

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica



Diseño e implementación de mecanismo para la deposición de una feromona ferromagnética desde un robot móvil utilizado para robótica de enjambres.

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

Daniel Alonso Monge Chaves

Cartago, 21 de noviembre 2022



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0
Internacional.


DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD

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

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

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 21 de noviembre de 2022




Daniel Alonso Monge Chaves
Céd: 1-1791-0807

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Daniel Alonso Monge Chaves

Proyecto: Diseño e implementación de mecanismo para la deposición de una feromona ferromagnética desde un robot móvil utilizado para robótica de enjambres.


Ing. Eduardo José Asenjo Castillo
Asesor

Cartago, 21 de noviembre de 2022.

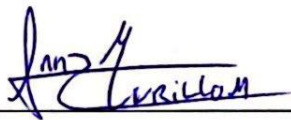
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Daniel Alonso Monge Chaves

Proyecto: Diseño e implementación de mecanismo para la deposición de una feromona ferromagnética desde un robot móvil utilizado para robótica de enjambres.

Miembros del jurado evaluador



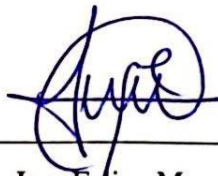
Ing. Ana María Murillo Morgan

Jurado



MSc. Marta Eugenia Vílchez Monge

Jurado



MSc. -Ing. Felipe Meza Obando

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 21 de noviembre 2022

RESUMEN

En este documento se presenta el diseño, la implementación y validación de un sistema de deposición de una feromona ferromagnética compuesta por óxido de hierro, azúcar, agua y levadura, a utilizarse como parte del proyecto “Planificación de Rutas Óptimas por medio de Enjambres” de la Escuela de Matemática y el Área Académica de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

El proyecto surge de la necesidad de implementar un método de comunicación bio inspirado - como lo son las feromonas- en un enjambre de robots móviles de modo que esto permita y contribuya a lograr un comportamiento colectivo que sea coordinado por medio de la interacción entre diversos robots por medio de una comunicación entre ellos. El sistema diseñado constituye una primera fase de la implementación de este sistema en el enjambre robótico disponible dentro del proyecto PROE pues en esta primera etapa este va colocado sobre un robot móvil Robotino® de la marca alemana Festo, el cual se encarga del transporte del mecanismo diseñado y de la deposición de la sustancia ferromagnética para que esta sea detectada -por medio de un magnetómetro- por los Atta Robots utilizados dentro del proyecto PROE. En una segunda instancia se pretende adaptar el sistema diseñado para que pueda colocarse sobre estos últimos, los cuales son robots más ligeros, de menor potencia y con menor capacidad de procesamiento que el Robotino® utilizado.

Para el desarrollo del sistema diseñado se siguió la metodología de diseño para ingeniería propuesta por los autores Karl Ulrich y Steven Eppinger de modo tal que en el presente documento se muestran todas las etapas de determinación de necesidades, generación y selección de conceptos que permitieron llegar al prototipo funcional obtenido. Asimismo, se muestra la fase de validación para la cual se implementaron conceptos estadísticos de modo tal que se lograra asegurar una precisión de un 95% de los resultados obtenidos de distancia entre gotas, tamaño de gotas y magnetización de estas, con el objetivo de verificar el cumplimiento de los parámetros especificados por el usuario, así como también las características de localidad, difusión y evaporación propias de una feromona.

Palabras clave: Feromona, Feromona Ferromagnética, Robótica de Enjambres, Magnetización, Robotino®.

ABSTRACT

This paper presents the design, implementation, and validation of a ferromagnetic pheromone deposition system composed of iron oxide, sugar, water, and yeast, to be used as part of the project "Optimal Route Planning by means of Swarms" of the School of Mathematics and the Academic Area of Mechatronics Engineering of the Instituto Tecnológico de Costa Rica.

The project arises from the need to implement a bio-inspired communication method -such as pheromones- in a swarm of mobile robots so that it allows and contributes to achieving a collective behavior that is coordinated through the interaction between different robots by means of communication between them. The designed system constitutes the first phase of the implementation of this system in the robotic swarm available within the PROE project, since in this first stage it is placed on a mobile robot Robotino® of the German brand Festo, which is in charge of the transportation of the designed mechanism and the deposition of the ferromagnetic substance so that it is detected -by means of a magnetometer- by the Atta Robots used within the PROE project. In a second instance, it is intended to adapt the designed system so that it can be placed on these Atta Robots, which are lighter robots, less powerful and with lower processing capacity than the Robotino® used.

For the development of the designed system, the engineering design methodology proposed by the authors Karl Ulrich and Steven Eppinger was followed, so this document shows all the stages of needs determination, generation, and selection of concepts that led to the functional prototype obtained. Likewise, the validation phase is shown, for which statistical concepts were implemented in order to ensure a 95% accuracy of the obtained results of the distance between drops, droplet size, and magnetization of these, with the aim of verifying compliance with the parameters specified by the user, as well as the characteristics of locality, diffusion, and evaporation of a pheromone.

Keywords: Pheromone, Ferromagnetic pheromone, Swarm Robotics, Magnetization, Robotino®.

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto de graduación a mi tío Franklin Alexis Chaves Montero Q.E.P.D quién forjó en gran parte mi pasión por la ingeniería y mi deseo por formar parte de una institución tan reconocida como el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Asimismo, quién además me aconsejó a las puertas de mi trayecto universitario y cuyas sabias palabras me guiaron y orientaron en un momento tan vital de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi mamá Marcia Monge, por todo el apoyo, los sacrificios, los consejos y el acompañamiento brindado durante estos años que me permitieron llegar hasta donde estoy hoy y sobrepasar momentos difíciles y retadores, sin tu apoyo jamás lo hubiera logrado. A mi abuelo Manuel Monge, por ser un ejemplo impecable de lucha, perseverancia y dedicación y por enseñarme que, con trabajo duro y esfuerzo se puede alcanzar todo lo que uno se proponga y se puede sobrepasar cualquier obstáculo en la vida. A Ismini Yglesias, por acompañarme, apoyarme, entenderme y motivarme incondicionalmente durante todo este tiempo, de corazón gracias. A mi abuela Lilliana por los chineos, el acompañamiento y los consejos brindados, y a mis tías, Adriana, Carolina y Rebeca por siempre estar ahí para mí y por ser un ejemplo a seguir y una motivación.

Asimismo, quiero agradecer al profesor e investigador MSc. -Ing. Juan Carlos Brenes Torres por darme la oportunidad y la confianza de poder aportar y colaborar con el proyecto que él junto con sus colegas de la escuela de Matemática han trabajado durante tantos años. Agradezco también al profesor Ing. José Eduardo Asenjo Castillo por el acompañamiento y ayuda que como asesor me brindó para poder desarrollar y culminar de la mejor manera el presente proyecto.

Agradezco a todos mis profesores durante estos años por todas las enseñanzas, el acompañamiento y los retos propuestos; sin duda alguna me llevo todo lo aprendido con mucho cariño. A Kevin Minero Chacón, por ser mi compañero de mil batallas durante todos estos años y más que eso por ser un gran amigo y compañero, mi más sincero agradecimiento y mis mejores deseos en el futuro profesional y personal.

A todos mis compañeros y amigos que he cosechado durante estos años, y en general a todas las personas que de manera ya sea efímera o permanente han estado en mi vida durante mi proceso de estudios universitarios, les agradezco porque de una u otra manera han influido y colaborado durante mi proceso de formación profesional.

LISTA DE CONTENIDOS

Lista de figuras.....	v
Lista de tablas	xiii
Lista de abreviaciones.....	xv
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Entorno del proyecto	1
1.2 Descripción del problema.....	2
1.3 Justificación.....	2
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo General.....	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
1.5 Estructura del documento.....	4
Capítulo 2. Marco Teórico.....	6
2.1 Robótica Móvil.....	6
2.1.1 Generalidades	6
2.1.1 Robot móvil	8
2.1.3 Mapeo y localización.....	9
2.1.3 Festo Robotino®.....	10
2.2 Robótica de Enjambres.....	10
2.2.1 Comunicación.....	11
2.2.2 Aproximación del control.....	12
2.2.3 Estado del arte sobre la implementación de feromonas en enjambres robóticos. .	12
2.3 Feromonas	15
2.4 Fluidos ferromagnéticos.....	16
2.5 Levadura.....	18
2.6 Agua Purificada.....	19
2.6.1 Agua de alimentación	20
2.6.2 Agua de grado primario (Tipo 3).....	20

2.6.3 Agua general de laboratorio (Tipo 2)	21
2.6.4 Agua ultrapura (Tipo 1).....	21
2.7 Feromona a utilizar.....	22
2.8 Sistemas hidráulicos de bombeo	23
2.8.1 Bombas centrífugas	24
2.8.1 Bombas peristálticas.....	26
2.8.3 Bombas de diafragma	27
2.9 Viscosidad e hidrodinámica	28
2.10 Descripción de metodología.....	30
2.10.1 Identificación de necesidades del cliente.....	31
2.10.2 Establecimiento de especificaciones.	32
2.10.3 Generación de conceptos	33
2.10.4 Selección de conceptos.....	33
2.10.5 Prueba de conceptos	34
Capítulo 3. Metodología	36
3.1 Identificación de necesidades del cliente	36
3.1.1 Recopilar datos sin procesar del cliente	36
3.1.2 Interpretación de los datos sin procesar en términos de las necesidades del cliente.....	37
3.1.3 Organizar las necesidades en una jerarquía.....	40
3.1.4 Establecer la importancia relativa de las necesidades	42
3.2 Establecimiento de especificaciones	42
3.2.1 Elaboración de una lista de métricas	43
3.2.2 Recabar información que provea contexto	46
3.2.3 Establecimiento de valores objetivos y marginales.....	46
3.3 Generación de conceptos.....	49
3.3.1 Aclaración del problema.....	49
3.3.2 Búsqueda interna	51

3.3.2 Búsqueda externa.....	54
3.3.3 Exploración sistemática.....	57
3.4 Selección de conceptos.....	72
Capítulo 4. Propuesta de diseño.....	79
4.1 Materiales.....	79
4.1.1 Almacenaje de la sustancia.....	79
4.1.2 Bombeo de la sustancia.....	83
4.1.3 Transporte de la sustancia.....	86
4.1.4 Mezclado de la sustancia.....	87
4.1.5 Magnetización de la sustancia.....	88
4.1.6 Deposición de la sustancia.....	90
4.2 Energía.....	91
4.2.1 Almacenar o aceptar energía externa.....	91
4.2.2 Adaptar energía eléctrica para el bombeo.....	92
4.3 Señales.....	93
4.3.1 Elemento de accionamiento manual.....	93
4.3.2 Elemento de accionamiento automático.....	94
4.3.3 Control automático de parámetros.....	95
4.3.4 Accionamiento del sistema.....	109
4.4 Diseño de carcasa.....	111
Capítulo 5. Resultados y análisis.....	120
5.1 Estrategia de validación.....	120
5.2 Análisis y presentación de resultados.....	122
5.2.1 Tamaño de gotas.....	123
5.2.2 Distancia entre gotas.....	130
5.2.3 Magnetización de las gotas.....	132
5.2.4 Validación de la trayectoria solicitada por el cliente.....	140

5.2.5 Validación de masa del sistema diseñado.....	142
5.3 Análisis económico	143
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	146
6.1 Conclusiones	146
6.2 Recomendaciones.....	147
Referencias.....	148
Anexo A: Formulario de Jerarquización de Necesidades.....	155
Anexo B: Planos Mecánicos	156
Anexo C: Plano Electrónico.....	171
Anexo D: Resultados de medición de magnetización.....	172
D.1 Gota 1	172
D.2 Gota 2	174
D.3 Gota 3	176
D.4 Gota 4	178
D.5 Gota 5	180
D.6 Gota 6	182
D.7 Gota 7	184
D.8 Gota 8	186
D.9 Gota 9	188
D.10 Gota 10	190
D.11 Gota 11	192
D.12 Gota 12	194
Anexo E: Guía de ensamble y desensamble del diseño.....	196
E.1 Desensamble.....	196
E.2 Ensamble.....	202
Anexo F: Guía de usuario para la programación.	204

Lista de figuras

Figura 2.1. Esquema Gráfico de un agente.	7
Figura 2.2. Estructura de un captador.	8
Figura 2.3. Robot móvil Festo Robotino®.	10
Figura 2.4. Utilización de feromona sensible a la luz UV.	13
Figura 2.5. Utilización de etanol como feromona.	14
Figura 2.6. Piscina de líquido ferromagnético ante la ausencia (izquierda) y presencia (derecha) de un campo magnético producto de la corriente eléctrica en un conductor.	18
Figura 2.7. Partes y representación de una bomba centrífuga.	24
Figura 2.8. Tipos de impulsores dentro de las bombas centrífugas.	25
Figura 2.9. Forma básica y representación gráfica del principio de funcionamiento de una bomba peristáltica.	27
Figura 2.10. Bomba de diafragma.	28
Figura 2.11. Representación de fenómeno Venturi.	29
Figura 2.12. Experimento en fluidos de Bernoulli.	30
Figura 2.13. Etapas del proceso de diseño propuesto por Ulrich y Eppinger.	30
Figura 3.1. Ubicación de la etapa de identificación de necesidades del cliente dentro del proceso de diseño propuesto por Ulrich y Eppinger.	36
Figura 3.2. Ubicación de la etapa de establecimiento de especificaciones dentro del proceso de diseño propuesto por Ulrich y Eppinger.	42
Figura 3.3. Ubicación de la etapa de generación de conceptos dentro del proceso de diseño propuesto por Ulrich y Eppinger.	49
Figura 3.4. Representación de caja negra.	50
Figura 3.5. Descomposición funcional del sistema.	51
Figura 3.6. Árbol de clasificación para el almacenamiento y aceptación de energía.	58
Figura 3.7. Árbol de clasificación para el subproblema de adaptación de energía para el bombeo.	58
Figura 3.8. Árbol de clasificación para el subproblema de almacenaje de la sustancia.	59
Figura 3.9. Árbol de clasificación para el subproblema de bombeo de la sustancia.	60
Figura 3.10. Árbol de clasificación para el subproblema de transporte de la sustancia.	61
Figura 3.11. Árbol de clasificación para el subproblema de mezclado de la sustancia.	61
Figura 3.12. Árbol de clasificación para el subproblema de magnetización de la sustancia.	62

Figura 3.13. Árbol de clasificación para el subproblema de deposición de la sustancia.	63
Figura 3.14. Árbol de clasificación para el subproblema de accionamiento del sistema.	64
Figura 3.15. Ubicación de la etapa de selección de conceptos dentro del proceso de diseño propuesto por Ulrich y Eppinger.....	72
Figura 4.1. Primera opción de envases de vidrio.....	80
Figura 4.2. Primera opción de envases de vidrio con 18 mL de agua.	80
Figura 4.3. Segunda opción de envases de vidrio.....	81
Figura 4.4. Muestra de curvatura en parte inferior del envase.....	82
Figura 4.5. Concepto ganador para almacenamiento de sustancia.	83
Figura 4.6. Primer concepto de solución para bombeo de sustancia.	84
Figura 4.7. Bomba peristáltica Yanmis G528.....	85
Figura 4.8. Bomba peristáltica Intllab RS385-635.	85
Figura 4.9. Manguera de silicón a utilizar.	87
Figura 4.10. Conector tipo “Y”.....	88
Figura 4.11. Magnetos de neodimio utilizados.....	88
Figura 4.12. Estructuras de acero a utilizar en la etapa de magnetización.	89
Figura 4.13. Estructuras de acero a utilizar en la etapa de magnetización después del maquinado.....	90
Figura 4.14. Punta de goteo utilizada para deposición de la sustancia.	90
Figura 4.15. Interfaz de entradas y salidas del Robotino® de Festo.	91
Figura 4.16. Ubicación de interfaz de entradas y salidas del Robotino® de Festo.	92
Figura 4.17. Circuito de adaptación de tensión.....	93
Figura 4.18. Botón utilizado para el accionamiento manual del sistema.....	94
Figura 4.19. GRAFCET del programa a utilizar.....	95
Figura 4.20. Timer y escritura sobre la variable de tiempo en <i>Robotino® View</i>	96
Figura 4.21. Estructura funcional del bloque de deposición en <i>Robotino® View</i>	96
Figura 4.22. Trayectoria utilizada por parte del Robotino®.....	97
Figura 4.23. Bloque <i>omni-drive</i> en <i>Robotino® View</i>	97
Figura 4.24. Marco de referencia utilizado por el robot móvil.....	98
Figura 4.25. Estructura funcional del bloque de desplazamiento en <i>Robotino® View</i>	99
Figura 4.26. Trayectoria deseada por el cliente.	100

Figura 4.27. GRAFCET de la programación de la trayectoria deseada por el cliente.....	101
Figura 4.28. Estructura funcional del bloque de pausa post deposición en <i>Robotino® View</i> .	102
Figura 4.29. Estructura funcional del bloque de desplazamiento frontal en <i>Robotino® View</i> .	103
Figura 4.30. Estructura funcional del bloque de conteo de distancia de recta en <i>Robotino® View</i>	104
Figura 4.31. Sección del GRAFCET correspondiente al trazado del arco.	105
Figura 4.32. Estructura funcional del bloque de pausa post deposición para el trazado del arco en <i>Robotino® View</i>	106
Figura 4.33. Estructura funcional del bloque de dibujo de arco en <i>Robotino® View</i>	107
Figura 4.34. Estructura funcional del bloque de conteo de distancia de arco en <i>Robotino® View</i>	107
Figura 4.35. Estructura funcional del bloque de Reset en <i>Robotino® View</i>	108
Figura 4.36. Circuito de accionamiento del sistema.	110
Figura 4.37. Placa perforada utilizada.	111
Figura 4.38. Carcasa solo con tapas laterales y piezas internas.....	112
Figura 4.39. Método de fijación de piezas internas.	113
Figura 4.40. Método de fijación de tapas exteriores.	114
Figura 4.41. Tapa frontal de la carcasa.	115
Figura 4.42. Tapa trasera de la carcasa.	116
Figuras 4.43a y 4.43b. Conector de señales de la carcasa.	117
Figura 4.44. Tapa superior de la carcasa.....	117
Figura 4.45. Tapa inferior de la carcasa.....	118
Figura 4.46. Placa para fijación de magnetos a carcasa.....	118
Figuras 4.47a, 4.47b y 4.47c. Ensamble final del sistema implementado.	119
Figura 5.1. Equipo purificador de agua <i>MILLI-Q® ADVANTAGE A10® SYSTEM</i>	120
Figura 5.2. Instrumento de medición utilizado para el tamaño de gota y distancia entre ellas.	121
Figura 5.3. Magnetómetro y Arduino utilizados para la medición del campo magnético...	121
Figura 5.4. Trayectoria en forma de arco utilizada para las pruebas.	122
Figura 5.5. Parámetros tomados como parte de la prueba de t-student de una muestra.	128
Figura 5.6. Diagrama de puntos para los datos de diámetros de gota medidos.	129
Figura 5.7. Método de medición de distancias entre gotas.	130
Figura 5.8. Posición del magnetómetro respecto a la gota.	133

Figura 5.9. Mediciones del campo magnético de la gota 8 justo cuando esta se depuso. ...	134
Figura 5.10. Mediciones del campo magnético de la gota 8 diez minutos después de que se depuso.	135
Figura 5.11. Mediciones del campo magnético de la gota 8 veinte minutos después de que se depuso.	136
Figura 5.12. Mediciones del campo magnético de la gota 8 treinta minutos después de que se depuso.	137
Figura 5.13. Gradiente de la variación de campo magnético ante la presencia de gotas de feromona en función del tiempo.	139
Figuras 5.14a y 5.14b. Rectas obtenidas como parte de la trayectoria solicitada por el cliente.	140
Figuras 5.15a y 5.15b. Distancia de 9mm medida entre las gotas de la trayectoria deseada por el cliente.	141
Figura 5.16. Arco o esquina redondeada de la trayectoria deseada por el cliente.	141
Figura 5.17. Trayectoria completa deseada por el cliente.	142
Figura 5.18. Masa del sistema diseñado.	143
Figura D.1.1. Mediciones del campo magnético de la gota 1 0 minutos después de que esta se depuso.	172
Figura D.1.2. Mediciones del campo magnético de la gota 1 10 minutos después de que esta se depuso.	172
Figura D.1.3. Mediciones del campo magnético de la gota 1 20 minutos después de que esta se depuso.	173
Figura D.1.4. Mediciones del campo magnético de la gota 1 30 minutos después de que esta se depuso.	173
Figura D.2.1. Mediciones del campo magnético de la gota 2 0 minutos después de que esta se depuso.	174
Figura D.2.2. Mediciones del campo magnético de la gota 2 10 minutos después de que esta se depuso.	174
Figura D.2.3. Mediciones del campo magnético de la gota 2 20 minutos después de que esta se depuso.	175
Figura D.2.4. Mediciones del campo magnético de la gota 2 30 minutos después de que esta se depuso.	175
Figura D.3.1. Mediciones del campo magnético de la gota 3 0 minutos después de que esta se depuso.	176

Figura D.3.2. Mediciones del campo magnético de la gota 3 10 minutos después de que esta se depuso.....	176
Figura D.3.3. Mediciones del campo magnético de la gota 3 20 minutos después de que esta se depuso.....	177
Figura D.3.4. Mediciones del campo magnético de la gota 3 30 minutos después de que esta se depuso.....	177
Figura D.4.1. Mediciones del campo magnético de la gota 4 0 minutos después de que esta se depuso.	178
Figura D.4.2. Mediciones del campo magnético de la gota 4 10 minutos después de que esta se depuso.....	178
Figura D.4.3. Mediciones del campo magnético de la gota 4 20 minutos después de que esta se depuso.....	179
Figura D.4.4. Mediciones del campo magnético de la gota 4 30 minutos después de que esta se depuso.....	179
Figura D.5.1. Mediciones del campo magnético de la gota 5 0 minutos después de que esta se depuso.	180
Figura D.5.2. Mediciones del campo magnético de la gota 5 10 minutos después de que esta se depuso.....	180
Figura D.5.3. Mediciones del campo magnético de la gota 5 20 minutos después de que esta se depuso.....	181
Figura D.5.4. Mediciones del campo magnético de la gota 5 30 minutos después de que esta se depuso.....	181
Figura D.6.1. Mediciones del campo magnético de la gota 6 0 minutos después de que esta se depuso.	182
Figura D.6.2. Mediciones del campo magnético de la gota 6 10 minutos después de que esta se depuso.....	182
Figura D.6.3. Mediciones del campo magnético de la gota 6 20 minutos después de que esta se depuso.....	183
Figura D.6.4. Mediciones del campo magnético de la gota 6 30 minutos después de que esta se depuso.....	183
Figura D.7.1. Mediciones del campo magnético de la gota 7 0 minutos después de que esta se depuso.	184
Figura D.7.2. Mediciones del campo magnético de la gota 7 10 minutos después de que esta se depuso.....	184

Figura D.7.3. Mediciones del campo magnético de la gota 7 20 minutos después de que esta se depuso.....	185
Figura D.7.4. Mediciones del campo magnético de la gota 7 30 minutos después de que esta se depuso.....	185
Figura D.8.1. Mediciones del campo magnético de la gota 8 0 minutos después de que esta se depuso.	186
Figura D.8.2. Mediciones del campo magnético de la gota 8 10 minutos después de que esta se depuso.....	186
Figura D.8.3. Mediciones del campo magnético de la gota 8 20 minutos después de que esta se depuso.....	187
Figura D.8.4. Mediciones del campo magnético de la gota 8 30 minutos después de que esta se depuso.....	187
Figura D.9.1. Mediciones del campo magnético de la gota 9 0 minutos después de que esta se depuso.	188
Figura D.9.2. Mediciones del campo magnético de la gota 9 10 minutos después de que esta se depuso.....	188
Figura D.9.3. Mediciones del campo magnético de la gota 9 20 minutos después de que esta se depuso.....	189
Figura D.9.4. Mediciones del campo magnético de la gota 9 30 minutos después de que esta se depuso.....	189
Figura D.10.1. Mediciones del campo magnético de la gota 10 0 minutos después de que esta se depuso.....	190
Figura D.10.2. Mediciones del campo magnético de la gota 10 10 minutos después de que esta se depuso.....	190
Figura D.10.3. Mediciones del campo magnético de la gota 10 20 minutos después de que esta se depuso.....	191
Figura D.10.4. Mediciones del campo magnético de la gota 10 30 minutos después de que esta se depuso.....	191
Figura D.11.1. Mediciones del campo magnético de la gota 11 0 minutos después de que esta se depuso.....	192
Figura D.11.2. Mediciones del campo magnético de la gota 11 10 minutos después de que esta se depuso.....	192
Figura D.11.3. Mediciones del campo magnético de la gota 11 20 minutos después de que esta se depuso.....	193

Figura D.11.4. Mediciones del campo magnético de la gota 11 30 minutos después de que esta se depuso.....	193
Figura D.12.1. Mediciones del campo magnético de la gota 12 0 minutos después de que esta se depuso.....	194
Figura D.12.2. Mediciones del campo magnético de la gota 12 10 minutos después de que esta se depuso.....	194
Figura D.12.3. Mediciones del campo magnético de la gota 12 20 minutos después de que esta se depuso.....	195
Figura D.12.4. Mediciones del campo magnético de la gota 12 30 minutos después de que esta se depuso.....	195
Figura E.1. Ensamble electromagnético diseñado.....	196
Figura E.1.1. Procedimiento de extracción de envases.....	197
Figura E.1.2. Procedimiento de extracción de tapa frontal.....	197
Figura E.1.3. Procedimiento de extracción de tapa superior.....	198
Figura E.1.4. Procedimiento de remoción de tuerca del botón en tapa superior.....	198
Figura E.1.5. Procedimiento de remoción de tapa trasera.....	199
Figura E.1.6. Terminales de conexión que se deben soltar.....	199
Figura E.1.7. Tornillo de fijación de placa perforada.....	200
Figura E.1.8. Punta de goteo a remover.....	200
Figura E.1.9. Procedimiento de remoción de tapa inferior.....	201
Figura E.1.10. Procedimiento de remoción de tornillo de fijación de soporte de bomba peristáltica.....	201
Figura E.1.11. Procedimiento de remoción de tornillo de fijación de placas internas horizontales a placas laterales.....	202
Figura E.1.12. Especificación de conexiones en la placa perforada.....	203
Figura F.1. GRAFCET correspondiente a la trayectoria deseada.....	204
Figura F.2. Tabla de variables en <i>Robotino®View</i>	205
Figura F.3. Bloque de pausa pre-deposición.....	206
Figura F.4. Bloque de deposición.....	206
Figura F.5. Bloque de pausa post-deposición.....	207
Figura F.6. Bloque de adelanto en línea recta.....	207
Figura F.7. Marco de referencia utilizado por el robot móvil.....	208
Figura F.8. Bloque de conteo de longitud de línea recta.....	208

Figura F.9. Bloque de pausa post-deposición en el trazado del arco.	210
Figura F.10. Bloque de desplazamiento en el trazado del arco.	211
Figura F.11. Bloque de conteo de distancia del arco.	211
Figura F.12. Bloque de conteo de distancia del arco.	212

Lista de tablas

Tabla 2.1. Clasificación de los robots.....	7
Tabla 2.2. Propiedades de niveles de pureza del agua.....	22
Tabla 2.3. Composición de la feromona a utilizar.....	23
Tabla 2.4. Categorías de jerarquización facilitadas al cliente.....	32
Tabla 3.1. Enunciados del cliente y necesidades interpretadas a partir de estos.....	37
Tabla 3.2. Lista de necesidades.....	40
Tabla 3.3. Resultado de jerarquización de necesidades.....	41
Tabla 3.4. Lista de métricas para el sistema de deposición de feromonas.....	44
Tabla 3.5. Matriz necesidades-métricas.....	45
Tabla 3.6. Especificaciones completas: métricas con sus respectivos valores ideales y objetivos.....	47
Tabla 3.7. Insumos de la búsqueda interna para la aceptación y el almacenamiento de energía externa.....	52
Tabla 3.8. Insumos de la búsqueda interna para la adaptación de la energía para el bombeo.....	52
Tabla 3.9. Insumos de la búsqueda interna para el almacenaje de la sustancia.....	53
Tabla 3.10. Insumos de la búsqueda interna para el bombeo de la sustancia.....	53
Tabla 3.11. Insumos de la búsqueda interna para el mezclado de la sustancia.....	53
Tabla 3.12. Insumos de la búsqueda interna para la deposición de la sustancia.....	54
Tabla 3.13. Insumos de la búsqueda interna para el accionamiento del sistema.....	54
Tabla 3.14. Insumos de la búsqueda externa para el bombeo de la sustancia.....	55
Tabla 3.15. Insumos de la búsqueda externa para el transporte de la sustancia.....	55
Tabla 3.16. Insumos de la búsqueda externa para el mezclado de la sustancia.....	55
Tabla 3.17. Insumos de la búsqueda externa para la magnetización de la sustancia.....	56
Tabla 3.18. Insumos de la búsqueda externa para la deposición de la sustancia.....	56
Tabla 3.19. Datos de referencia para magnetización de la sustancia.....	63
Tabla 3.20. Tabla de combinación para rama de energía.....	64
Tabla 3.21. Primera combinación para accionamiento manual del sistema.....	65
Tabla 3.22. Segunda combinación para accionamiento manual del sistema.....	66
Tabla 3.23. Tercera combinación para accionamiento manual del sistema.....	66
Tabla 3.24. Primera combinación para accionamiento automático del sistema.....	67

Tabla 3.25. Segunda combinación para accionamiento automático del sistema.	68
Tabla 3.26. Primera iteración de tabla de combinación para rama de materiales.	68
Tabla 3.27. Tabla de combinación para rama de materiales.	69
Tabla 3.28. Resumen de resultados de la etapa de generación de conceptos.	71
Tabla 3.29. Matriz de selección de conceptos para la rama de señales de accionamiento manual	73
Tabla 3.30. Matriz de selección de conceptos para la rama de señales de accionamiento automático.....	74
Tabla 3.31. Matriz de selección de conceptos para la rama de materiales	75
Tabla 3.32. Matriz de evaluación de conceptos para la rama de materiales	77
Tabla 3.33. Resumen de conceptos ganadores.....	78
Tabla 5.1. Mediciones diámetro de gota para un tiempo de activación de la bomba de 4ms.	124
Tabla 5.2. Mediciones diámetro de gota para un tiempo de activación de la bomba de 3.5ms.	125
Tabla 5.3. Mediciones diámetro de gota para un tiempo de activación de la bomba de 2ms.	126
Tabla 5.4. Mediciones diámetro de gota para un tiempo de activación de la bomba de 1ms.	127
Tabla 5.5. Resultados de la prueba t de una muestra.	129
Tabla 5.6. Datos de medición de distancias entre gotas.	132
Tabla 5.7. Promedio de las variaciones de campo magnético ante la presencia de gota según el tiempo transcurrido entre la deposición y la medición.	138
Tabla 5.8. Tabla de costos del proyecto.....	145

Lista de abreviaciones

PROE	Planificación de Rutas Óptimas por medio de Enjambres
C.D	Corriente directa
PAP	Paso a paso
SLAM	<i>Simultaneous localization and mapping</i>
MRF	<i>Magneto-rheological fluid</i>
FF	Ferrofluido
COT	Carbono orgánico total
ppb	Partes por billón
EDI	<i>Electrodeionization</i>
UV	Ultravioleta
LED	<i>Light emitting diode</i>
MDF	Medium-density fibreboard
ms	milisegundos
UFC/ml	unidades formadoras de colonias/mililitro
g	gramos
s	segundos
μT	micro teslas

Capítulo 1. Introducción

1.1 Entorno del proyecto

El presente proyecto será desarrollado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, sede central en la provincia de Cartago como parte del proyecto de investigación PROE (Planificación de Rutas Óptimas por medio de Enjambres). Este proyecto tiene como objetivo principal la implementación de los conceptos de robótica de enjambres para el desarrollo de rutas óptimas de acceso y/o evacuación. Dicho proyecto ha sido desarrollado mediante la colaboración conjunta entre la Escuela de Matemática y el Área Académica de Ingeniería Mecatrónica, ambas del Instituto Tecnológico de Costa Rica, con sus aportes correspondientes. Por el lado de la Escuela de Matemática, esta se enfoca principalmente en las áreas de la matemática pura, matemática aplicada y matemática educativa. Por su parte, el Área Académica de Ingeniería Mecatrónica brinda sus aportes encaminados al desarrollo de sistemas mecatrónicos integrales, inteligentes y flexibles que sean de utilidad tanto en la industria nacional como en la internacional.

Entre el año 2017 y 2018 la Escuela de Matemática da inicio al proyecto PROE con el objetivo de llevar a cabo una simulación computacional para la planificación de rutas óptimas de acceso y/o evacuación por medio de un enjambre centralizado en escenarios estáticos, utilizando técnicas de mapeo, procesamiento de datos y optimización multiobjetivo. Este desarrollo se dio como parte de una primera fase de implementación en la cual, a raíz de los resultados, se determinó que se debía realizar una implementación física de los algoritmos propuestos para realizar una implementación real de los mismos. De este modo, se decidió trabajar en conjunto con el Área Académica de Ingeniería Mecatrónica con el fin de realizar un diseño adecuado en términos electrónicos y mecánicos.

Posteriormente, como parte de los resultados de dicha etapa se buscó realizar una optimización del mecanismo utilizado mediante el fenómeno de feromonas, donde se han realizado una serie de simulaciones e investigaciones del fenómeno deseado a partir de la implementación de estas; sin embargo, se busca la implementación física del fenómeno simulado en un mecanismo robótico. Actualmente, la investigación se encuentra a cargo de tres profesores del Instituto Tecnológico de Costa Rica los cuales son: M.Sc. Cindy Calderón Arce, M.Sc. Rebeca Solís Ortega, y M.Sc. Juan Carlos Brenes Torres. La coordinación del proyecto es llevada a cabo por parte de la profesora

Cindy Calderón Arce; sin embargo, la coordinación del desarrollo mecatrónico es llevada a cabo por parte del profesor Juan Carlos Brenes Torres.

1.2 Descripción del problema

Como parte de la optimización de rutas dentro de la robótica de enjambres, el principio de las feromonas permite a los elementos robóticos conocer cuándo un robot o elemento móvil transitó la zona por la que se está recorriendo. De este modo, se logra una comunicación indirecta entre los distintos elementos que componen el sistema robótico para lograr un nivel de coordinación entre estos y optimizar el proceso de planificación de rutas.

La Escuela de Matemática ha desarrollado e implementado el concepto de feromonas deseado mediante simulaciones en las cuales se ha concluido que estas para catalogarse como feromonas deben cumplir tres características principales: la localidad, la difusión y la evaporación.

Para atender esta necesidad, Brenes-Torres et al. [1] propusieron la utilización de un ferrofluido como feromona, pues es capaz de cumplir con esas tres características de localidad, difusión y evaporación. Por lo tanto, se pretende llevar a la práctica el fenómeno de feromonas simulado y propuesto por los investigadores e implementarlo en un sistema real. De este modo, el problema del presente proyecto se centra en la necesidad de implementar, sobre un robot real, un sistema de feromonas que utilice una sustancia ferromagnética que sea capaz de cumplir con las condiciones de localidad, difusión y evaporación propias de las feromonas en la naturaleza.

1.3 Justificación

El proyecto PROE fue desarrollado con el objetivo de crear e implementar sistemas para planificar y obtener rutas óptimas en escenarios dinámicos. De esta manera, se busca contribuir con el acceso y/o evacuación en situaciones de desastre, como lo son los derrumbes o incendios. Para lograr dicho objetivo por medio de un enjambre de robots es necesario lograr un comportamiento colectivo que sea coordinado por medio de la interacción entre diversos robots. Esa interacción es llevada a cabo por medio de algún tipo de comunicación [1].

Dicha comunicación puede ser llevada a cabo de forma directa o indirecta. La comunicación directa es aquella en la cual la transmisión y recepción de datos se da en intervalos tan cortos que se consideran simultáneos. Este tipo de comunicación requiere de una base central que se encargue

Capítulo 1. Introducción

de coordinar los mensajes, lo cual va en contra del objetivo de comunicación descentralizada que se busca mediante los enjambres robóticos.

Por su parte, la comunicación indirecta es aquella en que el envío y la recepción del mensaje se dan en instantes distintos. Como parte de los mecanismos de comunicación indirecta empleados en la robótica de enjambres, con base en fenómenos de la naturaleza, se encuentra el fenómeno de las feromonas. Este es un mecanismo de comunicación indirecta en el cual se transmite información de un elemento a otro del enjambre, pero con diferencias temporales entre el momento de recepción y envío del mensaje. Dicho mecanismo de comunicación indirecta se ha considerado como el nominal en robótica de enjambres pues es consistente con el objetivo de comunicación descentralizada que buscan dichos sistemas.

Dentro de la comunicación indirecta, se han desarrollado diversas propuestas de implementación reales y virtuales de feromonas tales como la utilización de proyectores y luz para representar las feromonas, así como la utilización de pisos sensibles a rayos ultravioletas. No obstante, si bien cumplen con las condiciones y los fenómenos propios de las feromonas, estas son aplicaciones únicamente útiles en ambientes sumamente controlados con superficies y condiciones específicas.

Por otro lado, también se han desarrollado sistemas que utilizan compuestos gaseosos como feromona. No obstante, los gases presentan un comportamiento turbulento, por lo que para su detección se deben hacer muestreos rápidos por parte del sensor y los sensores metal-oxide (MOX) presentes en el mercado para este tipo de mediciones requieren de tiempo de recuperación después de cada medición, cuentan con tiempos de muestreo lentos y características dinámicas limitadas [1] razón por la cual este tipo de implementación no es adecuado para aplicaciones en entornos no estructurados o externos.

Por su parte, Brenes-Torres et al. [1] proponen solución basada en una sustancia ferromagnética que es fácilmente dispensable por parte del dispositivo, fácilmente medible con sensores disponibles en el mercado a un costo bajo, es amigable con el medio ambiente y que además cumple con las características de localidad, difusión y evaporación buscadas en una feromona.

Por lo tanto, con el objetivo de avanzar en términos de la robótica de enjambres, y optimizar la búsqueda de rutas óptimos por medio de robots, es evidente que es necesario poner en práctica el fenómeno de feromonas simulado por investigadores y la solución propuesta por Brenes-Torres et al. [1] en un robot real.

1.4 Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos a desarrollar en el presente proyecto.

1.4.1 Objetivo General

Diseñar un sistema mecatrónico capaz de llevar a cabo la deposición y dosificación de una sustancia que actúa como feromona e implementarlo sobre un robot *Robotino*® de Festo, como parte del proyecto PROE de la Escuela de Matemática y el Área Académica de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Identificar las variables de interés para el cliente, que permiten realizar un seguimiento durante el proceso y verificar la validez del diseño y del proceso que se está desarrollando.
2. Diseñar el ensamble mecánico que permite realizar el mezclado, bombeo, magnetización y deposición de la feromona a utilizar.
3. Diseñar el circuito o elementos de control que permiten definir los parámetros de funcionamiento del sistema bajo las condiciones deseadas.
4. Verificar la validez y funcionalidad del diseño propuesto mediante pruebas reales en el *Robotino*® de Festo según los parámetros de funcionamiento deseados.

1.5 Estructura del documento

La presente sección se muestra con el objetivo de brindar una descripción de la estructura general del presente informe y dar claridad de los contenidos de este, previo a su lectura. El documento se compone de seis capítulos, de los cuales el primero es el que culmina con esta sección en el cual se abordaron los detalles generales y fundamentales del proyecto tales como el entorno en el que se desarrolla, la problemática existente y la justificación de su importancia, lo cual define los objetivos del proyecto.

Capítulo 1. Introducción

Seguidamente, en el capítulo 2 se describe y aborda el sustento teórico que fundamenta al presente proyecto, mediante la descripción de conceptos relacionados con la robótica móvil, la robótica de enjambres, las feromonas, los fluidos ferromagnéticos, la levadura, el agua purificada, los sistemas hidráulicos de bombeo y una descripción general de los conceptos propios de la metodología de diseño de ingeniería seguida en el presente proyecto. Asimismo, se menciona el estado del arte de investigaciones similares con respecto a la implementación de feromonas en sistemas de enjambres de robots móviles.

Por su parte, el capítulo 3 sobre la metodología de diseño en ingeniería incluye la implementación detallada de todos los conceptos de la metodología descritos en el capítulo 2 propiamente en el proyecto, de modo tal que se muestran las acciones, decisiones y resultados obtenidos de la aplicación de la metodología de diseño en ingeniería propiamente para el proyecto en cuestión.

A continuación, en el capítulo 4, una vez definido el concepto de solución a implementar a partir del capítulo 3, se procede a mostrar con detalle cada uno de los elementos y componentes que lo componen, la implementación del diseño y los detalles específicos que forman parte de este, así como las decisiones intermedias que fueron tomadas durante el proceso de diseño y que permitieron llevar a cabo un refinamiento del diseño final.

Por otro lado, en el capítulo 5 se muestra la validación del diseño mediante una detallada exposición de los resultados obtenidos de pruebas y mediciones al sistema y su análisis respectivo, así como también el análisis económico correspondiente al proyecto en cuestión. Y finalmente, en el capítulo 6 se muestran las principales conclusiones y recomendaciones que surgieron del presente proyecto.

El presente proyecto constituye la primera etapa para la implementación del concepto de una feromona ferromagnética que sea utilizada en ambientes no controlados dentro de un enjambre de robots móviles, de modo que se puede afirmar que el principal aporte de ingeniería brindado por este constituye la implementación de un concepto bio inspirado en un enjambre de robots móviles real con capacidad de ser aplicado en un ambiente no controlado, lo cual es innovador y además abre nuevas puertas y horizontes a la comunidad científica para futuras investigaciones en robótica de enjambres.

Capítulo 2. Marco Teórico

En la presente sección se muestra detalladamente toda la información necesaria para comprender el fundamento teórico alrededor del cual se desarrolló el presente proyecto. Se comienza con una descripción de las generalidades y componentes principales de la robótica móvil, así como una descripción de los aspectos generales del robot móvil a utilizar. Seguidamente, se describen los principales conceptos de interés sobre la robótica de enjambres y su forma de trabajo, así como el estado del arte de la aplicación de feromonas dentro de la robótica de enjambres.

A continuación, se exponen los conceptos de las feromonas en la naturaleza y en la robótica de enjambres, se describen las características y propiedades de los fluidos ferromagnéticos, así como también los conceptos y fenómenos asociados a las levaduras. Por su parte luego se muestran los principales conceptos asociados con la purificación del agua y los diversos tipos de agua purificada que se han aceptado dentro de la comunidad científica e ingenieril. Seguidamente, se describe la feromona a utilizar para el presente proyecto, así como también los principios de los sistemas hidráulicos de bombeo y el funcionamiento y los principales conceptos relacionados con los tipos de bomba considerados para el presente proyecto. Finalmente, se describen los principales conceptos de interés sobre la viscosidad e hidrodinámica de los fluidos seguido de una descripción de la metodología de diseño a implementar.

2.1 Robótica Móvil

2.1.1 Generalidades

La robótica, y a su vez todas las ramas de la ingeniería han experimentado y a su vez aportado al desarrollo a nivel científico y tecnológico durante los últimos años. A nivel científico se ha buscado la implementación de sistemas electromecánicos complejos e inteligentes mientras que a nivel tecnológico ha sido el espacio de la evolución de la automatización clásica hacia el control inteligente, a partir de lo cual ha sido posible desarrollar máquinas y mecanismos capaces de tomar decisiones de manera autónoma.

Un robot es, en esencia, un agente físico inteligente y por agente se puede entender cualquier cosa capaz de percibir su medioambiente con la ayuda de sensores y actuar en ese medio utilizando actuadores [2] tal y como se muestra en la figura 2.1.

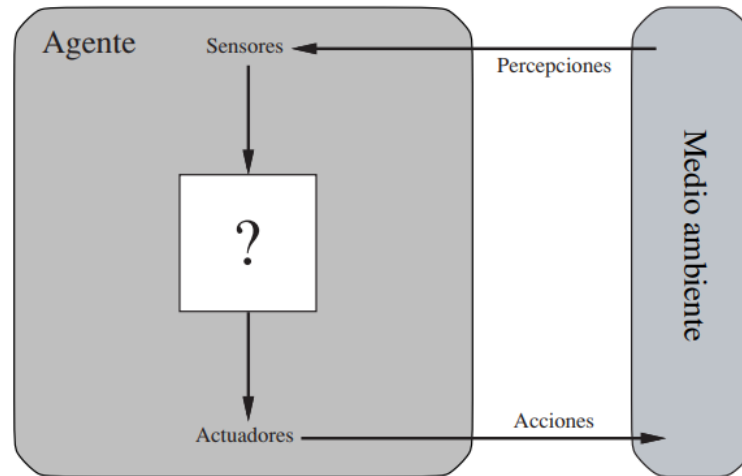


Figura 2.1. Esquema Gráfico de un agente. Fuente: [2]

De este modo, un robot cuenta con una arquitectura física compuesta por sensores y actuadores que le permiten comunicarse con una componente computacional la cual toma las decisiones y comanda las acciones que se dan a raíz de las percepciones recibidas desde el entorno.

Una primera clasificación de los robots puede hacerse teniendo en cuenta si su arquitectura está anclada a una plataforma fija (manipulador) o si, por el contrario, la arquitectura se relaciona con una plataforma móvil (robot móvil). La combinación de estos dos tipos de robots formaría un robot híbrido, como por ejemplo una prótesis o un humanoide [3].

Una subclasificación es posible si se atiende al campo de aplicación de los robots móviles según lo especificado en [4] tal y como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Clasificación de los robots

Robot manipulador	Robots Industriales
	Robots para aplicaciones médicas
	Robots para aplicaciones de rehabilitación
Robot móvil	Móviles terrestres autónomos
	Móviles aéreos autónomos
	Móviles subacuáticos autónomos
Híbridos	Caminadores
	Humanoides

Fuente: [4]

2.1.1 Robot móvil

El enfoque del presente proyecto se centra en la utilización de un robot móvil. Una máquina automática capaz de moverse en un entorno es lo que se considera como un robot móvil [5]. Por su naturaleza, los robots móviles cumplen tareas relacionadas con localización, mapeo, planificación y de manera general navegación en un espacio determinado, por tierra, aire o agua. La navegación eficiente de la plataforma requiere de una representación del entorno y de una actuación sobre el medio. La lectura del entorno se hace por medio de sensores, y la acción sobre el mismo por medio de efectores [3].

A diferencia de los robots industriales fijos, un robot móvil tiene un movimiento ilimitado por su tamaño físico debido a su movilidad. Como resultado, los robots móviles pueden operar en un gran espacio de trabajo y explorar entornos desconocidos, por lo que son capaces de realizar tareas donde sea necesario [5].

Se entiende por sensor como el conjunto de elementos sensor, transductor y acondicionador de señal que hace posible la captación de las características del medio e incorporarlas a un sistema. Este conjunto es denominado técnicamente captador [3] y su estructura se muestra en la figura 2.2.

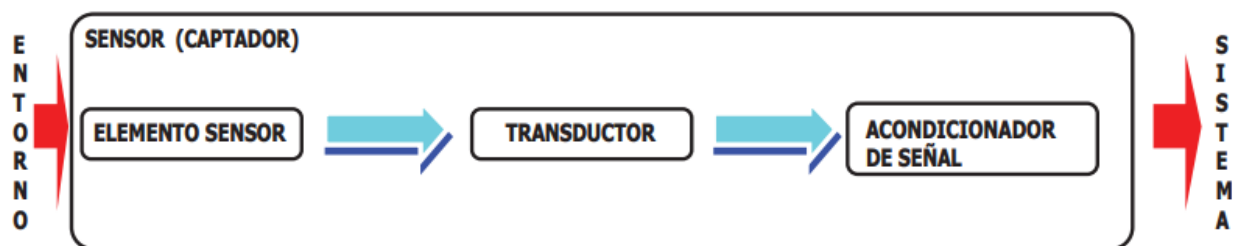


Figura 2.2. Estructura de un captador. Fuente: [3]

Por su parte, el efector es el dispositivo físico que permite que las acciones del robot se transfieran al entorno. El efector por excelencia para las plataformas móviles, es un motor eléctrico de C.D (Servomotor o Motor PAP). Los efectores garantizan los grados de libertad de la plataforma. Un grado de libertad implica el movimiento en una dirección específica del agente. Si todos los grados de libertad son controlables, se dice que el robot es holonómico [3].

2.1.3 Mapeo y localización

El proceso de localización permite a un robot móvil saber dónde se encuentra en todo momento con respecto a su entorno. Para ello se utilizan sensores que permiten realizar mediciones relacionadas con el estado del robot y su entorno. Estos sensores acumulan errores y proporcionan mediciones ruidosas. Por ello, muchas investigaciones se centran en mejorar la estimación de la posición mediante la integración de las medidas tomadas por varios tipos de sensores mediante técnicas de filtro de Kalman. La localización puede ser local o global. La solución más sencilla es la localización local, en la que el robot corrige su posición de forma incremental con respecto a una ubicación inicial, mientras que en la localización global la posición inicial del robot no es necesaria. Además, el proceso de localización puede basarse en la identificación sensorial de puntos de referencia en el entorno cuya ubicación es bien conocida, o bien puede basarse en mapas o modelos del entorno e identificar elementos característicos del entorno mapeado [4].

Por otro lado, el mapeo robótico se ha denominado comúnmente como localización y mapeo simultáneos (SLAM por sus siglas en inglés). Algunos métodos son incrementales y permiten su aplicación en tiempo real, mientras que otros requieren varias pasadas por la totalidad de los datos percibidos. Una amplia familia de métodos incrementales emplea filtros de Kalman para estimar el mapa y la ubicación del robot y generan mapas que describen la posición de puntos de referencia, balizas o determinados objetos del entorno [4].

La localización y el mapeo consisten en los componentes fundamentales de la tarea principal de navegación de un robot móvil y por su parte, la navegación requiere de dos elementos: la evasión de obstáculos y la planificación del movimiento, los cuales dictaminan el tipo de orden que se le dará a los efectores (motores) para realizar los movimientos.

La planificación, de manera general, se aborda desde dos perspectivas: la descomposición en celdas y la esqueletización. La primera divide el entorno del robot en un número finito de celdas, continuas unas de las otras, lo cual permite generar un campo de potencial como función del entorno, el cual incrementa su valor con la cercanía a un obstáculo, y lo decrementa en espacio libre. La segunda perspectiva modela el entorno del móvil en una representación de una sola dimensión (esqueleto) con el ánimo de simplificar el proceso de planificación [3].

2.1.3 Festo Robotino®

Robotino® es la plataforma robótica móvil de la marca alemana Festo para la investigación y la educación. Con su accionamiento omnidireccional, sus sensores, sus interfaces y sus extensiones específicas para aplicaciones, Robotino® puede utilizarse de forma muy flexible. Los lenguajes y sistemas de programación más importantes están disponibles para programar aplicaciones individuales. Un accionamiento omnidireccional permite que el Robotino® se mueva holonómicamente en el plano. Las tres unidades de accionamiento independientes que componen el *omnidrive* constan de motores, un codificador incremental, un reductor y ruedas, y están integradas en el chasis del Robotino®. Este está equipado con tres motores que accionan cada una de las tres ruedas omnidireccionales de forma independiente. Un codificador incremental está montado en cada motor y mide su ángulo de rotación. El robot incluye un reductor entre cada motor y rueda con una relación de transmisión de 32:1. El reductor permite manejar el sistema móvil con gran precisión a velocidades mínimas. [6].



Figura 2.3. Robot móvil Festo Robotino®. Fuente: [6]

2.2 Robótica de Enjambres

El empleo de la inteligencia de enjambres ha sido notorio en el desarrollo de sistemas de trabajo conjunto entre maquinarias. La inteligencia de enjambres se refiere al sofisticado comportamiento colectivo que puede surgir de la combinación de muchos individuos simples, cada uno de los cuales

opera de forma autónoma [7]. En la robótica se ha visto a la implementación de este tipo de inteligencias en lo que se conoce como la robótica de enjambres, la cual es un nuevo enfoque para la coordinación de gran número de robots relativamente sencillos, que son autónomos, no controlados de forma centralizada, capaces de tener comunicación local y que operan con un cierto sentido de inspiración biológica [7].

La robótica de enjambres es el estudio de cómo un gran número de agentes relativamente simples y físicamente encarnados puede ser diseñados de modo tal que se logre un comportamiento colectivo deseado a partir de las interacciones entre los agentes y entre éstos y el entorno [8].

El concepto de sistema multi robótico es comúnmente considerado también como un enjambre; no obstante, en [8] se mencionan las características que debe cumplir un sistema de múltiples agentes robóticos para ser considerado como un enjambre robótico:

1. Los robots del enjambre deben ser robots autónomos capaces de detectar y actuar en un entorno real.
2. El número de robots del enjambre debe ser grande o que al menos las reglas de control lo permitan.
3. Los robots deben ser homogéneos. Pueden existir diferentes tipos de robots en el enjambre, pero estos grupos no deben ser demasiado numerosos.
4. Los robots deben ser incapaces o ineficientes respecto a la tarea principal que tienen que resolver, es decir, necesitan colaborar para tener éxito o mejorar el rendimiento.
5. Los robots sólo tienen capacidad de comunicación y detección locales. Esto garantiza que la coordinación sea distribuida, por lo que la escalabilidad se convierte en una de las propiedades del sistema.

Dos aspectos fundamentales para una adecuada implementación de la robótica de enjambres son la comunicación y la aproximación del control.

2.2.1 Comunicación

Cuando una tarea requiere de cooperación entre agentes es necesario que se dé una comunicación entre los elementos que la van a llevar a cabo. Sin embargo, existen dudas y cuestionamientos sobre el nivel de comunicación que debe ser permitido entre estos elementos.

Como parte de los métodos de comunicación más comunes se encuentran el implícito o indirecto y el explícito o directo.

La comunicación implícita es un método de comunicación a través del entorno. Las feromonas son un tipo implícito de comunicación. Un nivel superior de feromonas llamado "feromona virtual" se ha introducido en distintos trabajos investigativos para emplear comunicación y coordinación sencillas para lograr resultados a gran escala en las áreas de vigilancia, reconocimiento, detección de peligros y búsqueda de rutas [8].

Por su parte, la comunicación explícita es el tipo de comunicación en el que en la que los robots se transmiten directamente mensajes entre sí y/o al operador humano [9].

La comunicación entre robots puede multiplicar sus capacidades y aumentar la eficiencia. A pesar de no haber una conclusión clara sobre qué tipo de comunicación es mejor para los enjambres de robots, la mayoría de las investigaciones apuntan hacia la comunicación implícita por sus características de robustez [8].

2.2.2 Aproximación del control

Dentro de la robótica de enjambres se distinguen dos métodos principales de control: el centralizado y el distribuido.

El control centralizado se basa en la organización de un sistema que tiene un agente robótico líder que se encarga de organizar el trabajo de los demás robots; dicho líder está involucrado en el proceso de decisión de todo el equipo, mientras que los demás miembros actúan según las indicaciones del líder. Por su parte, el control distribuido se basa en la organización de un sistema compuesto por agentes robóticos que son completamente autónomos en el proceso de decisión con respecto a los demás; en esta clase de sistemas no existe ninguna figura de líder [10].

2.2.3 Estado del arte sobre la implementación de feromonas en enjambres robóticos.

La implementación de las feromonas dentro de la robótica de enjambres ha sido tema de interés para múltiples investigaciones a lo largo del orbe, en las cuales se han implementado feromonas basadas en diversos principios y mediante distintas sustancias.

Capítulo 2. Marco Teórico

En [11] se describe la implementación de un proyecto nombrado *Phormica*, en el cual el suelo del entorno está recubierto de una sustancia fotocromática que se utiliza para almacenar información estigmática. Las sustancias fotocromáticas son una clase de materiales que cambian de color cuando les llega una luz de longitud de onda e intensidad específicas. Cuando se retira la fuente de luz, vuelven gradualmente a su color original [11].

En dicho estudio, utilizan una sustancia fotocromática comúnmente disponible que es de color blanco en su estado normal y cambia a magenta cuando se ilumina con luz UV. El color de la sustancia decae gradualmente hasta convertirse en blanco una vez retirada la luz UV: este fenómeno es similar a la evaporación de la feromona biológica. El tiempo de saturación y decadencia (evaporación de la feromona) del color magenta depende de la intensidad de la luz UV incidente. No obstante, es necesario seguir investigando para construir los modelos matemáticos de estas sustancias en el contexto de la estigmatización para robótica de enjambres [11].

La fotocromía de esta sustancia funciona bien en la mayoría de las condiciones de iluminación interior. En el caso de ambientes exteriores, la luz ultravioleta constituye una pequeña parte de la luz solar, pero sigue siendo suficiente para afectar la fotocromía del material. La sustancia no tiene una vida útil infinita. Las largas exposiciones a la luz solar y las altas temperaturas pueden alterar la composición química de la sustancia [11]. La fotografía mostrada en la figura 2.4 muestra este tipo de implementación de feromonas.

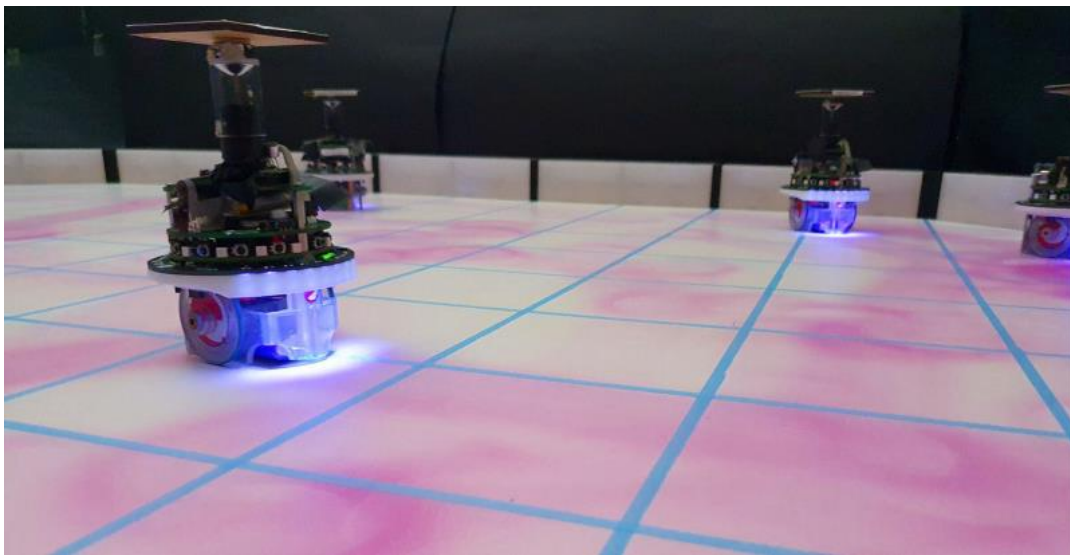


Figura 2.4. Utilización de feromona sensible a la luz UV. Fuente: [11].

Por otro lado, en [12] llevaron a cabo una implementación con vapor de etanol, en el cual se liberó una cantidad constante de vapor de etanol mediante una bomba. Para reducir las turbulencias creadas por la fuente de olores, la bomba se colocó fuera de la arena y se conectó con un tubo a la salida de la fuente. No obstante, la salida creaba algunas turbulencias justo a sotavento de la fuente, lo que a veces perturbaba el flujo laminar del viento en esa zona. Para la detección de este tipo de feromona se utilizó un sensor de olores de compuestos orgánicos volátiles MiCS-5521 que tiene un tiempo de respuesta muy rápido. No obstante, la principal desventaja de este tipo de implementaciones consiste en que -debido al comportamiento turbulento propio de los gases- las mediciones de concentración son muy variables por lo que es difícil poder definir umbrales de concentración adecuados para la detección de las mismas. Y de igual forma, debido a las características propias del material, la evaporación de la sustancia se da de manera muy rápida por lo cual, el tiempo de efectividad de la misma en el entorno es muy bajo.

La figura 2.5 representa esquemáticamente la zona en la que se llevaron a cabo los experimentos de deposición de la feromona.

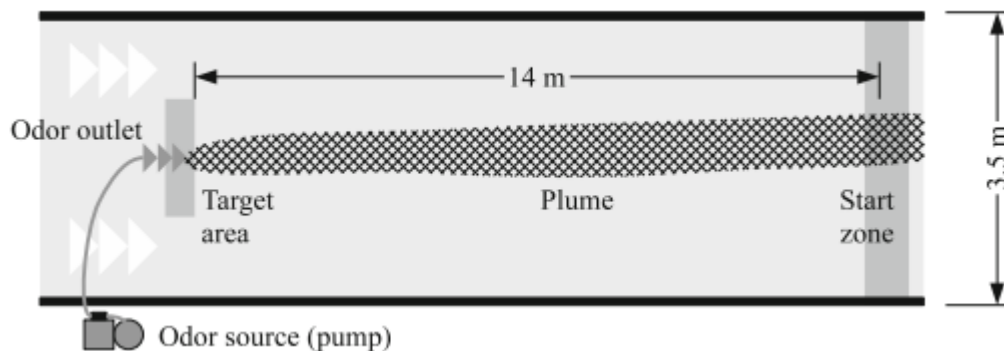


Figura 2.5. Utilización de etanol como feromona. Fuente: [12].

A partir de lo anterior es posible observar que si bien se han llevado a cabo diversas implementaciones, estas son poco aplicables en exteriores debido a la acción de la luz ultravioleta propia de la radiación solar, así como también debido al comportamiento de los gases en ambientes no controlados y con condiciones naturales impredecibles, razón por la cual se evidencia que no hay trabajos de feromonas en robótica de enjambres enfocados en la deposición de estas en exteriores y ambientes no controlados, lo cual constituye el enfoque principal de la feromona a utilizar en el presente proyecto.

2.3 Feromonas

El concepto de las feromonas ha sido ampliamente estudiado por científicos desde mediados del siglo XX a raíz de la iniciativa de conocer y estudiar los comportamientos colectivos de los organismos en la naturaleza. Los organismos vivos usan sustancias químicas para comunicarse entre sí, así como con su entorno circundante. Especies del Reino Vegetal y del Reino Animal secretan o liberan sustancias químicas voluntariamente -y algunas veces involuntariamente- que provocan una respuesta de comportamiento particular: una relación entre emisor y receptor durante el proceso y de modo que ambas especies sufren cambios de comportamiento [13]. Es por esto que la feromona es uno de los medios de comunicación más efectivos ampliamente utilizados por los animales [14].

Estos a menudo usan feromonas para transmitir señales químicas que sirven para la organización social (reconocimiento de los miembros de una misma familia, parentesco, o colonia), comportamiento territorial, búsqueda y elección de pareja, envío de mensajes de alarma y coordinación de comportamientos colectivos complejos. Un ejemplo típico de tal coordinación es el comportamiento de forrajeo de las hormigas. Al llevar comida de una fuente al nido, las hormigas dejan un rastro de feromonas para indicar el camino a la comida a las otras hormigas. El olor de feromonas determina que las otras hormigas ajusten su comportamiento y sigan el rastro existente, reforzándolo, depositando feromona adicional a lo largo del camino, en un proceso auto catalítico. [15].

Por otro lado, la feromona permite a todo un grupo de insectos sociales comunicarse efectivamente como una memoria compartida externalizada y espacial, aunque los individuos tienen memoria y capacidad sensoriomotora limitada [16]. Por otro lado, la hormiga argentina *Iridomyrmex humilis* encuentra el camino más corto desde su colonia hasta la fuente de alimento utilizando la feromona y sus mecanismos de retroalimentación [17].

Dicho lo anterior y una vez visualizada la importancia natural de la feromona, esta se puede definir como una sustancia química secretada al exterior de un individuo y detectado por sus congéneres, lo que provoca que lleven a cabo un comportamiento estereotipado y/o tiene cambios en el desarrollo [18].

Las feromonas en la naturaleza presentan tres características intrínsecas [19]:

- 1) Localidad: la comunicación de las feromonas depende de las condiciones ambientales locales y además están en una posición estática dentro del espacio físico.
- 2) Difusión: las feromonas pueden difundirse formando un gradiente de su densidad. Este gradiente puede proporcionar información a otros organismos.
- 3) Evaporación: las feromonas volátiles se evaporan y desaparecen de su ubicación original a temperaturas normales; o de forma más general: los niveles de concentración de la feromona deben decaer como una función del tiempo.

Al ser un método de comunicación tan efectivo dentro de las interacciones colectivas que se dan en la naturaleza, ha inspirado a implementarlo dentro de la robótica de enjambres mediante feromonas virtuales o incluso implementaciones físicas que simulan feromonas naturales. Estas feromonas deben, además de cumplir con las tres características antes mencionadas, ser fácilmente medibles/ detectables de modo que el receptor del mensaje pueda hacerlo adecuadamente.

Los equipos de investigación en la implementación de feromonas físicas informaron de muchos retos, casi todos ellos relacionados con las limitaciones de las actuales tecnologías de sensores, mientras que la utilización de feromonas virtuales es una herramienta útil para los experimentos, pero limita la investigación de la robótica de enjambre a entornos muy controlados. La aplicación de los robots de enjambre a entornos no controlados y al aire libre es un nuevo campo de investigación que necesita nuevas herramientas tal y como se mencionó anteriormente [1].

2.4 Fluidos ferromagnéticos

Para el desarrollo del presente proyecto, se implementa la deposición de una sustancia ferromagnética o un ferrofluido. Un fluido magnético coloidal, o ferrofluido, consiste típicamente en una suspensión de partículas ferromagnéticas mono dominio -como la magnetita- en un fluido portador no magnético. Un tensioactivo que cubre las partículas impide la aglomeración entre partículas, y el movimiento browniano evita la sedimentación de las partículas en campos gravitacionales o magnéticos [20]. Las partículas ferromagnéticas cuentan con un tamaño cercano a los diez nanómetros dispersas en un líquido portador. Dicho líquido portador puede ser tanto polar como no polar [21].

Capítulo 2. Marco Teórico

Los ferrofluidos son diferentes de los habituales fluidos magnetoreológicos (MRF por sus siglas en inglés) utilizados para amortiguadores, frenos y embragues, formados por partículas de tamaño micrométrico dispersas en aceite. En los MRF la aplicación de un campo magnético provoca un enorme aumento de la viscosidad, de modo que, para campos suficientemente fuertes, pueden comportarse como un sólido. Por otro lado, un ferrofluido (FF) mantiene su fluidez incluso si sometido a fuertes campos magnéticos (~ 10 kG) [21].

Los ferrofluidos son ópticamente isótropos, pero en presencia de un campo magnético externo, presentan birrefringencia inducida [22]. La humectación de determinados sustratos también puede inducir la birrefringencia en capas finas de FF [23].

Un material ferromagnético sólido puede ser magnetizado espontáneamente ante la presencia de un campo magnético externo. Si se tiene un líquido con características ferromagnéticas no solo estará magnetizada de forma espontánea, sino que también actuará como un líquido [24].

Las partículas de un ferrofluido coloidal, cada una con su momento magnético incorporado, son análogas a las moléculas de un gas paramagnético. En ausencia de un campo aplicado, las partículas se orientan aleatoriamente y el fluido no tiene magnetización neta. Sin embargo, para intensidades de campo ordinarias, la tendencia de los momentos dipolares a alinearse con el campo aplicado es parcialmente superada por la agitación térmica [20]. El comportamiento que describen los ferrofluidos ante la presencia de un campo magnético se observa en la figura 2.6.

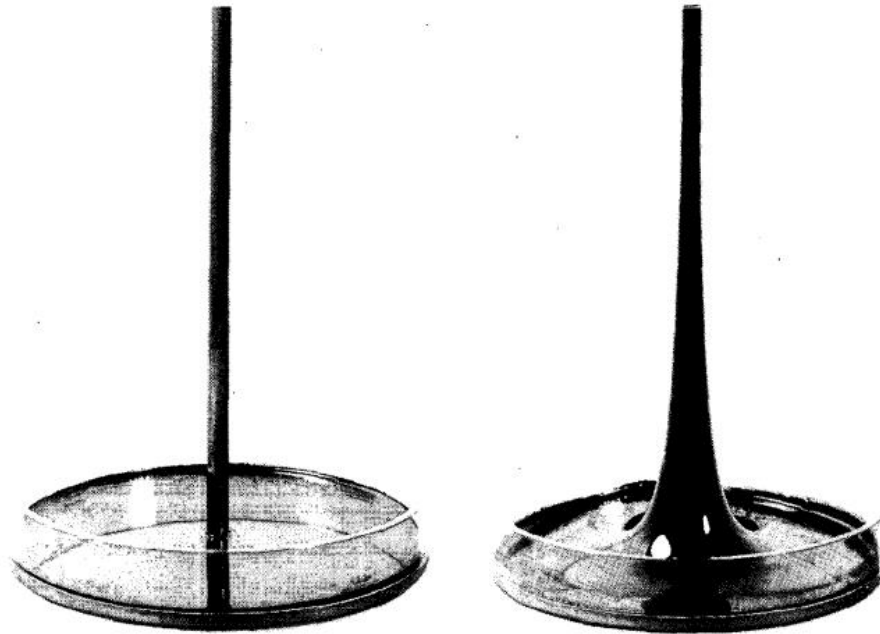


Figura 2.6. Piscina de líquido ferromagnético ante la ausencia (izquierda) y presencia (derecha) de un campo magnético producto de la corriente eléctrica en un conductor. Fuente: [20]

2.5 Levadura

Las levaduras son uno de los microorganismos más antiguos y más intensamente utilizados. Se consideran los microorganismos "domesticados" más antiguos. El pan fermentado y las bebidas alcohólicas, predecesores del pan, la cerveza y el vino actuales, se producían ya en el antiguo Egipto y en la antigua Grecia. En la actualidad, la levadura es de gran importancia entre otros microorganismos industriales, especialmente en la industria alimentaria para la producción de pan de molde, bebidas alcohólicas, alimentos y biomasa forrajera. La célula de la levadura es de tipo eucariota y contiene varios compartimentos, rodeados de membranas. El tamaño de la célula oscila entre 3-15 μm dependiendo del género y las condiciones de cultivo [25].

La importancia de las levaduras para la humanidad se centra en el proceso metabólico que llevan a cabo. El metabolismo es un conjunto de reacciones químicas que tienen lugar dentro de las células y en el entorno donde crecen y se reproducen. El metabolismo suministra a la célula el material de construcción y la energía necesarios para los procesos celulares. Los microorganismos poseen un intenso metabolismo que se ve fuertemente afectado por las condiciones externas [25].

Capítulo 2. Marco Teórico

Como fuente de carbono y energía, la levadura utiliza sobre todo monosacáridos y disacáridos, y en menor medida oligosacáridos y polisacáridos. Sin embargo, en las levaduras con un metabolismo predominantemente fermentativo la energía se forma durante el proceso de fermentación. Las actividades de dos enzimas son fundamentales para la distribución del piruvato generado entre la reacción respiratoria y la fermentativa: el piruvato deshidrogenasa mitocondrial y el piruvato descarboxilasa citoplasmática, que conducen a la formación de acetaldehído y, por tanto, de etanol. Los productos del metabolismo de la levadura incluyen CO₂, etanol, H⁺, y también glicerol, ácido acético, ácido succínico, etc. La proporción de productos puede verse influida por las condiciones de cultivo [26].

2.6 Agua Purificada

El agua es uno de los recursos naturales esenciales para la supervivencia de gran cantidad de especies en el planeta Tierra. Ante el crecimiento de las poblaciones y la producción industrial, las fuentes naturales de agua se han visto reducidas y/o contaminadas,

Según los estudios geológicos internacionales, cerca del 71% de la superficie de la Tierra está agua cubierta por los océanos en los que se encuentra el 96,54% de toda el agua de la Tierra la cual no es potable debido a la salinidad. El resto del 3,46% del agua de la Tierra se encuentra en lugares como los icebergs, aguas subterráneas, lagos, agua del suelo, la atmósfera, etc. y entre ellos sólo el 1,42% es agua dulce que puede ser utilizada para la supervivencia de los seres vivos. Según las investigaciones, se encuentra que sólo menos del 1% del total del agua de la Tierra puede acumularse fácilmente para ser usada como la principal fuente de agua dulce para la supervivencia de la raza humana [27].

Por esta razón se ha visto la necesidad de someter el líquido a diversos tratamientos que aseguren y mejoren la calidad de este. Hay dos tipos principales de purificación del agua: el tratamiento del agua potable y el tratamiento de aguas residuales. En el tratamiento del agua potable, el agua tiene que ser recogida de sus fuentes originales -como ríos y embalses- y purificarlas bajo las normas de calidad aplicables seguidas por la licencia de protección del medio ambiente. Tras la purificación, el agua debe ser saludable para el consumo humano y libre de microorganismos orgánicos e inorgánicos.

Capítulo 2. Marco Teórico

Por otro lado, en el tratamiento de aguas residuales, las aguas residuales procedentes de los procesos industriales deben ser recogidas y purificadas antes de verterlas a diferentes entornos ambientes como aguas superficiales, tierras para el riego, zonas costeras marinas y etc. Tras la depuración esa agua debe cumplir las normas de calidad aplicables de vertido o, de lo contrario, se consideraría como un acto de violación de las normas medioambientales [27].

