



**UNIVERSIDAD
DON BOSCO**

**Facultad de Ingeniería
Escuela de Biomédica**

Proyecto de Investigación:
**Automatización del proceso de preparación de vacunas para inmunoterapia
con alérgenos**

Para optar al grado de:
Ingeniero Biomédico

Autor/es:
**Brandon David Larrama Beltrán LB190643
Ángel Gabriel Barrientos Flores BF210290**

Asesor:
Ing. Leopoldo Hernández Guevara

Lector:
Ing. Oswaldo Carabantes

Soyapango, Mayo 2026

1. Hoja de Aprobación



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADUACIÓN DE GRADO

Modalidad: Proyecto de Investigación

Asesor: Leopoldo Hernández Guevara

Lector: Oswaldo Antonio Carabantes

Director de Escuela: Julia Xochilt Urrutia

En la reunión efectuada el martes 9 de junio a las 9:00 p.m. del año 2026, para el trabajo de investigación titulado:

Automatización del proceso de preparación de vacunas para inmunoterapia con alérgenos

Presentado por:

Egresado 1:	Brandon David Larrama Beltrán	LB190643
Egresado 2:	Ángel Gabriel Barrientos Flores	BF210290
Egresado 3:	*****	*****

Egresado(s) de la carrera: Ingeniería Biomédica

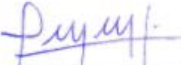
Terminadas las lecturas de las observaciones y en cumplimiento del Normativa de Graduación de la Universidad Don Bosco, se les otorga la siguiente calificación:

Nota del asesor (50%): 9.3

Nota del lector (50%): 9.5

NOTA FINAL: 9.4

Acta firmada el viernes 12 de junio del año 2026.


Firma Asesor


Firma Lector


Firma del Director de Escuela



2. Dedicatoria y agradecimientos

Dedico las primeras líneas de este trabajo a mis padres, por brindarme su respaldo absoluto en el cumplimiento de mi anhelo de ser ingeniero biomédico. A mi madre, por su presencia constante en cada noche de desvelo; y a mi padre, por enseñarme que los tropiezos son el verdadero cimiento del aprendizaje. Agradezco a Dios por otorgarme la fortaleza para culminar mi carrera profesional y por permitirme cosechar frutos a lo largo de ella. Extiendo mi gratitud a mi familia, por ser un soporte incondicional, y a mis amigos, por recordarme el valor de la alegría en los momentos difíciles. Con profundo respeto, honro la memoria de la Dra. Marta Alicia Larín (Q.E.P.D.), quien despertó en mí la curiosidad por la investigación biomédica. Asimismo, expreso mi sincero agradecimiento a la Fundación Rafael Meza Ayau, por la beca parcial que me permitió cursar mis últimos dos años de estudio; a la Universidad Don Bosco, por abrirme las puertas a nuevos conocimientos; y a mi asesor, el Ing. Leopoldo Hernández, por su guía experta y rigor académico en el desarrollo de este proyecto.

-Ing. Brandon David Larrama Beltrán.

Primeramente, quiero agradecer a mis padres por su apoyo incondicional, esfuerzo y sacrificio a lo largo de toda mi formación académica. Gracias por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios y por confiar siempre en mí. Su apoyo incondicional, ha sido fundamental en cada etapa de este camino, este logro también les pertenece a ustedes. De igual manera, deseo expresar mi más sincero agradecimiento al ingeniero Leopoldo Hernández por su apoyo y orientación durante el desarrollo de este proyecto.

-Ing. Ángel Gabriel Barrientos Flores.

3. Índice

1. Hoja de Aprobación.....	2
2. Dedicatoria y agradecimientos	3
3. Índice	4
4. Índice de Figuras y Tablas	6
4.1 Índice de Figuras	6
4.2 Índice de Tablas.....	7
5. Glosario de términos.....	7
6. Resumen.....	9
7. Introducción	10
8. Planteamiento del Problema	10
9. Justificación	11
10. Objetivos	12
10.1 Objetivo General.....	12
10.2 Objetivos Específicos	12
11. Alcances y limitaciones	13
12. Marco Teórico	13
12.1 Automatización de procesos	13
12.2 Concepto de alergia y respuesta inmunológica	16
12.3 Tipos de alergias y manifestaciones clínicas.	16
12.4 Inmunoterapia con alérgenos	18
12.5 Pruebas alérgicas.....	19
12.6 Protocolos de inmunoterapia	20
12.7 Proceso de creación de las vacunas.....	21
12.8 Diluciones.....	23
13. Metodología	25
13.1 Tipo de estudio.....	25
13.2 Población y muestra	26

13.3	Técnicas e instrumentos	26
13.4	Procedimiento	30
13.5	Análisis de datos	30
14.	Desarrollo del proyecto o propuesta de solución	32
14.1	Módulo de Usuario.....	32
14.2	Módulo de control	38
14.2.1	Modo “Mezcla Personalizada”	38
14.2.2	Modo “Diluciones Seriadas”	41
14.2.3	Comunicación usuario-microcontrolador	42
14.2.4	Codificación en microcontrolador	45
14.3	Módulo de dosificación.....	57
14.3.1	Carrito móvil.	57
14.3.2	Movimiento del embolo de la jeringa.....	58
14.4	Sistema de posicionamiento.	60
14.4.1	Calibraciones	63
14.5	Presupuesto	64
15.	Resultados	66
15.1	Panel frontal	66
15.2	Prototipo 3D.	67
15.3	Diagrama de bloques del sistema.	69
15.3.1	Usuario.....	69
15.3.2	Módulo de usuario	70
15.3.3	Capa de supervisión	70
15.3.4	Interfaz de comunicación (NI-VISA)	70
15.3.5	Módulo de control	70
15.3.6	Proceso físico	71
15.4	Diagrama de flujo	71
15.4.1	Primer segmento	71
15.4.2	Segundo segmento.....	73

16. Discusión	75
17. Conclusiones y Recomendaciones	77
18. Referencias	78
19. Anexos	82
19.1 Anexo A	82
19.2 Anexo B	83

4. Índice de Figuras y Tablas

4.1 Índice de Figuras

Fig. 1. Procesos de las pruebas cutáneas	20
Fig. 2. Fase inicial interfaz de usuario	34
Fig. 3. Arreglo con control de parámetros de concentrados por posición	36
Fig. 4. Diagrama de bloques para Mezcla personalizada.....	36
Fig. 5. Cálculo de diluciones seriadas.	38
Fig. 6. Mezcla personalizada con comunicación a microcontrolador.....	39
Fig. 7. Creación de cadena de caracteres para el volumen de concentrado.....	40
Fig. 8. Diluyente a formato string.....	41
Fig. 9. Diluciones a String	42
Fig. 10. Bloques para comunicación VISA	43
Fig. 11. Comunicación con el hardware.....	44
Fig. 12 Definición de variables y pines	46
Fig. 13. Módulo A4988	47
Fig. 14. Void loop.....	48
Fig. 15. Función que procesa los comandos recibidos.....	49
Fig. 16. Función para mezclar concentrados de alérgenos.....	50
Fig. 17. funciones para extraer números enteros y decimales	51
Fig. 18. funciones para calibrar ubicaciones	52
Fig. 19. Función para mover el carrusel.	53
Fig. 20. Función para mover embolo de jeringa	54
Fig. 21. Función moveToPosition	55
Fig. 22. Funciones para aspirar y dispensar líquidos	55
Fig. 23. Función para mover en eje Z.....	56
Fig. 24. Funciones para subir y bajar el carro móvil	56
Fig. 25. carrito móvil de módulo de dosificación.....	58
Fig. 26. módulo de dosificación	59

Fig. 27. estructura metálica para sujeción de motor.	60
Fig. 28. Carrusel de viales, vista superior	61
Fig. 29. espacio para eje del motor.	62
Fig. 30. Vista lateral módulo de posicionamiento	62
Fig. 31. posicionamiento de finales de carrera	63
Fig. 32. Panel frontal para usuario	66
Fig. 33. Partes del chasis	68
Fig. 34. Equipo ensamblado completamente.	69
Fig. 35. diagrama de bloques del equipo	71
Fig. 36. Diagrama de flujo de los procesos del equipo	74

4.2 Índice de Tablas.

Tabla 1. Tipos de reacciones de hipersensibilidad	17
Tabla 2. Lista de alérgenos	18
Tabla 3. Diluciones seriadas para vial de 10 ml	23
Tabla 4. Diluciones seriadas para vial de 5 ml	23
Tabla 5. Incrementos en vacunación	24
Tabla 6. Comparativa de microcontroladores.	27
Tabla 7. Tabla de datos de consumo energético.	28
Tabla 8. Tabla de tiempos	31
Tabla 9. Tiempos en diluciones seriadas.	31
Tabla 10. Valores por iteración	42
Tabla 11. Tabla de costos de componentes.	64

5. Glosario de términos

Alérgeno: sustancia de la naturaleza predominantemente proteica que, al ingresar a un organismo susceptible, es reconocida como extraña por el sistema inmunitario.

Anafilaxia: reacción inmunitaria de hipersensibilidad sistémica, aguda y potencialmente letal, caracterizada por una liberación masiva de mediadores inflamatorios que compromete gravemente las funciones respiratorias.

Automatización: aplicación de tecnologías mecánicas, electrónicas y de software para el control y ejecución de procesos industriales o de laboratorio sin intervención humana directa.

Baudios: unidad de medida que representa la tasa de modulación o el número de cambios de estado por segundo en un canal de comunicación digital.

Calibrar: conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores indicados por un instrumento de medición biomédica y los valores correspondientes reconocidos por un patrón de referencia estándar

Diluciones seriadas: técnica de laboratorio que consiste en la reducción progresiva y geométrica de la concentración de un soluto en una solución mediante pasos sucesivos de dilución con un factor de proporción constante.

Diluyente: sustancia líquida químicamente inerte y estéril utilizada para disminuir la concentración de un soluto o reactivo biológico sin alterar las propiedades químicas o inmunológicas de los componentes activos.

Final de carrera: sensor electromecánico de proximidad diseñado para detectar la presencia o posición de un componente móvil al llegar al término de su trayectoria geométrica.

Hipersensibilidad: respuesta inmunitaria inadecuada, excesiva o exagerada del organismo frente a antígenos ambientales que normalmente resultan inofensivos para la mayoría de los individuos ocasionando daño tisular o sistémico.

Inmunología: rama de las ciencias biomédicas encargada del estudio del sistema inmunitario.

Interfaz: componente físico o lógico que actúa como frontera o medio de comunicación entre dos sistemas independientes permitiendo el intercambio ordenado de información, datos o señales eléctricas entre el hardware y el usuario o entre dispositivos.

Microcontrolador: circuito integrado programable de alta densidad que incorpora en un solo chip las unidades funcionales esenciales de una computadora.

Puerto serial: interfaz de comunicación digital a través de la cual los datos e información binaria se transmiten bit a bit de forma secuencial y sucesiva sobre una única línea o bus de datos.

Tornillo sin fin: mecanismo de transmisión compuesto por un tornillo helicoidal dispuesto sobre un eje conductor que engrana directamente con una corona circular dentada.

Valor lógico: representación binaria discreta y abstracta en los sistemas digitales y lenguajes de programación que adopta únicamente uno de dos estados posibles mutuamente excluyentes: verdadero (1 lógico) o falso (0 lógico).

Vial: pequeño recipiente o contenedor cilíndrico fabricado en vidrio borosilicatado o plástico de alta densidad, diseñado con un cierre hermético para almacenamiento

seguro, conservación y dosificación de muestras biológicas, sueros o reactivos líquidos.

6. Resumen

El presente proyecto de investigación consiste en el diseño de un dispositivo médico orientado a la producción automatizada de vacunas para inmunoterapia con alérgenos, con el propósito de contribuir a la mejora de los procesos de preparación que se realizan actualmente de manera manual, ya que esto puede presentar limitaciones relacionadas con errores de dosificación, variabilidad en los procedimientos, y posibles riesgos de contaminación cruzada, y es por ello que surge la necesidad de desarrollar alternativas automatizadas que permitan aumentar la precisión, repetibilidad y seguridad del proceso.

El objetivo general del proyecto fue diseñar un dispositivo médico para la producción automatizada de vacunas para inmunoterapia con alérgenos, garantizando la precisión en la dosificación, bioseguridad y control de calidad. Para ello, primero se analizó el proceso manual de preparación de vacunas alérgénicas, identificando sus etapas principales, criterios de bioseguridad y correcta manipulación.

La metodología se basó en el diseño conceptual y funcional del dispositivo, integrando componentes mecánicos, electrónicos y de control. Se desarrolló una propuesta mecánica que es está compuesta por un sistema de carrusel para el posicionamiento de viales, un mecanismo de desplazamiento vertical y un sistema de dosificación mediante jeringa. Asimismo, se diseñó un sistema electrónico utilizando un microcontrolador para el control de motores paso a paso y sensores de posicionamiento. La interfaz de usuario fue desarrollada en el software LabVIEW, permitiendo tener una interfaz de usuario-sistema, la generación comando, y comunicación serial con el sistema de control.

Como resultado se obtuvo una propuesta funcional capaz de automatizar secuencias de posicionamiento, aspiración, dispensación, y dilución de alérgenos, simulando el comportamiento requerido para la preparación de vacunas de inmunoterapia. Además, con la arquitectura lograda, se facilitan futuras mejoras e integraciones tecnológicas.

El diseño propuesto es viable técnicamente como base para futuros desarrollos de automatización en procesos de inmunoterapia con alérgenos, demostrando potencial para reducir la intervención manual y mejorar la precisión del procedimiento; sin embargo, como trabajo futuro se recomienda la realización de validaciones experimentales y clínicas que permitan evaluar el desempeño en condiciones reales de aplicación

7. Introducción

La inmunoterapia con alérgenos es una de las formas de tratamiento para diversas alergias, desde rinitis alérgica hasta alergias alimentarias. Los resultados a las pruebas de alergia son específicos para cada paciente, por lo que, también las vacunas son individualizadas. El proceso de preparación y elaboración de cada vacuna depende del perfil alérgico, tanto como de la etapa del tratamiento en la que se encuentre el paciente; con esta información el médico puede determinar la concentración de alérgenos de la vacuna.

La preparación de las vacunas para inmunoterapia con alérgenos requiere una gran precisión debido a las sustancias que se manipulan por lo que una mala dosificación de ellas sería perjudicial para la salud del paciente. A pesar de ello, el proceso de preparación aún se hace de forma manual, lo cual incrementa el error humano, comprometiendo la vacuna entera.

A nivel nacional, el desarrollo de tecnologías biomédicas locales ha sido históricamente limitado, dependiendo mayormente de la importación de bienes prefabricados. Este proyecto marca un hito en la innovación tecnológica en El Salvador, demostrando que es viable diseñar y calcular robótica de precisión de grado de laboratorio utilizando ingeniería nacional.

La integración de sistemas electromecánicos optimizados para el manejo de fluidos posiciona este trabajo como un precedente pionero en el ecosistema de la automatización médica salvadoreña.

Ante este contexto en la presente investigación se pretende proponer un diseño inicial de un dispositivo médico que permita realizar de manera automatizada la preparación de vacunas destinadas a la inmunoterapia con alérgenos, esto como una alternativa tecnológica orientada específicamente al tratamiento, pero no al diagnóstico de las alergias. El objetivo principal es el de reducir la dependencia de la manipulación manual, reduciendo así el riesgo de errores en la dosificación, así como también mejorar la consistencia y seguridad de la elaboración de las vacunas de cada paciente.

El diseño contempla principalmente la automatización de dos operaciones críticas del proceso en cuestión: la dilución seriada de los extractos alérgicos y también la combinación precisa de alérgenos y volúmenes, permitiendo la elaboración de vacunas personalizadas de acuerdo con el perfil alérgico y la etapa del tratamiento de cada paciente en cuestión.

8. Planteamiento del Problema

A partir del análisis de los antecedentes, podemos darnos cuenta de que la producción de vacunas para inmunoterapia con alérgenos se realiza mediante procesos

manuales, los cuales pueden derivar en errores en la precisión y bioseguridad de la terapia. Si bien, en el área ya se tienen avances tecnológicos, estos no abordan el proceso de producción de las vacunas, sino más bien el diagnóstico de alergias, y es ahí donde identificamos un vacío en el desarrollo de soluciones tecnológicas desde la Ingeniería Biomédica que permitan automatizar el proceso de preparación de las vacunas.

Esta situación nos presenta la necesidad de investigar y desarrollar un diseño ingenieril que permita mejorar la reproducibilidad del proceso y la bioseguridad, y reducir la intervención manual; lo que nos lleva a la siguiente pregunta:

¿Cómo diseñar un dispositivo que permita automatizar la producción de vacunas para inmunoterapia con alérgenos en áreas clínicas?

9. Justificación

La investigación es de interés para el sector biomédico y de la salud, enfocado en servicios especializados en alergología, debido a la necesidad de optimizar los procesos de preparación de vacunas para terapias con alérgenos. En la actualidad estos procedimientos se hacen de forma manual y esto conlleva una alta carga operativa en el médico alergólogo, lo que hace que las probabilidades de error por cansancio incrementen.

La inmunoterapia moderna exige un cambio hacia la medicina personalizada, donde las vacunas alergénicas se diseñan a la medida fisiológica de cada paciente. En este contexto la dosificación manual introduce un margen de error humano que puede comprometer la eficacia del tratamiento o la seguridad del paciente debido a la alta sensibilidad de los alérgenos.

La necesidad de resolver este problema es debido a la precisión y la reproducibilidad cuando se preparan las vacunas, ya que estos son factores críticos que garantizan la seguridad del paciente, y garantizan que el tratamiento sea beneficioso. Sin procesos automatizados diseñados para este fin, se mantiene la dependencia de procesos manuales que son susceptibles a variaciones y riesgo.

Desde el punto de vista tecnológico, la investigación aportará un diseño de un dispositivo con el fin de automatizar la producción de vacunas para inmunoterapia con alérgenos, integrando criterios de sistemas de control automáticos, electrónica y aspectos relacionados a la salud. El aporte se convierte en una solución innovadora en el campo de la Ingeniería Biomédica desde el momento que se aplican principios de automatización a un proceso clínico que ha sido poco intervenido desde el ámbito ingenieril.

Los beneficiarios directos del sistema son tanto los profesionales de la salud como los pacientes en cuestión, siendo que estos se ven favorecidos de manera significativa y

complementaria. Dado que, por un lado, los alergólogos contarán con una propuesta tecnológica que reduce la intervención manual, reduce la carga laboral y mejora la trazabilidad en el procedimiento de elaboración de la vacuna, por otro lado, los pacientes recibirán tratamientos preparados bajo condiciones mucho más controladas y estandarizadas en comparación con las convencionales, lo que impacta directamente en la calidad y seguridad de su atención.

Ambos grupos se benefician de una considerable reducción en el tiempo de consulta, lo que optimiza el flujo de trabajo clínico y mejora la experiencia del paciente. De esta misma forma el sector académico se beneficiaría por medio de la generación de conocimientos aplicados que pueden servir como base para futuras investigaciones o desarrollos tecnológicos.

En cuanto a su importancia científica y tecnológica, contribuye al mejoramiento del vínculo entre la Ingeniería Biomédica y la práctica clínica, ya que promueve el desarrollo de soluciones tecnológicas para necesidades reales del sistema de salud. La investigación resultante podrá servir como referencia para investigaciones posteriores, para la implementación de un prototipo tomando como base el diseño o el mejoramiento de este.

10. Objetivos

10.1 Objetivo General

Diseñar un dispositivo médico para la producción automatizada de vacunas para inmunoterapia con alérgenos, garantizando la precisión en la dosificación, bioseguridad y control de calidad.

