. Diseño de prototipo dispensador programable.

Fuente: elaboración propia.

4.3 Programa de control de dosificación

Para el desarrollo del control del sistema dosificador, uno de los puntos críticos es el control del motor a pasos, se debe especificar primeramente el controlador utilizado para dicho fin. Para ello se evaluó la utilización de controles integrales o *drivers* diseñados con ese fin en específico, especialmente para el control de motores bipolares como el Motor Nema 17 que se utilizó en el prototipo, con una tensión nominal de 12 V, y corriente de 0,33 A por bobina, además de un torque de 0,23 Nm. (Mercury Motor, n.d.)

Para esto se decidió utilizar un *driver* MKS DRV8825, basado en el controlador DRV8825 como una solución integrada de control para motores a pasos de tipo bipolar, posee dos puentes-H y un control preciso del motor a partir de una interfaz de entradas STEP/DIR, STEP es la entrada para definir la cantidad de pasos que el motor se accionará mediante un tren de impulsos, mientras que DIR indica la dirección de rotación según el estado binario de la entrada. El controlador es capaz de manejar una corriente de hasta 2,5 A por salida a 24 V de alimentación, y posee un rango de alimentación para el motor de 8,2 V a 45 V (Texas Instruments Incorporated, 2014), ideal para el motor utilizado en el prototipo.

De esta forma se definió la cantidad de pasos como el número de pulsos necesarios para dispensar una cantidad específica de soldadura, la conexión mínima necesaria para realizar el control de los motores a pasos se muestra en la Figura 37.

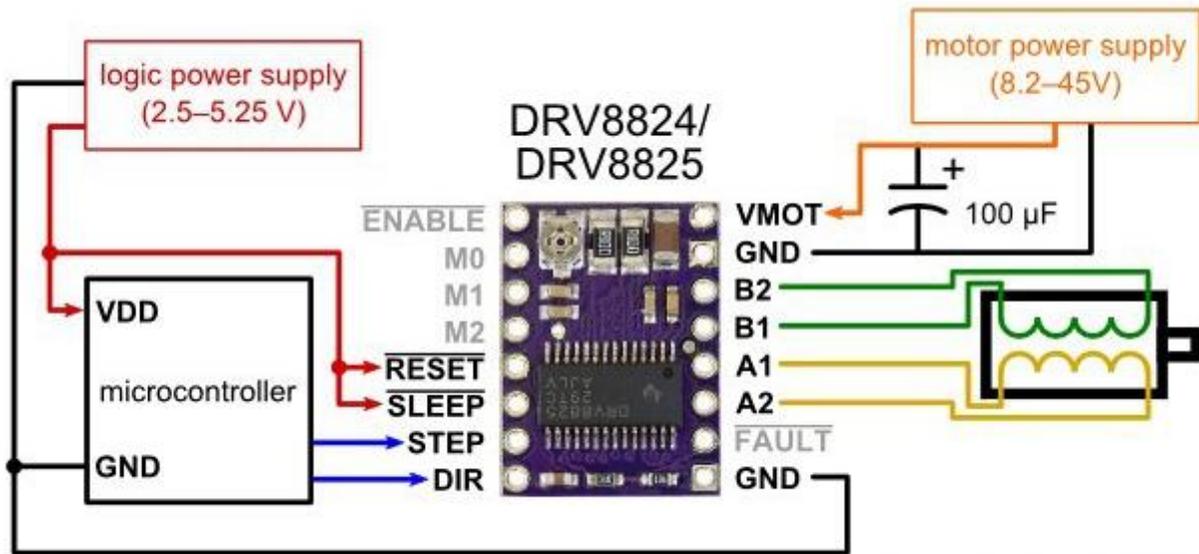


Figura 37. Conexión para realizar control de motor a pasos con *driver* DRV8825.

Fuente: (RepRap, 2015)

A partir de esto se puede definir la cantidad de pasos necesarios para realizar un depósito específico de soldadura, según los cálculos de resolución del dispositivo realizados en la sección anterior 4.2 estructura mecánica del dispensador. De esta manera se definen los contadores y temporizadores en la programación del sistema, por ejemplo, para definir 600 mg de pasta a dispensar en el caso de la soldadura C-715 se establecerá un contador de 100 que representa la cantidad de pasos necesarios para lograr un depósito de dicha cantidad y los temporizadores para generar un tren de impulsos según la resolución obtenida de 6 mg de soldadura.

Siguiendo la línea descrita en la Figura 25 para el diagrama de flujo del programa dosificador y considerando las instrucciones descritas en la sección 3.3 diseño programático, se generó la programación en el *software* *RSLogix*, tomando como base las aplicaciones de soldadura para las piezas número 6615 y 4768, y los resultados obtenidos del diagnóstico realizado. La asignación de variables se detalla en la Tabla 18, indicando los aspectos claves de como el código y su respectiva etiqueta, además de una descripción de la función que cumple en el programa y el tipo de dato que emplea la variable.

Tabla 18. Asignación de variables en el PLC.

Fuente: elaboración propia.

Código	Etiqueta	Descripción	Tipo de dato
O:0/0	SALIDA_PULSO	Salida del tren de impulsos para controlador motor	O0 - OUTPUT
O:0/1	DIRECCION	Salida de selección dirección para controlador motor	O0 - OUTPUT
I:0/0	INPUT_ACTIVACION	Entrada para enviar señal de activación	I1 - INPUT
B3:0/0	MEM_PULSADO	Bit para guardar estado de la entrada de activación	B3 - BINARY
B3:0/1	SENAL_PARO	Bit para guardar estado de final de aplicación	B3 - BINARY
B3:0/2	SELECCION_MULTIPLE	Bit utilizado para seleccionar piezas con más de una aplicación	B3 - BINARY
B3:0/3	SELECCION_DIR	Bit utilizado para seleccionar la dirección de giro	B3 - BINARY
T4:0	GENERADOR_PULSOS	Primer temporizador para generar tren de impulsos	T4 -TIMER
T4:1	PULSOS_DISPENSADO	Temporizador utilizado para la salida de pulsos para controlador motor	T4 -TIMER
C5:0	PASOS_GENERAL	Contador de pasos límite de dispensado	C5 - COUNTER
C5:1	PASOS_DISPENSADO	Contador donde se almacenan la cantidad de pasos para dosificador	C5 - COUNTER
C5:2	APLICACIONES_4768_1	Contador para las primeras 3 aplicaciones de la pieza número 4768	C5 - COUNTER
C5:3	PASOS_DISPENSADO_2	Contador donde se almacenan la cantidad de pasos para dosificador cuando hay dos aplicaciones	C5 - COUNTER
C5:4	APLICACIONES_4768_2	Contador para las últimas 2 aplicaciones de la pieza número 4768	C5 - COUNTER

Además de la programación del PLC, se generó el programa de control por HMI de manera paralela al PLC. Como se muestra en la Tabla 18, solo existe una entrada física de señal al PLC para generar la señal de aplicación de pasta, esto debido a que la selección de piezas y, por ende, la selección de la cantidad de pasos para el dispensado

de cantidades específicas de pasta; se planificó mediante comandos en la pantalla de control HMI, por lo que ambos programas se comunican y son requeridos para el control de dosificación. El programa del HMI se desarrolló con *macros* que permiten configurar el *preset value* del PLC para el contador C5:1 PASOS_DISPENSADO según la pieza seleccionada y que dicta la cantidad de pulsos que se envían al controlador del motor, además se envía la señal B3:0/2 SELECCION_MULTIPLE en caso de seleccionar un número de pieza que tiene más de una aplicación como es el caso de 4768 y B3:0/3 SELECCION_DIR para seleccionar la dirección de giro del motor y de esa manera la dirección de empuje del émbolo.

4.3.1 Narrativa de control

Una vez que se definió el algoritmo general del programa dosificador, las entradas y salidas; se procedió con el desarrollo de una narrativa de control del sistema, que simplifica el proceso de programación al detallar el proceso de control:

Actividad:

1. Se selecciona el número de pieza en la que se desea realizar el dispensado de soldadura.
2. Según la selección realizada, se configuran los contadores para definir la cantidad de pasos equivalentes a la cantidad específica de soldadura necesaria para la aplicación de la pieza, además se activan o desactivan *bits* según la cantidad de aplicaciones que requiere la pieza.
3. El sistema entra en un modo de espera, donde se comenzará con el dispensado de la pasta una vez que se active el mecanismo de entrada (pedal o botón) y se realizará la aplicación de soldadura correspondiente. Esto provoca que el contador general se incremente y una vez finalizada la aplicación se reinician los contadores de cantidad de pasos para poder indicar e iniciar una nueva aplicación.
4. Se repite el paso anterior en caso de que no se dé una nueva selección de pieza o no se llegue al límite de pasos de dispensado.

5. Una vez que se llega al límite de dispensado, se procede a realizar una recarga del sistema mediante el botón de recarga.
6. Una vez realizada la recarga, el sistema queda listo para iniciar nuevamente el proceso de selección de pieza y comenzar el ciclo de control.

4.4 Validación del sistema

En esta subsección se detallarán las pruebas de concepto y simulaciones realizadas con el fin de cumplir con el cuarto y último objetivo específico del proyecto referente a la validación del sistema.

4.4.1 Dispensador de soldadura

Para la validación de la acción de dispensado por parte del mecanismo, se creó un prototipo para validar el funcionamiento del sistema potenciado por motor paso a paso y tornillo de potencia. De esta manera, utilizando los componentes descritos en la sección 4.2 Estructura mecánica del dispensador, se manufacturó el prototipo mostrado en la Figura 38.