No obstante, dentro del proceso de purificación de agua potable existen cuatro niveles de pureza del agua reconocidos en la industria de la purificación del agua, cada uno de los cuales se utiliza para aplicaciones específicas en los laboratorios: agua de alimentación, agua de grado primario (tipo 3), agua general de laboratorio (tipo 2) y agua ultrapura (tipo 1).

La calidad del agua se define mediante una serie de mediciones de conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) o resistividad ($\text{M}\Omega\text{-cm}$), carbono orgánico total (COT) en partes por billón (ppb) y recuento bacteriano (UFC/ml) [28]. A continuación, se muestra una descripción de cada uno de los cuatro niveles de purificación.

2.6.1 Agua de alimentación

El agua de alimentación también se denomina agua bruta o potable, y su calidad depende de su origen. Mientras que el agua profunda es filtrada de forma natural por las capas de roca y suelo, el agua procedente de fuentes superficiales, como lagos y embalses, corre el riesgo de contaminación ambiental. El agua cruda o de alimentación suele identificarse midiendo su color, olor y turbidez. También se pueden buscar características químicas como el pH y la dureza, así como características bacteriológicas. Algunos de los contaminantes más importantes del agua de alimentación son los iones disueltos, los minerales, los microorganismos y los compuestos orgánicos [28].

2.6.2 Agua de grado primario (Tipo 3)

El agua pura de grado primario (Tipo 3) utiliza la tecnología de filtración de carbono y de ósmosis inversa, y es la forma más rentable de reducir los contaminantes del agua.

Al eliminar hasta el 99% de los contaminantes del agua de alimentación, la ósmosis inversa hace que el agua fluya desde una solución menos concentrada a través de una membrana semipermeable hasta una solución más concentrada. Al aplicar una presión externa al lado más

concentrado, se invierte el flujo osmótico, lo que obliga al agua a atravesar la membrana y deposita las impurezas en la superficie [28].

2.6.3 Agua general de laboratorio (Tipo 2)

También conocida como agua de grado general de laboratorio, el agua de tipo 2 se produce mediante una combinación de ósmosis inversa y una tecnología adicional como el intercambio de iones o el intercambio eléctrico de iones (EDI por sus siglas en inglés).

La desionización, o intercambio iónico, elimina los iones del agua de ósmosis inversa mediante el uso de resinas sintéticas. A medida que el agua pasa por las perlas de intercambio iónico, se producen reacciones químicas que provocan la eliminación de los iones. Este proceso continúa hasta que todos los iones no deseados son sustituidos por iones de hidrógeno e hidroxilo, que forman agua pura una vez combinados. El EDI es una tecnología de purificación activa que combina la electrodiálisis con el intercambio de iones. El agua pasa entre una membrana permeable a los aniones y una membrana permeable a los cationes dentro de una célula EDI. La cámara de la célula contiene una resina de intercambio iónico suelta. Los iones son atraídos hacia el electrodo de carga opuesta, pero son arrastrados antes de que puedan alcanzarlo, lo que significa que son eliminados del agua. Juntos, estos dos procesos crean el agua de tipo 2, que tiene una resistividad de 1-15M Ω -cm [28].

2.6.4 Agua ultrapura (Tipo 1)

Con una resistividad de 18,2 M Ω -cm a 25°C, el agua ultrapura (Tipo 1) es un requisito para los laboratorios analíticos. La citometría de flujo, las aplicaciones sensibles a los pirógenos y el cultivo de células y tejidos son aplicaciones típicas del agua de tipo 1. El agua con este tipo de resistividad puede seguir conteniendo contaminantes orgánicos, endotoxinas y nucleasas que no repercuten en los valores de resistividad, por lo que se requieren otras tecnologías para eliminarlos. El equipo que produce agua de Tipo 1 suele denominarse "pulidor", y puede alimentarse de un sistema de ósmosis inversa localizado o de una red centralizada [28].

La información mostrada en la tabla 2.2 resume las especificaciones mencionadas en [29] para los cuatro tipos de agua mencionados.

Tabla 2.2. Propiedades de niveles de pureza del agua.

Medición (unidad)	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Resistividad (MΩ-cm)	> 18	> 1	> 4	> 0.2 (200KΩ)
Conductividad (μS/cm)	< 0.056	< 1	< 0.25	< 5.0
pH at 25°C	N/A	N/A	N/A	5.0 – 8.0
Carbono-orgánico total (ppb or μg/L)	< 50	< 50	< 200	N/A
Sodio (ppb or μg/L)	< 1	< 5	< 10	< 50
Cloro (ppb or μg/L)	< 1	< 5	< 10	< 50
Sílice (ppb or μg/L)	< 3	< 3	< 500	N/A

Fuente: [29]

2.7 Feromona a utilizar

El presente proyecto propone la deposición de una feromona ferromagnética desde un robot móvil Robotino® de Festo. La feromona es propuesta por el investigador Juan Carlos Brenes Torres en [1]. Para la implementación de la misma se utilizan dos sustancias: la sustancia ferromagnética y la sustancia que va a llevar a cabo el fenómeno de evaporación en la feromona.

En el caso de fluidos magnéticos el efecto neto del campo magnético adquirido por el ferrofluido no varía, a menos que la sustancia sufra algún tipo de movimiento mecánico que rompa la alineación de las partículas, por ejemplo, la agitación [1]. Para dicha feromona se implementó la agitación mediante un fenómeno inofensivo y amigable con el ambiente como lo es el proceso metabólico de la levadura ante la presencia de azúcar y el cual fue descrito anteriormente. Esta reacción provoca un aumento de volumen de la feromona debido a la creación de burbujas. Además, presenta un proceso de reacción que dura varios minutos, lo que coincide con el principio de evaporación buscado en la feromona [1]. La composición de la feromona a utilizar se muestra en la tabla 2.3 para cada una de las dos sustancias que la componen.

Tabla 2.3. Composición de la feromona a utilizar.

Sustancia de la feromona	Material	Cantidad
Ferromagnética	Fe ₃ O ₄	3 g
	Agua	4 mL
	Azúcar blanco	3g
Evaporación	Levadura seca	2g
	Agua	6 mL

Fuente: Adaptado deΩ [1].

2.8 Sistemas hidráulicos de bombeo

El movimiento de fluidos de un lugar a otro ha sido desde épocas remotas un problema que ha aquejado a gran cantidad de generaciones de la raza humana. Sin duda alguna, la manera más eficiente y útil de lograr esta misión es mediante la utilización de mecanismos de bombeo hidráulicos. Este tipo de sistemas busca transferir energía a un líquido para permitir su transporte en una instalación [30].

Las máquinas de fluido se definen como un sistema mecánico que intercambia energía con el fluido que está contenido o que circula a través de ella. Son máquinas de fluido las bombas, los ventiladores, los compresores, las turbinas hidráulicas, las turbinas de vapor y de gas, pero también los tornillos de Arquímedes o las ruedas hidráulicas [30]. De este modo, basados en el concepto anterior, en el sentido más amplio del término, una bomba hidráulica es una máquina generadora que trabaja con un fluido incompresible en la que se produce una transformación de energía mecánica en hidráulica. Por su lado, en el sentido más específico, la bomba hidráulica es un dispositivo que transforma energía mecánica (torque y velocidad del motor) en hidráulica (caudal) [31].

Durante la operación de una bomba, esta cumple dos funciones: primero, su acción mecánica crea un vacío en la succión lo cual permite que la presión atmosférica fuerce líquido del tanque o reservorio hacia la entrada de la misma; y segundo, la misma acción entrega este líquido a la salida de la bomba y lo empuja hacia el circuito hidráulico [31].

Las bombas como tal no generan presión, sino que más bien producen movimiento del líquido (caudal) de modo que se genera el caudal necesario para el desarrollo de la presión en el sistema, la cual es realmente resultado de la resistencia al flujo [31].

Dentro del mercado de bombas hidráulicas existen diferentes clasificaciones basadas en diversos criterios tales como principio de funcionamiento, elementos que la componen, comportamiento que simulan, entre otros. Como parte del presente marco teórico se describen y detallan las clasificaciones y tipos de bomba consideradas de interés para el proyecto en cuestión.

2.8.1 Bombas centrífugas

Uno de los tipos de bomba más conocidos a nivel mundial son las bombas centrífugas, las cuales basan su principio de operación -tal y como su nombre lo intuye- en la acción de la fuerza centrífuga. Un caso sencillo que explica la acción de la fuerza centrífuga sobre líquidos es el clásico ejemplo de llenar un envase abierto con un líquido y girarlo rápidamente con el brazo sobre la cabeza y notar que el líquido permanece dentro del envase. Esto se debe a la fuerza centrífuga producida durante el movimiento.

Las dos partes principales de la bomba son el impulsor y el difusor. El impulsor, que es la única parte móvil, está unido a un eje y es accionado por un motor. Los impulsores suelen ser de bronce, policarbonato, hierro fundido, acero inoxidable y otros materiales. como de otros materiales. El difusor (también llamado voluta) alberga el impulsor y capta y dirige el agua fuera del impulsor [32]. Una imagen de las partes que componen a una bomba centrífuga se muestra en la figura 2.7.

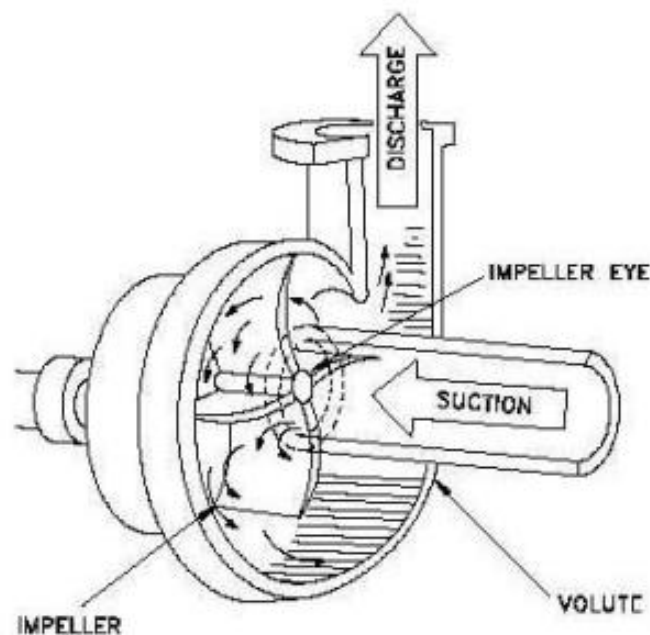


Figura 2.7. Partes y representación de una bomba centrífuga. Fuente: [32].

Capítulo 2. Marco Teórico

El líquido entra en la bomba a través de la entrada de succión en el ojo del impulsor. La velocidad de rotación del impulsor hace que el líquido salga a través de la boquilla de descarga. La fuerza centrífuga ejercida sobre el líquido por el impulsor giratorio aleja el líquido del ojo del impulsor y sale a lo largo de los álabes del impulsor hasta su extremo, donde el líquido es forzado contra las paredes interiores de la voluta y sale por la descarga de la bomba [32]. A medida que el agua sale del ojo del impulsor se crea una zona de baja presión, lo que hace que fluya más agua hacia el ojo. La presión atmosférica y la fuerza centrífuga hacen que esto ocurra.

Cuando el agua del impulsor golpea el lado de la voluta, la velocidad aumenta. Este movimiento acelerado se denomina "energía cinética", que es la energía en movimiento. La forma de la voluta permite al líquido expandirse, lo que ralentiza el movimiento del líquido. En cuanto el líquido se ralentiza en el interior de la voluta, la energía cinética se transformada en presión. Esta presión obliga al líquido a salir de la boquilla de descarga hacia las tuberías de salida [33].

El impulsor de una bomba centrífuga puede ser de tres tipos:

- Impulsor abierto: Los álabes están fundidos libremente en ambos lados.
- Impulsor semiabierto: Los álabes están libres por un lado y en un lado y cerrados en el otro.
- Impulsor cerrado: Los álabes están situados entre los dos discos, todo en una sola pieza de fundición.

Lo anterior se ejemplifica gráficamente en la figura 2.8.

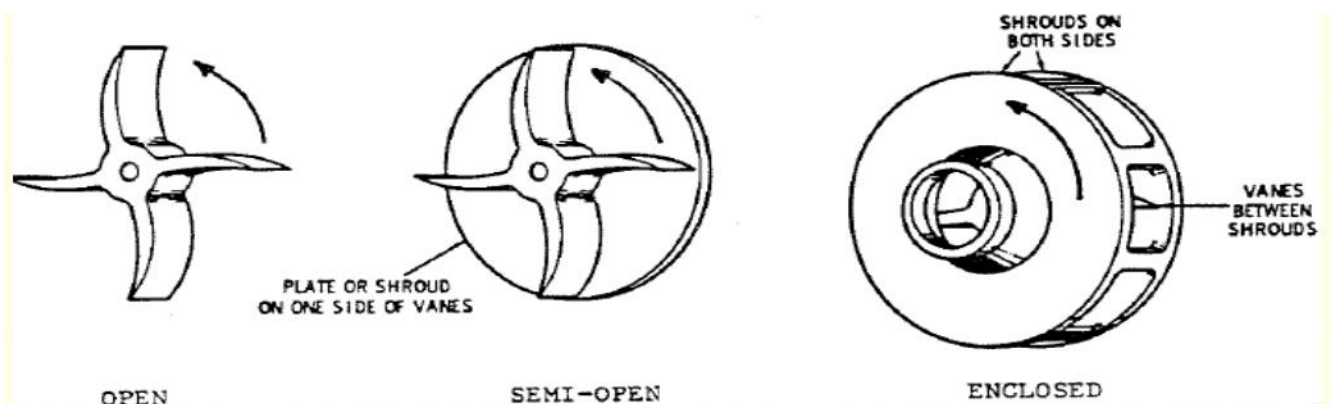


Figura 2.8. Tipos de impulsores dentro de las bombas centrífugas. Fuente: [33].

2.8.1 Bombas peristálticas

Las bombas peristálticas son bombas de desplazamiento mecánico que inducen el flujo en un conducto de paredes flexibles lleno de fluido a través de la peristalsis, es decir, el transporte debido a las ondas de contracción que se desplazan. Mientras que las bombas peristálticas a gran escala presentan una gran variedad de configuraciones, las microbombas basadas en este principio utilizan casi exclusivamente la contracción y expansión secuenciada de un pequeño número de actuadores discretos -normalmente tres- colocados a lo largo del conducto [34].

La bomba peristáltica rotativa tiene una carcasa de bomba, manguera, rotor, zapata y motor. La carcasa de la bomba tiene un rotor que se une al eje del motor. Las mangueras son elementos de la bomba que se encuentran en el rotor y la zapata se utilizan para presionar la manguera y se hace el vacío para que el fluido entre en la manguera [35].

Las bombas peristálticas emulan el proceso biológico de la peristalsis, en el que el material se mueve a través de el esófago u otro conducto anatómico mediante la contracción del músculo liso en ondas rítmicas. Uno de los principales atractivos de las bombas peristálticas a gran escala es la limpieza pues el fluido está completamente aislado de los componentes de la bomba, ya que nunca sale del tubo. Además, es sencillo cambiar el tubo para evitar la contaminación cruzada entre fluidos, y el material del tubo puede adaptarse para garantizar la compatibilidad con una aplicación concreta. La acción de bombeo es relativamente suave, por lo que las bombas peristálticas son adecuadas para líquidos reactivos o suspensiones celulares. Además, las bombas pueden autocebarse debido a la región de baja presión que se crea detrás de la constricción en movimiento, y la dirección del flujo puede invertirse fácilmente [34].

La forma básica de una bomba peristáltica y una representación gráfica de su principio de funcionamiento se muestra en la figura 2.9.

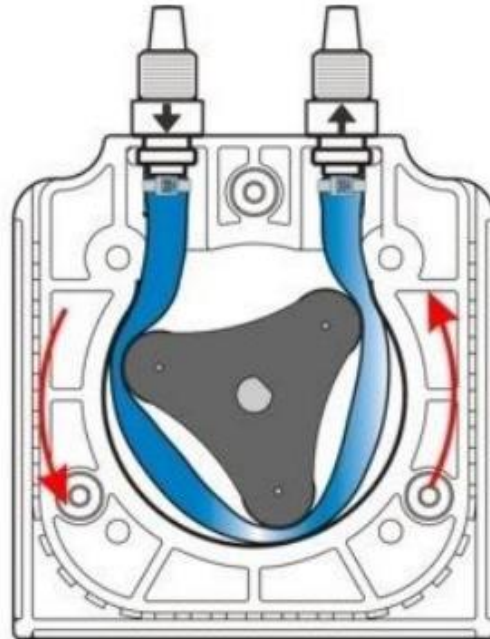


Figura 2.9. Forma básica y representación gráfica del principio de funcionamiento de una bomba peristáltica. Fuente: [35].

2.8.3 Bombas de diafragma

Otro de los tipos de bombas considerados de interés para el proyecto son las bombas de diafragma. En una bomba de diafragma el motor, el eje excéntrico y la biela fijan las membranas en movimiento de carrera. Esto cambia el tamaño del espacio entre los diafragmas y la cabeza de la bomba (cámara de la bomba). Al aumentar el tamaño de la cámara de la bomba se abre la válvula de entrada mientras que la válvula de salida está cerrada (proceso de admisión) [36].

El principio de operación de este tipo de bombas consiste en un dispositivo de bombeo automático que funciona según los principios combinados de las bombas hidráulicas de ariete, de membrana y de pistón. Inicialmente, el agua del depósito de suministro fluye por la tubería de impulsión debido a la gravedad. A medida que la velocidad del agua aumenta, se crea una presión en la cámara del diafragma que obliga a la válvula de impulsión a cerrarse. Cuando la válvula de impulsión se cierra, la presión se dirige al diafragma; de este modo, empuja el émbolo para forzar el agua hacia la válvula de impulsión. Cuando la válvula de impulso se abre, la presión en la cámara del diafragma disminuye haciendo que el diafragma vuelva a su posición inicial y permitiendo que el agua entre en la válvula de aspiración. El proceso se repite [37].

La imagen de la figura 2.10 constituye una bomba de diafragma con un principio de funcionamiento igual al mencionado y explicado anteriormente.



Figura 2.10. Bomba de diafragma. Fuente: [36].

2.9 Viscosidad e hidrodinámica

Una propiedad intrínseca de todos los líquidos es la viscosidad. Esta se define como una medida de la resistencia de un fluido que está siendo deformado por un esfuerzo de cizallamiento o de tracción. En términos cotidianos (y sólo para los fluidos), la viscosidad es el "espesor" o la "fricción interna". Así, el agua es "fina", con una viscosidad menor, mientras que la miel es "espesa", con una viscosidad mayor. En pocas palabras, cuanto menos viscoso sea el fluido, mayor será su facilidad de movimiento (fluidez) [38].

La viscosidad es un factor importante a la hora de determinar las pérdidas por fricción debidas a la energía de cizallamiento en un sistema de proceso de fluidos y en la selección y el dimensionamiento de válvulas, filtros, instrumentación y tuberías. Existe una gran variedad de materiales de referencia que proporcionan datos sobre las pérdidas por fricción para un determinado caudal, tamaño de tubería y viscosidad del fluido. También se dispone de datos que convierten los accesorios de tubería y las válvulas en longitudes rectas de tubería equivalentes [39].

De igual forma, es de suma importancia el efecto de la viscosidad al momento de llevar a cabo o diseñar un sistema de bombeo. A medida que aumenta la viscosidad, el rendimiento de la bomba tiene que ajustarse para tener en cuenta la resistencia adicional al cizallamiento. Por lo general, se

produce una pequeña reducción del caudal, una reducción más significativa de la altura o la presión y un aumento sustancial del consumo de energía [39].

Un método de solución para solventar los problemas de bombeo debidos a la viscosidad de los fluidos es la utilización del efecto Venturi debido a los principios de Bernoulli. Un Venturi es una reducción en una tubería. El líquido se mueve a un ritmo constante o a una velocidad constante en una tubería que se reduce a un diámetro menor. Lo interesante que ocurre es que la presión en el diámetro más pequeño de la tubería será menor que en el diámetro mayor aguas arriba [40]. Este fenómeno se ejemplifica más claramente en la imagen de la figura 2.11.

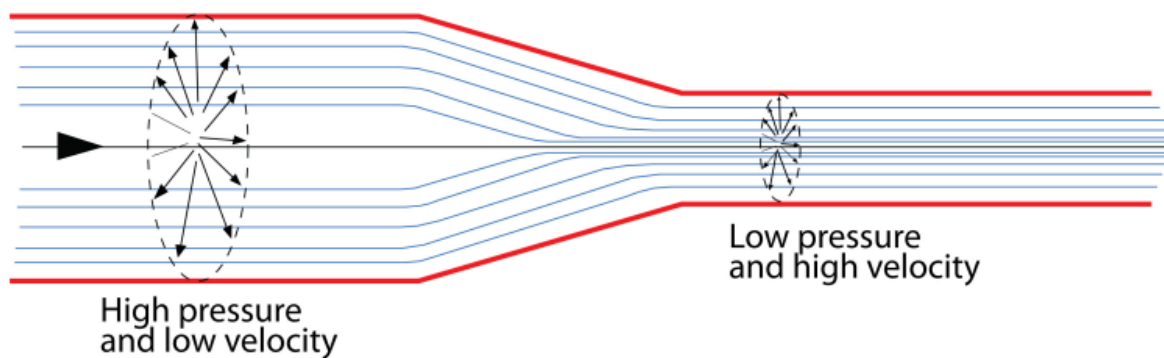


Figura 2.11. Representación de fenómeno Venturi. Fuente: [40].

De este modo, tal y como lo establece Bernoulli, un aumento en la velocidad de un fluido significa una disminución en la presión del mismo, y ese principio es la razón por la cual los aviones vuelan, debido a la diferencia de velocidad del aire entre los perfiles superiores e inferiores del ala [41].

Para el caso de los líquidos el efecto es tal y como se muestra en la figura 2.12, en donde se observa que, en el punto de reducción del diámetro, al mantenerse constante el flujo en toda la tubería, la velocidad aumenta y por ende la presión disminuye en ese punto.

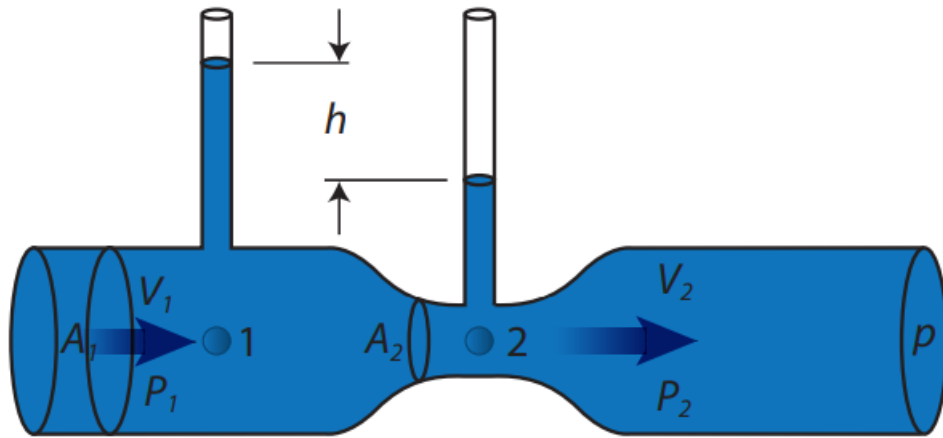


Figura 2.12. Experimento en fluidos de Bernoulli. Fuente: [41].

De este modo, una reducción del diámetro implica un diferencial de presión en el fluido y un aumento en la velocidad del mismo, lo cual es un aspecto relevante a considerar durante el bombeo de líquidos con viscosidad alta o media de modo que se facilite el desplazamiento del mismo por la tubería y se libere levemente el esfuerzo realizado por parte de la unidad de bombeo correspondiente.

2.10 Descripción de metodología

Para la solución del problema planteado en el presente informe como parte del proyecto de graduación en cuestión, se sigue la metodología de diseño propuesta por los autores Ulrich y Eppinger en el libro *Diseño y Desarrollo de Productos* [42]. Esta metodología propone un proceso de diseño compuesto por diversas etapas: identificación de necesidades del cliente, establecimiento de especificaciones, generación de conceptos, selección de conceptos, prueba de conceptos, establecimiento de especificaciones finales y planeo de desarrollo descendente. En la figura 2.13 se puede observar gráficamente todas las etapas que componen el proceso de diseño descrito.

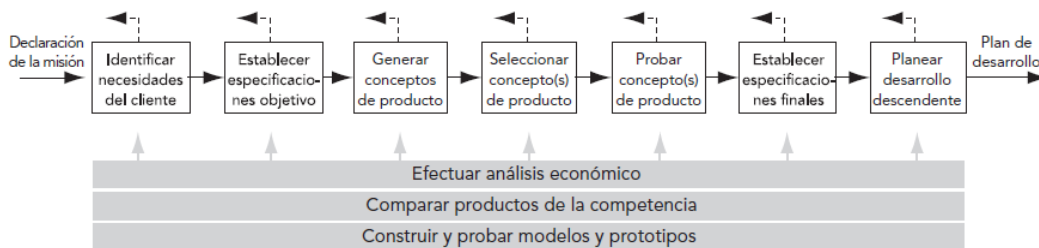


Figura 2.13. Etapas del proceso de diseño propuesto por Ulrich y Eppinger. Fuente: [42].

Dicho proceso de diseño es iterativo de modo tal que en cualquiera de las etapas existe la posibilidad de retroceder a alguna de las etapas anteriores en caso de ser necesario. Esto previendo posibles inconvenientes que se puedan presentar durante la ejecución de cada una de las etapas y a la búsqueda de realimentación que se debe llevar a cabo al final de cada una de las mismas de modo que los hallazgos, novedades, o acontecimientos propios de la etapa actual puedan servir de realimentación y mejora a los resultados de las etapas anteriores.

Para el presente proyecto el cliente corresponde al profesor e investigador del Instituto Tecnológico de Costa Rica, MSc. Juan Carlos Brenes Torres. A continuación, en la presente sección se muestra una descripción general de las características propias de cada una de las etapas mencionadas anteriormente y los aspectos fundamentales implementados para solucionar el problema planteado.

2.10.1 Identificación de necesidades del cliente

El objetivo de esta etapa del proceso consiste en escuchar y comprender el problema que aqueja al cliente para poder -con base en los criterios y conocimientos de ingeniería- determinar la raíz del problema que le aqueja y poder traducir sus enunciados en necesidades. El resultado de esta etapa consta de una serie de enunciados cuidadosamente redactados que reflejan las necesidades interpretadas a partir de lo enunciado por el cliente, organizados en una lista jerárquica con valores de importancia para muchas o todas las necesidades [42].

El proceso de identificación de necesidades consta de cuatro etapas: recopilar datos sin procesar de los clientes, interpretar los datos sin procesar en términos de las necesidades de clientes, organizar las necesidades en una jerarquía de necesidades primarias, secundarias y, de ser necesario, terciarias y establecer la importancia relativa de las necesidades.

Para la recopilación de datos sin procesar se entablaron varias entrevistas tanto presenciales como virtuales con el cliente las cuales se documentaron mediante grabaciones de audio y/o video de modo que las entrevistas podían ser revisadas con detenimiento posteriormente. Para dichas entrevistas se plantearon preguntas al cliente en las cuales se debió ser cauteloso para evitar sesgos en las mismas que pudieran sugerir algún tipo de solución en particular al problema planteado.

Posteriormente, para la interpretación de los datos sin procesar en términos de las necesidades del cliente se procedió a escuchar nuevamente las entrevistas con el cliente para reescribir sus

enunciados y traducirlos a necesidades siendo cuidadosos en expresar la necesidad en términos de lo que el producto tiene que hacer, no en términos de cómo puede hacerlo, en expresar la necesidad tan específicamente como la información originalmente recopilada, en utilizar enunciados en forma afirmativa, no en forma negativa, expresar la necesidad como atributo del producto y en evitar las palabras debe y debería.

Posteriormente, para la organización de las necesidades en una jerarquía se agruparon las necesidades con similitudes y se redactó una necesidad primaria asociada a cada uno de los grupos de necesidades con características en común. Por su parte, para el establecimiento de la importancia relativa se le facilitó un formulario de jerarquización de necesidades al cliente con las categorías de importancia mostradas en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Categorías de jerarquización facilitadas al cliente.

Valor	Importancia
1	La función es indeseable. No consideraría un producto con esta función.
2	La función no es importante, pero no me importaría tenerla.
3	Sería bueno tener esa función, pero no es necesaria.
4	La función es altamente deseable, pero consideraría un producto sin ella.
5	La función es de importancia crítica. No consideraría un producto sin esta función.

Fuente: Elaboración propia.

2.10.2 Establecimiento de especificaciones.

Las especificaciones dan una descripción precisa de lo que el producto tiene que hacer y son consideradas como la traducción de las necesidades del cliente en términos técnicos. Los objetivos de las especificaciones se establecen claramente en el proceso y representan las expectativas del equipo de desarrollo. Cada una de las especificaciones consta de una métrica, así como de valores marginales e ideales para ésta [42].

De este modo, una vez que se tuvieron definidas las necesidades se procedió a desarrollar una lista de métricas para tener un atributo cuantificable para cada necesidad, tomando en consideración que las métricas deben ser variables dependientes, medibles e incluir su importancia y unidades de medida.

Para establecer los valores objetivos ideales y marginalmente aceptables se utilizó tanto lo enunciado por el cliente como lo investigado mediante una búsqueda externa de subproductos similares que proveyeran contexto para el establecimiento de las métricas.

2.10.3 Generación de conceptos

Esta etapa presentó una importante componente investigativa para poder dar con la generación de posibles conceptos de solución al problema planteado. Para llevar a cabo esta etapa se siguió el proceso mencionado por los autores Ulrich y Eppinger [42] conformado por cuatro pasos: aclarar el problema, búsqueda interna, búsqueda externa y exploración sistemática.

En cuanto a la aclaración del problema, se llevó a cabo una división funcional del problema mediante un diagrama de caja negra del sistema con las entradas y salidas correspondientes. Dicho diagrama se muestra en el capítulo 3 correspondiente a la metodología de diseño.

Una vez definidas las entradas y salidas se definieron subproblemas que permiten enfocar el trabajo inicial en aquellos que se consideran críticos.

Seguidamente, se realizó una búsqueda tanto interna -todas aquellas ideas que surjan del conocimiento propio y el ingenio de quien/quienes están desarrollando el producto- como externa, la cual se refiere a la investigación de posibles alternativas que podrían haber funcionado como posibles soluciones al problema.

Finalmente, en la etapa de exploración sistemática se utilizaron tanto árboles de clasificación como también tablas de combinación, las cuales combinan conceptos de diversos subproblemas para dar origen a una solución candidata tomando en cuenta que estas tablas son de utilidad si se cuenta con conceptos que cuenten con alguna relación entre sí, pues al combinar conceptos independientes, con poca o nula relación no es provechoso.

2.10.4 Selección de conceptos

La selección del concepto corresponde a la actividad en la que se analizan y en forma secuencial se eliminan varios conceptos de producto, con objeto de identificar el concepto(s) más prometedor(es). El proceso requiere por lo general de varias iteraciones al momento de ser ejecutado [42].

El proceso de selección se llevó a cabo por medio de dos etapas: filtrado y evaluación de conceptos. En la primera de ellas se descartaron aquellos conceptos desfavorables y avanzaron a la siguiente fase únicamente aquellos conceptos que cumplieran en mayor proporción las necesidades interpretadas a partir de lo mencionado por el cliente. Para llegar a ese punto, se pueden realizar combinaciones, descartes o aprobaciones en los conceptos que se estén evaluando. Para tomar la decisión se utilizó una matriz de evaluación en la cual se escogió a uno de los conceptos como referencia y los demás se evaluaron siguiendo la siguiente nomenclatura mostrada en [42]:

- +: concepto es mejor que la referencia en la categoría que se esté evaluando.
- -: concepto es peor que la referencia en la categoría que se esté evaluando.
- 0: concepto es igual que la referencia en la categoría que se esté evaluando.

Por otro lado, la etapa de la evaluación de conceptos se llevó a cabo con los conceptos obtenidos de la etapa anterior de filtrado. En esta etapa la evaluación es más precisa pues se asigna una puntuación que permite seleccionar el concepto ganador a ser desarrollado. Al igual que para la etapa de filtrado, se utilizó un concepto de referencia y se usó la siguiente escala de evaluación [42]:

- 1: La función es notablemente peor o menor que la referencia.
- 2: La función es ligeramente peor o menor que la referencia.
- 3: Referencia.
- 4: La función es ligeramente superior o mejor que la referencia.
- 5: La función es notablemente superior o mejor que la referencia.

2.10.5 Prueba de conceptos

En la etapa de prueba de conceptos uno o más conceptos se prueban para verificar que las necesidades del cliente se han satisfecho, se evalúa el potencial de mercado del producto y se identifica cualquier defecto que debe ser corregido durante un desarrollo posterior. Si la respuesta del cliente es mala, el proyecto del desarrollo puede terminar o se pueden repetir actividades anteriores según sea necesario [42].

Capítulo 2. Marco Teórico

Esta etapa consistió en una serie de pruebas que permitieron evaluar el grado de cumplimiento de las necesidades. Las pruebas realizadas se apoyaron tanto en las necesidades como en las especificaciones del proyecto y fueron de naturaleza tanto cualitativa como cuantitativa.

Capítulo 3. Metodología

En el presente capítulo se muestran en detalle los resultados obtenidos, así como las acciones claras y precisas que se siguieron como parte de cada una de las etapas de la metodología de diseño antes mencionada. De igual forma, se detallan los alcances, limitaciones y especificaciones técnicas relevantes durante el desarrollo de la solución.

3.1 Identificación de necesidades del cliente

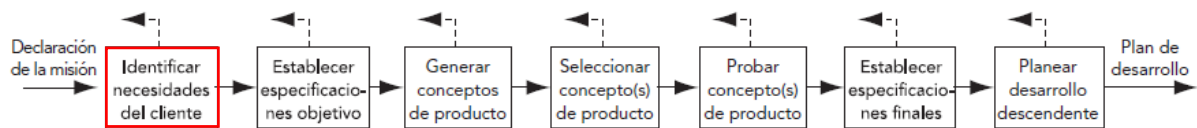


Figura 3.1. Ubicación de la etapa de identificación de necesidades del cliente dentro del proceso de diseño propuesto por Ulrich y Eppinger. Fuente: [42].

El proceso de identificación de necesidades consta -tal y como se mencionó en la sección 2.10.1 del presente informe- de cuatro etapas: recopilar datos sin procesar de los clientes, interpretar los datos sin procesar en términos de las necesidades de clientes, organizar las necesidades en una jerarquía de necesidades primarias, secundarias y, de ser necesario, terciarias y establecer la importancia relativa de las necesidades. En la presente sección se muestran las acciones realizadas y los resultados obtenidos como parte de cada una de estas etapas.

3.1.1 Recopilar datos sin procesar del cliente

Para la recopilación de datos sin procesar del cliente, ante los recursos económicos con lo que se contaban y las facilidades de comunicación y contacto con el cliente, se decidió utilizar las entrevistas con este para recabar la información correspondiente a las necesidades que buscaba satisfacer por medio del presente proyecto. Para ello se establecieron dos entrevistas principales -una virtual y otra presencial- y luego se realizaron varias consultas puntuales sobre dudas que surgieron después de las entrevistas.

Ambas entrevistas consistieron tanto en dudas realizadas por el entrevistador acerca de aspectos relacionados con lo que deseaba el cliente, qué problema enfrentaba, cómo lo satisfacía actualmente, entre otras, como también en expresiones del cliente acerca de sus intereses, comentarios y sugerencias. Las dos entrevistas fueron documentadas mediante grabaciones de

audio y/o video con la autorización del cliente para su posterior análisis minucioso en etapas posteriores del proceso de diseño. De dichas grabaciones se extrajeron los enunciados del cliente mostrados en la segunda columna de la tabla 3.1.

3.1.2 Interpretación de los datos sin procesar en términos de las necesidades del cliente.

Una vez realizadas y documentadas las entrevistas con el cliente se procedió a escucharlas nuevamente y con detenimiento para poder ir extrayendo todos los enunciados de relevancia para el proyecto que había expresado el cliente. Una vez extraídos dichos enunciados se procedió a traducirlos en necesidades redactadas de modo tal que funcionaran como guía al equipo de desarrollo para poder identificar los aspectos claves a considerar en el diseño de una solución.

Durante la redacción de los enunciados de necesidades estipulados por parte del cliente se tomaron en cuenta las sugerencias mencionadas en la sección 2.10.1 del presente informe acerca de la redacción de las necesidades. Los enunciados del cliente con su correspondiente necesidad interpretada se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Enunciados del cliente y necesidades interpretadas a partir de estos.

Cliente: Juan Carlos Brenes Torres	Entrevistador: Daniel Monge Fecha: 28 julio 2022 Actualmente satisface la necesidad: Con sistema de deposición manual Tipo de usuario: Miembro proyecto PROE.	
Pregunta/Sugerencia	Enunciado del cliente	Necesidad interpretada
Del método actual qué le gusta y qué le disgusta	Me gusta que tenga botón y batería. Entre más tiempo tengo el botón estripado más líquido deposita.	El SD tiene una funcionalidad de deposición manual.
	Me gustaría conservar la opción de un botón que active el sistema, le meta tensión a la bomba y que deponga la gota por si la programación no me funciona.	
	Me gusta que el sistema bombea el líquido ferromagnético adecuadamente.	El SD es capaz de depositar una sustancia ferromagnética.

Capítulo 3. Metodología

Tabla 3.1. Enunciados del cliente y necesidades interpretadas a partir de estos (continuación).

	<p>No me gusta la falta de consistencia entre factores como tamaño de gota, tiempo de trabajo de la bomba, flujo y caudal del sistema y en general relación entre factores. Cuánto caudal necesito para un tamaño de gota en específico.</p> <p>El robot sabe que, si se activa un segundo la bomba, depone una gota de tal tamaño. No se tiene parametrización entre factores. Saber qué flujo, qué presión y por cuanto tiempo me dan como resultado una gota de tal tamaño.</p> <p>No me gusta la falta de parametrización y que me toca hacerlo a puro ojo.</p>	<p>Se cuenta con una relación entre parámetros influyentes en el tamaño de gota que se deposita.</p>
	<p>Me gustaría poder definir un tamaño de gota y que el sistema sepa en cuánto tiempo de la bomba, presión, flujo y demás requiere para lograr eso y que ya no sea manual y definido a simple vista.</p>	<p>El SD controla los parámetros influyentes en el tamaño de gota a partir del tamaño especificado por el usuario.</p>
	<p>Dar la receta y relación entre parámetros y dejarlo claro en el programa para que se puede implementar a futuro en otro robot</p>	<p>La relación entre parámetros influyentes en el tamaño de gota está claramente definida.</p>
	<p>No me gusta que quedó muy grande y pesado.</p>	<p>El SD es ligero y de tamaño reducido.</p>
	<p>Me gustaría que a donde vaya a poner el líquido sea removible y lavable, así como las mangueras para que se pueda limpiar. Que el diseño pueda ser lavable en general.</p>	<p>El SD es fácilmente lavable.</p>
<p>Tiempo de funcionamiento continuo</p>	<p>Me gustaría que el sistema funcione aproximadamente durante 30 minutos.</p>	<p>El SD se ajusta al tiempo de operación requerido.</p>
<p>Tiempo de recarga de depósitos</p>	<p>El líquido creo que lo vamos a estar gastando cada 5 minutos. Se puede vivir con estar cambiando el envase con la sustancia a cada rato. Ojalá que no quede demasiado pequeño para que las recargas no sean demasiado seguidas.</p>	<p>Tamaño de depósitos permite tiempos distanciados de recarga de la sustancia.</p>
	<p>Quitar y poner los repositorios debe ser fácil para la recarga y la limpieza del sistema.</p>	<p>Los envases son accesibles y fáciles de remplazar.</p>
<p>Frecuencia de deposición/tamaño de gota</p>	<p>Un buen número de tamaño/frecuencia es una gota y otro distanciamiento del tamaño de una gota y luego otra gota.</p>	<p>El SD deposita las gotas con una distancia entre ellas.</p>
<p>Velocidad de deposición de la gota</p>	<p>Dejar la deposición de gota lo más rápido posible y dejarlo a una velocidad de deposición constante.</p>	<p>El SD cumple con la velocidad de deposición solicitada.</p>
	<p>Me gustaría saber a partir de qué velocidad del Robotino® la gota se deforma.</p>	<p>El SD cuenta con rangos definidos de velocidad de traslado del robot para una operación satisfactoria.</p>

Capítulo 3. Metodología

Tabla 3.1. Enunciados del cliente y necesidades interpretadas a partir de estos (continuación).

Consideraciones de presión y tamaño de la bomba y altura de deposición.	La gota no puede ir muy presurizada porque pierde el efecto magnético y se despilfarra.	El SD cuenta con presión adecuada para mantener el efecto ferromagnético de la sustancia.
	Prefiero bomba pequeña y de menos presión. Lo que más me interesa es que sea liviana y pequeña.	Sistema de bombeo es liviano y de tamaño reducido.
	Puedo vivir con que el robot se detenga, deponga la gota y luego continúe.	El SD podría detenerse para depositar la sustancia
	La altura de deposición influye en la efectividad de la deposición. Yo manejé 1 cm del suelo para que la gota no se deforme. Entre 6 mm y 1 cm. Más de un cm solo si demuestro que la gota funcione bien.	El SD cuenta con altura de deposición adecuada para mantener el efecto ferromagnético de la sustancia.
Automatizada/control	Busco que yo pueda decir tamaños de gota en diámetro y cada cuanto la deposición en términos de distancia y él lo traduzca en funcionamiento del sistema para poder yo luego hacer experimentos e ir variando esos parámetros.	El SD recibe como entradas el tamaño de gota y la distancia de deposición y lo ejecuta.
Sensibilidad a condiciones externas	Preferiría que sí esté aislado para que no se mezclen con cosas externas y también porque la sustancia mancha. Preferiblemente sellados los envases para evitar derrames. Puede ser fabricado o comprado el envase	Envases de sustancias son sellados.
Alimentación eléctrica	Preferiría alimentación desde el mismo Robotino® para solo tener que cargar una cosa y no dos cosas.	El SD es alimentado por el robot donde es instalado.
Cantidad puntos de deposición	No, solo quiero un punto de deposición.	El SD cuenta con un solo punto de deposición de feromona.
Tipo de magnetos	Magnetizo con neodimio y solo utilicé dos. Podría utilizar más y lograr mayor magnetización, pero no mucha porque se opone al bombeo del fluido y funge como válvula magnética.	El SD utiliza magnetos de neodimio en cantidad tal que la magnetización resultante permite el flujo de la feromona.
	Líquido a veces se atrae por parte de los magnetos. Se debe buscar que el campo magnético sobre la gota que ya se depuso debe ser mínimo.	El SD evita que el campo magnético de los imanes atraiga las gotas ya depositadas.
Mezcla feromona	La idea es que la mezcla se dé cuando se va a deponer para que podamos estar haciendo pruebas por horas sin preocuparnos de que la reacción ya se está dando en alguno de los envases. Mezcla podría darse un poco antes de la magnetización.	El SD evita que la reacción de evaporación de la feromona se dé mientras está almacenada.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Organizar las necesidades en una jerarquía

Para organizar las necesidades en una jerarquía, inicialmente se redactó una lista con todas las necesidades interpretadas y obtenidas en el paso anterior tal y como se muestra en la tabla 3.2

Tabla 3.2. Lista de necesidades.

1.	El SD tiene una funcionalidad de deposición manual.
2.	El SD recibe como entradas el tamaño de gota y la distancia de deposición y lo ejecuta.
3.	El SD es capaz de depositar una sustancia ferromagnética.
4.	El SD se ajusta al tiempo de operación requerido.
5.	Se cuenta con una relación entre parámetros influyentes en el tamaño de gota que se deposita.
6.	El SD controla los parámetros influyentes en el tamaño de gota a partir del tamaño especificado por el usuario.
7.	La relación entre parámetros influyentes en el tamaño de gota está claramente definida.
8.	El SD es ligero y de tamaño reducido.
9.	Sistema de bombeo es liviano y de tamaño reducido
10.	El SD es fácilmente lavable.
11.	Tamaño de depósitos permite tiempos distanciados de recarga de la sustancia.
12.	Envases de sustancias son sellados.
13.	Los envases son accesibles y fáciles de remplazar.
14.	El SD deposita las gotas con una distancia entre ellas
15.	El SD cumple con la velocidad de deposición solicitada.
16.	El SD cuenta con rangos definidos de velocidad de traslado del robot para una operación satisfactoria.
17.	El SD cuenta con presión adecuada para mantener el efecto ferromagnético de la sustancia.
18.	El SD podría detenerse para depositar la sustancia.
19.	El SD cuenta con altura de deposición adecuada para mantener el efecto ferromagnético de la sustancia.
20.	El SD utiliza magnetos de neodimio en cantidad tal que la magnetización resultante permite el flujo de la feromona.
21.	El SD evita que el campo magnético de los imanes atraiga las gotas ya depositadas.
22.	El SD es alimentado por el robot donde es instalado.
23.	El SD cuenta con un solo punto de deposición de feromona.
24.	El SD evita que la reacción de evaporación de la feromona se dé mientras está almacenada.

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, se procedió a agrupar las necesidades con similitudes entre sí, y una vez definidos los grupos con todas las necesidades con alguna o algunas semejanzas, se procedió a redactar una necesidad primaria que lograra describir todo lo descrito por las necesidades agrupadas. Algunas necesidades no formaron parte de ningún grupo, razón por la cual esta fueron tomadas como necesidades primarias.

Capítulo 3. Metodología

El resultado de la organización jerárquica de las necesidades se muestra en la tabla 3.3. Los asteriscos y signos de exclamación corresponden a la importancia relativa de las necesidades cuyo significado se detallará en la siguiente sección.

Tabla 3.3. Resultado de jerarquización de necesidades.

<p>***El SD cuenta con operación tanto manual como automática para la deposición de gotas de distintos tamaños a diferentes distancias</p> <p>El SD tiene una funcionalidad de deposición manual. El SD recibe como entradas el tamaño de gota y la distancia de deposición y lo ejecuta.</p>	<p>***El SD deposita la sustancia ferromagnética durante el tiempo de operación requerido.</p> <p>El SD es capaz de depositar una sustancia ferromagnética. El SD se ajusta al tiempo de operación requerido.</p>
<p>***El SD cuenta con parametrización de los factores influyentes en el tamaño y distanciamiento entre gotas de feromona.</p> <p>Se cuenta con una relación entre parámetros influyentes en el tamaño de gota que se deposita. El SD controla los parámetros influyentes en el tamaño de gota a partir del tamaño especificado por el usuario. La relación entre parámetros influyentes en el tamaño de gota está claramente definida.</p>	<p>El SD cumple con necesidades de tamaño y peso</p> <p>**El SD es ligero y de tamaño reducido. **! Sistema de bombeo es liviano y de tamaño reducido</p>
<p>Los envases del SD son lavables, sellados, removibles y de tamaño tal que permitan operación continua del sistema.</p> <p>***El SD es fácilmente lavable. *Tamaño de depósitos permite tiempos distanciados de recarga de la sustancia. *! Envases de sustancias son sellados. ***Los envases son accesibles y fáciles de remplazar.</p>	<p>El SD cuenta con especificaciones de altura, velocidad de deposición y velocidad de desplazamiento para depositar la gota de forma tal que esta mantenga las características deseadas de magnetización y distanciamiento entre gotas.</p> <p>***El SD deposita las gotas con una distancia entre ellas. ***El SD cumple con la velocidad de deposición solicitada. **El SD cuenta con rangos definidos de velocidad de traslado del robot para una operación satisfactoria. El SD cuenta con presión adecuada para mantener el efecto ferromagnético de la sustancia. *El SD podría detenerse para depositar la sustancia ***El SD cuenta con altura de deposición adecuada para mantener el efecto ferromagnético de la sustancia.</p>
<p>El SD emplea un arreglo de magnetos que permite la magnetización de la feromona sin atraer a las gotas ya depositadas en el suelo.</p> <p>**El SD utiliza magnetos de neodimio en cantidad tal que la magnetización resultante permite el flujo de la feromona. ***El SD evita que el campo magnético de los imanes atraiga las gotas ya depositadas.</p>	<p>**El SD es alimentado por el robot donde es instalado.</p>
<p>**El SD cuenta con un solo punto de deposición de feromona.</p>	<p>***! El SD evita que la reacción de evaporación de la feromona se dé mientras está almacenada.</p>

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4 Establecer la importancia relativa de las necesidades

Para establecer la importancia relativa de las necesidades se procedió a suministrarle al cliente un formulario de importancia de las necesidades más relevantes de la lista de necesidades mostrada en la tabla 3.2. En dicho formulario -disponible en el Apéndice A- se le solicitaba determinar el nivel de importancia relativo de cada necesidad con base en la escala descrita en la sección 2.10.1 del presente informe y además se le solicitaba marcar con una “X” en aquellas necesidades que considerara únicas, interesantes y/o inesperadas con el fin de encontrar las necesidades latentes.

A partir de los resultados obtenidos de ese formulario fue posible asignar la importancia relativa mostrada en la tabla 3.3. De esta forma, las necesidades que tienen tres asteriscos son aquellas que son de importancia crítica, las que tienen dos asteriscos son altamente deseables, las que tienen uno son aquellas que sería bueno tenerlas y las que no tienen ninguno son aquellas que son consideradas no importantes mas no indeseables por parte del cliente. Por otro lado, aquellas que tienen el signo de exclamación corresponden a las necesidades que el cliente identificó como latentes al ser consideradas únicas, interesantes y/o inesperadas.

Al finalizar esta etapa se analizaron los resultados de modo que se determinó que se habían cubierto todas las dudas a efectuarle al cliente sobre lo que se deseaba obtener y además que se contaba con un panorama claro en cuanto a las necesidades que aquejaban al mismo.

3.2 Establecimiento de especificaciones

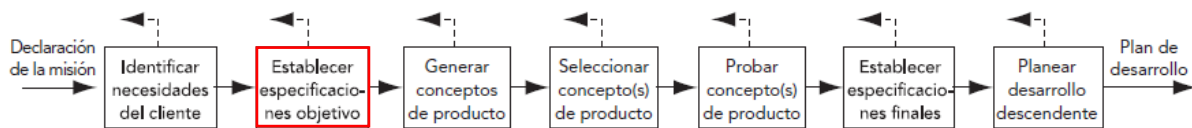


Figura 3.2. Ubicación de la etapa de establecimiento de especificaciones dentro del proceso de diseño propuesto por Ulrich y Eppinger. Fuente: [42].

Para el establecimiento de especificaciones inicialmente se desarrolló una lista de métricas, seguidamente se investigó sobre información que proveyera contexto, y finalmente se establecieron los valores objetivos e ideales asociados a cada métrica, pues una especificación se compone tanto de una métrica, como de un valor asociado a la misma. En la presente sección se muestran los resultados obtenidos en cada una de estas etapas mencionadas.

3.2.1 Elaboración de una lista de métricas

Al momento de redactar las métricas es necesario tomar en cuenta que estas serán la forma de medir que el producto satisface en mayor o menor medida la necesidad del cliente; es decir, que es la manera en que se traducen las necesidades en algo medible que brinda los parámetros adecuados al equipo de diseño.

Para la elaboración de la lista de métricas se siguieron las siguientes directrices [43]:

- Estas deben describir de manera completa cada necesidad (siempre que sea posible).
- Deben corresponder a variables dependientes.
- Deben ser cuantificables (siempre que sea posible).
- Deben incluir criterios estandarizados o normalizados (siempre que sea posible).
- Deben preferiblemente no ser binarias
- Estas deben incluir su importancia y unidad de medida.

La redacción de las métricas se va realizando en el orden de las necesidades y para cada una de las métricas redactadas se revisan las demás necesidades para ver si dicha métrica puede corresponder con alguna otra necesidad. Es por esta razón que en algunas ocasiones -y en este caso es así- una métrica corresponde a más de una necesidad.

Para los casos en que suceda lo anterior -que una métrica corresponda a más de una necesidad- la importancia de la métrica será igual a la importancia más alta que posean las necesidades relacionadas. Esta importancia se rige en una escala del 1 al 5 de acuerdo con las categorías especificadas en la tabla 2.4.

Tomando en consideración todo lo anterior y utilizando la lista de necesidades obtenidas en la sección 3.1 del presente informe, se obtuvo como resultado la lista de métricas mostrada en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Lista de métricas para el sistema de deposición de feromonas.

Métrica núm.	Necesidades	Métricas	Imp.	Unidades
1	1	Método manual de deposición de feromona.	5	Lista
2	2	Entradas digitadas por parte del usuario son diámetro de gota y distancia de deposición.	5	Binaria
3	3, 17, 19	Condición de la feromona tras deposición y traslado del robot	5	Lista
4	4	Tiempo de operación continua del sistema.	5	Minutos
5	5	Parámetros tomados en consideración para deposición de feromona.	5	Lista
6	6, 7	Relación clara entre parámetros influyentes en la deposición de la gota.	5	Binaria
7	8	Peso y tamaño de sistema diseñado.	4	Lista
8	9	Peso y tamaño de sistema de bombeo	4	Lista
9	10	Método de lavado del sistema.	5	Lista
10	11	Tiempo de recarga de repositorios	3	min
11	12	Sellado de repositorios.	3	Lista
12	13	Tiempo de reemplazo de cada repositorio.	5	s
13	14	Deposición se realiza mediante goteo distanciado	5	Binaria
14	15	Velocidad de deposición constante y lo más rápida posible	5	Binaria
15	16	Velocidades críticas de funcionamiento identificadas.	4	Lista
16	18	Operación durante la deposición de la feromona	3	Lista
17	20	Flujo de feromona a través de la etapa de magnetización	4	Lista
18	21	Comportamiento de las gotas depositadas ante presencia de imanes en robot.	5	Lista
19	22	Sistema es alimentado por el Robotino®	4	Binaria
20	23	Un único punto de deposición	4	Binaria
21	24	Evaporación de la sustancia no sucede antes de la deposición	5	Binaria

Fuente: Elaboración propia.

Idealmente, cada necesidad debe disponer de al menos una especificación e, idealmente, cada especificación debería responder de manera directa a una única necesidad [43]; sin embargo, esto no siempre es posible y es de utilidad poder visualizar esta correspondencia mediante una matriz como la mostrada en la tabla 3.5, en la cual se logra observar que solamente dos métricas corresponden a más de una necesidad sin sobrepasar el tener una métrica para más de tres necesidades, por lo cual es evidente que -en la medida de lo posible- la redacción de las métricas se apegó a la relación 1:1 que idealmente se busca entre métricas y necesidades y viceversa.

Tabla 3.5. Matriz necesidades-métricas

Necesidad	Métrica	Método manual de deposición de feromona.	Entradas digitadas por parte del usuario son diámetro de gota y distancia de deposición.	Condición de la feromona tras deposición y traslado del robot.	Tiempo de operación continua del sistema.	Parámetros tomados en consideración para deposición de feromona.	Relación clara entre parámetros influyentes en la deposición de la gota.	Peso y tamaño de sistema diseñado.	Peso y tamaño de sistema de bombeo.	Método de lavado del sistema.	Tiempo de recarga de repositorios.	Sellado de repositorios.	Tiempo de reemplazo de cada repositorio.	Deposición se realiza mediante goteo distanciado	Velocidad de deposición constante y lo más rápida posible	Velocidades críticas de funcionamiento identificadas.	Operación durante la deposición de la feromona.	Flujo de feromona a través de la etapa de magnetización	Comportamiento de las gotas depositadas ante presencia de imanes en robot.	Sistema es alimentado por el Robotino®	Un único punto de deposición	Evaporación de la sustancia no sucede antes de la deposición	
El SD tiene una funcionalidad de deposición manual.		•																					
El SD recibe como entradas el tamaño de gota y la distancia de deposición y lo ejecuta.			•																				
El SD es capaz de depositar una sustancia ferromagnética.				•																			
El SD cuenta con presión adecuada para mantener el efecto ferromagnético de la sustancia				•																			
El SD cuenta con altura de deposición adecuada para mantener el efecto ferromagnético de la sustancia.				•																			
El SD se ajusta al tiempo de operación requerido.					•																		
Se cuenta con una relación entre parámetros influyentes en el tamaño de gota que se deposita.						•																	
El SD controla los parámetros influyentes en el tamaño de gota a partir del tamaño especificado por el usuario.							•																
La relación entre parámetros influyentes en el tamaño de gota está claramente definida.							•																
El SD es ligero y de tamaño reducido.								•															
Sistema de bombeo es liviano y de tamaño reducido									•														
El SD es fácilmente lavable.										•													
Tamaño de depósitos permite tiempos distanciados de recarga de la sustancia.											•												
Envases de sustancias son sellados.												•											
Los envases son accesibles y fáciles de reemplazar.													•										
El SD deposita las gotas con una distancia entre ellas														•									
El SD cumple con la velocidad de deposición solicitada.															•								
El SD cuenta con rangos definidos de velocidad de traslado del robot para una operación satisfactoria.																•							
El SD podría detenerse para depositar la sustancia.																	•						
El SD utiliza magnetos de neodimio en cantidad tal que la magnetización resultante permite el flujo de la feromona.																		•					
El SD evita que el campo magnético de los imanes atraiga las gotas ya depositadas.																			•				
El SD es alimentado por el robot donde es instalado.																				•			
El SD cuenta con un solo punto de deposición de feromona.																					•		
El SD evita que la reacción de evaporación de la feromona se dé mientras está almacenada.																						•	

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Recabar información que provea contexto

El recabar información juega un papel relevante en el establecimiento de especificaciones pues permite orientar al grupo de diseño sobre los posibles valores que puede y/o debe esperar obtener del producto en diversos rubros o características.

Como posibles métodos para recabar dicha información se pueden tomar en cuenta tres aspectos: los enunciados expresados por el cliente durante las entrevistas, la importancia relativa de cada una de las necesidades y finalmente una comparación con la competencia.

Al ser el presente un proyecto ad hoc el cual no se pretende fabricar de forma masiva ni tampoco en primera instancia comercializarlo ni ponerlo a competir con productos similares en el mercado, el método de recabo de información correspondiente a compararlo con la competencia es inadecuado pues no existe referencia con la cual comparar el producto que se desea desarrollar.

Por esta razón, los enunciados mencionados por el cliente, los valores que explícitamente mencione durante las entrevistas, así como la importancia de las necesidades manifestadas en la encuesta suministrada y la determinada por medio de las expresiones, gestos y comentarios que se haga para cada una de las necesidades, se toman como principal fuente de referencia para poder recabar información acerca del producto a desarrollar pues la experiencia del cliente con este tipo de dispositivos permite orientar claramente y dar el contexto requerido del mismo.

3.2.3 Establecimiento de valores objetivos y marginales

A partir de la información recabada de la sección anterior se cuenta con un contexto claro para asignar valores objetivo a cada una de las métricas determinadas. Dos tipos de valores objetivo son útiles: un valor ideal y un valor marginalmente aceptable. El valor ideal es el mejor resultado que se puede esperar del producto. Por otro lado, el valor marginalmente aceptable es aquel que haría el producto apenas aceptable para el cliente.

Tomando en cuenta las definiciones anteriores y la información recabada de la etapa anterior, se procedió a definir los valores ideales y marginalmente aceptables para cada una de las métricas de modo que ya se tiene las especificaciones completas: compuestas por una métrica y un valor. El resultado obtenido se observa en la tabla 3.6. La importancia mostrada se rige en una escala del 1 al 5 de acuerdo con las categorías especificadas en la tabla 2.4.

Capítulo 3. Metodología

Tabla 3.6. Especificaciones completas: métricas con sus respectivos valores ideales y objetivos.

Métrica num.	Necesidades	Métricas	Imp.	Unidades	Valor marginal	Valor ideal
1	1	Método manual de deposición de feromona.	5	Lista	Botón	Botón Palanca
2	2	Entradas digitadas por parte del usuario son diámetro de gota y distancia de deposición.	5	Binaria	Sí	Sí
3	3, 17, 19	Condición de la feromona tras deposición y traslado del robot	5	Lista	Magnetizada. Distanciada de otras gotas.	Magnetizada. Gota concentrada. Distanciada de otras gotas.
4	4	Tiempo de operación continua del sistema.	5	Minutos	30	>30
5	5	Parámetros tomados en consideración para deposición de feromona.	5	Lista	Tiempo de activación de la bomba Presión Flujo	Tiempo de activación de la bomba Presión Flujo Distancia Magnetización
6	6, 7	Relación clara entre parámetros influyentes en la deposición de la gota.	5	Binaria	Sí	Sí
7	8	Peso y tamaño de sistema diseñado.	4	Lista	Dimensiones menores o iguales a 105x93x130 mm Peso menor o igual a 450.62 g	Dimensiones menores a 105x93x130 mm Peso menor a 450.62 g
8	9	Peso y tamaño de sistema de bombeo	4	Lista	Dimensiones menores o iguales a 105x93x130 mm Peso menor o igual a 70.02 g	Dimensiones menores a 105x93x130 mm Peso menor a 70.02 g
9	10	Método de lavado del sistema.	5	Lista	Purga automática Purga+manual Completamente manual	Purga automática Purga+manual
10	11	Tiempo de recarga de repositorios	3	min	5 min	>5 min
11	12	Sellado de repositorios.	3	Lista	Tapa	Tapa Tapa con empaques. Sellado presurizable.

Tabla 3.6. Especificaciones completas: métricas con sus respectivos valores ideales y objetivos (continuación).

12	13	Tiempo de reemplazo de cada repositorio.	5	s	30	<30
13	14	Deposición se realiza mediante goteo distanciado	5	Binaria	Sí	Sí
14	15	Velocidad de deposición constante y lo más rápida posible	5	Binaria	Sí	Sí
15	16	Velocidades críticas de funcionamiento identificadas.	4	Lista	Velocidad máxima para adecuada deposición. Velocidad mínima para adecuada deposición	Velocidad máxima para adecuada deposición. Velocidad mínima para adecuada deposición Velocidad ideal de funcionamiento.
16	18	Operación durante la deposición de la feromona	3	Lista	Con pausas al momento de deposición.	Sin pausas
17	20	Flujo de feromona a través de la etapa de magnetización	4	Lista	Fluido con dificultad leve. Fluido con dificultad moderada	Fluido sin ninguna dificultad.
18	21	Comportamiento de las gotas depositadas ante presencia de imanes en robot.	5	Lista	Levemente atraídos sin causar distorsión en forma ni magnetización de la sustancia.	Sin ninguna atracción.
19	22	Sistema es alimentado por el Robotino®	4	Binaria	Sí	Sí
20	23	Un único punto de deposición	4	Binaria	Sí	Sí
21	24	Evaporación de la sustancia no sucede antes de la deposición	5	Binaria	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia.

Una vez definidas las especificaciones del producto a desarrollar, al igual que al final de todas las etapas del proceso de diseño, se llevó a cabo un análisis para asegurar que las especificaciones

cumplieran con los objetivos del proyecto, que los valores definidos fueran logrables, así como asegurar que se contaba con todas las especificaciones necesaria. Una vez verificado lo anterior se determinó que se estaba en condición de avanzar hacia la siguiente etapa del proceso de diseño correspondiente a la generación de conceptos.

3.3 Generación de conceptos

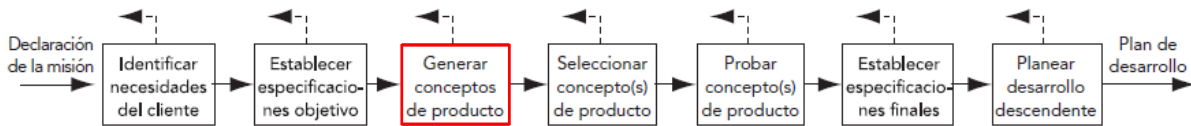


Figura 3.3. Ubicación de la etapa de generación de conceptos dentro del proceso de diseño propuesto por Ulrich y Eppinger. Fuente: [42].

Un concepto consiste en una descripción aproximada de la tecnología, forma y principio de funcionamiento del producto a desarrollar. Este consiste en una descripción concisa de la manera en que el producto llegará a satisfacer las necesidades del cliente y se representa generalmente como un bosquejo o como un modelo tridimensional aproximado y a veces es acompañado por una breve descripción conceptual [42].

La generación adecuada de conceptos es un paso trascendental dentro del proceso de diseño en ingeniería para garantizar el desarrollo de un producto adecuado y que cumpla con los requerimientos y necesidades del cliente. Para ello, se lleva a cabo este proceso mediante cuatro pasos propuestos por los autores Ulrich y Eppinger en [42] los cuales son: aclarar el problema, buscar internamente, buscar externamente y explorar sistemáticamente. Asimismo, al igual que en todas las etapas, se culmina con una etapa de análisis de los resultados obtenidos en esta etapa del proceso de diseño.

A continuación, en la presente sección se describen y explican detalladamente todas las acciones, decisiones intermedias y resultados obtenidos a raíz de cada una de las etapas antes mencionadas.

3.3.1 Aclaración del problema

La aclaración del problema es el primer paso de la etapa de generación de conceptos pues es donde se entiende de mejor manera la problemática que aqueja al cliente, se descompone el

problema, y se determinan los subproblemas críticos por los cuales se debe comenzar a trabajar y los cuales orientan el trabajo del equipo de desarrollo para poder generar el mejor producto posible.

La descomposición del problema en subproblemas más sencillos permite atacar el problema general de manera más práctica pues en ocasiones -y tal fue el caso del presente proyecto- atacar todo el problema como uno solo no solamente se torna complicado, sino que además omite detalles que mediante una descomposición funcional se pueden refinar y dar como resultado un mejor producto.

Inicialmente, para la descomposición funcional se realizó un diagrama de caja negra tal y como se muestra en la figura 3.4 donde se tienen como entradas la energía que alimentará el sistema, los materiales, que en este caso son las dos sustancias que componen la feromona a utilizar [1]. Y finalmente, la última entrada corresponde a las señales de accionamiento manual por parte del usuario y de accionamiento automático por parte del Robotino®. Finalmente, la única salida del sistema corresponde al material -la feromona- ya mezclado y magnetizado.

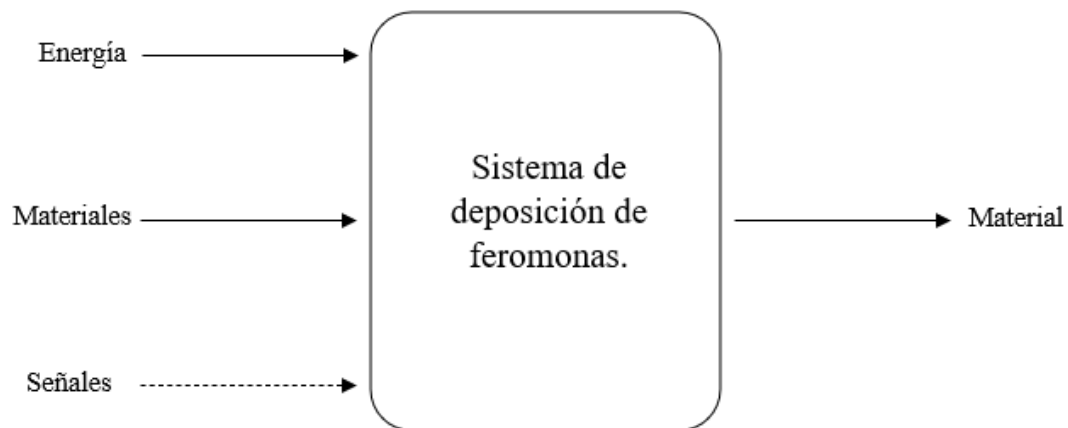


Figura 3.4. Representación de caja negra. Fuente: adaptado de: [42].

Una vez realizada la representación de caja negra del sistema a desarrollar se procede a realizar un refinamiento de este mediante una descomposición que muestra las subfunciones o subproblemas que se deben atender y para los cuales se debe buscar solución. El diagrama de descomposición funcional refinado se muestra en la figura 3.5.

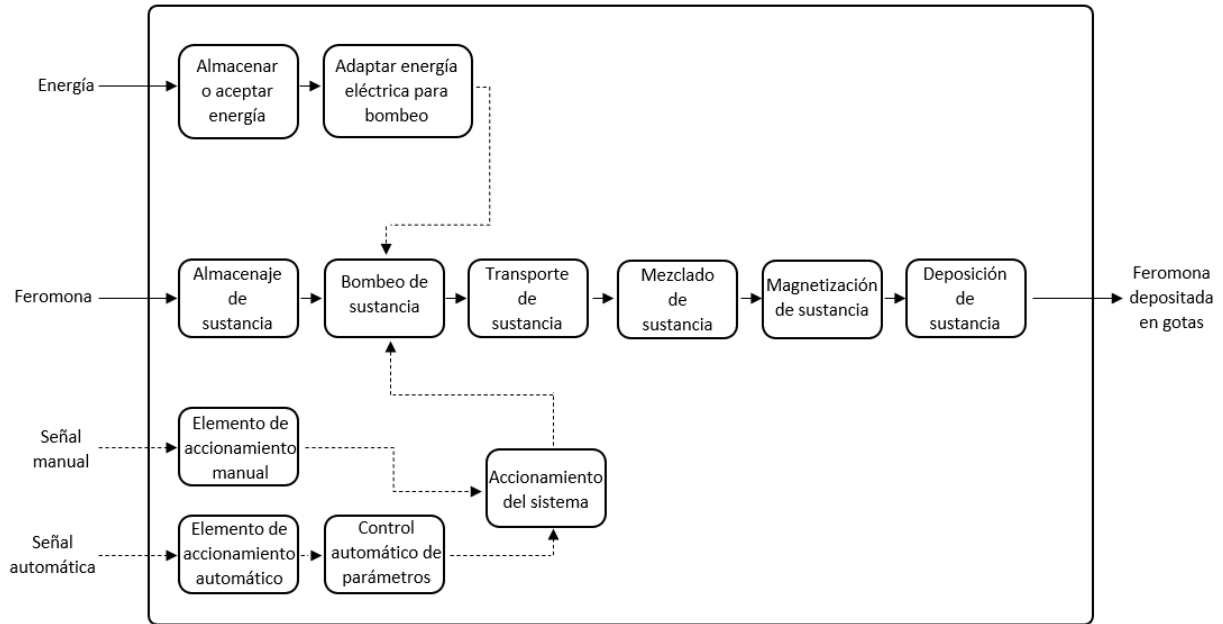


Figura 3.5. Descomposición funcional del sistema. Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizada la descomposición funcional mostrada en la figura 3.5 se procedió a identificar los subproblemas críticos para el proyecto en cuestión. En este caso dichos subproblemas consisten en el almacenaje y bombeo de la sustancia, el mezclado de esta y finalmente la deposición de la misma. Seguidamente, una vez identificados los problemas críticos se prosiguió con las etapas de búsqueda interna y externa de información para la generación de conceptos.

En la siguiente sección se mostrarán los resultados obtenidos tanto de la búsqueda interna como externa, para cada uno de los subproblemas mostrados en la figura 3.5.

3.3.2 Búsqueda interna

El proceso de búsqueda interna de conceptos corresponde a aquel que surge del conocimiento, las ideas y la creatividad de las personas encargadas del desarrollo del producto. Para ello, se desarrolló una lluvia de ideas con conceptos de solución que podrían funcionar para cada uno de los subproblemas identificados. Para llevarlo a cabo se tomó en cuenta la suspensión del juicio con respecto a las ideas de solución a proponer, se procuró generar muchas ideas -tantas como fuese posible- así como también dar la bienvenida incluso a aquellas ideas que no parecieran factibles

pues con refinamiento se pueden mejorar y cuanto menos factible sea la idea más alarga las fronteras del espacio de solución y estimula al equipo a pensar en los límites de posibilidad [42].

Los resultados de la búsqueda interna de conceptos para el subproblema de aceptación o almacenamiento de energía externa se muestran en la tabla 3.7. Los resultados obtenidos muestran como ideas de solución a la alimentación directamente desde el Robotino® de Festo, mediante baterías desechables, baterías recargables o incluso una opción de energía manual en la cual se presurizan los envases con una bomba manual.

Tabla 3.7. Insumos de la búsqueda interna para la aceptación y el almacenamiento de energía externa.

Aceptación y el almacenamiento de energía externa
Robotino®
Baterías
Baterías recargables
Manual

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, para el subproblema de adaptación de la energía para el bombeo, el resultado obtenido a partir de la búsqueda interna se muestra en la tabla 3.8, donde se observa que los resultados obtenidos son una interfaz de potencia y el bombeo manual correspondiente a la alternativa de presurizar los envases manualmente y que dicha presión sea la encargada del bombeo de los fluidos.

Tabla 3.8. Insumos de la búsqueda interna para la adaptación de la energía para el bombeo

Adaptación de la energía para el bombeo
Interfaz de potencia
Bombe manual

Fuente: Elaboración propia

Con respecto al subproblema de almacenamiento de la sustancia el proceso de búsqueda interna dio como resultado las opciones mostradas en la tabla 3.9. En dicha tabla se logra observar cómo las opciones generadas corresponden a envases de vidrio y plástico con distintas variables: presurizables, con tapas, sin tapas e incluso la combinación de las alternativas de utilizar tapas presurizables.