10.2 Objetivos Específicos

- Analizar el proceso de creación manual de las vacunas para terapia por inmunoterapia con alérgenos para identificar sus etapas y requerimientos de bioseguridad.
- Buscar normativas o criterios a seguir para la correcta manipulación y dosificación de alérgenos.
- Definir requerimientos mecánicos y electrónicos del sistema propuesto para el proceso de producción de vacunas alérgicas.
- Diseñar la estructura física de la máquina considerando criterios de seguridad, y compatibilidad con el entorno clínico.
- Diseñar la parte mecánica del equipo añadiendo los mecanismos necesarios para la manipulación, dosificación de los alérgenos.
- Desarrollar el diseño del sistema electrónico y de control del dispositivo, orientado a la automatización del proceso manual ya existente.

- Incorporar el diseño mecánico y electrónico en una propuesta funcional que permita la producción de vacunas para inmunoterapia con alérgenos.
- Evaluar el diseño propuesto, verificando su viabilidad y cumpliendo con el objetivo general.

11. Alcances y limitaciones

El alcance de la investigación comprenderá el análisis del proceso manual de preparación de vacunas para inmunoterapia con alérgenos identificando sus etapas, requerimientos, y condiciones de bioseguridad. También se abordará los requerimientos funcionales, mecánicos y electrónicos necesarios para el diseño del dispositivo propuesto.

La Investigación contemplará el análisis y definición de los procesos de dilución de los alérgenos para obtener diferentes concentraciones, desde un enfoque ingenieril, con el fin de diseñar un sistema que permita la automatización del proceso.

La investigación incluirá el desarrollo del diseño del chasis, así como el diseño mecánico y electrónico del sistema, incluyendo la integración conceptual de sus componentes para la propuesta de un sistema que automatiza el proceso. En el trabajo se utilizarán herramientas de diseño y simulaciones para evaluar la viabilidad técnica del diseño.

El producto final que generará la investigación es una propuesta de diseño que integra tanto el diseño de la estructura física como el del sistema electrónico del dispositivo destinado a la producción de vacunas para inmunoterapia con alérgenos, incluyendo planos, diagramas de funcionamiento, especificaciones técnicas y la documentación descriptiva del sistema.

La investigación no contemplará la fabricación física ni implementación de un prototipo del dispositivo diseñado. Asimismo, excluye la validación experimental y clínica del dispositivo y de las vacunas producidas. Se limitará al análisis meramente ingenieril del proceso, no abordará la determinación de dosis terapéuticas, ya que, esto corresponde al ámbito clínico. Tampoco contempla la evaluación inmunológica de pacientes ni el cumplimiento de procesos regulatorios para comercialización del dispositivo, así como un análisis económico detallado de los costos de producción que conllevaría.

12. Marco Teórico

12.1 Automatización de procesos

La automatización de procesos se basa en la implementación directa de sistemas tecnológicos que sean capaces de realizar tareas o secuencias de operaciones con

una intervención humana mínima. Dichos sistemas se basan principalmente en la integración de componentes mecánicos, electrónicos y digitales con el objetivo de realizar acciones como supervisar, controlar y esencialmente optimizar el funcionamiento de un determinado proceso, logrando esto por medio de la implementación de sensores, actuadores y unidades de control programables con el objetivo de que los sistemas automatizados puedan medir variables relevantes del entorno en el que se implementan y ajustar el comportamiento del sistema para mantener condiciones operativas previamente establecidas.

Abordándolo desde el ámbito de la ingeniería, la automatización se emplea principalmente con el objetivo de mejorar la eficiencia, exactitud y repetibilidad de los procesos de producción, es por ello por lo que las tareas repetitivas o las que requieren de una gran exactitud suelen beneficiarse en gran medida de la implementación de este tipo de sistemas, ya que la intervención humana puede generar e incrementar la aparición de variaciones en la ejecución de las operaciones. Siendo así que al reducir la variabilidad de los sistemas por medio de la automatización de estos se logran conseguir resultados más consistentes y mejorar el control de calidad de los procesos. (Groover, 2015)

Normalmente un sistema automatizado estándar suele estar conformado principalmente por tres subsistemas fundamentales, el primero se relaciona con la medición, compuesto concretamente por sensores que cumplen la función de detectar las distintas variables físicas que se obtienen del entorno, como temperatura, presión, posición, volumen, etc. El segundo se enfoca en el sistema de control, dado que se encarga de procesar la información obtenida a través de los sensores, encargándose de determinar las acciones que permiten mantener un funcionamiento óptimo de todo el proceso. Finalmente, el tercer sistema le compete el sistema de actuación, el cual está conformado por actuadores o componentes mecánicos capaces de realizar acciones mecánicas tales como apertura de válvulas o dispensación de líquidos.

Con el paso del tiempo y el desarrollo de nuevas tecnologías eléctricas y de control, las diversas aplicaciones de los principios de automatización han sido aplicados en múltiples campos fuera del industrial como suele ser lo más tradicional, dentro de los cuales destaca el ámbito de la biomédica, donde ha tenido un crecimiento particularmente significativo en laboratorios clínicos y centros de investigación. La automatización ha facilitado que en entornos de esta clase puedan mejorar los procedimientos experimentales y reducir el riesgo de errores generalmente asociados a la manipulación o intervención humana de muestras biológicas o reactivos químicos. (Bolton, 2015, págs. 1-9)

Dentro de los laboratorios clínicos se realizan numerosos procedimientos que implican operaciones repetitivas y precisas de pequeñas muestras de líquidos que en muchas

ocasiones requieren de un manejo especializado. Entre estas operaciones se pueden mencionar preparaciones de soluciones, la dosificación de reactivos, la mezcla de compuestos y la realización de diversas diluciones seriadas. Es por ello por lo que, al momento de realizar estos procesos de manera manual, se genera variabilidad en mediciones dado que la precisión de estas depende en gran medida de la habilidad y experiencia del operador. Por esta razón la implementación de sistemas automatizados implica una reducción significativa de estas variaciones e incrementando la productividad de los procesos. Dentro del contexto clínico uno de los procedimientos que destaca por requerir especialmente de una manipulación precisa de líquidos es la preparación de vacunas utilizadas en inmunoterapia alérgica, este tipo de tratamientos se emplea en pacientes que poseen hipersensibilidad frente a alérgenos ambientales concretos y se basa en la administración controlada de extractos alérgicos con la intención de inducir una tolerancia inmunológica y disminuir la intensidad de las reacciones alérgicas. (Mohamed H. Shamji, y otros, 2023)

Para la preparación de estas vacunas se requiere de la realización de varias etapas de medición, dilución y mezcla de extractos alérgicos en concentraciones específicas. Además de que en muchos casos se requiere de personalización de los tratamientos para cada perfil alérgico de los distintos pacientes identificados para las determinadas pruebas clínicas, variando y combinando distintos alérgenos en una misma solución. Es por esto mismo que el proceso requiere de un control preciso de los volúmenes utilizados y de las relaciones de dilución de los distintos componentes de la formulación. De manera bastante convencional este tipo de procedimientos suelen realizarse de forma manual, por medio de la implementación de jeringas o pipetas para la extracción y realización de las distintas diluciones correspondientes y pese a que estos métodos han resultado ser completamente funcionales aun presentan muchas limitaciones relacionadas a el manejo de variabilidad e imprecisión de las mediciones y distribución de extractos, además del tiempo requerido para elaboración de cada tratamiento. Bajo este contexto la implementación de procesos automatizados representa una alternativa tecnológica que puede aportar al progreso de la optimización en la elaboración de vacunas alérgicas dada su naturaleza repetitiva y estructurada de las operaciones que implica este procedimiento, siendo ideal para la aplicación de sistemas especializados en el manejo automatizado de líquidos para realizar diluciones y mezclas. Por medio del uso de actuadores controlados electrónicamente es posible replicar de manera consistente los pasos requeridos para la elaboración de las vacunas para el tratamiento de interés.

Una de las principales mejoras que se busca obtener es en la precisión de la dosificación de los extractos alérgicos, aspecto que impacta positivamente en gran medida la trazabilidad de los procesos implementados en la elaboración de las

vacunas, así como la eficiencia del sistema por medio de la optimización del tiempo que toma este.

12.2 Concepto de alergia y respuesta inmunológica

La alergia se describe como una respuesta exagerada del sistema inmune del cuerpo a algunas sustancias inertes presentes en el ambiente, las cuales son normalmente inofensivas. La reacción a los alérgenos, los cuales son sustancias que causan la alergia, es la liberación de histamina y otros químicos del cuerpo. Estos químicos causan los síntomas de las alergias, los cuales normalmente son suaves pero molestos. Sin embargo, a veces los síntomas son mucho peores, e involucran a todo el cuerpo, a esto se le conoce como hipersensibilidad, la cual es una respuesta inapropiada del sistema inmune a antígenos que a la mayoría de las personas no les causan daño, y los síntomas se manifiestan continuamente en diferentes maneras como: náuseas, sarpullido, urticaria, vómito, inflamación en labios, lengua o vías respiratorias, etc. (Dougherty, Alsayouri, & Sadowski, 2023) (LeWine, 2024).

12.3 Tipos de alergias y manifestaciones clínicas.

Los científicos franceses, Paul Portier y Charles Richet fueron los primeros en reconocer y describir las hipersensibilidades. A inicios del siglo 20, como parte de sus estudios de la respuesta de los bañistas en el Mediterráneo a las picaduras de un tipo específico de medusas, demostraron que el agente tóxico en la picadura era una pequeña proteína. Con esto razonaron que provocar una respuesta de anticuerpos podía servir para neutralizar la toxina y proteger el organismo humano o animal. Hicieron un experimento en el cual inyectaron una pequeña cantidad en perros, y semanas después inyectaron una cantidad más alta simulando la picadura de la medusa; desafortunadamente los perros respondieron inmediatamente con vómito, diarrea, asfixia y la muerte. Richet acuñó el término anafilaxis para describir la sobre reacción del sistema inmune, convirtiéndose en la primera descripción de una reacción de hipersensibilidad.

Desde entonces los inmunólogos han aprendido que hay más de un tipo de hipersensibilidad. La hipersensibilidad inmediata presenta síntomas que se manifiestan dentro de periodos de tiempos muy cortos después del estímulo inmunológico. Otros tipos de hipersensibilidad tardan horas o incluso días en manifestarse, y son conocidos como hipersensibilidad de tipo retardada (Kuby, 2013). Hay 4 tipos de hipersensibilidad y cada uno se manifiesta de diferente forma, que son las que se muestran en la Tabla. 1.

La hipersensibilidad de tipo I es la que se toma en cuenta para la investigación, dado que, la inmunoterapia con alérgenos se utiliza de forma casi exclusiva para tratar las reacciones de este tipo de hipersensibilidad. Como se muestra en la Tabla. 1 en los demás tipos de hipersensibilidad no se tiene un agente externo que desencadene la

reacción, sino que son células propias del cuerpo, o sería contraproducente inyectar más antígenos.

Tabla 1. Tipos de reacciones de hipersensibilidad

Hipersensibilidad	Forma típica en la que se manifiesta
Tipo I	Se puede presentar como choque anafiláctico y como anafilaxia localizada como rinitis alérgica, asma, urticaria, alergias alimenticias, y eczemas.
Tipo II	Incluye reacciones a transfusiones de sangre, eritroblastosis fetal, y anemia hemolítica autoinmune.
Tipo III	Incluye reacción de Arthus localizada y reacciones generalizadas como vasculitis necrotizante, artritis reumatoide, lupus eritematoso sistémico, etc.
Tipo IV	Incluye dermatitis por contacto, lesiones tuberculosas y rechazos de injertos.

Este tipo de hipersensibilidad se puede manifestar en diferentes partes o de diferentes formas, las cuales no siempre los pacientes pueden identificar que se tratar de una reacción de hipersensibilidad, pero si estos síntomas continúan se deben tener bajo observación ya que podría existir riesgo de anafilaxis. Muchas veces se involucran múltiples sistemas como los siguientes:

- Piel: picazón, enrojecimiento repentino con sensación de calor en la zona, o urticaria que se puede conectar formando áreas afectadas más grandes de piel inflamada.
- Mucosa: inflamación de los labios, lengua, conjuntiva, sensación de nudo en la garganta o dificultad para tragar.
- Pulmones: sensación de presión en el pecho, respiración corta, sibilancia, ronquera, rinorrea.
- Gastrointestinal: espasmos en el pecho con náusea y atragantamiento, vómito, calambres abdominales, o diarrea.
- Sistema Nervioso Central: alteración del estado mental, depresión leve crónica, un sentimiento de que algo malo va a suceder.
- Ocular: comezón alrededor de los ojos, o irritación o inflamación de una zona.
- Urinaria u órganos sexuales: calambres en la vejiga, calambres uterinos (Dougherty, Alsayouri, & Sadowski, 2023).

En Estados Unidos más de la mitad de la población sufre hipersensibilidad de tipo I, causándoles las reacciones más comunes, y por su parte, las incidencias de alergia continúan incrementando. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), para el año 2050, al menos una de cada dos personas sufrirá desórdenes alérgicos

debido a la acelerada contaminación del aire asociada a la emisión de gases tóxicos y a los cambios climáticos (Kuby, 2013) (Dbouk, Visez, & Ali, 2022).

Los responsables de iniciar la hipersensibilidad de tipo I son los anticuerpos Inmunoglobulina E (IgE) al interactuar con un antígeno multivalente. En un individuo sano, la generación de anticuerpos IgE se produce solo en respuesta a infecciones parásitas; sin embargo, hay algunos individuos denominados como atópicos, los cuales están predispuestos a generar anticuerpos IgE contra antígenos comunes en el ambiente como los que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Lista de alérgenos

Alérgenos comunes en el ambiente	
Polen de plantas	Abedul, ambrosía, césped, hierba timotea.
Comidas	Nueces, mariscos, huevos, frijoles, habichuelas, leche, etc.
Medicamentos	Penicilina, sulfonamida, anestésicos locales, salicilatos (aspirina).
Insectos	Veneno de abeja, veneno de avispa, veneno de hormiga, cucarachas, y ácaros.
Otros	Esporas de moho, pelo de animales y caspa, látex, vacunas.

12.4 Inmunoterapia con alérgenos

A nivel internacional, la inmunoterapia con alérgenos ha sido ampliamente investigada como una estrategia eficaz para tratar enfermedades alérgicas que son causadas por IgE, como por ejemplo la rinitis alérgica, asma o alergia a venenos de insectos. Estudios clínicos han demostrado que es efectiva a largo plazo y la capacidad que tiene de modificar el historial alérgico (Durham & Shamji, 2023).

Desde el año 1911, la inmunoterapia por alérgenos ha sido utilizada como una estrategia de desensibilización e inducción de la tolerancia inmunológica. Esta terapia es conocida a nivel global en el ámbito de inmunología por utilizar extractos específicos de alérgenos para tratar enfermedades alérgicas. Se le considera el único procedimiento terapéutico capaz de modificar el historial natural de las enfermedades alérgicas. El tratamiento funciona como un modulador inmunológico con potencial curativo por medio de la respuesta inmunológica ante alérgenos específicos.

Comparado con el uso de fármacos, esta estrategia de modulador inmunológico no ofrece curar al paciente de forma temporal, se puede llegar incluso a remover la alergia, o mantenerla en control por periodos prolongados aun después de que el

tratamiento ha terminado. El control de las alergias permanece de 6 a 7 años sin necesidad de utilizar medicamentos, y para algunos individuos la permanencia es para toda la vida. En caso de que se suceda algún tipo de recaída, estas ya no suelen ser tan severas como lo fueron antes del tratamiento. (Monteiro, Akio, Santos, & Solé, 2022)

Cuando un individuo presenta alergias, muchas veces se le es fácil darse cuenta de que es lo que desencadena la reacción alérgica, pero en muchas de las ocasiones el individuo no logra identificar cual o cuales alérgenos son los causantes de las reacciones alérgicas. Normalmente estos individuos tienen episodios alérgicos recurrentes, y es necesario que acudan donde un especialista para identificar los alérgenos.

La correcta identificación de los alérgenos es muy importante tanto como para que el individuo pueda evitarlos, y para que los especialistas alergólogos puedan brindar la inmunoterapia específica. Para identificarlos no basta con revisar el historial del individuo, basarse en este puede ser contraproducente, ya que, solo se tiene la certeza del individuo o de sus familiares. Por ello se llevan a cabo procesos diagnósticos como las pruebas cutáneas, o las pruebas in vitro. (Ebo, y otros, 2004)

12.5 Pruebas alérgicas

Las pruebas cutáneas son un método confiable para diagnosticar alergias desencadenadas por IgE en pacientes con hipersensibilidad tipo I. Estas pruebas tienen la ventaja de son mínimamente invasivas, no son costosas, y el resultado se puede ver casi de manera inmediata. Para llevar a cabo este proceso diagnóstico, el especialista debe llevar seguimiento del estado del paciente, y de la intensidad del cuadro alérgico. En todo momento se debe contar con equipo de emergencia necesaria en caso de que el paciente sufra anafilaxia durante la realización de las pruebas, lo cual es común en casos de alergia a comidas o a medicamentos. Las pruebas cutáneas generalmente se hacen en el antebrazo, y en casos pediátricos en la espalda. Se debe dejar un espacio mayor a 2 centímetros entre cada prueba cutánea para evitar que se tenga falsos positivos por contaminación cruzada, así mismo, se puede utilizar un marcador o una cuadrícula para poder identificar correctamente los resultados de la prueba, como se muestra en la fig. 1 literal a). Para llevar a cabo el proceso, el especialista debe hacer uso de una lanceta, la cual debe penetrar la capa epitelial de la piel como se muestra en la fig. 1 literal b). Esta debe ser cambiada para cada tipo de alérgeno, para evitar la contaminación cruzada y para reducir el riesgo de que el especialista se corte al llevar a cabo las pruebas. (Heinzerling, y otros, 2013)

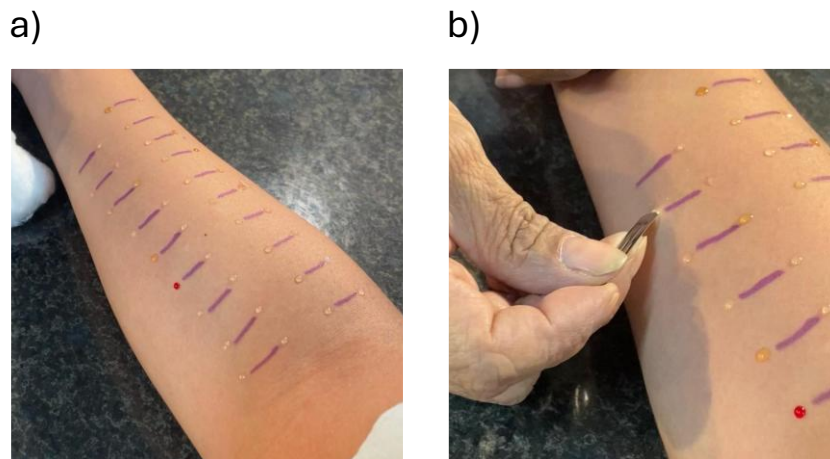


Fig. 1. Procesos de las pruebas cutáneas

Cuando el especialista termina de hacer las pequeñas incisiones en la capa epitelial debe esperar entre 15 y 20 minutos a que el sistema inmune reaccione a los alérgenos. Se cuenta con un control positivo, el cual se utiliza como un punto de comparación. Las ronchas resultantes se miden en su diámetro y se comparan con el diámetro de la roncha resultante del control positivo, el especialista con esta información puede detectar qué alérgenos desencadenan la hipersensibilidad de tipo I.