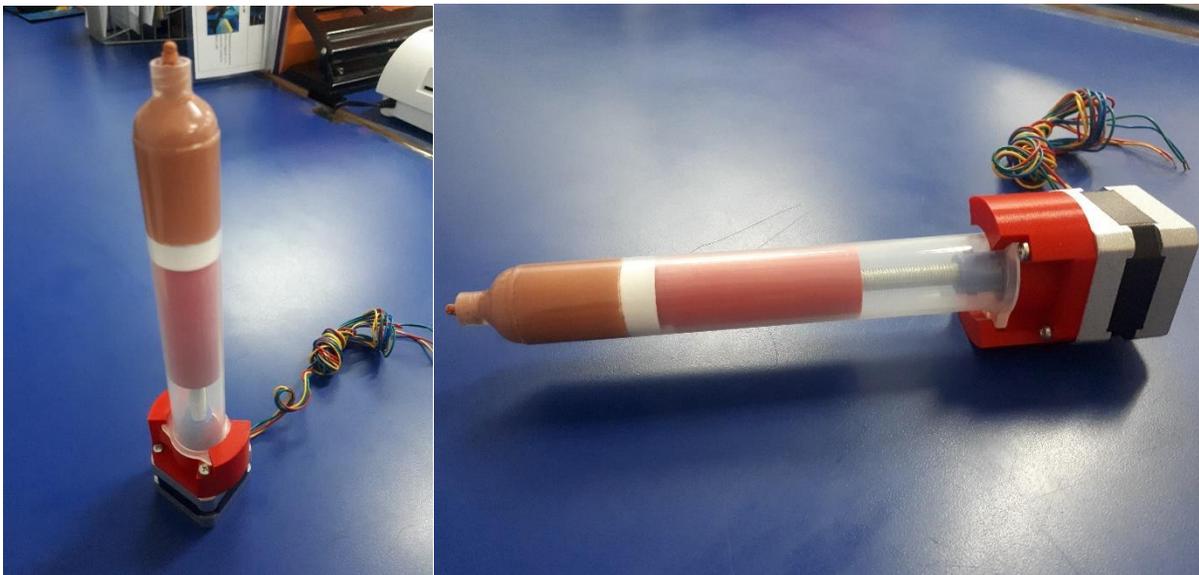


Figura 38. Prototipo dispensador de soldadura.

Fuente: elaboración propia

Para ello se realizaron pruebas de depósito para la soldadura C-715, inicialmente se realizaron mediciones para corroborar el dato de resolución teórica obtenida de 6 mg de pasta dispensada por paso accionado del motor, utilizando una metodología muy similar al proceso de diagnóstico descrito en la sección 3.5.1 planeación del trabajo experimental, se midió la masa de una cinta antes y después de realizar la aplicación de soldadura en esta, empleando la balanza analítica, tal y como se muestra en la Figura 39.

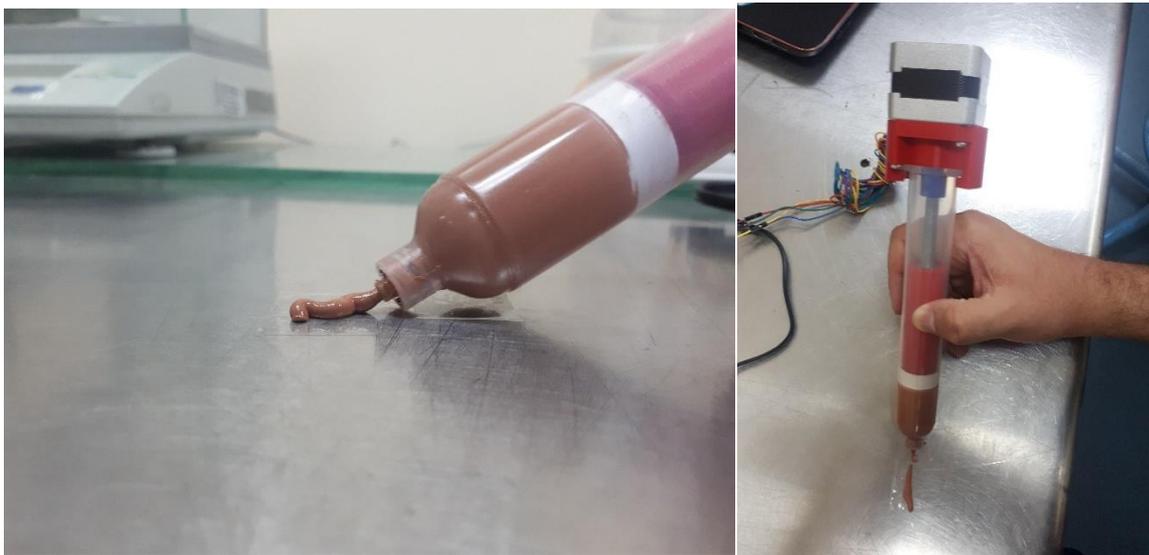


Figura 39. Pruebas de dosificación del prototipo.

Fuente: elaboración propia.

Para la prueba se definieron 100 pulsos de señal de control para el *driver* del motor a pasos como base de aplicación y por ende esperando obtener un resultado de 600 mg aplicados, además de un rango de variación esperado de ± 60 mg, es decir, un error menor al 10 % en la cantidad de pasta de soldadura aplicada. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 19.

El porcentaje de error fue calculado como se muestra a continuación:

$$\text{Resolución} = \frac{\text{Valor de soldadura obtenido}}{\text{cantidad de pulsos}}$$

$$E (\%) = \frac{|6 - \text{Resolución}|}{6} \cdot 100$$

Tabla 19. Resolución práctica del prototipo dispensador.

Fuente: elaboración propia

Numero muestra	Masa medida ($\pm 0,1$ mg)			Resolución dispensado	% Error
	Cinta	Total	Soldadura		
1	34.2	658.3	624.1	6.241	4.017
2	29.8	631.4	601.6	6.016	0.267
3	26.5	596.0	569.5	5.695	5.083
4	37.8	631.6	593.8	5.938	1.033
5	30.8	589.8	559.0	5.59	6.833
6	33.8	629.3	595.5	5.955	0.75
7	39.8	602.9	563.1	5.631	6.15
8	30.2	592.2	562.0	5.62	6.333
9	35.2	586.9	551.7	5.517	8.05
10	37.4	639.8	602.4	6.024	0.4
11	39.2	583.5	544.3	5.443	9.283
Promedio	34.1	612.9	578.8	5.8	4.4

Como se puede observar de los resultados obtenidos, el prototipo se apega en gran manera a los cálculos teóricos realizados, considerando además que la cantidad definida de 6 mg ó 0,006 g es relativamente pequeña para una aplicación, que forma la base del diseño propuesto; según las aplicaciones que se realizan en las piezas y en el proceso de *brazing* en la empresa, obteniendo una resolución práctica de 5,8 mg en promedio y un error de tan solo 4,4 %. Además, se cumple con el estimado de variación y el proceso de aplicación con el prototipo, se encuentra en los límites definidos, ejemplificado también en la Figura 40.

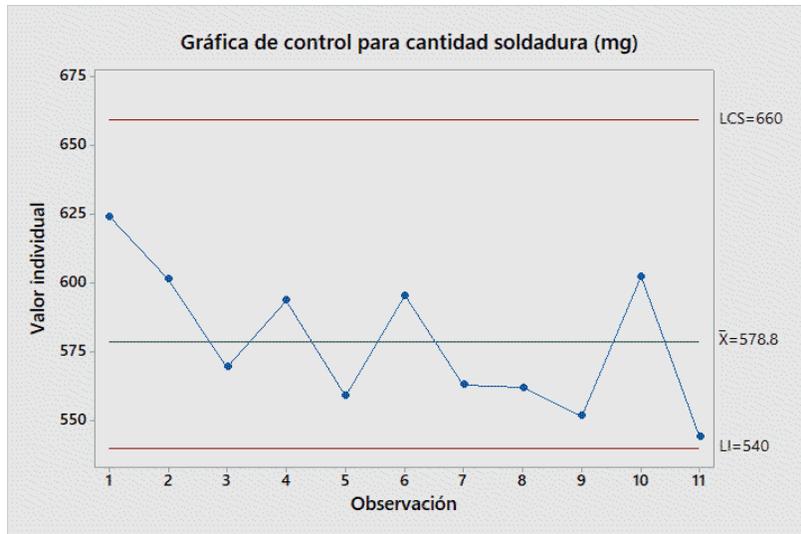


Figura 40. Gráfica de control para resolución de aplicación de soldadura del prototipo dispensador.

Fuente: elaboración propia.

A partir de los resultados anteriores, se realizó una prueba de validación más; tomando como base la cantidad intermedia de soldadura para la pieza 6615 de 635 mg, con el resultado de resolución de 5,8 mg promedio, se realizó una prueba con una muestra de 30 aplicaciones, pesando nuevamente un papel antes y después de aplicarse la pasta de soldadura, como se muestra en las Figuras 41 y 42 respectivamente.

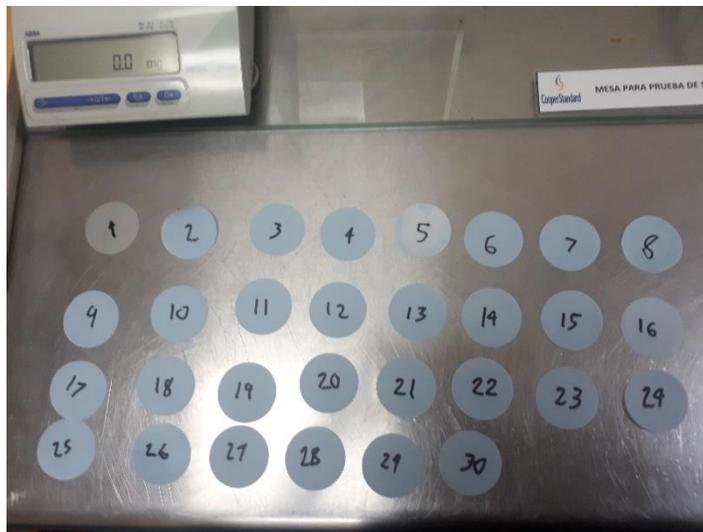


Figura 41. Preparación de muestras para prueba de validación del prototipo dispensador.

Fuente: elaboración propia.