Tabla 3.9. Insumos de la búsqueda interna para el almacenaje de la sustancia.

Almacenaje de la sustancia
Envase de vidrio sin tapa
Envase de plástico sin tapa
Envase presurizable de vidrio
Envase presurizable de plástico
Envase de vidrio con tapa
Envase de plástico con tapa
Envase de vidrio con tapa presurizable
Envase de plástico con tapa presurizable.

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, en lo que corresponde al subproblema de bombeo de la sustancia, el proceso de búsqueda interna mediante una lluvia de ideas dio como resultado los insumos mostrados en la tabla 3.10, donde se observa que se obtuvieron como posibilidades de solución la bomba centrífuga, la bomba manual mencionada antes en donde se plantea la presurización de los envases para el empuje de los líquidos y finalmente, se propone como alternativa un bombeo por gravedad utilizando un electroimán como válvula de modo que los fluidos caigan por efecto gravitatorio y la activación y desactivación de un electroimán detenga el flujo de la sustancia debido a la componente ferromagnética de esta.

Tabla 3.10. Insumos de la búsqueda interna para el bombeo de la sustancia.

Bombeo de la sustancia
Bomba centrífuga
Bomba manual
Bombeo por gravedad como electroimán como válvula

Fuente: Elaboración propia

Con respecto al subproblema de mezclado de la sustancia el proceso de búsqueda interna dio únicamente como resultado la opción mostrada en la tabla 3.11 correspondiente a un tercer depósito al que llegaran las otras dos sustancias y de ahí se mezclaran y se enviaran al punto de deposición.

Tabla 3.11. Insumos de la búsqueda interna para el mezclado de la sustancia.

Mezclado de sustancia
Tercer depósito

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3. Metodología

Por su parte, en cuanto al subproblema de deposición de la sustancia, el proceso de búsqueda interna dio como único resultado el insumo mostrado en la tabla 3.12 correspondiente a simplemente dejar la tubería abierta sin ningún tipo de terminal.

Tabla 3.12. Insumos de la búsqueda interna para la deposición de la sustancia.

Deposición de sustancia
Tubo abierto

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para el subproblema de accionamiento del sistema se tienen dos ramas, el accionamiento debido a la señal manual y el accionamiento debido a la señal automática. Los insumos generados a partir de la búsqueda interna se muestran en la tabla 3.13 en la cual se muestra el uso de relés, de transistores y la alimentación directa de la bomba con el botón.

Tabla 3.13. Insumos de la búsqueda interna para el accionamiento del sistema.

Accionamiento manual del sistema	Accionamiento automático del sistema
Alimentación directa de la bomba con el botón.	Relé
Conexión de botón a relé	Transistor
Conexión de botón a transistor	

Fuente: Elaboración propia

Una vez culminada la etapa de búsqueda interna, se procedió con la etapa de búsqueda externa dentro de la generación de conceptos.

3.3.2 Búsqueda externa

Para el proceso de búsqueda externa se realizaron investigaciones sobre alternativas de solución principalmente a los subproblemas críticos. Para ello, se tomaron en cuenta los resultados obtenidos a partir de las entrevistas con el cliente quien para el caso en cuestión es, además del cliente, un usuario líder y un experto en el producto a desarrollar por lo que sus argumentos, sugerencias y expresiones fungen como una fuente de búsqueda externa de solución. Además, se consultó también literatura publicada con respecto a cada uno de los subproblemas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para diversos subproblemas identificados a partir de la búsqueda externa.

Capítulo 3. Metodología

Los resultados de la búsqueda externa para el subproblema de bombeo de la sustancia se muestran en la tabla 3.14. En dicha tabla se muestra como insumos obtenidos la bomba peristáltica [1], la bomba de diafragma, y bomba magnética [43].

Tabla 3.14. Insumos de la búsqueda externa para el bombeo de la sustancia.

Bombeo de la sustancia
Bomba peristáltica
Bomba de diafragma
Bomba magnética

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, para el subproblema del transporte de sustancia a partir de la búsqueda externa en la fuente [44] se obtuvieron los insumos de solución mostrados en la tabla 3.15.

Tabla 3.15. Insumos de la búsqueda externa para el transporte de la sustancia.

Transporte de la sustancia
Tubería silicón
Tubería antimicrobial
Tubería resistente a químicos
Tubería PVC
Tubería para lácteos y bebidas
Tubería poliuretano
Tubería polietileno
Tubería nylon
Tubería metálica
Tubería teflón

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, para el subproblema de mezclado de la sustancia, a partir de la búsqueda externa se obtuvieron como opciones de solución los conectores tipo “Y” y los conectores tipo “T” tal y como se muestra en la tabla 3.16.

Tabla 3.16. Insumos de la búsqueda externa para el mezclado de la sustancia.

Mezclado de la sustancia
Conector tipo “Y”
Conector tipo “T”

Fuente: Elaboración propia

Para el subproblema de magnetización de la sustancia a partir de [45] se obtuvieron los insumos de posible solución mostrados en la tabla 3.17.

Tabla 3.17. Insumos de la búsqueda externa para la magnetización de la sustancia.

Magnetización de la sustancia
Magnetita
Cerámicos o ferrita
Alnicos
Neodimio
Samario/Cobalto
Electroimán

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para el subproblema de deposición de la sustancia la búsqueda externa dio como resultado la alternativa de solución mostrada en la tabla 3.18 correspondiente a una punta de goteo, llamada *drip tip* en inglés.

Tabla 3.18. Insumos de la búsqueda externa para la deposición de la sustancia.

Deposición de la sustancia
Punta de goteo.

Fuente: Elaboración propia

Para los subproblemas correspondientes a los elementos de accionamiento manual, a los elementos de accionamiento automático, y el control automático de parámetros, al no ser subproblemas críticos ni tampoco aspectos que darían un valor diferenciante al producto, no se llevó a cabo un proceso de búsqueda tan exhaustivo como para el caso de los subproblemas anteriores.

Para el elemento de accionamiento manual, un botón constituye el método más sencillo y adecuado para llevar a cabo esta funcionalidad, e indagar en alternativas similares novedosas aporta poco al producto y solo añade complejidad al proceso de diseño.

Por otro lado, para el elemento de accionamiento automático, al ser un requerimiento obligatorio del proyecto el hecho de que el sistema sea controlado por el Robotino®, a partir de la búsqueda externa de los manuales y funcionalidades de este se determina que la manera más adecuada de llevar a cabo el accionamiento automático es mediante las salidas digitales del robot móvil de modo que el accionamiento de las mismas produzca el comportamiento deseado por parte del sistema.

Finalmente, para el control automático de parámetros, igualmente debido a que es un requerimiento obligatorio del proyecto el hecho de que el sistema sea controlado por el Robotino®,

la manera más apropiada de llevar a cabo dicho control es mediante la programación del Robotino® mediante la herramienta *Robotino® View* para accionar el sistema cada cierto tiempo y solamente los segundos o minutos que sea necesario según los requerimientos especificados por el usuario.

De este modo, una vez culminada el proceso de búsqueda interna y externa para cada uno de los subproblemas identificados, se procedió con la etapa de exploración sistemática tal y como se muestra en la siguiente sección del presente informe.

3.3.3 Exploración sistemática

Una vez realizado el proceso de recopilación de información interna y externa, es requerido analizar todos los conceptos obtenidos con el fin de dar origen a posibles candidatos de solución para cada subfunción [42]. Inicialmente, se somete toda la información obtenida a un proceso de organización mediante árboles de clasificación, los cuales permiten clasificar los conceptos generados en la búsqueda interna y externa gráficamente, de modo que sea más sencillo identificar conceptos que puedan trabajarse en paralelo, así como otros que no merezcan la pena seguir explorando [42].

A este punto, se cuenta con 46 posibles alternativas de solución a los subproblemas planteados anteriormente. La combinación de los mismos da como resultado una cantidad de conceptos de solución cuyo manejo, evaluación y pruebas tomaría gran cantidad de tiempo y trascendería las capacidades del equipo de desarrollo. A continuación, se muestran los árboles de clasificación desarrollados para cada uno de los subproblemas. Dichos árboles permiten la eliminación de algunas de las ramas menos promisorias y realizar un primer filtrado de conceptos para obtener una cantidad de combinaciones de posibles conceptos de solución manejables por parte del equipo de desarrollo.

3.3.3.1 Árboles de clasificación

Para el almacenamiento o aceptación de energía externa el árbol de clasificación se muestra en la figura 3.6. De dicho árbol se descartaron las ramas de baterías y baterías recargables debido a que ello implicaría ya sea agregarle un consumible al sistema o agregar otro elemento que se requiere recargar, cuando parte de los objetivos principales del diseño consisten en tener la menor cantidad de consumibles y que además solo se recargue un único elemento.

Por otro lado, tras un análisis profundo, el equipo de desarrollo determinó que la alternativa de energía manual no es adecuada para el proyecto pues la variación en el nivel de líquido dentro del recipiente significaría a su vez una variación en el nivel de presión dentro de los envases debido a la variación volumétrica dentro del mismo, lo cual significaría una dificultad para el control de parámetros a la hora de la deposición pues los tiempos de activación del sistema para depositar la sustancia serían variables, razón por la cual se descartó la rama de utilizar una bomba manual como fuente de energía. De este modo, se descartan esas ramas y solamente se deja la rama correspondiente a la alimentación del Robotino®.

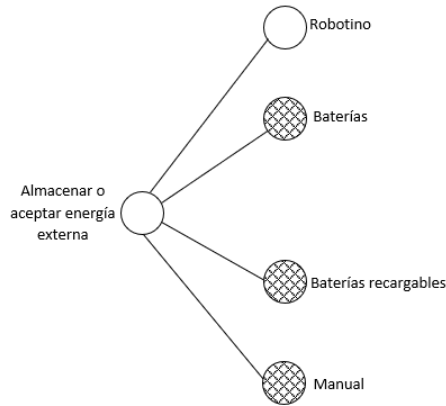


Figura 3.6. Árbol de clasificación para el almacenamiento y aceptación de energía. Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, el árbol de clasificación correspondiente al subproblema de adaptación de la energía para el bombeo se muestra en la figura 3.7. En esta figura se logra observar que la rama de adaptación manual -correspondiente al bombeo manual mencionado antes- se descartó por las razones ya mencionadas de incapacidad de control de parámetros debido a la variación volumétrica y de presión en los envases.

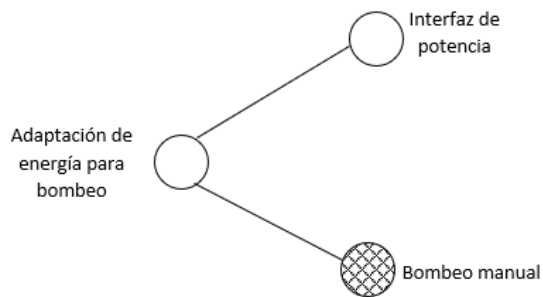


Figura 3.7. Árbol de clasificación para el subproblema de adaptación de energía para el bombeo. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, con respecto al subproblema de almacenamiento de la sustancia el árbol de clasificación correspondiente se muestra en la figura 3.8, en la cual se observa que numerosas ramas fueron eliminadas, debido a razones que se indican a continuación. Inicialmente, todas las ramas correspondientes a envases de plástico fueron descartadas pues el sistema debe ser fácilmente lavable y ante la utilización de óxido de hierro, el plástico se mancha y toma la coloración negra del fluido, además de que es más difícil de lavar que el vidrio. Por otro lado, se descartaron los envases de vidrio con tapa presurizable pues esta rama era solo utilizable en caso de emplear el bombeo manual mencionado, pero este se descartó por las razones antes detalladas, razón por la cual los envases presurizables pasan a ser una alternativa innecesaria para el proyecto.

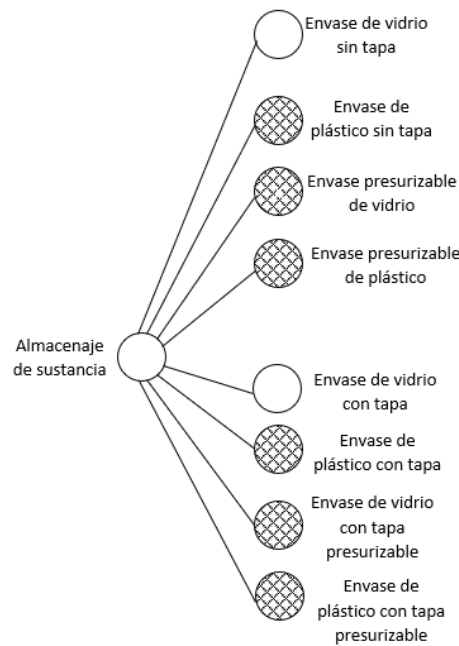


Figura 3.8. Árbol de clasificación para el subproblema de almacenaje de la sustancia. Fuente: Elaboración propia.

El árbol de clasificación correspondiente al subproblema de bombeo de la sustancia se muestra en la figura 3.9. De las ramas de este árbol se descartaron las bombas magnéticas (Q-pumps) pues estas requieren de mucho espacio -y uno de los objetivos del diseño es que sea de tamaño reducido-, además de un diseño completo de la bomba pues no hay diseños comerciales de las mismas, por lo que trasciende el alcance del presente proyecto. Por otro lado, la bomba manual también fue descartada por el poco control sobre los parámetros de interés que se tiene en su implementación

debido a las razones de variación volumétrica y de presión en los envases mencionado anteriormente.

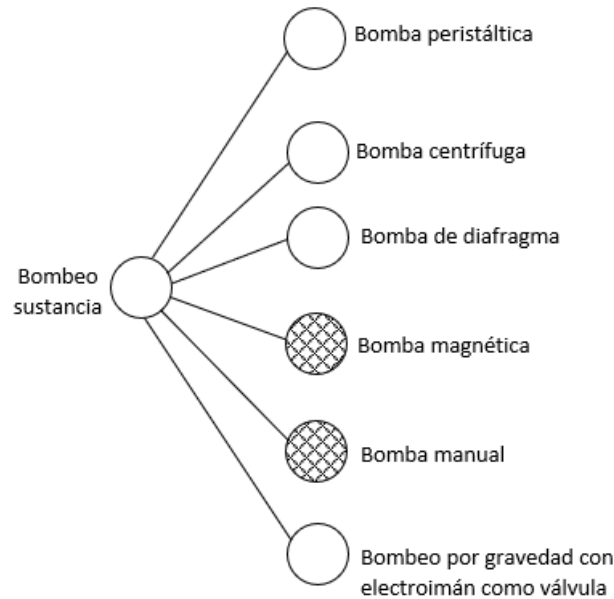


Figura 3.9. Árbol de clasificación para el subproblema de bombeo de la sustancia. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, con respecto al transporte de la sustancia, el árbol de clasificación correspondiente se muestra en la figura 3.10. En dicho árbol de clasificación se decidió descartar inicialmente la rama de tubería antimicrobial por el hecho de que la sustancia a utilizar no requiere de ningún grado de esterilización, por lo que es innecesaria la utilización de este tipo de tuberías. Lo mismo sucede con las tuberías resistentes a químicos, así como las de lácteos y bebidas pues el óxido de hierro, el azúcar, la levadura y el agua no realizan ningún tipo de reacción química ni cuentan con características propias de un fluido químico, ni tampoco requieren de tuberías especializadas para alimentos o bebidas por lo que estas dos opciones son inadecuadas. Finalmente, la tubería metálica y la tubería de teflón se descartan debido a que son poco flexibles y difíciles de acoplar a otras tuberías, razón por la cual su uso para proyectos de tamaño reducido es poco deseable, por lo que se descartan estas dos posibles ramas de solución.

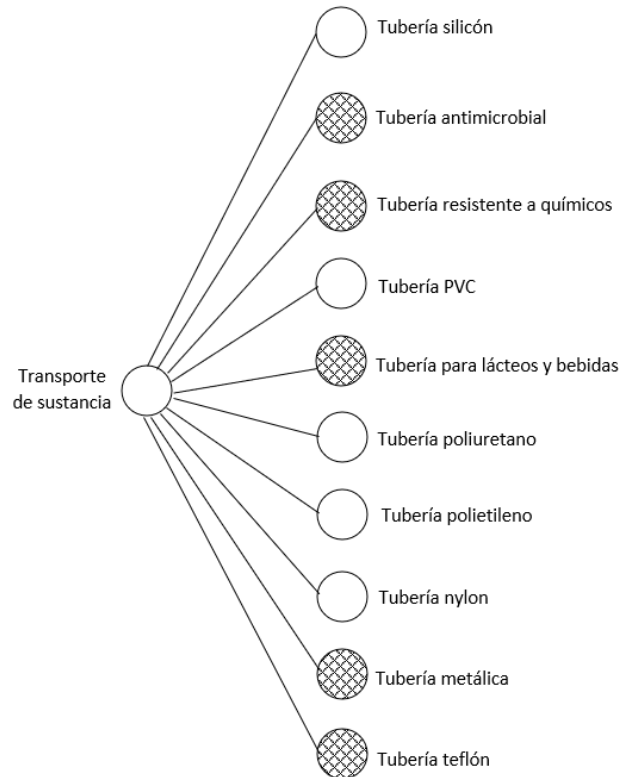


Figura 3.10. Árbol de clasificación para el subproblema de transporte de la sustancia. Fuente: Elaboración propia.

Para el subproblema del mezclado de la sustancia, el árbol de clasificación asociado se muestra en la figura 3.11. En esta se logra observar que la rama de un tercer depósito al cual llegan las dos sustancias, se mezclan y posteriormente son bombeadas para su deposición, se descarta pues dicha opción implicaría una mayor utilización de espacio en el diseño además de probablemente más de una bomba y una de las necesidades de alta importancia del diseño constituye el peso y tamaño reducido del mismo, razón por la cual se prescinde de dicha rama para ese subproblema.

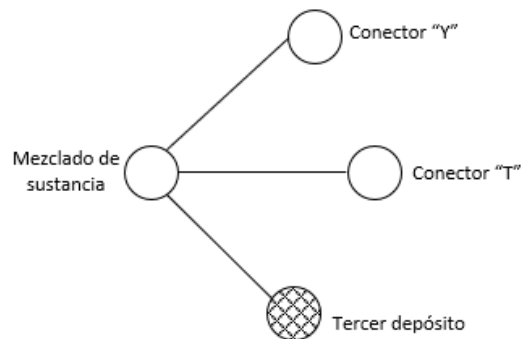


Figura 3.11. Árbol de clasificación para el subproblema de mezclado de la sustancia. Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, para la magnetización de la sustancia el árbol de clasificación correspondiente se muestra en la figura 3.12.

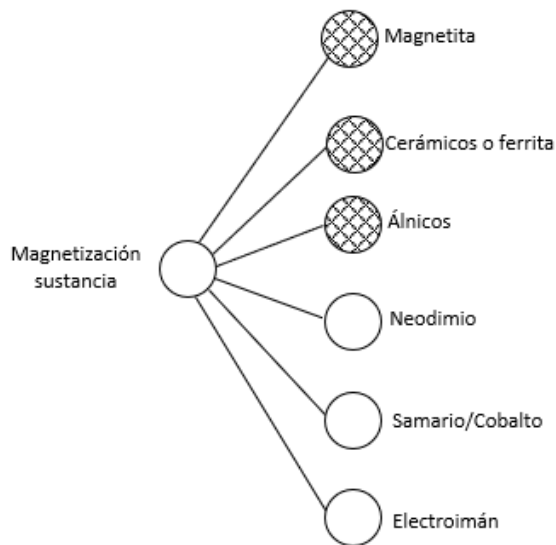


Figura 3.12. Árbol de clasificación para el subproblema de magnetización de la sustancia. Fuente: Elaboración propia.

De dicho árbol de clasificación se decidió prescindir de la magnetita pues este es un imán natural y es una piedra. Para efectos del proyecto se requiere colocar los magnetos tal y como se observa en [1] en medio de dos placas metálicas altamente conductoras de modo que el efecto magnético quede concentrado en medio de dichas placas, por lo que en caso de utilizar magnetita se requeriría de un tratamiento y maquinado posterior a la compra de esta para que pueda ser utilizada y colocada en medio de las dos placas, razón por la cual es un método inconveniente de magnetización.

Por otro lado, los magnetos cerámicos y los alnicos se descartaron debido a la información mostrada en la tabla 3.19, en la cual se muestran los valores de energía de producto máxima ($BH_{\text{máx}}$) lo cual representa la densidad de energía magnética establecida en el espacio entre los dos polos magnéticos del imán, es decir, la energía magnética estática por unidad de volumen del entrehierro. En la tabla correspondiente se observa que los magnetos cerámicos y los alnicos cuentan con valores de energía de producto máxima considerablemente menores a los de los magnetos de neodimio y de samario y cobalto, razón por la cual quedaron descartados para proceder con las mejores opciones para la magnetización de la feromona ferromagnética.

Tabla 3.19. Datos de referencia para magnetización de la sustancia.

Material	BH max	Costo relativo (\$/libra)	Costo relativo (\$/BH max)
Neodimio	40	35	1.7
Samario/Cobalto	26	60	4.9
Álnicos	5	25	9.5
Cerámicos	3	2	0.9

Fuente: [46]

Para la deposición de la sustancia, el árbol de clasificación se muestra en la figura 3.13 en la cual se muestran las dos ramas obtenidas a partir de las búsquedas tanto internas como externas: el tubo abierto y utilizar una punta de goteo o *drip tip*. Para este caso, no fue necesario descartar ninguna de las ramas mostradas pues ambas opciones son viables para el proyecto y su rendimiento se evalúa en etapas posteriores del proceso de diseño.

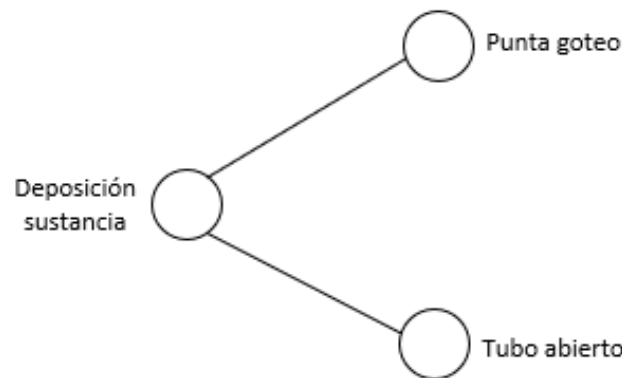


Figura 3.13. Árbol de clasificación para el subproblema de deposición de la sustancia. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para el subproblema de accionamiento del sistema ante la entrada de señales el árbol de clasificación corresponde al mostrado en la figura 3.14 en la cual se muestran obtenidas a partir de las búsquedas tanto internas como externas. Para este caso, no fue necesario descartar ninguna de las ramas mostradas pues todas las opciones son viables para el proyecto y su rendimiento se evalúa en etapas posteriores del proceso de diseño.

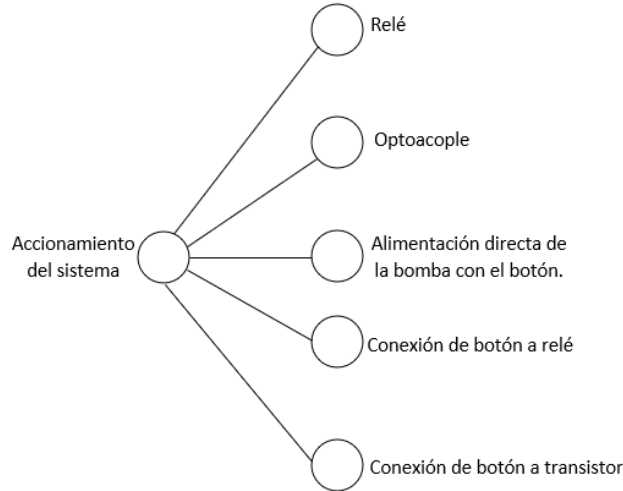


Figura 3.14. Árbol de clasificación para el subproblema de accionamiento del sistema. Fuente: Elaboración propia.

3.3.3.2 Tablas de combinación

Una vez que, por medio de los árboles de combinación, se observaron y analizaron las posibles ramas de solución para cada uno de los subproblemas identificados y se descartaron las ramas menos promisorias, se procedió a utilizar tablas de combinación, las cuales permiten considerar en forma sistemática combinaciones de fragmentos de solución. Estas dan como resultado las posibles combinaciones de solución para las tres ramas de descomposición funcional: energía, material y señales. En la presente sección se muestran los resultados obtenidos de dicho proceso.

En cuanto a la rama de energía, del proceso anterior de los árboles de clasificación solo quedó una solución para cada uno de los subproblemas definidos, de modo que solo existe una posibilidad de combinación para este caso tal y como se muestra en la tabla 3.20, a partir de la cual se logra concluir que la solución a implementar en términos de energía constituye en la utilización del Robotino® como fuente de alimentación y una interfaz de potencia para adaptar dicha energía a niveles y condiciones utilizables por parte de los mecanismos de bombeo a implementar.

Tabla 3.20. Tabla de combinación para rama de energía.


Almacenamiento o aceptación de energía externa	Adaptación de energía para bombeo
Robotino®	Interfaz de potencia

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 3. Metodología

Por otro lado, para la rama de señales se tiene dos vertientes: la de accionamiento manual y la de accionamiento automático. Para el accionamiento manual se tienen 3 posibles conceptos de solución en esta etapa, de los cuales el primero de ellos se muestra en la tabla 3.21. Esta combinación consiste en emplear el botón y colocarlo directamente entre la fuente de alimentación y la bomba como un interruptor.

Tabla 3.21. Primera combinación para accionamiento manual del sistema.

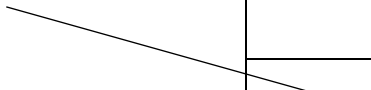
Elemento de accionamiento manual	Accionamiento del sistema
	Relé
	Optoacople
Botón 	Alimentación directa de la bomba con el botón
	Conexión de botón a relé
	Conexión de botón a transistor

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte la siguiente combinación mostrada en la tabla 3.22 corresponde a utilizar igualmente un botón y colocarlo entre la fuente de alimentación y las bobinas de un relé normalmente abierto de modo tal que la alimentación de este produzca la alimentación del motor de la bomba.

Tabla 3.22. Segunda combinación para accionamiento manual del sistema.

Elemento de accionamiento manual	Accionamiento del sistema
	Relé
	Optoacople
Botón	Alimentación directa de la bomba con el botón
	Conexión de botón a relé
	Conexión de botón a transistor

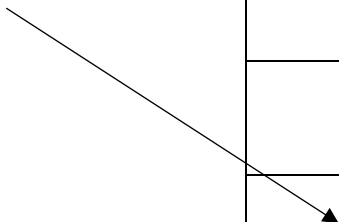


Fuente: Elaboración propia.

Y finalmente, de forma similar al caso anterior la combinación mostrada en la tabla 3.23 se propone utilizar un botón, pero conectado entre la fuente de alimentación y la patilla de base de un transistor -con las protecciones correspondientes- de modo que este funcione como un interruptor de alimentación a la bomba.

Tabla 3.23. Tercera combinación para accionamiento manual del sistema.

Elemento de accionamiento manual	Accionamiento del sistema
	Relé
	Optoacople
Botón	Alimentación directa de la bomba con el botón
	Conexión de botón a relé
	Conexión de botón a transistor



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en cuanto al accionamiento automático se cuenta con dos posibles combinaciones de concepto de solución de los cuales el primero se muestra en la tabla 3.24, el cual corresponde a la utilización de las salidas digitales del Robotino® como elemento de accionamiento, el control de parámetros por medio de una programación en el entorno *Robotino® View* propio del robot a utilizar y finalmente, la utilización de un relé como interruptor accionado por la señal digital del sistema.

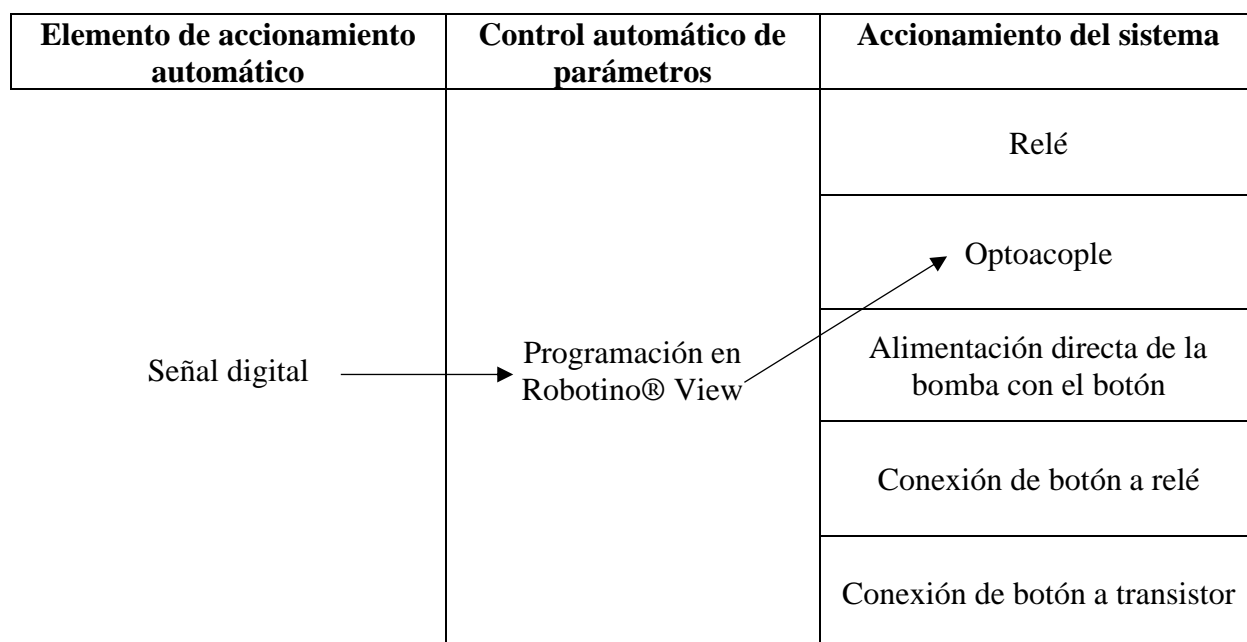
Tabla 3.24. Primera combinación para accionamiento automático del sistema.

Elemento de accionamiento automático	Control automático de parámetros	Accionamiento del sistema
<p>Señal digital →</p>	<p>Programación en Robotino® View</p>	<p>Relé</p>
		<p>Optoacople</p>
		<p>Alimentación directa de la bomba con el botón</p>
		<p>Conexión de botón a relé</p>
		<p>Conexión de botón a transistor</p>

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la segunda posible combinación se muestra en la tabla 3.25, la cual corresponde a la utilización de las salidas digitales del Robotino® como elemento de accionamiento, el control de parámetros por medio de una programación en el entorno *Robotino® View* propio del robot a utilizar y finalmente, la utilización de un optoacople como interruptor accionado por la señal digital del sistema.

Tabla 3.25. Segunda combinación para accionamiento automático del sistema.



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, con respecto a la rama de materiales, a partir de la figura 3.5 es posible evidenciar que esta cuenta con seis subproblemas a resolver como parte de ella, lo cual daría como resultado innumerable cantidad de combinaciones tal y como se observa en la tabla 3.26.

Tabla 3.26. Primera iteración de tabla de combinación para rama de materiales.

Almacenaje de sustancia	Bombeo de sustancia	Transporte de sustancia	Mezclado de sustancia	Magnetización de sustancia	Deposición de sustancia
Envase de vidrio con tapa	Bomba peristáltica	Tubo silicón	Conector “Y”	Neodimio	Tubo abierto
Envase de vidrio sin tapa	Bomba centrífuga	Tubo PVC	Conector “T”	Samario/Cobalto	Punta de goteo
	Bomba de diafragma	Tubo poliuretano		Electroimán	
	Bombeo por gravedad con electroimán como válvula	Tubo polietileno			
		Tubo nylon			

Fuente: Elaboración propia

No obstante, la aplicación de las tablas de combinación deja de ser práctica cuando la cantidad de columnas es mayor a tres, tal y como es el presente caso. Debido a esto, en esta etapa fue necesario reconsiderar parte de las alternativas de solución propuestas para cada uno de los

Capítulo 3. Metodología

subproblemas de modo que se lograra hacer concesiones que permitieran al equipo de desarrollo enfocar los recursos en aquellos aspectos que sí podrían ser factores diferenciadores en el producto final.

Con respecto al subproblema del envasado de la sustancia, el equipo de trabajo determinó que el hecho de que el envase fuera sin tapa no es realmente un aspecto diferenciador para el producto, el simple hecho de que ya sea de vidrio es lo que lo hace fácilmente lavable -lo cual es uno de los factores de interés para el cliente- y adicional a ello, el contar con tapa le da cierto grado de aislamiento a las sustancias ante el ingreso de polvo y suciedad del entorno además de que eventualmente podría evitar derrames de estas. Por lo tanto, se decidió prescindir de la alternativa del envase sin tapa.

Por otro lado, otro aspecto poco relevante en el rendimiento y diferenciación del producto a desarrollar constituye el transporte de la sustancia. Esto debido a que todas las opciones que se tienen como parte de dicho apartado hasta este punto son tuberías flexibles hechas a base de polímeros. Asimismo, la sustancia a transportar no requiere de ningún tipo de tubería especial para mantener su composición o su efecto, razón por la cual la elección entre una u otra tubería no significaría mayor diferencia en el producto final. Por esta razón, la elección se llevó a cabo considerando la tubería que había disponible en el laboratorio en el que se desarrolló el presente proyecto la cual era de Nylon, razón por la cual hasta este punto se descartaron las demás alternativas de solución para este subproblema.

De este modo, la tabla de combinación 3.26 queda reducida a la mostrada en la tabla 3.27.

Tabla 3.27. Tabla de combinación para rama de materiales.

Almacenaje de sustancia	Bombeo de sustancia	Transporte de sustancia	Mezclado de sustancia	Magnetización de sustancia	Deposición de sustancia
Envase de vidrio con tapa	Bomba peristáltica	Tubo silicón	Conector "Y"	Neodimio	Tubo abierto
	Bomba centrífuga		Conector "T"	Samario/Cobalto	Punta de goteo
	Bomba de diafragma			Electroimán	
	Bombeo por gravedad con electroimán como válvula				

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3. Metodología

A partir de la tabla 3.27 se procedió a realizar las combinaciones factibles de modo que se obtienen como resultados las posibles alternativas de solución mostradas en la siguiente lista:

- Envase de vidrio con tapa – Bomba peristáltica – Tubo Silicón – Conector “Y” – Neodimio -Tubo abierto.
- Envase de vidrio con tapa – Bomba peristáltica – Tubo Silicón – Conector “Y” – Neodimio - Punta de goteo.
- Envase de vidrio con tapa – Bomba peristáltica – Tubo Silicón – Conector “Y” – Samario/Cobalto – Punta goteo.
- Envase de vidrio con tapa – Bomba peristáltica – Tubo Silicón – Conector “T” – Neodimio – Punta goteo.
- Envase de vidrio con tapa – Bomba centrífuga – Tubo Silicón – Conector “T” – Neodimio – Punta goteo.
- Envase de vidrio con tapa – Bomba centrífuga – Tubo Silicón – Conector “Y” – Neodimio – Punta goteo.
- Envase de vidrio con tapa – Bomba diafragma – Tubo Silicón – Conector “T” – Neodimio – Punta goteo.
- Envase de vidrio con tapa – Bomba diafragma – Tubo Silicón – Conector “Y” – Neodimio – Punta goteo.
- Envase de vidrio con tapa – Bombeo por gravedad– Tubo Silicón – Conector “Y” – Electroimán – Punta goteo.
- Envase de vidrio con tapa – Bombeo por gravedad– Tubo Silicón – Conector “T” – Electroimán – Punta goteo.
- Envase de vidrio con tapa – Bombeo por gravedad– Tubo Silicón – Conector “Y” – Electroimán – Tubo abierto.

De este modo, hasta esta etapa ya se cuenta con todos los posibles conceptos de solución para cada subproblema, así como todas las combinaciones factibles entre las mismas para cada una de las tres ramas de la descomposición funcional. En la tabla 3.28 se muestran un resumen de todos los conceptos generados, así como la nomenclatura correspondiente a cada uno de ellos.

Tabla 3.28. Resumen de resultados de la etapa de generación de conceptos.

Rama a la que pertenece	Descripción de concepto	Nomenclatura del concepto
Energía	Alimentación desde Robotino® – Interfaz de potencia	Concepto A
Materiales	Envase de vidrio con tapa – Bomba peristáltica – Tubo Silicón – Conector “Y” – Neodimio -Tubo abierto.	Concepto B
	Envase de vidrio con tapa – Bomba peristáltica – Tubo Silicón – Conector “Y” – Neodimio - Punta de goteo.	Concepto C
	Envase de vidrio con tapa – Bomba peristáltica – Tubo Silicón – Conector “Y” – Samario/Cobalto – Punta goteo.	Concepto D
	Envase de vidrio con tapa – Bomba peristáltica – Tubo Silicón – Conector “T” – Neodimio – Punta goteo.	Concepto E
	Envase de vidrio con tapa – Bomba centrífuga – Tubo Silicón – Conector “T” – Neodimio – Punta goteo.	Concepto F
	Envase de vidrio con tapa – Bomba centrífuga – Tubo Silicón – Conector “Y” – Neodimio – Punta goteo.	Concepto G
	Envase de vidrio con tapa – Bomba diafragma – Tubo Silicón – Conector “T” – Neodimio – Punta goteo.	Concepto H
	Envase de vidrio con tapa – Bomba diafragma – Tubo Silicón – Conector “Y” – Neodimio – Punta goteo.	Concepto I
	Envase de vidrio con tapa – Bombeo por gravedad– Tubo Silicón – Conector “Y” – Electroimán – Punta goteo.	Concepto J
	Envase de vidrio con tapa – Bombeo por gravedad– Tubo Silicón – Conector “T” – Electroimán – Punta goteo.	Concepto K
	Envase de vidrio con tapa – Bombeo por gravedad– Tubo Silicón – Conector “Y” – Electroimán – Tubo abierto.	Concepto L
Señales (Automáticas)	Señal digital – Programación Robotino® View – Relé	Concepto M
	Señal digital – Programación Robotino® View – Optoacople	Concepto N
Señales (Manuales)	Botón - Alimentación directa de la bomba con el botón	Concepto O
	Botón - Conexión de botón a relé	Concepto P
	Botón - Conexión de botón a transistor	Concepto Q

Fuente: Elaboración propia.

Una vez culminada la generación de conceptos se procedió a realizar el análisis del proceso, en el cual se determinó que se había considerado todo el espacio posible de soluciones para cada uno de los subproblemas, sin sesgos ni omisión de ningún tipo de idea o propuesta. De este modo, considerado lo anterior se procedió a la etapa de selección de conceptos

3.4 Selección de conceptos

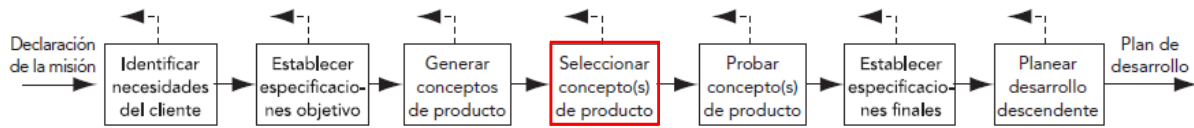


Figura 3.15. Ubicación de la etapa de selección de conceptos dentro del proceso de diseño propuesto por Ulrich y Eppinger. Fuente: [42].

La etapa de selección de conceptos se aborda por medio de dos etapas: la etapa de filtrado y la etapa de evaluación de conceptos. Para llevar a cabo la etapa de filtrado se utilizan cinco pasos: la elaboración de una matriz de selección, la evaluación de los conceptos, el ordenamiento de los conceptos, la combinación y mejora de los mismos y finalmente la selección de uno o más conceptos.

Para un filtrado más adecuado de los conceptos se realizó una matriz de selección para cada una de las ramas de la descomposición funcional; es decir, una para los conceptos de la rama de energía, una para los conceptos de la rama de señales y una para los conceptos de la rama de materiales. Sin embargo, para el caso de las ramas de energía al solo haber un concepto, no fue necesario desarrollar dicha matriz. Y, por otro lado, para la rama de señales se utilizó una matriz de selección para los conceptos correspondientes a las señales de accionamiento manual y otra para los conceptos correspondientes a las señales de accionamiento automático.

Por otro lado, para la evaluación de los conceptos se utilizó la nomenclatura mencionada en la sección 2.10.4 del presente informe de modo que se seleccionó un concepto como referencia y se evaluaron los demás con respecto a esa de modo tal que un “+” significa mejor que la referencia, un “0” implica que es igual a la referencia, y un “-” implica que es peor que la referencia.

Dicho lo anterior, en la tabla 3.29 se muestra la matriz de selección correspondiente a los conceptos de las ramas de señales de accionamiento manual utilizando la nomenclatura especificada en la tabla 3.28. Para dicha matriz de selección se tomaron como criterios de selección la rapidez de respuesta que presenta el concepto ante el accionamiento por parte del usuario, el tamaño de este, la cantidad de elementos que lo componen, la capacidad de

Capítulo 3. Metodología

respuesta o reacción ante pulsos rápidos y breves pues en ciertas ocasiones el usuario únicamente desea activar el sistema durante un instante muy corto de tiempo.

Tabla 3.29. Matriz de selección de conceptos para la rama de señales de accionamiento manual

Criterios de selección	Conceptos		
	Concepto O	Concepto P	Concepto Q (Referencia)
Rapidez de accionamiento	+	0	0
Tamaño	0	-	0
Cantidad de elementos	+	0	0
Capacidad de respuesta ante pulsos cortos	+	-	0
Suma +	3	0	0
Suma 0	1	2	4
Suma -	0	2	0
Evaluación neta	3	-2	0
Lugar	1	3	2
¿Continuar?	Sí	No	No

Fuente: Evaluación propia

A partir de los resultados mostrados en la tabla 3.29 es posible observar que -basados en los criterios de selección definidos- solamente el “Concepto O” correspondiente a la conexión del botón directamente entre la alimentación y la bomba, ha superado la etapa de filtrado, pues presenta características sobresalientes en lo que corresponde a la capacidad de respuesta ante pulsos cortos, cantidad de elementos que lo componen y rapidez de accionamiento, lo cual le da una evaluación neta tres unidades por encima de la referencia y 5 unidades por encima del otro concepto, razón por la cual se puede afirmar que constituye el mejor concepto de solución para el accionamiento por medio de señales manuales.

Por su parte, igualmente dentro de la rama de señales, pero en esta ocasión para el accionamiento automático, la matriz de selección se muestra en la tabla 3.30 en la cual se comparan los dos conceptos desarrollados durante la generación de conceptos descrita en la sección 3.3 del presente informe, presentados de conformidad con la nomenclatura detallada en la tabla 3.28. Como criterios de selección para este caso se tomaron, al igual que para el caso del accionamiento manual, la rapidez de respuesta que presenta el concepto ante el accionamiento por parte del usuario, el tamaño de este, la cantidad de elementos que lo componen, la capacidad de respuesta o reacción ante pulsos rápidos y breves pues en ciertas

ocasiones el usuario únicamente desea activar el sistema durante un instante muy corto de tiempo.

Tabla 3.30. Matriz de selección de conceptos para la rama de señales de accionamiento automático

Criterios de selección	Conceptos	
	Concepto M (Referencia)	Concepto N
Rapidez de accionamiento	0	0
Tamaño	0	+
Cantidad de elementos	0	0
Capacidad de respuesta ante pulsos cortos	0	+
Suma +	0	2
Suma 0	4	2
Suma -	0	0
Evaluación neta	0	2
Lugar	2	1
¿Continuar?	No	Sí

Fuente: Evaluación propia

A partir de la tabla 3.30 es posible observar que -según los criterios de selección definidos- solamente el concepto N, correspondiente a la utilización de una señal digital proveniente del Robotino®, seguida de una programación en el entorno *Robotino® View* de Festo y la utilización de un optoacople para acoplar el circuito digital con el circuito de potencia, es el único concepto dentro de esta rama que logró superar la etapa de filtrado pues presenta característica sobresalientes en lo que corresponde al tamaño y a la capacidad de respuesta ante pulsos cortos, razón por la cual estuvo dos unidades por encima de la evaluación neta obtenida por parte del concepto tomado como referencia, por lo que se decidió avanzar con dicho concepto para solventar dicho subproblema.

Seguidamente, se procedió a realizar la matriz de selección para la rama de materiales de la descomposición funcional planteada en la sección 3.3.1 del presente informe y utilizando la nomenclatura especificada en la tabla 3.28 para hacer referencia a cada uno de los conceptos a evaluar. Para llevar a cabo dicha matriz de selección se utilizaron como criterios de selección la efectividad de magnetización de la sustancia, el adecuado mezclado de las dos sustancias que componen la feromona a utilizar, la capacidad de control de los parámetros de interés para el cliente, la capacidad de depositar gotas de tamaño reducido, el consumo energético, el tamaño y

Capítulo 3. Metodología

el peso del concepto. Los anteriores criterios fueron definidos a partir de los resultados obtenidos a partir de etapas anteriores del proceso de diseño en las cuales se exploraron a profundidad los intereses y necesidades del cliente. Dicho lo anterior, la matriz de selección correspondiente se muestra en la tabla 3.31.

Tabla 3.31. Matriz de selección de conceptos para la rama de materiales

Criterios de selección	Conceptos										
	Concepto B	Concepto C	Concepto D	Concepto E	Concepto F	Concepto G	Concepto H	Concepto I (Referencia)	Concepto J	Concepto K	Concepto L
Efectividad de magnetización	0	0	-	0	0	0	0	0	-	-	-
Adecuado mezclado de sustancias	0	0	0	-	-	0	-	0	0	-	-
Capacidad de control de parámetros	+	+	+	+	-	-	0	0	-	-	-
Deposición de gotas pequeñas	0	+	+	+	-	-	-	0	-	-	-
Consumo energético	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tamaño	+	+	+	+	0	0	0	0	+	+	+
Peso	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+
Suma +	2	3	3	3	0	0	0	0	2	2	2
Suma 0	5	4	2	3	4	5	5	7	2	1	1
Suma -	0	0	1	1	3	2	2	0	3	4	4
Evaluación neta	2	3	2	2	-3	-2	-2	0	-1	-2	-2
Lugar	2	1	3	4	11	9	10	5	6	7	8
¿Continuar?	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No	No	No	No

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la tabla 3.31 es posible observar que los conceptos B -correspondiente a la utilización de un envase de vidrio con tapa, una bomba peristáltica, un tubo de silicón, un conector “Y”, magnetos de neodimio y el tubo abierto-, C - correspondiente a la utilización de un envase de vidrio con tapa, una bomba peristáltica, un tubo de silicón, un conector “Y”, magnetos de neodimio y una punta de goteo- , D - correspondiente a la utilización de un envase de vidrio con tapa, una bomba peristáltica, un tubo de silicón, un conector “Y”, magnetos de samario y cobalto y una punta de goteo- y E - correspondiente a la utilización de un envase de vidrio con tapa, una bomba peristáltica, un tubo de silicón, un conector “T”, magnetos de neodimio y una punta de goteo- son los conceptos que lograron superar la etapa de filtrado correspondiente pues estos presentaron una evaluación neta entre dos y tres unidades mayor a la referencia y hasta seis unidades mayor a los demás conceptos evaluados debido principalmente a la capacidad de control de parámetros, la

capacidad de depositar gotas pequeñas, así como también el tamaño, razón por la cual fueron elegidos para continuar en el proceso de selección de conceptos de solución.

Puesto que, para los casos de las ramas de energía y señales, durante la etapa de filtrado ya se definieron los conceptos ganadores, para dichos casos no es necesario llevar a cabo la etapa de evaluación de conceptos para definir el concepto ganador; sin embargo, para el caso la rama de materiales, se cuenta con cuatro conceptos de solución que aún después de la etapa de filtrado siguen siendo considerados como candidatos de solución, razón por la cual se debe proceder con la evaluación de los mismo para poder dar con el o los conceptos ganadores.

Para la etapa de la evaluación de conceptos se procede a realizar una matriz de selección en la cual se le asigna un peso a cada criterio de selección e incluso, en caso de requerir más refinamiento en cuanto a los criterios de selección, se pueden incluir nuevos con el objetivo de poder diferencia adecuadamente cada uno de los conceptos a evaluar. Al igual que para la etapa anterior, se elige un concepto como referencia y se asigna una calificación a los demás conceptos de acuerdo con la siguiente escala:

- 1: Mucho peor que la referencia
- 2: Peor que la referencia
- 3: Igual que la referencia
- 4: Mejor que la referencia
- 5: Mucho mejor que la referencia

Para el caso en cuestión, la matriz de evaluación de conceptos se muestra en la tabla 3.32, para la cual se utilizaron los mismos criterios de selección que en la etapa de filtrado de conceptos por el hecho de que estos son suficientes y adecuados para lograr evaluar adecuadamente los conceptos por evaluar. Asimismo, se asignó un peso de 10% a los criterios de peso, tamaño consumo energético y efectividad de magnetización pues estos son los aspectos menos diferenciadores entre los conceptos a evaluar además de que tienen una importancia relativamente menor que el hecho de poder depositar gotas pequeñas, controlar adecuadamente los parámetros de interés y mezclar adecuadamente las sustancias, razón por la cual a estos últimos criterios de selección se les asignó un peso de un 20% tal y como se muestra en la tabla 3.32.

Tabla 3.32. Matriz de evaluación de conceptos para la rama de materiales

		Conceptos							
		Concepto B (Referencia)		Concepto C		Concepto D		Concepto E	
Crterios de selección	Peso	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Efectividad de magnetización	10%	3	0.3	3	0.3	2	0.2	3	0.3
Adecuado mezclado de sustancias	20%	3	0.6	3	0.6	3	0.6	1	0.2
Capacidad de control de parámetros	20%	3	0.6	3	0.6	3	0.6	2	0.4
Deposición de gotas pequeñas	20%	3	0.6	5	1	3	0.6	3	0.6
Consumo energético	10%	3	0.3	3	0.3	3	0.3	3	0.3
Tamaño	10%	3	0.3	3	0.3	3	0.3	3	0.3
Peso	10%	3	0.3	3	0.3	3	0.3	3	0.3
	Total puntos		3		3.4		2.9		2.4
	Lugar		2		1		3		4
	¿Continuar?	No		Sí		No		No	

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la tabla 3.32 es posible observar cómo el concepto C - correspondiente a la utilización de un envase de vidrio con tapa, una bomba peristáltica, un tubo de silicón, un conector “Y”, magnetos de neodimio y una punta de goteo- corresponde al concepto ganador de la etapa de evaluación de conceptos para la rama de materiales. Esta presenta calificaciones muy similares a las de la referencia -que es igual al concepto C, pero sin la punta de goteo- excepto en la deposición de gotas de tamaño reducido en donde el concepto ganador es mucho mejor que la referencia lo cual lo hace el concepto ganador para esta rama de la descomposición funcional planteada.

De este modo, una vez culminada la etapa de selección de conceptos se procedió a realizar un análisis de los resultados obtenidos hasta este momento en el proceso de diseño, para lo cual se concluyó que los conceptos desarrollados, seleccionados y evaluados satisfacen las expectativas de los diseñadores y se apegan a lo estipulado por parte del cliente. Asimismo, se

Capítulo 3. Metodología

considera que solucionan adecuadamente y a cabalidad cada uno de los subproblemas, razón por la cual, pueden pasar a la siguiente etapa del proceso de diseño correspondiente a las pruebas de conceptos.

De este modo, en la tabla 3.33 se muestra un resumen de los conceptos seleccionados para cada una de las ramas de la descomposición funcional mostrada en la figura 3.5.

Tabla 3.33. Resumen de conceptos ganadores.

Rama de descomposición funcional	Concepto ganador
Energía	Alimentación desde Robotino® con interfaz de potencia
Materiales	Envase de vidrio con tapa, una bomba peristáltica, un tubo de silicón, un conector “Y”, magnetos de neodimio y una punta de goteo
Señales manuales	Conexión del botón directamente entre la alimentación y la bomba
Señales automáticas	Señal digital proveniente del Robotino®, seguida de una programación en el entorno Robotino® View de Festo y la utilización de un optoacople para acoplar el circuito digital con el circuito de potencia

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 4. Propuesta de diseño

En el presente capítulo, una vez definido el concepto ganador para cada una de las ramas de la descomposición funcional mostrada en la figura 3.5, se procede a mostrar con detalle cada uno de los elementos y componentes que lo componen, la implementación del diseño y los detalles específicos que forman parte de este, así como las decisiones intermedias que fueron tomadas durante el proceso de diseño y que permitieron llevar a cabo un refinamiento del diseño final.

4.1 Materiales

En la presente sección se detalla y explica el diseño y la elección de cada uno de los componentes que componen al concepto ganador dentro de la rama de materiales de la descomposición funcional de la figura 3.5.

4.1.1 Almacenaje de la sustancia

A partir del procedimiento llevado a cabo en el capítulo 3 del presente informe se determinó que el concepto ganador para brindar solución al subproblema de almacenamiento de la sustancia es un envase de vidrio con tapa. Sin embargo, hasta este punto no se tenía claridad de qué forma, ancho, alto, volumen y demás características debía tener el envase. Solamente se tiene como parámetros el tamaño aproximado del sistema -que debe ser lo más pequeño posible- y que los envases deben poder rellenarse fácilmente. Ante consultas al cliente con respecto al volumen del envase, el mismo indica que la única forma de determinarlo es mediante pruebas, de modo que se sepa cuánto volumen de sustancia consume el sistema durante su operación.

De este modo, como una primera iteración se utilizaron los envases de vidrio mostrados en la figura 4.1. Los cuales consisten en envases de vidrio cilíndricos con una tapa de latón que se sella a rosca. Las manchas mostradas en la tapa son el resultado de una serie de pruebas llevadas a cabo durante el proceso de diseño.



Figura 4.1. Primera opción de envases de vidrio. Fuente: Elaboración propia.

Al realizar y preparar la receta mostrada en la tabla 2.3 se determinó que incluso si se realizaba la receta triplicando las cantidades eran como máximo 18mL que equivale a 18 cm³, cuando el envase es de aproximadamente 118 cm³, razón por la cual evidentemente ni tan siquiera triplicando las cantidades propias de la feromona se alcanzaba un volumen cercano a la capacidad del envase, por lo que se determinó que este tipo de envases era demasiado grande para la aplicación deseada. Para ejemplificar lo anterior, en la figura 4.2 se muestra el envase con un volumen de 18 mL de agua, en la cual se observa que el envase se encontraba sobredimensionado para la aplicación.



Figura 4.2. Primera opción de envases de vidrio con 18 mL de agua. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 4. Propuesta de diseño

De este modo, se utilizó una segunda opción de envase tal y como se muestra en la figura 4.3, la cual consiste igualmente en un envase de vidrio en este caso cuadrado con parte superior cilíndrica y tapa de latón igualmente sellada por rosca. La base tiene dimensiones de 4x4 cm y una altura de 5.3 cm, razón por la cual se eligió una alternativa de menor tamaño frente a los 5cm de diámetro por 6cm de altura de los envases de la figura 4.1.



Figura 4.3. Segunda opción de envases de vidrio. Fuente: Elaboración propia.

No obstante, al llevar a cabo diversas pruebas se determinó que estos envases seguían siendo muy grandes para la aplicación pues el volumen de estos es de aproximadamente 76 cm^3 . En la figura 4.4 se muestra el envase con 18 mL de agua como evidencia de que estos envases están sobredimensionados para la aplicación.

Por otro lado, tal y como se muestra en la figura 4.4, estos envases presentan un desnivel en la parte inferior de modo que, al quedar poco líquido, los residuos se alojan en los bordes del envase por lo que -si la manguera de la bomba está centrada- no va a extraer dicho material y va a quedar almacenado, lo que se traduce en desperdicio de la feromona, razón por la cual se descartó este tipo de envase.



Figura 4.4. Muestra de curvatura en parte inferior del envase. Fuente: Elaboración propia.

Se determinó la necesidad de un envase de menor volumen, y que tuviera una base plana o con un desnivel hacia la parte central del envase de modo que el bombeo fuese más eficiente y que la manguera se pudiera centrar de modo que permitiera la extracción de todo el fluido almacenado en el envase.

A partir de un análisis y busca de opciones exhaustiva se definió un envase en forma de tubo de ensayo como el mostrado en la figura 4.5 el cual tiene un volumen de 25 cm^3 , tiene un diámetro de 3 cm y una altura de 5 cm, y debido a que ambos envases no requieren de más de 6 cm de ancho y 5 cm de altura dentro del sistema diseñado, el tamaño de estos es una ventaja frente a las alternativas anteriormente mencionadas.



Figura 4.5. Concepto ganador para almacenamiento de sustancia. Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, la forma característica de estos envases en la parte inferior permite que la manguera -al estar centrada- sea capaz de extraer todo el líquido almacenado en el mismo. Por otro lado, la tapa de corcho que tienen, además de proteger ante el ingreso de agentes externos, es fácil de perforar para realizar el agujero por el cual ingrese la manguera de bombeo. De este modo, se determinó la opción ganadora para almacenar la sustancia siguiendo la elección de concepto ganador determinada en el capítulo 3.

4.1.2 Bombeo de la sustancia

A partir del capítulo 3 se determinó mediante el procedimiento propio del proceso de diseño que el concepto ganador del bombeo de la sustancia consiste en una bomba peristáltica. Para ello, se analizaron tres alternativas de bombas peristálticas. La primera de ellas, mostrada en la figura 4.6, es una bomba peristáltica equipada con un motor de corriente directa de 12V y 5 W de potencia con dimensiones de 5.5 cm x 4.0 cm x 4.5 cm y un diámetro de la circunferencia de bombeo de 4 cm.



Figura 4.6. Primer concepto de solución para bombeo de sustancia. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la siguiente alternativa mostrada en la figura 4.7 corresponde al modelo Yanmis G528 el cual consiste igualmente en una bomba peristáltica equipada con un motor de corriente directa de 12V y 3 W de potencia con dimensiones de 5.3 cm x 4.4 cm x 5 cm, y un diámetro de la circunferencia de bombeo de aproximadamente 3.6 cm.



Figura 4.7. Bomba peristáltica Yanmis G528. Fuente: [47].

Finalmente, la última opción considerada corresponde al modelo Intllab modelo RS385-635 mostrado en la imagen de la figura 4.8 la cual es una bomba peristáltica equipada con un motor de corriente directa de 12V y 3 W de potencia con dimensiones de 5.5 cm x 6.7 cm x 4.1 cm y un diámetro de la circunferencia de bombeo de 3 cm.



Figura 4.8. Bomba peristáltica Intllab RS385-635. Fuente: [48].

Capítulo 4. Propuesta de diseño

La alternativa mostrada en la figura 4.6 se descartó debido a que, frente a las otras dos opciones, el consumo energético es casi un 70% mayor. Por otro lado, entre la alternativa de la marca Yanmis y la de marca Intillab se eligió el modelo de la última, pues a pesar de que tiene un ancho considerablemente mayor y el consumo energético es exactamente el mismo, tiene un diámetro de la circunferencia de bombeo un 17% menor y esto permite lograr depositar gotas más pequeñas y por ende maximizar el consumo de material que es uno de los aspectos manifestados como altamente importantes por parte del cliente. Lo anterior se debe a que -al tener un menor diámetro en la circunferencia de bombeo- para el mismo desplazamiento angular del motor se obtiene una menor longitud de circunferencia y por ende la deposición de menor cantidad de sustancia por parte de la bomba. Por lo tanto, esa fue la razón decisiva para determinar que la bomba peristáltica mostrada en la figura 4.8 era la que se iba a utilizar en el diseño a implementar.

4.1.3 Transporte de la sustancia

Para el transporte de la sustancia se utilizó -tal y como se determinó en el capítulo anterior por medio del procedimiento de la metodología de diseño- una tubería de nylon tal y como se muestra en la figura 4.9. Esta tubería tiene un diámetro interior de 2 mm y un diámetro exterior de 4 mm y se definió este tamaño pues es el mismo tipo de tubería que utiliza la bomba, de modo que toda la tubería sea compatible con el mismo tipo de manguera que utiliza la bomba.

Por otro lado, como características adicionales que impulsaron la selección de este tipo de tubería se encuentra el hecho de que -al ser flexible- se puede acoplar con el conector utilizado para el mezclado de la sustancia, el cual se muestra en la siguiente sección.



Figura 4.9. Manguera de silicón a utilizar. Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Mezclado de la sustancia

A partir del capítulo anterior se determinó que el concepto ganador para la etapa de mezclado de la sustancia consiste en un conector tipo Y hecha a base de polímeros. El tamaño de estos elementos es único, razón por la cual el diámetro de sus entradas no fue un factor determinante como parte de la elección de estos, pues se va a utilizar tubería de silicón la cual es flexible y fácilmente estirable para lograr fijarla con el conector, tal y como se mencionó anteriormente.

La instalación del conector se da de modo que la convergencia de ambas tuberías se conecta directamente a la bomba y cada una de las ramas de divergencia del conector van -por medio de una manguera- dirigidas hacia cada uno de los envases de las sustancias que componen la feromona: el envase con el óxido de hierro, el azúcar y agua, y el envase con la levadura hidratada. Lo recién explicado y una imagen con el conector utilizado se muestra en la figura 4.10.



Figura 4.10. Conector tipo “Y”. Fuente: Elaboración propia.

4.1.5 Magnetización de la sustancia

Para la magnetización de la sustancia, en el capítulo anterior se determinó que el tipo de magnetos a utilizar eran imanes de neodimio. Sin embargo, para ser específicos, se utilizaron los dos magnetos circulares de neodimio mostrados en la figura 4.11 los cuales tienen un diámetro de 10 mm y un espesor de 5 mm. Como parte de las características de este tipo de magnetos se encuentra que tienen una masa unitaria de 2.9 mg y tienen una fuerza de atracción de 26.5 N.



Figura 4.11. Magnetos de neodimio utilizados. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, otra consideración durante el diseño de la etapa de magnetización consiste en la posición de los imanes los cuales se colocaron de forma que las líneas de campo laterales fueran paralelas al movimiento de la sustancia. De lo contrario, el campo magnético se opondría al flujo del ferrofluido.

Capítulo 4. Propuesta de diseño

Por otro lado, se utilizaron placas de acero por encima y por debajo de los imanes, creando una etapa de magnetización enjaulada. La intensidad del campo magnético es significativamente menor fuera de las placas de acero. El diseño minimiza el efecto de las líneas de campo superior e inferior de los imanes. Además, garantiza que la alineación de las partículas en el ferrofluido se mantiene y evita el retorno del líquido.

Las placas utilizadas consisten en estructuras de acero en forma de “L” tal y como la mostrada en la figura 4.12 pues estas cumplen con el objetivo de enjaular el campo magnético de los imanes y además cuentan con agujeros de 5 mm de diámetro de modo que la manguera de transporte de la sustancia sea capaz de atravesarlas.



Figura 4.12. Estructuras de acero a utilizar en la etapa de magnetización. Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, para colocarlas de manera más adecuada dentro de la carcasa a diseñar se maquinaron las piezas mediante una cegueta para lograr finalmente obtener una de 33 mm de longitud y una de 55 mm tal y como se muestra en la figura 4.13 en donde el tonillo que se observa es el que permite fijar estas placas a la carcasa del sistema.

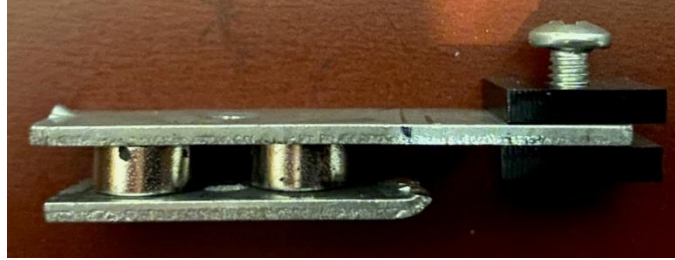


Figura 4.13. Estructuras de acero a utilizar en la etapa de magnetización después del maquinado.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.6 Deposición de la sustancia

Para la deposición de la sustancia se determinó por medio de la metodología de diseño que el concepto a implementar para solucionar este subproblema es la utilización de una punta de goteo. La punta de goteo utilizada se muestra en la figura 4.14, la cual es una pieza hecha a base de polímero y fabricada para tuberías de 2mm diámetro interno y realizan una disminución a un diámetro de 1mm. Esta pieza brinda rigidez en el punto de deposición pues sirve como fijación de la manguera a la salida de las placas mostradas en la figura 4.13, además de que permite que el goteo se realice de forma más fluida y natural.



Figura 4.14. Punta de goteo utilizada para deposición de la sustancia. Fuente: Elaboración propia.

4.2 Energía

En la presente sección se detalla y explica el diseño y la elección de cada uno de los componentes que componen al concepto ganador dentro de la rama de energía de la descomposición funcional de la figura 3.5.

4.2.1 Almacenar o aceptar energía externa.

A partir del procedimiento seguido en el capítulo 3 se determinó que el concepto ganador para la aceptación o almacenamiento de energía externa es utilizar la alimentación directamente desde el Robotino®. Este cuenta con dos módulos de entradas y salidas mostrados en la figura 4.15 el cual cuenta, con salidas y entradas tanto analógicas como digitales, así como también con salidas de 24V CC de máximo 3 A y dichas salidas constituyen los símbolos +/- mostrados en la figura 4.15.



Figura 4.15. Interfaz de entradas y salidas del Robotino® de Festo. Fuente: [49]

Dicho módulo se encuentra fácilmente accesible en la parte exterior del Robotino® tal y como se muestra en la figura 4.16, de modo que es amigable para el usuario realizar las conexiones pertinentes.



Figura 4.16. Ubicación de interfaz de entradas y salidas del Robotino® de Festo. Fuente: [49]

No obstante, tal y como se observó en la sección 4.1.2, la bomba a utilizar trabaja con una tensión nominal de 12 V, razón por la cual fue necesario diseñar un bloque que permitiera la adaptación de la energía recibida desde el Robotino® para aplicarla en la bomba a utilizar, lo cual se explica con detalles en la siguiente sección.

4.2.2 Adaptar energía eléctrica para el bombeo.

Tal y como se mencionó, la fuente de tensión proveniente del Robotino® entrega 24V en corriente directa y 3A máximo, mientras que la bomba a utilizar requiere de una tensión de 12 V, razón por la cual se diseñó un circuito regulador de tensión para alimentar la bomba seleccionada.

Para ello, se utilizó el circuito lineal de regulación de tensión mostrado en la figura 4.17, el cual se compone de dos capacitores -de 330 nF y 100 nF- respectivamente, un diodo 1N4002 y un regulador de tensión LM 7812, el cual es el componente que justamente permite tener los 12 V a la salida de este.

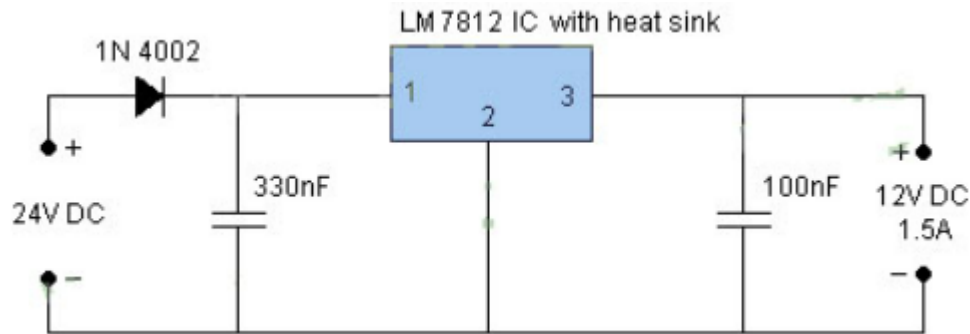


Figura 4.17. Circuito de adaptación de tensión. Fuente: [50]

Los aspectos por considerar para comprobar el adecuado dimensionamiento del circuito para la aplicación deseada se centraron en el regulador de tensión, esto debido a que es este componente el encargado de definir los límites de corriente del circuito. Según hojas de datos la corriente máxima que puede manejar este regulador de tensión es de 1.5 A; sin embargo, la bomba a utilizar requiere -como máximo- una corriente de 300mA, por lo cual se evidencia que el circuito es adecuado para la aplicación.

Por otro lado, otro de los aspectos característicos de los reguladores de tensión lineales es su alta disipación de energía por medio de calor. No obstante, para la presente aplicación la exigencia de potencia al circuito es considerablemente baja con respecto al límite nominal especificado por los fabricantes de los componentes, sin embargo, de igual forma se le colocó un disipador de calor al integrado LM7812 para prevenir sobrecalentamientos y garantizar un funcionamiento adecuado del mismo. De este modo, se concluye que la solución propuesta para el bloque de adaptación de energía es adecuada para la aplicación.

4.3 Señales

En la presente sección se detalla y explica el diseño y la elección de cada uno de los componentes que componen al concepto ganador dentro de la rama de señales de la descomposición funcional de la figura 3.5.

4.3.1 Elemento de accionamiento manual

A partir del procedimiento seguido en el capítulo 3 se determinó que el elemento de accionamiento manual a utilizar consiste en un botón. Para la selección de este se buscó que fuera

de tamaño reducido, de fácil accionamiento y que evidentemente fuera capaz de accionar el sistema implementado.

Considerando lo anterior el botón a utilizar es el mostrado en la figura 4.18 el cual tiene un diámetro máximo de 9.5mm y un largo de 27.5 mm, además de una resistencia en contacto de 20mΩ, una vida útil de 50.000 ciclos y una capacidad de corriente de hasta 3 A, por lo cual es evidente que es adecuado para la aplicación en cuestión.



Figura 4.18. Botón utilizado para el accionamiento manual del sistema. Fuente: [51]

4.3.2 Elemento de accionamiento automático.

Con respecto al elemento de accionamiento automático en el capítulo 3 se definió que dicho elemento sería una señal digital obtenida directamente desde el Robotino®. Dichas señales son de 24 V, a prueba de cortos circuitos y con una corriente máxima de 1 A. Las mismas corresponden a las salidas etiquetadas como DQ1 – DQ8 en la interfaz de entradas y salidas del Robotino® mostrado en la figura 4.15.

Las consideraciones aquí mencionadas son de interés para la selección de componentes del bloque de accionamiento del sistema, así como la implementación de la programación que permitirá el control de parámetros en el sistema, bloques en los cuales se ahondará más adelante.

4.3.3 Control automático de parámetros.

Para el control automático de parámetros se implementó -tal y como se determinó por medio del procedimiento del capítulo tres- una programación en el entorno *Robotino® View*. Inicialmente se realizó una trayectoria en forma de arco para la implementación de las pruebas cuyo diagrama GRAFCET se muestra en la figura 4.19.

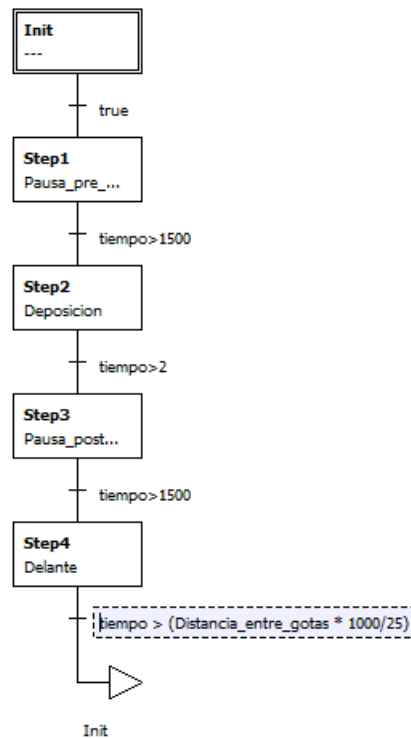


Figura 4.19. GRAFCET del programa a utilizar. Fuente: Elaboración propia.

En dicho GRAFCET se observa que se tienen 4 bloques funcionales. Los bloques 1 y 3 constituyen pausas antes y después de la deposición de la gota para garantizar que esta se deposite adecuadamente, pues si la deposición se da en movimiento, es posible que el rastro que quede sea distinto al de una gota e incluso se pierdan parte de los efectos esperados de la misma. En estos bloques el robot móvil no tiene por ende ni velocidad lineal ni tampoco velocidad angular. Es evidente que estos bloques se mantienen activos durante 1500 ms. Este conteo es realizado por un *timer* tal y como se muestra en la figura 4.20, el cual escribe su valor en la variable tiempo, de modo que una vez que se alcanza el valor definido en la condición de salto de bloque esta se reinicia.



Figura 4.20. Timer y escritura sobre la variable de tiempo en *Robotino® View*. Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, el bloque 2 consiste en el bloque de la deposición y su estructura funcional se muestra en la figura 4.21, en la cual es evidente que la funcionalidad del mismo consiste en activar la salida digital DQ1 que va a permitir la deposición de la sustancia mediante en circuito de accionamiento que se explica más adelante. Asimismo, al igual que se muestra en la figura 4.20, se cuenta con un *timer* que escribe sobre la constante de tiempo de modo que una vez que se cumple con el valor de 2 ms determinado mediante pruebas para obtener el tamaño de gota deseado para la aplicación, se salta al siguiente bloque funcional. La manera en que se obtuvo el tiempo de activación adecuado de la bomba para obtener el tamaño de gota deseado se muestra en detalle en la sección de resultados del presente informe. Una vez dicho lo anterior, es evidente que existe una diferencia leve entre los bloques 1 y 3 la cual consiste en que en el bloque 3 se procede a poner la salida digital DQ1 en bajo para detener la activación de la bomba y por ende también la deposición.