Sin embargo, en algunos individuos no es posible llevar a cabo las pruebas cutáneas, ya que puede ser contraproducente si estos tienen en su historial cuadros de anafilaxis que atente contra su vida. Si se llegase a practicar las pruebas cutáneas no se tiene certeza de que tanto le afectará, lo cual puede inducir en anafilaxis fatal. Para este tipo de paciente se utilizan pruebas de alergia in vitro, en las cuales se detectan IgE específicos presentes en la sangre del paciente. A comparación de las pruebas cutáneas, las pruebas in vitro no necesitan que el individuo corte el suministro de antihistamínicos, lo cual provee mucha más comodidad al individuo, al evitar que los signos se presenten. Estas pruebas pueden identificar varios grupos de IgE, los cuales sirven para diagnosticar las alergias que padece el individuo, pero también presenta desventajas en contra de las pruebas cutáneas; es un procedimiento más invasivo, ya que se necesita la extracción de sangre, los resultados de las pruebas son tardados, y representan un costo económico más alto. (Ebo, y otros, 1998) (Heinzerling, y otros, 2013) (Sicherer, y otros, 2012)

12.6 Protocolos de inmunoterapia

La inmunoterapia cuenta con dos fases principales: la fase de incremento y la fase de mantenimiento.

En la fase de incremento el individuo recibe inyecciones con una cantidad que va incrementando desde una pequeña cantidad de antígenos, hasta que alcanzan una dosis terapéutica en aproximadamente de 3 a 6 meses. La frecuencia con la que los individuos reciben las inyecciones son una o dos veces por semana, aunque en algunas ocasiones se calendarizan más de dos a la semana.

La fase de mantenimiento se comienza solo hasta que el paciente ha alcanzado una dosis terapéutica y el individuo ya no presenta reacciones adversas de manera local o sistémica. En este punto las inyecciones cambian la frecuencia, generalmente dejando un tiempo de entre 2 a 4 semanas para alérgenos aspirados, o de 4 a 8 semanas en casos donde se utilizan alérgenos de veneno. Una vez que se encuentra en fase de mantenimiento, el tratamiento debe continuar desde 3 hasta 5 años y el individuo debe hacerse pruebas cada 6 a 12 meses mientras esté recibiendo la inmunoterapia. (Independence , 2020) (Chu, 2024)

12.7 Proceso de creación de las vacunas.

Dado que la inmunoterapia por alérgenos representa un riesgo para los individuos que la van a recibir, si esta no se da de la manera adecuada, es importante que los físicos a cargo estén altamente capacitados. En las capacitaciones aparte de evaluar la técnica para preparar los extractos, también es importante que el personal tenga altos niveles de asepsia a la hora de llevar a cabo los procesos.

Que el proceso de mezclado sea optimo es muy importante, por lo que, se basan en muchos criterios como que los alérgenos que se usen si sean de relevancia para el tratamiento del paciente, que no se hagan mezclas que afecten el potencial de otro alérgeno, etc. Pero lo más importante es hacer un cálculo correcto para la dosificación de los alérgenos en cada frasco del paciente. Para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$V1 \times C1 = V2 \times C2$$

Donde:

V1: es el volumen final que quieres preparar

C1: Concentración de extracto que quieres prepara

V2: El volumen de extracto que necesitas diluir

C2: concentración del extracto que utilizarás

La incógnita de esta fórmula es V2, que es el volumen que necesitamos tomar del concentrado de alérgenos para poner en la vacuna que se le suministrará al paciente.

Por ejemplo:

Un paciente resultó ser alérgico al pelo de gato, y se le dará su primer frasco para la inmunoterapia, el especialista desea que la primera dosis sea de 0.1 ml y que la cantidad de alérgeno que se le suministre sea de 400 BAU (Unidades Alérgicas Biológicas) por cada 0.1 ml, entonces el primer paso es calcular la concentración del extracto que se desea preparar, y para ello se divide la dosis deseada de mantenimiento entre el volumen que se le inyecta al individuo

$$C1 = \frac{400 \text{ BAU}}{0.1 \text{ ml}}$$

$$C1 = 4000 \frac{\text{BAU}}{\text{ml}}$$

Los concentrados de alérgenos deben tener el valor de la concentración que se presenta en el frasco, normalmente está presente en la etiqueta, y este se usa como el valor de concentración del extracto, o sea, C2. Por último, el volumen del frasco en el que se guardará la mezcla es, y por ende la cantidad final de la vacuna, se convierte en V1. Con todos estos datos, V2 se convierte en la incógnita que se desea resolver, o sea el volumen necesario para el frasco completo en la vacuna.

$$V2 = \frac{V1 \times C1}{C2}$$

Para este ejemplo asumimos un valor de V1 de 10 ml y un valor de C2 de 10,000 BAU/ml

$$V2 = \frac{10 \text{ ml} \times 4000 \text{ BAU/ml}}{10000 \text{ BAU/ml}}$$

$$V2 = 4 \text{ ml}$$

Ese es el volumen que se debe tomar del extracto para agregarlo al frasco donde se hará la mezcla de los alérgenos que se incluirán en la inmunoterapia. Este procedimiento se debe hacer con cada uno de los alérgenos. Asumiendo que ya se realizaron los cálculos para todos los demás alérgenos y que el frasco donde se almacenará la mezcla es de 10 ml hacemos el siguiente cálculo, que corresponde a la cantidad de diluyente que se debe agregar:

$$\text{diluyente} = V1 - \sum V2$$

Asumiendo que los valores resultantes para otros alérgenos ya fueron calculados, decimos que la sumatoria final de todos los V2 es de 5.6 ml de concentrados de extractos, o volumen total de antígenos, por lo tanto:

$$\text{diluyente} = 10 \text{ ml} - 5.6 \text{ ml}$$

$$\text{diluyente} = 4.4 \text{ ml}$$

El resultado de este cálculo nos indica que la cantidad de diluyente que se debe agregar a la mezcla final son 4.4 ml, para alcanzar el volumen deseado V1, el cual en este caso es de 10 ml (Nelson & Cox, 2014).

12.8 Diluciones.

El proceso explicado anteriormente se utiliza para crear el vial correspondiente a la fase de mantenimiento, el cual como se mencionó, es el vial con el que la paciente continua la fase una vez llegada a los niveles de concentraciones correspondientes a su tratamiento; en otras palabras, contiene la dosis máxima para el tratamiento del paciente.

Una vez creado el vial de la fase de mantenimiento, se deben hacer diluciones, que comúnmente son seriadas, antes de empezar con el tratamiento. La inmunoterapia subcutánea con alérgenos empieza con dosis pequeñas de una mezcla o una solución que ha sido altamente diluida, y con el tiempo se va subiendo la dosis hasta alcanzar la dosis de mantenimiento. Las series de diluciones son de 10 veces como se muestran en la Tabla. 3 y la Tabla. 4, en las cuales se muestran las series de diluciones para viales de 10 ml y 5 ml respectivamente. Estas diluciones normalmente involucran 4 o 5 viales, dependiendo del nivel de tolerancia del paciente, según diagnóstico por parte del especialista haciendo uso de los estudios previos, y siempre se empieza el tratamiento con el vial que tiene mayor dilución. Además, es importante que el personal lleve control de las concentraciones de las mezclas, incluso se recomienda aparte de etiquetar correctamente cada una, se diferencia por colores (Extractopedia, s.f.).

Tabla 3. Diluciones seriadas para vial de 10 ml

Nivel de dilución	Volumen de extracto	Volumen de diluyente	Volumen final	Número de vial	Color
Mantenimiento (1:1)	10 ml	0 ml	10 ml	1	Rojo
1:10	1 ml	9 ml	10 ml	2	Amarillo
1:100	1 ml	9 ml	10 ml	3	Azul
1:1000	1 ml	9 ml	10 ml	4	Verde
1:10000	1 ml	9 ml	10 ml	5	Plateado

Tabla 4. Diluciones seriadas para vial de 5 ml

Nivel de dilución	Volumen de extracto	Volumen de diluyente	Volumen final	Número de vial	Color
Mantenimiento (1:1)	5 ml	0 ml	5 ml	1	Rojo
1:10	0.5 ml	4.5 ml	5 ml	2	Amarillo

1:100	0.5 ml	4.5 ml	5 ml	3	Azul
1:1000	0.5 ml	4.5 ml	5 ml	4	Verde
1:10000	0.5 ml	4.5 ml	5 ml	5	Plateado

Nota. Adaptado de *How to perform dilutions*, por Extractopedia, s.f., <https://www.extractopedia.com/use-of-allergen-extracts/how-to-perform-dilutions/>

Cada especialista decide la manera en la que considera correcta de llevar a cabo el tratamiento, pero coinciden en que las dosis van incrementando en el esquema de vacunación, y normalmente el esquema de vacunación se ve como en la Tabla. 5 en la cual se comienza desde el vial con la menor concentración de alérgenos, o sea, el que tiene mayor dilución hasta alcanzar la dosis de mantenimiento, en la cual el paciente, normalmente se mantiene entre 3 a 5 años y el alergólogo indica los intervalos de tiempo entre cada vacunación. Las vacunas se aplican con intervalos indicados por el médico alergólogo; y normalmente llevan el esquema que se muestra en la Tabla 5, a la semana se aplica una cantidad y a la siguiente va incrementando hasta llegar al valor máximo que es 0.7 ml, que es donde el paciente continua con esa dosis hasta que se termine su vial. Para este caso tomaron como ejemplo los incrementos utilizados por la Dra. Marta Alicia Larin, los cuales comienzan entregando al paciente 0.1 ml de la mezcla para la inmunoterapia, y gradualmente incrementa hasta llegar a 0.7 ml, cantidad con la cual se continúa entregando la terapia hasta que el vial se termina y se puede continuar hasta llegar al vial de mantenimiento (Larin, 2023).

Tabla 5. Incrementos en vacunación

vial		Aplicación de vacunas (ml)					
							0.7
							0.6
					0.5		
				0.4			
			0.3				
		0.2					
1:1	0.1						
							0.7
							0.6
					0.5		
				0.4			
			0.3				
		0.2					
1:10	0.1						
							0.7
							0.6

vial	Aplicación de vacunas (ml)						
					0.5		
				0.4			
			0.3				
		0.2					
1:100	0.1						
							0.7
						0.6	
					0.5		
				0.4			
			0.3				
		0.2					
1:1000	0.1						
							0.7
						0.6	
					0.5		
				0.4			
			0.3				
		0.2					
1:10000	0.1						
							0.7
						0.6	
					0.5		
				0.4			
			0.3				
		0.2					
1:100000	0.1						

Como se puede notar, el proceso manual requiere mucha intervención humana, desde cálculos en las concentraciones de alérgenos necesarios para hacer las mezclas para las vacunas, hasta la creación de la mezcla usando jeringas y altos niveles de asepsia. El proceso manual de preparación de vacunas para inmunoterapia por alérgenos depende mucho del operador, que está encargado de llevar a cabo el proceso, y esto aumenta la probabilidad de errores en la dosificación o dilución, lo cual afecta la seguridad y eficacia del tratamiento.

13. Metodología

13.1 Tipo de estudio

El presente estudio corresponde a un desarrollo de tecnología de enfoque aplicado, ya que tiene como objetivo utilizar conocimientos científicos y técnicos para resolver un problema en concreto, por medio del desarrollo de una propuesta de solución tecnológica. La propuesta es un sistema automatizado para la preparación de vacunas de inmunoterapia por alérgenos.

El estudio es de carácter no experimental, dado que, no se construye ni implementa el sistema físicamente, sino que se desarrolla a nivel de diseño conceptual, funcional y técnico.

13.2 Población y muestra

El presente proyecto de investigación corresponde a un proyecto de diseño y desarrollo tecnológico, por lo que no involucró población humana ni muestras biológicas para análisis experimental o clínico. La información utilizada estuvo conformada por documentación técnica, normativas relacionadas con dispositivos médicos y procesos de inmunoterapia con alérgenos, así como especificaciones de componentes mecánicos y electrónicos empleados en el diseño conceptual del sistema

13.3 Técnicas e instrumentos

Software

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench): Es un entorno de programación desarrollado por National Instruments que fue utilizado como la plataforma principal para el diseño de la interfaz gráfica de usuario (GUI) dentro del sistema, dado que permitió implementarlo en la lógica de control del flujo de trabajo para modos de operación, cálculo de volúmenes de dilución y la comunicación serial con el controlador en cuestión. (National Instruments , 2024)

Arduino IDE: Es un entorno de desarrollo integrado que es utilizado para la programación del microcontrolador Arduino Mega que se implementó, dicho entorno se implementó para escribir y cargar el firmware encargado de interpretar los comandos enviados desde LabVIEW por medio de comunicación serial, de igual forma se utilizó para controlar los motores paso a paso, coordinar los movimientos del carrusel junto con el eje Z y gestionar los finales de carrera. (Arduino, 2024)

Autodesk Inventor: Software de diseño asistido por computadora (CAD) utilizado con el objetivo de desarrollar el modelado de la estructura mecánica del sistema. Este programa permitió visualizar y verificar el ensamblaje de cada uno de los componentes físicos que conforman el sistema principal del equipo, incluyendo el carrusel, el movimiento en el eje Z y los mecanismos de desplazamiento. (Autodesk, 2024)

Hardware

Microcontrolador (Arduino MEGA): Para la implementación del proyecto se realizó una evaluación de 3 microcontroladores: Arduino Mega 2560, ESP32 y Raspberry Pi 4. Dentro del análisis se tomaron en cuenta algunos aspectos como el control en tiempo real, programación, disponibilidad, etc. Con el objetivo de determinar la viabilidad de cada uno se realizó la Tabla. 6:

Tabla 6. Comparativa de microcontroladores.

Criterio	Arduino Mega 2560	ESP32	Raspberry Pi 4
Pines I/O	54 digitales / 16 analógicos	34 digitales / 18 analógicos	26 GPIO (sin ADC nativo)
Comunicación con LabVIEW	Serial nativo, estable	Requiere configuración adicional	Requiere drivers extra
Control en tiempo real	Sí (sin sistema operativo)	Parcial (FreeRTOS opcional)	No determinista (Linux)
Programación	Arduino IDE — gratuito	Arduino IDE / ESP-IDF	Python sobre Linux
Disponibilidad El Salvador	Alta — tiendas locales	Media	Baja — escasez y precio alto
Costo aprox. (2026)	\$12–14 USD	\$8–12 USD	\$55–75 USD
Requiere SO	No	No	Sí (Raspberry Pi OS)
Evaluación	Seleccionado	Viable con limitaciones	No recomendado

El ESP32 ofrece un costo ligeramente menor a los demás y también cuenta con conectividad WiFi-integrada, sin embargo, su comunicación con LabVIEW necesita una configuración adicional, lo cual añade latencia variable al sistema, además de ello posee una menor cantidad de pines I/O lo hace menos adecuado para gestionar simultáneamente tres motores, tres drivers y tres finales de carrera (Systems, Espressif, 2025). La Raspberry Pi 4, por otro lado, tiene una mayor capacidad de procesamiento como tal, pero al ejecutar un sistema operativo Linux de forma general no garantiza tiempos de respuesta en tiempo real, siendo esto un aspecto sumamente crítico para el control de motores paso a paso, además de ello se tomó en cuenta su costo local (\$35 USD) y su disponibilidad limitada en El Salvador lo hace una opción menos viable para este prototipo (Raspberry Pi Ltd, 2025). El Arduino Mega 2560 resulta la opción más adecuada al combinar 54 pines digitales, cuatro puertos UART para comunicación serial estable con LabVIEW, ejecución determinista sin sistema operativo, amplia disponibilidad local y además un costo más accesible, manteniéndose alrededor de \$12–14 USD (Arduino IDE , 2025).

Motor NEMA 17 (1): Es un motor paso a paso estándar utilizado para controlar el movimiento rotacional del carrusel que portará los frascos, permitiendo de esta forma el posicionamiento angular entre las distintas posiciones de cada uno de los frascos.

Motor NEMA 17 con tornillo sin fin de 100 mm (×2): Son motores paso a paso con un husillo integrado que cumplen con la función de ejecutar el desplazamiento lineal

del eje Z, haciendo posible convertir el movimiento rotacional en desplazamiento vertical con alta precisión al momento de posicionar la jeringa y de igual forma permite ejecutar los movimientos de aspirar y dispensar de la jeringa.

Rodamientos para varilla de acero inoxidable de 8 mm (5): se utilizaron para poder garantizar un desplazamiento controlado de manera suave y alineando los ejes de movimiento del sistema, con el objetivo de reducir la fricción y asegurar la repetibilidad en los movimientos del sistema.

Finales de carrera (3): Se consideraron como sensores de posición mecánicos con el propósito de ser utilizados para la calibración y control de cada una de las posiciones de referencia (home) del carrusel y del eje Z.

Vernier: Es un instrumento de medición preciso que fue utilizado para determinar las dimensiones exactas de la jeringa en estado de reposo, es decir, con el émbolo en la posición de 0 ml y extendido. Las medidas obtenidas fueron necesarias para establecer los parámetros de referencia del sistema de dosificación y el diseño del mecanismo.

Driver A4988 (3): Son controladores de motor paso a paso de la marca Allegro MicroSystems que fueron utilizado para gestionar la alimentación y el microstepping de los motores NEMA 17 que se implementaron. Cada driver recibió señales de paso y dirección desde el Arduino Mega, permitiendo así regular con precisión el movimiento de cada uno de los motores sin sobrecargar los pines del microcontrolador. (Allegro MicroSystems, 2014)

Fuente: Para desarrollar el diseño del sistema se tomó a bien realizar un cálculo de carga eléctrica en donde se tomaron en cuenta todos los dispositivos electrónicos y electromecánicos que conforman al equipo, con el objetivo de seleccionar una fuente de alimentación adecuada que sea capaz de suministrar la potencia que necesita el equipo para poder operar de manera estable y segura, tomando en cuenta un margen de reserva que garantice el correcto funcionamiento del equipo a lo largo de su vida útil. En la Tabla. 7 se muestra el cálculo de la potencia total requerida por el sistema:

Tabla 7. Tabla de datos de consumo energético.