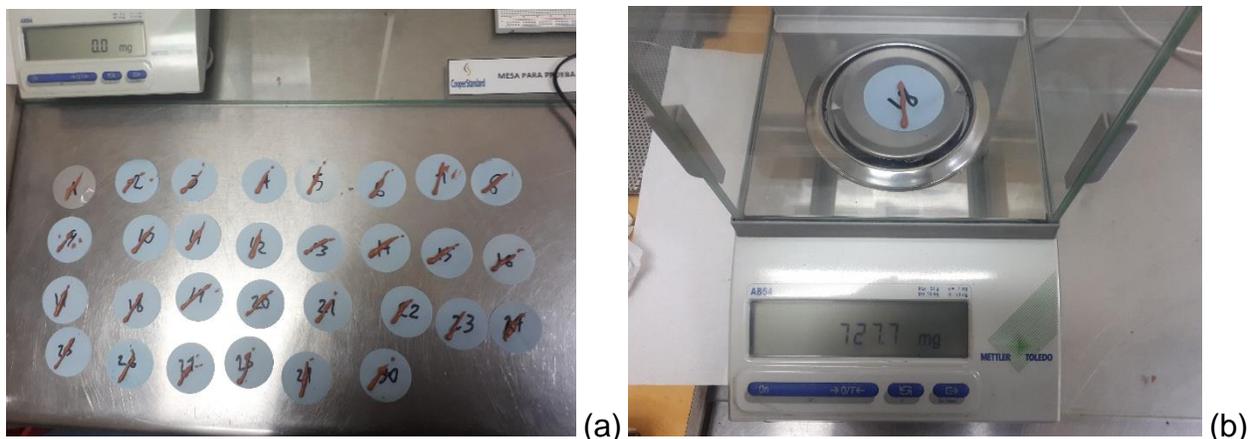


Figura 42. (a) Pruebas para validación prototipo dispensador. (b) Medición de muestras para validación prototipo dispensador.

Fuente: elaboración propia.

Se estableció el control para 108 pasos en el motor y un rango de variación esperado del 10 %, con lo que se realizaron pruebas y obtuvieron los siguientes resultados tabulados en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados prueba de validación del prototipo.

Fuente: elaboración propia.

Numero muestra	Masa medida ($\pm 0,1\text{mg}$)			% Error
	Cinta	Total	Soldadura	
1	30.5	649.8	619.3	2.47
2	122.6	718.7	596.1	6.13
3	122.9	776.8	653.9	2.98
4	123.8	780.4	656.6	3.40
5	85.0	719.7	634.7	0.05
6	122.7	895.7	773.0	21.73
7	124.4	708.3	583.9	8.05
8	85.4	786.8	701.4	10.46
9	123.1	659.2	536.1	15.57
10	122.1	815.2	693.1	9.15
11	122.8	723.7	600.9	5.37
12	123.6	886.4	762.8	20.13
13	123.8	781.2	657.4	3.53
14	122.1	827.0	704.9	11.01
15	123.2	801.7	678.5	6.85
16	126.6	793.5	666.9	5.02

17	122.4	867.4	745.0	17.32
18	122.1	727.7	605.6	4.63
19	122.0	786.7	664.7	4.68
20	124.5	750.1	625.6	1.48
21	121.7	730.3	608.6	4.16
22	124.1	858.0	733.9	15.57
23	123.5	640.0	516.5	18.66
24	122.9	836.9	714.0	12.44
25	124.3	782.2	657.9	3.61
26	83.5	765.4	681.9	7.39
27	123.7	830.9	707.2	11.37
28	123.6	766.3	642.7	1.21
29	124.0	858.6	734.6	15.69
30	126.2	830.1	703.9	10.85
Promedio	116.4	778.5	662.1	8.7

Como se evidencia de las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, se puede afirmar que el diseño cumple con las especificaciones establecidas y como consecuencia, se confirma el buen funcionamiento del sistema y su capacidad para dosificar el dispensado de soldadura en los niveles requeridos para su aplicación en el proceso productivo de la empresa.

Además de esto, se realizó una prueba inicial del prototipo en conjunto con el departamento de seguridad de la empresa, donde se indicó que el prototipo no presenta aspectos de riesgo importantes y cumple con la eliminación del factor tensión que los operarios deben ejercer en el método manual de aplicación de soldadura, además de esto se reduce considerablemente el peso del dispositivo, ya que las botellas de aplicación manual pesan alrededor de los 700 mg, mientras que el dispositivo cargado pesa cerca de los 350 mg. No existen entonces problemas importantes en el diseño, sin embargo, por cuestiones de norma y procedimientos en la empresa el diseño se debe de validar por cuestiones de peso y el impacto que genera en la persona que lo utiliza en el caso de que se quiera implementar en el proceso productivo.

4.4.2 Validación programa de control y monitoreo para dosificador

En cuanto al sistema programable para el control de dosificación, se realizaron pruebas a manera de simulaciones para constatar el funcionamiento correcto del diseño programático.

Según lo establecido en la sección 4.3 Programa de control para dosificador, se debe seleccionar la pieza en la pantalla del HMI, primeramente, hay una pantalla inicial tal cual aparece en la Figura 43. Mediante el botón “Selección de pieza” se despliega un menú, en este caso con los números de pieza tratados a fondo en el proyecto, la pieza número 6615 y la pieza número 4768, como se muestra en la Figura 44.

Una vez seleccionado el número de pieza, se muestra una nueva pantalla con un botón de “Set” para realizar la selección de la pieza y enviar los datos del HMI al PLC, “Reset” para cancelar la selección y “Recarga” que permite indicar una dirección inversa en el movimiento del motor para retraer el pistón de aplicación de la jeringa; al enviar la señal al PLC que realiza la comunicación con los *drivers* del motor.

Para efectos de la prueba se muestra en la simulación también la lectura del espacio de memoria del PLC que contiene el *preset value* del contador C5:1 PASOS_DISPENSADO, es decir, el lugar donde se almacenan los pulsos necesarios para generar la cantidad de pasos establecidos, en la Figura 45 se muestra la pantalla una vez seleccionada la pieza, donde se da la lectura del espacio de memoria para el contador establecido según el número de pieza 6615.

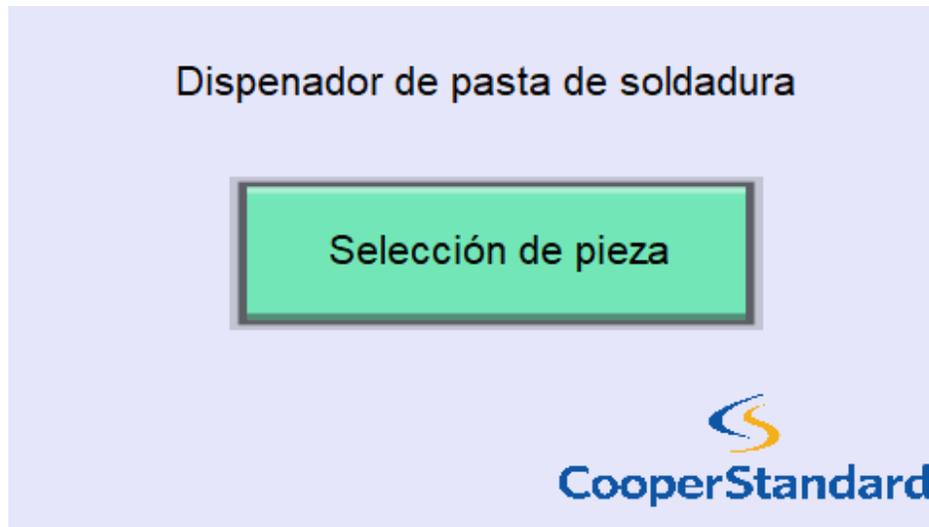


Figura 43. Pantalla inicial sistema monitoreo dosificadora.

Fuente: elaboración propia.



Figura 44. Pantalla de selección de pieza.

Fuente: elaboración propia

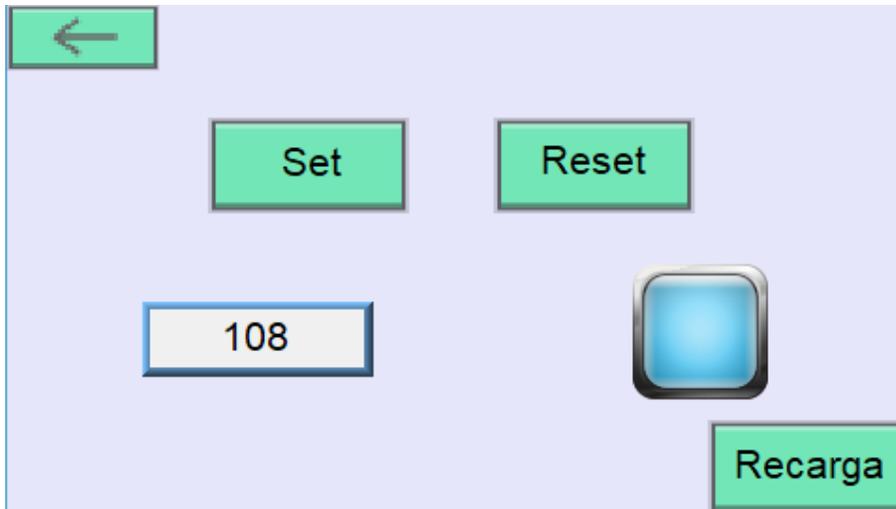


Figura 45. Pantalla donde se fijan los parámetros del PLC además de la lectura del contador para número de pieza 6615.

Fuente: elaboración propia

A partir de estas pruebas se verifica el funcionamiento del sistema de comunicación entre HMI y PLC además de poder controlar el proceso desde una pantalla de monitoreo de la manera que fue propuesto. Es importante recordar que el diseño se realizó tomando en cuenta las diferentes recomendaciones presentes en la norma ISA 101 como se mencionó en la subsección 2.7.3 Sistema de monitorización e interfaz.

Es importante recalcar que la recarga del dispositivo es manual, y el botón en pantalla permite realizar dicha recarga debido a que solo se utiliza para devolver el pistón mediante un movimiento inverso del motor al realizado normalmente para dispensar.

4.5 Análisis económico

En cuanto al análisis del proyecto desde el enfoque económico, existen diversos métodos que permiten analizar y comprobar la viabilidad de este, sin embargo, se opta por la utilización de los indicadores económicos desarrollados en la sección 2.8 del mismo nombre, ya que permiten integrar aspectos de carácter temporal, riesgo y rendimiento en el análisis, que además permitan probar si el proyecto es afín con los objetivos de Cooper Standard.

El primer paso realizado en el análisis económico fue la investigación y tabulación de los diferentes costos del proyecto como lo son materiales y componentes necesarios para la elaboración de un primer prototipo funcional, listados en la Tabla 26 sobre la inversión por costos directos y la Tabla 27 sobre costos indirectos y el total de inversión en la sección 8 de Anexos.