Figura 4.21. Estructura funcional del bloque de deposición en *Robotino® View*. Fuente: Elaboración propia

Por su parte, el bloque restante corresponde al bloque de desplazamiento llamado “Delante” en el GRAFCET de la figura 4.19. La trayectoria por realizar por parte del robot móvil para la fase de comprobación corresponde a un arco con las características y forma descrita en la figura 4.22.

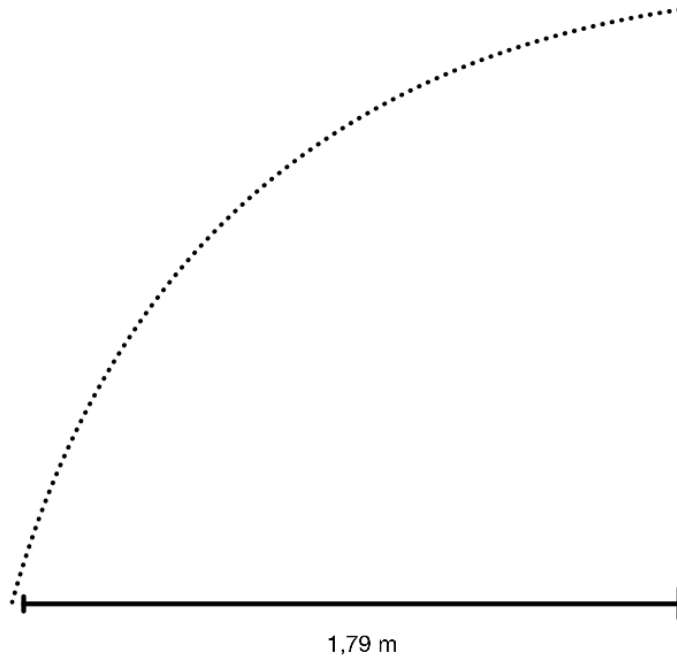


Figura 4.22. Trayectoria utilizada por parte del Robotino®. Fuente: Elaboración propia

Para lograr lo anterior se utilizó un bloque *omni-drive* dentro del entorno *Robotino® View* tal y como se muestra en la figura 4.23, el cual se encarga de calcular las revoluciones por minuto de cada uno de los tres motores del robot móvil a partir de los valores de velocidad en el eje “x”, en el eje “y”, así como también velocidad angular.

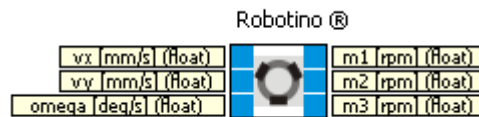


Figura 4.23. Bloque *omni-drive* en *Robotino® View*. Fuente: Elaboración propia

El marco de referencia utilizado por el robot móvil se muestra en la figura 4.24.

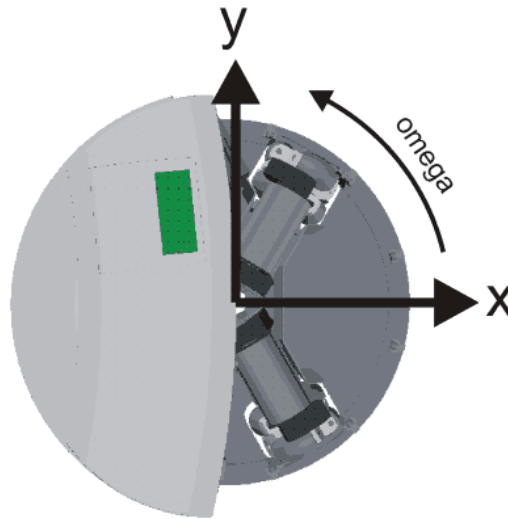


Figura 4.24. Marco de referencia utilizado por el robot móvil. Fuente: Elaboración propia

Para lograr obtener la trayectoria deseada se utilizó la estructura funcional mostrada en la figura 4.25 en la cual se observa que -al igual que en los casos anteriores- se utiliza un *timer* que escribe su valor sobre la variable tiempo pues esto define el paso entre bloques del GRAFCET. Por otro lado, se utiliza una velocidad angular negativa de -0.8 grados/s para obtener la trayectoria deseada siguiendo el marco de referencia mostrado en la figura 4.24. Con dicha velocidad angular, el viraje de 90 grados deseado se realizaría en $112,5$ segundos, por lo cual para obtener el arco de 2.81 m de longitud deseado (obtenido como un cuarto de circunferencia con el radio especificado) se debe utilizar una velocidad en el eje “x” de 25 mm/s tal y como se muestra en la figura 4.25.

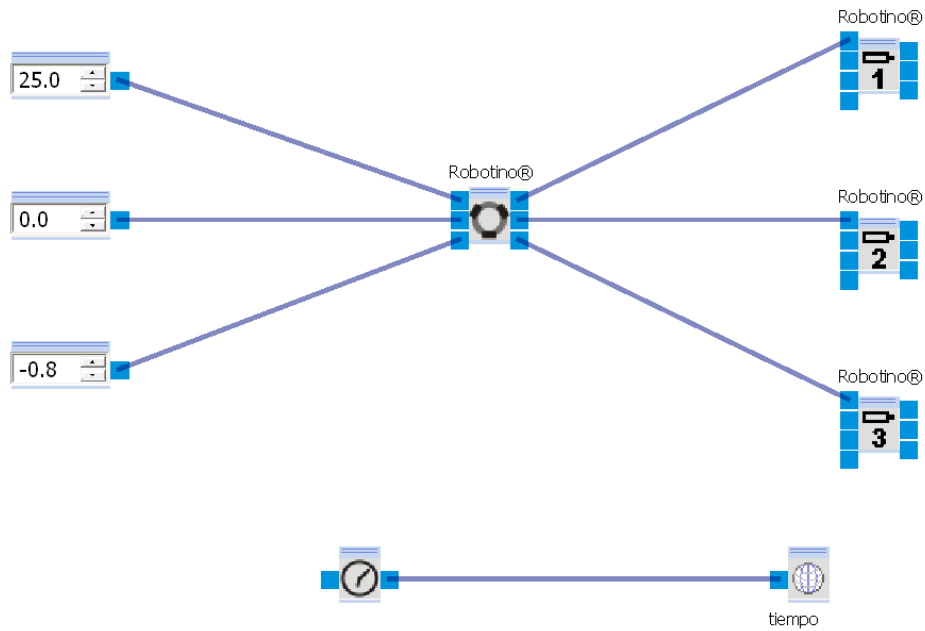


Figura 4.25. Estructura funcional del bloque de desplazamiento en *Robotino® View*. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la figura 4.19 se logra observar que la condición de salida del bloque de desplazamiento está definida por una variable “Distancia_entre_gotas” suministrada por el usuario de modo tal que -utilizando regla de tres- el tiempo que debe desplazarse el Robotino® es la distancia suministrada por el usuario en milímetros dividida por la velocidad de 25mm/s y multiplicada por 1000 para obtener el valor de tiempo en milisegundos, de modo que el tiempo de desplazamiento se asocia directamente con el dato de distancia ingresado por el usuario.

Por su parte, una vez realizadas las pruebas utilizando la trayectoria anterior, el cliente manifestó que deseaba una trayectoria tal y como la mostrada en la figura 4.26, pero con la modificación de que la línea diagonal se sustituyera por un arco que une ambas líneas: la vertical con la horizontal.

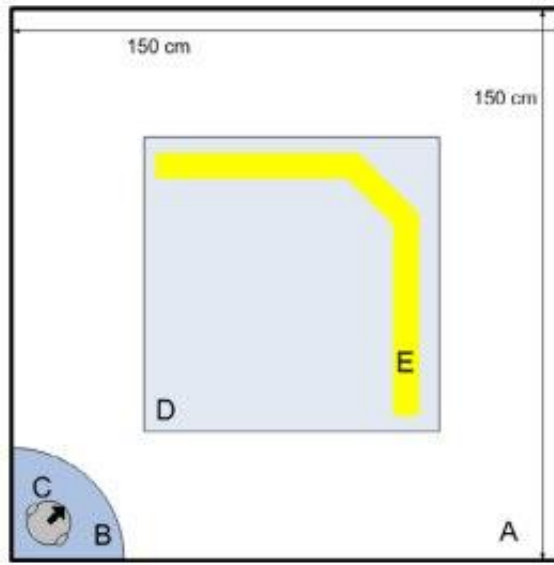


Figura 4.26. Trayectoria deseada por el cliente. Fuente: [52]

Para ello, igualmente se implementó la programación en el entorno *Robotino® View*. El GRAFCET correspondiente a la programación de esta trayectoria se muestra en la figura 4.27.

Capítulo 4. Propuesta de diseño

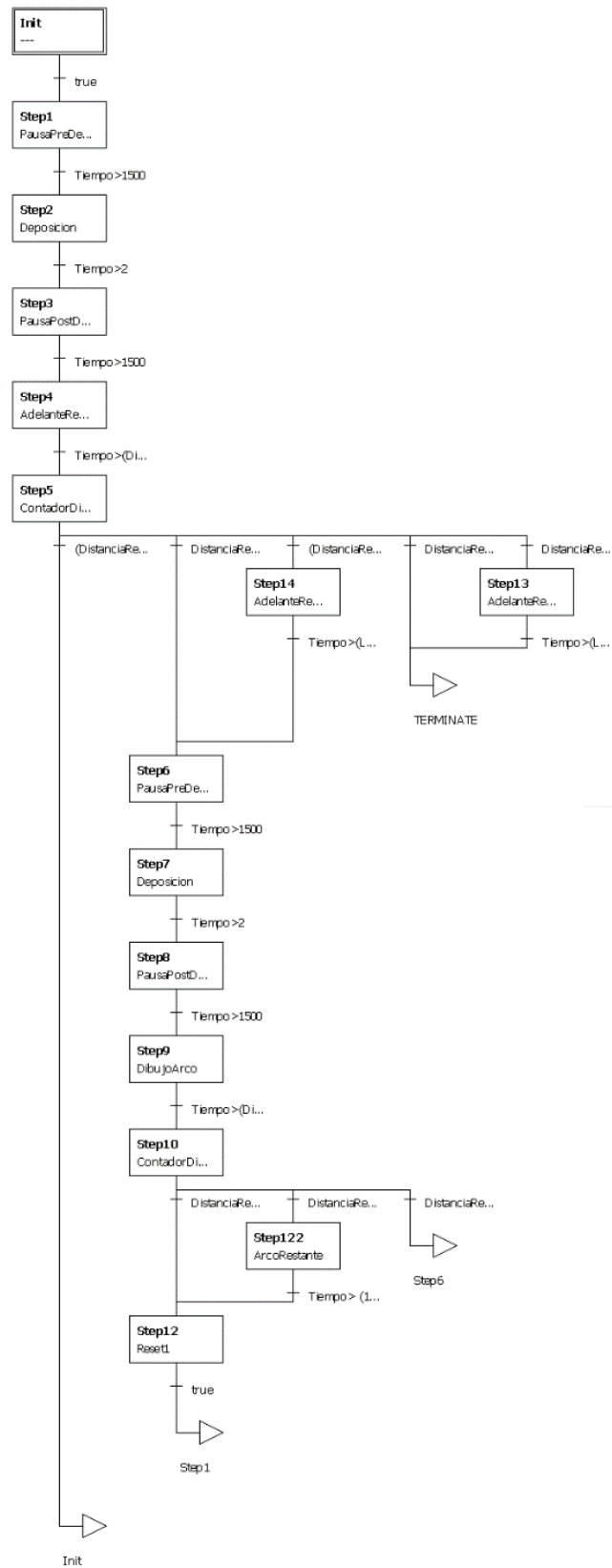


Figura 4.27. GRAFCET de la programación de la trayectoria deseada por el cliente. Fuente: [52]

Los bloques Step 1 y Step 3 constituyen pausas antes y después de la deposición de la gota para garantizar que esta se deposite adecuadamente, pues si la deposición se da en movimiento, es posible que el rastro que quede sea distinto al de una gota e incluso se pierdan parte de los efectos esperados de la misma. En estos bloques el robot móvil no tiene por ende ni velocidad lineal ni tampoco velocidad angular. Es evidente que estos bloques se mantienen activos durante 1500 ms. Este conteo es realizado por un *timer* tal y como se muestra en la figura 4.20, el cual escribe su valor en la variable tiempo, de modo que una vez que se alcanza el valor definido en la condición de salto de bloque esta se reinicia.

Seguidamente, el bloque Step 2 consiste en el bloque de la deposición y su estructura funcional se muestra en la figura 4.21, en la cual es evidente que la funcionalidad de este consiste en activar la salida digital DQ1 que va a permitir la deposición de la sustancia mediante en circuito de accionamiento que se explica más adelante. Asimismo, al igual que se muestra en la figura 4.20, se cuenta con un *timer* que escribe sobre la constante de tiempo de modo que una vez que se cumple con el valor de 2 ms determinado mediante pruebas para obtener el tamaño de gota deseado para la aplicación, se salta al siguiente bloque funcional. La manera en que se obtuvo el tiempo de activación adecuado de la bomba para obtener el tamaño de gota deseado se muestra en detalle en la sección de resultados del presente informe. Una vez dicho lo anterior, es evidente que existe una diferencia leve entre los bloques 1 y 3 la cual consiste en que en el bloque 3 se procede a poner la salida digital DQ1 en bajo para detener la activación de la bomba y por ende también la deposición, además de que realiza un conteo de la cantidad de gotas tal y como se muestra en la figura 4.28, en donde se suma 1 al valor de la variable CantidadGotas y se sobrescribe a sí misma.

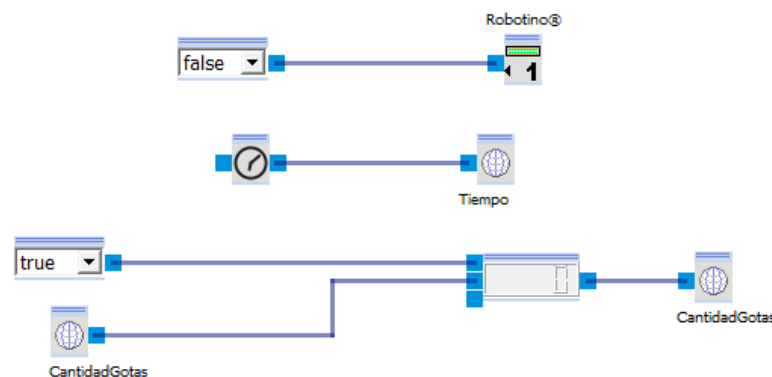


Figura 4.28. Estructura funcional del bloque de pausa post deposición en *Robotino® View*. Fuente: Elaboración propia

Por su parte, el bloque Step 4 denominado “AdelanteRecto” cuenta con la estructura funcional mostrada en la figura 4.29 en la cual se logra observar que -utilizando el marco de referencia del Robotino® mostrado en la figura 4.24 así como el bloque *omni-drive* de la figura 4.23, este bloque constituye un desplazamiento frontal del Robotino® a una velocidad de 25 mm/s. Al igual que en los casos anteriores- se utiliza un *timer* que escribe su valor sobre la variable tiempo pues esto define el paso entre bloques del GRAFCET

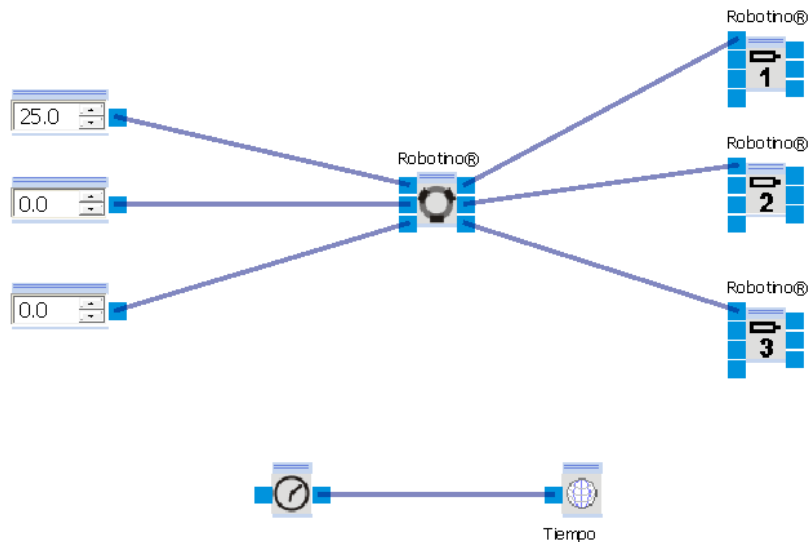


Figura 4.29. Estructura funcional del bloque de desplazamiento frontal en *Robotino® View*. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la figura 4.27 se logra observar que la condición de salida del bloque de desplazamiento está definida por una variable “Distancia_entre_gotas” suministrada por el usuario de modo tal que -utilizando regla de tres- el tiempo que debe desplazarse el Robotino® es la distancia suministrada por el usuario en milímetros dividida por la velocidad de 25mm/s y multiplicada por 1000 para obtener el valor de tiempo en milisegundos, de modo que el tiempo de desplazamiento se asocia directamente con el dato de distancia ingresado por el usuario.

Seguidamente, el bloque Step 5 es un contador de distancia el cual básicamente -tal y como se muestra en la figura 4.30- multiplica la cantidad de gotas que se han depuesto por la variable de distancia entre ellas para obtener la longitud de la recta que se está trazando, además de que inicializa la variable de conteo de gotas en el arco en cero.

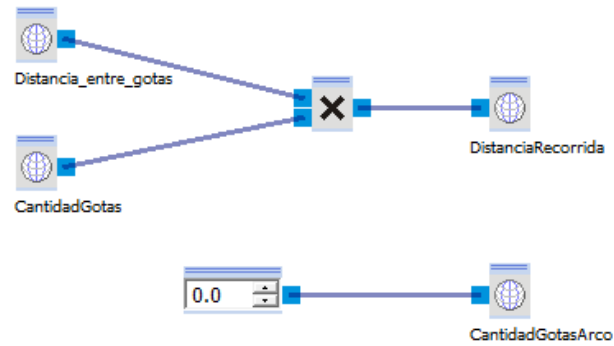


Figura 4.30. Estructura funcional del bloque de conteo de distancia de recta en *Robotino® View*.

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, en la figura 4.27 se observa que hay una serie de ramificaciones después del Step 5 definidas por un condicional. La primera condición de izquierda a derecha constituye a cuando la $(DistanciaRecorrida < LongitudRectas) \ \&\& \ ((LongitudRectas - DistanciaRecorrida) \geq Distancia_entre_gotas)$. Lo anterior quiere decir que la distancia recorrida es menor a la longitud de rectas ingresada por parte del usuario y que además la distancia que falta por recorrer para alcanzar la longitud de rectas digitada por parte del usuario es mayor a la distancia entre gotas, razón por la cual se vuelve al “Init” que equivale al Step 1 y en el avance el Robotino® se desplazará una distancia entre gotas nuevamente.

Sin embargo, está el otro caso de la tercera condición de izquierda a derecha, que se presenta cuando la $(DistanciaRecorrida < LongitudRectas) \ \&\& \ ((LongitudRectas - DistanciaRecorrida) < Distancia_entre_gotas \ \&\& \ Lineas == 0)$, esto quiere decir que la distancia que falta por recorrer es menor a una distancia entre gotas, razón por la cual se debe adelantar pero no una distancia equivalente a la distancia entre gotas sino una distancia definida por la diferencia entre las variables *LongitudRectas* y *DistanciaRecorrida*, por lo cual el tiempo de avance se define por la diferencia entre esas variables entre 25 mm/s multiplicado por mil -por medio de regla de tres- para que esté en milisegundos. Por otro lado, la variable *Lineas* es utilizada para saber cuándo ya se realizó la primera línea, de modo tal que si está en cero no se ha terminado de dibujar la primera línea mientras que si está en 1 ya una de las líneas fue trazada. Una vez que ya se alcanzó la longitud de la línea deseada por parte del usuario se entra en el ciclo de trazado del arco.

La otro condición -la segunda de izquierda a derecha- es la que se presenta cuando la distancia recorrida es exactamente igual a la longitud de rectas ingresada por el usuario y $Lineas == 0$, de

modo tal que se procede a avanzar al ciclo de dibujo del arco sin necesidad de avanzar más pues ya la línea tiene la longitud deseada por el usuario.

La sección de trazado del arco es la mostrada en la figura 4.31

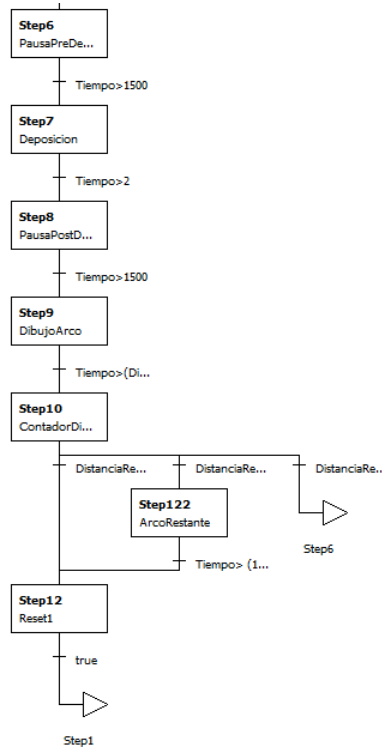


Figura 4.31. Sección del GRAFCET correspondiente al trazado del arco. Fuente: Elaboración propia

Para este caso, los Steps 6, 7 y 8 son exactamente iguales a los bloques de PausaPreDeposición, Deposición y PausaPostDeposición explicados anteriormente para el caso de trazado de la línea, en los cuales los bloques de pausa no tienen ningún tipo de movimiento lineal ni angular y en la deposición únicamente se activa la salida digital 1 del sistema por 2 ms. Sin embargo, el Step8 presenta una leve diferencia con respecto a la PausaPostDeposición de la figura 4.28 correspondiente al trazado de la línea. Para este caso la única diferencia constituye en que la variable de cantidad de gotas sobre la que escribe el contador es una variable de CantidadGotasArco, pero cumple la misma función tal y como se observa en la figura 4.32.

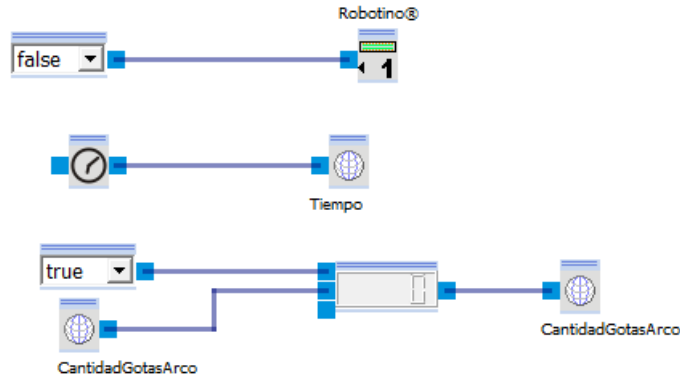


Figura 4.32. Estructura funcional del bloque de pausa post deposición para el trazado del arco en *Robotino® View*. Fuente: Elaboración propia

De este modo, una vez que se realizó la deposición y se hicieron las pausas correspondientes se procede al bloque de desplazamiento para trazado del arco. Para ello, fue necesario definir una longitud de arco adecuada. Inicialmente se probó con un arco de 50cm de radio; no obstante, este radio genera que la rueda trasera del Robotino® tenga que pasar sobre las gotas para poder realizar el viraje, razón por lo cual por medio de pruebas se determinó que el menor radio posible para obtener un arco sin que la rueda trasera del Robotino® pasara por encima de las gotas era de 70cm, de modo tal que la longitud del arco sería de 1.09956m. De este modo, manteniendo una velocidad constante de 25mm/s al Robotino® le tomaría 43.9824s realizar la trayectoria y en ese mismo tiempo debía girar 90 grados, razón por la cual la velocidad angular debe ser de 2.04627 grados/s para que este sea capaz de realizar el arco deseado. Lo anterior se muestra en la figura 4.33, en la cual el signo de la velocidad angular se define según el marco de referencia del Robotino® mostrado en la figura 4.24. Asimismo, se logra observar que hay un temporizador que escribe sobre la variable tiempo.

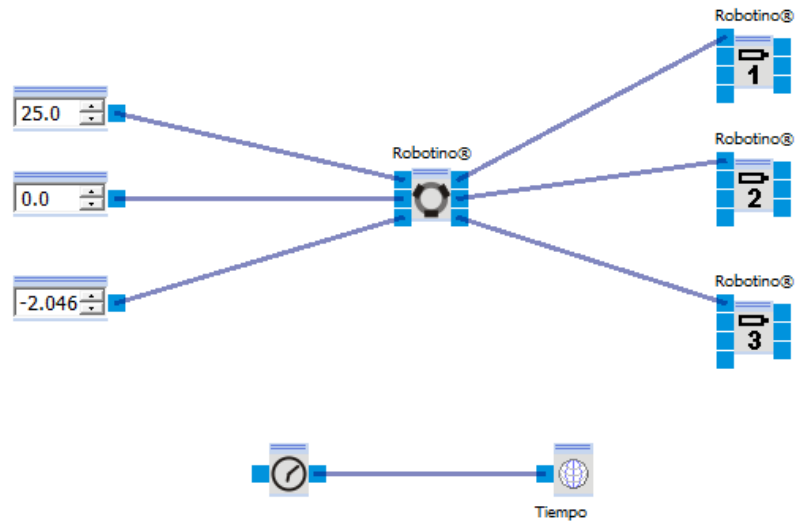


Figura 4.33. Estructura funcional del bloque de dibujo de arco en *Robotino® View*. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la figura 4.31 se logra observar que la condición de salida del bloque de DibujoArco está definida por una variable “Distancia_entre_gotas” suministrada por el usuario de modo tal que -utilizando regla de tres- el tiempo que debe desplazarse el Robotino® es la distancia suministrada por el usuario en milímetros dividida por la velocidad de 25mm/s y multiplicada por 1000 para obtener el valor de tiempo en milisegundos, de modo que el tiempo de desplazamiento se asocia directamente con el dato de distancia ingresado por el usuario.

Una vez que se desplaza el robot se pasa a un bloque de contador de distancia recorrida en el arco el cual se conforma -tal y como se ve en la figura 4.34- de un multiplicador de la distancia entre gotas por la cantidad de gotas en el arco y se escribe en la variable DistanciaRecorridaArco.

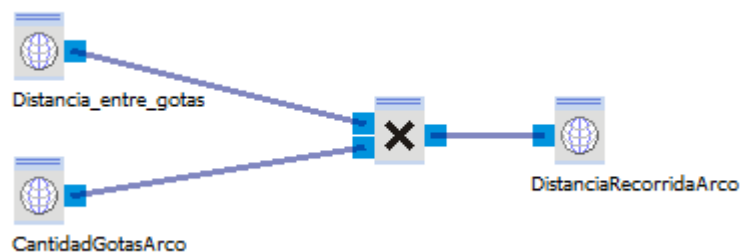


Figura 4.34. Estructura funcional del bloque de conteo de distancia de arco en *Robotino® View*. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4. Propuesta de diseño

Una vez que se realizó el conteo se tienen tres condiciones: 1) $DistanciaRecorridaArco == 1099.56$. 2) $DistanciaRecorridaArco < 1099.56 \ \&\& \ ((1099.56 - DistanciaRecorridaArco) < Distancia_entre_gotas)$ y 3) $DistanciaRecorridaArco < 1099.56 \ \&\& \ ((1099.56 - DistanciaRecorridaArco) \geq Distancia_entre_gotas)$. La primera de ellas constituye al caso en que la distancia de arco es exactamente igual a la distancia esperada de este, por lo que se pasa a un bloque de Reset en el cual las variables ContadorArco, CantidadGotas y DistanciaRecorrida se ponen en cero para saltar nuevamente al Step 1 y comenzar con el trazado de la segunda línea y además se pone la variable Lineas en 1 para saber que la línea y el arco ya fueron trazados, tal y como se muestra en la figura 4.35.

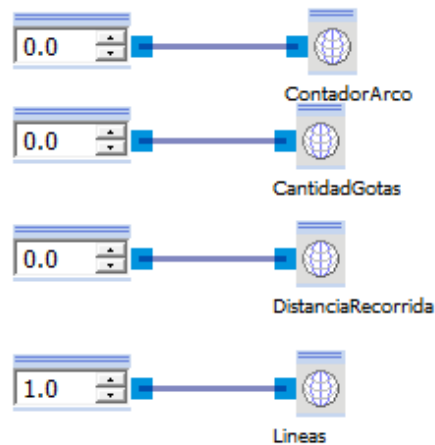


Figura 4.35. Estructura funcional del bloque de Reset en *Robotino® View*. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la segunda condición corresponde al caso en que la distancia restante del arco es menor a una distancia entre gotas por lo que se activa el desplazamiento en forma de arco un tiempo de $(1099.56 - DistanciaRecorridaArco) * 1000 / 25$ ms el cual se obtiene por medio de regla de tres considerando la distancia restante y la velocidad de desplazamiento del Robotino®. Y finalmente, la tercera condición corresponde a cuando la distancia restante del arco es mayor o igual a una distancia entre gotas por lo que se salta al Step 6 y se continúa el trazado del arco.

Tal y como se mencionó anteriormente, una vez que se culmina el trazado del arco se procede a saltar el Step 1 y comenzar nuevamente con el ciclo de trazado de líneas mencionado anteriormente, solo que para este caso, al llegar a los condicionales que se encuentran después del Step 5, ya la variable Lineas está en 1 por lo que las condicionales que aplican son la tercera y

cuarta de izquierda a derecha que son respectivamente: 1) $\text{DistanciaRecorrida} == \text{LongitudRectas} \ \&\& \ \text{Lineas} == 1$ y 2) $\text{DistanciaRecorrida} < \text{LongitudRectas} \ \&\& \ (\text{LongitudRectas} - \text{DistanciaRecorrida}) < \text{Distancia_entre_gotas} \ \&\& \ \text{Lineas} == 1$. La primera de ellas corresponde al caso en el cual la distancia recorrida para la segunda línea es exactamente igual a la longitud de recta especificada por el usuario, por lo que el programa termina tal y como se muestra en la figura 4.27. Y por su parte, cuando la distancia que falta por recorrer es menor a una distancia entre gotas se avanza solo un tiempo definido por la distancia restante correspondiente a la diferencia entre las variables LongitudRectas y Distancia Recorrida. Y por su parte, si la distancia que falta es mayor a una distancia entre gotas, esto constituye a la primera condición de izquierda a derecha por lo que se salta al “Init” o Step1 para continuar con la deposición y el trazado correspondiente de la recta.

De este modo, se evidencia cómo el programa primero traza una línea cuya longitud es especificada por el usuario y una vez que se alcanza esa longitud se comienza el trazado de un arco cuya longitud ya está definida debido a una limitante física existente por la capacidad de giro del robot. Una vez que se alcanza la longitud de arco deseada se procede a dibujar la segunda línea la cual una vez que se culmina se termina el programa y el Robotino® se detiene.

4.3.4 Accionamiento del sistema.

Para el accionamiento del sistema, se determinó por medio del procedimiento llevado a cabo en el capítulo tres, que para el caso del accionamiento automático el concepto a implementar sería la utilización de un optoacople como elemento de accionamiento automático, mientras que para las señales manuales se decidió colocar el botón directamente entre la alimentación y la bomba. A continuación, se explica detalladamente la forma en la que se implementó lo antes mencionado.

El circuito implementado se muestra en la figura 4.36.

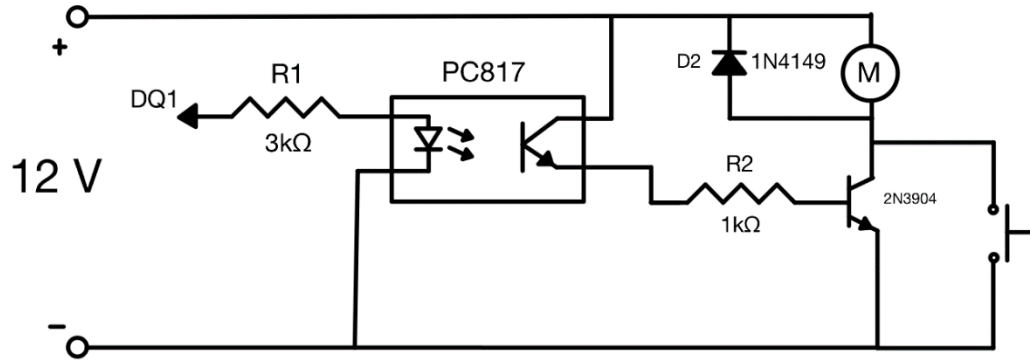


Figura 4.36. Circuito de accionamiento del sistema. Fuente: Elaboración propia

Para dicho circuito la señal DQ1 corresponde a la salida digital del Robotino®, la cual es de 24 V y máximo 1 A. Para el caso del optoacople se utilizó el modelo SHARP PC817, el cual tiene como corriente máxima a la entrada un valor de 50 mA según las hojas de datos del fabricante. Por esta razón, considerando el hecho de que -según hojas de datos- la caída de tensión típica en el LED es de 1.2 V, y tomando como corriente máxima 20 mA, se obtiene que la caída de tensión en la resistencia a utilizar es de 22.8 V y considerando una corriente de 20 mA el valor de resistencia mínimo a colocar es de 1.1 k Ω ; no obstante, se optó por una de 3k Ω para limitar la corriente en el optoacople.

Por otro lado, el optoacople tiene una corriente de colector máxima de 50 mA según lo estipula el fabricante. Por esta razón, para el accionamiento eléctrico del motor se utilizó un transistor 2N3904, el cual es capaz de manejar corrientes de colector de hasta 200 mA y para la aplicación en cuestión se midió que el motor requiere de una corriente de aproximadamente 130 mA para su funcionamiento, razón por la cual este transistor es adecuado para la aplicación. Como protección en la base de este se utilizó una resistencia de 1 k Ω para evitar que haya una corriente de más de 50 mA en la base, la cual es el valor máximo de la corriente de base y el valor máximo de corriente de colector en el optoacople.

Y finalmente, en la figura 4.36 se observa que se colocó un diodo 1N4549 como protección al semiconductor pues cuando se retira la alimentación del motor, este puede continuar girando, induciendo corrientes y tensiones no deseadas para el transistor.

Finalmente, también se logra observar la ubicación del interruptor entre tierra y el motor de la bomba, para poder realizar una activación inmediata cuando sea necesario.

El circuito anterior, en conjunto con el de adaptación del nivel de tensión fueron soldados sobre una placa perforada tal y como la mostrada en la figura 4.37, de dimensiones de 50mm x 50mm pues al ser un primer prototipo funcional, y tomando en consideración el tiempo disponible para el desarrollo del presente proyecto, es la manera más adecuada de implementarlo.

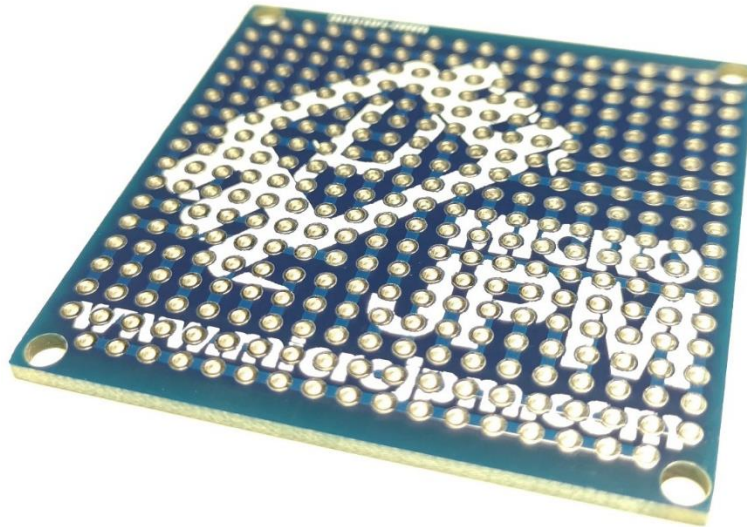


Figura 4.37. Placa perforada utilizada. Fuente: [53]

4.4 Diseño de carcasa

En la presente sección se detallará en el diseño llevado a cabo para la carcasa del sistema. Inicialmente, el primer aspecto a considerar fue el material a utilizar entre los cuales se encontraban: impresión 3D, acrílico, MDF, o chapa metálica. El MDF fue descartado por el hecho de que este tipo de material es poroso y absorbente, razón por la cual ante un eventual derrame de sustancia no solamente quedaría totalmente manchado sino que además sufriría un aumento volumétrico debido a la expansión por absorción de líquido razón por la cual se tendrían que reemplazar la o las piezas que hayan sido humedecidas y considerando que el sistema desarrollado es un sistema de bombeo de una sustancia líquida, definitivamente el MDF no es una alternativa viable para la carcasa.

Por otro lado, la chapa metálica es sin duda una alternativa promisoriosa en términos de rigidez, nitidez y acabado; no obstante, esta tiene un peso elevado cuando se busca un sistema ligero y de tamaño reducido además de que el costo y complejidad de la manufactura es mayor, razón por la cual fue descartado.

Capítulo 4. Propuesta de diseño

Por su parte, la impresión 3D es una alternativa adecuada junto con el acrílico; no obstante, mediante el acrílico se obtiene un acabado más nítido que mediante la impresión 3D pues para obtener mejores acabados mediante este último método se requiere de la implementación de procesos y tratamientos posteriores a la manufactura, a diferencia del acrílico. Por otro lado, los productos manufacturados mediante impresión 3D presentan cierta rugosidad en comparación con la superficie de una lámina acrílica, lo cual lo hace más difícil de limpiar ante un eventual derrame de la sustancia a utilizar dentro de la carcasa. De este modo, se determinó que la carcasa iba a ser manufacturada de acrílico mediante el proceso de corte láser.

La carcasa se diseñó de modo tal que se pudieran colocar: los envases, la placa perforada, el botón, el motor y la sección de deposición con las placas y los magnetos correspondientes. De este modo se llegó al diseño -solamente con las tapas laterales e internas- mostrado en la figura 4.38.

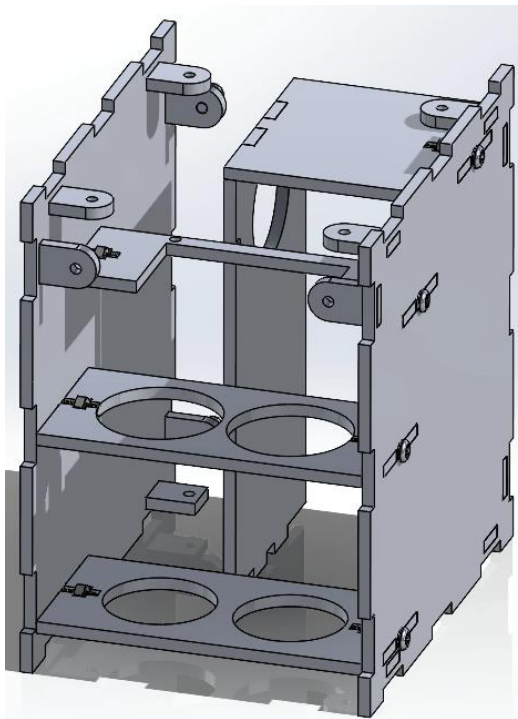


Figura 4.38. Carcasa solo con tapas laterales y piezas internas. Fuente: Elaboración propia

Para este diseño se decidió colocar la placa perforada en la parte superior de modo que estuviera más cerca del punto en el que está el botón para el accionamiento manual. Asimismo, la pieza que la sostiene cuenta con esa ranura para dar espacio a los pines y relieves ubicados en la parte inferior de la placa perforada producto de la soldadura.

Capítulo 4. Propuesta de diseño

Por otro lado, el motor se decidió colocar de esa forma para aprovechar el ancho de 86 mm de la estructura que ya se debía tener debido al tamaño de los envases y no hacerla más bien más larga. La altura de colocación del agujero para el motor se definió de modo tal que estuviera por encima de la posición superior de los envases para que la manguera pudiera ingresar fácilmente a estos y extraer la sustancia ahí colocada.

Por su parte, para las placas de sostén de los envases estas se diseñaron de forma tal que los diámetros de la placa de abajo son levemente menores al diámetro de los envases para que estos puedan permanecer fijos sobre esta placa y no pasen a través de ella. Por su parte, la placa superior más bien se diseñó levemente holgada para permitir que los envases se pudieran mover hacia arriba e inclinarlos levemente para poder sacarlos con facilidad. La distancia a la cual se colocó la placa perforada se definió tomando en cuenta que los envases se pudieran mover hacia arriba, que hubiera campo para manipular los envases y la manguera, y que además hubiera espacio para que el regulador de tensión no hiciera contacto con la placa superior del envase.

Para la fijación de estos elementos de modo tal que haya rigidez en el ensamble y que las piezas no se muevan durante el movimiento del robot móvil se utilizó el diseño mostrado en la figura 4.39 por medio del cual se hacen unas ranuras en las que encajan todas las piezas, pero además se hace un agujero para un tornillo y se hace la ranura para la tuerca correspondiente de modo tal que se genera una fijación rígida y adecuada entre todas las piezas del ensamble. Para la fijación de las piezas horizontales con las piezas laterales del ensamble se utilizaron tornillos M3x12 y tuercas M3.

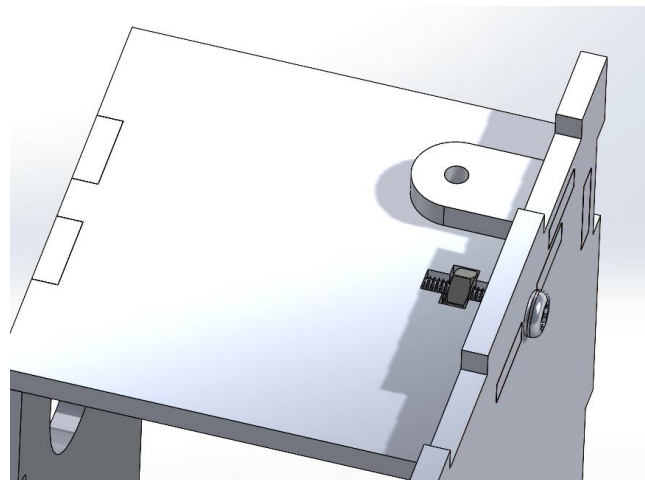


Figura 4.39. Método de fijación de piezas internas. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4. Propuesta de diseño

Por otro lado, en lo que respecta a las piezas restantes -la placa frontal, trasera, superior e inferior- estas se fijaron por medio de unas piezas salientes mostradas en la figura 4.40 fijadas a las placas laterales por medio del adhesivo *SuperBonder* las cuales se diseñaron con un agujero de 2.675mm de diámetro que corresponde al diámetro efectivo de un tornillo M3 según [54], de modo tal que el tornillo se fija de forma autoroscante en las piezas mostradas en la figura 4.40. Para ello se utilizaron tornillos M3x10.

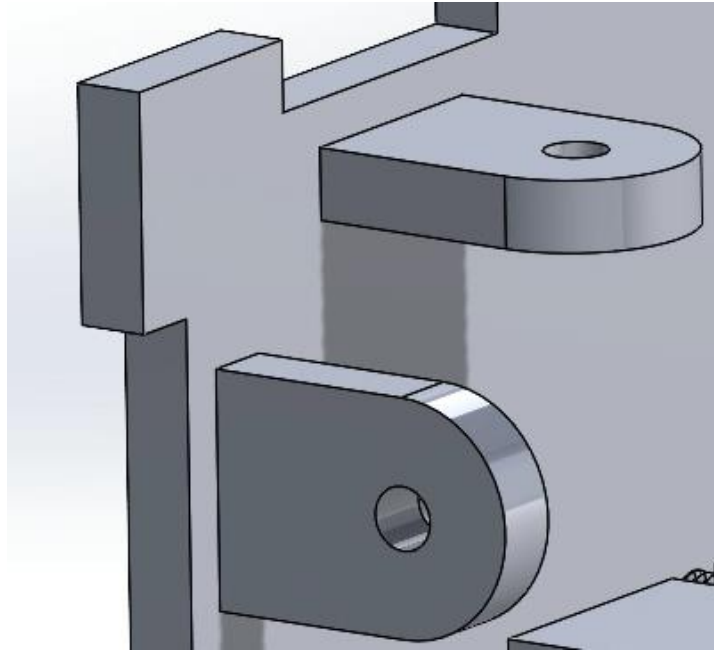


Figura 4.40. Método de fijación de tapas exteriores. Fuente: Elaboración propia

Otro aspecto determinante en la fijación y rigidez de la estructura diseñada constituyen las estructuras escalonadas que se muestran en los bordes de las piezas, de modo tal que permite una fijación más adecuada y un ensamble más rígido.

El diseño de la placa frontal -tal y como se muestra en la figura 4.41- no tiene ningún elemento más que los cuatro agujeros que permite fijarla a las piezas mostradas en la figura 4.40.

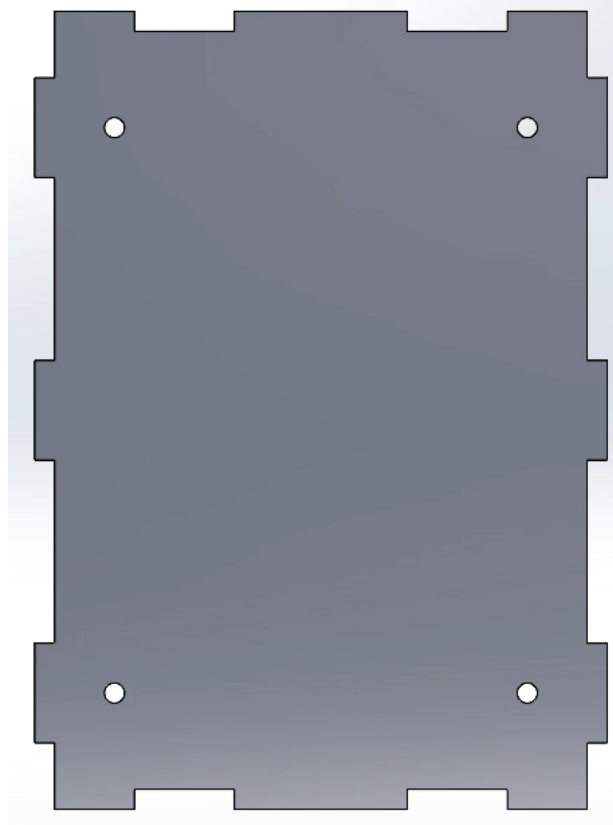


Figura 4.41. Tapa frontal de la carcasa. Fuente: Elaboración propia

Por su parte, la placa trasera -tal y como se observa en la figura 4.42- sí cuenta con un agujero diseñado para poder acceder fácilmente a los envases con la sustancia de modo que puedan recargarse con más materia prima, así como también ser extraídos para limpieza de estos.

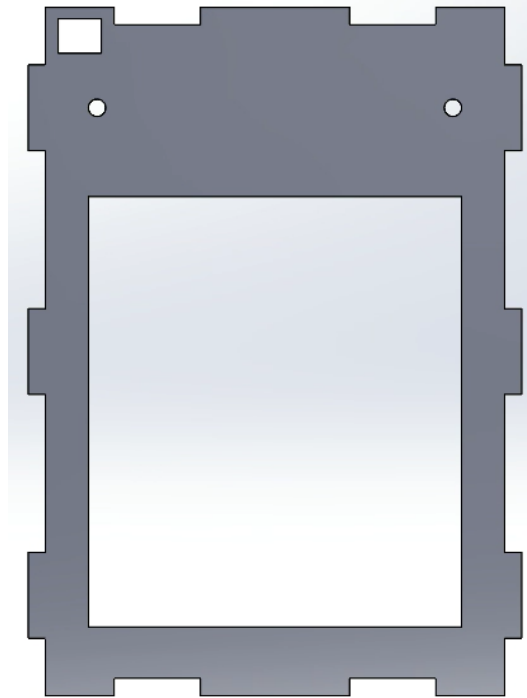


Figura 4.42. Tapa trasera de la carcasa. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la figura 4.42 se muestran dos agujeros correspondientes a los tornillos de fijación de la placa y un rectángulo en la parte superior izquierda que corresponde al agujero diseñado para el conector de tres pines mostrado en las figuras 4.43a y 4.43b, el cual cuenta con los dos pines de alimentación de 24 V y la señal digital, todos provenientes del Robotino®, de modo tal que la conexión y desconexión del módulo diseñado sea rápida y sencilla para el usuario. Este conector únicamente puede ser conectado de una forma para que se acoplen ambas partes mostradas en las figuras 4.43a y 4.43b, de modo que se evitan conexiones erróneas que puedan dañar el sistema diseñado.



Figuras 4.43a y 4.43b. Conector de señales de la carcasa. Fuente: Elaboración propia

Por su parte, la placa superior mostrada en la figura 4.44 cuenta con los cuatro agujeros para los tornillos de fijación y además cuenta con el agujero para el botón de accionamiento manual.

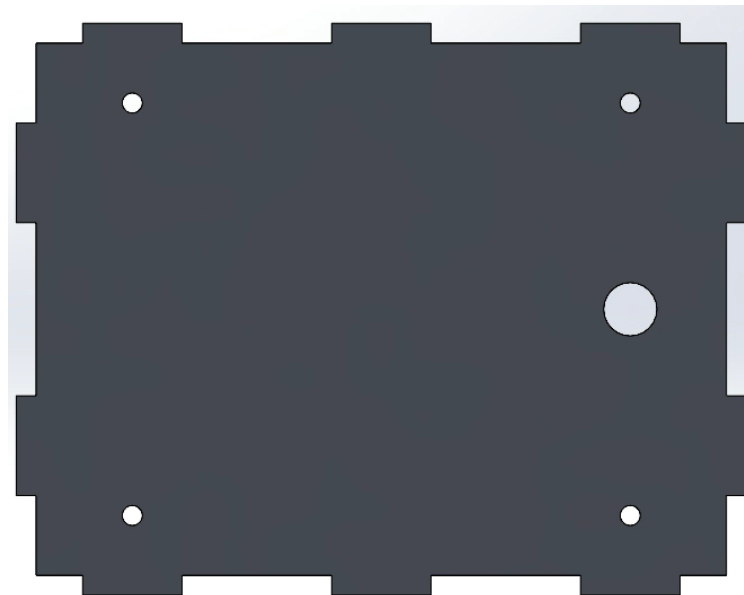


Figura 4.44. Tapa superior de la carcasa. Fuente: Elaboración propia

Y finalmente, la placa inferior diseñada se muestra en la figura 4.45 en la cual se observa que esta cuenta con los cuatro agujeros para los tornillos de fijación, dos ranuras rectangulares que corresponden al punto donde se acopla la placa vertical que sostiene al motor y un agujero rectangular más uno circular que corresponden a las placas de magnetización.

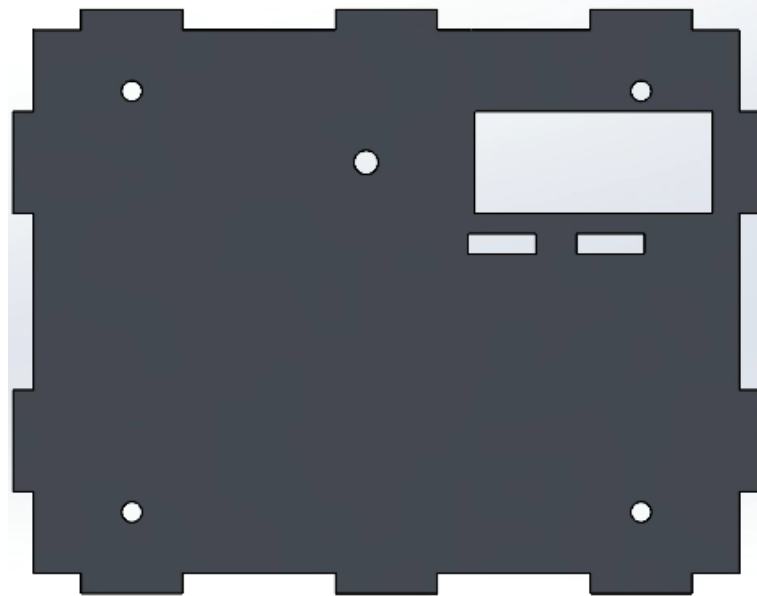


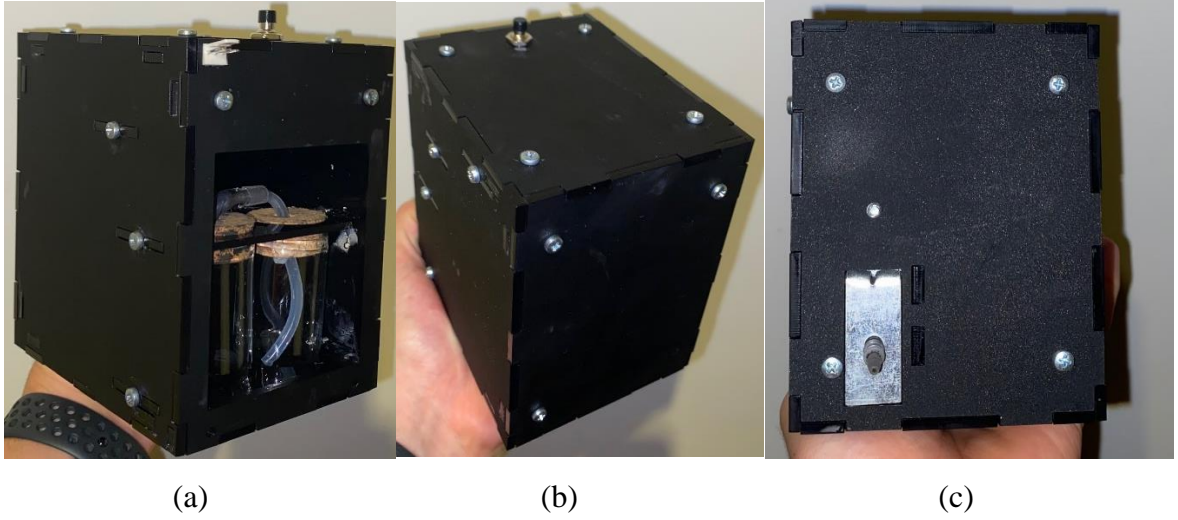
Figura 4.45. Tapa inferior de la carcasa. Fuente: Elaboración propia

El agujero rectangular está diseñado para la ubicación de las placas con los magnetos y el agujero circular corresponde al tornillo que las fija a la carcasa; sin embargo, para asegurar que las placas quedaran a tope con la placa inferior, se debió diseñar un par de placas de acrílico cuadradas que permitieran colocarla a la altura adecuada dentro de la carcasa y que además contribuyeran a una fijación rígida de las placas a la misma, tal y como se muestra en la figura 4.46.



Figura 4.46. Placa para fijación de magnetos a carcasa. Fuente: Elaboración propia

De este modo, el ensamble final ya implementado y con todos los elementos instalados se muestra en las figuras 4.47a, 4.47b y 4.47c.



Figuras 4.47a, 4.47b y 4.47c. Ensamble final del sistema implementado. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5. Resultados y análisis

En el presente capítulo se muestra la manera en la que se llevó a cabo todo el proceso de validación mediante la toma de datos de las variables de interés para el proyecto y análisis de estos. Inicialmente se describe la estrategia de validación seguida para la etapa final del proceso de diseño, seguidamente se realiza el análisis y la presentación de los resultados obtenidos y finalmente, se adjunta y se describe el análisis económico del proyecto desarrollado.

5.1 Estrategia de validación

Para la etapa final del proceso de diseño, correspondiente a la validación, se procedió a realizar las mediciones de los parámetros de interés en el funcionamiento del sistema: distancia entre gotas, tamaño de la gota y magnetización de estas. Asimismo, también se muestra la validación del peso del sistema diseñado en comparación al diseño que se tenía antes implementado.

Para la mezcla de sustancia utilizada en la parte de validación, se realizó la receta mostrada en la tabla 2.3, sin embargo, como consideración especial, se utilizó agua ultrapura (tipo I) con una resistividad medida de 18.2 M Ω -cm. Para la obtención de este fluido se utilizó el equipo *MILLI-Q® ADVANTAGE A10® SYSTEM* del Laboratorio Institucional de Microscopía del Instituto Tecnológico de Costa Rica, mostrado en la figura 5.1.



Figura 5.1. Equipo purificador de agua *MILLI-Q® ADVANTAGE A10® SYSTEM*. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5. Resultados y análisis

Para la medición del tamaño de gota y distancia entre las mismas se utilizó como instrumento de medición una regla metálica con una resolución de 0.5 mm tal y como se muestra en la figura 5.2.

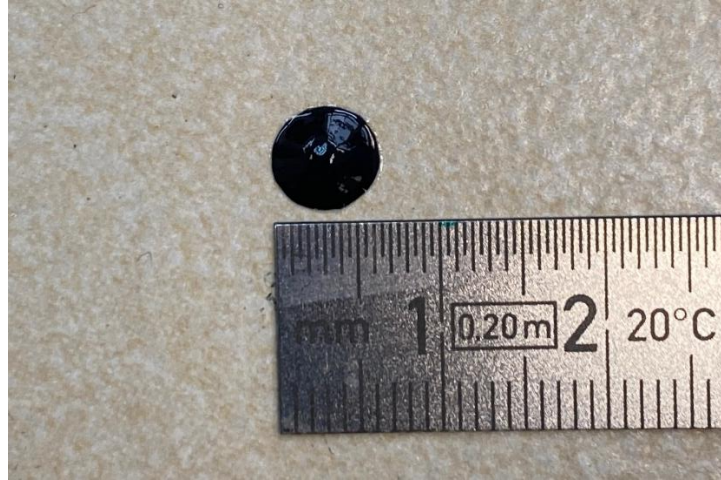


Figura 5.2. Instrumento de medición utilizado para el tamaño de gota y distancia entre ellas. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, para la medición del campo magnético de las gotas, se utilizó el magnetómetro CJMCU-008 conectado a un Arduino Uno y montado sobre una base de MDF que colocaba el sensor a una altura de 10 mm del suelo, tal y como se muestra en la figura 5.3.

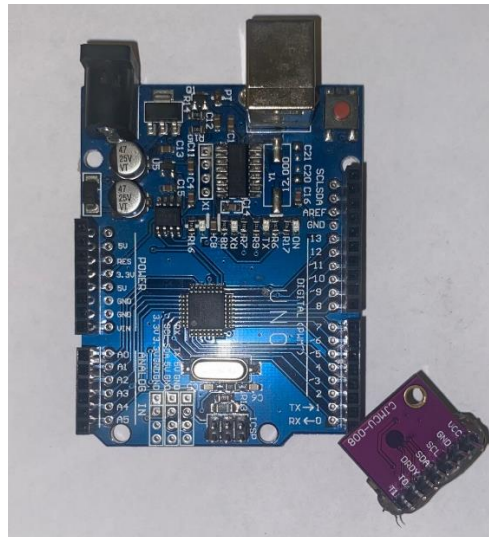


Figura 5.3. Magnetómetro y Arduino utilizados para la medición del campo magnético. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5. Resultados y análisis

Asimismo, para la realización de las pruebas se utilizó la trayectoria en forma de arco mostrada en la sección 4.3.3 del presente informe. Dicha trayectoria ya implementada de forma física se muestra en la figura 5.4.



Figura 5.4. Trayectoria en forma de arco utilizada para las pruebas. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la medición de la masa del sistema se utilizó una balanza digital con resolución de 0.01 g.

Mencionado lo anterior, en la siguiente sección se procede a mostrar los resultados obtenidos y todo el desarrollo y decisiones intermedias llevadas a cabo para cada una de las mediciones: distancia entre gotas, tamaño de gota y magnetización, así como también el análisis correspondiente de estos.

5.2 Análisis y presentación de resultados

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos y todo el desarrollo y decisiones intermedias llevadas a cabo para cada una de las mediciones: distancia entre gotas, tamaño de gota y magnetización, así como también el análisis correspondiente de estos. De igual forma, se muestra la validación de la trayectoria solicitada por el usuario posterior a la etapa de toma de datos y

muestras, cuya programación en el entorno *Robotino® View* se explicó en detalle en la sección 4.3.3 del presente informe.

5.2.1 Tamaño de gotas.

La especificación inicial del cliente requería que la gota fuera capaz de colocarse en tamaños inferiores a los 6mm. A partir de las pruebas preliminares se determinó no era posible cumplir el requerimiento pues el volumen mínimo necesario para que el peso del fluido lograra vencer la tensión superficial y la fricción generada en la punta de goteo era equivalente a una gota de aproximadamente 6mm. El cliente expresa que puede aceptar el tamaño de 6mm con una tolerancia de +/- 1mm y una desviación estándar de 16.67%. Por este motivo no se realizan modificaciones al diseño de la punta de goteo.

De este modo, dicho lo anterior, se procedieron a realizar una serie de pruebas con distintos tiempos de activación de la bomba para determinar el tiempo adecuado para obtener el valor de diámetro de la gota más cercano a los 6mm. Para estas pruebas se seleccionó un tamaño de muestra arbitrario de 22 mediciones tomando en consideración la trayectoria del robot, el espacio para correr las pruebas y la cantidad de gotas que depositaba en el recorrido. La manera en que se midió el diámetro de las gotas se muestra en la figura 5.2.

Se realizaron pruebas con un tiempo de activación de la bomba de 4ms, para lo cual se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Mediciones diámetro de gota para un tiempo de activación de la bomba de 4ms.

Número de medición	Diámetro de gota (± 0.25) mm
1	6.00
2	6.00
3	6.50
4	6.50
5	6.50
6	6.00
7	6.00
8	6.50
9	5.00
10	8.00
11	4.00
12	8.00
13	5.00
14	8.00
15	7.00
16	6.00
17	6.00
18	6.00
19	5.00
20	6.00
21	6.00
22	6.00
Promedio	6.18
Desviación Estándar	0.98

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos de la tabla 5.1 se logra observar que se obtiene un valor promedio cercano a los 6 mm con una desviación estándar de 0.9825, lo cual da como resultado un coeficiente de variación de 15.89%, lo cual es inferior al valor aceptado por parte del cliente, sin embargo, es deseable que en diseños mecánicos este valor sea menor al 10% para que sea considerado como aceptable.

Por lo tanto, se procedió a realizar pruebas con un tiempo de activación de la bomba de 3.5ms, cuyos resultados se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Mediciones diámetro de gota para un tiempo de activación de la bomba de 3.5ms.

Número de medición	Diámetro de gota (± 0.25) mm
1	6.50
2	6.00
3	6.00
4	6.00
5	6.00
6	6.00
7	6.00
8	5.00
9	7.00
10	6.00
11	7.00
12	5.00
13	6.50
14	6.00
15	7.00
16	6.00
17	6.00
18	6.00
19	6.00
20	6.50
21	6.00
22	6.50
Promedio	6.14
Desviación Estándar	0.52

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos de la tabla 5.2 se observa que el promedio de 6.136mm se aproxima más al dato de 6 mm deseado en comparación a los datos de la tabla 5.1. Por otro lado, la desviación estándar de 0.51598 da como resultado un coeficiente de variación de 8.4% el cual es menor al permitido por parte del cliente y además es inferior al 10% aceptable para diseños mecánicos.

No obstante, a pesar de que los resultados anteriores son aceptables, se realiza otra prueba bajando el tiempo de activación de la bomba con el objetivo de aproximar más el promedio al ideal de 6 mm. Por lo tanto, los resultados de las mediciones realizadas con un tiempo de activación de la bomba de 2ms se muestran en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Mediciones diámetro de gota para un tiempo de activación de la bomba de 2ms.

Número de medición	Diámetro de gota (± 0.25) mm
1	5.00
2	5.50
3	5.00
4	5.50
5	6.00
6	6.00
7	6.00
8	6.00
9	6.00
10	6.00
11	6.00
12	7.00
13	6.50
14	6.50
15	6.50
16	7.00
17	6.50
18	6.00
19	6.00
20	7.00
21	6.00
22	6.00
Promedio	6.09
Desviación Estándar	0.55

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados de la tabla 5.3 se muestra que se logró aproximar aún más el promedio al valor deseado de 6mm, con una desviación estándar un poco mayor a los datos de la tabla 5.2; el coeficiente de variación de 9% asociado a estas mediciones sigue siendo menor al 10% aceptable para diseños mecánicos y por lo tanto también se encuentra dentro del valor aceptado por parte del cliente.

Si bien los resultados anteriores son aceptables se realiza otra prueba bajando el tiempo de activación de la bomba con el objetivo de aproximar aún más el promedio al ideal de 6 mm y obtener el mínimo de activación de la bomba que genera las características deseadas. Por lo tanto, los resultados de las mediciones realizadas con un tiempo de activación de la bomba de 1ms se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Mediciones diámetro de gota para un tiempo de activación de la bomba de 1ms.

Número de medición	Diámetro de gota (± 0.25) mm
1	8.00
2	7.00
3	8.00
4	11.00
5	10.00
6	10.00
7	11.00
8	11.00
9	6.50
10	8.00
11	7.00
12	10.00
13	10.00
14	11.00
15	10.00
16	10.00
17	9.00
18	9.00
19	10.00
20	10.00
21	6.50
22	7.50
Promedio	9.11
Desviación Estándar	1.53

Fuente: Elaboración propia

A partir de la tabla 5.4 se logra observar que los resultados de promedio obtenidos en este caso se alejan del valor de 6mm deseado, además de que el coeficiente de variación asociado a estas mediciones es de 16.83% lo cual está fuera de los valores deseados para dicho coeficiente.

Lo anterior se debe a que en cada bombeo no se logra alcanzar la cantidad de volumen necesario para vencer la tensión superficial y la fricción generada entre el líquido y las paredes de la punta de goteo, por lo que en una activación de la bomba el líquido queda en la punta de goteo sin ser depositado en el piso y en la siguiente activación de la bomba se acumula más líquido y ya sí se depone adecuadamente pero en tamaños de gotas considerablemente grandes debido a la acumulación de volumen en la punta de goteo, razón por la cual el promedio obtenido es de tal magnitud.

De este modo, a partir de lo anterior se logró determinar que el tiempo de activación de 2ms es el límite inferior para lograr los resultados deseados de tamaño de gota en términos de un

coeficiente de variación acorde a las necesidades del cliente y acorde a los valores aceptados para un diseño de tipo mecánico.

Ahora bien, como parte de los indicadores del presente proyecto se establece que se debe tener una precisión mayor o igual al 95% entre el tamaño de gota deseado y el tamaño de gota obtenido, razón por la cual es necesario determinar el tamaño de muestra adecuado para poder afirmar que la cantidad de muestras tomadas es adecuada para poder garantizar una precisión del 95% entre los datos deseados y los obtenidos.

Para ello, se realizó una prueba de *t-student* de una muestra en el programa *Minitab*, la cual es una aproximación de la distribución normal para muestras pequeñas como la que se tiene en este caso. Para esta prueba se utilizó, tal y como se muestra en la figura 5.5, una diferencia de 0.5 pues es la resolución del instrumento utilizado, y una potencia de 0.95 correspondiente a la precisión del 95% buscada como parte del proyecto. Por su parte, la desviación estándar corresponde a la obtenida para los datos medidos en el tiempo de activación de 2ms tal y como se muestra en la figura 5.5.

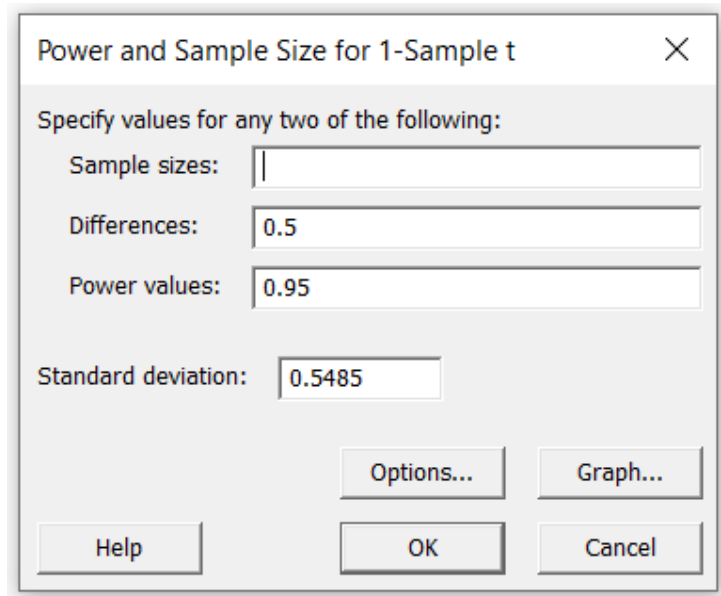


Figura 5.5. Parámetros tomados como parte de la prueba de *t-student* de una muestra. Fuente: Elaboración propia

De este modo, al llevar a cabo la prueba de t-student de una muestra con los datos suministrados en la figura 5.5 para obtener el tamaño de muestra adecuado se obtienen los datos mostrados en la tabla 5.5 en la cual se observa que con la diferencia de 0.5 especificada y la potencia objetivo de 0.95, se obtiene que el tamaño de muestra asociado a una potencia de 0.9536 es de 18 muestras. Por lo tanto, a partir de estos datos se logra concluir que las 22 muestras tomadas inicialmente de forma arbitraria cumplen con el tamaño de muestra necesario para obtener una precisión mayor o igual al 95%.

Tabla 5.5. Resultados de la prueba t de una muestra.

Diferencia	Tamaño de muestra	Potencia objetivo	Potencia real
0.5	18	0.95	0.953632

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, una vez que se valida que los datos de la tabla 5.3 cumplen con el tamaño de muestra adecuado para garantizar la precisión deseada, así como también con el coeficiente de variación y el promedio de diámetro esperado, se procede a verificar gráficamente que los datos de diámetro estén dentro del rango deseado mediante un diagrama de puntos tal y como se muestra en la figura 5.6.

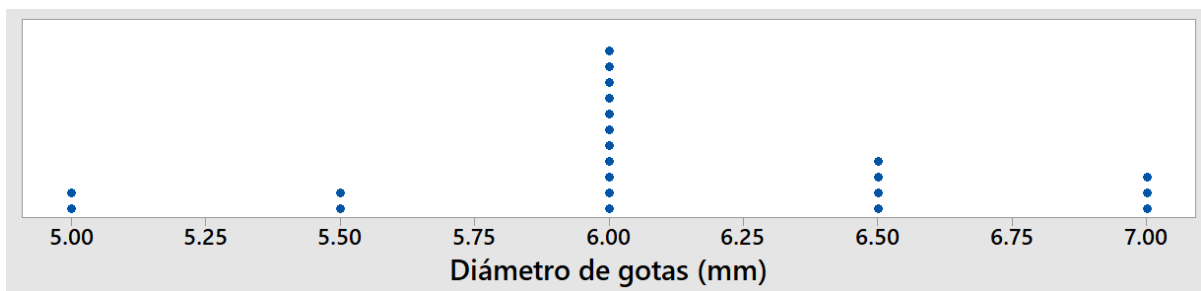


Figura 5.6. Diagrama de puntos para los datos de diámetros de gota medidos. Fuente: Elaboración propia

A partir del diagrama de puntos de la figura 5.6, para respaldar lo indicado por el coeficiente de variación de 9% obtenido y que en efecto es menor al deseado por parte del cliente, se logra observar gráficamente que las mediciones se encuentran dentro del rango de validez de (6 ± 1) mm especificado por el cliente, donde la mayor parte de las mediciones se concentran en los 6mm, lo cual concuerda con el fenómeno de fricción y tensión superficial explicado anteriormente. Sin embargo, igual se logra observar que en ocasiones se obtienen gotas de 5mm y hasta 7 mm, sin embargo, con una frecuencia mucho menor que para el caso de 6mm, pues el 50% de las gotas

medidas contaron con un diámetro de exactamente 6mm, por su parte el 18.2% presentó diámetros menores a los 6mm y el 31.82% presentó diámetros mayores a los 6mm, pero sin salirse en ninguna ocasión del rango de validez indicado por el cliente. En los límites del rango de validez se encuentra únicamente el 22.7% de los datos, por lo que el 77.3% de los datos se encuentra sobre el valor deseado o muy cercano a este, por lo que se puede afirmar que las mediciones del diámetro de gota para un tiempo de activación de la bomba de 2ms cumplen con una precisión mayor o igual al 95% los valores diametrales deseados como parte del proyecto.

5.2.2 Distancia entre gotas.

La distancia entre gotas es otro de los parámetros de interés a validar como parte del proyecto. Para ello, igualmente se utilizó la trayectoria en forma de arco mostrada en la figura 5.4 e igualmente se utilizó la misma regla metálica con una resolución de 0.5mm para las mediciones tal y como se muestra en la figura 5.7.



Figura 5.7. Método de medición de distancias entre gotas. Fuente: Elaboración propia

Para este caso, se midieron las 21 distancias entre las 22 gotas depositadas para cada uno de los tiempos de activación. En todos los casos, en el programa se definió una distancia de 60mm entre gotas y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.6. En esta tabla se logra observar que para los tiempos de activación de 4ms, 3.5ms y 2ms los promedios de distancia entre gotas están muy cercanos a los 60mm especificados en el programa con una desviación estándar de 0.3, un porcentaje de error máximo de 0.238% y un coeficiente de variación de alrededor de 0.5% el

cual es tan bajo que posiblemente esté asociado a los errores de medición por parte del operario debido a la resolución del instrumento utilizado.