EQUIPO	CANTIDAD	VOLTAJE (V)	CORRIENTE (A)	CARGA P/E (W)	CARGA(W)
Motores nema 17	3	12	1.7	20.4	61.2
Arduino		5	0.093	0.5	0.5
Módulos A4988	3	5	1 (por fase)	5	15

Ventiladores de 12 voltios	2	12	0.2	2.4	4.8
Indicadores LED	2	2	0.02	0.04	0.08
CARGA					81.6 W
RESER. (20%)					16.3 W
TOTAL					97.9 W
F. D					0.85
FUENTE CON D.MAX					83.2 W

El elemento que representa la mayor demanda energética en el sistema son los motores paso a paso NEMA 17 dado que operan con un voltaje de 12 V y una corriente de 1.7 A, estos motores poseen múltiples bobinas que requieren de una energización adecuada para poder producir el movimiento paso a paso, lo que representa un consumo considerable dentro de la operación del sistema, además, este tipo de motores tienden a incrementar su gasto energético ligeramente con el paso del tiempo debido al desgaste del equipo y el aumento de pérdidas internas. (Handson Technology, 2023)

De igual forma el sistema utiliza módulos controladores A4988 para el apartado correspondiente al manejo de los motores paso a paso y conforman la segunda mayor demanda energética del sistema, representando un consumo de 15 W por los 3 módulos. (Allegro MicroSystems, s.f). También se tomaron en cuenta los dos ventiladores que cumplen la función de disipar el calor dentro del sistema electrónico del equipo, siendo que ambos generan un consumo energético en conjunto de 4.8 W al momento de ejecutar su función. (GDSTIME, s.f)

Por otro lado, los demás elementos como los indicadores representan un gasto reducido dentro de la operación de todo el sistema, puesto que su demanda energética es prácticamente despreciable dentro del sistema general. (SparkFun Electronics, s.f)

Con el objetivo de incrementar la fiabilidad del sistema se incorporó una reserva del 20% sobre la carga que se ha calculado, basándose en la siguiente secuencia de fórmulas:

$$Reserva = 81.6 W \times 0.20 = 16.3W$$

Por tanto, la potencia total que considera la reserva es:

$$Potencia Total = 81.6 W + 16.3 W = 97.9 W$$

Posterior a esto se realizó el cálculo del factor de demanda de 0.85, que representa la relación entre la carga instalada y la carga real al momento de operar simultáneamente durante el funcionamiento rutinario del equipo. Se tomo esta decisión debido a que al momento de operar no todos los elementos trabajan al 100% de manera simultánea, dado que en cuanto un motor ejecuta una acción otro puede permanecer en reposo total o parcial. Viendo reflejado ese razonamiento en la siguiente formula:

$$P_{final} = 97.9 W \times 0.85 = 83.2 W$$

Concluyendo así que el sistema consume un valor de potencia equivalente a 83. 2 W al momento de operar. Debido a que la fuente comercial maneja valores estandarizados se tomó a bien implementar una fuente que cuente con 12 V y 120 W para poder alimentar el sistema de manera óptima.

13.4 Procedimiento

El desarrollo del proyecto se realizó en diferentes etapas. Inicialmente se investigó sobre los procedimientos y la información teórica necesaria para poder hacer un buen análisis del proceso manual de preparación de vacunas para inmunoterapia con alérgenos, identificando las etapas involucradas. Asimismo, se investigaron protocolos y estándares para el proceso cálculo y dosificación de vacunas alergénicas.

A continuación, se estableció un flujo de trabajo, el cual es necesario para seguir un orden lógico y así poder determinar los pasos a seguir y diseñar el diagrama de bloques que se encarga de mandar los comandos al microcontrolador. Una vez creado, se codificó el microcontrolador para que dependiendo de los comandos que este reciba, trabaje de cierta manera y logre el cometido que el usuario desea.

Posteriormente se realizó el diseño 3D del chasis y el sistema integrado, en el cual se incluye el carrusel, los motores, los sistemas de paro, y todo lo físico integrado en el dispositivo que estará a la vista del usuario, a modo de simular como se vería el prototipo construido en la vida real.

13.5 Análisis de datos

Para saber cuánto tiempo se tarda el equipo en completar la generación de mezclas se tomó como ejemplo, la dosificación del primer vial, en el cual se obtuvo aproximadamente 68 segundos en hacer todo el proceso para este vial, como se muestra en la Tabla. 8. Los tiempos pueden ser variables ya que, la cantidad de volumen que debe aspirar va a cambiar dependiendo lo que el usuario desee que el paciente reciba, por lo tanto, como puede ser 1 ml pueden ser 5 ml, y esto agregaría o quitaría segundos al proceso, por lo que se podría decir que de forma aproximada se tarda un minuto en completar la dosificación del primer vial, y tomando en cuenta que se tienen hasta 9 viales posibles y la parte del diluyente. El tiempo para completar

la creación de una vacuna, desde el cálculo hasta la mezcla personalizada son de aproximadamente 10 minutos y medio.

Tabla 8. Tabla de tiempos

Acción	Tiempo en segundos
Calibración	5
Posicionamiento de carrusel	1
Bajar jeringa	5
Aspiración	10
Subir jeringa	5
Posicionamiento de carrusel vial 0	1
Bajar jeringa	5
Dispensar	10
Subir jeringa	5
Posicionamiento de carrusel enjuague	1
Bajar jeringa	5
Enjuague	10
Subir jeringa	5
Total	68

Para el caso de las diluciones seriadas de igual manera que en el caso anterior se tomaron los tiempos correspondientes a la primera dilución, y cada uno de los tiempos de los pasos se puede medir, por lo que obtendríamos un promedio de tiempo de 90 segundos, el cual puede variar dependiendo de en qué paso se encuentra, por lo que el proceso completo se tardaría alrededor de 7 minutos.

Tabla 9. Tiempos en diluciones seriadas.

Acción	Tiempo en segundos
Calibrar	5
Bajar jeringa	5
Aspirar	2
Subir jeringa	5
Posicionamiento de carrusel	1
Bajar jeringa	5
Dispensar	2
Subir jeringa	5
Posicionamiento de carrusel	2
Bajar jeringa	5
Aspirar	18
Subir	5
Posicionamiento de carrusel	2
Bajar jeringa	5
Dispensar	18

Subir jeringa	5
total	90

14. Desarrollo del proyecto o propuesta de solución

El presente proyecto propone el diseño de un sistema automatizado para la preparación de vacunas para inmunoterapia por alérgenos, con el fin de mejorar la precisión en la dosificación y reducir errores que son asociados al proceso manual, por la intervención humana.

El sistema está compuesto por diferentes módulos que están a cargo del control, la dosificación de los concentrados y diluyente, y gestión del usuario, con ayuda de tecnologías de automatización y control

El sistema está dividido por diferentes módulos encargados de una cosa en concreto, que son los siguientes:

- Módulo de usuario
- Módulo de control
- Módulo de dosificación
- Sistema de posicionamiento.

Se encuentra estructurado de manera que sus diferentes módulos permitan una operación integral: un módulo de interfaz que permite la interacción del usuario con el sistema, un módulo que se encarga de la lógica del sistema, un módulo que permite la dosificación por medio del manejo de concentrados, trabajando en conjunto con el sistema de posicionamiento.

14.1 Módulo de Usuario.

El módulo de usuario tiene la finalidad de ser el puente que comunica al usuario con el sistema por medio de una interfaz gráfica, que, en este caso, se hace con la ayuda del software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), el cual es una herramienta de programación gráfica ampliamente utilizada en aplicaciones que abarcan instrumentación, adquisición de datos y control de procesos que fue desarrollada por National Instruments. Este entorno de programación destaca de entre otros lenguajes de programación tradicionales debido a que se basa en un modelo de flujo de datos, permitiendo que las operaciones se ejecuten cuando los datos están disponibles, lo que da paso a una integración con diversos dispositivos de medición y de control, así como también contribuye a tener una interacción mucho más eficiente con sistemas en tiempo real, lo que facilita la creación de interfaces hombre-maquina (Corp, National Instruments, 2026).

Bajo nuestro contexto, LabVIEW se empleó como el medio de visualización, monitoreo y control del sistema automatizado del equipo, así como también la ejecución de acciones de control sobre los actuadores del sistema.

La interfaz gráfica, cuenta con la opción de escoger entre dos modos de operación del sistema. Uno de los modos es el de creación de una mezcla en específico para un paciente, y el otro modo es el modo de dilución seriada de 4 diluciones en series de 10, es decir que en el orden de 1:1, 1:10, 1:100, 1:1000, 1:10000. El usuario, por medio de un panel frontal, puede decidir, si quiere hacer una nueva mezcla para un paciente, o diluir una mezcla previamente creada.

Para llevar cabo dichos procedimientos, se trabajó el VI (instrumento virtual) junto con un diagrama de bloques en el que se lleva a cabo todo el proceso necesario para hacer los cálculos que requieren

En primera instancia el VI del panel frontal se mira como en la Fig. 2, en la cual no se cuenta con una interfaz amigable con el usuario, ya que solo se ha utilizado para poder tener los bloques correspondientes en la ventana de diagrama de bloques que es donde se trabajan todos los procesos y cálculos necesarios.

Fig. 2. Fase inicial interfaz de usuario

En esta interfaz, la cual en la primera fase del diseño no se encuentra diseñada para que un usuario pueda guiarse de manera fácil, pero para que los diseñadores puedan introducir parámetros, y puedan ver los resultados de dichos parámetros.

Para esta primera fase de diseño, se utiliza la formula:

$$V2 = \frac{V1 \times C1}{C2}$$

Esta fórmula se utiliza, como se explicó en el marco teórico, para poder calcular el volumen necesario de un concentrado para hacer una mezcla específica para un paciente, y en el proyecto es determinante para poder llevar a cabo el proceso de generación de la vacuna.

Al usuario se le permite seleccionar el modo de operación del sistema, el cual puede ser el modo de diluciones seriadas o el modo de “Diluciones seriadas” o “Mezcla personalizada”, por medio de un control enumerado, el cual permite al usuario escoger, en este caso, una de las dos opciones, y a nivel de sistema les otorga a diluciones seriadas el valor de 0 y a mezcla personalizada el valor de 1. Una vez seleccionada una de las dos opciones, se procede a ingresar los parámetros respectivos para el modo de operación seleccionado.

El siguiente paso depende del modo seleccionado, como ejemplificación asumimos que el usuario seleccionó trabajar con el modo “Mezcla personalizada”. Los siguientes parámetros que el usuario debe agregar son: Volumen de mezcla, volumen de inyección, la concentración de alérgenos deseada por volumen de inyección, y la concentración comercial del extracto de alérgeno. Estos parámetros deben ser manejados por el usuario.

Para el ingreso de datos referentes a los concentrados se cuenta con 2 parámetros por cada uno de los extractos, o si lo vemos de otra forma, dos parámetros por cada uno de los alérgenos que el usuario desea en la mezcla. Como podemos ver en la Fig. 3, el usuario debe ingresar estos valores y arriba de ellos se encuentra un interruptor, con el cual, el usuario le indica al sistema que quiere utilizar el vial situado en la posición seleccionada. El límite de viales de concentrado de extracto de alérgeno posibles es de 9, pero al usuario solo se le muestran solamente 3 casillas en las que puede ingresar los parámetros. Logramos esto, utilizando la herramienta de clúster, y dentro de esta agregamos el booleano llamado “Usar” y dos controles numéricos en los que el usuario puede escribir o usar el scroll, estos destinados para los valores de los parámetros C1 y C2. Como siguiente paso, el clúster pasa a estar dentro de un array y de esta forma el usuario no se sobresatura visualmente con 9 pares de parámetros, sino que, puede navegar con el scroll por las posiciones disponibles.

Con los datos previamente ingresados, el software se encarga de hacer el cálculo de cada uno de los de los alérgenos que el usuario activó en el botón “usar” y le ingresó datos.

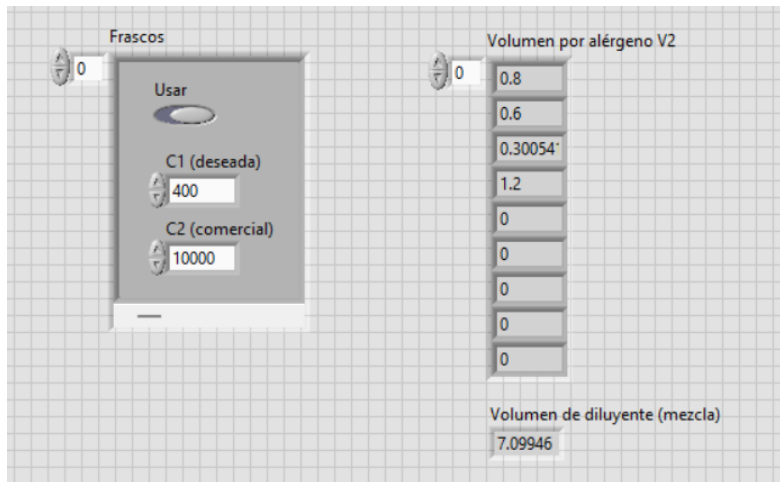


Fig. 3. Arreglo con control de parámetros de concentrados por posición

Para que todo esto sea posible, es necesario trabajar el diagrama de bloques, el cual no es visible para el usuario, solamente para el programador. En la Fig. 4 se muestra el diagrama de bloques completo correspondiente solo al modo de operación “Mezcla personalizada”. Y en este sucede todo el proceso y cálculos matemáticos necesarios para saber las cantidades exactas de sustancias a tomar para crear el vial de mantenimiento, o en proporciones 1:1.

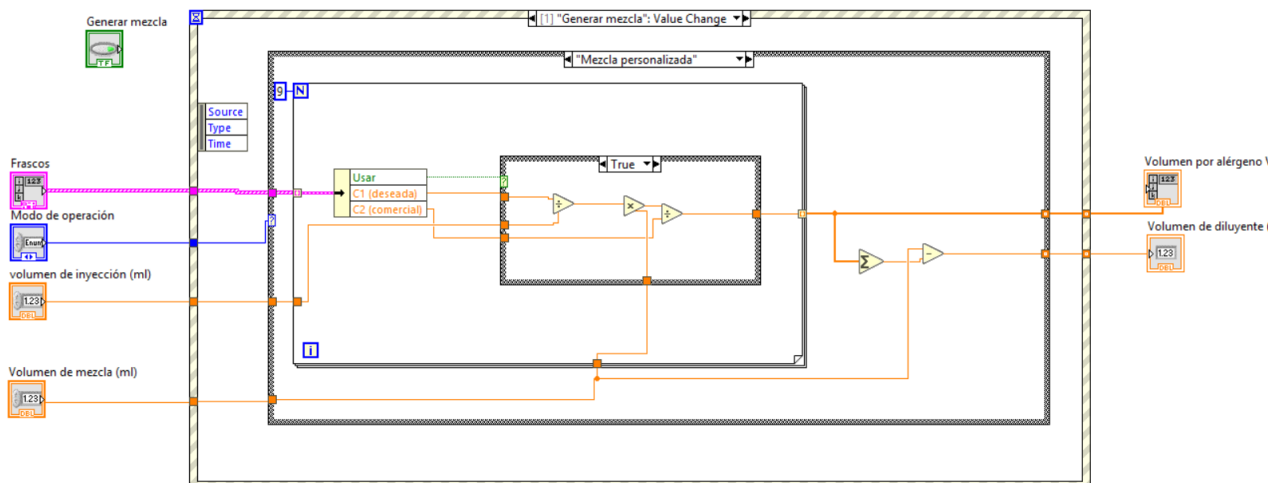


Fig. 4. Diagrama de bloques para Mezcla personalizada

Como primer punto se utiliza la herramienta de software “Event Structure”, la cual permite que se active al haber un evento, en este caso, presionar el botón de “Generar mezcla”. Este botón está configurado para que trabaje en el modo “Latch When Pressed”, y este en lugar de actuar como un interruptor actúa como un pulsador, que al ser presionado activa el evento.

Dentro del “Event Structure” se utiliza otro tipo de estructura, un “Case Structure” al cual se conecta el control enumerado donde se elige el modo de operación, y ahora esta estructura permite tener dos casos, el caso en el que el usuario quiere hacer una mezcla personalizada, y en el que quiere hacer diluciones seriadas. Continuando con el caso en el que se elige hacer una mezcla, el siguiente paso es utilizar los parámetros que el usuario a ingresado. Para ello, dentro del “Case Structure” agregamos otro tipo de estructura llamada “For Loop”, esta estructura nos permite hacer el proceso un número determinado de veces, en este caso 9 veces máximo, correspondiendo al número de concentrados de extracto alérgico máximo que tiene el sistema.

Dentro del “For Loop” hacemos uso de la herramienta “Unbundle By Name”, la cual es necesaria ya que, en un principio para no tener que usar 18 diferentes controles, se decidió hacer un clúster y luego ponerlo dentro de un array, entonces al momento de llevar esta información hacia adentro, se puede decir que llega en conjunto toda, o como un paquete de datos que no se pueden diferenciar por si solos. Con la herramienta “Unbundle By Name” se separa por nombre cada uno de los parámetros que fueron agregados al clúster.

Cuando ya se tiene separado cada uno de los parámetros, podemos hacer los cálculos, pero estos no van indiscriminadamente para todos los 9 viales, el usuario debe activar la opción, en este caso el interrupto “Usar” para que este sea tomado en cuenta por el sistema, entonces para poder hacer esto, dentro del “For Loop” se agrega un “Case Structure” que depende del estado del interruptor. Si el interruptor se encuentra en un 1 lógico toma el valor de valor de concentrado deseado por inyección, y lo divide entre el volumen de la inyección, para obtener el valor real de C1. Luego toma el volumen de la mezcla (V1) y lo multiplica por el resultado anterior (C1), y luego el resultado de esta multiplicación lo divide entre el valor de concentrado comercial del extracto alérgico (C2), y de esta manera obtenemos el valor del volumen que debe tomar del extracto para agregarlo al frasco correspondiente a la mezcla.

Fuera del “For Loop” se hace el cálculo correspondiente al valor de diluyente que se debe agregar. Para ello tomamos el cable resultante de los V2 el cual es un array y hacemos la sumatoria de todos los valores del array. Al valor de volumen V1 le restamos la sumatoria de los V2, para así, obtener el valor del volumen de diluyente que se le debe agregar a la mezcla.

El otro modo de operación del sistema es un poco más sencillo que el de mezcla personalizada, y se puede apreciar cómo está compuesto en la Fig. 5. En este modo, llamada “Diluciones seriadas” como su nombre lo indica, permite que el usuario pueda hacer 4 diluciones de un vial de mantenimiento ya existente, o bien, que haya creado previamente con el modo de operación “Mezcla personalizada”. Para llevar a cabo el procedimiento, primero se debe hacer un cálculo, el cual solamente toma como variante el volumen de la mezcla, que puede ser 5 ml o 10 ml, este llega a un bucle

For, que solamente se repite 4 veces, y se activa al presionar el pulsador “General mezcla”.

El cálculo necesario, dado que son diluciones seriadas que van en factor de 10, primero el valor de volumen de la mezcla se divide entre 10, y el resultado se le resta al valor original de volumen, como se muestra en las siguientes fórmulas:

$$V2 = \frac{V1}{10}$$

$$\text{Volumen diluyente} = V1 - V2$$

Donde, V2 es el valor de volumen que se tomará del vial previo a la dilución que se hará, por ejemplo, si se hace la dilución 1:100 el V2, será tomado del vial correspondiente a 1:10. Mientras que V1, es el valor variable del volumen total con contendrá el vial de dilución (5 o 10 ml). Estos volúmenes son mostrados al usuario mediante un indicador en el panel frontal.

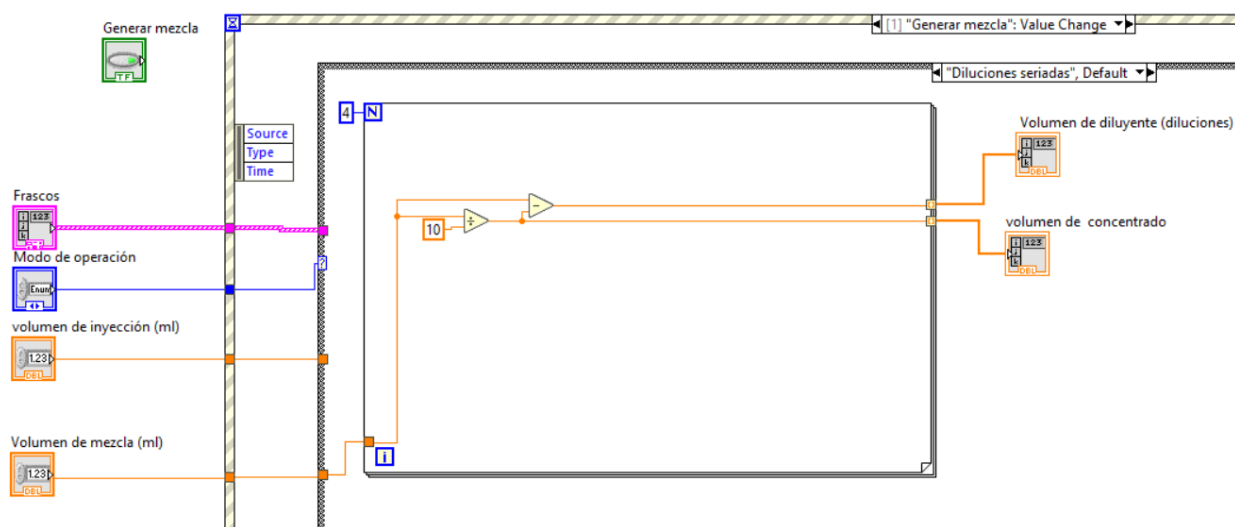


Fig. 5. Cálculo de diluciones seriadas.