El valor total de la inversión ronda los \$ 2000, contemplando tanto costos indirectos como los costos directos. Esto es, considerando las licencias corporativa para el *software* de programación para los PLC, cuyo valor estimado es de aproximadamente \$1200, es decir, sin tomar en cuenta dicha licencia que se encuentra disponible en la empresa, el proyecto requiere de una inversión aproximada de \$ 800, comparando la propuesta de diseño con otras estaciones comerciales de dosificación como lo son la *Nordson Performus X*, que rondan los \$ 2300 a \$ 2500 (Nordson EFD, 2018) que ya han sido cotizados en Cooper Standard, se contempla un ahorro de hasta el 34 % en el mejor de los casos. Es importante destacar que para estas estaciones comerciales no se tiene acceso a la programación o códigos fuente que permitan realizar un control robusto de la dosificación a la hora de aplicar soldadura, además de que se basan en el principio neumático que presenta diversas desventajas respecto al principio mecánico de dispensado como se discutió en el apartado 3.2 diseño del mecanismo dispensador.

Por su parte, a la hora de realizar el análisis de flujos netos de efectivo del proyecto, mostrado en la Tabla 27 en la sección de Anexos del documento, se realizó una proyección de 6 años de uso, por lo que se tomó en cuenta la depreciación de los componentes más costosos luego de dicho período, principalmente los PLC que rondan cerca de los \$ 350, además de tomar en cuenta la vida útil del equipo que se encuentra ligada al uso del PLC y el motor a pasos, razón por la que se toma una vida útil de aproximadamente 10 años, estándar para este tipo de componentes electrónicos.

Un dato de gran importancia sobre el flujo efectivo neto del proyecto, que respalda la realización de este, es la utilidad que generará este proyecto por año a la empresa Cooper Standard. Analizando únicamente los beneficios de seguridad y ergonómicos al eliminar los movimientos repetitivos de la aplicación manual, se espera eliminar las

lesiones provocadas a los operarios de los hornos a la hora de aplicar la pasta de soldadura. Estos problemas han generado incluso incapacidades de hasta más de un mes, incluyendo 3 casos recientes ocurridos en la empresa. Con base en estimaciones realizadas en conjunto con el departamento de seguridad de la empresa, se definen los beneficios a la hora de eliminar o reducir dichos problemas.

Finalmente, considerando los puntos expuestos en esta subsección, se realizan todos los cálculos necesarios para encontrar el flujo neto de efectivo del proyecto, incorporándolos en la Tabla 27.

A partir del cálculo de dicho flujo y utilizando la herramienta de Microsoft Excel con fórmulas prediseñadas, basadas en las ecuaciones y conceptos desarrollados en la sección 2.8 Indicadores Económicos del Marco Teórico, se realizaron los cálculos para los indicadores económicos VAN, TIR e IR, dichos resultados se pueden observar en la Figura 46 como un fragmento de la Tabla 27 presente en la sección de Anexos del documento.

VALOR ACTUAL NETO (VAN)	\$60.72
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	25.231%
INDICE DE DESEABILIDAD (ID)	1.03

Figura 46. Indicadores económicos resultantes del proyecto.

Fuente: elaboración propia.

Una vez calculados estos indicadores, y según la teoría desarrollada en la sección 2.8 del documento, se puede observar que todos los indicadores dan resultados favorables a la implementación del proyecto. El índice de rentabilidad o deseabilidad es mayor a uno que a su vez respalda el resultado del valor actual neto; el cual es mayor a cero y da razón suficiente para indicar que el proyecto es viable y puede aceptarse desde la óptica económica.

Por su parte, la tasa interna de retorno es de aproximadamente un 25 %, lo cual al comparar con la tasa de descuento del 24% utilizada en los cálculos; este valor de TIR es mayor a dicha tasa de descuento, lo cual permite concluir igualmente con que el

proyecto es viable y puede ser aceptado desde la perspectiva económica ya que resulta financieramente atractivo.

5. Conclusiones y recomendaciones

En esta sección, se describen las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas conforme el desarrollo y duración de todo el proyecto.

5.1 Conclusiones

Conclusiones objetivo específico 1.

1. A partir del desarrollo del diagnóstico, se logró identificar los puntos más críticos en la implementación actual de la aplicación de pasta de soldadura en el proceso productivo de la empresa. Estos puntos críticos fueron un pivote de gran importancia en el subsecuente desarrollo del proyecto.

2. Se definieron las variables más significativas estadísticamente en el proceso productivo, específicamente para la cantidad de soldadura que el dispositivo debe ser capaz de dispensar, lo que se tomó como base para establecer las especificaciones del prototipo final de dispensado.

Conclusiones objetivo específico 2.

3. Se generaron diferentes soluciones para el dispensado de pasta de soldadura, que se adaptara a las necesidades actuales de la empresa, basándose en el diseño en ingeniería a la vez que se definió la solución más adecuada mediante criterios objetivos.

4. Se diseñó un prototipo de mecanismo de dispensado, buscando atacar directamente la problemática encontrada de variación en la aplicación y el aspecto ergonómico.

Conclusiones objetivo específico 3.

5. Se logró establecer las pautas básicas para realizar el control de dosificación según el mecanismo diseñado, que permite regular la cantidad de soldadura con alta precisión de 6 mg de resolución de dispensado para las piezas analizadas en el proyecto.

6. Se diseñó un sistema de monitorización en tiempo real para la aplicación y control del dosificador, basado en HMI.

Conclusiones objetivo específico 4.

7. Se realizaron pruebas de concepto que constataron el funcionamiento colectivo del sistema dispensador propuesto, unificando la solución y validándola al mismo tiempo, logrando crear un prototipo que cumple con las especificaciones establecidas y se apega al diseño propuesto.

8. A partir de las simulaciones realizadas, se obtuvieron resultados positivos en el 100% de las pruebas realizadas de la implementación para la función de monitorización y control para el sistema de dosificación.

5.2 Recomendaciones

Al Departamento de Ingeniería de Cooper Standard

1. Debido al proceso iterativo de diseño, además de la revisión realizado en conjunto con el departamento de seguridad, se propone la utilización de componentes más livianos en el dosificador que permitan disminuir aún más la afectación provocada por el factor peso en la utilización del dispositivo. Lo anterior se puede lograr, por ejemplo, al utilizar un motor a pasos de las mismas características pero que su masa sea menor, por ejemplo.

2. Como extensión del proyecto y en línea con el mejoramiento continuo del dispositivo y el sistema de aplicación de soldadura, se propone también la elaboración de un mecanismo que permita soportar el sistema dosificador, de manera que este se mantenga en posición con ayuda de una sujeción que permita retraer el sistema y soporte

todo el peso de este, de esta manera se puede continuar mejorando en el factor peso por la utilización del dispositivo.

3. Con base en las observaciones realizadas en la revisión en conjunto con el departamento de seguridad del dispositivo, una posible mejora al diseño es acoplar una especie de agarre a la jeringa, ya sea de goma u otro material que permita mejorar el soporte del usuario que se tiene al sujetar y utilizar el dispositivo.

4. Se propone continuar con el proyecto y establecer las cantidades de soldadura para las piezas restantes en caso de que se desee implementar el diseño de dispensador en el proceso productivo de la empresa, debido a la naturaleza abierta de la programación es posible realizar modificaciones y comenzar a agregar nuevos niveles de dispensado para cantidades específicas de soldadura, según los requerimientos definidos para cada número de pieza.

6. Bibliografía

- Abbott Furnace. (2018). Brazing Fundamentals and Sinter Brazing. *Abbott Continuous Furnance Symposium*.
- APB Consultants. (2017). IATF 16949:2016 Automotive Quality Management System. Retrieved from <http://isoconsultantpune.com/iatf-169492016-automotive-quality-management-system/>
- Bertomeu, J., Garcia, J., Gardonio, S., Gomez, M., & Granados, F. (2015). *Motor paso a paso*. Retrieved from http://www1.frm.utn.edu.ar/mielectricas/docs2/PaP/MOTOR_PaP_FINAL.pdf
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2009). Shigley's Mechanical Engineering Design, Ninth Edition. *McGraw Hill Inc*.
- Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., & Turner, R. H. (2017). *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*.
- Cooper Standard. (2019). About us. Retrieved from <https://www.cooperstandard.com/>
- García, V. (2016). *El Puente-H (H-Bridge)*. Retrieved from <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/el-puente-h-h-bridge>
- Gitman, L. J., & Zutter, C. (2012). Principios de administración financiera. In *Pearson Educación* (Vol. 12). <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- González Fernández, V. R. (2002). Motores paso a paso (step/stepper/stepping motors). Retrieved from Universidad de Valladolid website: http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/cyr_01/robotica/sistema/motores_p-p.htm
- Gutierrez, H., & De la Vara, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos. In *Mc Graw-Hill Interamericana*. <https://doi.org/10.3906/sag-1507-147>
- Hawrylo, M. E. (2015). ISA101, Human-Machine Interfaces - ISA. *International Society of Automation*. Retrieved from <https://www.isa.org/isa101/>
- Hernández Bello, I. I., & Ochoa Luna, C. (2004). *Control difuso y construcción de un mecanismo capaz de golpear con distintos efectos una bola de billar*. Retrieved from http://caterina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_b_iihttp://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/cyr_01/robotica/sistema/motores_p-p.htm
- Höganäs AB. (2019). Brazing paste application methods. Retrieved from <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/high-temperature-brazing/brazing-paste-application-methods/>
- Hutching Automotive Products. (2019). Quiénes somos, historia, misión y visión.