Estos valores dan tan cercanos a la distancia nominal indicada en el programa porque esta distancia se definió, tal y como se mostró en la sección 4.3.3, como una función del tiempo y la velocidad del Robotino®, razón por la cual esto está directamente relacionado con el temporizador del computador interno del Robotino® así como el control de velocidad llevado a cabo por parte de este por medio de los motores y los codificadores presentes en cada uno de ellos.

Por otro lado, para el tiempo de activación de 1ms se logra observar que el promedio se aleja del valor deseado de 60 mm pues presenta un porcentaje de error de un 52.38% y se obtiene además un coeficiente de variación de 33.6% el cual es superior al 10% aceptable incluso para diseños mecánicos. Esto se debe al fenómeno de tensión superficial y fricción entre el fluido y la tubería mencionado anteriormente, pues el sistema sí bombea cada 60mm; sin embargo, el volumen de líquido no es suficiente para vencer la fricción por lo que se almacena en la punta de goteo y cae hasta el siguiente ciclo de activación de la bomba, por lo que se terminan deponiendo -algunas- cada 120mm tal y como se observa en la tabla 5.6, mientras que algunas otras sí se deponen cada 60mm, lo cual le da ese promedio de 91.43mm tan alejado del valor deseado con un porcentaje de error de un 52.38% y un coeficiente de variación de 33.6%, el cual es indeseado para el proyecto en cuestión.

Tabla 5.6. Datos de medición de distancias entre gotas.

	Tiempo activación de 4ms	Tiempo activación de 3.5ms	Tiempo activación de 2ms	Tiempo activación de 1ms
Gotas medidas	Distancia entre gotas (± 0.25) mm	Distancia entre gotas (± 0.25) mm	Distancia entre gotas (± 0.25) mm	Distancia entre gotas (± 0.25) mm
1 a 2	60.00	60.00	60.00	60.00
2 a 3	60.00	60.00	60.00	60.00
3 a 4	60.00	60.00	60.00	60.00
4 a 5	60.00	60.00	60.00	120.00
5 a 6	60.00	60.00	60.00	120.00
6 a 7	60.00	60.50	60.00	120.00
7 a 8	60.00	60.00	60.00	120.00
8 a 9	60.00	60.00	60.00	60.00
9 a 10	60.50	60.00	61.00	60.00
10 a 11	60.00	61.00	60.00	60.00
11 a 12	61.00	60.00	61.00	120.00
12 a 13	60.00	61.00	60.00	60.00
13 a 14	60.50	60.00	60.00	120.00
14 a 15	60.00	60.00	60.00	120.00
15 a 16	61.00	60.00	60.00	120.00
16 a 17	60.00	60.00	60.00	120.00
17 a 18	60.00	60.00	60.00	120.00
18 a 19	60.00	60.00	60.00	120.00
19 a 20	60.00	60.00	60.00	60.00
20 a 21	60.00	60.00	60.00	60.00
21 a 22	60.00	60.00	60.00	60.00
Promedio	60.14	60.12	60.09	91.43
Desviación Estándar	0.31	0.30	0.30	30.70
Coefficiente de variabilidad	0.52	0.51	0.50	33.58
Porcentaje de error	0.24	0.19	0.16	52.38

Fuente: Elaboración propia.

De este modo, a partir de los datos para el tiempo de activación de 2ms mostrados en la tabla 5.6 se logra validar que la distancia obtenida entre gotas presenta una precisión mayor o igual al 95% entre el valor indicado en el programa y el valor obtenido durante la deposición.

5.2.3 Magnetización de las gotas.

Para la medición de la magnetización presente en las gotas se utilizó el magnetómetro modelo CJMCU-008 conectado a un Arduino Uno tal y como se muestra en la figura 5.3. Para estas mediciones se depositaron 12 gotas para las cuales se recopilaron los datos de campo magnético en el eje Z desde un punto alejado a 60mm de la gota tal y como se muestra en la figura 5.8 hasta

el instante en que este se encontraba directamente encima de esta de modo que fuera posible observar el gradiente de magnetización conforme el magnetómetro se iba acercando a la gota depositada, así como también la variación total del campo magnético desde el punto inicial hasta el punto en el que se encontraba la gota. Esta metodología de medición se realizó para cada una de las gotas en 4 instantes distintos: cuando la gota se acababa de depositar, cuando la gota tenía 10 minutos de haber sido depositada, cuando la gota tenía 20 minutos de haber sido depositada y finalmente cuando esta había sido depositada hace 30 minutos, con el objetivo de poder observar cómo el efecto de agitación producto de la fermentación llevada a cabo por la levadura disminuía el efecto magnético sobre las gotas.

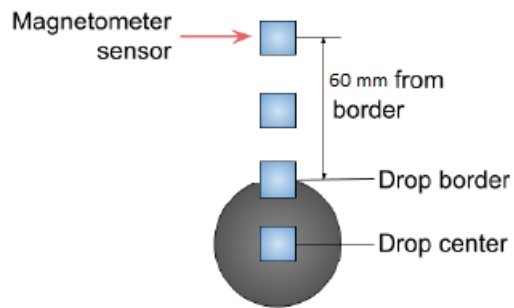


Figura 5.8. Posición del magnetómetro respecto a la gota. Fuente: Adaptado de [1]

Para efectos del proyecto, únicamente es de importancia el delta o variación que se presenta en la magnitud del campo magnético entre el instante en que no hay presencia de la gota y el instante en que se está sobre la gota, esto porque de acuerdo con la posición en la que se esté realizando la medición el valor base o de referencia del campo magnético es variable, por lo que no se puede asumir un valor base fijo sino que se debe enfocar únicamente en la variación de la magnitud del campo magnético.

A partir de los datos recopilados por parte del magnetómetro se procedió a graficarlos con el objetivo de poder visualizar más adecuadamente el comportamiento a medir. En la presente sección se muestran los resultados correspondientes a una de las doce gotas medidas; no obstante, en el apéndice D se muestran los resultados obtenidos para cada una de las doce gotas medidas.

En la figura 5.9 se muestra la gráfica correspondiente a los datos de magnetización de la gota 8 en el instante en que esta se acababa de deponer. El eje de tiempo corresponde al dato de tiempo que lleva encendido el sensor desde el momento en que se alimentó, razón por la cual dicho dato

no comienza en cero y dichas mediciones del sensor se realizaban aproximadamente cada 40ms. De este modo, en la figura 5.9 se logra extraer que el valor base o inicial promedio de magnitud del campo magnético es de $-359.85 \mu\text{T}$, mientras que el valor promedio presente en el instante en el que se estaba exactamente sobre la gota es de $-356.88 \mu\text{T}$, lo cual da una variación promedio de $2.97 \mu\text{T}$ en la magnitud del campo magnético. Por otro lado, en la gráfica de la figura 5.9 también se logra observar el gradiente en la magnitud del campo magnético conforme el sensor se va acercando al punto de deposición de la feromona hasta llegar al valor máximo alcanzado justo en el instante en que se estaba sobre la gota de feromona.

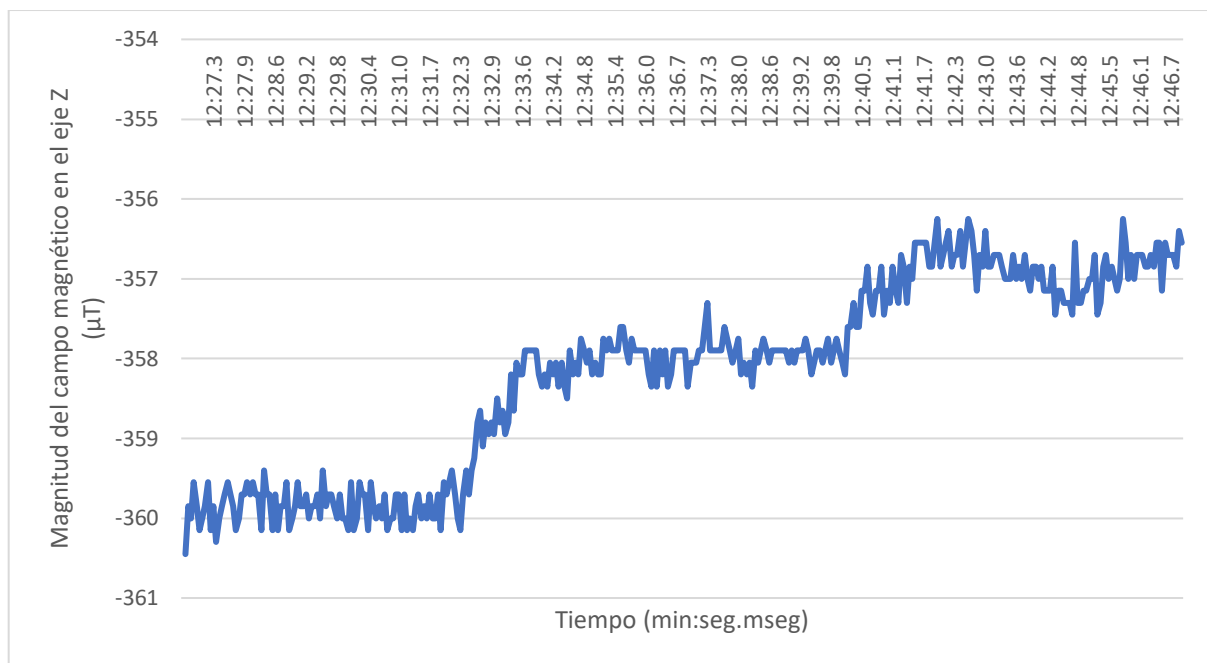


Figura 5.9. Mediciones del campo magnético de la gota 8 justo cuando esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la figura 5.10 se logra observar la medición de campo magnético de la misma gota, pero 10 minutos después de que esta se depuso. A partir de los valores mostrados en este gráfico se extrajo que el valor base o de referencia inicial cuando el sensor se encontraba lejos de la gota es en promedio de $-356.71 \mu\text{T}$, mientras que el valor máximo obtenido cuando el sensor se encontraba sobre la gota fue en promedio de $-354.78 \mu\text{T}$, lo cual da una variación de $1.94 \mu\text{T}$. Esto demuestra que desde el instante en que se depuso la gota hasta que pasaron 10 minutos, la variación del campo magnético al estar presencia de la gota disminuyó en un 34.68% lo cual es evidencia de que el fenómeno de evaporación causado por la interacción de la levadura y el azúcar sí disminuye

el campo magnético en la gota. De igual forma, en la figura 5.10 se logra observar el gradiente ascendente en la magnitud del campo magnético medido conforme se acerca el sensor a la gota hasta alcanzar el valor máximo cuando se encuentra justo encima de ella.

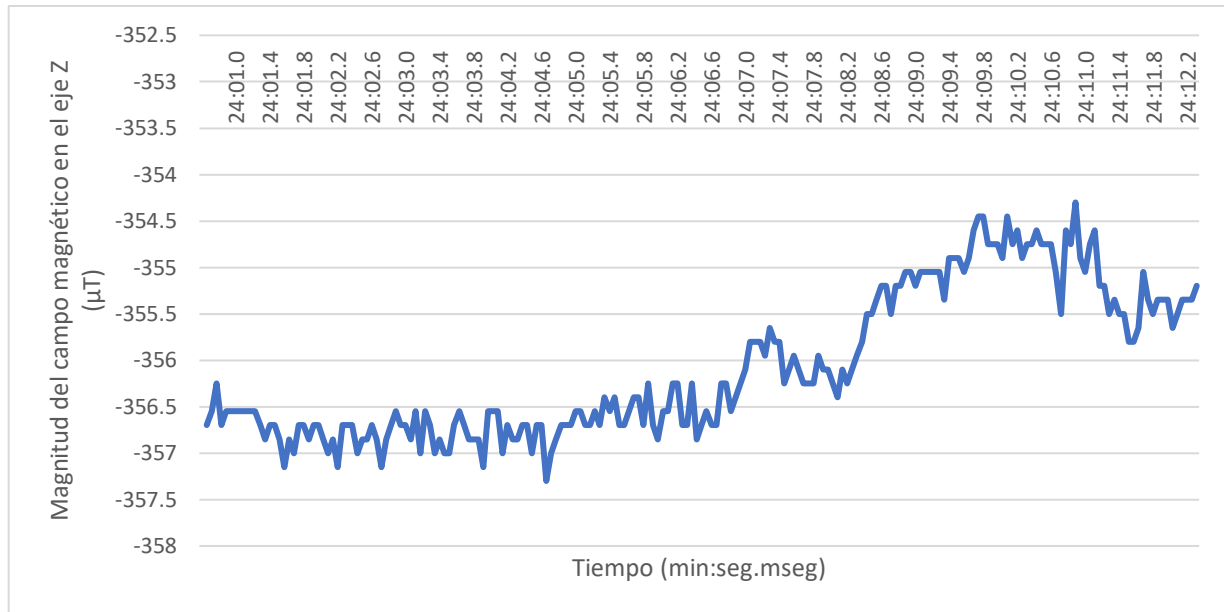


Figura 5.10. Mediciones del campo magnético de la gota 8 diez minutos después de que se depuso.

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, en la figura 5.11 se muestran la gráfica correspondiente a la variación del campo magnético 20 minutos después de que la gota se depuso, a partir de la cual se extrajo que el valor base o de referencia promedio del sensor al no estar en presencia de la gota ferromagnética es de $-365.2 \mu\text{T}$, mientras que el valor máximo promedio obtenido en el instante en el que el sensor se encontraba justo encima de la gota es de $-364.52 \mu\text{T}$, lo cual da un delta de $0.68 \mu\text{T}$. Lo anterior demuestra que a los 20 minutos de deponer la sustancia la variación en el campo magnético en el instante en que se detecta la presencia de la gota ferromagnética disminuye en un 77.1% con respecto a la variación inicial que se presenta justo en el instante en que la gota se acaba de deponer, lo cual evidencia la acción del fenómeno de evaporación producto del proceso de fermentación llevado a cabo por la levadura. Por otro lado, al igual que para los casos anteriores se observa un gradiente de magnitud conforme el sensor se va acercando a la gota; no obstante, este es menos evidente pues la variación entre los niveles de campo magnético inferior y superior es menor en este caso y se aproxima más a las variaciones propias del magnetómetro, razón por la cual son más notorios los picos de variación propios del ruido existente en el sensor magnético.

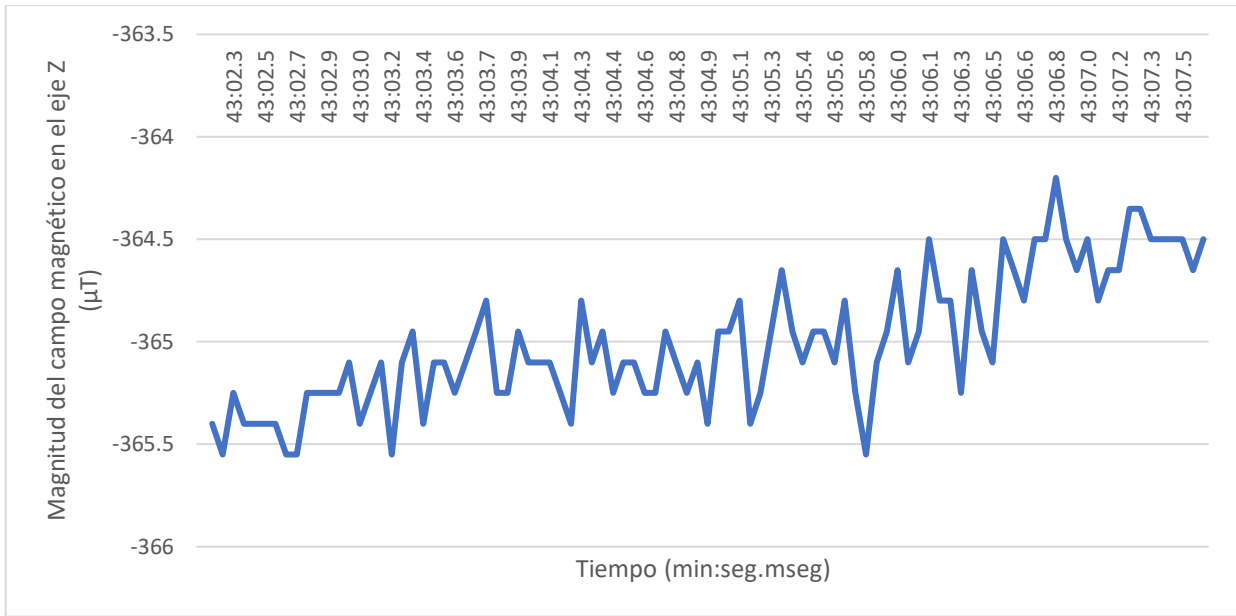


Figura 5.11. Mediciones del campo magnético de la gota 8 veinte minutos después de que se depuso.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la figura 5.12 se muestra la gráfica de los valores de campo magnético obtenidos 30 minutos después de haber depositado la feromona. A partir de esta gráfica se extrajo que el valor de campo magnético base o de referencia ante la ausencia de gota ferromagnética fue en promedio de $-367.57 \mu\text{T}$, mientras que el valor máximo promedio alcanzado justo cuando se colocó el magnetómetro encima de la gota fue de $-367.54 \mu\text{T}$, lo cual da como resultado una variación de $0.03 \mu\text{T}$ que puede ser hasta producto de las variaciones propias del magnetómetro por lo que se puede afirmar que 30 minutos después de la deposición la variación en la magnitud del campo magnético disminuye en un 98.99% con respecto a la variación que se tuvo justo en el instante en que se depuso la gota, por lo que se reafirma la efectividad de la feromona en la disminución del efecto magnético de la gota. Por otro lado, en este caso no se logra observar claramente un gradiente de concentración pues la variación es tan leve que esta se ve opacada por las variaciones propias del ruido presente en el magnetómetro; sin embargo, en las otras mediciones quedó claro dicho comportamiento gradual.

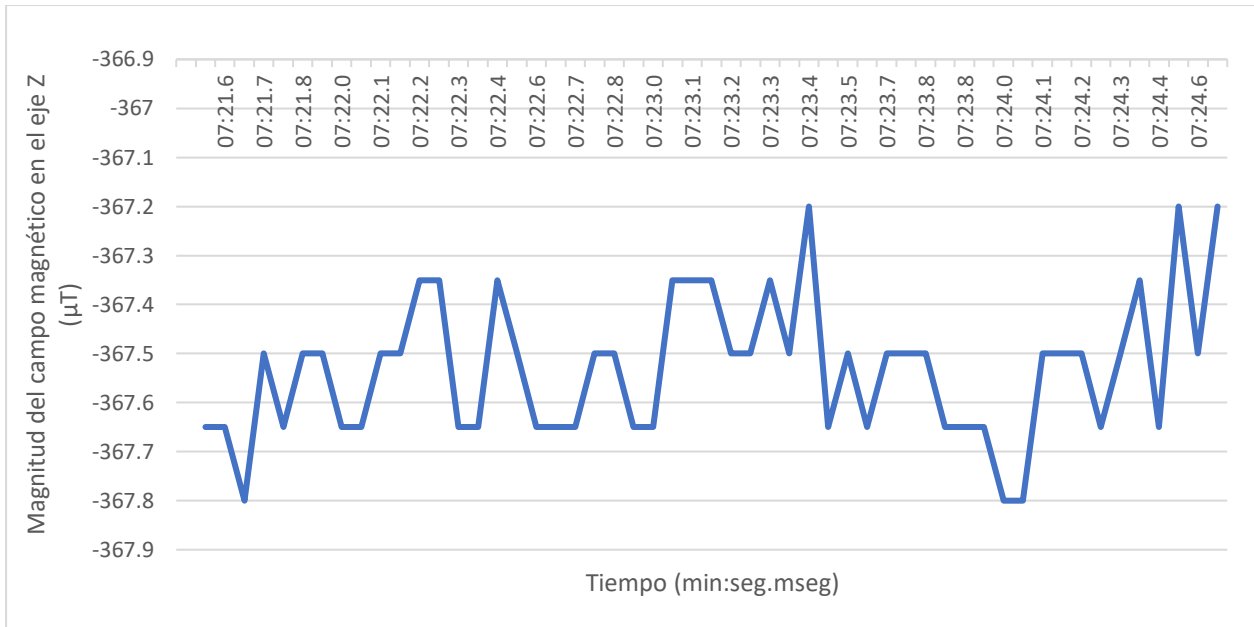


Figura 5.12. Mediciones del campo magnético de la gota 8 treinta minutos después de que se depuso.

Fuente: Elaboración propia

Estos gráficos de los datos recopilados a distintos instantes se realizaron para cada una de las doce gotas muestreadas, los cuales se muestran en el apéndice D del presente informe. Para poder analizar el comportamiento general de las gotas en cada uno de los instantes muestreados se determinaron los deltas o las variaciones en magnitud de campo magnético ante la presencia de una gota para cada uno de los cuatro momentos en que se realizaron mediciones y para todas las gotas y se promediaron para poder obtener un valor promedio de variación en función del tiempo. Los resultados obtenidos al llevar a cabo este proceso se muestran en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Promedio de las variaciones de campo magnético ante la presencia de gota según el tiempo transcurrido entre la deposición y la medición.

Número de gota	Valor de la variación de la magnitud del campo magnético ante la presencia de gota (en μT) según el tiempo transcurrido entre la deposición y la medición.			
	0 min	10 min	20 min	30 min
1	2.253	1.446	0.925	0.312
2	5.375	1.437	0.587	0.450
3	3.363	1.601	0.946	0.164
4	3.948	1.377	0.911	0.451
5	4.832	1.320	0.738	0.409
6	3.258	1.065	0.974	0.517
7	2.817	1.103	0.953	0.165
8	2.973	1.940	0.681	0.025
9	2.869	1.247	0.805	0.005
10	3.009	1.255	0.313	0.144
11	3.761	1.157	0.581	0.274
12	2.801	0.989	0.757	0.117
Promedio	3.438	1.328	0.764	0.253

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la tabla 5.7 es posible observar que la variación promedio de magnitud del campo magnético en el instante en que la gota se acaba de deponer es de $3.438 \mu\text{T}$ mientras que diez minutos después dicha variación promedio es de $1.328 \mu\text{T}$ lo cual implica una reducción en la magnetización del 61.74% en los primeros diez minutos. Por su parte, después de 20 minutos el valor promedio de variación de la magnitud del campo magnético es de $0.764 \mu\text{T}$, por lo cual en los segundos diez minutos la magnetización de la sustancia se reduce en un 42.47%, lo cual implicaría hasta este punto una reducción del 77.78% del delta con respecto al valor inicial. Y finalmente, a los 30 minutos de haberse realizado la deposición el valor promedio de la variación en la magnitud del campo magnético ante la presencia de una gota es de $0.253 \mu\text{T}$ lo cual implica que en los siguientes 10 minutos la reducción en la magnetización es de un 66.88%, lo cual implicaría una reducción total en el delta de magnitud de campo magnético ante la presencia de gota de un 92.64% con respecto al valor inicial obtenido.

Lo anterior se evidencia más claramente en la gráfica mostrada en la figura 5.13 en la cual se grafica el valor promedio del delta de magnitud de campo magnético medido por parte del

magnetómetro ante la presencia de una gota a los 0 min, 10 min, 20 min y 30 min después de la deposición. En dicha gráfica se logra observar claramente que la mayor variación en la magnitud del delta medido por el magnetómetro ante la presencia de una gota de feromona se da en los primeros diez minutos, en los cuales se da la mayor disminución de la magnetización. Seguidamente, la variación detectada por el magnetómetro sigue disminuyendo paulatinamente hasta que, a los 30 minutos de haber sido depositada, la sustancia prácticamente ya ha perdido casi todo su efecto magnético por lo que la variación detectada por el magnetómetro es casi nula.

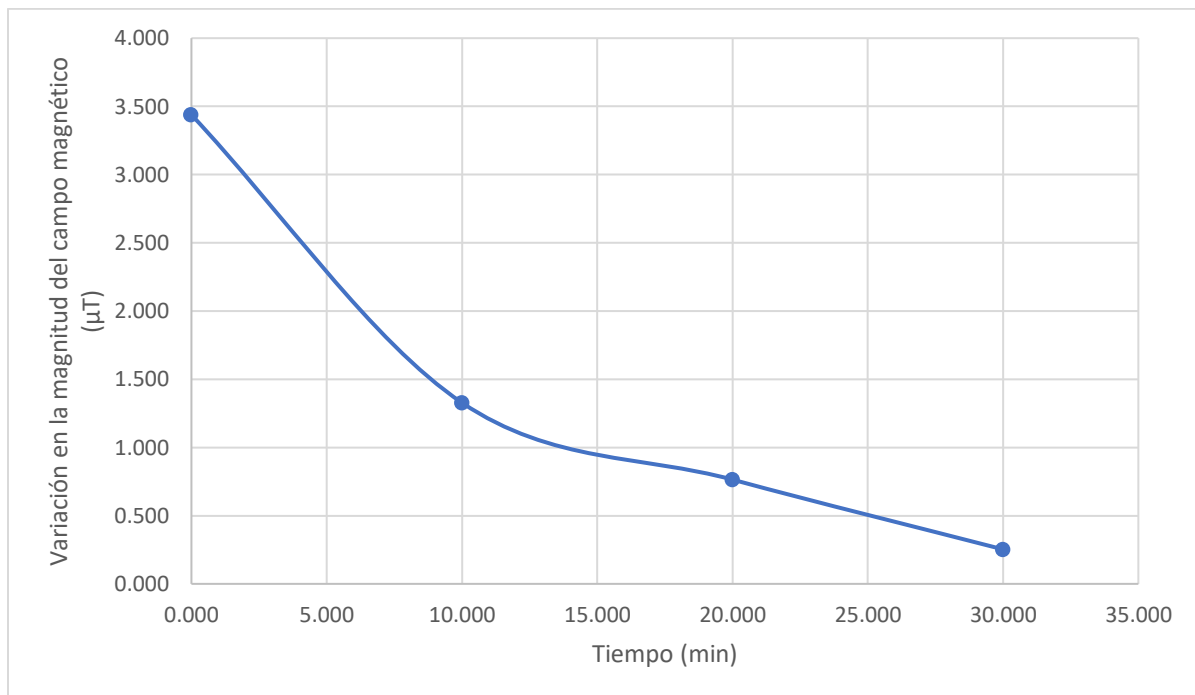


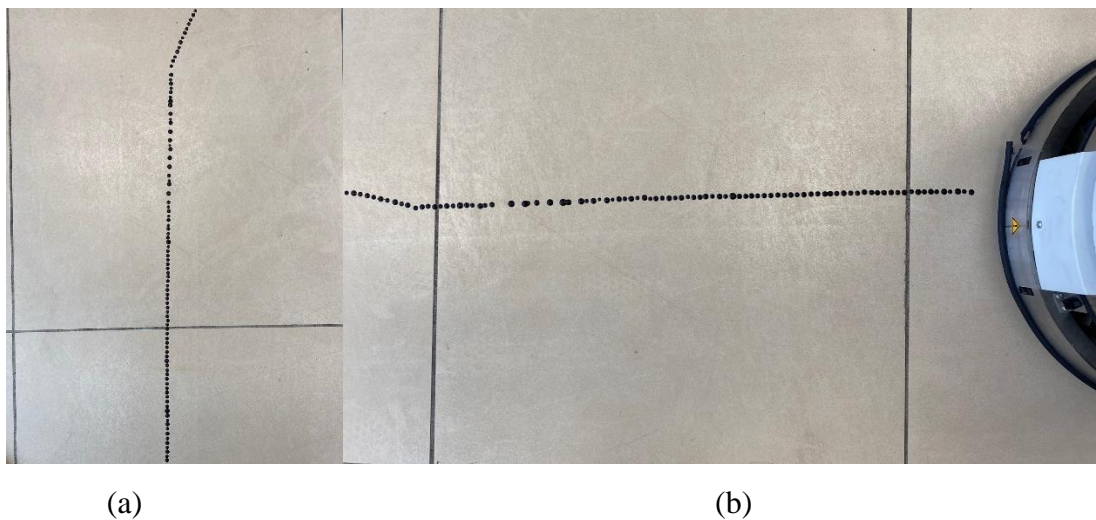
Figura 5.13. Gradiente de la variación de campo magnético ante la presencia de gotas de feromona en función del tiempo. Fuente: Elaboración propia

De este modo, a partir de lo mostrado anteriormente, se logra validar la propiedad de magnetización esperada en la sustancia, así como la difusión -observada por medio de un gradiente conforme se acerca el sensor a la gota- y a su vez la propiedad de evaporación la cual se observa mediante la reducción en función del tiempo de la variación de la magnitud del campo magnético al estar en presencia de una gota de feromona.

5.2.4 Validación de la trayectoria solicitada por el cliente.

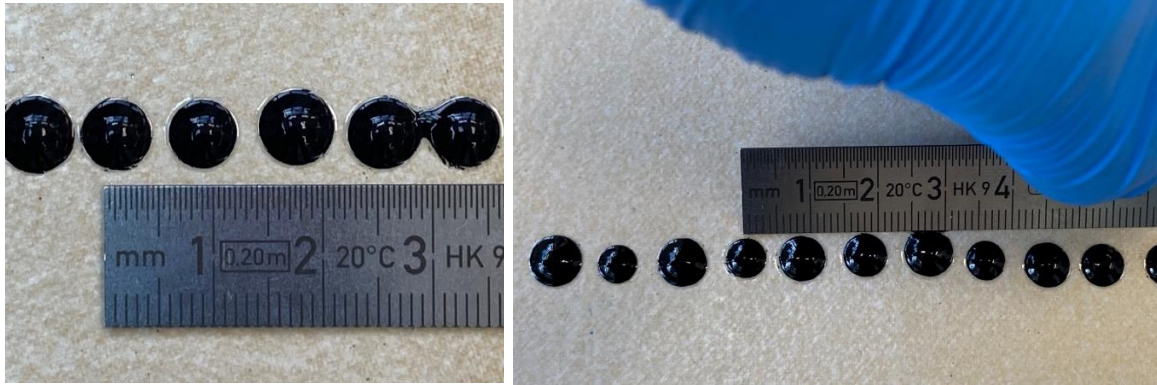
La trayectoria solicitada por el cliente posterior a la medición de resultados se detalló en la sección 4.3.3 del presente informe. No obstante, en la presente sección se muestra la validación de la implementación de dicha trayectoria en el Robotino® y la deposición adecuada de la sustancia durante la misma.

Tal y como se mencionó, la trayectoria solicitada consiste en una recta seguida por un arco y luego otra recta, o lo que es lo mismo: una intersección a noventa grados con la esquina redondeada tal y como se muestra en la figura 4.26 pero con la variación de que la recta diagonal se sustituye por un arco. En el programa se definió la longitud de las rectas como variables a indicar por parte del usuario. Para las pruebas a realizar se definieron de un tamaño de 800mm. Las rectas obtenidas se muestran en las figuras 5.14a y 5.14b



Figuras 5.14a y 5.14b. Rectas obtenidas como parte de la trayectoria solicitada por el cliente. Fuente: Elaboración propia

Se logra apreciar además que las gotas están muy próximas unas de otras, esto pues el cliente solicitó que estuvieran lo más próximas posibles, ante lo cual se digitó una distancia de 9mm entre los centros de gotas; es decir, aproximadamente 3mm entre los bordes de las circunferencias. La comprobación de esto se muestra en las figuras 5.15a y 5.15b.



(a)

(b)

Figuras 5.15a y 5.15b. Distancia de 9mm medida entre las gotas de la trayectoria deseada por el cliente. Fuente: Elaboración propia

De igual forma, en la figura 5.16 se muestra la esquina redondeada o el arco que vincula ambas rectas de la trayectoria.

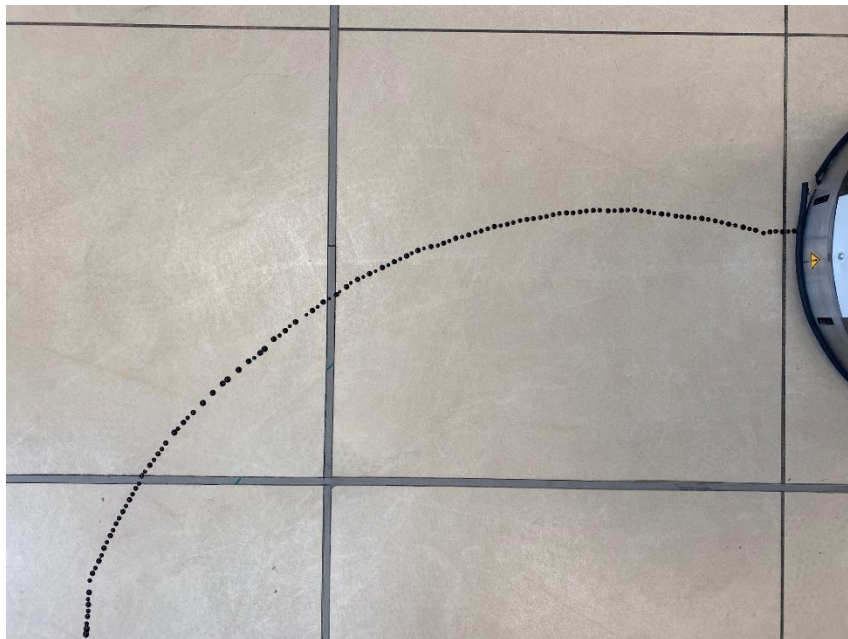


Figura 5.16. Arco o esquina redondeada de la trayectoria deseada por el cliente. Fuente: Elaboración propia

Y finalmente, en la figura 5.17 se muestra la trayectoria completa solicitada por parte del cliente con rectas de 800mm de longitud, un arco, y las gotas depositadas cada 9mm.

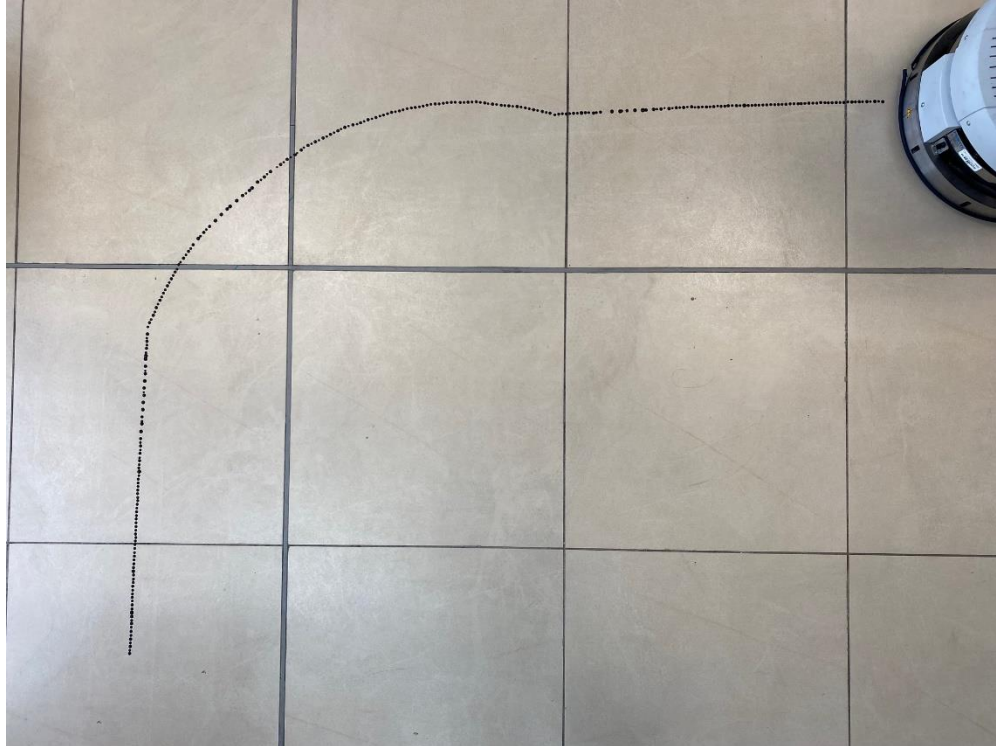


Figura 5.17. Trayectoria completa deseada por el cliente. Fuente: Elaboración propia

De este modo, se logra validar que la trayectoria deseada por parte del cliente es correctamente realizada por parte del Robtino y con una deposición de gotas adecuadas, por lo que se valida el adecuado funcionamiento conjunto del Robotino® y el sistema de deposición de feromona.

5.2.5 Validación de masa del sistema diseñado.

En la presente sección se validan los resultados de masa del sistema diseñado con respecto al valor objetivo mencionado por parte del cliente para este rubro y mostrado en la tabla 3.6, el cual corresponde a una masa menor a 450.62 g con los reservorios completamente vacíos.

La medición de masa del sistema diseñado se muestra en la figura 5.18, en la cual se logra observar que dicho valor es de 440.74 g con los reservorios completamente vacíos.



Figura 5.18. Masa del sistema diseñado. Fuente: Elaboración propia

A partir de la imagen anterior se logra observar que el sistema diseñado cuenta con una masa 9.88 g al valor mencionado por parte del cliente. De este modo, se logra validar que el diseño realizado como parte del presente proyecto, en el cual se cuenta con dos envases y un mecanismo de mezclado de las sustancias utilizadas, cuenta con una masa 9.88 g menor al valor de referencia, por lo que se satisfacen las necesidades y requerimientos manifestados por parte del cliente con respecto a la masa del sistema, en donde se buscaba únicamente un valor menor al mencionado anteriormente.

5.3 Análisis económico

Los costos asociados al proyecto se componen principalmente de los elementos que componen el sistema de deposición de la feromona, tales como bombas, tuberías, uniones, magnetos, tornillos, tuercas, envases, conectores y también todos los elementos electrónicos que componen el circuito de accionamiento del sistema como, por ejemplo, optoacopladores, resistencias, transistores y demás. Asimismo, se tomaron en consideración los costos de manufactura de este, razón por la cual se incluyen los servicios de corte láser y lámina de acrílico, así como también las herramientas utilizadas para el ensamblaje del sistema como desatornilladores y adhesivos. De igual forma, se tomó en consideración la necesidad de un recurso computacional para poder

Capítulo 5. Resultados y análisis

programar y operar el Robotino® de manera óptima, así como también el costo del Robotino® como tal. Y finalmente, se consideró un costo asociado a 4 pagos mensuales al estudiante con base en la mitad del salario mensual mínimo de tiempo completo a un bachiller universitario [55], pues las horas asignadas por reglamento al Proyecto Final de Graduación son 20 horas semanales, lo cual constituye una jornada de medio tiempo.

Debido a la naturaleza del proyecto, al formar parte de un grupo de investigación, el valor de este va más asociado a la generación de conocimiento y la exploración de nuevas alternativas de solución a la comunicación en robótica de enjambres que al retorno económico, de modo que este constituya un avance en la exploración científica y tecnológica dentro de esta rama de la robótica. Por lo tanto, el cálculo de viabilidad o impacto económico no se puede llevar a cabo con base en una línea de producción.

De igual forma, el presente proyecto al ser una nueva implementación no llega a sustituir ningún producto ya existente en el mercado, por lo que su viabilidad tampoco puede ser abordada desde el punto de vista de la tecnología que llega a sustituir.

Asimismo, el proyecto tampoco llega a sustituir una labor realizada por un operador o funcionario, pues antes no existía sistema tal que fuera capaz de depositar la feromona desde ningún tipo de robot móvil durante su recorrido, por lo que no se puede considerar un retorno o valor económico desde dicha perspectiva. No obstante, las pruebas realizadas y las conclusiones a las que se llegó a partir de las misma sí podrían significar un ahorro de tiempo para futuros investigadores que busquen implementar el sistema o hacerle mejoras al mismo, de modo que la implementación llevada a cabo significa un punto de partida para futuras investigaciones o implementaciones relacionadas. Sin embargo, este es un ahorro a posteriori por lo que no se puede tampoco cuantificar un retorno o valor económico desde este punto de vista tampoco.

Dicho lo anterior, se justifica la razón por la cual el análisis económico del presente proyecto se conforma únicamente el análisis de costos mostrado en la tabla 5.8, en la cual se muestra el costo y la cantidad de los principales componentes electrónicos, los costos de ensamblaje y materiales de la carcasa, así como de los componentes que conforman el sistema de deposición tales como envases, bombas, y tubos y finalmente el costo en términos de recurso computacional y equipo así como también de remuneración económica al estudiante. Los precios en dólares se

Capítulo 5. Resultados y análisis

definieron en colones de acuerdo con el tipo de cambio de ₡621.03 emitido por el Banco Central de Costa Rica el 15 de octubre del 2022.

Tabla 5.8. Tabla de costos del proyecto.

Descripción	Precio Unitario	Cantidad	Total (₡)
Placa perforada de fibra de vidrio 50 x 50 mm	\$1.20	1	745.24
DG350-2 Bloque Terminal 2 Polos 3.5mm	\$0.50	2	621.03
Resistencia de 1 kΩ	\$0.05	1	31.05
Resistencia de 3 kΩ	\$0.05	1	31.05
Diodo 1N4003	\$0.15	1	93.15
Diodo 1N4149	\$0.20	1	124.21
Capacitor 330 nF	\$0.50	1	310.5
Capacitor 100 nF	\$0.20	1	124.21
Regulador de tensión LM7812	\$1.00	1	621.03
Transistor 2N3904	\$0.30	1	186.31
Optoacople PC817	\$1.20	1	745.24
Push button	\$1.20	1	745.24
Disipador de calor	\$1.20	1	745.24
Bomba peristáltica Intllab RS385-635	\$9.80	1	6086.1
Kit de conectores tipo “Y” para tuberías flexibles	\$6.99	1	4341
Kit de uniones para tuberías flexibles	\$6.99	1	4341
Metro de tubería de nylon de 2mm de diámetro interno	\$5.99	1	3720
Envase en forma de tubo de ensayo de 30 mm de diámetro y 50 mm de alto con tapa de corcho	₡350	2	700
Tornillo M3x6	₡5.2	1	5.2
Tornillo M3x10	₡5.25	14	73.5
Tornillo M3x12	₡5.54	7	38.78
Tornillo M4x12	₡9.49	1	9.49
Tuerca hexagonal M3	₡26.27	7	183.89
Soporte angular en L de acero	₡3825	1	3825
Magnetos cilíndricos de Neodimio de 10mm de diámetro y 5mm de espesor	\$1.10	2	1366.3
Metro de cable de alarma de 4 hilos	\$0.95	1	590
Metro de soldadura de estaño	\$1.00	1	621.03
Servicio de corte láser en lámina de acrílico de 3mm de espesor	₡8000	1	8000
Desatornillador Phillips	₡2695	1	2695
Adhesivo SuperBonder	₡2880	1	2880
3 Pin Housing Connector 2.54mm	\$0.20	1	124.21
2.54mm Crimp Terminal Connector	\$0.11	3	204.94
3 Pin Wafer Connector 2.54mm	\$0.17	1	105.6
Remuneración al estudiante	₡293954	4	1175818
Total			1220852

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

En el presente capítulo se muestra y exponen las conclusiones a las que se llegó tras el desarrollo y la implementación del proyecto en cuestión, así como también las principales recomendaciones que surgen para futuros proyectos afines o mejoras al presente proyecto.

6.1 Conclusiones

Las principales conclusiones del proyecto se establecen a continuación:

- Se lograron determinar como variables de interés para el cliente: el tamaño de la gota, la distancia entre gotas y la magnetización de las mismas.
- Se implementó una metodología de diseño en ingeniería, la propuesta por Ulrich y Eppinger, para garantizar la calidad, validez y refinamiento de la solución propuesta.
- Se realizó una descomposición funcional de la problemática general y se identificaron los problemas críticos o de alta relevancia para el proyecto.
- Se diseñó e implementó un conjunto mecánico capaz de llevar a cabo la deposición, mezcla y magnetización de una sustancia compuesta por una componente ferromagnética y otra componente de levadura hidratada.
- Se diseñó e implementó un circuito capaz de ajustar la tensión a niveles aptos para la operación de los elementos que componen el diseño mecánico, así como también capaz de propiciar el accionamiento del sistema de bombeo de modo manual y automático.
- Se diseñó e implementó un ensamble electromecánico compuesto por los elementos de bombeo, almacenaje, mezclado y magnetización de la sustancia, así como también los elementos electrónicos que permiten el control del sistema por medio de accionamiento manual y/o automático.
- Se desarrolló en el entorno *Robotino® View* un programa que permite la deposición de la feromona en la trayectoria manifestada por parte del cliente con la posibilidad de que usuario ingrese las longitudes de las rectas, así como también la distancia entre gotas.
- Se diseñó un sistema que cumple con los requerimientos de masa manifestados por el cliente.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

- Se validó que todas las mediciones para tamaño de gota, magnetización y distancia entre gotas cumplen con la precisión objetivo de 95% o superior definida al inicio del proyecto con respecto a los valores esperados.
- Se determinó que el tiempo efectivo de magnetización de la gota es de aproximadamente 30 minutos después de su deposición.
- Se determinó que el tiempo de activación de la bomba para obtener una gota según los requerimientos deseados es de 2 ms.

6.2 Recomendaciones

Es posible considerar aspectos de mejora, o recomendaciones para implementaciones futuras:

- Utilizar una bomba peristáltica de menor profundidad, pero con el mismo diámetro de rotor con el objetivo de disminuir las dimensiones del ensamble sin afectar la capacidad de deposición de gotas pequeñas.
- Reducir el tamaño del sistema mediante un posible reacomodo de los componentes que componen el ensamble electromecánico.
- Implementar un sistema en el envase de la levadura para evitar los cambios en la viscosidad del fluido debido a la generación de burbujas.
- Utilizar un envase tipo Pyrex para el almacenamiento del agua ultrapura tipo I con el objetivo de mantener sus propiedades de pureza el mayor tiempo posible.
- Considerar implementar un sustituto para la levadura pues esta última presenta cambios en su composición y viscosidad después de un tiempo debido a la generación de burbujas.
- Implementar el circuito de control diseñado en una placa PCB.
- Diseñar un elemento de fijación del ensamble electromecánico al robot en caso de que se desee utilizarlo en superficies irregulares y de poca planicidad, para evitar que el sistema se desplace o voltee debido a las vibraciones y saltos producidos por la superficie.

Referencias

- [1] J.C. Brenes-Torres, F. Blanes, J. Simo, “. Magnetic Trails: A Novel Artificial Pheromone for Swarm Robotics in Outdoor Environments.” *Computation*, vol. 10, no. 6, Jun., pp. 98, 2022.
- [2] S.J. Rusell, P. Norving, *Inteligencia Artificial - Un Enfoque Moderno*, 2ª. Madrid, España: Pearson Prentice Hall, 2004. [En línea]. Disponible: <https://luismejias21.files.wordpress.com/2017/09/inteligencia-artificial-un-enfoque-moderno-stuart-j-russell.pdf>
- [3] M.J. Muñoz, “Robótica móvil: una aproximación preliminar”, *Matices Tecnológicos*, pp. 20-28, Jul. 2008. Consultado: 11-Sep-22. [En línea]. Disponible: <https://www.researchgate.net/publication/333324303>
- [4] E. García, M.A. Jiménez, P. González, et al, “The evolution of robotics research”, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol.14, no.1, pp. 90-103. Abr.2007. Consultado: 11-Sep-22. DOI: 10.1109/MRA.2007.339608. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/3344813_The_evolution_of_robotics_research
- [5] X.Q. Chen, Y.Q. Chen, y J.G. Chase, “Mobiles Robots - Past Present and Future” en *Mobile Robots - State of the Art in Land, Sea, Air, and Collaborative Missions*, X.Q. Chen y Y.Q. Chen, Eds. Londres. Inglaterra: IntechOpen Limited, 2009, cáp. 1, pp. 1-32. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/221786528_Mobiles_Robots_-_Past_Present_and_Future.
- [6] Festo Didactic SE, “Robotino”, Festo, <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/Robotino3/Overview/EN/index.html> (Consultado 11 set., 2022).
- [7] M. Yogeswaran, S. G. Ponnambalam. (2010). An Extensive Review of Research in Swarm Robotics. Presentado en *Nature & Biologically Inspired Computing*, 2009. NaBIC 2009. [En línea]. Disponible: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.465.1152&rep=rep1&type=pdf>
- [8] I. Navarro, F. Matía, “An Introduction to Swarm Robotics”, Hindawi Publishing Corporation, vol. 2013, no. 1, Ene. 2013. Consultado: 12-Sep-2022. DOI: 10.5402/2013/608164. [En línea]. Disponible: file:///C:/Users/HP/Downloads/An_Introduction_to_Swarm_Robotics.pdf

- [9] A. Hannawati, J. Iskandar y R. A. Russell. (2007), Pheromone Communication Simulation for Mobile Robots Using Java 3D. Presentado en Computer and Information Science, 2007. ICIS 2007. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/4263801_Pheromone_Communication_Simulation_for_Mobile_Robots_Using_Java_3D
- [10] L.Iocchi, D. Nardi y M. Salerno, “Reactivity and Deliberation: A Survey on Multi-Robot Systems”, Balancing Reactivity and Social Deliberation in Multi-Agent Systems, From RoboCup to Real-World Applications, , pp. 9-34, Jun. 2002. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/2881740_Reactivity_and_Deliberation_A_Survey_on_Multi-Robot_Systems
- [11] M. Salman, D.G. Ramos, K. Hasselmann, et al. “Phormica: Photochromic Pheromone Release and Detection System for Stigmergic Coordination in Robot Swarms.” Front. Robot. AI Vol.7, Dec. 2020. Consultado: 28-Sep-22. DOI: 10.3389/frobt.2020.591402. [En línea]. Disponible: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2020.591402/full>
- [12] R. Fujisawa, H. Imamura, F. Matsuno. Cooperative transportation by swarm robots using pheromone communication. In Distributed Autonomous Robotic Systems; Springer: Cham, Switzerland, 2013; pp. 559–570.
- [13] V. Nandagopal, A. Prakash y J.Rao, “Know the Pheromones: Basics and Its Application”, Journal of Biopesticides, vol.1, no.2, pp. 210-215, Ene.2008. Consultado: 11-Sep-22. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/255583852_Know_the_Pheromones_Basics_and_Its_Application
- [14] S. Camazine, J.L. Deneubourg, N.R. Franks, et al, *Self-organization in biological systems*. 1.ed, Princeton, Nueva Jersey, Estados Unidos de América: Princeton University Press, 2003.
- [15] I. Susnea, “A Brief History of Virtual Pheromones in Engineering applications”, American Journal of Engineering Research (AJER), vol. 5, no. 3, pp. 70-76, Mar. 2016. Consultado 11-Sep-22. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/299215595_A_Brief_History_of_Virtual_Pheromones_in_Engineering_applications

- [16] S. Na, Y. Qiu, A.E. Turgut, et al, “Bio-inspired artificial pheromone system for swarm robotics applications”, *Adaptive Behavior*, vol. 29, no. 4, pp. 395-415, Jun. 2020. Consultado 11-Sep-22. DOI: 10.1177/1059712320918936. [En línea]. Disponible: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1059712320918936>
- [17] B. Hölldobler, E.O. Wilson, *The Ants*, 1. Ed. Massachusetts, Estados Unidos de América: Harvard University Press, 1990.
- [18] P. Karlson, M. Lüscher, “‘Pheromones’: a New Term for a Class of Biologically Active Substances”, *Nature*, vol. 183, pp. 55-56, Ene. 1959. Consultado: 11-Sep-2022. [En línea]. Disponible: <https://www.nature.com/articles/183055a0>
- [19] R. Fujisawa, S. Dobata, K. Sugawara, et al. “Designing pheromone communication in swarm robotics: Group foraging behavior mediated by chemical substance.” *Swarm Intelligence*, vol. 8, no. 3, pp. 227–246, Sep. 2014. Consultado: 11-Sep-2022. DOI: 10.1007/s11721-014-0097-z. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/265053113_Designing_pheromone_communication_in_swarm_robotics_Group_foraging_behavior_mediated_by_chemical_substance
- [20] R.E. Rosensweig. “Magnetic Fluids”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol.19, no.1, pp. 437-463, Ene. 1987. Consultado 12-Sep-2022. DOI: 10.1146/annurev.fl.19.010187.002253 [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/230597018_Magnetic_Fluids
- [21] C. Scherer y A. M. Figueiredo, “Ferrofluids: Properties and Applications”, *Brazilian Journal of Physics*, vol. 35, no.3, pp. 718-727, Sep. 2005. Consultado 12-Sep-2022. DOI: 10.1590/S0103-97332005000400018. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/260863044_Ferrofluids_Properties_and_Applications
- [22] B. Berkovski y V. Bashtovoy, *Magnetic Fluids and Applications Handbook*, 1. Ed. Wallingford, Inglaterra: Begell House, 1996.
- [23] M. Magalhães, A. M. Figueiredo Neto, A. Bee, et al. “Wetting of glass surfaces by ionic magnetic fluids: Effect of the concentration and the pH of the solution and of the size of the magnetic grains on a surface stabilized birefringent layer”, *Phys.* Vol. 113. Nov. 2000. Consultado 12-Sep-2022. [En línea]. Disponible: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.1322655>

- [24] R.V. Mehta, “Ferromagnetic fluids”, Journal of Scientific and Industrial Research, vol. 44, no. 9, pp. 500-507, Sep. 1985. Consultado 12-Sep-2022. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/254860994_Ferromagnetic_fluids
- [25] J. Kopecká, D. Matoulková, M. Němec, “Yeast and its uses.”, vol. 58, no. 11-12, pp. 329-335, Nov.2012. Consultado 12-Sep-2022. DOI: 10.18832/kp2012029. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/307796771_Yeast_and_its_uses
- [26] J.T. Pronk, H.Y. de Steensma, J.P. Van Dijken, “Pyruvate metabolism in *Saccharomyces cerevisiae*”, Yeast, vol. 12, no. 16, pp. 1607-1633, Dec. 1996, Consultado 12-Sep-2022, DOI: 10.1002/(sici)1097-0061(199612)12:16<1607::aid-yea70>3.0.co;2-4. [En línea]. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9123965/>
- [27] K, Thivanka, “Water purification”, Chemuniqu, vol. 16, no.1, pp. 38-39, Ene. 2015. Consultado: 13-Sep-2022. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/297978451_Water_Purification
- [28] “Ultra Pure vs Feed Water, Comparing the 4 Types of Laboratory Water”, Technology Networks, <https://www.technologynetworks.com/immunology/lists/4-types-of-laboratory-water-made-simple-293547> (Consultado 14 sep., 2022).
- [29] Standard Specification for Reagent Water, ASTM D1193-91, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, Estados Unidos, 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.astm.org/d1193-91.html>
- [30] S. de las Heras, *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas*, 1 ed. Barcelona, España: Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC, 2011. [En línea] Disponible: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36653/9788476538937.pdf>
- [31] R. Solórzano, “Principios Ingenieriles Básicos - Bombas Hidráulicas”, Power & Motion, <https://www.powermotiontech.com/hp-en-espanol/article/21886594/principios-ingenieriles-bsicos-bombas-hidraulicas> (Consultado 28 sep. 2020).
- [32] “Pumps and pumping system”, Bureau of Energy Efficiency <https://www.beeindia.gov.in/sites/default/files/3Ch6.pdf> (Consultado 28 sep., 2020).

- [33] M. Prosoli, “Centrifugal Pump Overview”, Pumps Plus Inc, https://www.midea.org/docs/Prosoli%20-%20Centrifugal_Pumps_Overview.pdf (Consultado 28 sep., 2020).
- [34] J.M. Berg, “Peristaltic Pumps”, Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics, pp. 1-13, Ene. 2015. Consultado: 14-Sep-2022. DOI: 10.1007/978-1-4614-5491-5_1198. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/302544930_Peristaltic_Pumps
- [35] E. N. Aitavade, S. D. Patil, A. N. Kadam, et al. “An Overview of Peristaltic Pump Suitable For Handling of Various Slurries and Liquids”, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), pp. 19-24, s.f., Consultado: 14-Sep-2022. [En línea]. Disponible: [https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/sicete\(mech\)-volume1/4.pdf](https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/sicete(mech)-volume1/4.pdf)
- [36] Manual No. 412741, Diaphragm pumps 4 – headed, Welch, Ilmenau, Alemania <https://bit.ly/3e1S55f>
- [37] M. Denson, M. Galad, y J.J. Malamug, “Design and Fabrication of a Hydraulic Diaphragm Pump”, The CLSU International Journal of Science & Technology, vol. 1, no. 1, pp. 15–17, Jul. 2016. Consultado: 13-Sep-2022. [En línea] Disponible: https://www.academia.edu/55315646/Design_and_Fabrication_of_a_Hydraulic_Diaphragm_Pump
- [38] Viscosity, s.f., <https://resources.saylor.org/wwwresources/archived/site/wp-content/uploads/2011/04/Viscosity.pdf> (Consultado 28 sep., 2020).
- [39] M. Baxter, “Crane Engineering” The effects of viscosity on systems and pump selection, <https://blog.craneengineering.net/the-effects-of-viscosity-on-systems-and-pump-selection> (Consultado 28 sep., 2020).
- [40] J. Chaurette, “The different behavior of solids and fluids (the venturi)”, Pump Fundamentals, <https://www.pumpfundamentals.com/venturi%20effect.pdf> (Consultado 28 sep., 2020).
- [41] National Aeronautics and Space Administration, “Bernoulli’s Principle”, https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/bernoulli_principle_k-4.pdf (Consultado 28 sep., 2020).
- [42] K. Ulrich y J. Eppinger, Diseño y desarrollo de productos, 5ª ed. México: McGRAW-HILL, 2013.

- [43] N. Sharp. “Pumping Through Liquid Tubes”, FYFD, Jul. 2020, Consultado: 19-Sep-2022. [En línea]. Disponible: <https://fyfluiddynamics.com/2020/07/pumping-through-liquid-tubes/>
- [44] Fournier, “Flexible Plastic Tubing”, Fournier Rubber & Supply Company, <https://www.fournierrubber.com/plastic-tubing/> (Consultado 20-Sep-2022).
- [45] Eurobalt, “Imanes permanentes”, Eurobalt, <https://eurobalt.net/es/blog/2019/04/16/permanent-magnet/> (Consultado 20-Sep-2022).
- [46] Integrated Magnetics, “Magnet Frequently Asked Questions”, Integrated Magnetics, <https://www.intemag.com/magnetic-frequently-asked-questions#:~:text=What%20is%20a%20magnet%3F,be%20produced%20in%20this%20manner> (Consultado: 20-Sep-2022).
- [47] “Yanmis Bomba peristáltica, mini bomba peristáltica DC12V para laboratorio bioingeniería G528”, Amazon.com, <https://a.co/d/7hhaslW> (Consultado: 30-Sep-2022).
- [48] “INTLLAB Bomba dosificadora de líquido peristáltica de 12 V CC”, Amazon.com, <https://a.co/d/0U4oHdu> (Consultado: 30-Sep-2022).
- [49] Festo Didactic SE, “I/O interface”, Festo, <https://www.festo-didactic.com/int-en/services/robotino/hardware/interface/i-o-interface/?fbid=aW50LmVuLjU1Ny4xNy4zNC4xNDU5> (Consultado: 30 set., 2022).
- [50] S. Shahjahan, “Top Three 24V to 12V DC to DC Converter Circuits”, Circuits DIY, <https://www.circuits-diy.com/top-three-24v-to-12v-dc-to-dc-converter-circuits/> (Consultado: 30 set., 2022).
- [51] “PBS-105 Black Knob Push Button Momentary Panel Mount SPST-NO”, MicroJPM, <https://www.microjpm.com/products/pbs-105-push-button-momentary-panel-mount-black-knob-spst-no/> (Consultado: 30 set., 2022).
- [52] P. Sousa, L. Marques, A.T. de Almeida, “Toward chemical-trail following robots”, presentado en Proceedings of the 2008 Seventh International Conference on Machine Learning and Applications, San Diego, CA, USA, 11–13 December 2008, pp. 489–494.

[53] “50mm x 50mm uJPM Placa Cobre Perforada [Pistas] [2 Caras] [Fibra Vidrio]”, MicroJPM, <https://www.microjpm.com/products/a80mm-x-120mm-placa-cobre-perforada-una-cara/>

(Consultado: 1 oct., 2022).

[54] “ISO Metric Thread Dimensions”, Accu, <https://www.accu.co.uk/p/117-iso-metric-thread-dimensions> (Consultado: 1 oct., 2022).

[55] Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, Departamento de Salarios, “Salarios mínimos del sector privado para el segundo semestre del año 2022.” <https://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/lista-salarios.html> (Consultado: 17 oct., 2022).

Anexo A: Formulario de Jerarquización de Necesidades

Encuesta del sistema de deposición de feromonas.

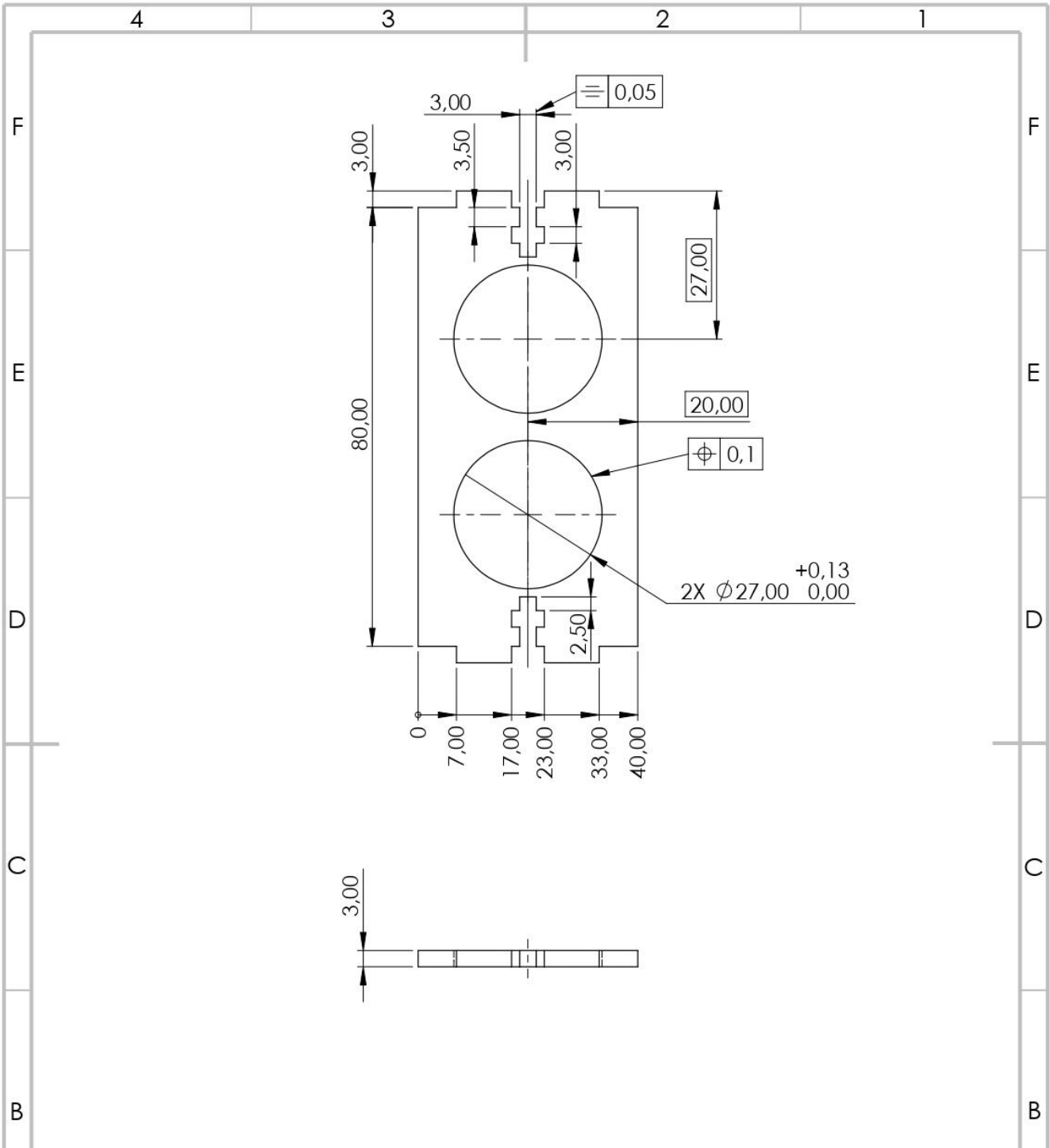
Para cada una de las siguientes funciones del sistema a implementar, por favor indique en el espacio izquierdo en una escala de 1 a 5 qué tan importante es esa función para usted. La abreviación “SD” se refiere a “Sistema Diseñado”. Por favor use la siguiente escala:

1. La función es indeseable. No consideraría un producto con esta función.
2. La función no es importante, pero no me importaría tenerla.
3. Sería bueno tener esa función, pero no es necesaria.
4. La función es altamente deseable, pero consideraría un producto sin ella.
5. La función es de importancia crítica. No consideraría un producto sin esta función.

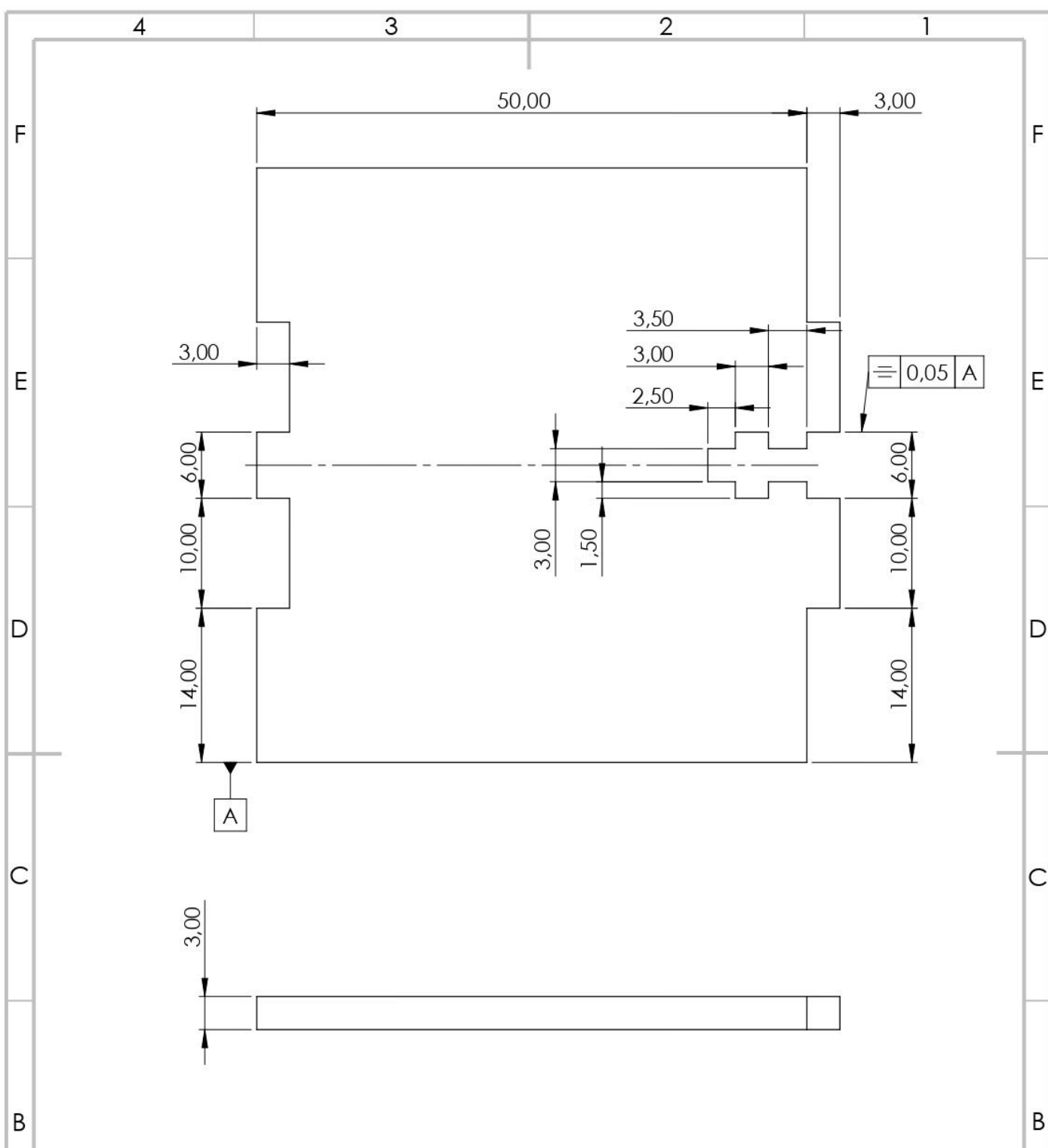
También indique, con una marca en la línea de la derecha, si piensa usted que la función es única, interesante y/o inesperada.

Importancia de la función Marque una caja si la función en escala de 1 a 5.	Marque con una X si la función en escala de 1 a 5. es única, interesante y/o inesperada.
___ El SD cuenta con operación tanto manual como automática para la deposición de gotas de distintos tamaños a diferentes distancias.	___
___ El SD deposita la sustancia ferromagnética durante el tiempo de operación requerido.	___
___ El SD cuenta con parametrización de los factores influyentes en el tamaño y distanciamiento entre gotas de feromona.	___
___ El SD es ligero y de tamaño reducido.	___
___ Sistema de bombeo es liviano y de tamaño reducido	___
___ El SD es fácilmente lavable.	___
___ Tamaño de depósitos permite tiempos distanciados de recarga de la sustancia.	___
___ Envases de sustancias son sellados.	___
___ Los envases son accesibles y fáciles de remplazar.	___
___ El SD deposita las gotas con una distancia entre ellas.	___
___ El SD cumple con la velocidad de deposición solicitada.	___
___ El SD cuenta con rangos definidos de velocidad de traslado del robot para una operación satisfactoria.	___
___ El SD cuenta con presión adecuada para mantener el efecto ferromagnético de la sustancia.	___
___ El SD podría detenerse para depositar la sustancia.	___
___ El SD cuenta con altura de deposición adecuada para mantener el efecto ferromagnético de la sustancia.	___
___ El SD utiliza magnetos de neodimio en cantidad tal que la magnetización resultante permite el flujo de la feromona	___
___ El SD evita que el campo magnético de los imanes atraiga las gotas ya depositadas.	___
___ El SD es alimentado por el robot donde es instalado.	___
___ El SD cuenta con un solo punto de deposición de feromona.	___
___ El SD evita que la reacción de evaporación de la feromona se dé mientras está almacenada.	___

Anexo B: Planos Mecánicos



TEC		TECNOLOGICO DE COSTA RICA		ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN: A
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: N9 Corte láser N6	PARTE:	PLACA INFERIOR SOSTÉN DE ENVASES
DIBUJÓ	MONGE. D		16/09/22			
DISEÑÓ	MONGE. D		16/09/22	MATERIAL:		
				ACRÍLICO		
SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
	LINEAL: X	±0,25	mm	CARCARSA DEL SISTEMA DE DEPOSICIÓN DE FEROMONAS	1:1	A4
	.X	±0,1		UNIDADES: mm	HOJA 1 DE 15	
	.XX	±0,05				
	.XXX	±0,010				
	ANGULAR: ±0,1°					
		PESO: gramos				



TEC

TECNOLÓGICO
DE COSTA RICA

ÁREA ACADÉMICA DE
INGENIERÍA MECATRÓNICA

REVISIÓN:
A

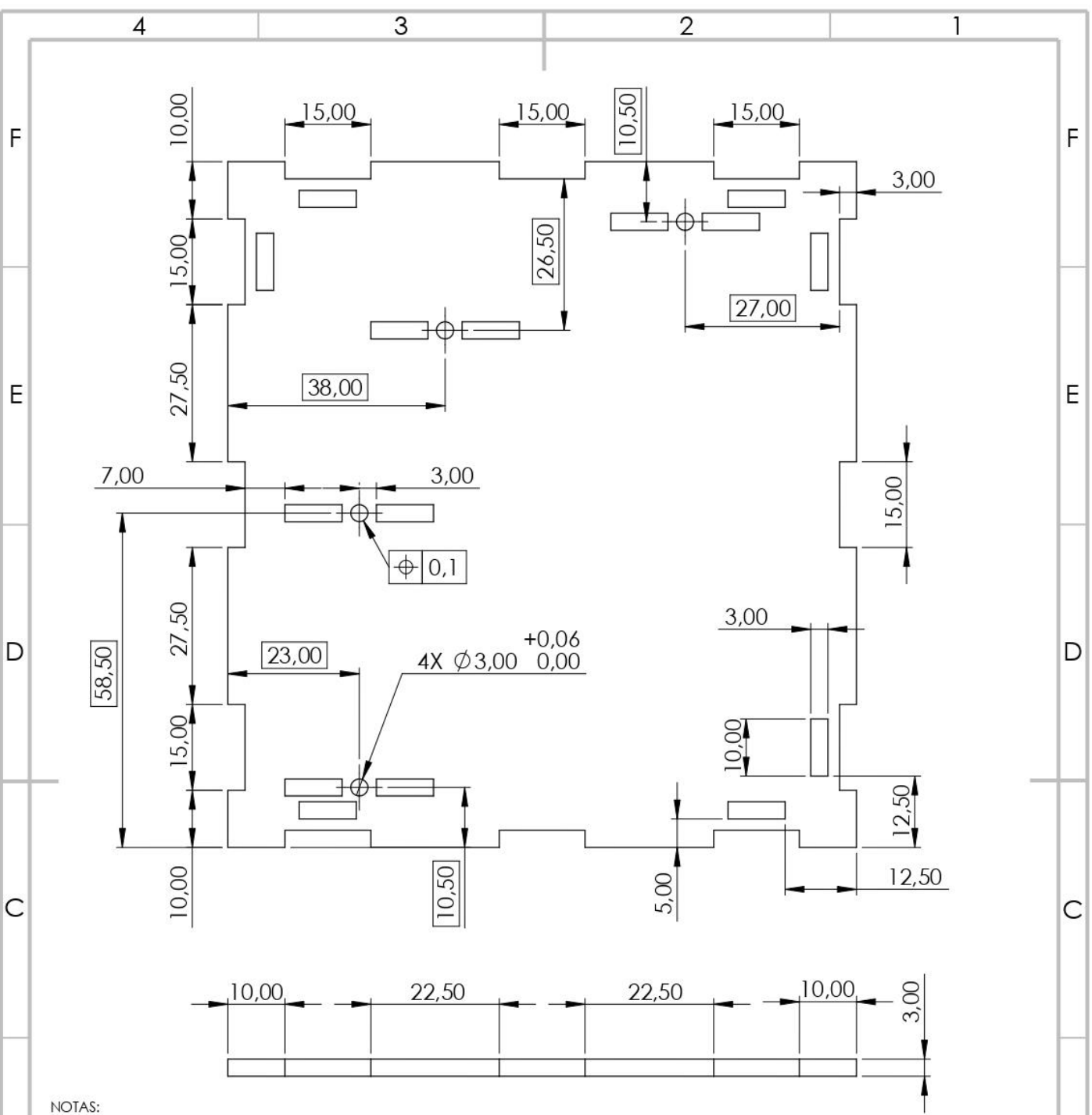
NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: N9 N6	PARTE: PLACA HORIZONTAL PARA SOSTÉN DE MOTOR
DIBUJÓ MONGE. D		16/09/22	Corte láser	
DISEÑÓ MONGE. D		16/09/22	MATERIAL: ACRÍLICO	
SISTEMA: 	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°	TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO: CARCASA DEL SISTEMA DE DEPOSICIÓN DE FEROMONAS	ESCALA: 2:1
	PESO: gramos	UNIDADES: mm	HOJA 2 DE 15	FORMATO A4

4

3

2

1



NOTAS:
 - Las extrusiones en los bordes de la pieza presentan simetría con respecto a los planos horizontal y vertical.
 - Las ranuras rectangulares son todas de las mismas dimensiones.