14.2 Módulo de control

14.2.1 Modo “Mezcla Personalizada”

Hasta este punto, se ha logrado hacer una calculadora de diluciones, y de volúmenes de concentrados para poder crear las mezclas personalizadas. Los resultados de estos cálculos deben ser utilizados por otro componente para poder hacer la mezcla, en este

Dentro de nuestro sistema Arduino Mega es el encargado de la interacción directa con el entorno físico, al ser un microcontrolador bastante robusto y fácil de programar nos permite utilizarlo para ejecutar instrucciones en tiempo real sobre los actuadores con los que se realizarán las mezclas de las vacunas (Arduino, 2025).

- Ejecutar las secuencias de operación definidas por el operador.
- Control y dosificación de los concentrados y diluyentes.
- Control del sistema electromecánico del sistema.

Dentro del software LabVIEW se encuentran herramientas para poder establecer una comunicación directa desde el puerto USB hacia el microcontrolador, por lo que, para poder hacer que la información importante, que en este caso son los datos obtenidos en los cálculos, puedan ser transmitidos al microcontrolador desde el LabVIEW, hacemos uso del instrumento NI/VISA. Para ello primero se deben hacer cambios en el diagrama de bloques viéndose como en la Fig. 6.



39

intonía, es por ello, que como primer paso convertimos el resultado de V2, en algo que el microcontrolador pueda entender y utilizar como un “comando” o indicación.

En la Fig. 7 podemos observar la parte en la que tomamos el valor de V2, y lo enviamos como una cadena de caracteres para poder ser usado. Se utiliza la herramienta “Format into String” la cual nos permite ingresar un formato que en este caso es **M%d,Vm%.3f\n**, en este tipo de bloque es necesario utilizar el símbolo de porcentaje “%”, ya que, es un indicativo para LabVIEW, del lugar donde pondrá el dato que se le proporciona. Y es importante tomar en cuenta el número de entrada al que se conecta la variable, ya que en ese orden sustituirán los símbolos de porcentaje. En este caso **M%d** corresponde al número de muestra de concentrado, y la “d” significa que se tomará un número entero. **Vm%.3f** corresponde al volumen que se tomará de la muestra de concentrado, y el “.3f” indica que se trata de un flotante con 3 decimales. La cadena de caracteres resultantes, por ejemplo, si V2 es igual a 4.5 ml y corresponde al vial colocado en el puesto 3 del carrusel donde están posicionados, sería “M3, V4.500”.

Para poder saber a qué número de vial corresponde hacemos uso del número de iteraciones, con el ligero cambio de aumentarlo en uno, ya que las iteraciones comienzan desde 0. Este se conecta a la primera entrada del bloque “Format into String”. El valor resultante del cálculo de V2 se conecta a la entrada número 2 del bloque, en la salida del bloque ya se cuenta con un formato que el microcontrolador puede utilizar.

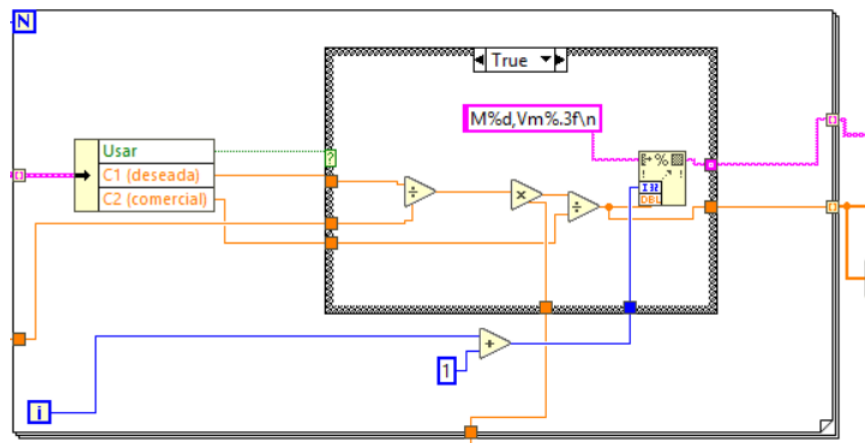


Fig. 7. Creación de cadena de caracteres para el volumen de concentrado

El siguiente paso, es convertir los datos de diluyente para este modo. Como se puede observar en la Fig. 8, se utiliza otra vez un bloque “Format into String”, pero esta vez con un ligero cambio, en la entrada string, siendo esta **MD,Vd%.3f\n**, donde MD, indica que ahora se trata del diluyente, y el Vd que es el volumen que se debe tomar de este. Para el caso del cálculo del diluyente, solo se tiene una variable, el volumen de

diluyente necesario, por lo que el resultado se conecta a la entrada 1, y se sustituye en la cadena de caracteres. Si continuamos con el ejemplo en el que el valor de concentrado es de 4.5 ml y asumimos que solo es un alérgeno, el valor de diluyente debe ser 5.5 ml, por lo que la cadena que se obtiene a la salida del bloque es **MD, Vd4.500**.

Para el modo de mezcla personalizada, contamos con el array de datos generado a partir del bucle Loop en el que se toman en cuenta los concentrados de alérgenos, y aparte tenemos la cadena de caracteres del diluyente. Para poder hacer un “paquete” con ambos datos, es necesario utilizar el bloque llamado “build array”, al cual como se puede observar en la Fig. 8, llegan ambas salidas. La primera salida es el array de elementos, en cual puede haber desde 1 hasta 9 cadenas de caracteres, y a esto se le adhiere el string del diluyente, creando un mismo array para ambos parámetros.

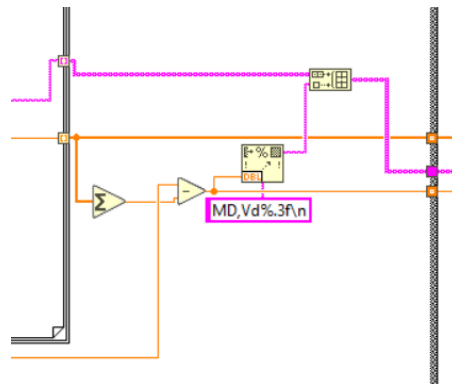


Fig. 8. Diluyente a formato string

14.2.2 Modo “Diluciones Seriadas”

Para las diluciones seriadas, como se mencionó anteriormente, se van haciendo en orden y la lógica de este sistema es el siguiente.

Como se puede ver en la Fig. 9, utilizamos el mismo bloque para crear un string, en este caso, el formato de entrada es P%d,O%d,D%d,Vm%.3f,Vd%.3f, donde:

- P: corresponde a paso en el que se encuentra, o en otras palabras en cuál de las 4 diluciones se encuentra.
- O: indica el “origen” y este va cambiando, dependiendo de en qué paso se encuentre.
- D: el destino al que debe llegar.
- Vm: el volumen de mezcla que se debe tomar.
- Vd: el volumen de diluyente.

En este caso el volumen V_m y V_d , cambian solamente entre dos valores dependiendo de la capacidad en volumen del vial y la cantidad de volumen que el usuario decida crear. Los valores para V_m son: 1 ml y 0.5 ml. Por otro lado, los valores de diluyente son: 9 ml, y 4.5 ml respectivamente.

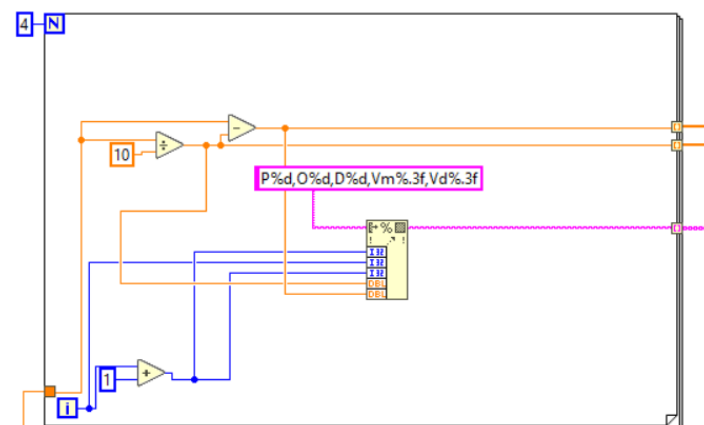


Fig. 9. Diluciones a String

En el bloque “Format into String” en la primera entrada se conecta la salida de la iteración aumentada en 1, utilizándolo para guiarse y saber en qué paso se encuentra; a la segunda entrada se conecta la iteración sin aumento, ya que, corresponde al “origen” o al número de vial del que se debe tomar para su dilución; en la tercera entrada se conecta otra vez a la salida de la iteración aumentada en uno, ya que corresponde al número de vial donde se depositará el líquido, y los dos siguientes corresponden a V_m y V_d . En la Tabla. 10 se muestran los valores que tomaría cada variable que se muestra en el string, durante cada iteración, excluyendo los valores de V_m y V_d .

Tabla 10. Valores por iteración

Iteración	P	O	D	Dilución seriada
0	1	0	1	1:10
1	2	1	2	1:100
2	3	2	3	1:1000
3	4	3	4	1:10000

14.2.3 Comunicación usuario-microcontrolador

Para poder llevar a cabo la comunicación entre el software de LabVIEW y el microcontrolador. Para ello, utilizamos la herramienta del sistema llamada NI-VISA, que es una interfaz de programación de aplicaciones (API) desarrollada por National

Instruments, que está diseñada para facilitar la comunicación entre sistemas de software y dispositivos de instrumentación electrónica, como actuadores y motores, este sistema tiene sus bases en las especificaciones establecidas por la IVI Foundation, que es un consorcio abierto fundado para promover especificaciones para programar instrumentos de prueba que simplifiquen la intercambiabilidad, proporcionen un mejor rendimiento y reduzcan el costo de desarrollo y mantenimiento del programa (Fundación IVI, 2025). Gracias a VISA es posible que cada dispositivo sea identificado mediante un descriptor único, lo que permite abrir sesiones de comunicación de forma estable y confiable (National Instruments, 2026).

Hasta este punto solamente tenemos una salida en cadena de caracteres, que fácilmente puede ser simplemente mostrada en el panel frontal. En nuestro caso, la finalidad es poder enviar estas cadenas de caracteres al hardware, o sea el microcontrolador, por medio de un cable conectado al ordenador. Para ello hacemos uso de los bloques mostrados en la Fig. 10, los cuales son los que permiten que se pueda dar la conexión entre ambos.

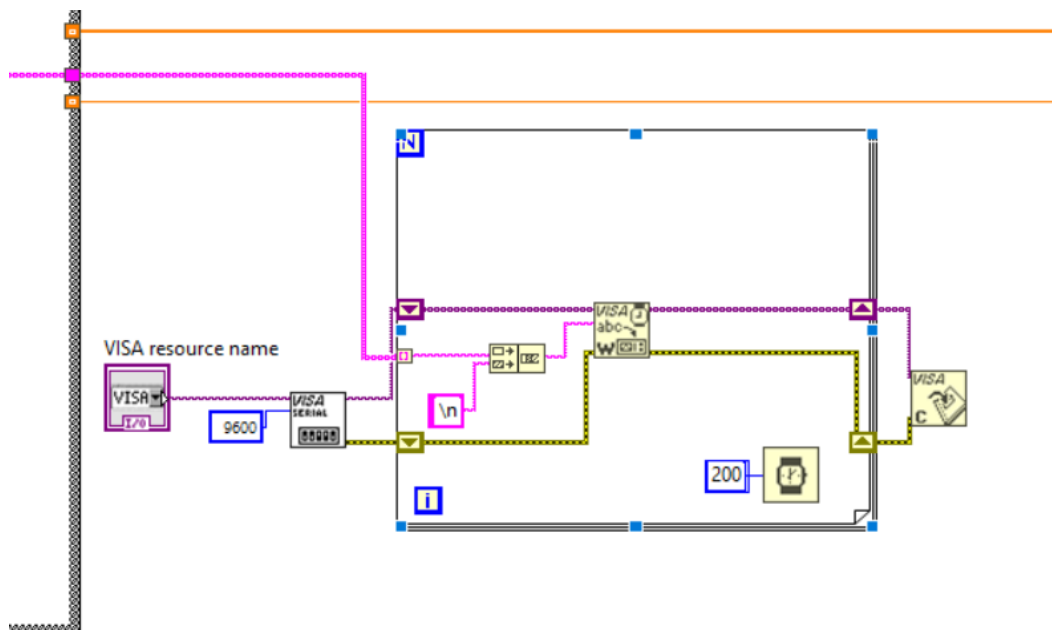


Fig. 10. Bloques para comunicación VISA

Estos bloques cada uno tiene una función específica para que se pueda establecer la comunicación entre el software y el hardware, a continuación, se detallan individualmente.

- **VISA SERIAL:** Este bloque en específico se encarga de inicializar y configurar el puerto serie, lo que significa que es la etapa obligatoria que se ejecuta antes de cualquier comunicación. Aquí es donde se definen los parámetros críticos de la transmisión asíncrona: Velocidad de baudios, Bits de datos, Bit de parada, Paridad, Control de flujo (National Instruments, 2025).
- **VISA WRITE:** Es un bloque que permite enviar información desde LabVIEW hacia el Arduino. Lo que hace posible transmitir comandos, valores o cadenas de texto que son interpretados por el microcontrolador para ejecutar ciertas acciones, por ejemplo, dosificar un volumen determinado o mover un motor. Convierte los datos del programa en paquetes seriales que viajan por el cable USB hacia el Arduino, se podría decir que es el bloque que “materializa” las instrucciones del software en el mundo físico (National Instruments, 2026).
- **VISA CLOSE:** Este es el bloque final del proceso de comunicación, ya que su función es cerrar correctamente el puerto serie y liberar los recursos del sistema. El no cerrar el puerto serie al terminar la ejecución podría generar

Estos bloques juntos permiten que se pueda dar a la comunicación usando el COM de la computadora, para ello utilizamos el siguiente diagrama de bloques, mostrado en la Fig. 11, en conjunto con otros bloques. Este diagrama empieza con el VISA SERIAL, al cual se conecta un controlador que nos indica los puertos disponibles en el controlador para poder seleccionar el que se está utilizando; en el bloque de SERIAL se establece que trabaje a 9600 baudios tal como lo hace el microcontrolador.



Se crea un bucle For el cual procesará el número de indicaciones que venga del array uno a uno, y dentro de este bucle, se coloca el VISA Write, al cual llega el nombre del puerto VISA entrando por el cuadro de color morado, el cual es un “Shift Register”, que nos permite que este recuerde cual fue el dato anterior y no trate en este caso el “VISA resource name” como un nuevo dato, ya que, este no cambiará.

44

con el bloque VISA Close. Además, para evitar que haya caos en la comunicación, se interconectan en serie los puertos Error In y Error Out de los tres bloques VISA.

14.2.4 Codificación en microcontrolador

El control de todo el sistema se da luego de que el usuario da la orden y los parámetros necesarios para poder ejecutar la acción. En este caso LabVIEW sirve como el medio, y con ayuda del microcontrolador y módulos se lleva a cabo la lógica de todo el sistema. Este es un “compounding” automatizado por medio de comandos seriales que recibe el microcontrolador.

A la entrada, este recibe las cadenas de caracteres que se han creado en LabVIEW, y con ellos a la salida se obtiene el movimiento físico y la manipulación de los líquidos, o sea, la dosificación.

Para crear la lógica del sistema, utilizamos lenguaje C para poder establecer los parámetros, pines, acciones y valores necesarios, para que el microcontrolador sepa cómo llevar el flujo general de sistema, el cual es el siguiente:

1. Inicializar el sistema
2. Recepción de datos provenientes de LabVIEW
3. Construir los comandos recibidos en la cadena de caracteres
4. Interpretar el comando formado
5. Ejecutar la acción seleccionada
6. Activar los motores
7. Controlar por medio de sensores

La codificación del sistema esta dividida por diferentes partes, la primera es donde se encuentran definidos todos los pines físicos del microcontrolador que se utilizarán. Y está desarrollada como se muestra en la Fig. 12, donde se pueden ver los pines que se utilizar como salida a los diferentes módulos para el control de motores y las variables que se utilizarán, como por ejemplo “stepsPerML” la cual establece cuantos pasos el motor debe moverse para aspirar un mililitro de la solución correspondiente.

```

// PINES MOTOR CARRUSEL + SENSOR
#define STEP_PIN 3
#define DIR_PIN 4
#define ENDSTOP_PIN 8

// PINES JERINGA (SEGUNDO MOTOR)
#define STEP_SYR 6
#define DIR_SYR 7

float stepsPerML = 250.0;

// PINES EJE Z (SUBIR / BAJAR)
#define STEP_Z 9
#define DIR_Z 10

int stepsZDown = 3250;
int stepsZUp = 3250;

// PINES SENSORES Z
#define ENDSTOP_Z_TOP 11
#define ENDSTOP_Z_BOTTOM 12

// VARIABLES DE MOVIMIENTO
int stepsPerPosition = 33; // HALF STEP
int currentPosition = 0;
String command = ""; // guarda el comando que le llega

```

Fig. 12 Definición de variables y pines

Debido a que el sistema hace uso de 3 motores paso a paso NEMA 17, que ofrecen un ángulo de paso de 1.8° (200 pasos por vuelta), en el código se define de que pines sale la información correspondiente para cada uno de los módulos que trabajarán en conjunto con los motores, en este caso, los módulos a utilizar son A4988, ya que, por el ángulo de paso, se debe trabajar con “Half Step” o medio paso en español, así tener más exactitud a la hora de que el sistema tenga que dirigirse a un vial en específico.

En el campo de la Ingeniería Biomédica se cuenta con varias normativas, y una para tomar en cuenta a la hora de diseñar un equipo o un área, la cual es la norma ISO 13485. En el presente proyecto de investigación, se busca incorporar mecanismos que aseguren la calidad y trabajen como un reemplazo en caso de que algo no llegase a función de la manera que se espera. Se incluyen finales de carrera, los cuales sirven como retroalimentación en caso de que por algún motivo el motor continúe subiendo. Asimismo, se hace una calibración inicial tanto del carrusel donde se encuentran los viales como del carrito que se mueve en el eje Z para ingresar y sacar la jeringa del vial, para asegurarse que la jeringa no se encuentre dentro del vial, sino en una posición segura.

A la vez, para contar con aspectos de seguridad y calidad, el sistema cuenta con sensores de límite que permitirán al microcontrolador saber sobre el posicionamiento del carrusel y de la jeringa, en el código estos están llamados ENDSTOP. Cada uno

de ellos corresponde a un lugar en específico. Dos de ellos posicionados de tal manera que permitan saber que la jeringa ha bajado o ha subido, y la otra para “calibrar” la posición del carrusel.