- Retrieved from <https://hap-cr.com/who-we-arehistory/>
- Integrated Dispensing Solutions Inc. (2019a). Dispensing Solder Paste. Retrieved from <https://www.dispensinglink.com/dispensing-solder-paste.html>
- Integrated Dispensing Solutions Inc. (2019b). Syringe Dispensers. Retrieved from <https://www.dispensinglink.com/dispensers.html>
- Jennings, I. (2017). *Rotary Auger Valves - Pros and Cons*. Retrieved from <http://www.techconsystems.com/images/companies/pdf/articles/Techcon-Rotary-Valve-Article.pdf>
- José Carlos, Q.-Q., Ernesto, F.-G., Víctor, Q.-A., & Jorge, B.-L. (2014). Diseño e implementación de un sistema de control y monitoreo basado en HMI-PLC para un pozo de agua potable. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(1), 41–50. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(15\)30005-6](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(15)30005-6)
- Khandani, S. (2005). Engineering Design Process. *IISME Solectron*, (August), 1–24.
- Kymera International. (2018a). *TECHNICAL DATA SHEET CUBOND® FURNACE BRAZING PASTES GRADE C-699* (pp. 5–6). pp. 5–6.
- Kymera International. (2018b). *TECHNICAL DATA SHEET CUBOND® FURNACE BRAZING PASTES GRADE C-715* (pp. 5–6). pp. 5–6.
- Kymera International, & Belman Melcor. (2019). Furnace Brazing Fundamentals. *Abbott Continuous Furnance Symposium*.
- Lucas Mihaupt. (2014). Técnicas y consejos de soldadura Fuerte (Brazing). Retrieved from <http://www.emagister.com/curso-soldadura-fuerte-brazing/eleccion-material-aporte>
- Meléndez Poltronieri, R. (2019). Análisis económico: Indicadores financieros. *Área Académica Ingeniería Mecatrónica Formulación de Proyectos*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Mercury Motor. (n.d.). *Stepper Nema 17 Datasheet*.
- Minitab LLC. (2019). Interpretar los resultados clave para Analizar diseño factorial. Retrieved from <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/factorial/analyze-factorial-design/interpret-the-results/key-results/>
- Moreno Tolentino, A. M., & Velázquez Goyri, O. (2007). Diseño detallado de una máquina exprimidora de naranjas (Vol. 66). Universidad de las Américas Puebla.
- NEORS. (2013). Process Control Narratives. *Process Control and Automation System Design Standards, 0.0*.

- Nordson EFD. (2003). *Auger Valve Dispensing*. 1–5. Retrieved from https://smtnet.com/library/files/upload/EFD_-_Auger_Valve_Dispensing.pdf
- Nordson EFD. (2018). *Performus X Series Dispensers Operating Manual*. Retrieved from https://azcscxpprodcn.azureedge.net/-/media/Files/Nordson/efd/Products/Manuals/Fluid-Dispensers/Air-Powered/Nordson_EFD_Performus_X_Operating_Manual.pdf?la=en&rev=1be7643d1f2642fb997f7a4891c83c01
- Nordson EFD. (2019). *Ultimus I-II Dispensers Operating Manual*. Retrieved from https://azcscxpprodcn.azureedge.net/-/media/Files/Nordson/efd/Products/Manuals/Fluid-Dispensers/Air-Powered/Nordson_EFD_Ultimus_I_II_Operating_Manual.pdf?la=en&rev=263a58a351e74f4992a26c6279995607
- Oerlikon Metco. (n.d.). An Introduction to Brazing. *BRO-0010.4*, (4). Retrieved from https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_BRO-0010.4_Introduction_to_Brazing_EN.pdf
- Pilaguano Gavilanez, L. E. (2016). Diseño e implementación de un módulo didáctico con variador de frecuencia como fuente de ahorro de energía en el laboratorio de máquinas eléctricas de la universidad técnica de cotopaxi extensión la maná, año 2015. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- RepRap. (2015). MKS DRV8825. Retrieved from https://reprap.org/wiki/MKS_DRV8825
- Rockwell Automation. (n.d.). *Module 4 - Timing, counting and data-handling instructions*. 1–36.
- Rockwell Automation. (2015). *MicroLogix1000 User Manual*.
- Tanco, M., Viles, E., Ilzarbe, L., & Álvarez, M. J. (2007). Manufacturing industries need Design of Experiments (DoE). *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2166(1), 1108–1112. Retrieved from http://www.iaeng.org/publication/WCE2007/WCE2007_pp1108-1112.pdf
- Texas Instruments Incorporated. (2014). *DRV8825 Stepper Motor Controller IC*. Retrieved from www.ti.com
- UNED. (2011). Controladores Lógicos Programables (PLC). Retrieved from http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_ISE6_1_2.pdf
- Unitronics. (2019). What is the definition of “PLC”? Retrieved from <https://unitronicsplc.com/what-is-plc-programmable-logic-controller/>
- Universidad de la Costa C.U.C. (2015). *Práctica de laboratorio: Interfaces Máquina*

Humano. Facultad de ingeniería electrónica.

7. Apéndices

7.1 Especificaciones de elementos roscados para diseño

Tabla 21. Diámetros y áreas de roscas métricas de paso grueso y fino*.

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2009)

Diámetro mayor nominal d , mm	Serie de paso grueso			Serie de paso fino		
	Paso p , mm	Área de esfuerzo de tensión A_t , mm ²	Área del diámetro menor A_r , mm ²	Paso p , mm	Área de esfuerzo de tensión A_t , mm ²	Área del diámetro menor A_r , mm ²
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	2	115	104	1.5	125	116
16	2	157	144	1.5	167	157
20	2.5	245	225	1.5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3.5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4.5	1 120	1 050	2	1 260	1 230
48	5	1 470	1 380	2	1 670	1 630
56	5.5	2 030	1 910	2	2 300	2 250
64	6	2 680	2 520	2	3 030	2 980
72	6	3 460	3 280	2	3 860	3 800
80	6	4 340	4 140	1.5	4 850	4 800
90	6	5 590	5 360	2	6 100	6 020
100	6	6 990	6 740	2	7 560	7 470
110				2	9 180	9 080

* Las ecuaciones y los datos utilizados para elaborar esta tabla se obtuvieron de la norma ANSI B1.1-1974 y B18.3.1-1978. El diámetro menor se determinó mediante la ecuación $d_r = d - 1.226869p$, y el diámetro de paso a partir de $d_{pp} = d - 0.649519p$. La media del diámetro de paso y el diámetro menor se usaron para calcular el área de esfuerzo de tensión.

Tabla 22. Diámetros y áreas de roscas unificadas de tornillo UNC y UNF*.
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2009)

Designación de tamaño	Diámetro mayor nominal	Serie gruesa-UNC			Serie fina-UNF		
		Roscas por pulgada, <i>N</i>	Área de esfuerzo de tensión A_r , pulg ²	Área del diámetro menor $A_{r,r}$, pulg ²	Roscas por pulgada, <i>N</i>	Área de esfuerzo de tensión A_r , pulg ²	Área del diámetro menor $A_{r,r}$, pulg ²
0	0.0600				80	0.001 80	0.001 51
1	0.0730	64	0.002 63	0.002 18	72	0.002 78	0.002 37
2	0.0860	56	0.003 70	0.003 10	64	0.003 94	0.003 39
3	0.0990	48	0.004 87	0.004 06	56	0.005 23	0.004 51
4	0.1120	40	0.006 04	0.004 96	48	0.006 61	0.005 66
5	0.1250	40	0.007 96	0.006 72	44	0.008 80	0.007 16
6	0.1380	32	0.009 09	0.007 45	40	0.010 15	0.008 74
8	0.1640	32	0.014 0	0.011 96	36	0.014 74	0.012 85
10	0.1900	24	0.017 5	0.014 50	32	0.020 0	0.017 5
12	0.2160	24	0.024 2	0.020 6	28	0.025 8	0.022 6
$\frac{1}{4}$	0.2500	20	0.031 8	0.026 9	28	0.036 4	0.032 6
$\frac{5}{16}$	0.3125	18	0.052 4	0.045 4	24	0.058 0	0.052 4
$\frac{3}{8}$	0.3750	16	0.077 5	0.067 8	24	0.087 8	0.080 9
$\frac{7}{16}$	0.4375	14	0.106 3	0.093 3	20	0.118 7	0.109 0
$\frac{1}{2}$	0.5000	13	0.141 9	0.125 7	20	0.159 9	0.148 6
$\frac{9}{16}$	0.5625	12	0.182	0.162	18	0.203	0.189
$\frac{5}{8}$	0.6250	11	0.226	0.202	18	0.256	0.240
$\frac{3}{4}$	0.7500	10	0.334	0.302	16	0.373	0.351
$\frac{7}{8}$	0.8750	9	0.462	0.419	14	0.509	0.480
1	1.0000	8	0.606	0.551	12	0.663	0.625
$1\frac{1}{4}$	1.2500	7	0.969	0.890	12	1.073	1.024
$1\frac{1}{2}$	1.5000	6	1.405	1.294	12	1.581	1.521

* Esta tabla se compiló de la norma ANSI B1.1-1974. El diámetro menor se determinó mediante la ecuación $d_r = d - 1.299\ 038p$ y el diámetro de paso a partir de $d_p = d - 0.649\ 519p$. Para calcular el área de esfuerzo de tensión se usaron la media del diámetro de paso y el diámetro menor.

7.2 Factores de conversión de unidades

Tabla 23. Factores de conversión de unidades.