TEC | TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

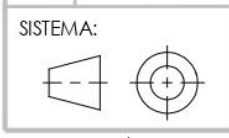
REVISIÓN: **A**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJÓ	MONGE. D		16/09/22
DISEÑO	MONGE. D		16/09/22

ACABADO GENERAL:
 N9 Corte láser
 N6

MATERIAL:
 ACRÍLICO

PARTE:
TAPA LATERAL 1



TOLERANCIAS:
 LINEAL: X ±0,25
 . X ±0,1
 . XX ±0,05
 . XXX ±0,010
 ANGULAR: ±0,1°

TOLERANCIA EN:
 mm

PESO: gramos

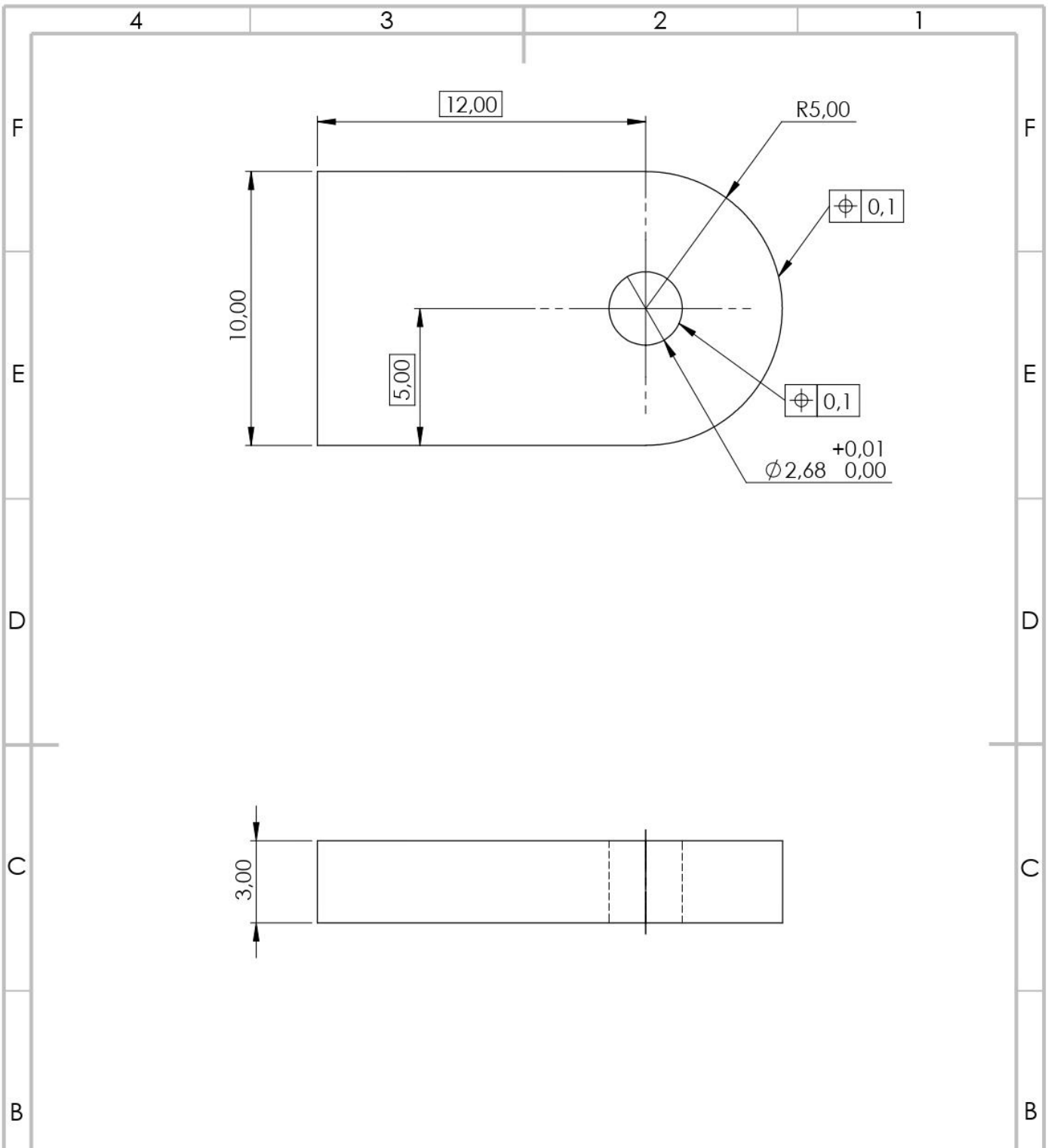
PROYECTO:
 CARCASA DEL SISTEMA DE DEPOSICIÓN DE FEROMONAS

UNIDADES: mm

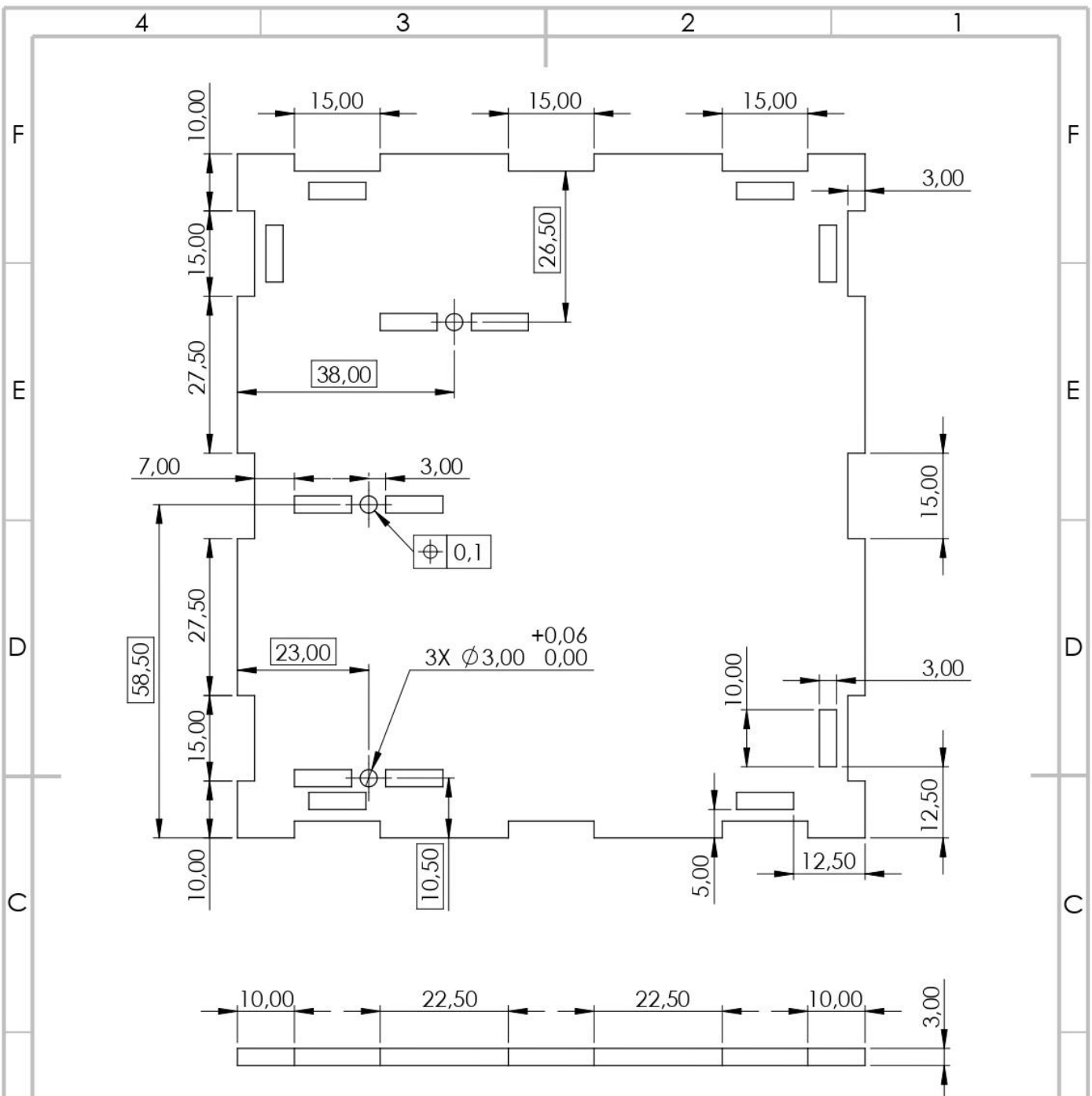
ESCALA:
1:1

HOJA 3 DE 15

FORMATO
 A4



TEC		TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN: A	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: N9 Corte láser N6	PARTE: PIEZA DE FIJACIÓN 1		
DIBUJÓ	MONGE, D		16/09/22				
DISEÑÓ	MONGE, D		16/09/22	MATERIAL: ACRÍLICO			
SISTEMA: 		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO: CARCASA DEL SISTEMA DE DEPOSICIÓN DE FEROMONAS	ESCALA: 5:1	FORMATO A4
		PESO: gramos		UNIDADES: mm	HOJA 4 DE 15		



NOTAS:

- Las extrusiones en los bordes de la pieza presentan simetría con respecto a los planos horizontal y vertical.
- Las ranuras rectangulares son todas de las mismas dimensiones.

TEC

TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

REVISIÓN: **A**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJÓ	MONGE. D		16/09/22
DISEÑÓ	MONGE. D		16/09/22

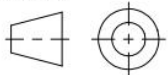
ACABADO GENERAL:
N9 Corte láser
N6

MATERIAL:
ACRÍLICO

PARTE:

TAPA LATERAL 2

SISTEMA:



TOLERANCIAS:
LINEAL: X ±0.25
.X ±0.1
.XX ±0.05
.XXX ±0.010
ANGULAR: ±0.1°

TOLERANCIA EN:

mm

PESO: gramos

PROYECTO:

CARCAZA DEL SISTEMA DE DEPOSICIÓN DE FEROMIONAS

UNIDADES: mm

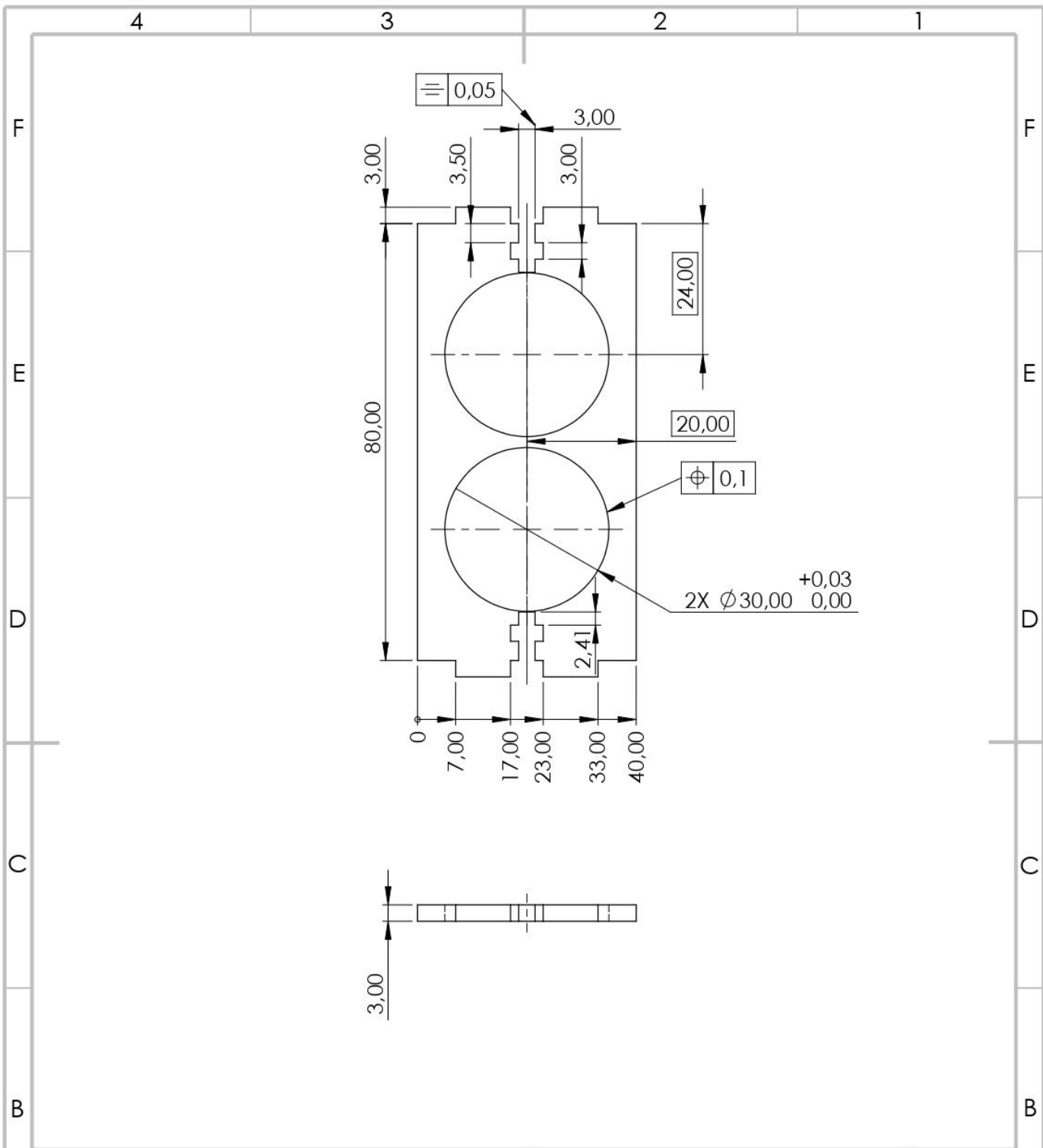
ESCALA:

1:1

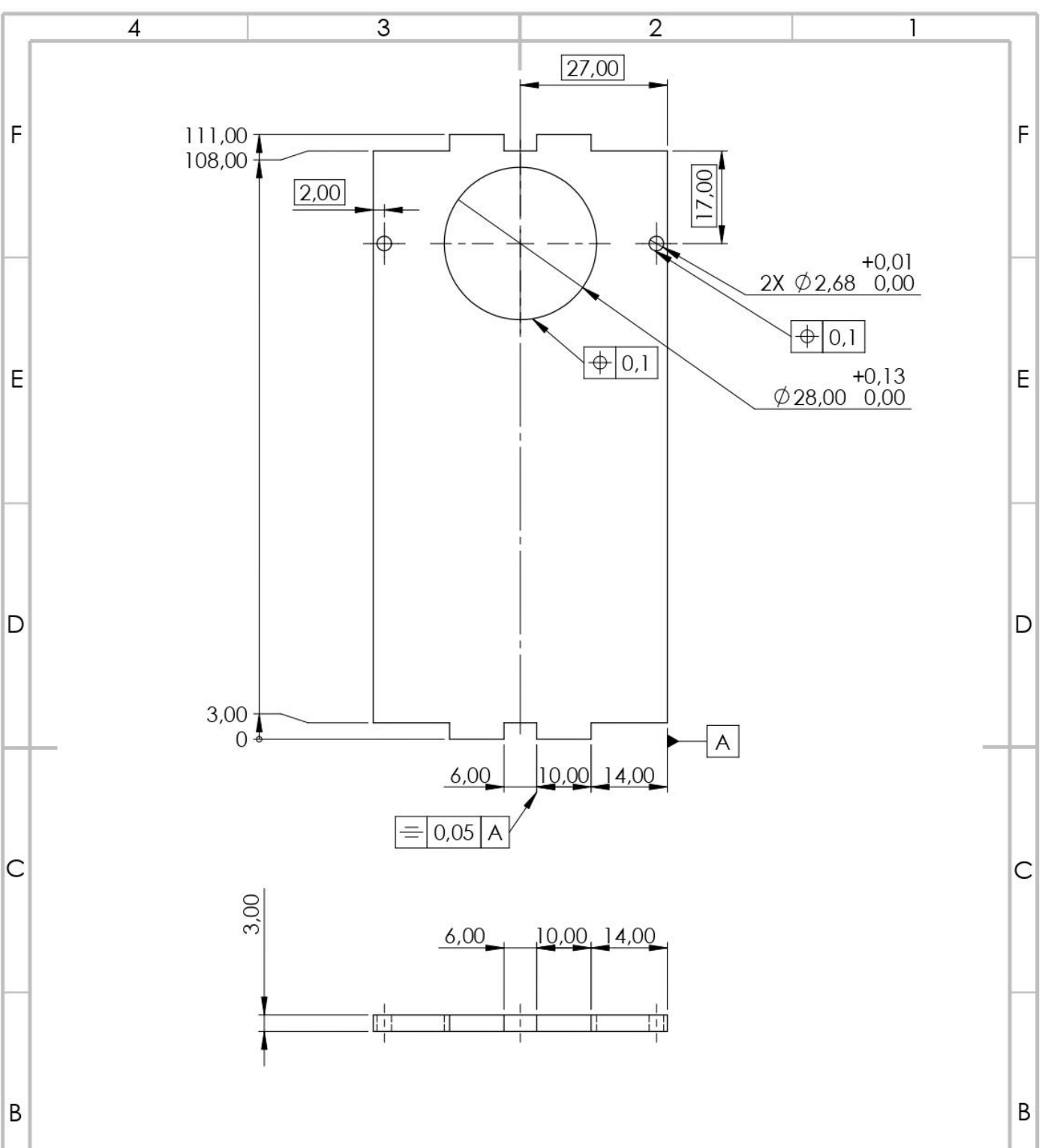
HOJA 5 DE 15

FORMATO

A4



TEC		TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN: A
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: N9 N6 Corte láser	PARTE: PLACA SUPERIOR SOSTÉN ENVASES	
DIBUJÓ	MONGE. D		16/09/22	MATERIAL: ACRÍLICO		
DISEÑÓ	MONGE. D		16/09/22			
SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 . X ±0.1 . XX ±0.05 . XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		TOLERANCIA EN: mm		PROYECTO: CARCASA DEL SISTEMA DE DEPOSICIÓN DE FEROMONAS	ESCALA: 1:1
		PESO: gramos		UNIDADES: mm	FORMATO A4	
4		3		2		1
A		A		A		A



TEC

TECNOLÓGICO
DE COSTA RICA

ÁREA ACADÉMICA DE
INGENIERÍA MECATRÓNICA

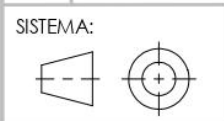
REVISIÓN:
A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJÓ	MONGE. D		16/09/22
DISEÑÓ	MONGE. D		16/09/22

ACABADO GENERAL:
N9 Corte láser
N6

MATERIAL:
ACRÍLICO

PARTE:
**PLACA VERTICAL PARA SOSTÉN
DE MOTOR**



TOLERANCIAS:
LINEAL: X ±0.25
.X ±0.1
.XX ±0.05
.XXX ±0.010
ANGULAR: ±0.1°

TOLERANCIA EN:
mm

PESO: gramos

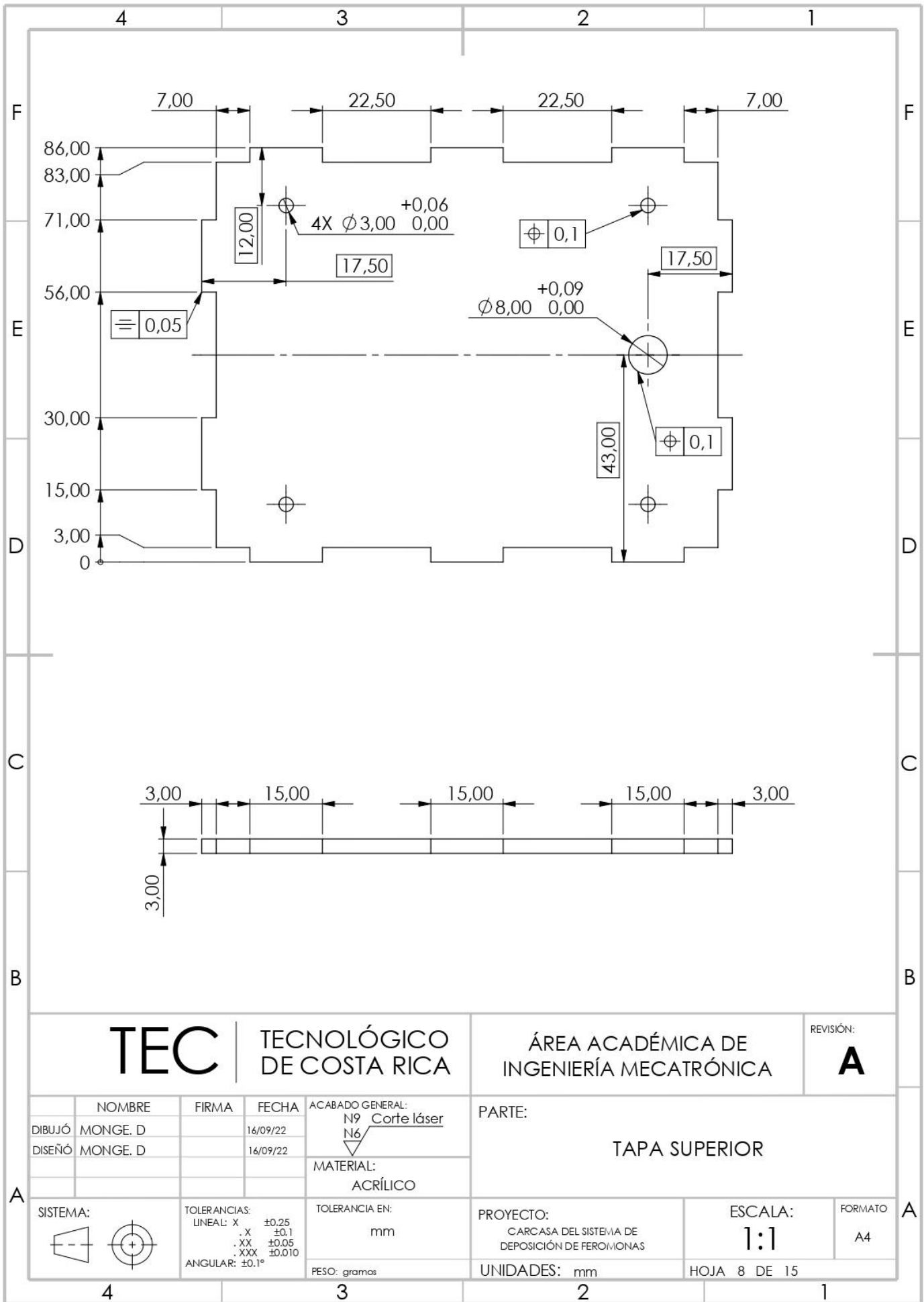
PROYECTO:
CARCASA DEL SISTEMA DE
DEPOSICIÓN DE FEROMONAS

UNIDADES: mm

ESCALA:
1:1

HOJA 7 DE 15

FORMATO
A4



TEC

TECNOLÓGICO
DE COSTA RICA

ÁREA ACADÉMICA DE
INGENIERÍA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJÓ	MONGE, D		16/09/22
DISEÑO	MONGE, D		16/09/22

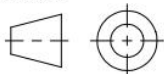
ACABADO GENERAL:
N9 Corte láser
N6

MATERIAL:
ACRÍLICO

PARTE:

TAPA SUPERIOR

SISTEMA:



TOLERANCIAS:
LINEAL: X ±0.25
. XX ±0.1
. XXX ±0.05
ANGULAR: ±0.1°

TOLERANCIA EN:
mm

PESO: gramos

PROYECTO:
CARCASA DEL SISTEMA DE
DEPOSICIÓN DE FEROMONAS

UNIDADES: mm

ESCALA:

1:1

FORMATO

A4

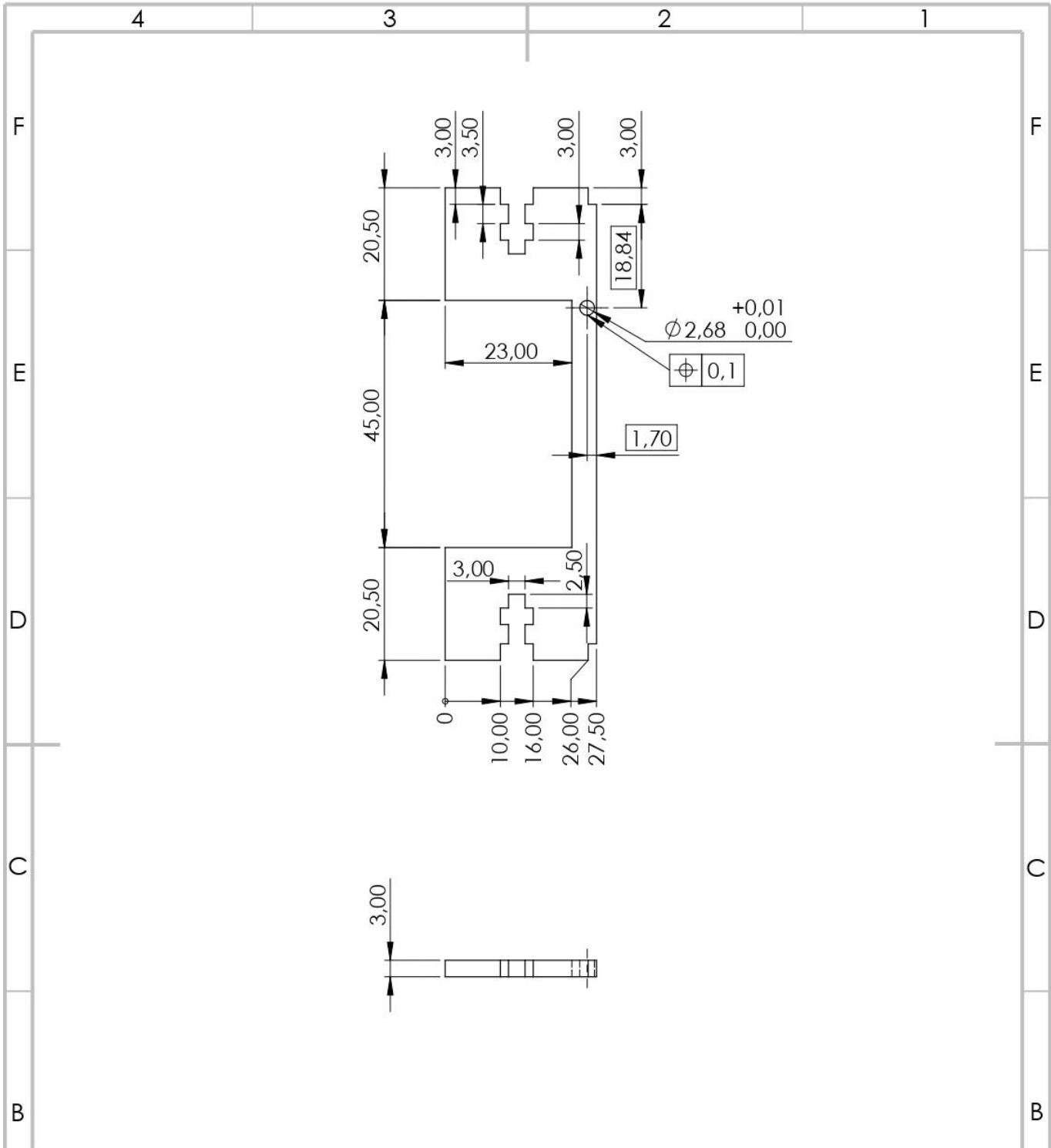
HOJA 8 DE 15

4

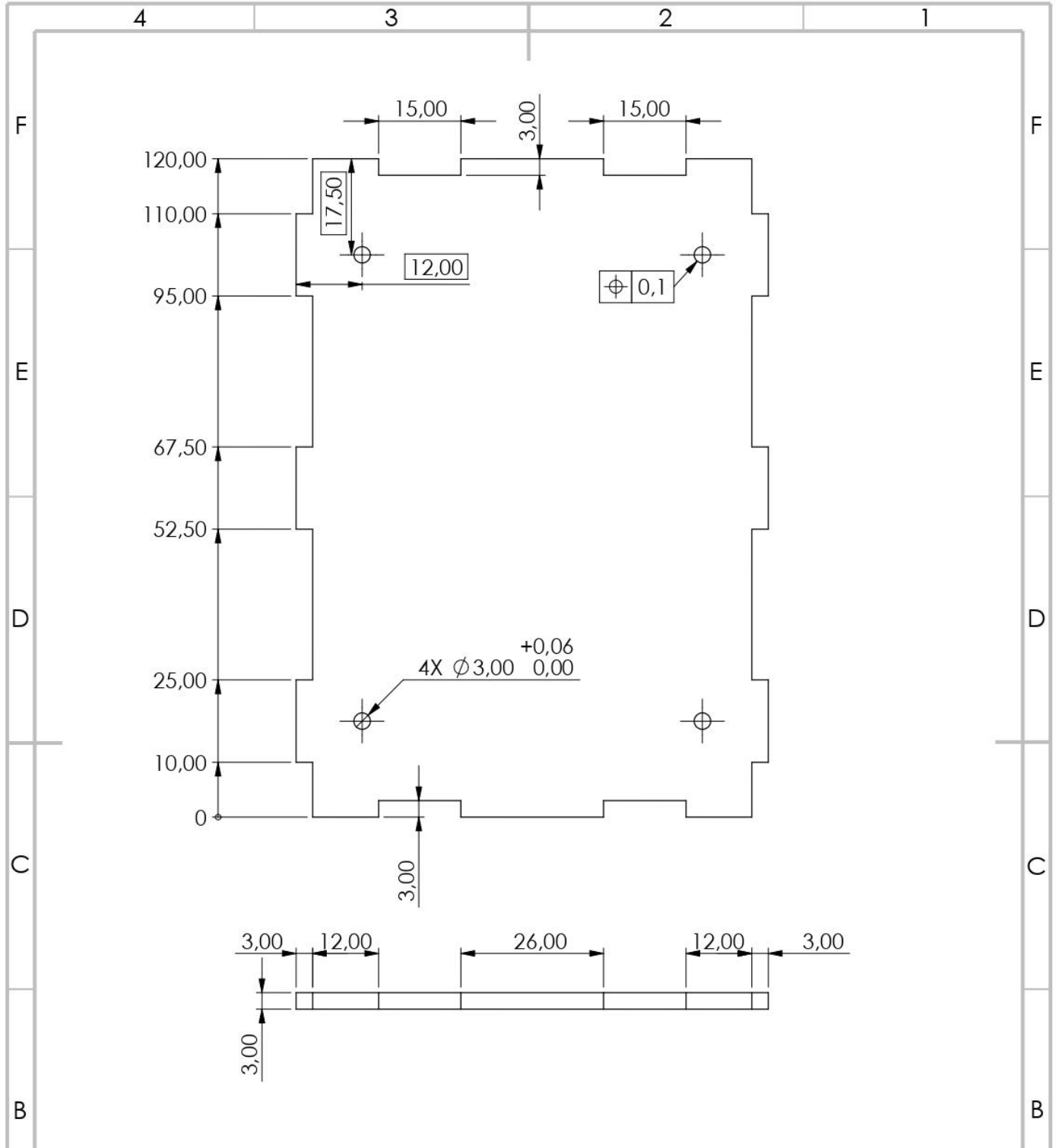
3

2

1

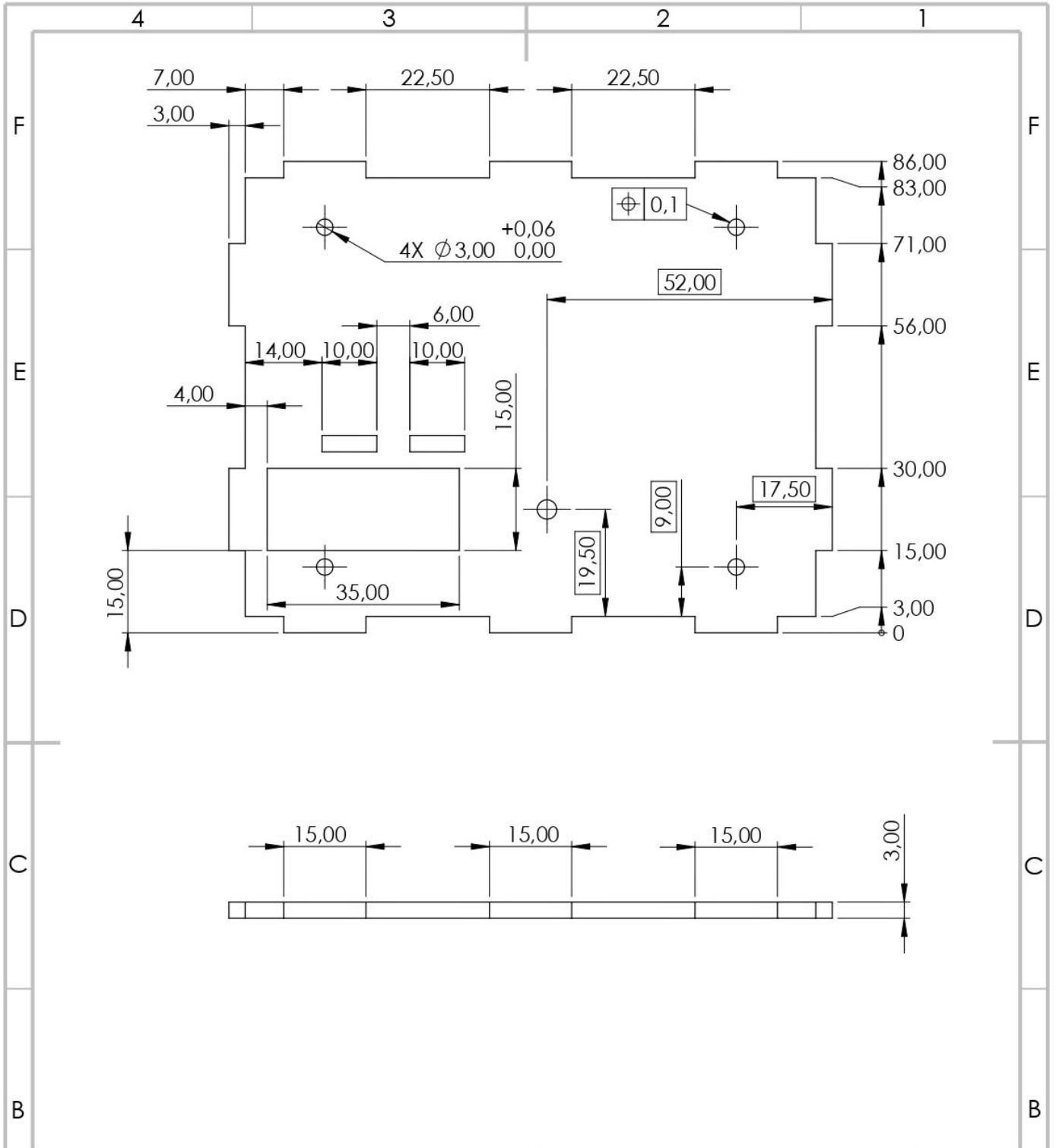


		TECNOLOGICO DE COSTA RICA		ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN: A	
		NOMBRE: MONGE. D FIRMA: FECHA: 16/09/22		ACABADO GENERAL: N9 Corte láser N6		PARTE: PLACA SOSTÉN ELECTRÓNICA	
DIBUJÓ: MONGE. D DISEÑO: MONGE. D		MATERIAL: ACRÍLICO		TOLERANCIA EN: mm		PROYECTO: CARCASA DEL SISTEMA DE DEPOSICIÓN DE FEROMONAS	
SISTEMA: 		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		PESO: gramos		ESCALA: 1:1	
				UNIDADES: mm		FORMATO: A4	
				HOJA 9 DE 15			

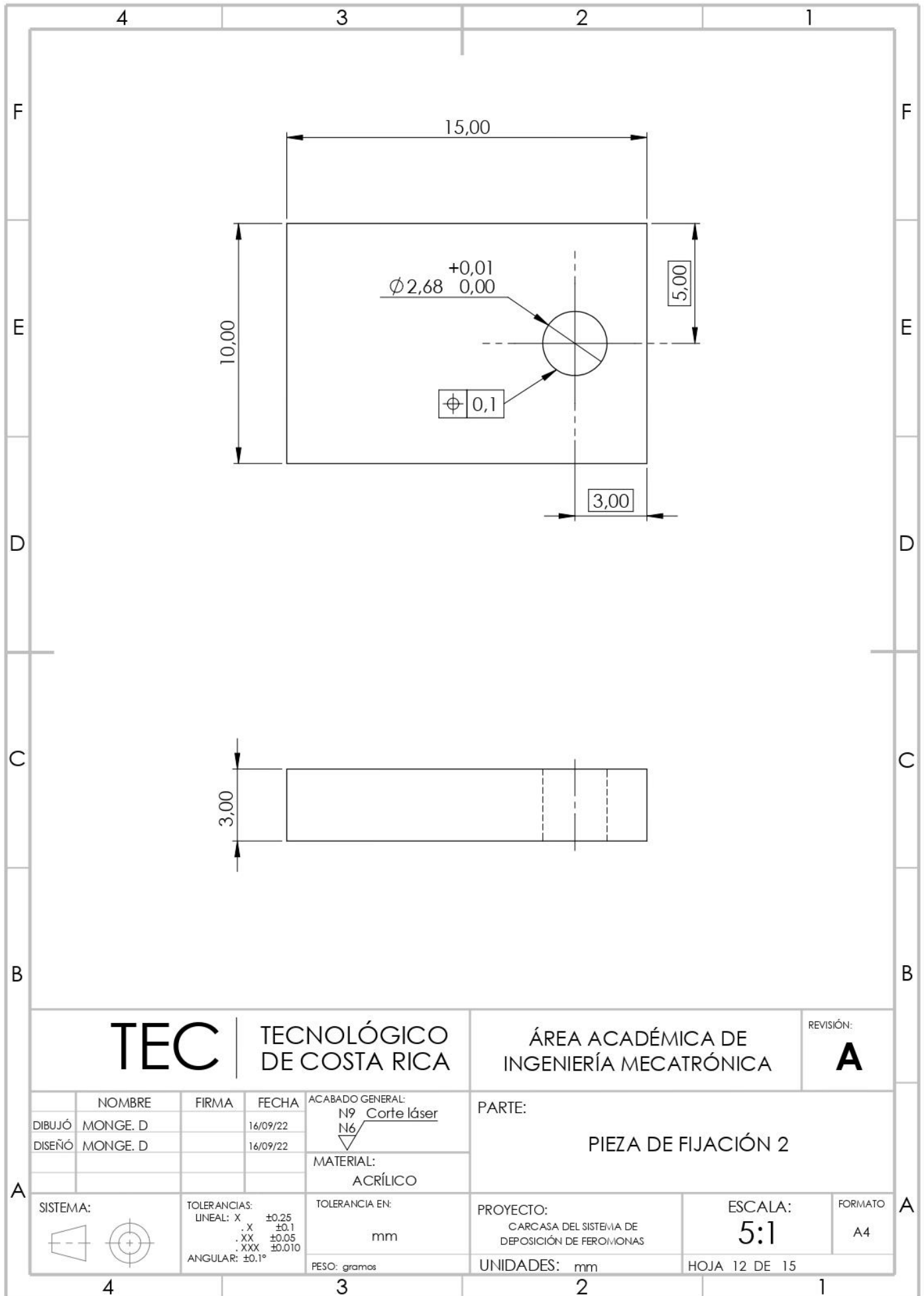


TEC		TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN: A
DIBUJÓ	MONGE. D	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: N9 Corte láser N6	PARTE: TAPA FRONTAL	
DISEÑO	ASENJO. J		16/09/22	MATERIAL: ACRÍLICO		
SISTEMA: 		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO: CARCASA DEL SISTEMA DE DEPOSICIÓN DE FEROMONAS	ESCALA: 1:1
		PESO: gramos		UNIDADES: mm	FORMATO A4	

4 3 2 1



		TECNOLOGICO DE COSTA RICA		ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN: A	
NOMBRE MONGE. D		FIRMA		FECHA 16/09/22		ACABADO GENERAL: N9 Corte láser N6	
DIBUJÓ MONGE. D		DISEÑO MONGE. D		MATERIAL: ACRÍLICO		PARTE: TAPA INFERIOR	
SISTEMA: 		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0,25 .X ±0,1 .XX ±0,05 .XXX ±0,010 ANGULAR: ±0,1°		TOLERANCIA EN: mm		PROYECTO: CARCASA DEL SISTEMA DE DEPOSICIÓN DE FEROMONAS	
PESO: gramos		UNIDADES: mm		ESCALA: 1:1		FORMATO A4	
HOJA 11 DE 15							



TEC

TECNOLÓGICO
DE COSTA RICA

ÁREA ACADÉMICA DE
INGENIERÍA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

A

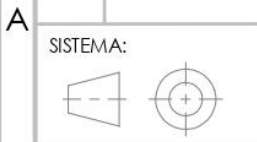
	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJÓ	MONGE, D		16/09/22
DISEÑÓ	MONGE, D		16/09/22

ACABADO GENERAL:
N9 Corte láser
N6

PARTE:

PIEZA DE FIJACIÓN 2

MATERIAL:
ACRÍLICO



TOLERANCIAS:
LINEAL: X ±0.25
. X ±0.1
. XX ±0.05
. XXX ±0.010
ANGULAR: ±0.1°

TOLERANCIA EN:
mm

PROYECTO:
CARCASA DEL SISTEMA DE
DEPOSICIÓN DE FERROMIONAS

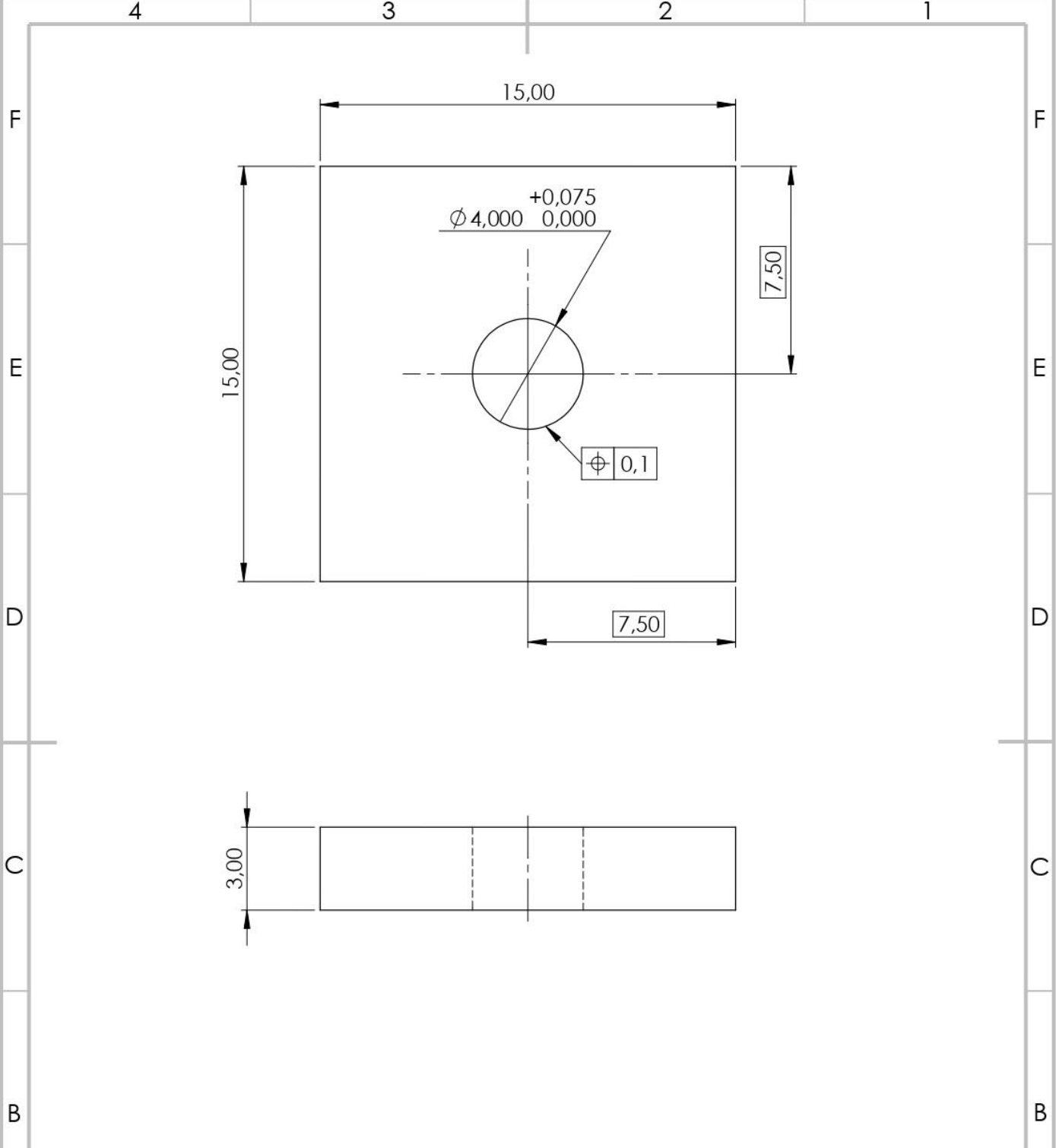
ESCALA:
5:1

FORMATO
A4

PESO: gramos

UNIDADES: mm

HOJA 12 DE 15



TEC

TECNOLÓGICO
DE COSTA RICA

ÁREA ACADÉMICA DE
INGENIERÍA MECATRÓNICA

REVISIÓN:
A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJÓ	MONGE, D		16/09/22
DISEÑÓ	MONGE, D		16/09/22

ACABADO GENERAL:
N9 Corte láser
N6

MATERIAL:
ACRÍLICO

PARTE:
**CALZA PARA SOSTÉN DE
MAGNETOS**

SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TOLERANCIA EN:
	LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°	mm

PESO: gramos

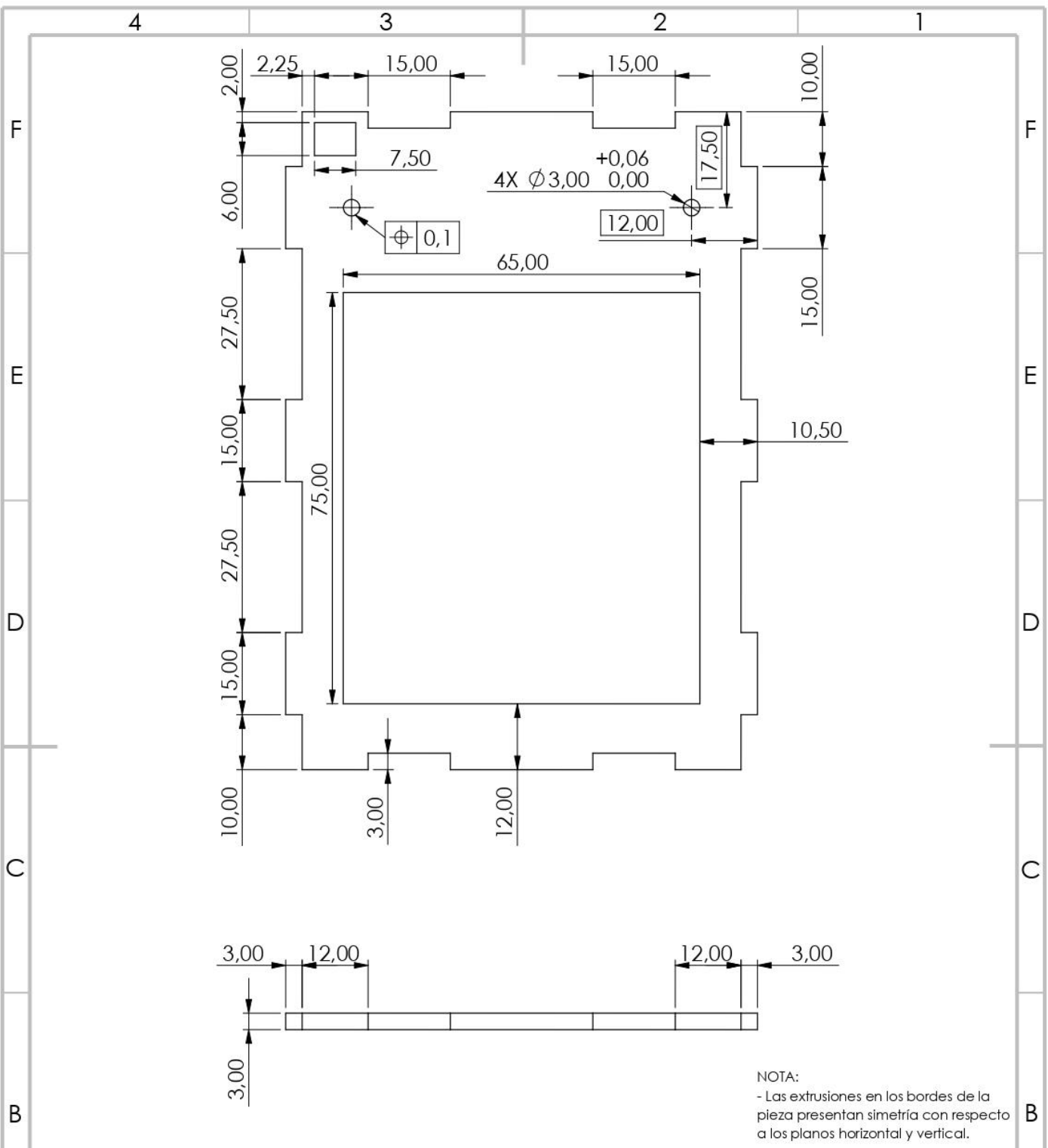
PROYECTO:
CARCASA DEL SISTEMA DE
DEPOSICIÓN DE FEROMIONAS

UNIDADES: mm

ESCALA:
5:1

FORMATO
A4

HOJA 13 DE 15



TEC

TECNOLÓGICO
DE COSTA RICA

ÁREA ACADÉMICA DE
INGENIERÍA MECATRÓNICA

REVISIÓN:
A

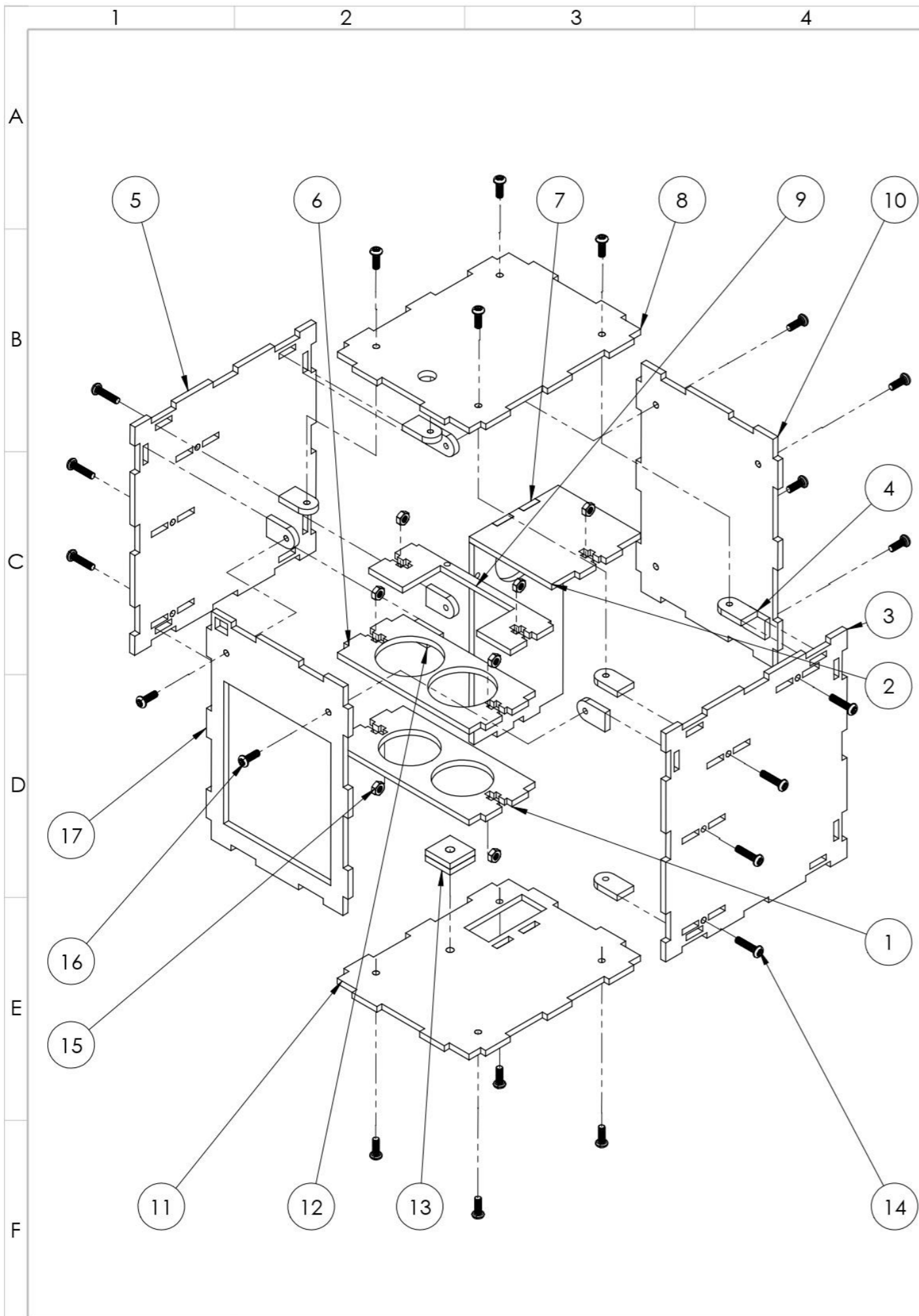
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: N9 N6 Corte láser	PARTE: TAPA TRASERA		
DIBUJÓ	MONGE. D		16/09/22	MATERIAL: ACRÍLICO	PROYECTO: CARCASA DEL SISTEMA DE DEPOSICIÓN DE FEROMIONAS		
DISEÑO	MONGE. D		16/09/22				
SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 . X ±0.1 . XX ±0.05 . XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		TOLERANCIA EN: mm		ESCALA: 1:1	FORMATO A4	
	PESO: gramos		UNIDADES: mm		HOJA 14 DE 15		

4

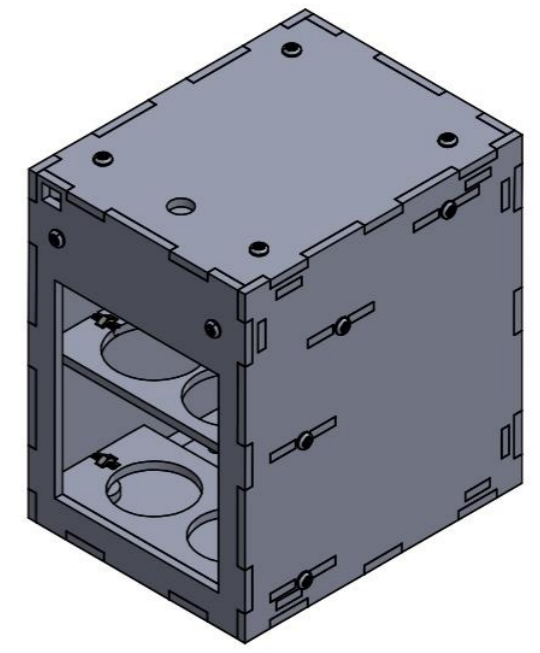
3

2

1



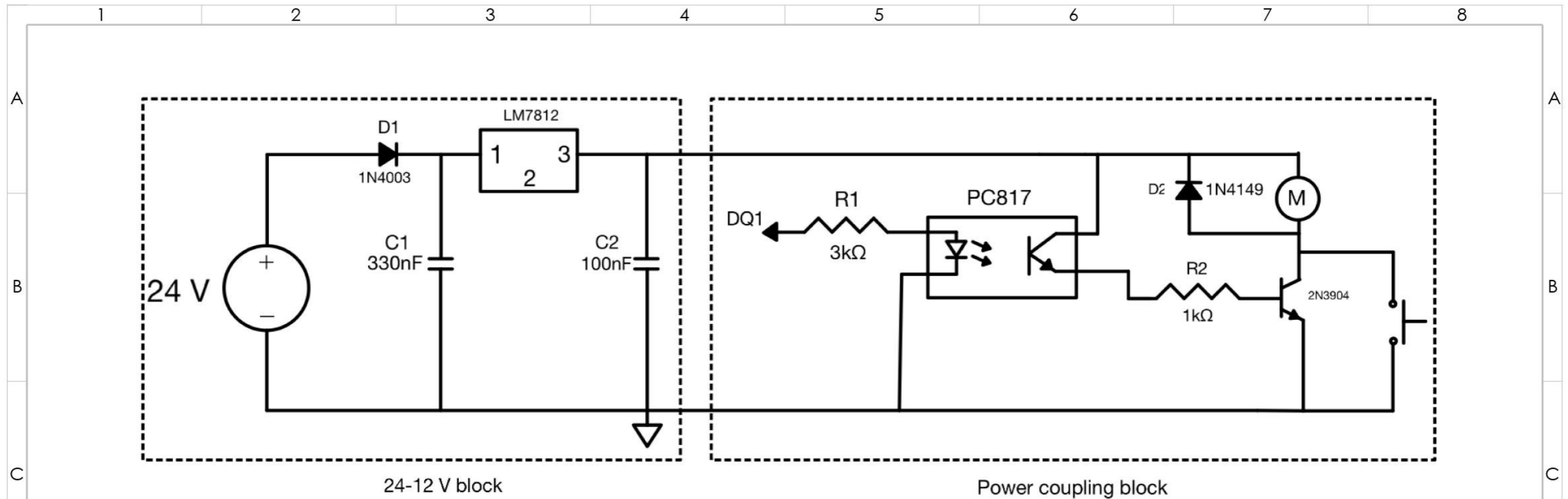
N.º DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	CANTIDAD
1	PLACA INFERIOR SOSTÉN ENVASES	1
2	PLACA HORIZONTAL PARA SOSTÉN DE MOTOR	1
3	TAPA LATERAL 1	1
4	PIEZA DE FIJACIÓN 1	13
5	TAPA LATERAL 2	1
6	PLACA SUPERIOR SOSTÉN ENVASES	1
7	PLACA VERTICAL PARA SOSTÉN DE MOTOR	1
8	TAPA SUPERIOR	1
9	PLACA SOSTÉN ELECTRÓNICA	1
10	TAPA FRONTAL	1
11	TAPA INFERIOR	1
12	PIEZA DE FIJACIÓN 2	1
13	CALZA PARA SOSTÉN MAGNETOS	2
14	M3X12 PHILIPS SCREW	7
15	M3 NUT	7
16	M3X10 PHILIPS SCREW	14
17	TAPA TRASERA	1



TEC		TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN: A
DIBUJ.	MONGE. D	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: N9 Corte láser N6	PARTE: VISTA EXPLOSIONADA DEL DISEÑO	
VERIF.	ASENJO. J		16/09/22 d/m/año	MATERIAL: ACRÍLICO		
APROB.	ASENJO. J		d/m/año			
SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0,25 .XX ±0,1 .XXX ±0,05 ANGULAR: ±0,1°		TOLERANCIA EN: mm	PESO: gramos	PROYECTO: CARCASA DEL SISTEMA DE DEPOSICIÓN DE FEROMONAS	ESCALA: 1:2
				UNIDADES: mm	HOJA 15 DE 15	FORMATO A 3

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Anexo C: Plano Electrónico



ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
FUENTE	FUENTE DC 24 V	1
1N4003	DIODO RECTIFICADOR DE SILICIO	1
LM7812	REGULADOR DE TENSIÓN 12 V	1
C1	CAPACITOR 330 nF	1
C2	CAPACITOR 100 nF	1
R1	RESISTENCIA 3kΩ	1
R2	RESISTENCIA 1kΩ	1
PC817	OPTOACOPLE	1
D2	DIODO	1
2N3904	TRANSISTOR NPN DE PROPÓSITO GENERAL	1
BOTÓN	PUSH BUTTON	1
MOTOR	BOMBA PERISTÁLTICA DE 12 V	1

NOTA:

- DQ1 HACE REFERENCIA A LA SALIDA DIGITAL DEL ROBOTINO

TEC		TECNOLÓGICO DE COSTA RICA		ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN: A
DIBUJ.	MONGE, D	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	PARTE:	
VERIF.	ASENJO, J		16/09/22	NO APLICA	PLANO DE DISEÑO ELECTRÓNICO	
APROB.	ASENJO, J		d/m/año	MATERIAL:		
				NO APLICA		
SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
N/A	LINEAL: X	±0.25	-	SISTEMA DE DEPOSICIÓN DE FEROMONAS	N/A	A 3
	.X	±0.1				
	.XX	±0.05				
	.XXX	±0.010				
	ANGULAR: ±0.1°					
			PESO: gramos	UNIDADES: -	HOJA 1 DE 1	

Anexo D: Resultados de medición de magnetización

D.1 Gota 1

- **0 minutos**

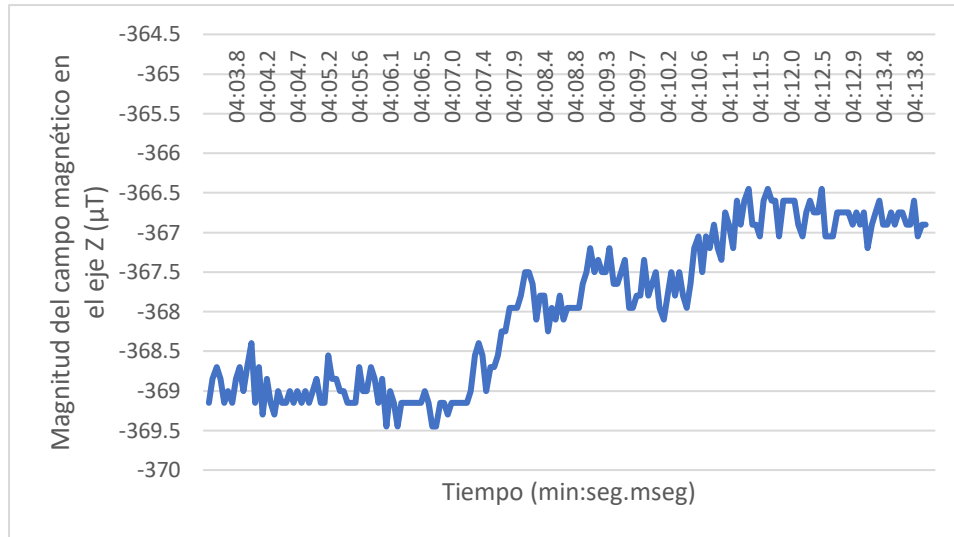


Figura D.1.1. Mediciones del campo magnético de la gota 1 0 minutos después de que esta se depuso.

Fuente: Elaboración propia

- **10 minutos**

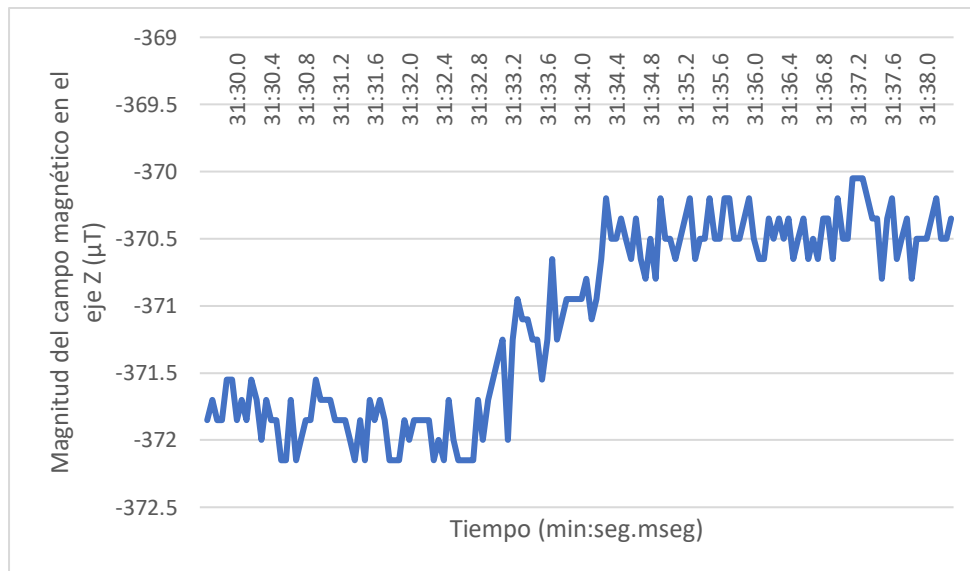


Figura D.1.2. Mediciones del campo magnético de la gota 1 10 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **20 minutos**

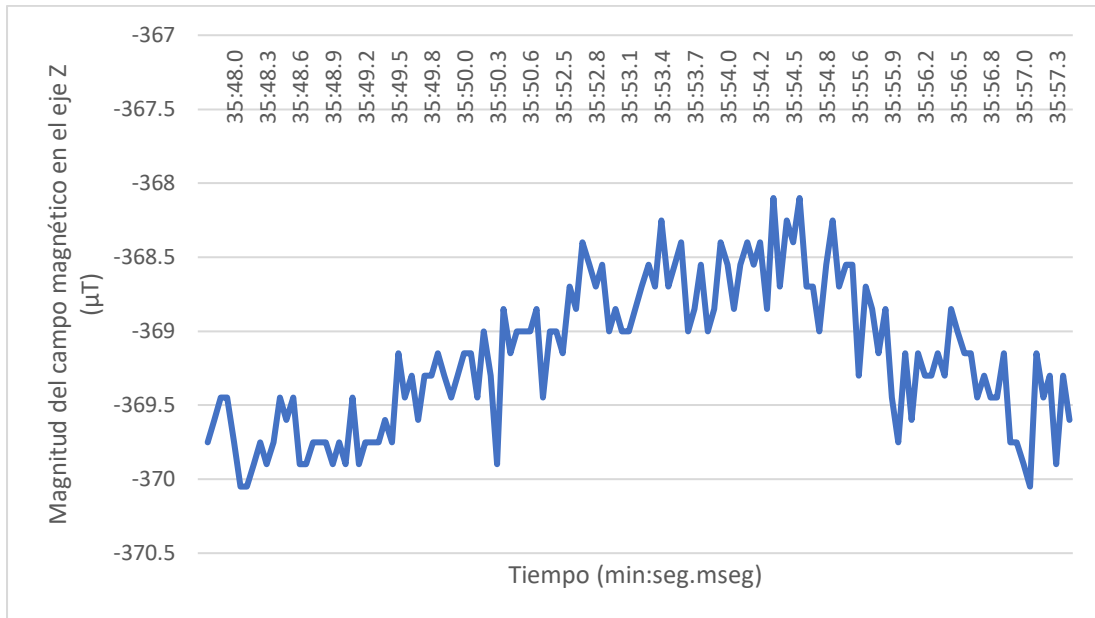


Figura D.1.3. Mediciones del campo magnético de la gota 1 20 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **30 minutos**

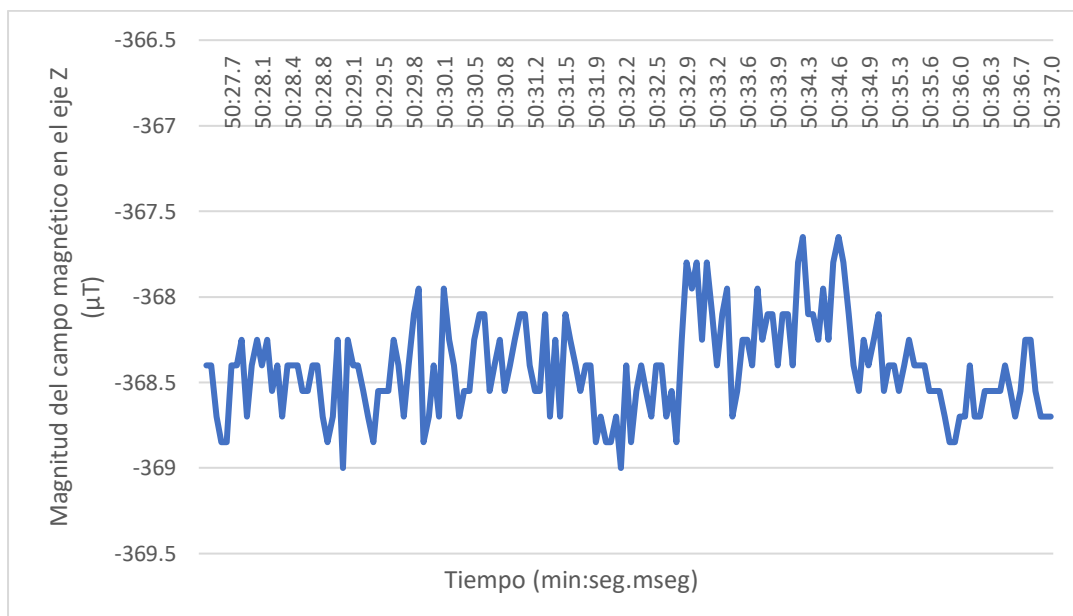


Figura D.1.4. Mediciones del campo magnético de la gota 1 30 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

D.2 Gota 2

- **0 minutos**

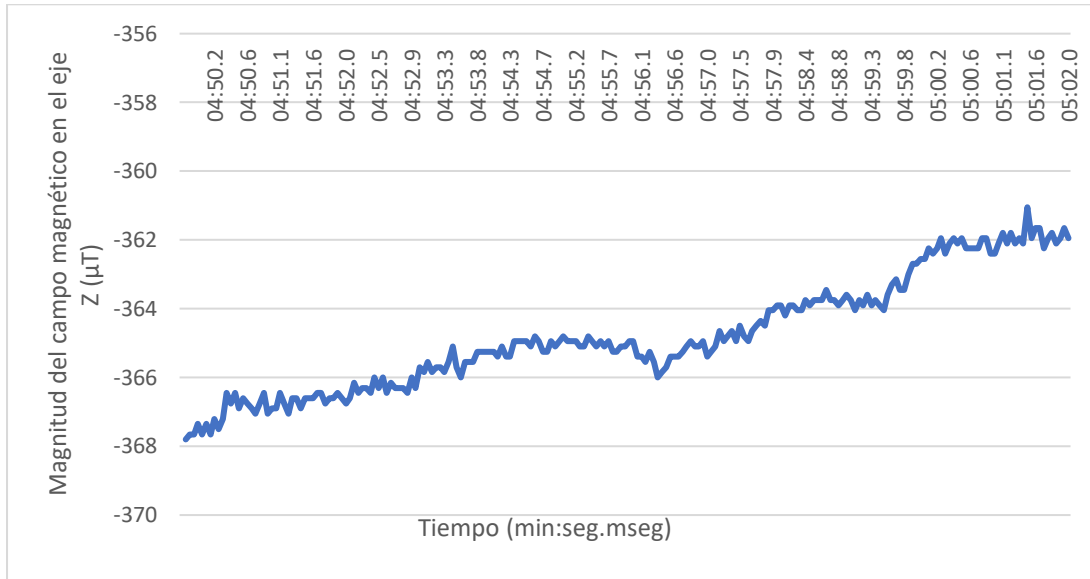


Figura D.2.1. Mediciones del campo magnético de la gota 2 0 minutos después de que esta se depuso.