El número de pasos por posición es de aproximadamente 33.33 pasos por 30° recorridos, para poder hacer el cálculo, es importante saber cómo funciona el motor, ya que este tiene un ángulo mínimo de desplazamiento de 1.8°, pero con este valor no se tiene mucha exactitud, es por ello por lo que se trabaja con el módulo A4988 que permite usar el modo micro pasos, donde el motor puede trabajar a diferentes fracciones del paso normal. El modo que utilizamos es de medio paso, lo que hace que los pasos por revolución sean 400 en lugar de los 200 que se pueden utilizar con el motor NEMA 17 por sí mismo. El módulo logra hacer esto energizando las fases del motor con corrientes intermedias (My Tech Tutor, 2022). Como se cuenta con 400 pasos y son 12 viales, al dividir la vuelta completa entre 12 se obtiene que es necesario avanzar aproximadamente 33 pasos para moverse 30°.

El módulo, como se puede apreciar en la Fig. 13 tiene variedad de pines, pero los que permiten que se pueda utilizar micro pasos, son los de la columna izquierda, MS1, MS2, y MS3. La combinación en la que MS1 está en alto y los demás en bajo, permite que se pueda trabajar con 400 pasos.

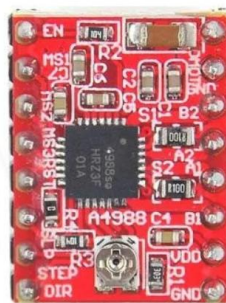


Fig. 13. Módulo A4988

El código utilizado utiliza funciones o “voids” para tener un código más entendible y en caso de que se quieran reutilizar códigos, solo se llama a la función que se necesita utilizar. Dentro del “void setup” se tiene la definición de parámetros que se utilizaran a lo largo de código, como por ejemplo los modos de operación de los pines, que pueden ser salidas o entradas, y en este se hace la llamada a la función de calibración inicial para el carrusel y para el nivel al que se encuentra la jeringa, ya que se debe encontrar en un nivel seguro en el que no colisione con partes de los viales o con el carrusel.

En el void loop se hace la captación de los datos que han viajado desde el LabVIEW hasta el monitor serial, es por ello por lo que mientras haya algo disponible en el puerto serial esto lo almacena en la variable de tipo carácter. En algunos casos puede llegar a aparecer una letra “r” que no es parte del comando que se le envía al

microcontrolador, así que se le da la indicación de ignorarlo para que no interfiera con los datos que son de importancia. En cambio, cuando se encuentra con un “\n” significa que el comando ha terminado, y es ahí donde se llama una nueva función llamada “processCommand”. Y luego de terminar la función, borra el contenido de la variable. En cambio, si aún no ha encontrado un “\n” sigue leyendo y el caracter encontrado lo agrega a la cadena de caracteres tal y como se puede observar en la Fig. 14.

```
void loop() {
    // lectura del puerto serial
    while (Serial.available() > 0) { // sucede solo si hay algo en el monitor serial
        char c = Serial.read(); // almacena el caracter que llega al monitor en la variable c

        // Ignora el \r en caso de que aparezca
        if (c == '\r') {
            continue;
        }

        // si encuentra un \n significa que termina el comando
        if (c == '\n') {
            processCommand(command); // llama la función process command
            command = ""; // borra el contenido para poder almacenar el nuevo comando
        } else { // sino
            command += c; // le agrega el otro caracter que trae el comando
        }
    }
}
```

Fig. 14. Void loop

En la Fig. 15 podemos observar la función encargada de procesar los comandos recibidos por medio de puerto serial que toma la cadena de caracteres llamada command y luego se guarda de manera temporal en otra variable llamada “cmd”. Cuando ya se tiene la cadena completa lo que se procede a hacer es identificar la letra con la que comienza el comando, puesto que, los comandos pueden empezar con “M” cuando se trata de personalizada, con “MD” cuando se trata del volumen del diluyente en el modo de mezcla personalizada, y por último puede empezar con “P” indicando que se trata de diluciones seriadas, se decidió utilizar la letra “P” tomando como base el número de pasos que hace en las diluciones.

En la primera condición, se verifica si el valor de “cmd” empieza con una letra “M”, y no con “MD”. En caso de que si empieza solamente con la letra “M” se procede a llamar a la función encargada de hacer el proceso de dosificación de los concentrados de alérgenos. Si empieza con “MD” es porque solo necesita tomar el volumen de diluyente correspondiente al cálculo hecho previamente en el diagrama de bloques de LabVIEW, por lo que se procede a llamar a la función encargada de hacerlo. En caso de que no sean ninguno de estos dos, verifica si el comando que ha recibido en la variable “cmd”

empieza con la letra “P”, y si es así manda a llamar a la función encargada de hacer las diluciones seriadas.

```
void processCommand(String cmd) { // toma lo que hay en command y guarda una copia

    // ---- Mezcla ----
    if (cmd.startsWith("M") && !cmd.startsWith("MD")) { // condiciona, si en la vari
    | processMixture(cmd); //llama a la funcion que procesa la mezcla
    }

    // ---- Diluyente ----
    else if (cmd.startsWith("MD")) { //condiciona si la variable cmd comienza con MD
    | processDiluent(cmd); //llama a la funcion procesa diluyente
    }

    // ---- dilucion serial----
    else if (cmd.startsWith("P")) { // condiciona si el comando empieza con P
    | processSerialDilution(cmd); //llama a la funcion que procesa las diluciones se
    }

}
```

Fig. 15. Función que procesa los comandos recibidos

Dependiendo de que comando se haya recibido hará un proceso diferente. En caso de que el comando recibido empiece con la letra “M”, entra a la función que se muestra en la Fig. 16. Esta función toma la cadena de caracteres llamada “cmd” y extrae los números que vienen en esta con ayuda de otras dos funciones, una destinada a obtener los números enteros y otra los números flotantes, o sea que tienen decimales. Se tienen dos variables internas en la función, una de ellas es para almacenar el número extraído de después de la letra M, el cual corresponde al número de vial de concentrado del que se tomará el volumen, y la otra variable “vm” donde almacena el valor de volumen que se debe extraer del vial.

Luego llama a la función encargada de mover el carrusel a la posición en la cual se va a tomar el volumen de concentrado de alérgenos, lo toma y espera un tiempo prudente para empezar a aspirar el líquido, sube para sacar la aguja del vial y se mueve de nuevo al vial donde se hará la mezcla de concentrados, y luego llama a la función encargada de que la jeringa tenga un proceso de enjuague para que no se contaminen los otros concentrados

```

//proceso de mezcla personalizada
void processMixture(String cmd) { //creamos la funcion de procesar mezcla, usando lo que se
    int vial = extractNumber(cmd, 'M'); //creamos la variable de tipo entero vial donde guardamos
    float Vm = extractFloat(cmd, "Vm"); // creamos la variable de tipo flotante donde guardamos

    moveToPosition(vial); //llama a la funcion que mueve a la posicion que corresponde

    moveZDownSafe(3250); // entrar al vial donde toma el alergenico
    delay(300); // espera un tiempo prudente para empezar a aspirar
    aspirate(Vm); //aspira la cantidad de volumen que corresponde

    moveZUpSafe(); // salir del vial

    moveToPosition(0); // mezcla

    moveZDownSafe(3250); // entra al vial donde se hace la mezcla
    delay(300); // espera un tiempo prudente para empezar a dispensar
    dispense(Vm); //llama a la funcion encargada de dispensar el volumen
    moveZUpSafe(); // se mueve hacia arriba hasta que se encuentra con el limite de carrera
}

```

Fig. 16. Función para mezclar concentrados de alérgenos

Una vez se ha finalizado el proceso de tomar los concentrados de los diferentes viales, se debe tomar el volumen de diluyente previamente calculado en el diagrama de bloques, para ellos se cuenta con la función llamada “processDiluent”. En la cual se utiliza nuevamente la cadena de caracteres “cmd” y la función para extraer número que no son enteros, en este caso para tomar número que corresponde al volumen de diluyente que en la cadena de caracteres se encuentra luego de las siglas “Vd”. Al igual que en el proceso de toma de los concentrados se mueve hacia el vial de diluyente, toma la cantidad designada, y la deposita en el vial de mezcla, o sea el que se encuentra en la posición 0. Luego de todo el proceso, llama a la función encargada de hacer el enjuague de la jeringa.

La función que se encarga de hacer el enjuague de la jeringa se llama “rinseSyringe” y se utiliza un bucle for para que el proceso de enjuague se haga 2 veces. Primero se mueve el carrusel de viales a la posición en la que se encuentra el enjuague y después baja hasta la posición segura y aspira 1ml de solución, espera un segundo y lo dispensa en el mismo vial, y continua hasta completar 2 repeticiones.

Se crearon también dos funciones para extraer la información que llega por medio del puerto serial, que son los que se muestran en la Fig. 17. Una de ellas es para extraer los números enteros, para ello utiliza dos variables que se le facilitan a la hora de llamar la función. Para esto necesita una cadena de caracteres y además un “key” que es la letra que debe buscar, la cual en cada llamamiento de la función se especifica qué letra es. Cuando ya se tienen ambas variables, en la cadena de caracteres se localiza la

posición en la que se encuentra la letra que estamos buscando, por ejemplo, si tenemos la cadena de caracteres: O2,D3,Vm0.5

Y queremos obtener el valor entero que acompaña a la letra D, este usa el comando “indexOf” para saber exactamente en que posición numérica, comenzando desde 0, se encuentra la letra que estamos buscando, en este caso la letra D se encuentra en la posición 3. Al encontrar que la letra D se encuentra en la posición número 3, le suma uno al número de índice, para saber que en la sub-cadena de caracteres empezará a contar desde uno después de donde se localizó el caracter, y se utiliza el comando “.toInt” para decirle que lo que le sigue después de la posición 3+1 lo convierta a número entero. Luego de que la función detecta algo que no es número, se detiene y ya no convierte lo que le sigue a entero, como en el caso que se muestra que después de Vm se tiene 0.5, ya que, después del 3, se tiene una coma, lo cual ya no es un número.

Para el caso en el que lo que se necesita es extraer un numero decimal, se utiliza la otra función mostrada en la Fig. 17, esta está pensada para los valores que corresponden a los volúmenes de concentrados y de diluyente. Para ello la primera parte es idéntica a la anterior, pero si tomamos en cuenta que no se necesita un entero sino un decimal, la parte donde se crea la sub-cadena de caracteres en este caso empieza a contar desde el index, que es la posición donde se encontró la primera letra del “key” y le suma la longitud de este, por ejemplo si utilizamos “Vm” este buscara en que posición se encuentra la V, y le sumara la longitud que en este caso es 2, y luego usa el comando “.toFloat” para convertirlo en número decimal hasta que se encuentra con algo que ya no es un numero decimal.

```
// Extrae los enteros despues de los caracteres (M, O, D)
int extractNumber(String cmd, char key) { // funcion que extrae los numero

    int index = cmd.indexOf(key); //busca el numero de posicion en el string
    // dentro de la funcion
    if (index == -1) { //si no encuentra el key (index es -1) devuelve el va
        return -1;
    }
    // si encuentra el key indicado
    return cmd.substring(index + 1).toInt(); //devuelve una subcadena de car
}

// Extracicon de de Vm y Vd tipo float
float extractFloat(String cmd, String key) { //se genera la funcion de tip

    int index = cmd.indexOf(key); //busca el numero de posicion en el string

    if (index == -1) { //si no encuentra el string indicado
        return 0; //devuelve 0
    }
    return cmd.substring(index + key.length()).toFloat(); // si encuentra el
    //devuelve una sub cadena de tipo float
}
```

Fig. 17. funciones para extraer números enteros y decimales

Como parte de las medidas que se tomaron para asegurar que el vial en el que se toma y deposita el concentrado sea el correcto, se cuenta con una función para que el sistema pueda ubicarse espacialmente, llamada “home”. Lo que hace es que, con ayuda de un final de carrera y una leva en la parte inferior del carrusel, ubica cuando se encuentra en la posición 0 que es la correspondiente al vial donde se llevará a cabo la mezcla. Mientras el pin correspondiente al final de carrera se encuentra en alto, o sea no está siendo presionado, el carrusel gira hasta encontrarlo, y una encontrado, gira un poco hacia el lado contrario para no mantenerlo presionado, y una vez ha finalizado este proceso establece la posición como la posición 0.

Para el eje Z hace algo parecido, pero en este caso específicamente para saber que la jeringa no se encuentre en una posición insegura, como por ejemplo abajo en la posición mínima que el motor y el tornillo sin fin le pueden otorgar, ya que, puede colisionar con viales y arruinar la jeringa y la aguja o dispensar de manera incorrecta. Para ello se asegura que mientras el final de carrera no se encuentre presionado la base del carrito siga subiendo hasta que presione el final de carrera, como se puede observar en el código de la Fig. 18.

```
void home() {  
    while (digitalRead(ENDSTOP_PIN) == HIGH) { //mientras el pin del final  
        | moveSteps(1, false); // gira hasta encontrar sensor  
    }  
    // retroceso preciso hasta liberar sensor  
    while (digitalRead(ENDSTOP_PIN) == LOW) { //mientras el pin que corres  
        | moveSteps(1, true); // gira hasta que la leva no lo presione.  
    }  
    currentPosition = 0; // guarda que la posicion actual es la 0  
}  
  
void homeZ() {  
    // subir hasta encontrar el sensor superior  
    while (digitalRead(ENDSTOP_Z_TOP) == HIGH) { //mientras el pin del fin  
        | moveStepsZ(1, false); // sube  
    }  
}
```

Fig. 18. funciones para calibrar ubicaciones

Para mover el carrusel se utiliza el motor NEMA 17 junto con el módulo A4988, y para ello se creó la función llamada “moveSteps”, la cual utiliza el número de pasos y la dirección de giro, previamente proporcionada al momento de llamarla. Envía las indicaciones al pin designado para la dirección del carrusel y luego con ayuda de un bucle for envía altos y bajos a las bobinas del motor, enciendo y apagando cada cierto tiempo, hasta termina terminar el conteo de pasos, como se observa en el código de la Fig. 19.

```

//funcion para mover determinados pasos en el carrusel
void moveSteps(int steps, bool direction) { // pasos y direccion

    digitalWrite(DIR_PIN, direction); // le define al pin si ira en sentido horario o antihorario

    for (int i = 0; i < steps; i++) { //usa un bucle for para mover los pasos
        digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
        delayMicroseconds(16000);
        digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
        delayMicroseconds(16000);
    }
}

```

Fig. 19. Función para mover el carrusel.

Para decidir el tiempo de retraso se tomaron en cuenta diferentes parámetros, especialmente el no hacer que el motor gire rápido, ya que, al manipular líquidos, debido a la inercia, estos se pueden derramar ante movimientos bruscos. Es por ello por lo que se decidió establecer que el tiempo de movimiento de un vial a otro contiguo sea de un segundo, para ello se hizo el siguiente cálculo:

$$\frac{1s}{33} = 0.30303$$

$$30303 \mu s * \frac{1}{2} = 15151.51 \mu s$$

Se obtuvo que el valor necesario de retraso para que se tenga un segundo entre viales contiguos es de 15151 aproximadamente, pero para el código se dejará un tiempo de 16000 microsegundos que nos proporciona un tiempo entre viales contiguos de 1.056 s.

Para mover el émbolo de la jeringa se utiliza otra función aparte, pero parecida a la que se encarga de mover el carrusel. Siempre utiliza el número de pasos y la dirección de giro que le serán proporcionadas previamente en el llamamiento de la función. Esta se encuentra en la Fig. 20 y lleva exactamente la misma estructura, pero cambia en el número de pin, o en este caso en el nombre del pin que fue previamente definido, y en el tiempo de retraso asignado. Para el movimiento del embolo de la jeringa, se estableció que se tarde 2 segundos por ml aspirado y dispensado debido a que si se hace demasiado rápido este puede crear burbujas dentro de la jeringa, y eso significaría no dispensar la cantidad correcta de líquido. El cálculo de retraso es diferente, ya que, tomamos en cuenta los datos proporcionados por la jeringa y por el tornillo sin fin.

Datos:

- 5mm = 1ml
- Tornillo sin fin 2mm de paso y 4 entradas
- Tiempo por ml = 2 segundos

Que el tornillo sin fin tenga 2 mm de paso y 4 entradas significa que en realidad por vuelta que da recorre un total de 8 mm y se sabe que por vuelta recorre 400 pasos, por lo por regla de tres simple se obtiene el número de pasos necesarios para que el recorra 1ml.

$$\frac{5\text{ mm} * 400\text{ pasos}}{8\text{mm}} = 250\text{ pasos}$$

El tornillo debe recorrer 250 pasos para aspirar o dispensar 1 ml, y se necesita que se tarde 2 segundos. El retraso necesario es calculado dividiendo el tiempo entre el número de pasos:

$$\frac{2\text{s}}{250\text{ pasos}} = \frac{8\text{ms}}{\text{paso}}$$

Dado que se está trabajando en microsegundos, el valor es 8000 microsegundos, y como se tienen dos tiempos, que son el tiempo en alto y en bajo para cada paso, el retraso debe ser la mitad, o sea, 4000 microsegundos.

```
void moveStepsSyringe(int steps, bool direction) {
    digitalWrite(DIR_SYR, direction);

    for (int i = 0; i < steps; i++) {
        digitalWrite(STEP_SYR, HIGH);
        delayMicroseconds(4000);
        digitalWrite(STEP_SYR, LOW);
        delayMicroseconds(4000);
    }
}
```

Fig. 20. Función para mover embolo de jeringa

La función de “moveSteps” trabaja en conjunto con la función que se muestra en la Fig. 21, ya que en ella se hace el cálculo para saber dónde se debe mover el carrusel y en qué dirección. Normalmente, a la función “moveToPosition” se le asigna el valor de un vial, que es conocido como “targetPosition” y a la posición que se debe mover el carrusel. La función calcula la diferencia entre el valor de posición actual, y el valor de posición a la que se debe mover, que es la posición objetivo y lo guarda en la variable de tipo entero “diff”. Con el dato obtenido en valor absoluto se calcula la cantidad de pasos que se debe mover multiplicándolo con el número de pasos por posición, que en este caso es 33. Y luego utilizando booleanos, y si la diferencia es mayor a 0 gira en un sentido, y si es menor a 0 gira en el sentido contrario.