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2009)

I Factores de conversión A para convertir la entrada X en el resultado Y mediante el empleo de la fórmula $Y = AX^*$

Multiplique la entrada X	Por el factor A	Para obtener el resultado Y	Multiplique la entrada X	Por el factor A	Para obtener el resultado Y
Unidad térmica británica, Btu	1055	joule, J	milla, mi	1.610	kilómetro, km
Btu/segundo, Btu/s	1.05	kilowatt, kW	milla/hora, mi/h	1.61	kilómetro/hora, km/h
caloría	4.19	joule, J	milla/hora, mi/h	0.447	metro/segundo, m/s
centímetro de mercurio (0°C)	1.333	kilopascal, kPa	momento de inercia, lbm · pie ²	0.0421	kilogramo-metro ² , kg · m ²
centipoise, cP	0.001	pascal-segundo Pa · s	momento de inercia, lbm · pulg ²	293	kilogramo-milímetro ² , kg · mm ²
grado (ángulo)	0.0174	radián, rad	momento de sección (segundo momento de área), pulg ⁴	41.6	centímetro ⁴ , cm ⁴
pie, pie	0.305	metro, m	onza fuerza, oz	0.278	newton, N
pie ² , pie ²	0.0929	metro ² , m ²	onza masa	0.0311	kilogramo, kg
pie/minuto, pie/min	0.0051	metro/segundo, m/s	libra, lbf [†]	4.45	newton, N
pie-libra, pie · lb	1.35	joule, J	libra-pie, lbf · pie	1.36	newton-metro, N · m
pie-libra/segundo, pie · lb/s	1.35	watt, W	libra/pie ² , lbf/pie ²	47.9	pascal, Pa
pie/segundo, pie/s	0.305	metro/segundo, m/s	libra-pulgada, lbf · pulg	0.113	joule, J
galón (EUA), gal	3.785	litro, L	libra-pulgada, lbf · pulg	0.113	newton-metro, N · m
caballo de fuerza, hp	0.746	kilowatt, kW	libra/pulgada, lbf/pulg	175	newton/metro, N/m
pulgada, pulg	0.0254	metro, m	libra/pulgada ² , psi (lbf/pulg ²)	6.89	kilopascal, kPa
pulgada, pulg	25.4	milímetro, mm	libra-masa, lbm	0.454	kilogramo, kg
pulgada ² , pulg ²	645	milímetro ² , mm ²	libra-masa/segundo, lbm/s	0.454	kilogramo/segundo, kg/s
pulgada de mercurio (32°F)	3.386	kilopascal, kPa	cuarto de galón (EUA), qt	946	mililitro, mL
kilolibra, kip	4.45	kilonewton, kN	módulo de sección, pulg ³	16.4	centímetro ³ , cm ³
kilolibra/pulgada ² , kpsi (ksi)	6.89	megapascal, MPa (N/mm ²)	slug	14.6	kilogramo, kg
masa, lbf · s ² /pulg	175	kilogramo, kg	ton (corta 2 000 lbm)	907	kilogramo, kg
			yarda, yd	0.914	metro, m

* Aproximado

† La unidad del sistema de uso común en Estados Unidos libra-fuerza, con frecuencia se abrevia lbf para distinguirla de la libra-masa, que se abrevia lbm.

7.3 Características mecánicas de materiales

Tabla 24. Constantes físicas de materiales.

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2009)

Material	Módulo de elasticidad E		Módulo de rigidez G		Relación de Poisson ν	Peso específico w		
	Mpsi	GPa	Mpsi	GPa		lbf/pulg ³	lbf/ft ³	kN/m ³
Aluminio (todas las aleaciones)	10.4	71.7	3.9	26.9	0.333	0.098	169	26.6
Cobre al berilio	18.0	124.0	7.0	48.3	0.285	0.297	513	80.6
Latón	15.4	106.0	5.82	40.1	0.324	0.309	534	83.8
Acero al carbono	30.0	207.0	11.5	79.3	0.292	0.282	487	76.5
Hierro fundido (gris)	14.5	100.0	6.0	41.4	0.211	0.260	450	70.6
Cobre	17.2	119.0	6.49	44.7	0.326	0.322	556	87.3
Abeto Douglas	1.6	11.0	0.6	4.1	0.33	0.016	28	4.3
Vidrio	6.7	46.2	2.7	18.6	0.245	0.094	162	25.4
Inconel	31.0	214.0	11.0	75.8	0.290	0.307	530	83.3
Plomo	5.3	36.5	1.9	13.1	0.425	0.411	710	111.5
Magnesio	6.5	44.8	2.4	16.5	0.350	0.065	112	17.6
Molibdeno	48.0	331.0	17.0	117.0	0.307	0.368	636	100.0
Metal Monel	26.0	179.0	9.5	65.5	0.320	0.319	551	86.6
Plata niquelada	18.5	127.0	7.0	48.3	0.322	0.316	546	85.8
Acero al níquel	30.0	207.0	11.5	79.3	0.291	0.280	484	76.0
Bronce fosforado	16.1	111.0	6.0	41.4	0.349	0.295	510	80.1
Acero inoxidable (18-8)	27.6	190.0	10.6	73.1	0.305	0.280	484	76.0
Aleaciones de titanio	16.5	114.0	6.2	42.4	0.340	0.160	276	43.4

Tabla 25. Coeficientes de fricción f de pares roscados.

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2009)

Material del tornillo	Material de la tuerca			
	Acero	Bronce	Latón	Hierro fundido
Acero, seco	0.15-0.25	0.15-0.23	0.15-0.19	0.15-0.25
Acero, aceite para máquina	0.11-0.17	0.10-0.16	0.10-0.15	0.11-0.17
Bronce	0.08-0.12	0.04-0.06	—	0.06-0.09

8. Anexos

8.1 Flujos de efectivo del proyecto

Tabla 26. Información general y costos directos asociados al proyecto

Fuente: elaboración propia

PROYECTO:	DISEÑO DE PROTOTIPO DE DISPENSADOR PROGRAMABLE PARA EL PROCESO DE SOLDADURA <i>BRAZING</i> EN LA SECCIÓN DE HORNOS DE LA EMPRESA COOPER STANDARD
PROPIETARIO:	COOPER STANDARD
PROFESIONAL RESPONSABLE:	JOSÉ MARIO CASTRO VÁSQUEZ
SEMESTRE	SEGUNDO 2019
DURACIÓN PROYECTO	4 MESES

COSTOS DIRECTOS

Ítem	Detalle	Subtotal (\$)
1	Paquete de agujas	10.00
2	Jeringas y pistones dispensador 55cc	27.56
3	Set relés 24 V	8.00
4	Motor <i>Stepper</i> Nema17	24.50
5	Acople motor-jeringa	3.00
6	Pistón empuje	3.00
7	Acople motor-eje	3.00
9	Varilla roscada 5/16-24	8.49
10	Tuerca 5/16-24	8.29
11	PLC <i>MicroLogix</i> 1000/1100/1200	350.00
12	Pantalla HMI Weintek MT8050iE	305.00
13	<i>Switch</i> accionador	15.00
14	Licencia corporativa software RSLogix500	1,200.00
15	<i>Power Supply</i>	10.95
16	Cables y componentes electrónicos varios	25.00
17	Driver DRV8825 motor a pasos	5.00
A. TOTAL		2,006.79

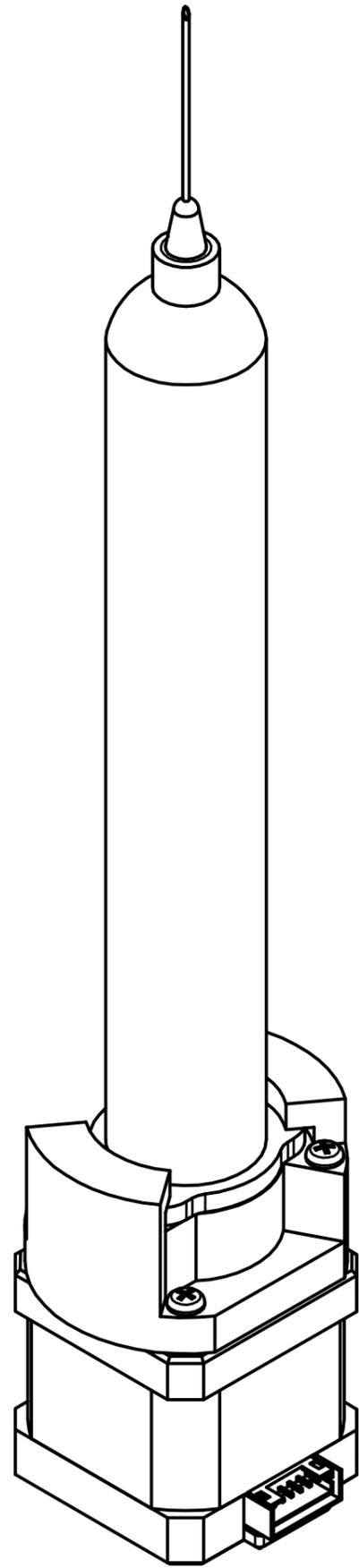
Tabla 27. Costos indirectos del proyecto y total de inversión
Fuente: elaboración propia

COSTOS INDIRECTOS

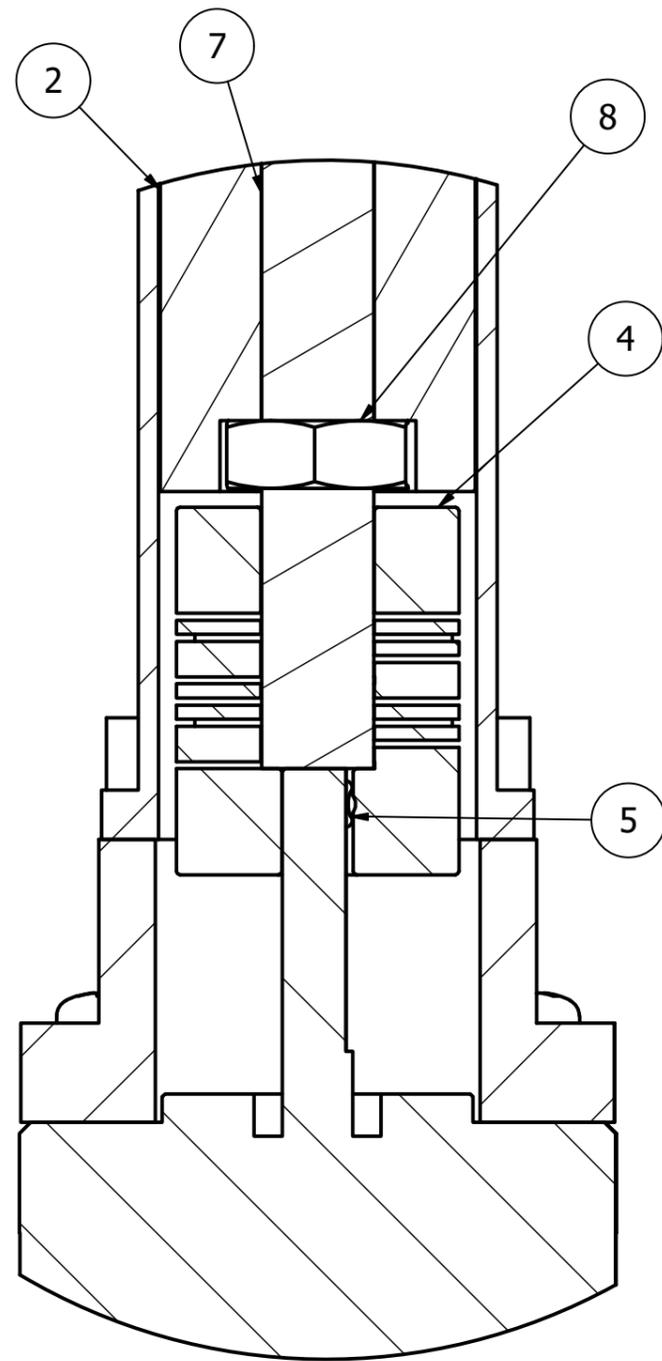
Ítem	Detalle	Subtotal (U\$)
1	Administración (juicio experto 3 %)	60.20
2	Operación y Mantenimiento (juicio experto 1 %)	20.07
B. TOTAL		80.27
TOTAL INVERSIÓN (Costos directos + costos indirectos)		2,087.06