Fuente: Elaboración propia

- **10 minutos**

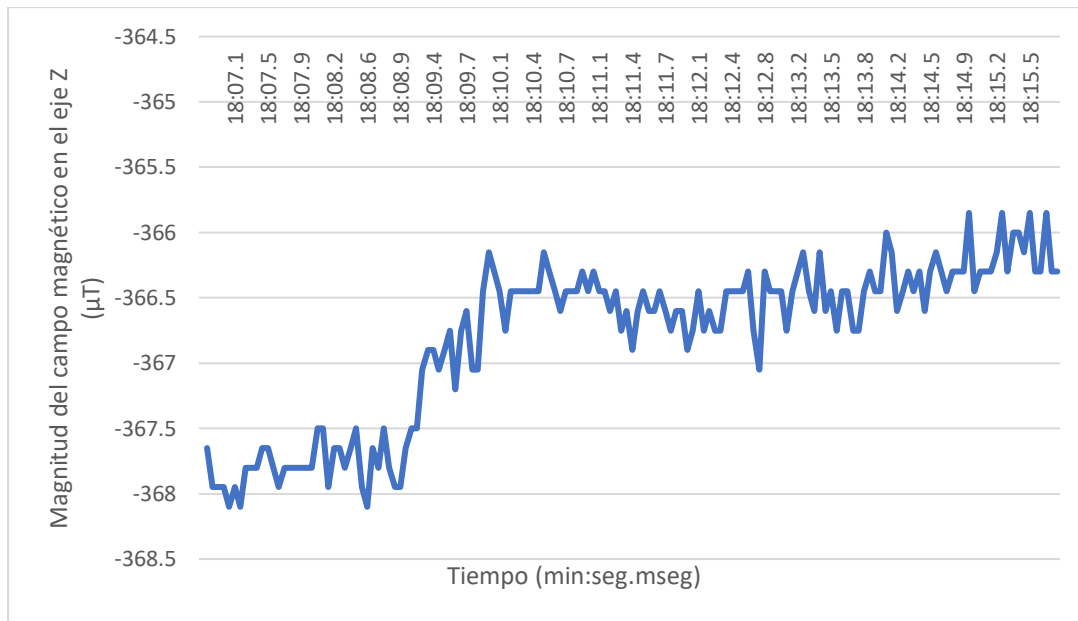


Figura D.2.2. Mediciones del campo magnético de la gota 2 10 minutos después de que esta se depuso.

Fuente: Elaboración propia

- **20 minutos**

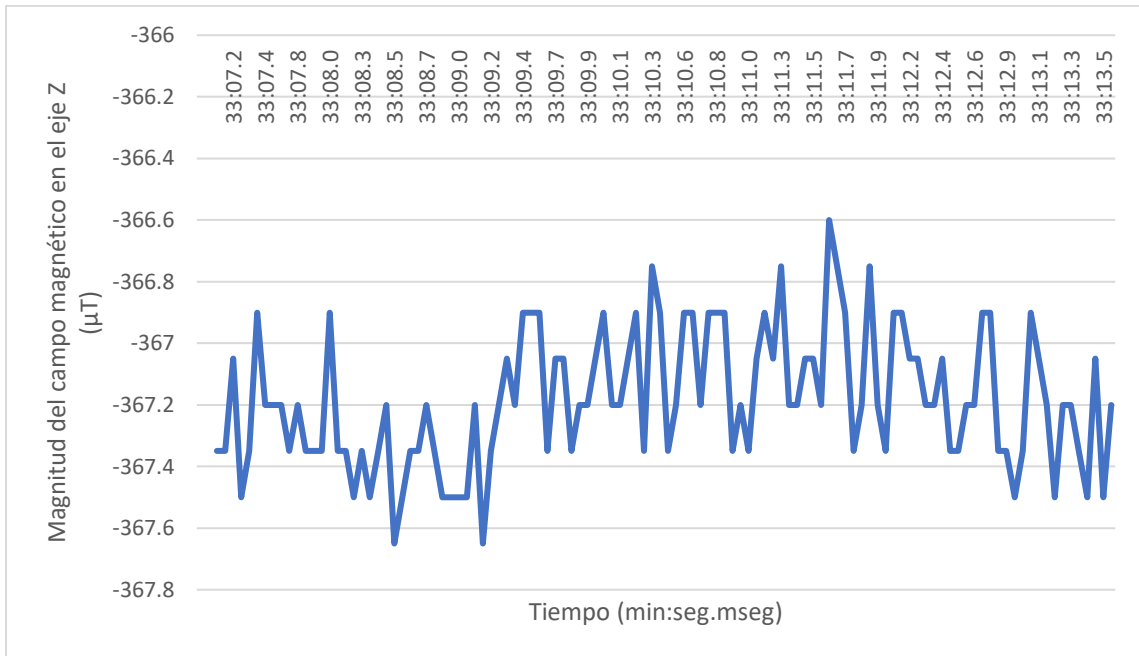


Figura D.2.3. Mediciones del campo magnético de la gota 2 20 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **30 minutos**

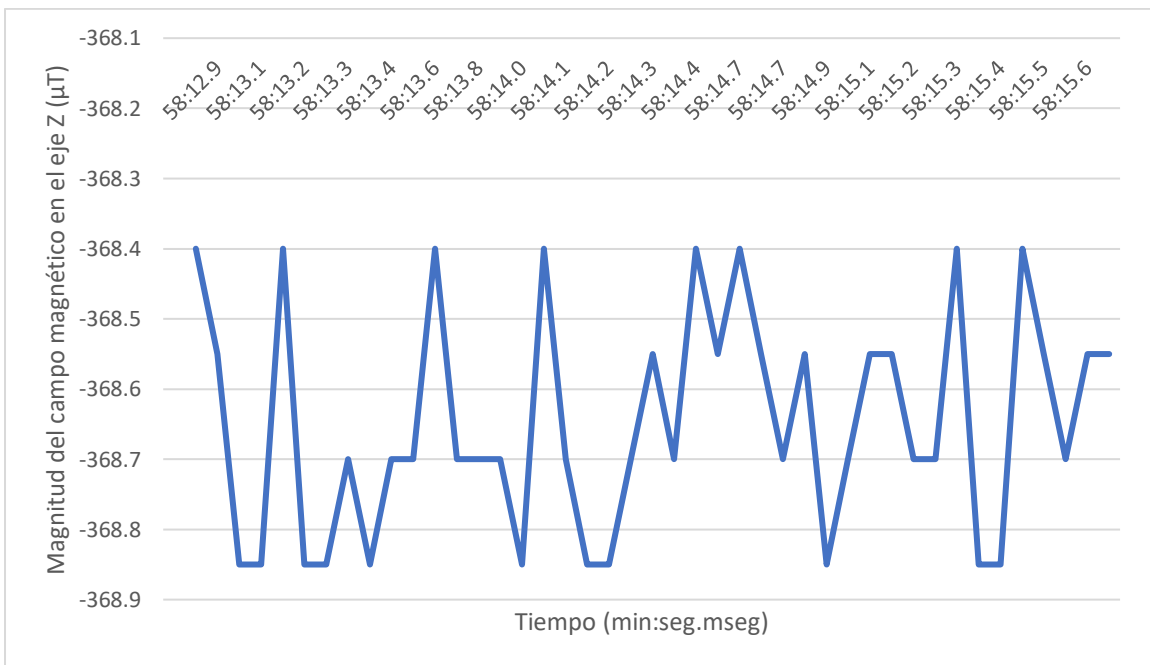


Figura D.2.4. Mediciones del campo magnético de la gota 2 30 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

D.3 Gota 3

- 0 minutos

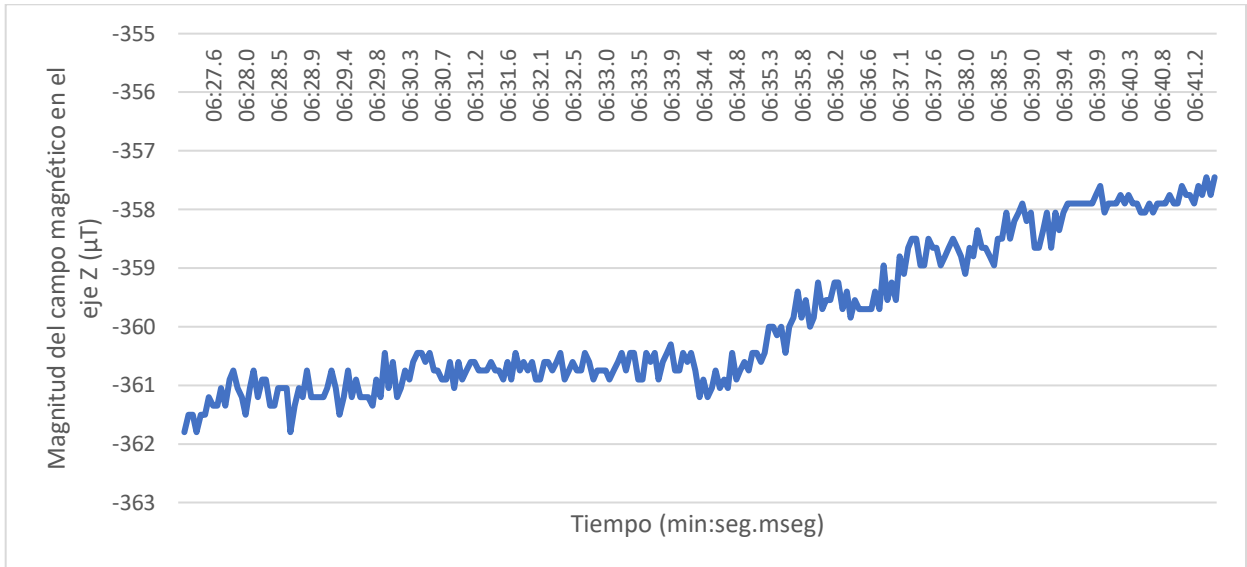


Figura D.3.1. Mediciones del campo magnético de la gota 3 0 minutos después de que esta se depuso.

Fuente: Elaboración propia

- 10 minutos

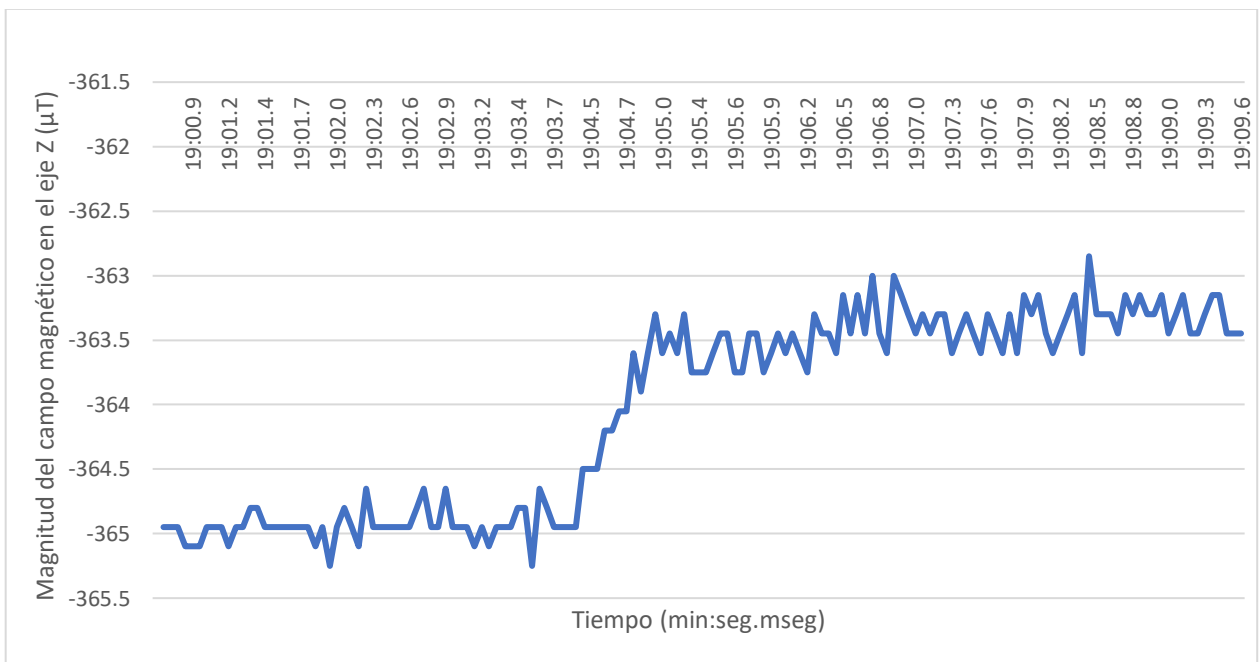


Figura D.3.2. Mediciones del campo magnético de la gota 3 10 minutos después de que esta se

depuso. Fuente: Elaboración propia

- **20 minutos**

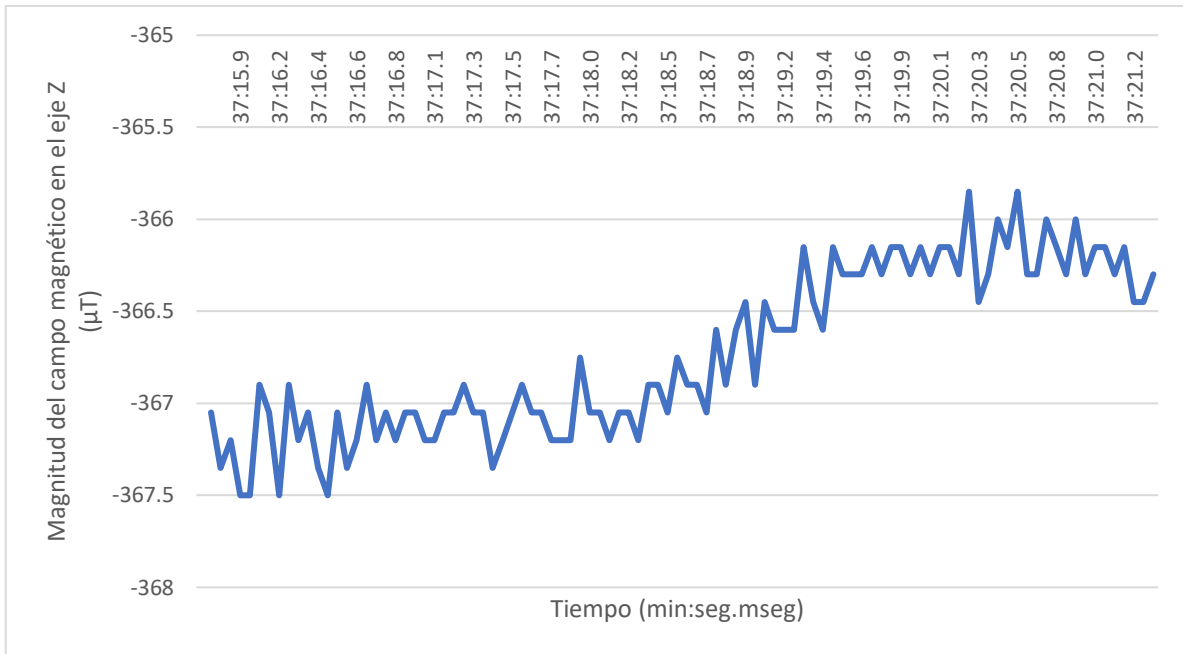


Figura D.3.3. Mediciones del campo magnético de la gota 3 20 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **30 minutos**

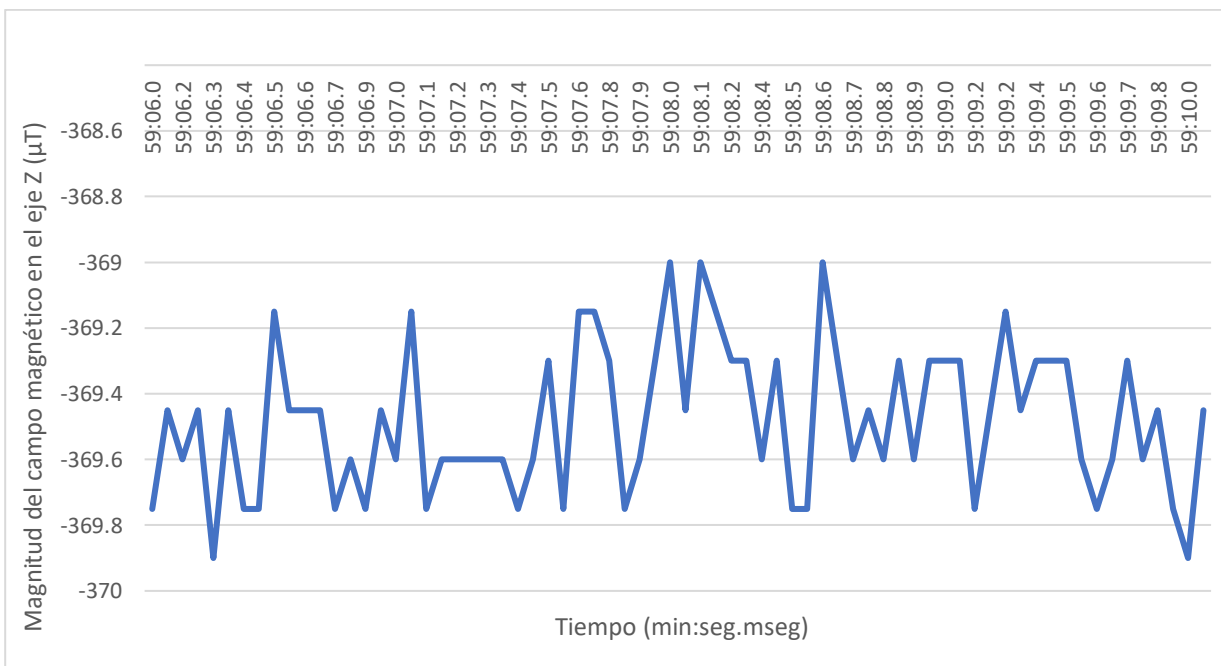


Figura D.3.4. Mediciones del campo magnético de la gota 3 30 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

D.4 Gota 4

- **0 minutos**

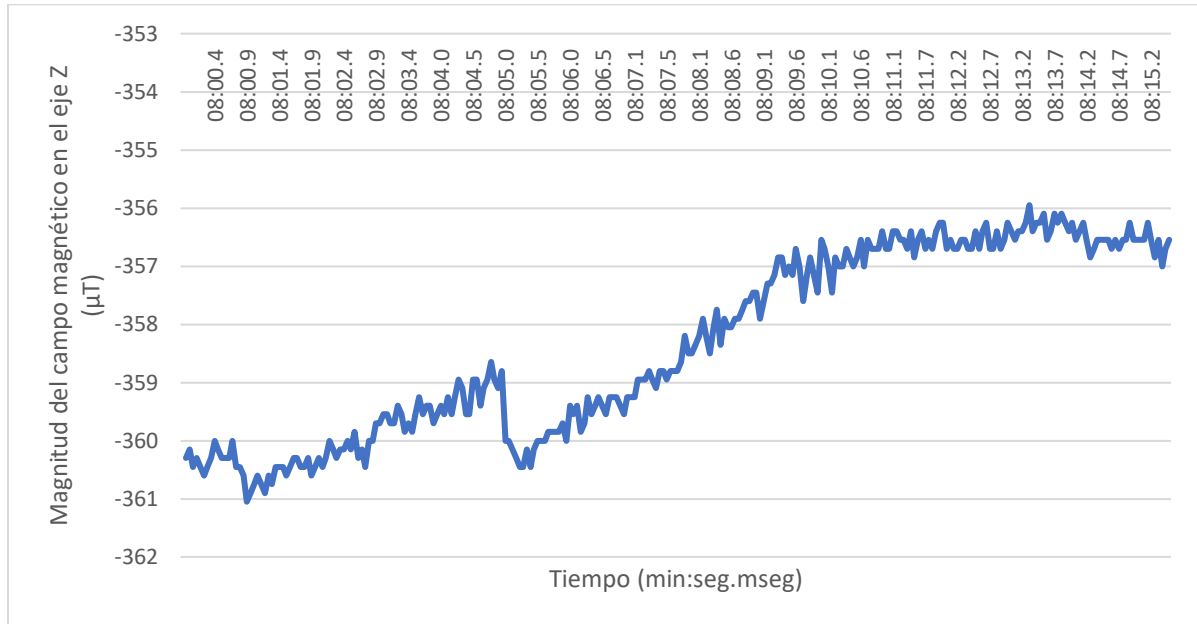


Figura D.4.1. Mediciones del campo magnético de la gota 4 0 minutos después de que esta se depuso.

Fuente: Elaboración propia

- **10 minutos**

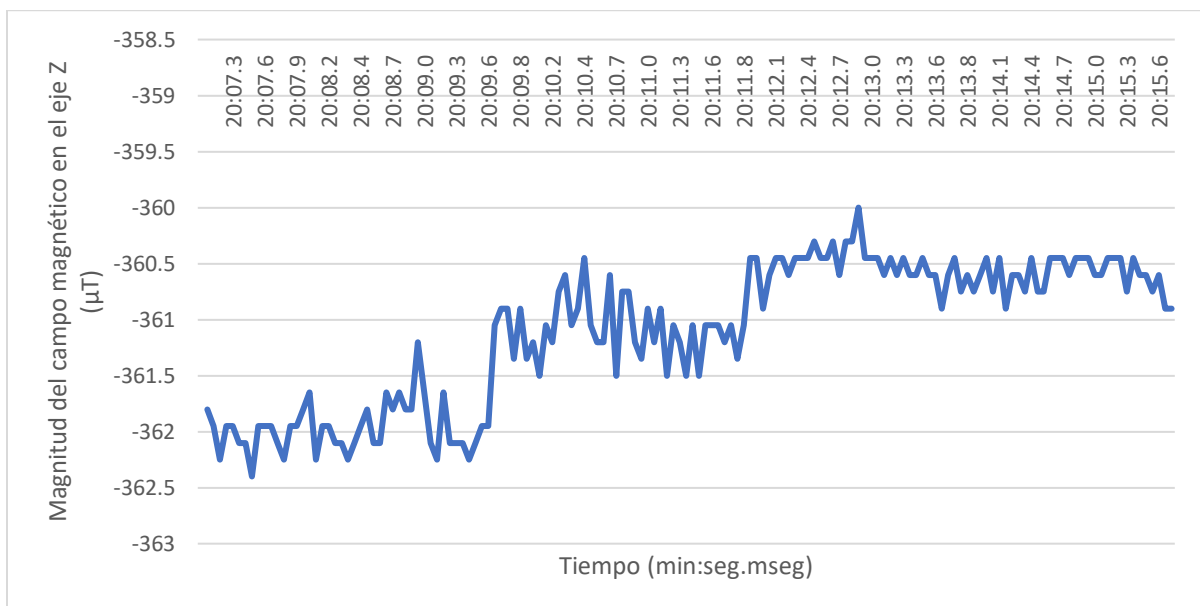


Figura D.4.2. Mediciones del campo magnético de la gota 4 10 minutos después de que esta se

depuso. Fuente: Elaboración propia

- **20 minutos**

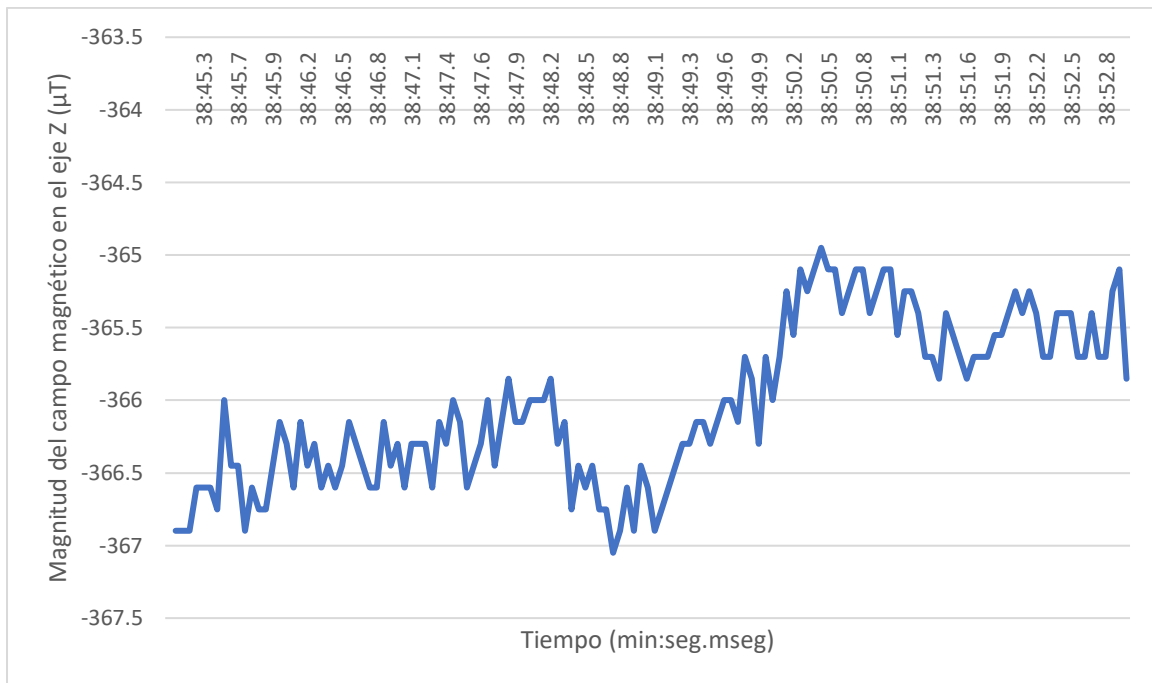


Figura D.4.3. Mediciones del campo magnético de la gota 4 20 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **30 minutos**

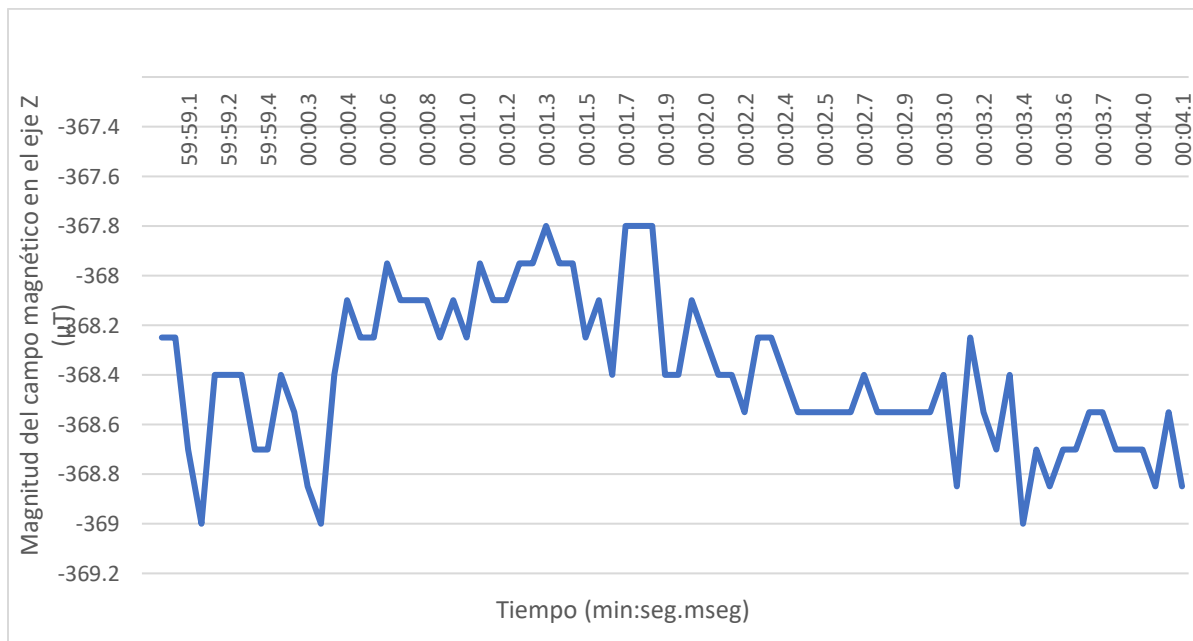


Figura D.4.4. Mediciones del campo magnético de la gota 4 30 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

D.5 Gota 5

- **0 minutos**

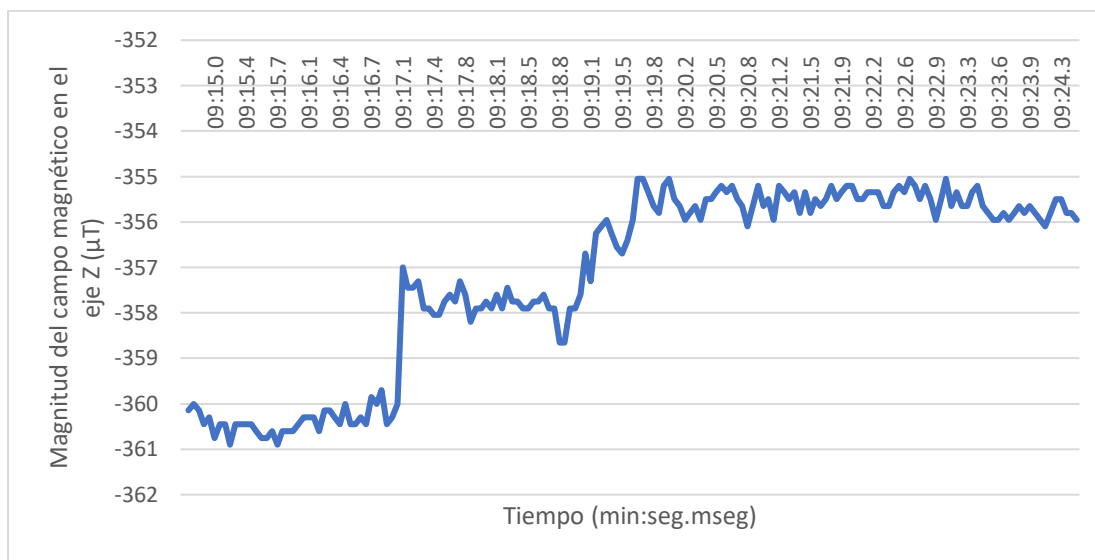


Figura D.5.1. Mediciones del campo magnético de la gota 5 0 minutos después de que esta se depuso.

Fuente: Elaboración propia

- **10 minutos**

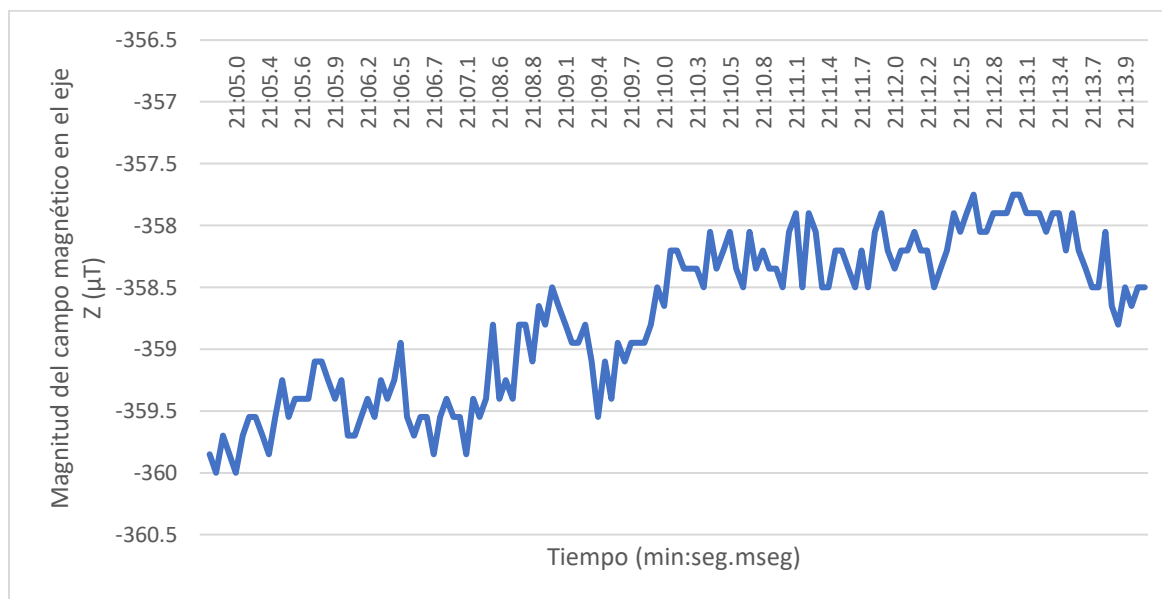


Figura D.5.2. Mediciones del campo magnético de la gota 5 10 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **20 minutos**

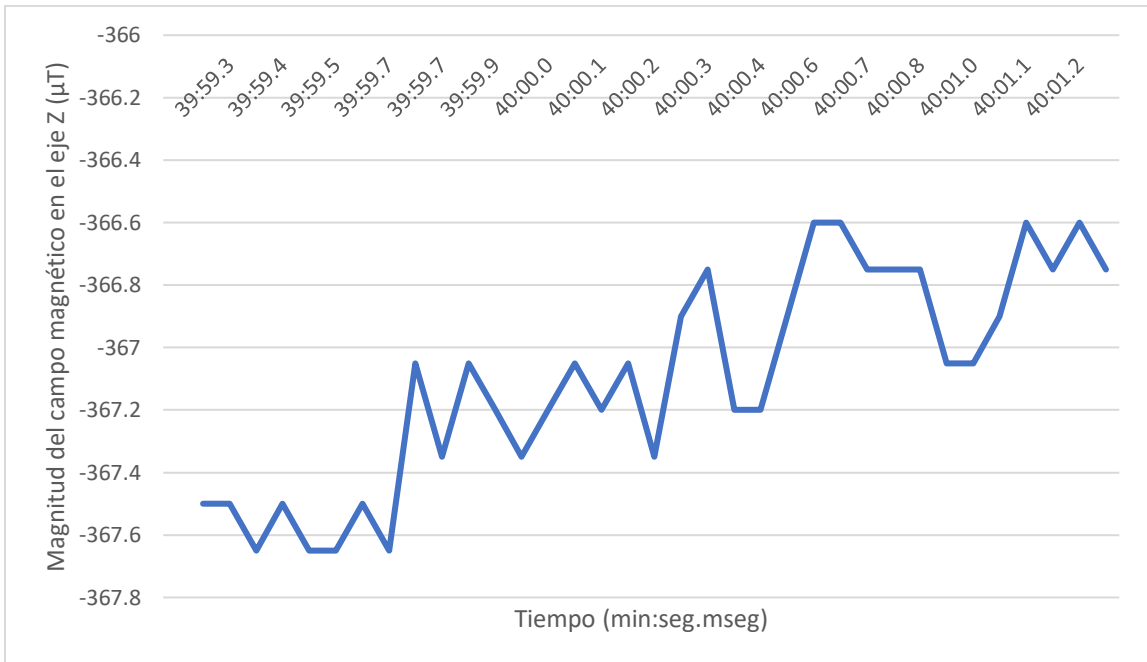


Figura D.5.3. Mediciones del campo magnético de la gota 5 20 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **30 minutos**

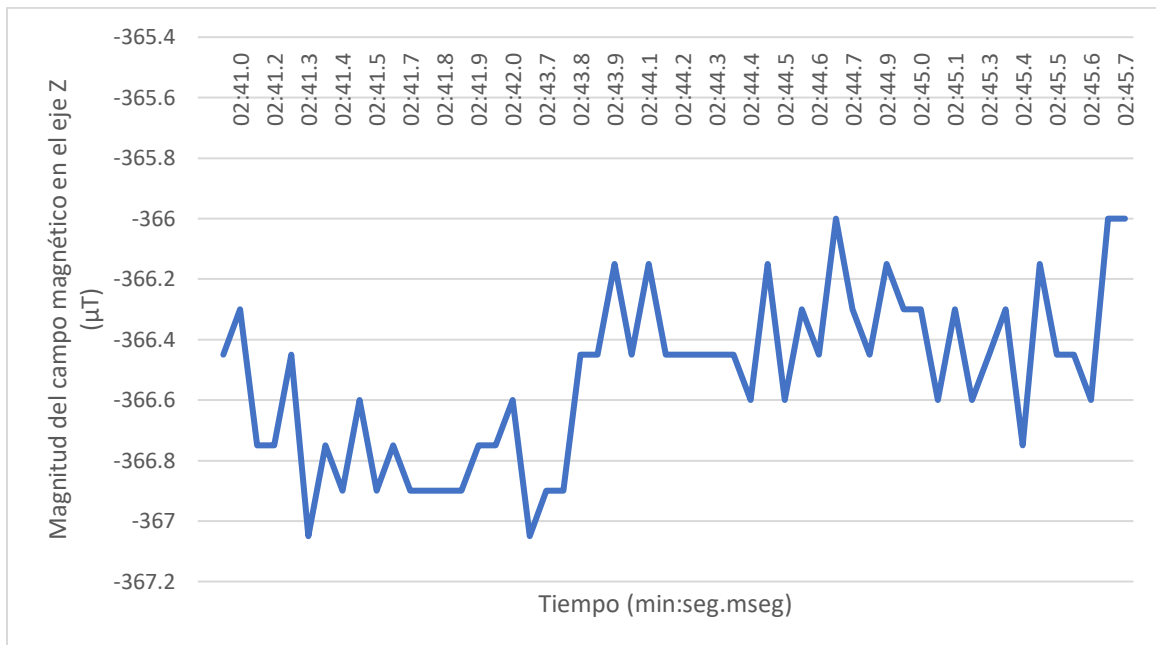


Figura D.5.4. Mediciones del campo magnético de la gota 5 30 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

D.6 Gota 6

- **0 minutos**

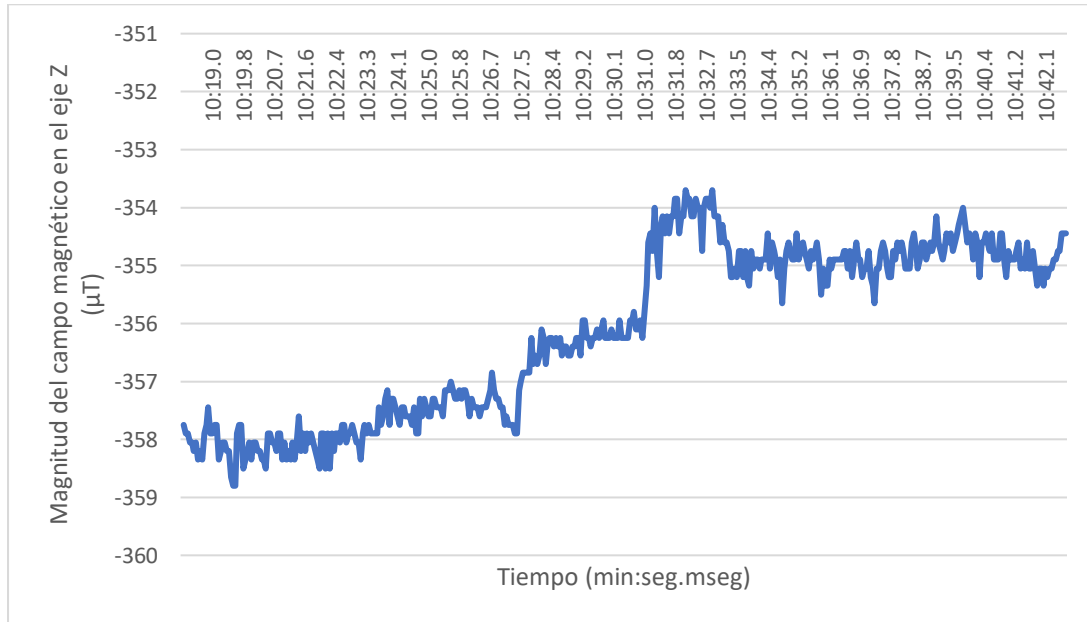


Figura D.6.1. Mediciones del campo magnético de la gota 6 0 minutos después de que esta se depuso.

Fuente: Elaboración propia

- **10 minutos**

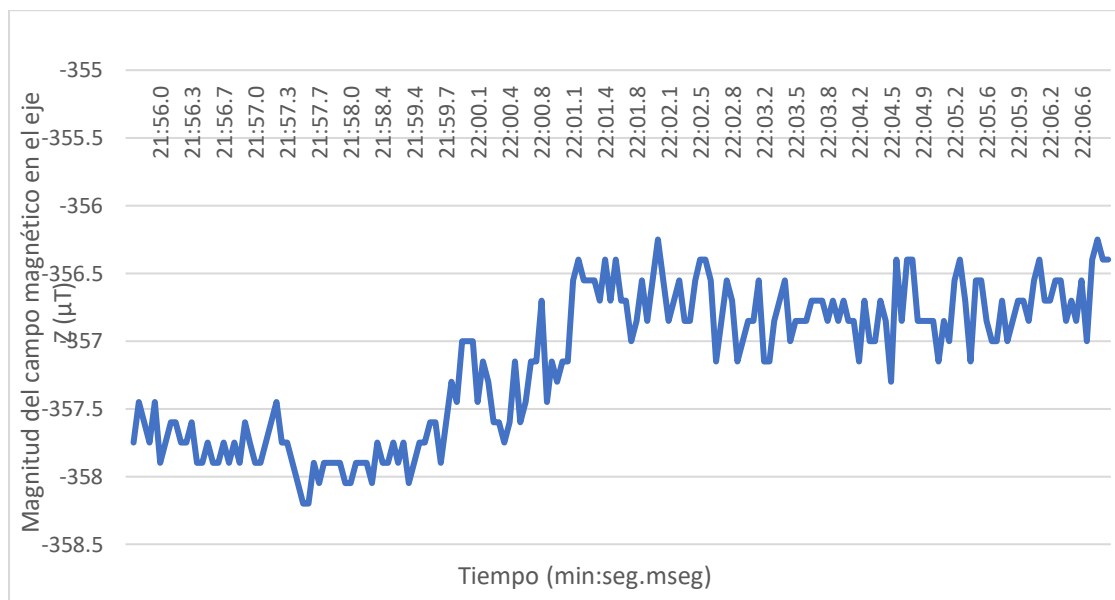


Figura D.6.2. Mediciones del campo magnético de la gota 6 10 minutos después de que esta se depuso.

Fuente: Elaboración propia

- **20 minutos**

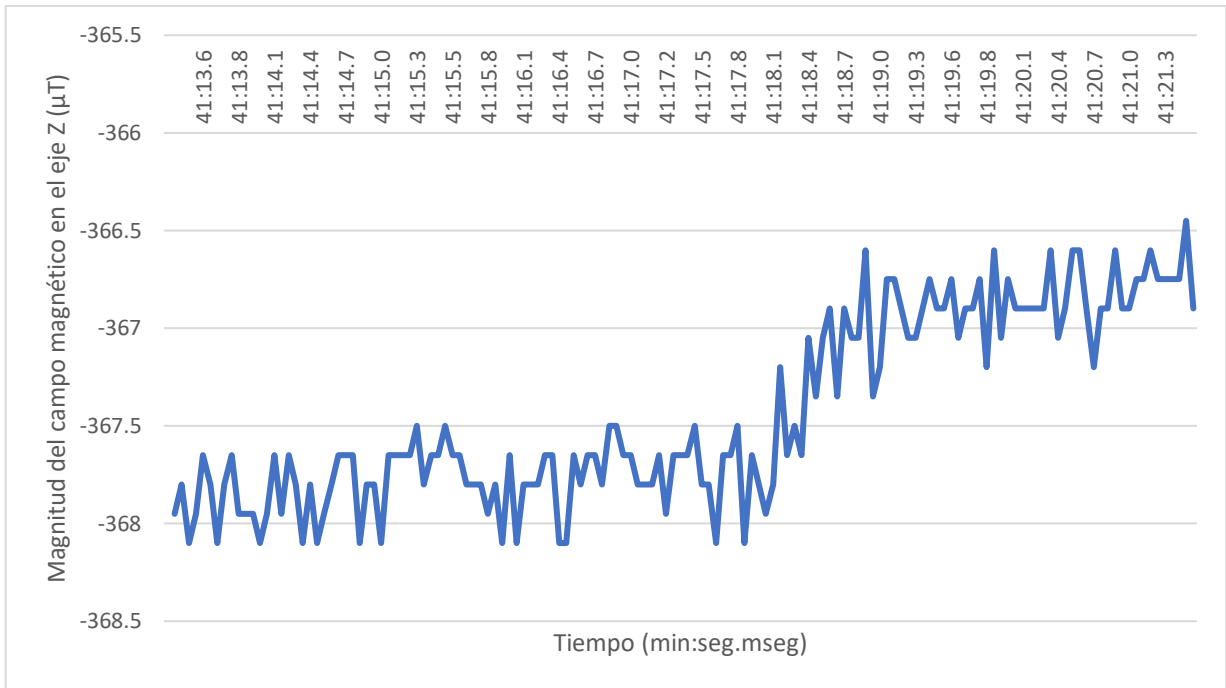


Figura D.6.3. Mediciones del campo magnético de la gota 6 20 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **30 minutos**

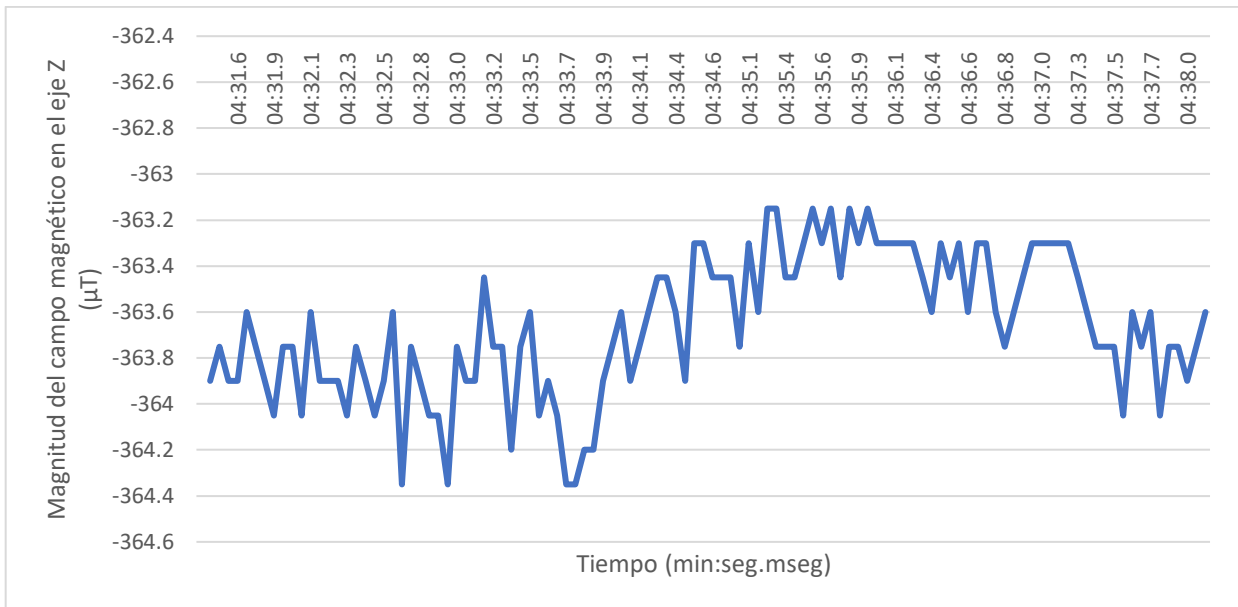


Figura D.6.4. Mediciones del campo magnético de la gota 6 30 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

D.7 Gota 7

- **0 minutos**

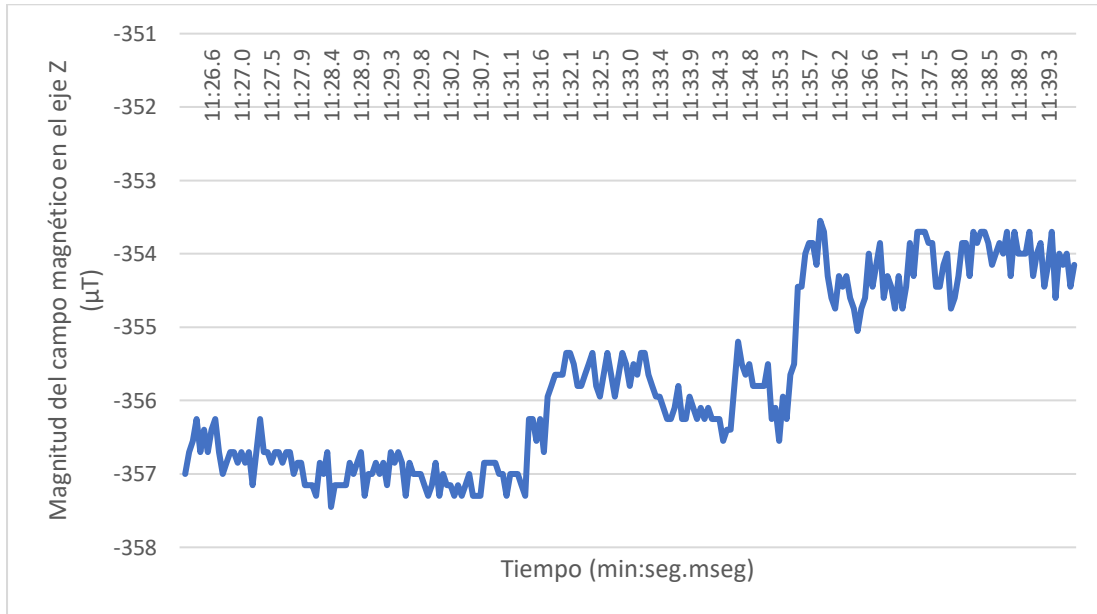


Figura D.7.1. Mediciones del campo magnético de la gota 7 0 minutos después de que esta se depuso.

Fuente: Elaboración propia

- **10 minutos**

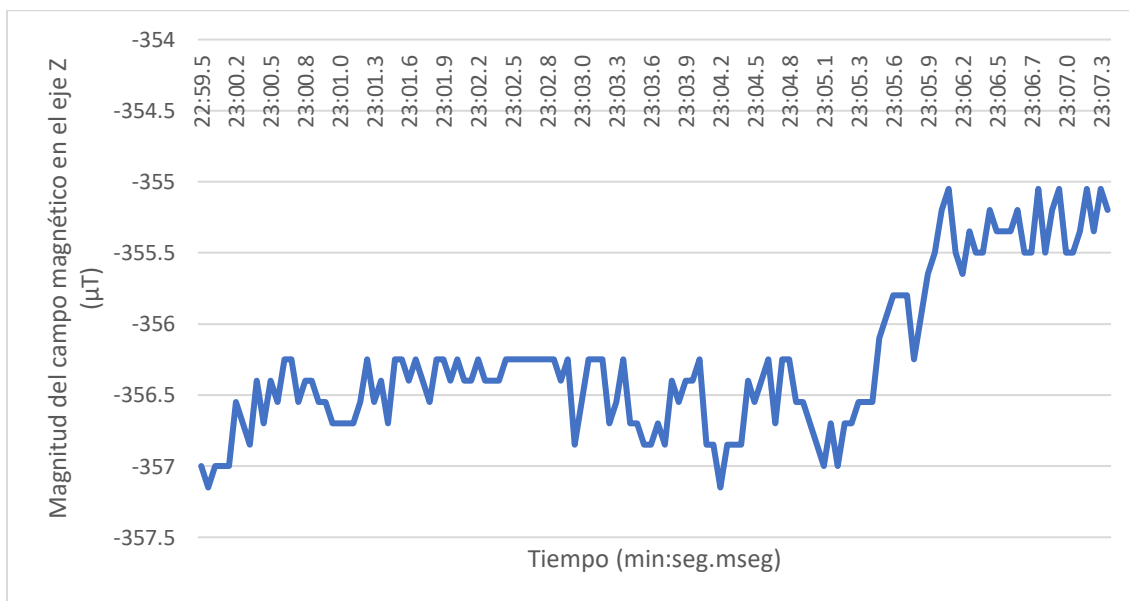


Figura D.7.2. Mediciones del campo magnético de la gota 7 10 minutos después de que esta se depuso.

Fuente: Elaboración propia

- **20 minutos**

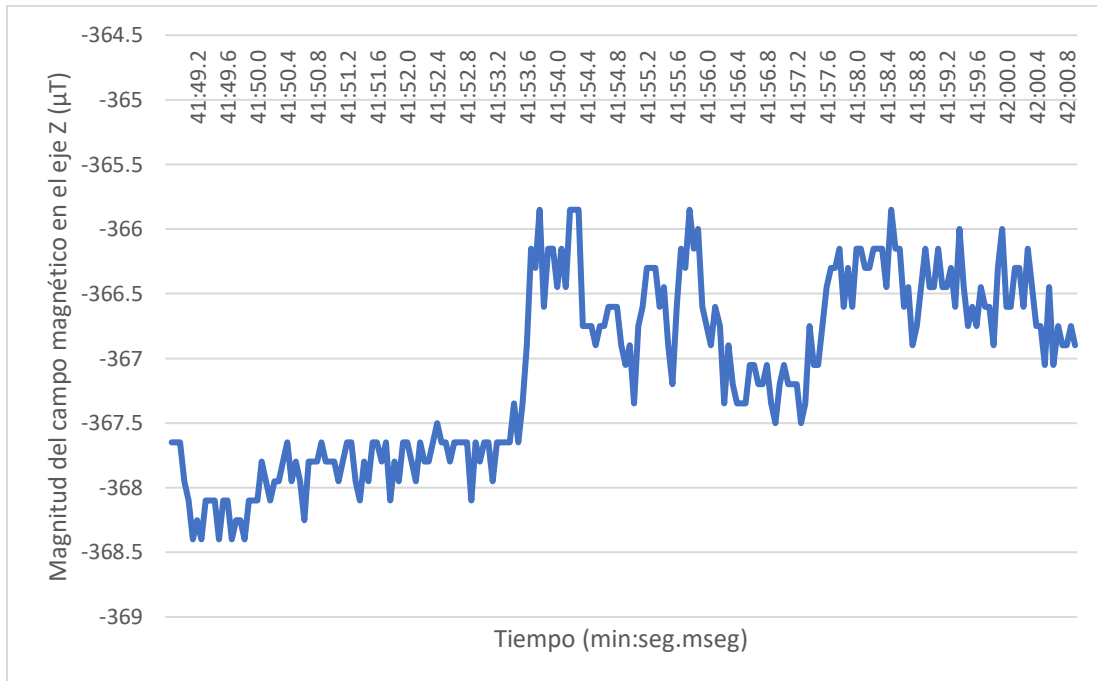


Figura D.7.3. Mediciones del campo magnético de la gota 7 20 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **30 minutos**

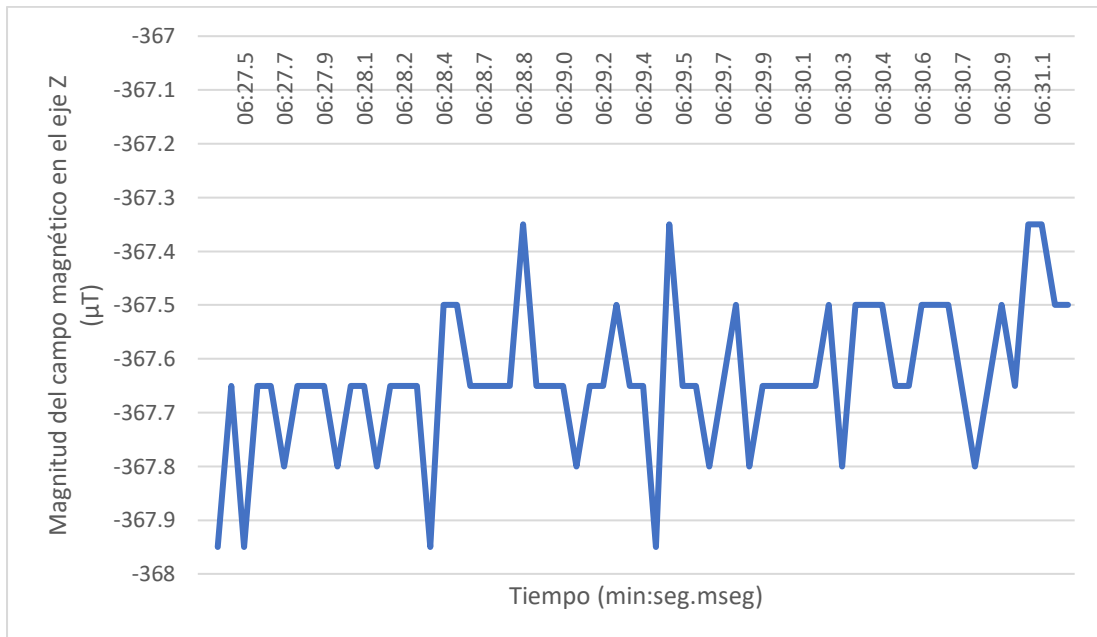


Figura D.7.4. Mediciones del campo magnético de la gota 7 30 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

D.8 Gota 8

- **0 minutos**

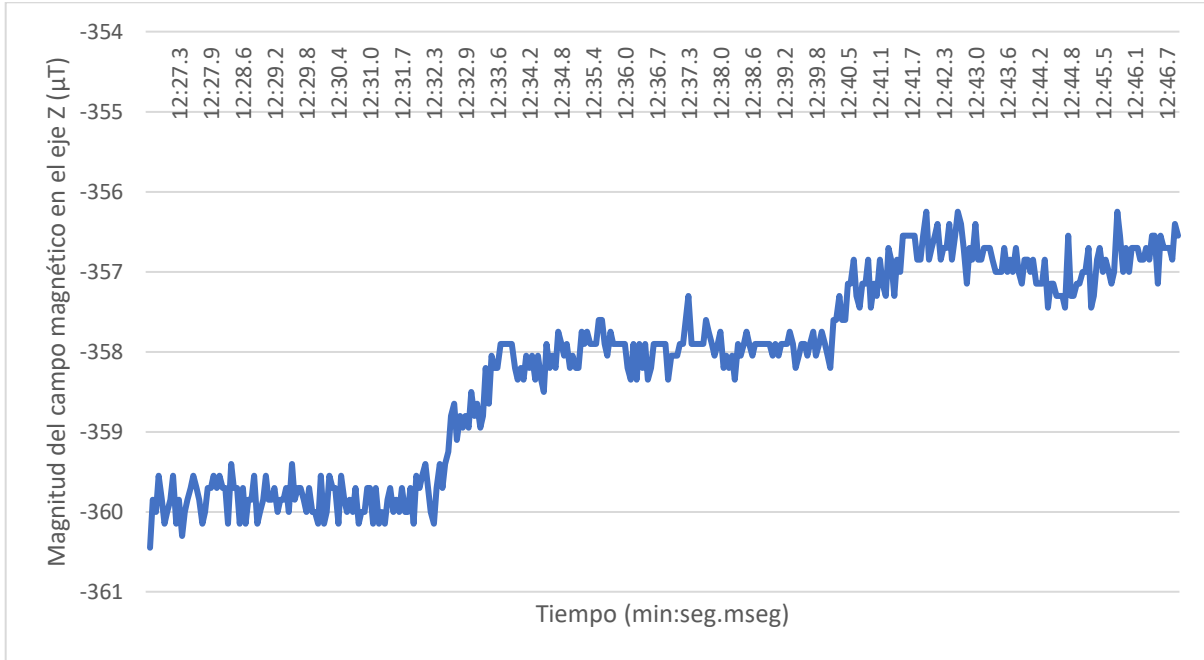


Figura D.8.1. Mediciones del campo magnético de la gota 8 0 minutos después de que esta se depuso.

Fuente: Elaboración propia

- **10 minutos**

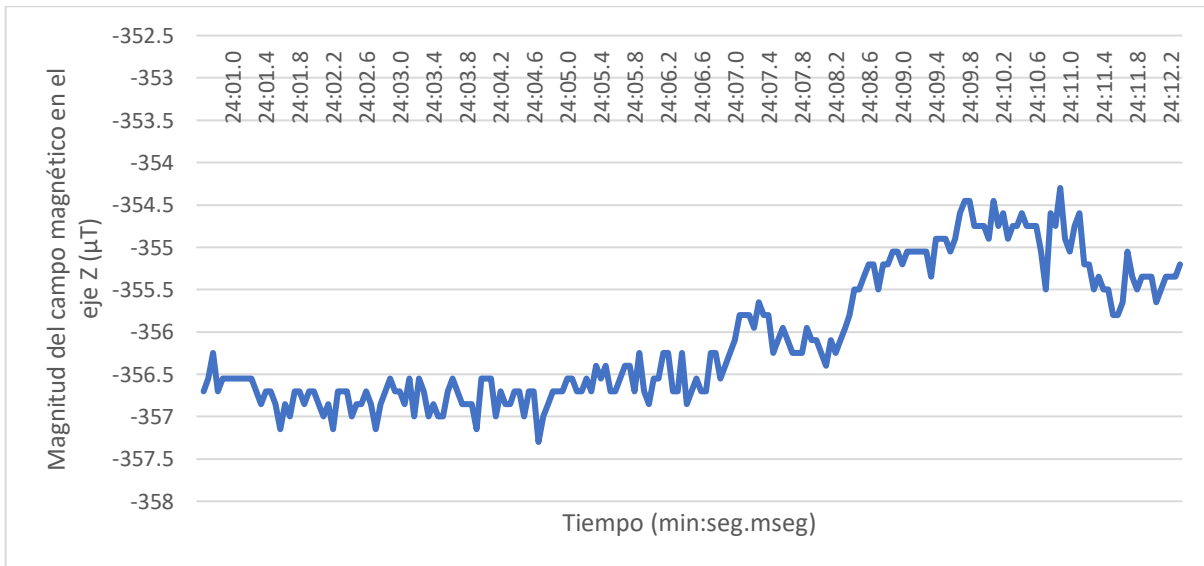


Figura D.8.2. Mediciones del campo magnético de la gota 8 10 minutos después de que esta se depuso.

Fuente: Elaboración propia

- **20 minutos**

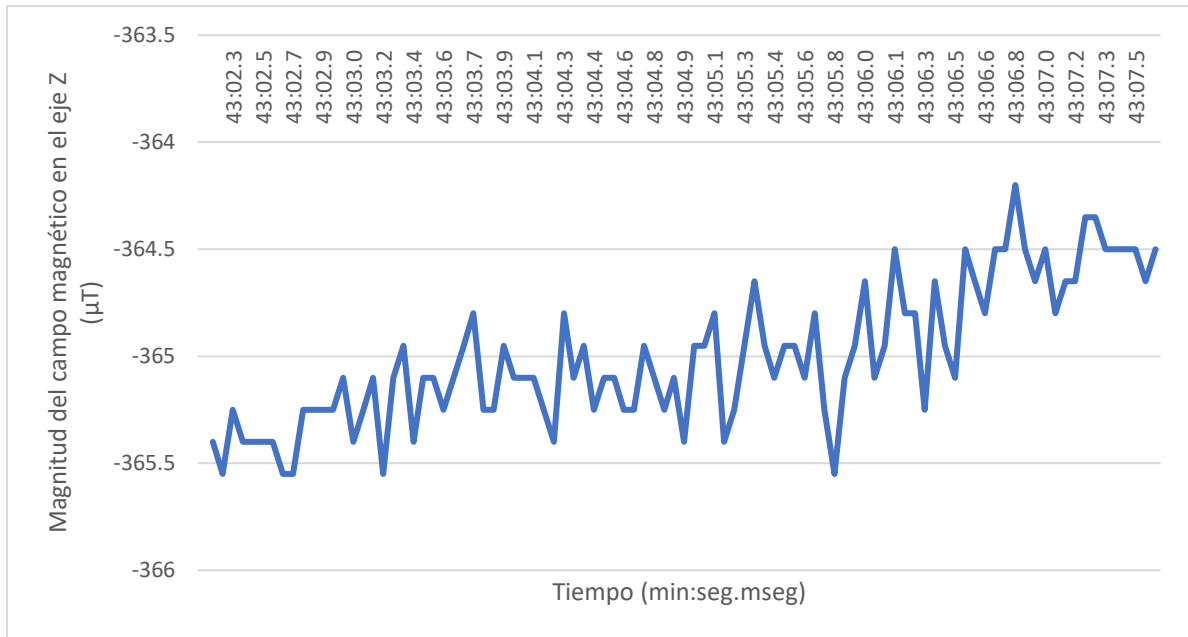


Figura D.8.3. Mediciones del campo magnético de la gota 8 20 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **30 minutos**

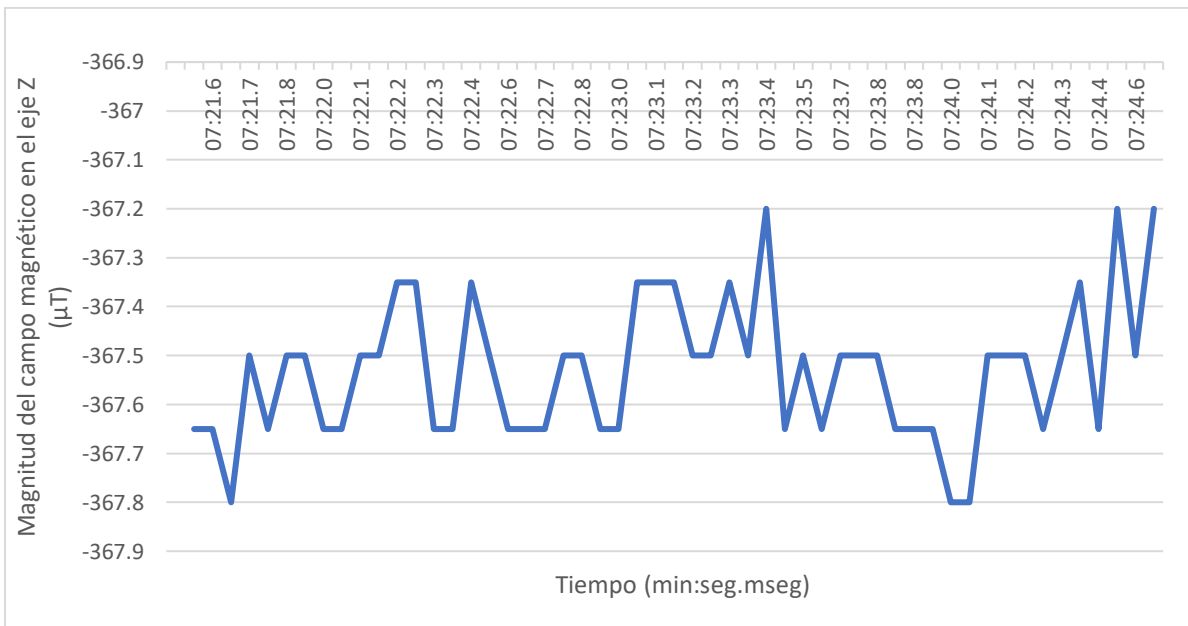


Figura D.8.4. Mediciones del campo magnético de la gota 8 30 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

D.9 Gota 9

- 0 minutos

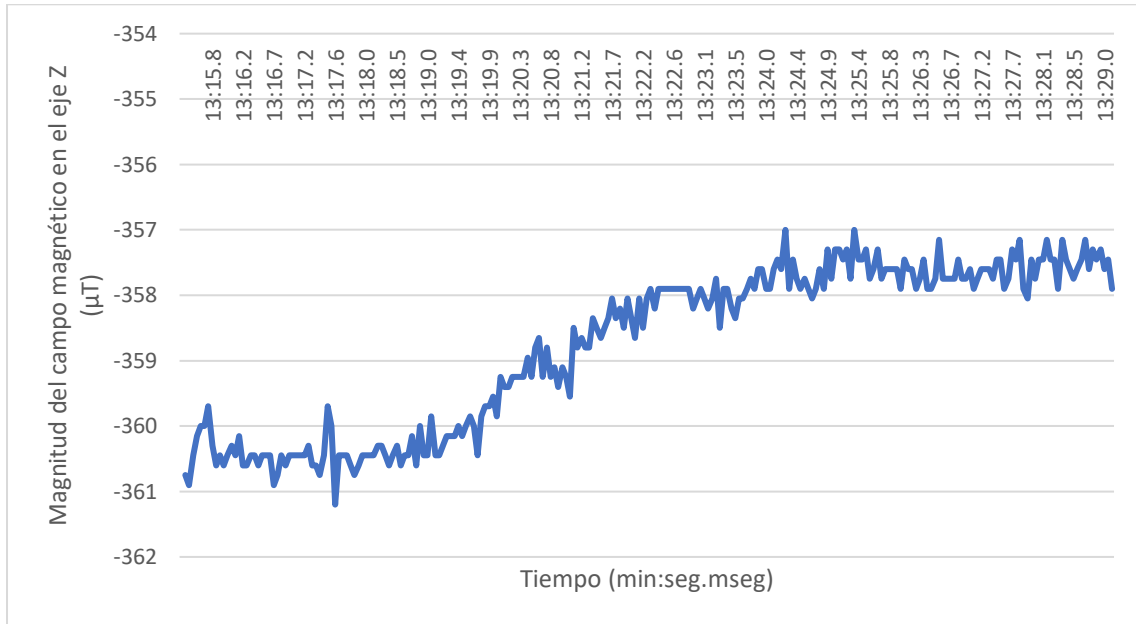


Figura D.9.1. Mediciones del campo magnético de la gota 9 0 minutos después de que esta se depuso.

Fuente: Elaboración propia

- 10 minutos

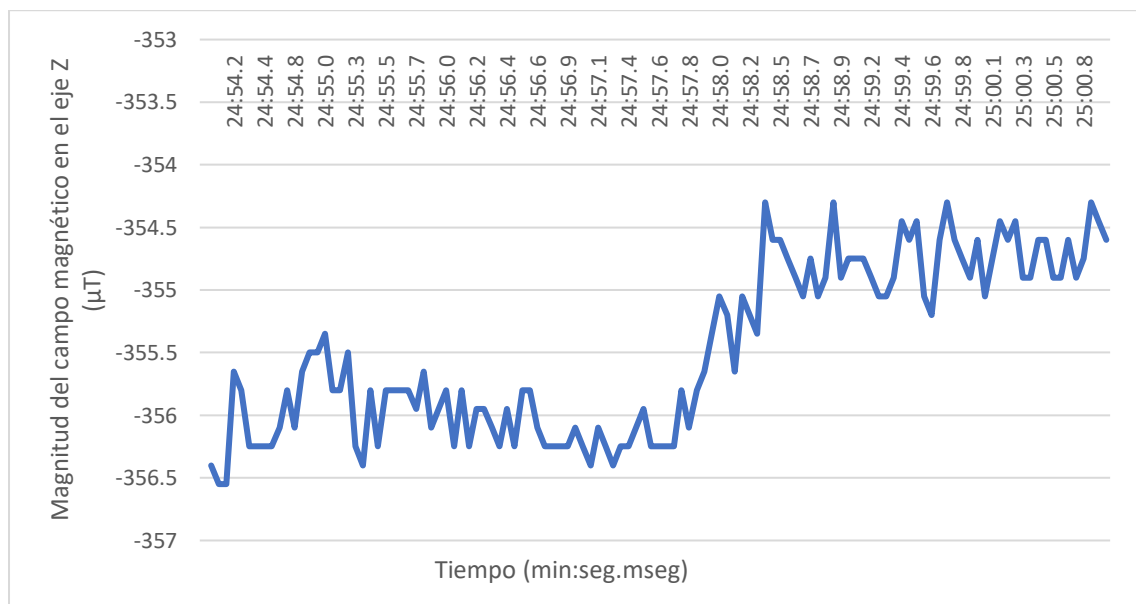


Figura D.9.2. Mediciones del campo magnético de la gota 9 10 minutos después de que esta se depuso.