Con estos datos almacenados en las variables, llama la función “moveSteps” para que mueva el carrusel a la posición calculada, y establece que la posición actual es la posición actual a la que se movió el carrusel, para que al moverlo a otro vial posteriormente sepa que encuentra por ejemplo en la posición 5, y no en la posición 0.

```
void moveToPosition(int targetPosition) { //mueve el vial a la posicion

    int diff = targetPosition - currentPosition; //calcula la diferencia e
    int steps = abs(diff) * stepsPerPosition; //con el valor absoluto de l
    bool dir = (diff > 0); // hace una comparacion booleana y da el sentid

    moveSteps(steps, dir); //mueve los pasos en cierta direccion

    currentPosition = targetPosition; // define que la posicion actual es l
}
```

Fig. 21. Función moveToPosition

Las funciones mostradas en la Fig. 22 se encargan de aspirar y dispensar el volumen de alérgenos o diluyente. Ambas son casi iguales, ya que toman el valor que se les asigna en las otras funciones, que son “Vm” y “Vd”, y lo convierten en la variable “volume” y ya que se sabe que por cada ml le toma 250 pasos, se multiplica el volumen deseado por la constante, y se almacena en la variable “steps”, llama la función de mover el embolo de la jeringa y luego espera un tiempo de 3 segundos para finalizar la aspiración, y de igual manera funciona para dispensar, con la diferencia el embolo empuja el líquido.

```
void aspirate(float volume) {

    int steps = volume * stepsPerML;
    moveStepsSyringe(steps, false); // subir émbolo
    delay(3000); 3 segundos de espera mientras se llena la jeringa.
}

void dispense(float volume) {

    int steps = volume * stepsPerML;
    moveStepsSyringe(steps, true); // bajar émbolo
}
```

Fig. 22. Funciones para aspirar y dispensar líquidos

La función para que el carrito donde se encuentra el “brazo” con la jeringa se mueva se llama “moveStepsZ” y toma el valor de pasos y la dirección de movimiento. En este caso para calcular el retardo, dado que este se mueve en el eje Z, es importante que vaya un poco más lento para que el motor no vaya a patinar. Este motor sube y baja

una cantidad de 6.5 cm, y se mueve 3250 pasos, por lo que al hacer el cálculo utilizando 750 segundos de retardo, se obtiene el siguiente resultado:

$$750\mu s * 750\mu s = 1500\mu s$$

$$1500\mu s * 3250 \text{ pasos} = 4.875 \text{ s}$$

El carro móvil tardara 4.875 segundos en subir, y otros 4.875 en bajar, asegurando que la integridad del motor se mantenga, y que no se presenten fallos debido a que el motor patine.

```
void moveStepsZ(int steps, bool direction) {  
  
    digitalWrite(DIR_Z, direction);  
  
    for (int i = 0; i < steps; i++) {  
        digitalWrite(STEP_Z, HIGH);  
        delayMicroseconds(750);  
        digitalWrite(STEP_Z, LOW);  
        delayMicroseconds(750);  
    }  
}
```

Fig. 23. Función para mover en eje Z

Para asegurar que la subida y bajada del carrito es segura, se cuenta con dos funciones que toman el valor máximo de pasos, el cual es 3250, y haciendo uso de un bucle for empieza el descenso del carrito, y cuando este termina el conteo, significa que ha llegado abajo, y como medida de seguridad, si toca antes el sensor, este se sale del bucle y significa que ya llego a su límite inferior seguro. De igual forma para la subida, mientras el final de carrera no se encuentre presionado, el carrito subirá en el eje Z, hasta encontrarse con el final de carrera, lo que significa que ha llegado al límite superior seguro.

```
void moveZDownSafe(int maxSteps) {  
  
    for (int i = 0; i < maxSteps; i++) {  
        // si hay sensor inferior, lo respeta  
        if (digitalRead(ENDSTOP_Z_BOTTOM) == LOW) {  
            break;  
        }  
        moveStepsZ(1, true);  
    }  
}  
  
void moveZUpSafe() {  
  
    while (digitalRead(ENDSTOP_Z_TOP) == HIGH) {  
        moveStepsZ(1, false);  
    }  
}
```

Fig. 24. Funciones para subir y bajar el carro móvil

14.3 Módulo de dosificación

Para crear el módulo de dosificación se utilizaron diferentes instrumentos, incluyendo hardware y software. Con ayuda del software Autodesk Inventor Professional se diseñó el modelo 3D del equipo, para poder visualizar de mejor manera la propuesta de innovación tecnológica.

14.3.1 Carrito móvil.

Este módulo consta de dos motores NEMA 17 con tornillo sin fin de 100 mm, como se muestra en la Fig. 25 para el diseño del carrito móvil, que es el encargado de subir y bajar en el eje Z, se tuvieron diferentes etapas. En el literal A, se tiene el diseño solo del motor, respetando las especificaciones de tamaño y altura mostrada en el Anexo A. El tornillo sin fin del motor seleccionado tiene un diámetro de 8 mm, y además cuenta con una tuerca de avance, que es quien empuja y mueve los objetos. En el literal B se puede observar la base del carrito móvil, y este cuenta con diferentes extrusiones. La extrusión central es un agujero en el cual el tornillo sin fin pueda pasar libremente, y los agujeros circundantes corresponden a los que ocuparán los tornillos para la sujeción de la tuerca de avance, los cuales de acuerdo con las especificaciones son de tipo M3.

En las esquinas cuenta con espacios para poner rodamientos de tipo LM8UU, los cuales tienen bolas de acero dentro que permiten que varillas de acero inoxidable se deslicen fácilmente y pueda subir y bajar el carrito sin hacer tanto esfuerzo. Tiene espacio para cuatro rodamientos, ya que, es importante que el carrito tenga soporte en las 4 esquinas para no generar desequilibrios y hacer que el motor se sobre esfuerce.

En el literal C, se puede apreciar cómo queda el motor y la base del carrito acoplados, el tornillo sin fin sobresale, y en la posición en la que se encuentra en la imagen es cuando el carrito está en la posición más baja que corresponde a cuando está en posición de aspiración o dispensación de líquido. El tornillo sin fin que mide 100 mm queda dentro de otra estructura hueca, que sirve como la base del brazo. Esta estructura es la del literal D, es necesario que sea hueca para que el tornillo pueda subir y bajar libremente, y además se contempló que fuera un poco más alta que la altura total del tornillo. El carrito móvil está pensado para que se mueva en el Z una cantidad de 3250 pasos, los cuales en centímetros son 6.5 cm, ya que, se busca que la aguja de la jeringa pueda salir con facilidad del vial y no colisione.

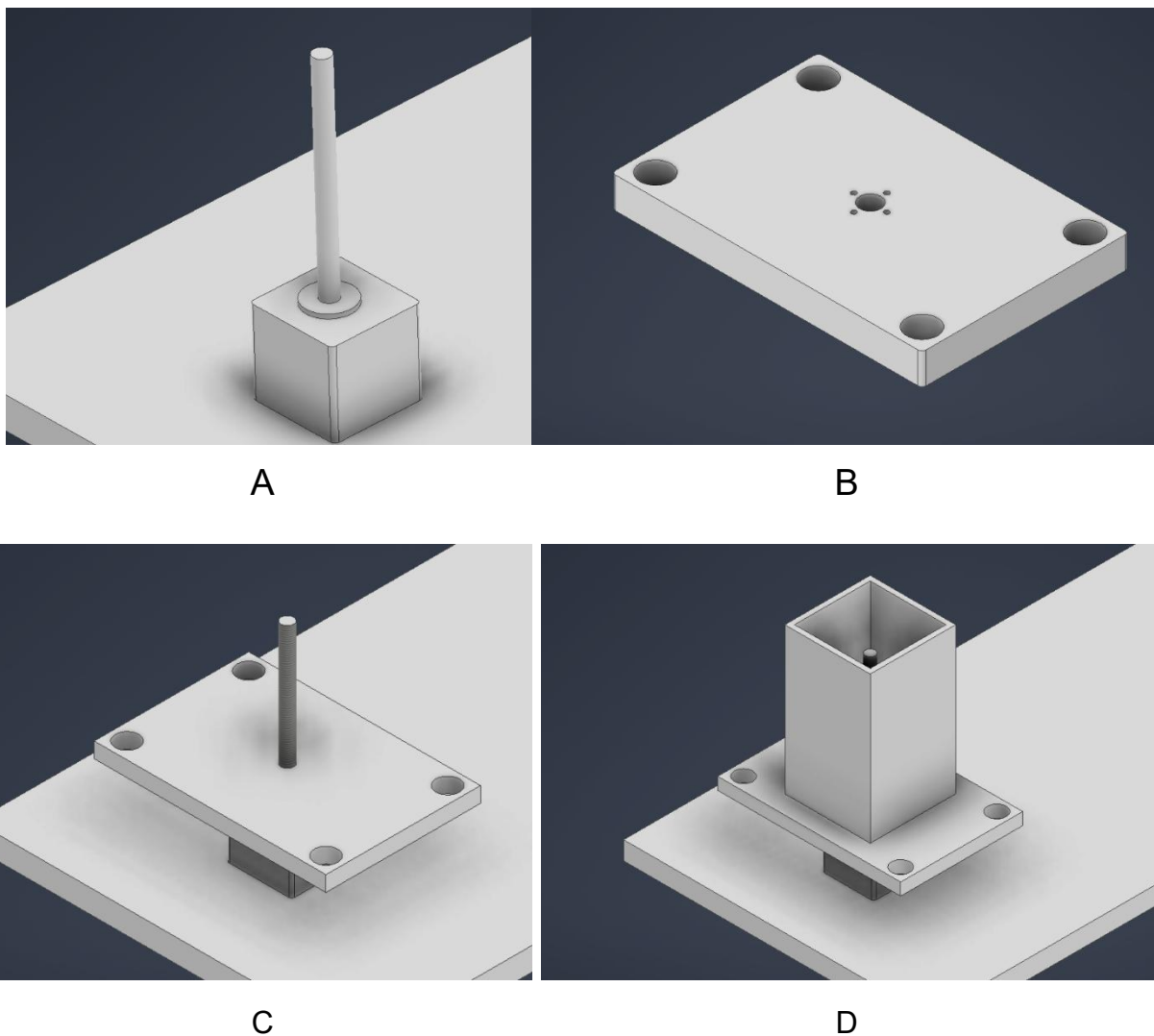


Fig. 25. carrito móvil de módulo de dosificación

14.3.2 Movimiento del embolo de la jeringa

Encima de la base del brazo se agregó una plataforma en la que se posicionó el motor NEMA 17 con un tornillo sin fin, el cual al igual que el anterior es de 100 mm. En la Fig. 26, en el literal A, se muestra el motor sobre la plataforma. Este motor sirve para poder mover el émbolo de la jeringa, al igual que la base del carrito este necesita una varilla de soporte, la cual también debe llevar un rodamiento tipo LM8UU, para una varilla de acero inoxidable de 8 mm. Esta varilla también le da estabilidad a la pieza diseñada para poder él émbolo, ya que, sin esta, la pieza giraría sobre el eje del motor y no haría su cometido de subir y bajar el embolo.

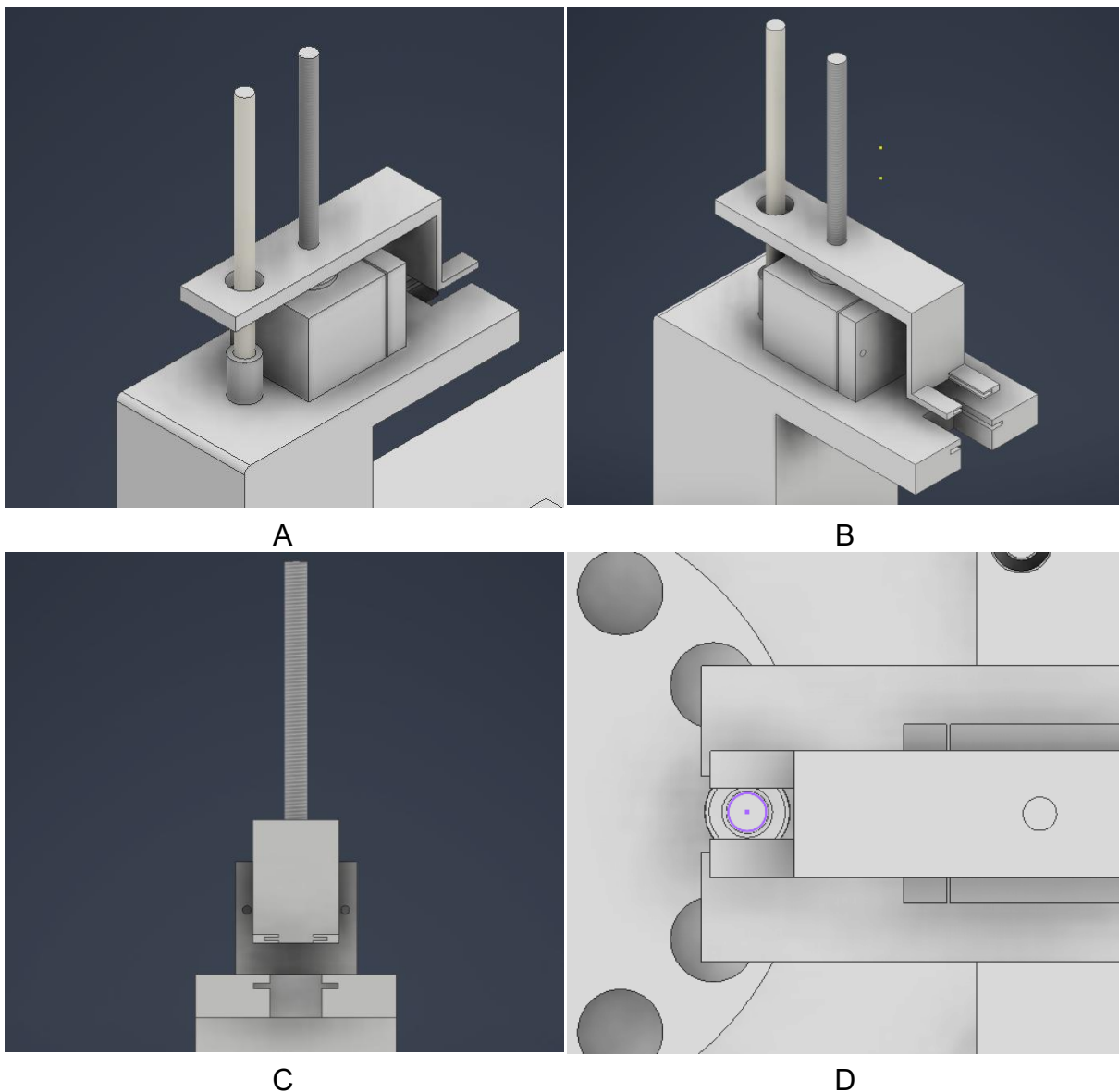


Fig. 26. módulo de dosificación

En el literal B se observa la parte superior de la plataforma y en la cual en su extremo tiene una hendidura para poder posicionar las lengüetas de la jeringa, y que tenga sujeción y no se mueva al momento de mover el émbolo. Por su parte el apoyo del émbolo encaja en la pieza de arriba, la cual es la pieza móvil que hace que, al girar el motor, esta suba el émbolo, generando que aspire el volumen de líquido que se ha especificado, o que baje el émbolo y dispense el volumen. A su vez cuenta con una estructura cuadrada que sirve para generar un apoyo extra a los motores, los cuales se pueden sujetar a la estructura con ayuda de un soporte prefabricado para este tipo de motores, que son los que se muestran en la Fig. 27. Estos se posicionan sobre el motor y se sujetan con tuercas para evitar que se muevan o se vayan a caer.



Fig. 27. estructura metálica para sujeción de motor.

En el literal C, se puede observar una vista frontal de la parte donde embona el émbolo. Este se debe presionar de manera que las lengüetas queden sujetas por la parte que no es móvil, la cual es la inferior, y el apoyo del émbolo debe ser sujeto por la parte móvil, la cual es la superior. Para poder realizar el diseño de esta parte en específico se utilizó una jeringa comercial de 10 ml de la marca NIPRO, y con ayuda de un Vernier se hicieron las mediciones específicas del espesor de cada una de las partes que serán introducidas para evitar que las hendiduras quedaran demasiado holgadas, o que no permitieran la entrada de las partes de la jeringa al mecanismo.

En el literal D, se puede observar una vista área o superior de la alineación que tiene el mecanismo de dosificación, en el cual se posicionará la jeringa, y el vial cuando se encuentre justo debajo de la jeringa, ya sea para aspirar sustancias o para dispensarlas.

14.4 Sistema de posicionamiento.

Para poder crear el sistema de posicionamiento se utilizó un motor NEMA 17, pero esta vez sin tornillo sin fin, ya que no se necesita hacer que algo suba o baje, sino que gire el mecanismo diseñado para sostener los viales. El mecanismo diseñado para que los viales se mantengan fijos y puedan girar, es una base circular tipo carrusel con espacios destinados para colocar los viales. Como se muestra en la Fig. 28, este carrusel cuenta con 12 espacios que giran dependiendo de donde se desee tomar o dispensar la sustancia, esto comandado por el microcontrolador, con la información que ha recibido después que el usuario haya ingresado los parámetros que desea que contenga su la mezcla o las diluciones.

El carrusel tiene definido el número de cada una de sus posiciones, ya que, en el panel frontal del módulo de usuario, este escoge el número del vial en los que desea trabajar

en un rango de 1 a 9; en estos espacios el usuario puede posicionar los concentrados que desea utilizar, sin que sea necesario poner el máximo de viales posibles.

Las posiciones número 0, 11 y 10, están destinadas para el vial donde se creará la mezcla, el vial que contendrá la solución de enjuague, y el vial que contendrá el diluyente respectivamente. Todos los espacios para los viales están pensados para viales que tengan un diámetro externo de 20 mm.

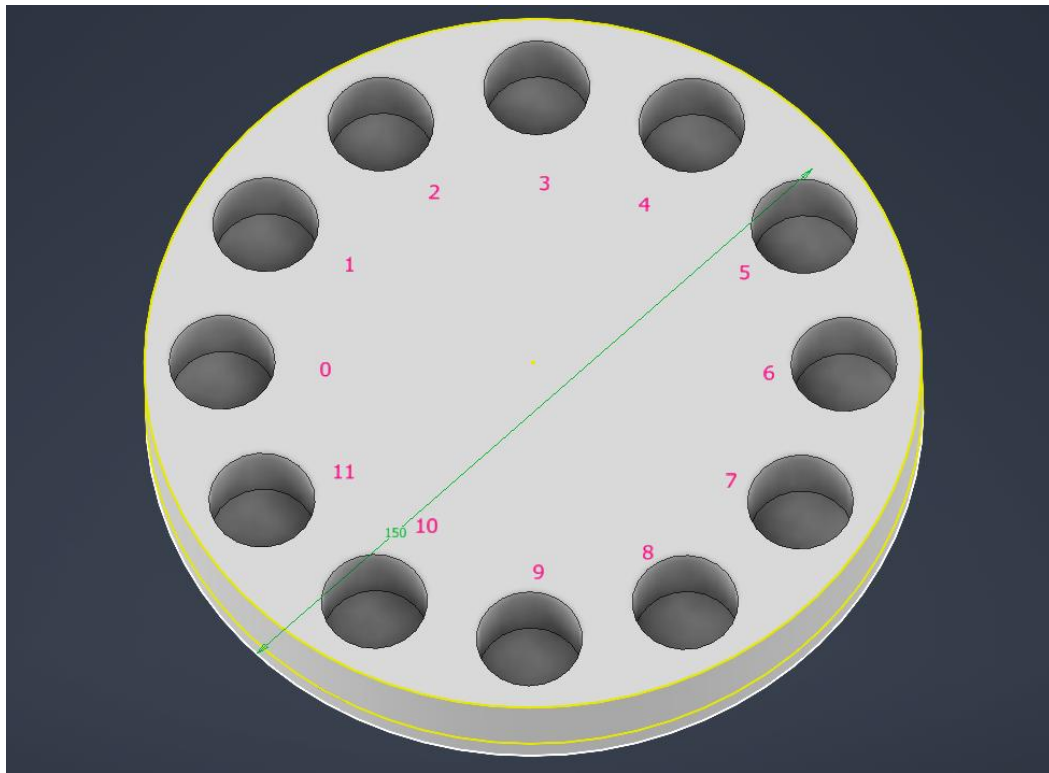


Fig. 28. Carrusel de viales, vista superior

Para que el carrusel pueda girar en la parte inferior cuenta con un agujero que permite que el eje del motor entre sin problema y no patine sobre su mismo eje. Contando con que los motores cuentan con una parte plana del eje, o sea, el eje no es completamente cilíndrico, sino que parece una D, se diseñó el espacio para el eje con la misma forma y medidas que este eje, como se puede apreciar en la Fig. 29.