Tabla 28. Flujo neto de efectivo del proyecto
Fuente: elaboración propia

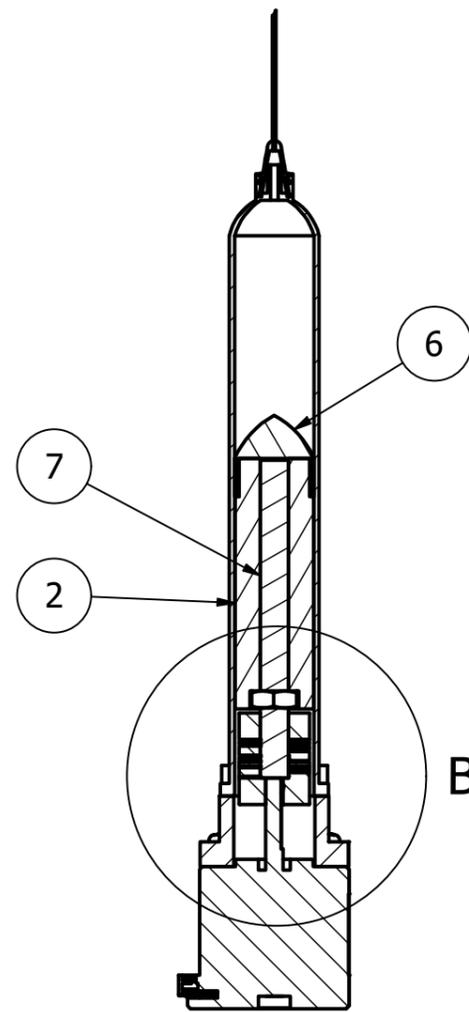
AÑOS	Prototipo Dispensador de Soldadura						
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
INVERSION INICIAL							
Equipamiento	2,087.06						
Total Inversión Inicial	2,087.06						
BENEFICIOS							
Beneficios de seguridad y ergonomía		996.00	996.00	996.00	996.00	996.00	996.00
GASTOS VARIABLES INCREM							
DEPRECIACION INCREM.							
PLC		25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Total de gastos		25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
UTILIDAD ANTES DE IMP.		971.00	971.00	971.00	971.00	971.00	971.00
IMPUESTO DE RENTA		291.30	291.30	291.30	291.30	291.30	291.30
UTILIDAD DES/IMPUES.		679.70	679.70	679.70	679.70	679.70	679.70
DEPRECIACION INCREM.							
PLC		25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
VALORES DE RESCATE							
Activos Fijos CMF							100.00
Impacto en Renta							-30.00
FLUJO NETO EFECTIVO	-2,087.06	704.70	704.70	704.70	704.70	704.70	774.70
FNE descontados (24%)	\$2,147.78						
VALOR ACTUAL NETO (VAN)	\$60.72						
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	25.231%						
INDICE DE DESEABILIDAD (ID)	1.03						



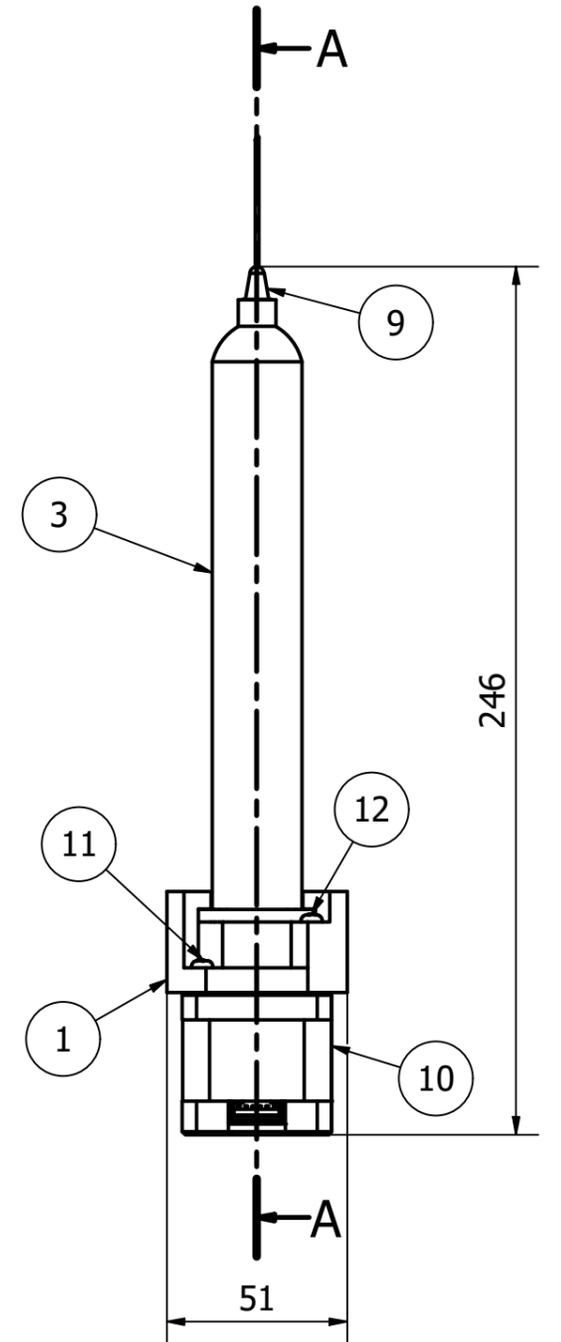
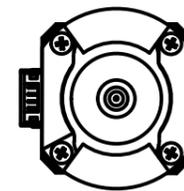
ESCALA 1:1



DETALLE B
ESCALA: 2 : 1



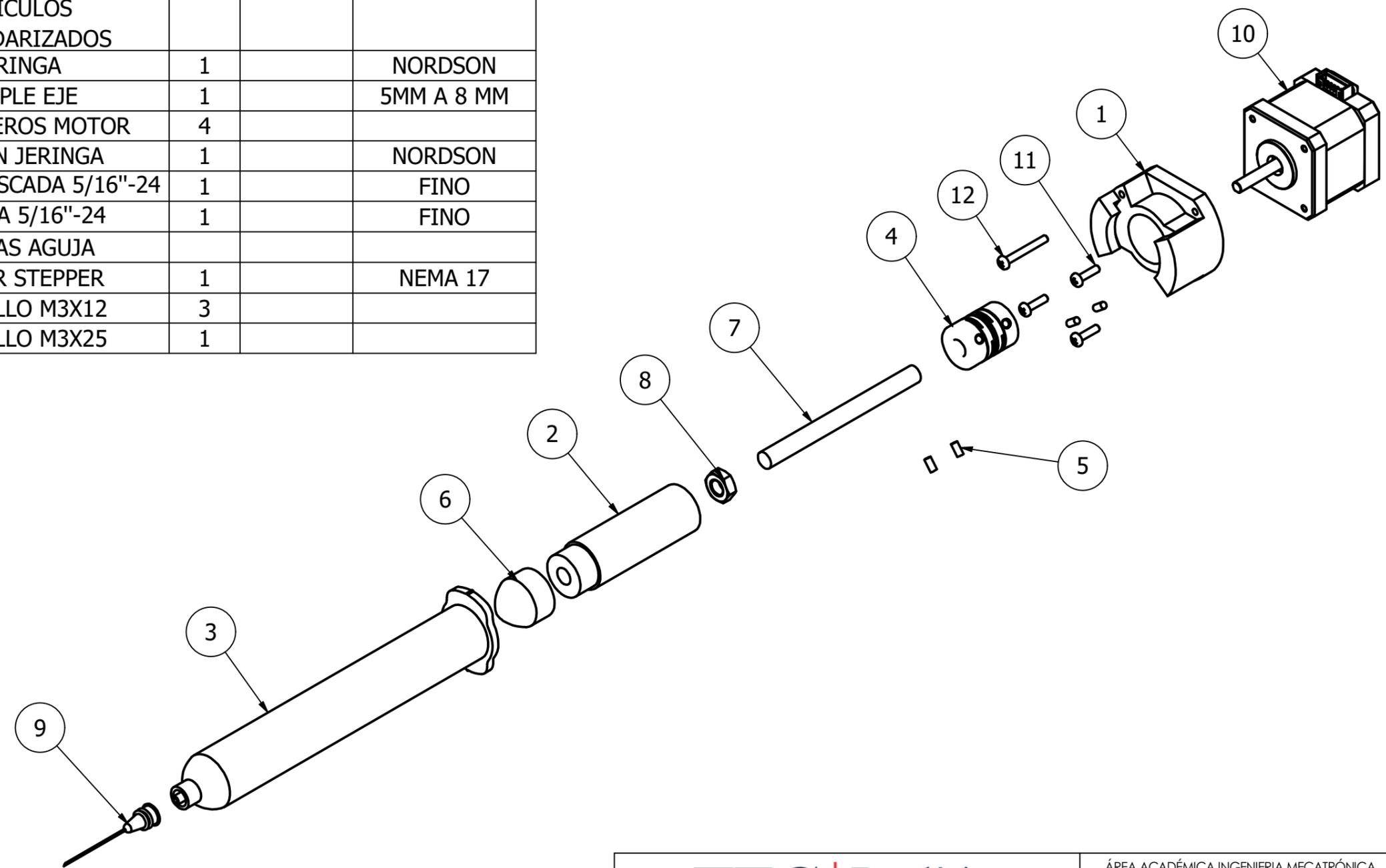
A-A
ESCALA: 1 : 2



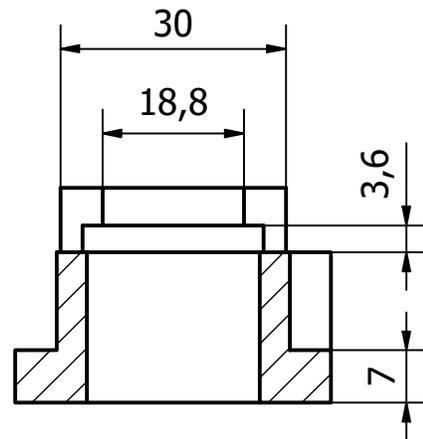
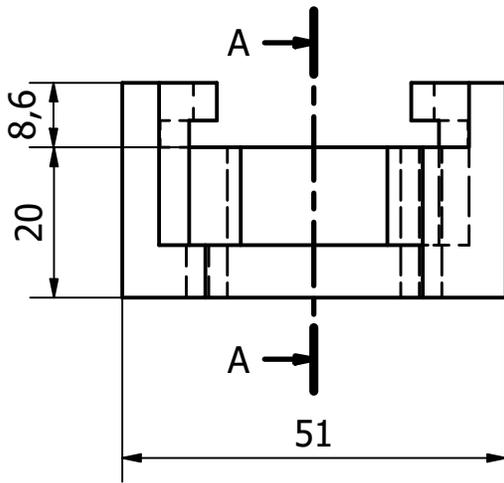
ESCALA 1:2

Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				CURSO		A
				PROYECTO FINAL GRADUACIÓN		
				DENOMINACIÓN		
				PLANO MONTAJE SISTEMA		
DIBUJ.		FIRMA		FECHA		ACABADO
VERIF.				08/10/19		MATERIAL
APROB.						TRATAMIENTO TÉRMICO
FABR.						DESIGNACIÓN
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		TOLERANCIAS GENERALES: LINEAL: X ±0.5		PESO:		PG 00.00.00
						ESCALA INDICADA
						HOJA 1 DE 4
						FORMATO A3

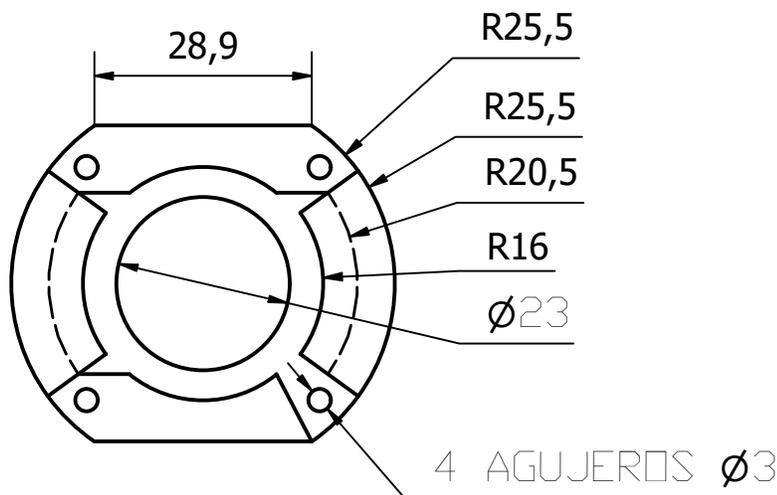
POS	DESIGNACIÓN	DENOMINACIÓN	CANT.	MATERIAL	OBSERVACIONES
		DOCUMENTACIÓN			
	PG 00.00.00	DIBUJO MONTAJE			
		PIEZAS			
1	PG 00.00.01	ACOPLE MOTOR	1	ABS	
2	PG 00.00.02	ÉMBOLO	1	ABS	
		ARTÍCULOS ESTANDARIZADOS			
3		JERINGA	1		NORDSON
4		ACOPLE EJE	1		5MM A 8 MM
5		PRISIONEROS MOTOR	4		
6		PISTON JERINGA	1		NORDSON
7		VARILLA ROSCADA 5/16"-24	1		FINO
8		TUERCA 5/16"-24	1		FINO
9		PUNTAS AGUJA			
10		MOTOR STEPPER	1		NEMA 17
11		TORNILLO M3X12	3		
12		TORNILLO M3X25	1		



 Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				CURSO		A
				PROYECTO FINAL GRADUACIÓN		
				DENOMINACIÓN		
				EXPLOSIONADO CONJUNTO		
NOMBRE		FIRMA	FECHA	ACABADO		DESIGNACIÓN PG 00.00.00
DIBUJ.			08/10/19	MATERIAL		
VERIF.				TRATAMIENTO TÉRMICO		
APROB.				PESO:		
FABR.						ESCALA 1:2 HOJA 2 DE 4
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM			TOLERANCIAS GENERALES: LINEAL: X ±0.5		FORMATO A3	



A-A
ESCALA: 1 : 1



4 AGUJEROS Ø3

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO:
PROYECTO FINAL GRADUACIÓN

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	J. CASTRO		08/10/19
VERIF.			
APROB.			
FABR.			

ACABADO GENERAL: 10
MATERIAL: PLÁSTICO ABS

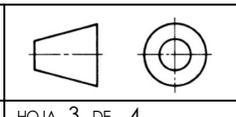
DENOMINACIÓN SOPORTE MOTOR

SI NO SE INDICA LO
CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN
EN MM

TOLERANCIAS GENERALES:
LINEAL: X ±0.5
X.X ±0.3

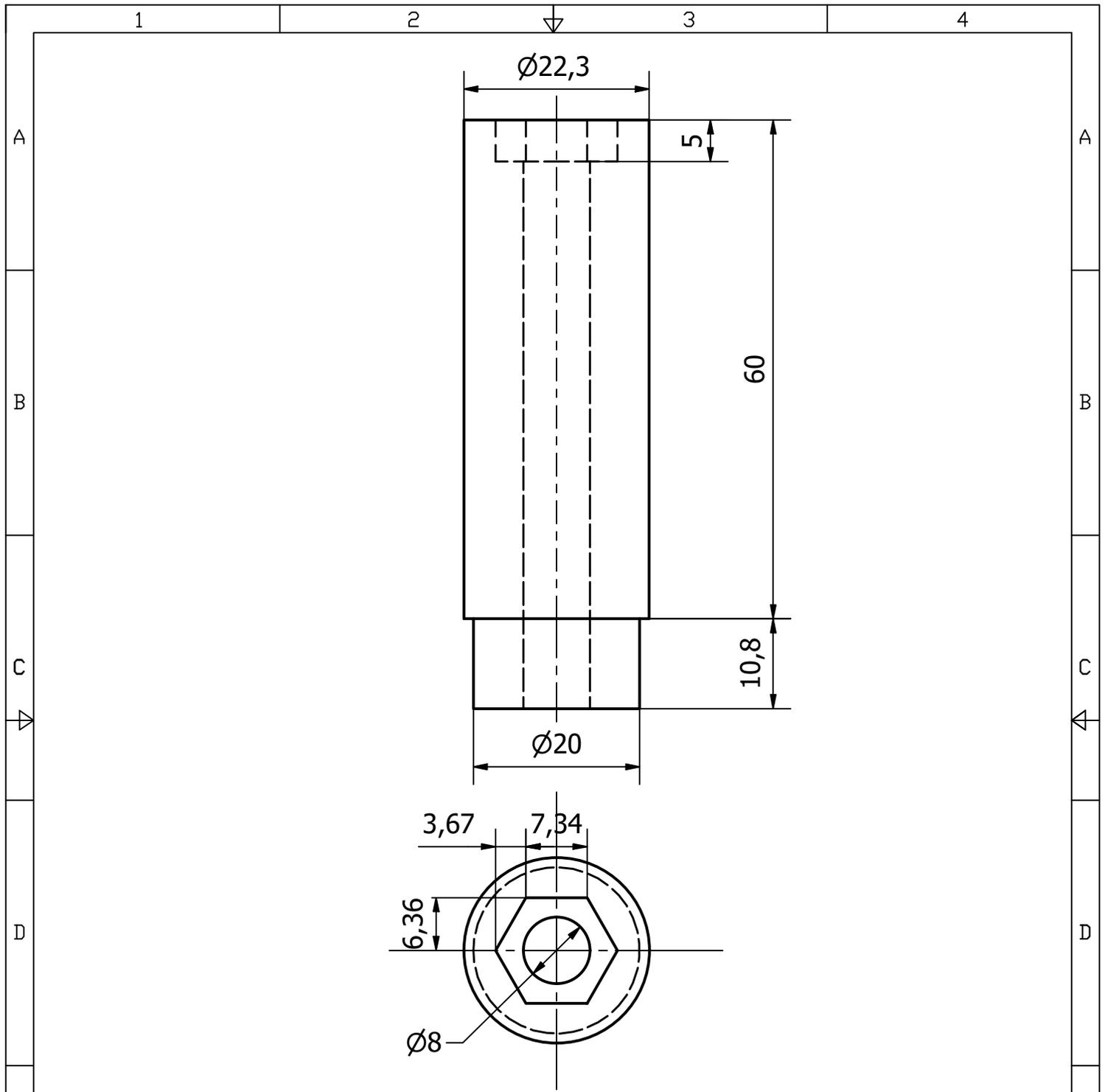
TRATAMIENTO TÉRMICO:
PESO: 27 gramos

DESIGNACIÓN:
PG 00.00.01
ESCALA: 1:1



FORMATO
CARTA

HOJA 3 DE 4



TEC | Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO:
PROYECTO FINAL GRADUACIÓN

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	J. CASTRO		08/10/2019
VERIF.			
APROB.			
FABR.			

ACABADO GENERAL: 10
MATERIAL: PLÁSTICO ABS

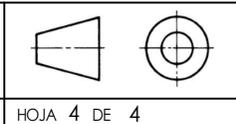
DENOMINACIÓN ÉMBOLO

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM

TOLERANCIAS GENERALES:
LINEAL: X ±0.5
X.X ±0.4
X.XX ±0.3

TRATAMIENTO TÉRMICO:
PESO: 24 gramos

DESIGNACIÓN:
PG 00.00.02
ESCALA: 1:1.5



FORMATO
CARTA
HOJA 4 DE 4