Fuente: Elaboración propia

- **20 minutos**

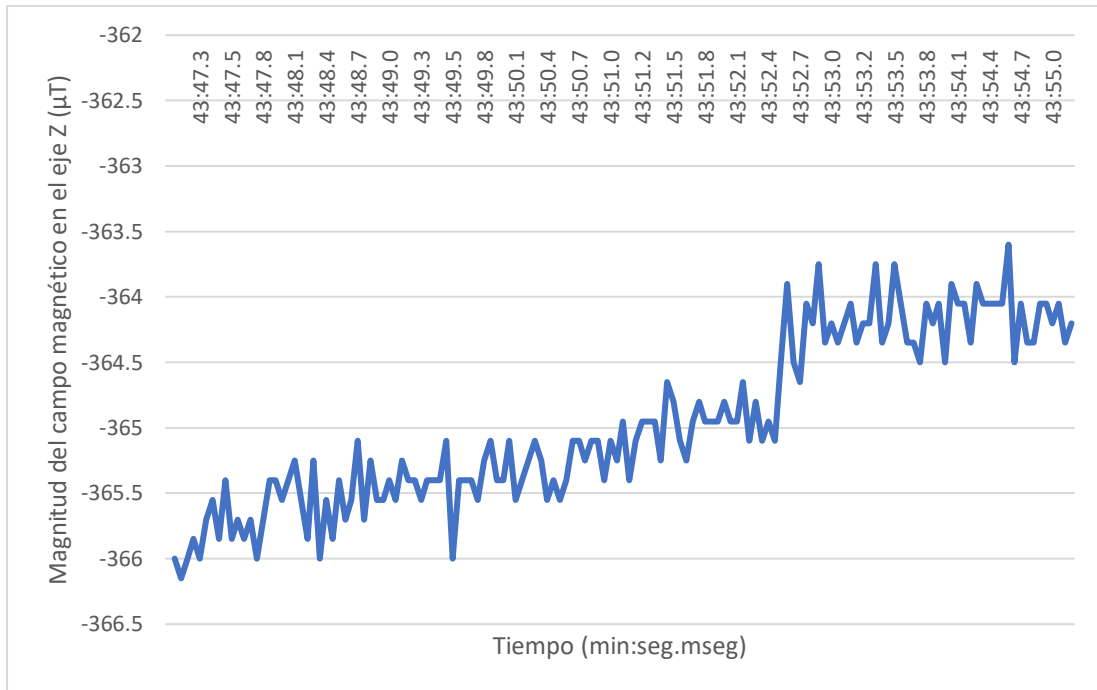


Figura D.9.3. Mediciones del campo magnético de la gota 9 20 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **30 minutos**

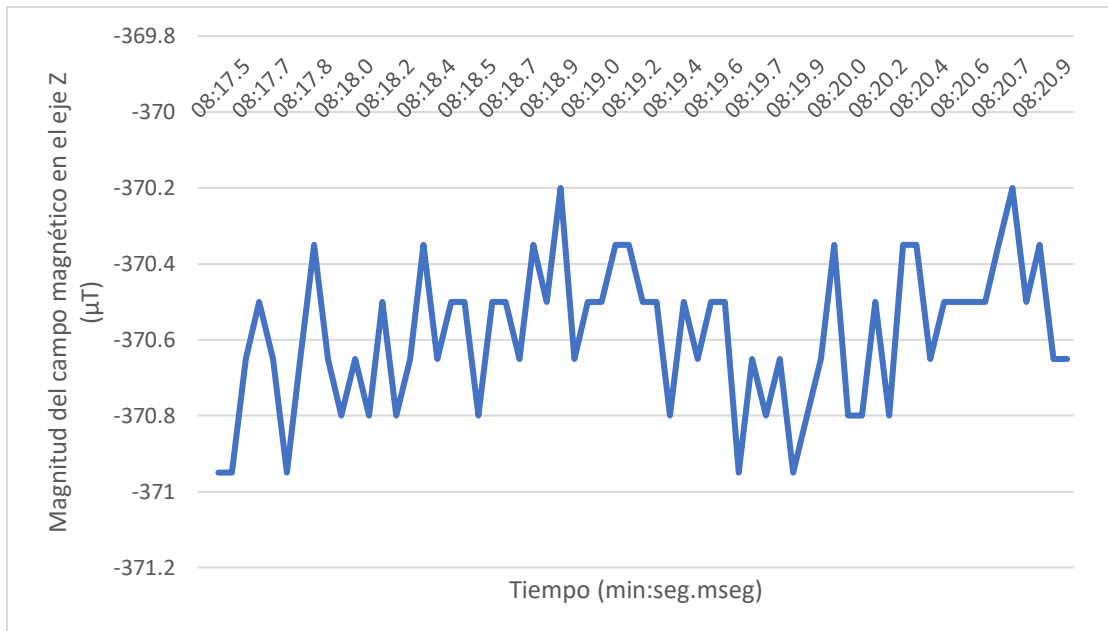


Figura D.9.4. Mediciones del campo magnético de la gota 9 30 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

D.10 Gota 10

- 0 minutos

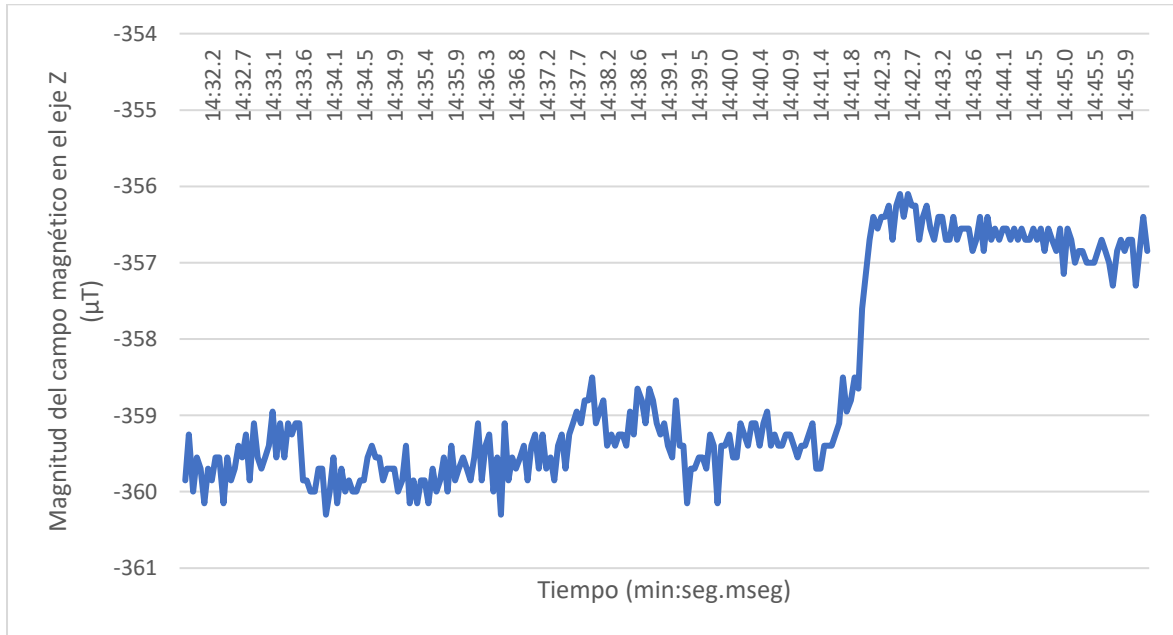


Figura D.10.1. Mediciones del campo magnético de la gota 10 0 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- 10 minutos

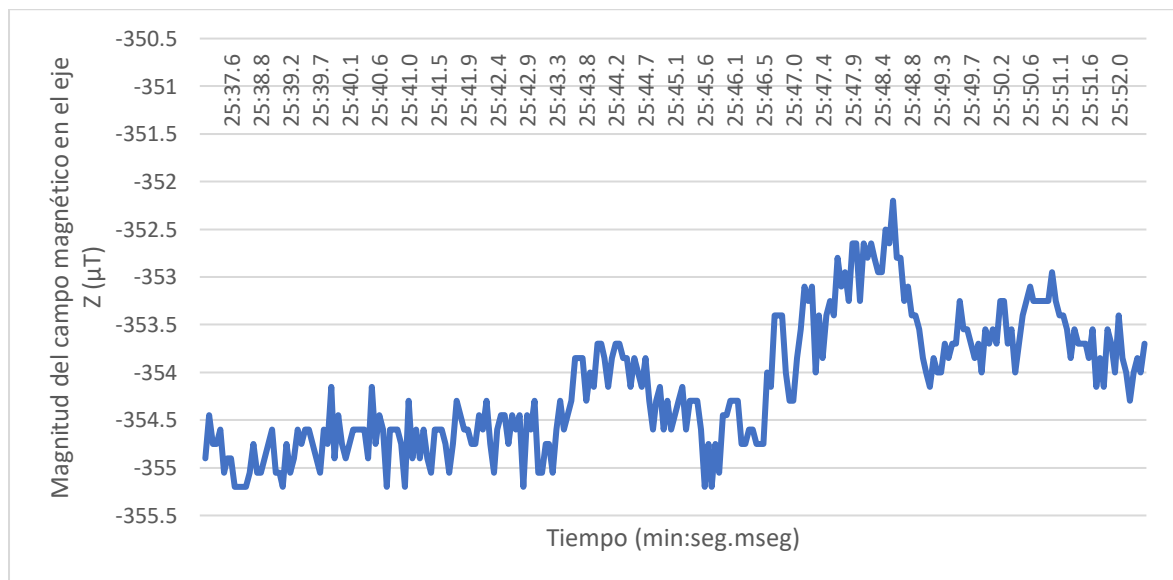


Figura D.10.2. Mediciones del campo magnético de la gota 10 10 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **20 minutos**

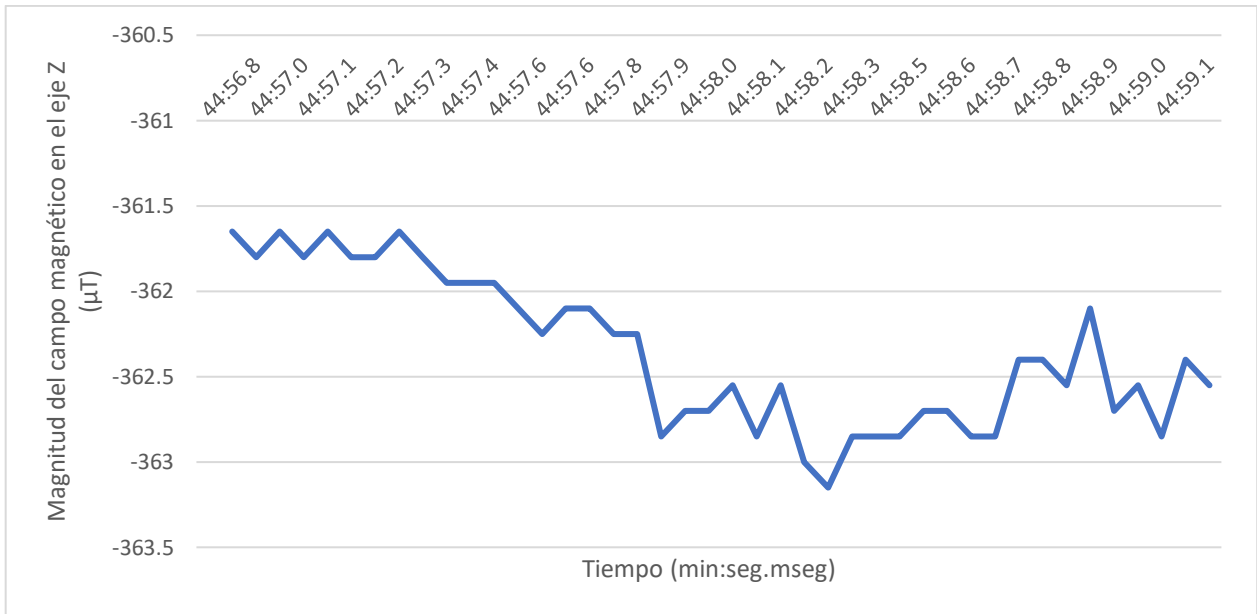


Figura D.10.3. Mediciones del campo magnético de la gota 10 20 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **30 minutos**

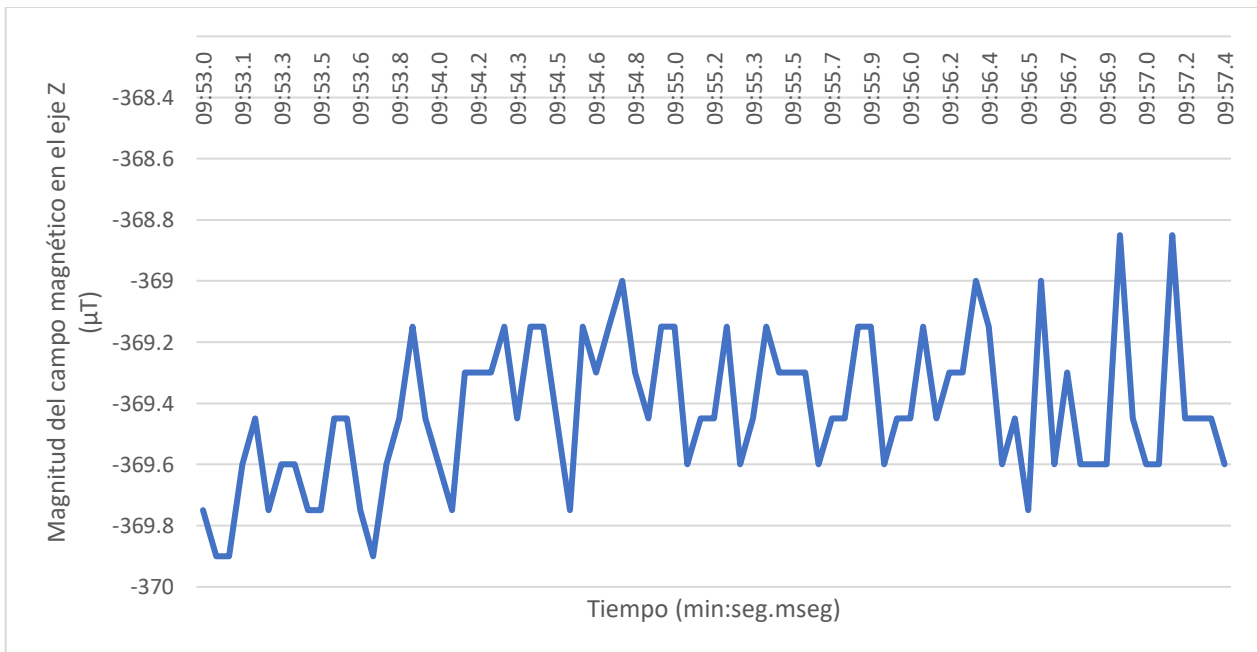


Figura D.10.4. Mediciones del campo magnético de la gota 10 30 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

D.11 Gota 11

- 0 minutos

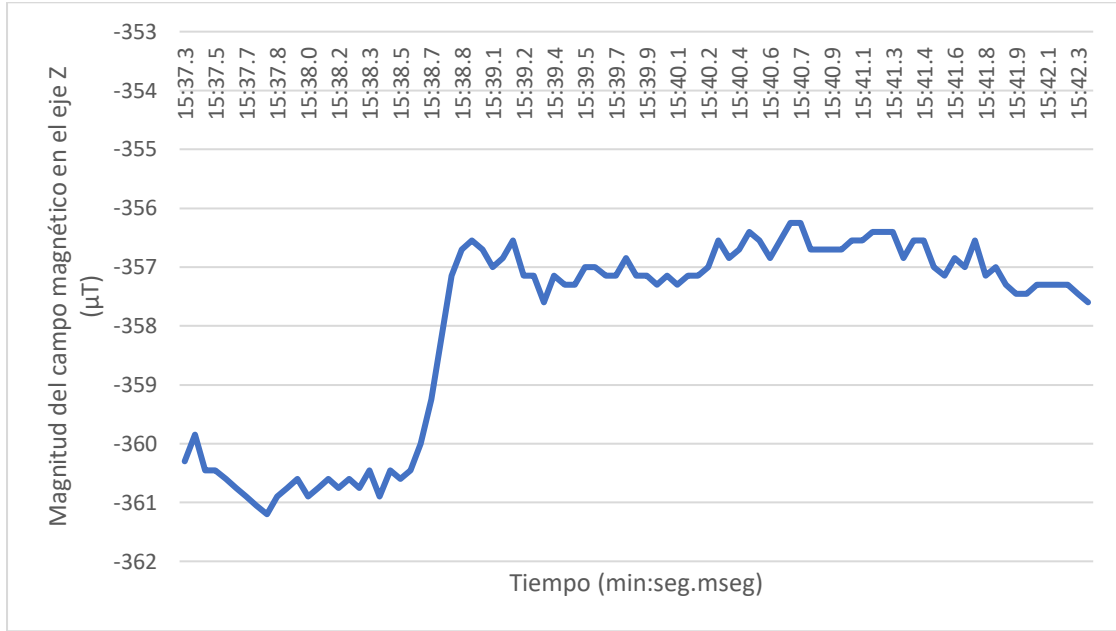


Figura D.11.1. Mediciones del campo magnético de la gota 11 0 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- 10 minutos

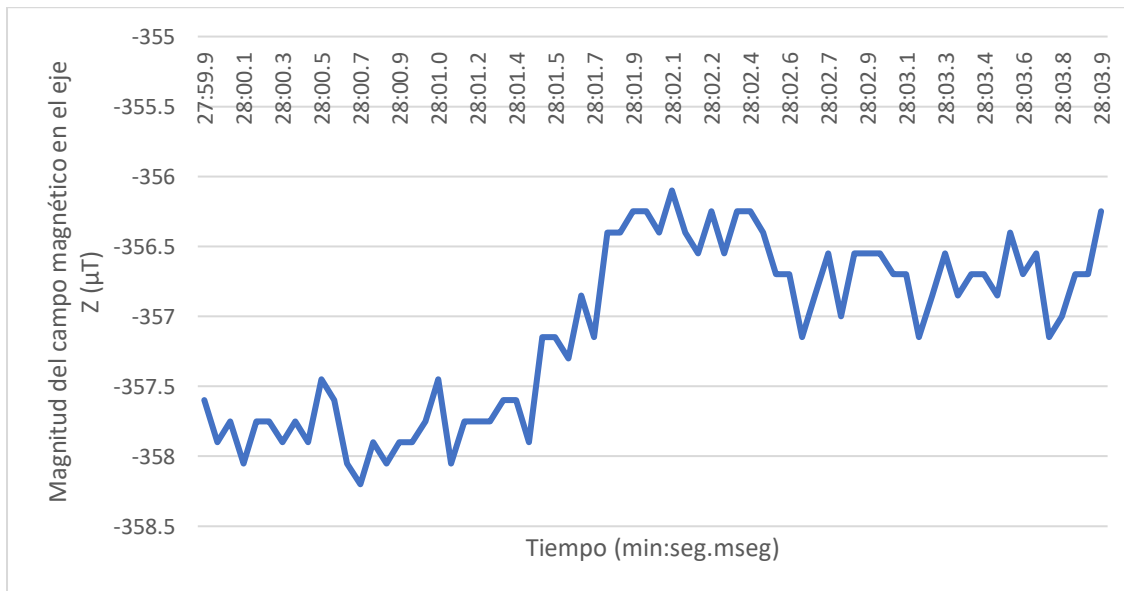


Figura D.11.2. Mediciones del campo magnético de la gota 11 10 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **20 minutos**

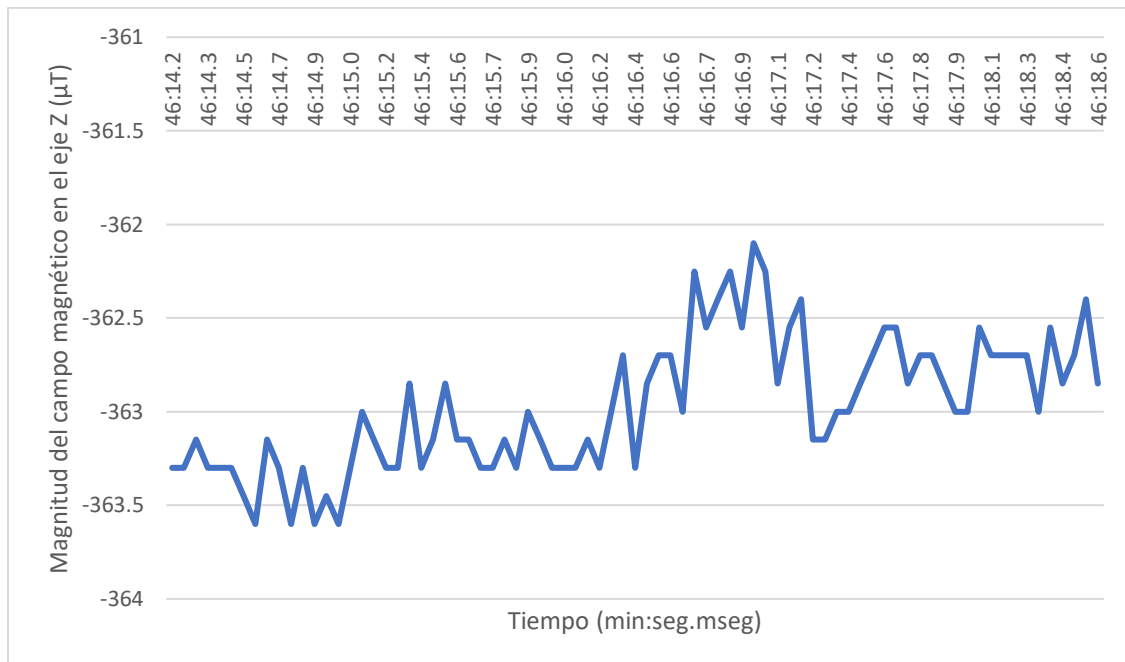


Figura D.11.3. Mediciones del campo magnético de la gota 11 20 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **30 minutos**

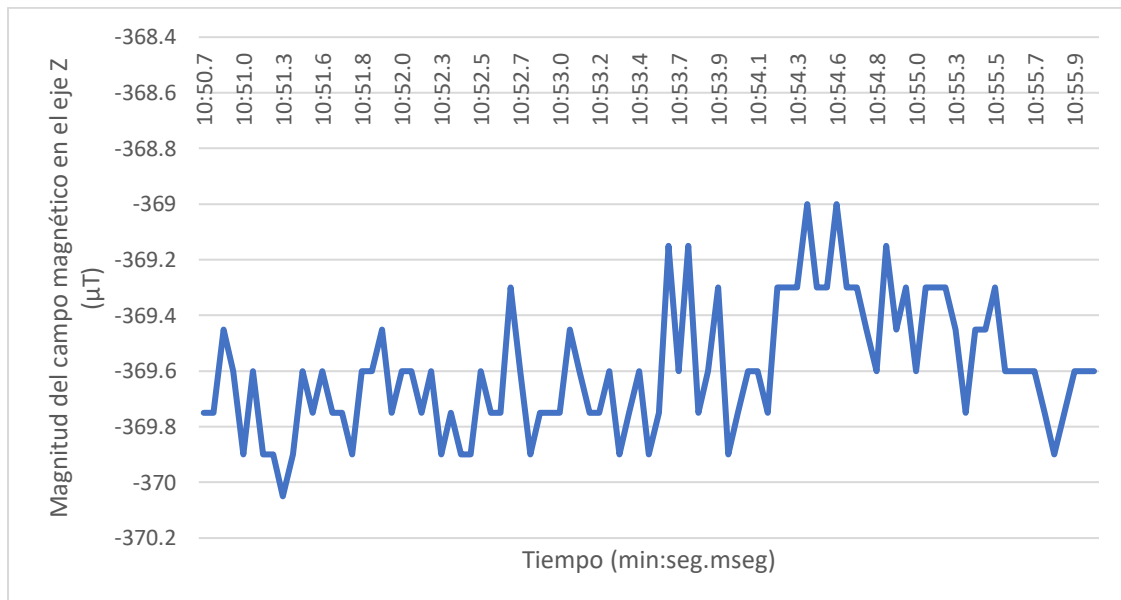


Figura D.11.4. Mediciones del campo magnético de la gota 11 30 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

D.12 Gota 12

- **0 minutos**

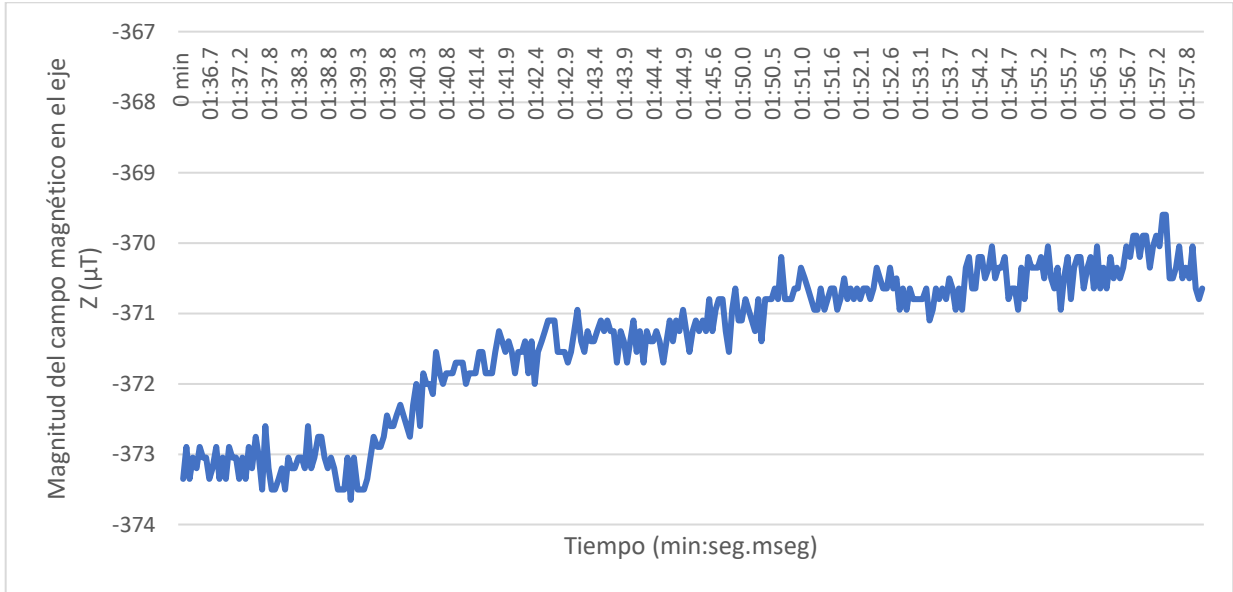


Figura D.12.1. Mediciones del campo magnético de la gota 12 0 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **10 minutos**

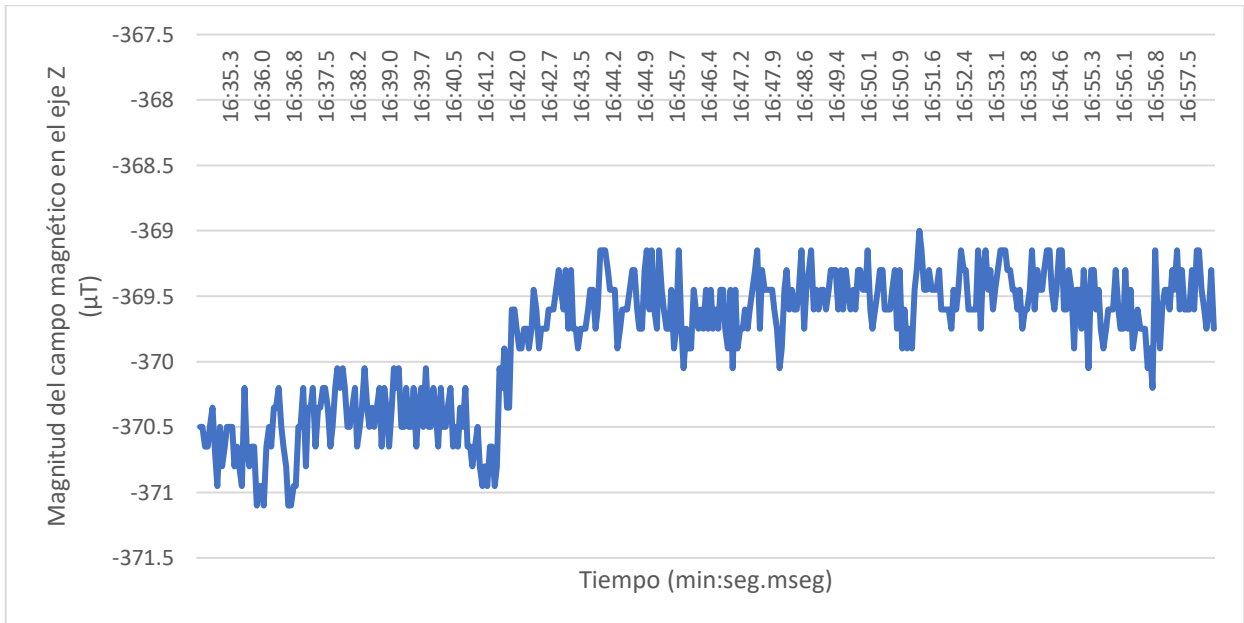


Figura D.12.2. Mediciones del campo magnético de la gota 12 10 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **20 minutos**

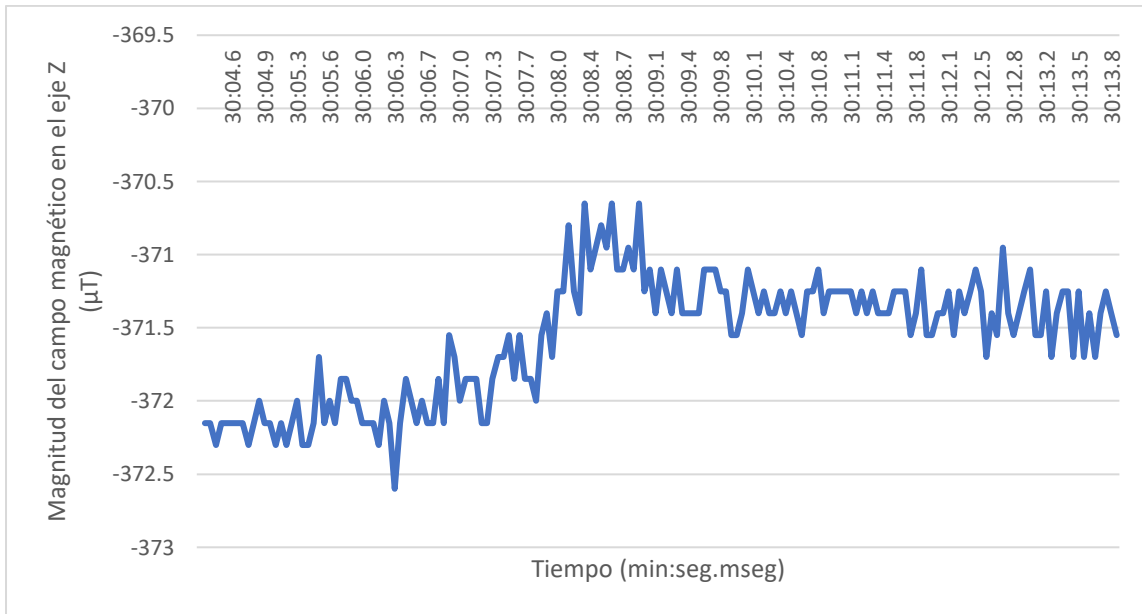


Figura D.12.3. Mediciones del campo magnético de la gota 12 20 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

- **30 minutos**

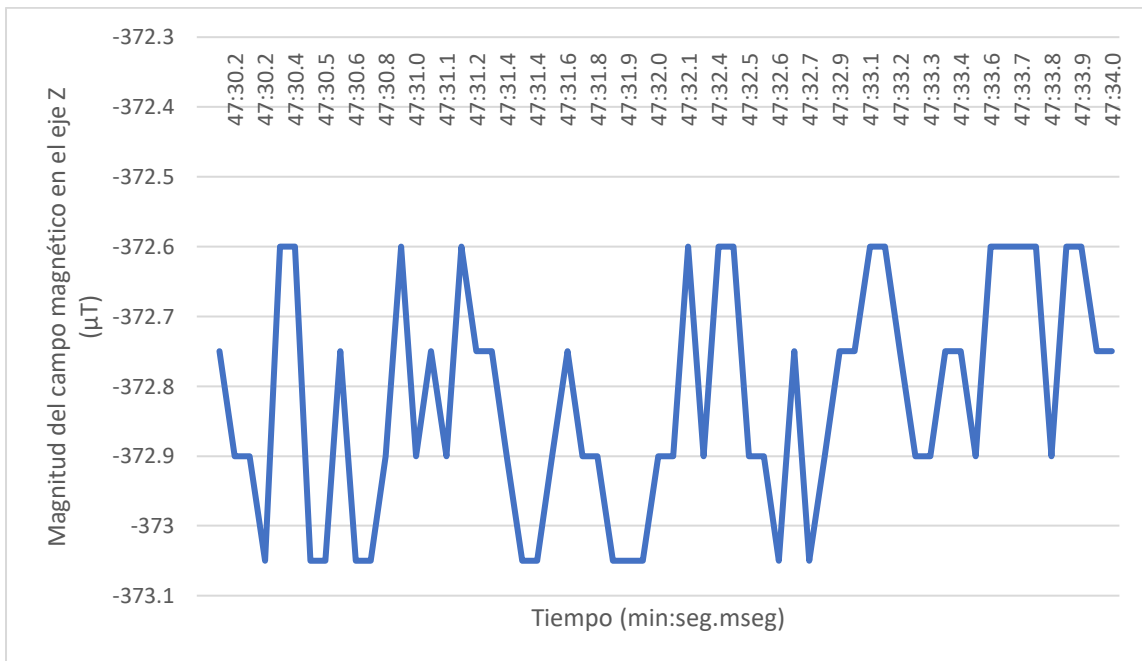


Figura D.12.4. Mediciones del campo magnético de la gota 12 30 minutos después de que esta se depuso. Fuente: Elaboración propia

Anexo E: Guía de ensamble y desensamble del diseño.

La presente sección se muestra como una guía para el ensamble y desensamble del diseño electromecánico mostrado en la figura E.1



Figura E.1. Ensamble electromagnético diseñado. Fuente: Elaboración propia

E.1 Desensamble

1. Remover los dos envases tal y como se muestra en la figura E.1.1, en donde se observa que se remueve el corcho y se sacan los envases inclinándolo levemente tal y como se muestra en la figura E.1.1.



Figura E.1.1. Procedimiento de extracción de envases. Fuente: Elaboración propia

2. Remover los cuatro tornillos de fijación de la tapa frontal y remover dicha tapa tal y como se muestra en la figura E.1.2.

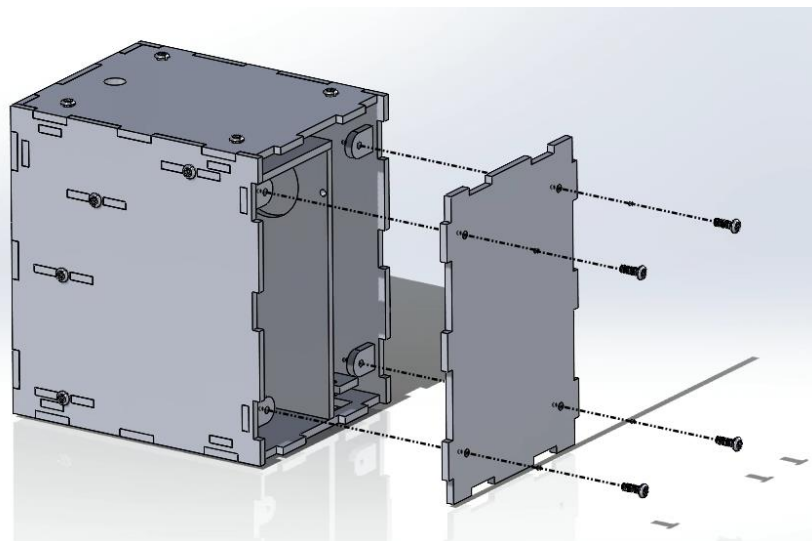


Figura E.1.2. Procedimiento de extracción de tapa frontal. Fuente: Elaboración propia

3. Remover los cuatro tornillos de fijación de la tapa superior y remover dicha tapa tal y como se muestra en la figura E.1.3, tomando la precaución de no jalar muy fuertemente pues aún el botón está conectado a la placa perforada y adherida a la tapa.

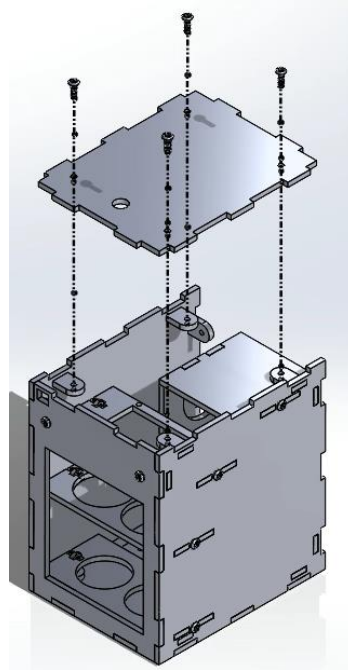


Figura E.1.3. Procedimiento de extracción de tapa superior. Fuente: Elaboración propia

4. Remover la tuerca que ensambla el tornillo a la placa superior tal y como se muestra en la figura E1.4.

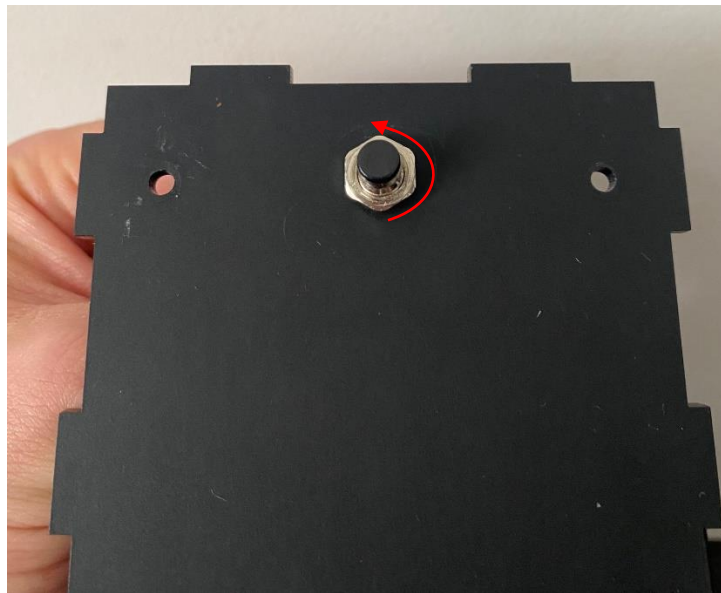


Figura E.1.4. Procedimiento de remoción de tuerca del botón en tapa superior. Fuente: Elaboración propia

5. Remover los dos tornillos de fijación de la tapa trasera y remover dicha tapa tal y como se muestra en la figura E.1.5, tomando la precaución de no jalar muy fuertemente pues aún la terminal de conexión está conectado a la placa perforada y adherida a la tapa.

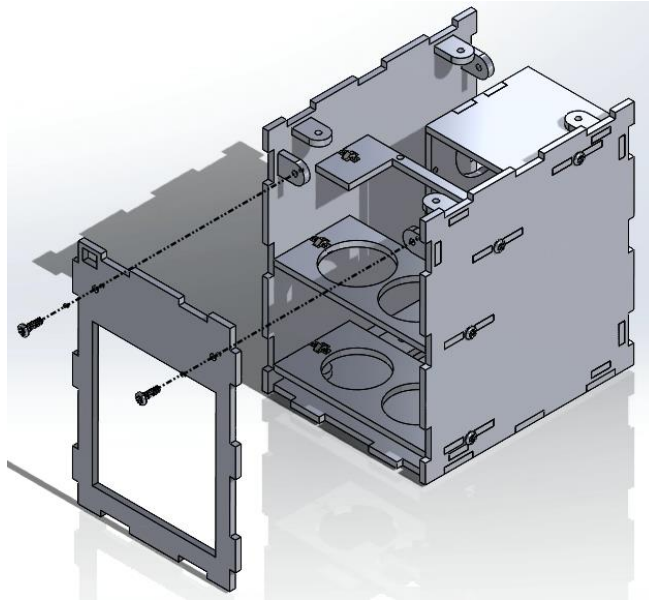


Figura E.1.5. Procedimiento de remoción de tapa trasera. Fuente: Elaboración propia

6. Aflojar los tornillos de los terminales marcados en la figura E.1.6 y extraer los cables de dichas terminales. Una vez realizado esto ya se puede jalar de la tapa trasera pues la terminal de conexión ya no está conectada a la placa perforada.

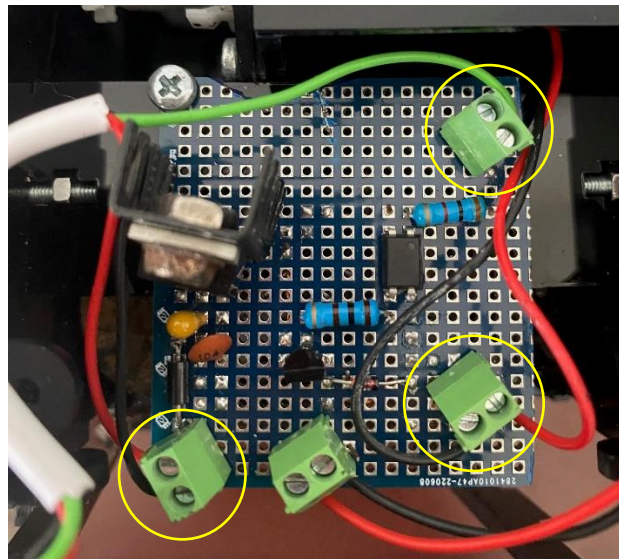


Figura E.1.6. Terminales de conexión que se deben soltar. Fuente: Elaboración propia

7. Remover el tornillo que fija la placa perforada a la carcasa de acrílico el cual se marca en la figura E.1.7.

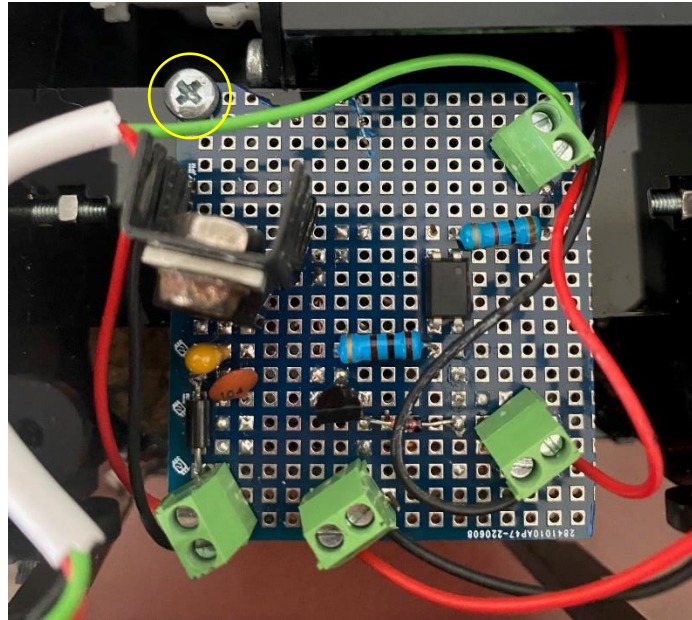


Figura E.1.7. Tornillo de fijación de placa perforada. Fuente: Elaboración propia

8. Remover la punta de goteo mostrada en la figura E.1.8.



Figura E.1.8. Punta de goteo a remover. Fuente: Elaboración propia

9. Remover los cuatro tornillos de fijación de la tapa inferior y remover dicha tapa tal y como se muestra en la figura E.1.9.

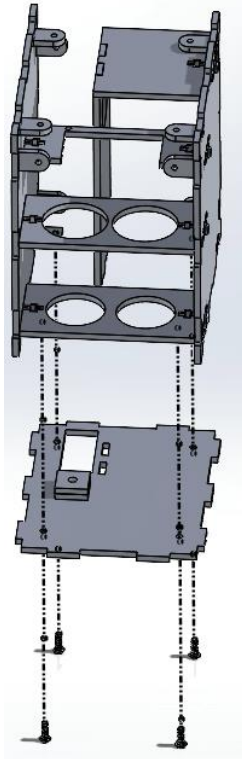


Figura E.1.9. Procedimiento de remoción de tapa inferior. Fuente: Elaboración propia

10. Remover el tornillo y la tuerca que fijan el conjunto que soporta la bomba peristáltica tal y como se muestra en la figura E.1.10 y seguidamente extraer dicho conjunto.

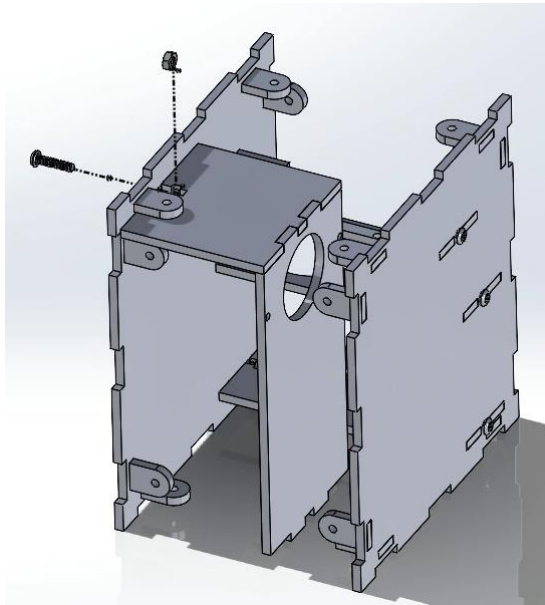


Figura E.1.10. Procedimiento de remoción de tornillo de fijación de soporte de bomba peristáltica.

Fuente: Elaboración propia

11. Remover los tres tornillos y tuercas que acoplan las piezas internas horizontales a las palcas laterales del lado derecho y posteriormente quitar la pieza lateral correspondiente tal y como se muestra en la figura E.1.11.

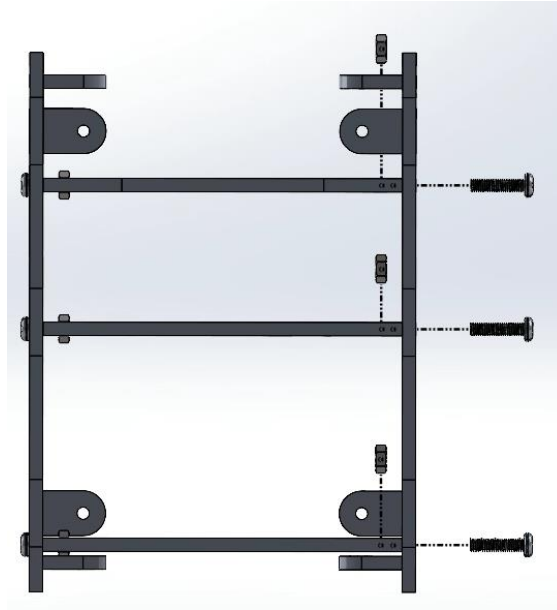


Figura E.1.11. Procedimiento de remoción de tornillo de fijación de placas internas horizontales a placas laterales. Fuente: Elaboración propia

12. Repetir el procedimiento del paso 11 para los tres tornillos y tuercas del otro lado.

E.2 Ensamble

El procedimiento de ensamble es básicamente el proceso de desensamble, pero viceversa tal y como se explica a continuación:

1. Se deben fijar las tres piezas horizontales internas a una de las piezas laterales mediante los tres tornillos y tuercas correspondientes tal y como se muestra en la figura E.1.11. Una vez que se han fijado a una de las piezas laterales, se prosigue fijando la otra pieza lateral de modo que quede tal y como se observa en la figura E.1.11.
2. Una vez que se tienen las dos placas laterales fijadas a las tres placas internas horizontales, se fija el conjunto de soporte de la bomba tal y como se muestra en la figura E.1.10.
3. Fijar la placa inferior tal y como se muestra en la figura E.1.9.
4. Colocar la punta de goteo mostrada en la figura E.1.8.

5. Fijar la placa perforada a la placa horizontal de acrílico mediante el tornillo mostrado en la figura E.1.7.
6. Realizar las conexiones según la nomenclatura especificada en la figura E.1.12.

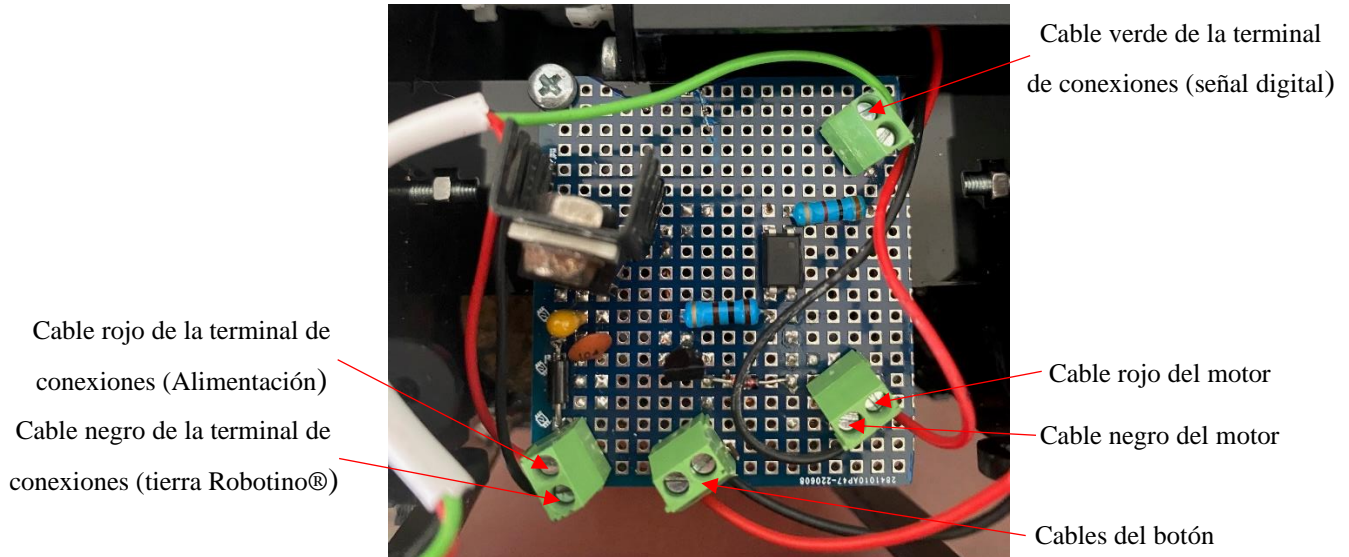


Figura E.1.12. Especificación de conexiones en la placa perforada. Fuente: Elaboración propia

7. Fijar la tapa trasera mediante los dos tornillos correspondientes tal y como se muestra en la figura E.1.5.
8. Fijar el botón a la tapa superior mediante la tuerca mostrada en la figura E.1.4.
9. Fijar la tapa superior mediante los cuatro tornillos correspondientes tal y como se muestra en la figura E.1.3.
10. Fijar la tapa frontal mediante los cuatro tornillos correspondientes tal y como se muestra en la figura E.1.2.
11. Colocar los envases en el espacio correspondiente de la forma en que se observa en la figura E.1.1.

Anexo F: Guía de usuario para la programación.

El presente anexo tiene como objetivo guiar a miembros del proyecto PROE en caso de que quieran modificar o abordar la programación en futuras etapas del proyecto, así como una guía para el/los usuarios que quieran utilizarlo para realizar la deposición.

En la figura F.1 se muestra el GRAFCET correspondiente al programa capaz de generar la trayectoria de línea-arco-línea solicitada por el cliente.

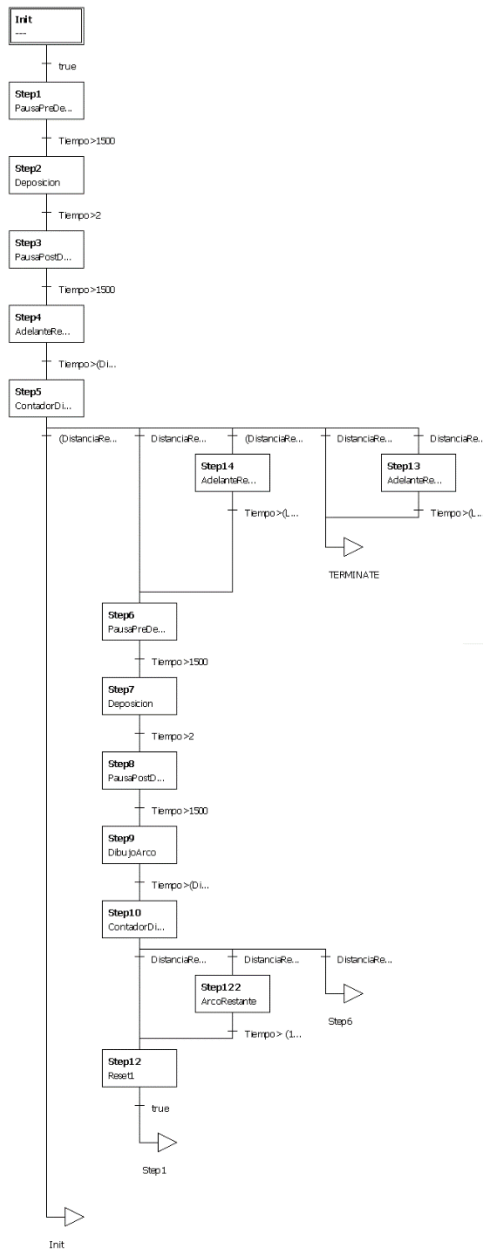


Figura F.1. GRAFCET correspondiente a la trayectoria deseada. Fuente: Elaboración propia

El programa cuenta con dos variables que deben ser ingresadas por el usuario, que son las dos primeras mostradas en la tabla de variables al lado izquierdo del programa en *Robotino® View*, las cuales corresponden a la longitud de las rectas y la distancia entre los centros de gotas (en mm ambas) tal y como se muestra en la figura F.2. La menor distancia entre gotas recomendada es de 9mm.

Name	Type	Value
AA_Distancia_entre_gotas	float	9.000000
AA_LongitudRectas	float	800.000000
CantidadGotas	float	0.000000
CantidadGotasArco	float	0.000000
ContadorArco	float	0.000000
DistanciaRecorrida	float	0.000000
DistanciaRecorridaArco	float	0.000000
Lineas	float	0.000000
Tiempo	float	0.000000
TiempoArco	float	0.000000
TiempoFuncionamientoA...	float	0.000000

Figura F.2. Tabla de variables en *Robotino®View*. Fuente: Elaboración propia

El programa inicia con el trazado de líneas por medio de los steps del 1 al 5. El step 1 consiste en una pausa antes de la deposición de modo tal que el robot se detenga para depositar la gota y garantizar que esta se deposite adecuadamente. Por lo tanto, en la figura F.3 se logra observar que en este momento el robot no tiene velocidad ni en “X” ni en “Y” ni tampoco velocidad angular. El bloque *Onmi-Drive* mostrado en la parte central de la figura F.3 se encarga, a partir de los datos de velocidad en “X”, en “Y” y velocidad angular de entrada, ajustar las revoluciones por minuto de cada uno de los tres motores del Robotino®. La condición de salida de este bloque es un tiempo de 1500 ms, por lo que se coloca un *timer* dentro del bloque que escribe sobre la variable tiempo.

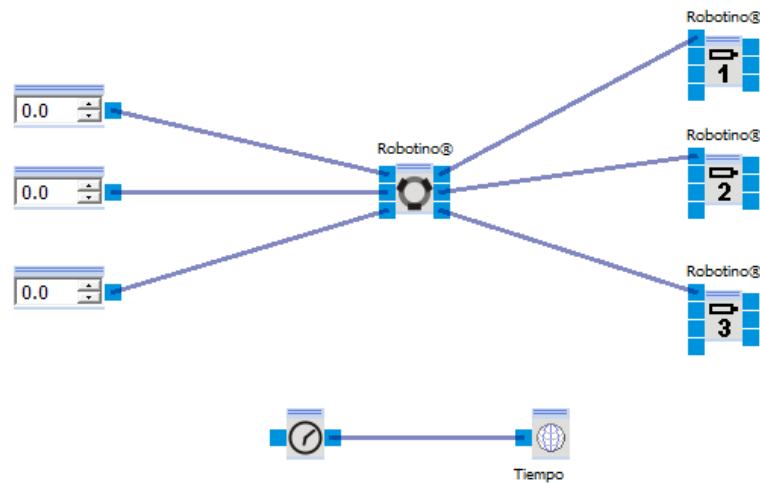


Figura F.3. Bloque de pausa pre-deposición. Fuente: Elaboración propia

Por su parte, en el bloque de deposición, tal y como se observa en la figura F.4 solamente se activa la salida digital 1 a la que se encuentra conectado el sistema diseñado, y también se coloca un *timer* que escribe sobre la variable tiempo pues la condición de salida de este bloque es un tiempo de 2ms.

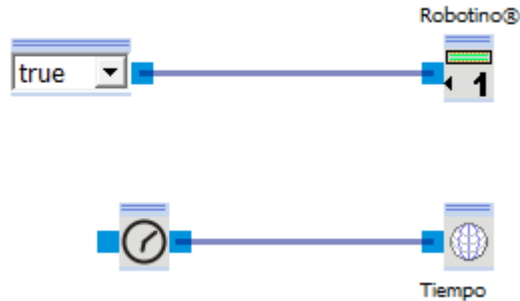


Figura F.4. Bloque de deposición. Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, el bloque de pausa post-deposición es parte de la pausa antes mencionada de modo tal que el robot se detenga para depositar la gota y garantizar que esta se deposite adecuadamente. Por lo tanto, en la figura F.5 se logra observar que en este momento el robot no tiene velocidad ni en “X” ni en “Y” ni tampoco velocidad angular. La condición de salida de este bloque es un tiempo de 1500 ms, por lo que se coloca un *timer* dentro del bloque que escribe sobre la variable tiempo. Asimismo, este bloque se encarga de apagar la salida digital de modo tal que se detenga el bombeo, así como también se encarga de realizar un conteo de gotas en el cual sobre la variable *CantidadGotas* se le suma uno al valor anterior que esta tenía.

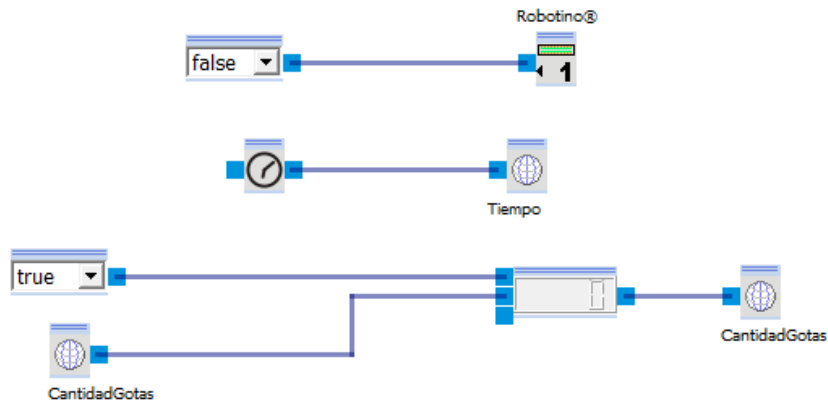


Figura F.5. Bloque de pausa post-deposición. Fuente: Elaboración propia

Por su parte, el bloque AdelanteRecto es el que se encarga de adelantar al robot en una trayectoria recta tal y como se muestra en la figura F.6 en la cual se observa que el robot lleva una velocidad de 25mm/s en el eje X y se tiene también un *timer* pues la condición de salida depende del tiempo, de modo tal que por medio de regla de 3 y considerando la velocidad del robot y la distancia entre gotas, el tiempo que se debe desplazar en milisegundos esta dado por la expresión:

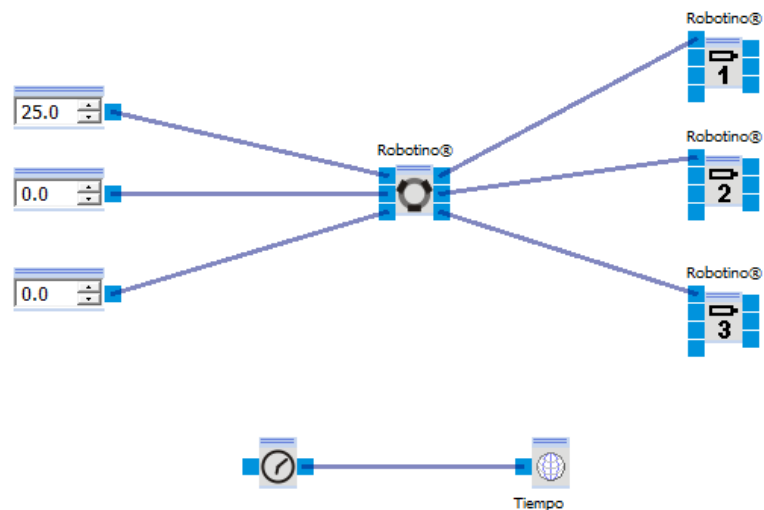
$$\text{Tiempo} > (\text{AA_Distancia_entre_gotas} * 1000 / 25)$$


Figura F.6. Bloque de adelanto en línea recta. Fuente: Elaboración propia

El marco de referencia del robot móvil se muestra en la figura F.7

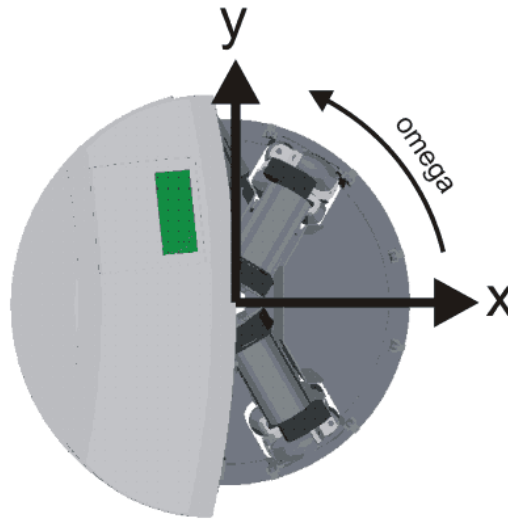


Figura F.7. Marco de referencia utilizado por el robot móvil. Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, el Step5 llamado ContadorDistancia se encarga de contar la distancia de la línea recta que se ha trazado, lo cual se realiza -como se observa en la figura F.8- mediante una multiplicación de la cantidad de gotas por la distancia entre gotas. Asimismo, se inicializa el valor del contador de gotas en el arco en 0.

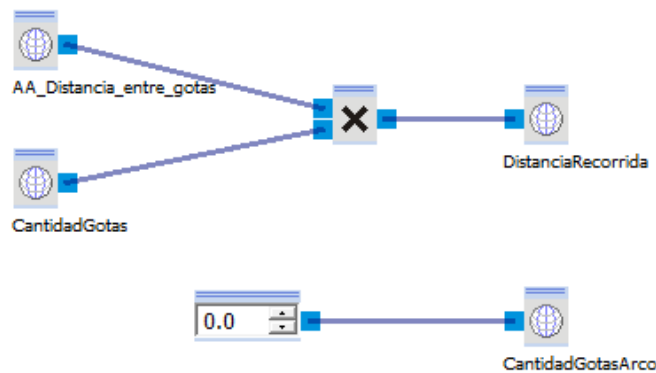


Figura F.8. Bloque de conteo de longitud de línea recta. Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, después del Step 5 se tienen 5 condiciones que se abordaran de izquierda a derecha respectivamente. La primera de ellas es la siguiente: $(DistanciaRecorrida < AA_LongitudRectas) \ \&\& \ ((AA_LongitudRectas - DistanciaRecorrida) \geq AA_Distancia_entre_gotas)$. Esta corresponde al caso en que la longitud de la línea recta que ha trazado el Robotino® es menor a la deseada y la distancia restante por trazar de esta es mayor o igual a una distancia entre gotas, de modo que en este caso se vuelve al step 1 y se recorren nuevamente los bloques explicados anteriormente.

La segunda condición corresponde a que: $\text{DistanciaRecorrida} == \text{AA_LongitudRectas} \ \&\& \ \text{Lineas} == 0$. Esta se cumple cuando la longitud de la recta que ha trazado el Robotino® es exactamente igual a la longitud deseada de estas y además solo se está terminando de trazar la primera línea -que es lo que indica la variable Lineas en cero pues si estuviera en 1 quiere decir que se está terminando de trazar la segunda línea. Si se cumple esta condición se continúa con el Step 6 a partir del cual se comienza el trazado del arco y que se explicará más adelante.

La tercera condición correspondiente a: $(\text{DistanciaRecorrida} < \text{AA_LongitudRectas}) \ \&\& \ ((\text{AA_LongitudRectas} - \text{DistanciaRecorrida}) < \text{AA_Distancia_entre_gotas}) \ \&\& \ \text{Lineas} == 0$ hace referencia al caso en que la longitud de la línea recta que ha trazado el Robotino® es menor a la deseada y la distancia restante por trazar de esta es menor a una distancia entre gotas por lo que se salta a un bloque (Step14) de adelantamiento exactamente igual al mostrado en la figura F.6 pero por un tiempo de $\text{Tiempo} > (\text{AA_LongitudRectas} - \text{DistanciaRecorrida}) * 1000 / 25$ milisegundos definido por la distancia restante por recorrer para alcanzar la longitud deseada.

La cuarta condición corresponde a: $\text{DistanciaRecorrida} == \text{AA_LongitudRectas} \ \&\& \ \text{Lineas} == 1$. Esta se cumple cuando la longitud de la recta que ha trazado el Robotino® es exactamente igual a la longitud deseada de estas y además se está terminando de trazar la segunda línea (pues $\text{Lineas} = 1$), por lo que el programa termina pues ya se llegó al final de la trayectoria deseada. Esta condición se presenta aquí porque primero el programa dibuja la primera recta, pasa a la parte de trazado del arco y finalmente regresa a los Steps del 1 al 5 para trazar la segunda línea.

Y la última condición después del Step5 corresponde a $\text{DistanciaRecorrida} < \text{AA_LongitudRectas} \ \&\& \ (\text{AA_LongitudRectas} - \text{DistanciaRecorrida}) < \text{AA_Distancia_entre_gotas} \ \&\& \ \text{Lineas} == 1$. Esta hace referencia al caso en que la longitud de la línea recta que ha trazado el Robotino® es menor a la deseada y la distancia restante por trazar de esta es menor a una distancia entre gotas por lo que se salta a un bloque (Step13) de adelantamiento exactamente igual al mostrado en la figura F.6 pero por un tiempo de $\text{Tiempo} > (\text{AA_LongitudRectas} - \text{DistanciaRecorrida}) * 1000 / 25$ milisegundos definido por la distancia restante por recorrer para alcanzar la longitud deseada y una vez que se traza esa longitud de recta se termina la segunda línea y por ende también el programa.

Ahora se procede a explicar los bloques de trazado del arco, correspondientes a los Steps del 6 al 12, a los cuales se salta después de que se cumple ya sea la segunda o la tercera de las

condiciones explicadas anteriormente. El bloque Step 6 corresponde a una pausa pre-deposición exactamente igual al mostrado en la figura F.3 para garantizar que la gota se deposite adecuadamente, con una condición de salto de un tiempo de 1500ms también. Seguidamente, el bloque Step7 de deposición es exactamente igual al mostrado en la figura F.4, con una condición de salto de tiempo de 2ms también.

Por su parte, la pausa post deposición del Step8 es exactamente igual al mostrado en la figura F.5 e igualmente con una condición de salto de 1500ms, pero con la diferencia de que el conteo se realiza sobre una variable de cantidad de gotas específicamente del arco tal y como se muestra en la figura F.9.

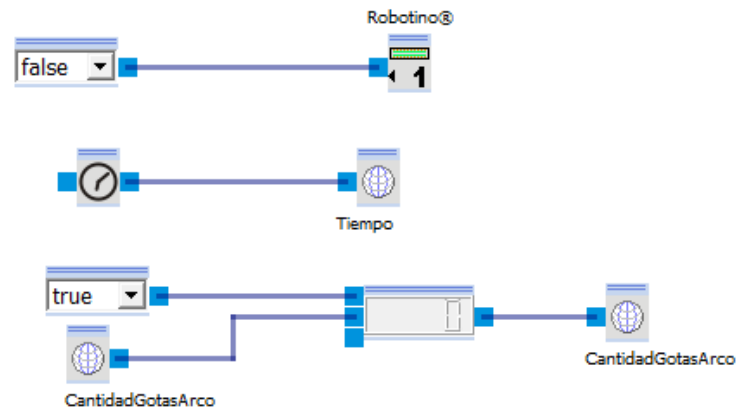


Figura F.9. Bloque de pausa post-deposición en el trazado del arco. Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, el bloque Step9 llamado DibujoArco se encarga de desplazar el Robot en la trayectoria de arco deseada. El arco por trazar se define de 70cm de radio pues es el menor radio posible para evitar que la llanta trasera del Robotino® pase por encima de las gotas depositadas. Un radio de 70cm implica un arco -cuarto de circunferencia- de 1099.56mm. Esto implica que a una velocidad de 25mm/s el Robotino® haría ese desplazamiento en 43.98s, por lo cual en ese tiempo debe rotar 90 grados, por lo que la velocidad angular debe ser de 2.046 grados/segundo negativos por el marco de referencia mostrado en la figura F.7, por lo que se obtiene el bloque mostrado en la figura F.10, en donde igualmente la condición de salto es un tiempo asociado a la distancia entre gotas y la velocidad de desplazamiento del Robotino®: $\text{Tiempo} > (\text{AA_Distancia_entre_gotas} * 1000 / 25)$.

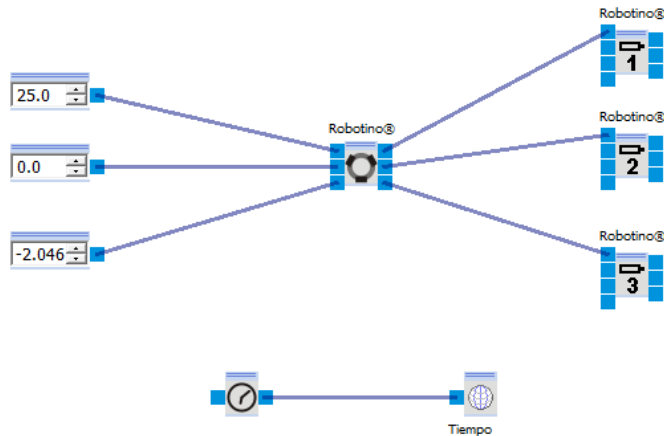


Figura F.10. Bloque de desplazamiento en el trazado del arco. Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, el bloque Step10 se encarga del conteo de distancia de arco trazada por el Robotino®, el cual se muestra en la figura F.11 que consiste en multiplicar la cantidad de gotas del arco por la distancia entre gotas.

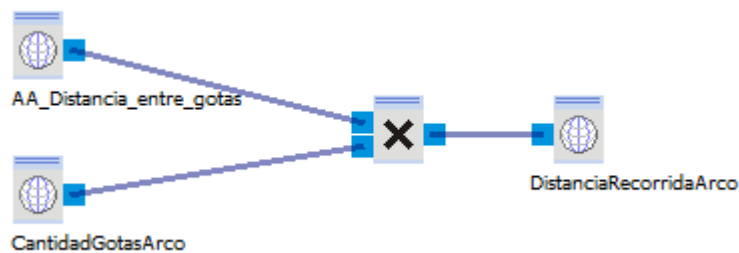


Figura F.11. Bloque de conteo de distancia del arco. Fuente: Elaboración propia

Si $\text{DistanciaRecorridaArco} < 1099.56$ && $((1099.56 - \text{DistanciaRecorridaArco}) \geq \text{AA_Distancia_entre_gotas})$ lo cual quiere decir que si la longitud del arco trazado por el Robotino® es menor a la longitud deseada y la longitud restante es mayor o igual a una distancia entre gotas se procede a saltar al Step6 nuevamente y continuar con el trazado y la deposición de gotas en la trayectoria de arco.

No obstante, si: $\text{DistanciaRecorridaArco} == 1099.56$, que significa que la distancia de arco trazada por el Robotino® es exactamente igual a la deseada se pasa a un bloque de Reset1 mostrado en la figura F.12 el cual pone las variables ContadorArco, DistanciaRecorrida y CantidadGotas en cero para comenzar el trazado de la segunda línea y la variable Lineas en 1 para indicar que ya se va a trazar la segunda línea. Después de ese bloque de Reset1 se salta al Step 1 para comenzar el trazado de la segunda línea.

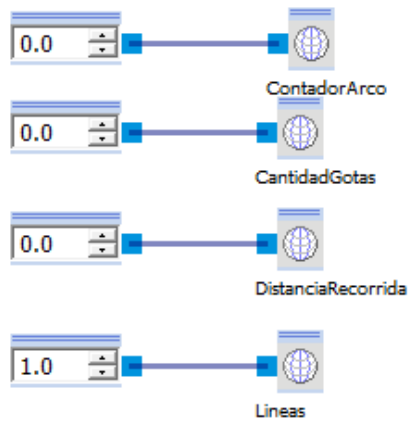


Figura F.12. Bloque de conteo de distancia del arco. Fuente: Elaboración propia

Por su parte, si: $DistanciaRecorridaArco < 1099.56 \ \&\& \ ((1099.56 - DistanciaRecorridaArco) < AA_Distancia_entre_gotas)$, que significa que la distancia de arco trazada por el Robotino® es menor a la deseada y además la distancia restante es menor a una distancia entre gotas, se pasa a un bloque llamado ArcoRestante exactamente igual al bloque DibujoArco mostrado en la figura F.10 pero que solo funciona un tiempo $Tiempo > (1099.56 - DistanciaRecorridaArco) * 1000 / 25$ definido -por medio de regla de tres- a partir de la distancia restante por trazar y la velocidad de desplazamiento del Robotino®. Después de adelantarse la distancia restante, se salta al bloque Reset1 mostrado antes y posteriormente al Step1 para comenzar el trazado de la segunda línea.

De este modo, quedan explicados todos los detalles y bloques del programa encargado de trazar una línea, luego un arco y posteriormente otra línea con una orientación a 90 grados con respecto a la primera en el cual se pueden definir las longitudes de las rectas y la distancia entre los puntos.