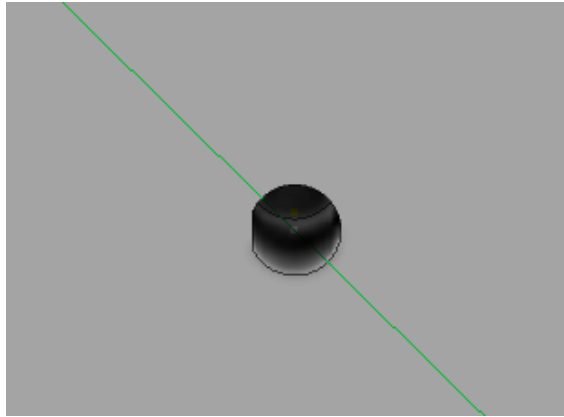


Fig. 29. espacio para eje del motor.

El motor al igual que los otros dos este sujeto con ayuda de las piezas prefabricadas específicamente para este tipo de motores, por lo que, como se muestra en la Fig. 30 cuenta con el bloque donde se atornillará la pieza prefabricada, en este bloque también se posiciona el final de carrera que es el encargado, con ayuda de la leva que se muestra en la parte inferior del carrusel, de indicar cuando el carrusel se encuentre en la posición 0. En el anexo B, se muestran las medidas del sensor de final de carrera seleccionado para colocar en todos los lugares en los que es necesario saber la posición ya sea del carrito en el eje Z o del carrusel.

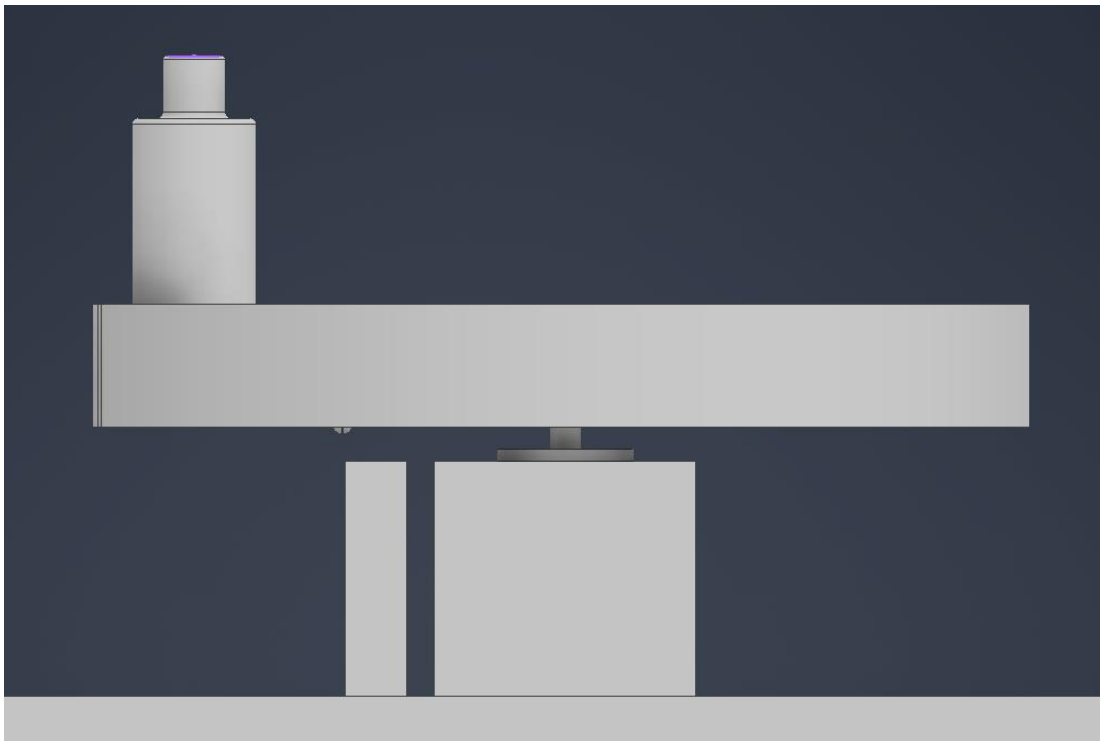


Fig. 30. Vista lateral módulo de posicionamiento

14.4.1 Calibraciones

Como parte de la seguridad del equipo, es importante que este tenga claro donde se encuentra, es por ello por lo que como se mencionó anteriormente, para cada una de las partes críticas, se hace uso de finales de carrera. Estos se encuentran ubicados bajo el carrusel, bajo el carrito móvil y también sobre este, en la pestaña que sobresale de la pared de la izquierda en la Fig. 31. Los finales de carrera que cumplen su función para el posicionamiento en el eje Z, están ubicados de tal manera que, al llegar a su posición mínima, el sistema sepa que ya llegó en caso de que no pare por sí solo haciendo uso del parámetro establecido de distancia máxima de bajada, y de igual manera para el final de carrera que retroalimenta la información del límite superior, con la diferencia de que, este es más crítico, puesto que sobre el brazo se encuentra el tornillo sin fin, que sobresale alrededor de 10 cm por encima del cuerpo del motor, y la varilla de acero inoxidable que le brinda soporte a la pieza que mueve el émbolo, y estos en caso de que el carrito no pare y siga subiendo colisionarían con la pared superior del equipo, es por ello que es necesario que aparte de los parámetros establecidos en el código, también se tenga un plan B en caso de fallar.

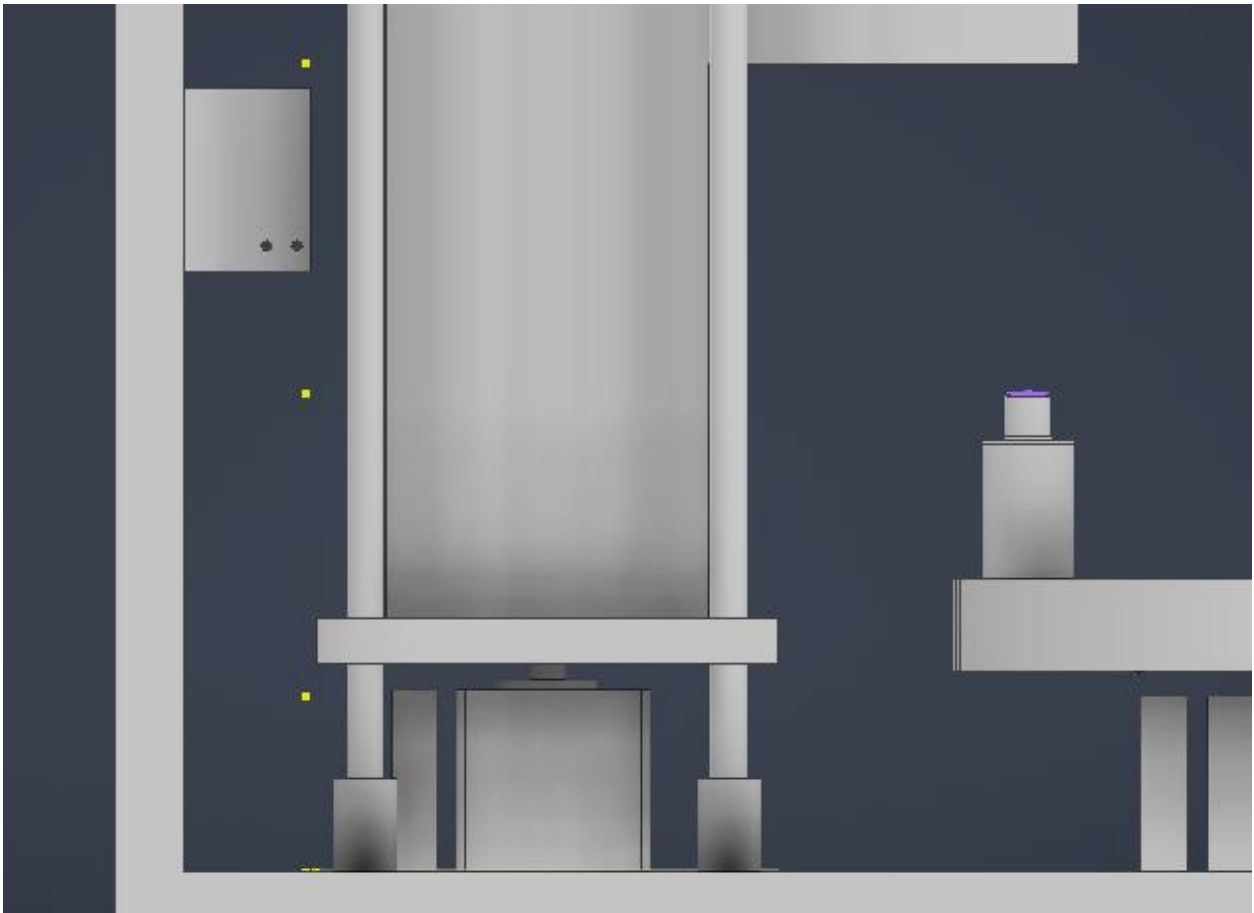


Fig. 31. posicionamiento de finales de carrera

14.5 Presupuesto

Con el objetivo de poder estimar la viabilidad económica del proyecto se incluyó un análisis de costos de los componentes que se utilizarían para la construcción de un prototipo. Los precios presentados a continuación fueron obtenidos de la página de Amazon, con el objetivo de evaluar un contexto mucho más estándar de los precios en el mercado actual, dichos precios son expresados en dólares estadounidenses (USD), la cual es la moneda de curso legal de El Salvador.

De igual forma se consideró la licencia del software que se implementa en el sistema del equipo, dado que se emplearon versiones académicas o de libre acceso disponibles a través de la institución educativa, Dentro del análisis no se contemplan los costos asociados a herramientas de fabricación especializada, servicios de impresión 3D, instrumentación de calibración volumétrica certificada. A continuación, se muestra en la Tabla. 11 con el resumen de los costos del equipo:

Tabla 11. Tabla de costos de componentes.

Componente / material	Cant.	Precio	Subtotal
Arduino Mega 2560	1	\$22.99	\$22.99
Motor NEMA 17 paso a paso	3	\$8.66	\$25.98
Motor NEMA 17 con tornillo sin fin 100 mm	2	\$22.99	\$45.98
Driver A4988 (paquete de 5 unidades)	1	\$10.19	\$10.19
Final de carrera mecánico	3	\$0.28	\$0.84
Rodamiento lineal para varilla 8 mm	5	\$0.99	\$4.95
Varilla de acero inoxidable 8 mm x 350 mm	2	\$15.67	\$31.34
Fuente de alimentación 12V 10A 120W	1	\$12.59	\$12.59
Ventilador 60 mm 12V	1	\$6.99	\$6.99

Filamento PLA+ 1 kg	1	\$15.99	\$15.99
UPS de 600 VA/300 vatios	1	\$83.99	\$83.99
Arduino IDE	1	\$0.00	\$0.00
Licencia LabVIEW (Anual)	1	\$560.00	\$560.00
Autodesk Inventor (estudiante)	1	\$0.00	\$0.00
TOTAL ESTIMADO DEL PROTOTIPO			\$821.83

Nota. Precios consultados en mayo de 2026. P. unitario = precio unitario en USD.

El costo total estimado del prototipo asciende a \$821.83 USD, de los cuales un total de \$261.33 corresponde a los componentes físicos del sistema y \$560 pertenecen al apartado de software por parte de la licencia de programa LabVIEW, siendo este un 68.14% del costo total del prototipo y representando el mayor costo dentro de todo el sistema, el resto representa un monto accesible bajo el contexto de desarrollo de prototipos académicos de automatización para laboratorio.

15. Resultados

15.1 Panel frontal

El panel frontal se modificó para que este fuese más intuitivo para el usuario, y se le agregó una simulación que toma los datos reales de que vial se ha seleccionado, y qué volumen se debe tomar de cada uno y va siguiendo la lógica con estos datos para luego mostrar el flujo de trabajo con ayuda de indicadores LED como se muestra en la Fig. 32. Los viales están posicionados de manera que asemejen las posiciones reales del carrusel cuando se encuentra en posición “home”; y a la vez que va haciendo cada paso, va mostrando si este está subiendo o bajando, y cuando se posiciona sobre un vial, muestra que es lo que está haciendo, lo cual puede ser, aspirando, dispensando o enjuagando.



Fig. 32. Panel frontal para usuario

En la parte de configuración inicial se muestran los controladores para el modo de operación, el volumen de la mezcla que es la capacidad total de volumen del vial que se está utilizando, el volumen de inyección, el cual corresponde al volumen de la

primera dosis que se dará al paciente, y el VISA resource name que es donde se selecciona el puerto serial al que se conecte el microcontrolador.

El apartado de frascos/mezclas contiene la opción de activar un vial, o sea, si el número de frasco está encendido, significa que se tomará en cuenta para la mezcla, en cambio si no está encendido se obvia, y se continua hasta encontrar uno que si está encendido. En este apartado también se cuenta con controladores para seleccionar o escribir la cantidad de concentrado deseado en BAU, y la cantidad de concentrado comercial con el que ya viene determinado el vial.

En resultados se muestra en un apartado el volumen final de cada concentrado que el equipo necesita tomar para luego dispensarlo y hacer la mezcla. Así mismo, muestra el volumen de diluyente que debe tomar, el cual se calcula restando al volumen del vial la sumatoria de volúmenes de concentrados.

Cuando se escoge el modo diluciones seriadas, no se muestran los valores de cada dilución, ya que, para las 4 diluciones siempre se toma el mismo volumen de diluyente y de concentrado de mezcla, con la diferencia que el vial del que se toma el concentrado siempre en primer lugar el vial 0, luego el vial 1, y así sucesivamente hasta llegar al vial 3.

15.2 Prototipo 3D.

Anteriormente, se mostró el diseño en 3D de las partes móviles del equipo, que son comandadas por el microcontrolador por medio de los comandos recibidos desde LabVIEW, pero el equipo debe estar protegido y no quedar a la intemperie para evitar que contaminantes y agentes externos puedan entrar en las mezclas y concentrados; es por ello que se diseñó un chasis que aparte de proteger al equipo, manteniéndolo en el interior, también albergue la parte electrónica dentro de él en un espacio apartado del área de trabajo del usuario.

Como se muestra en la Fig. 33, el chasis está conformado por 3 partes principales, que son el contenedor principal, que se muestra su parte frontal en el literal A, y su parte trasera en el literal B. En la parte frontal, cuenta con un espacio superior para colocar el sistema, que está conformado por los 3 motores, el carrito móvil, la pieza encargada de mover el embolo, y el carrusel, así como los finales de carrera. En la parte inferior, cuenta con un espacio, que es parecido a una gaveta, que se desliza sobre rieles, y tiene una plataforma, que es la que se encarga de sostener los dispositivos electrónicos que funcionan en conjunto con el microcontrolador y a este mismo. Entre los dispositivos están: el módulo para usar el medio paso, de los cuales son 3 y la fuente encargada de darle alimentación al equipo. En la parte trasera, se cuenta con dos orificios donde se colocan ventiladores de 12 voltios, para mantener enfriados los componentes en el gabinete.

En el literal C, se puede observar la puerta que protegerá al equipo, esta es de cristal para poder ver el procedimiento, y es una puerta pivotante, o sea, no utiliza bisagras para poder abrirse o cerrarse, sino que, utiliza un eje, en el cual la puerta como su nombre lo indica, pivota.

En el literal D, se muestra como tal el gabinete, el cual se desliza entre dos rieles, este cuenta con agujeros para atornillarlo al contenedor principal y que este sea extraído solamente con fines de mantenimiento.

Como producto final, se tiene el ensamble de las partes mostradas en la Fig. 33, las cuales juntas forman parte del chasis, que actúa como un resguardo del sistema que se encarga de hacer las diluciones y mezclas personalizadas. Dentro de este como se muestra en la Fig. 34, se tiene este sistema al cual el usuario clínico, puede acceder de manera fácil, abriendo la puerta pivotante, la cual permite que el usuario tenga un acceso fácil y amplio para posicionar los viales.

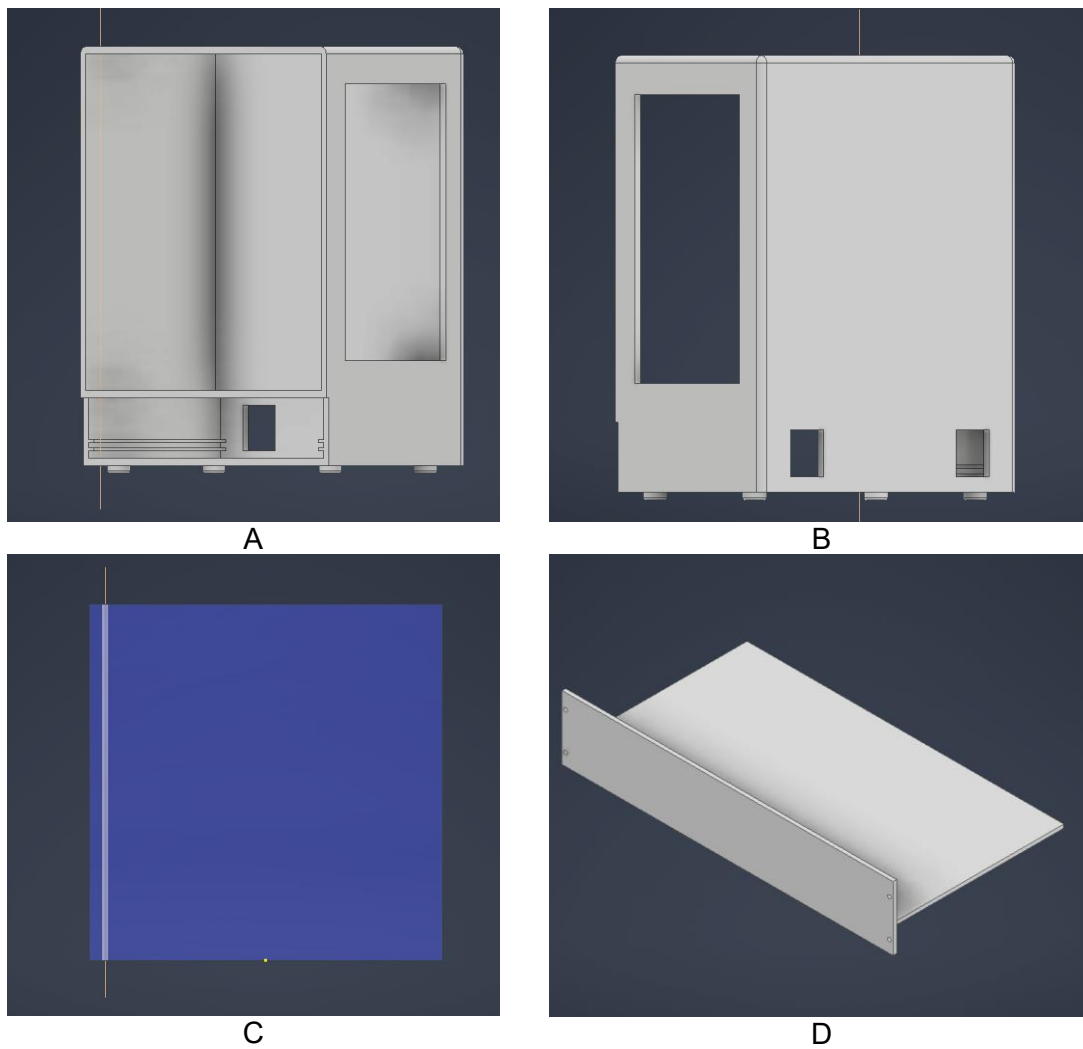


Fig. 33. Partes del chasis

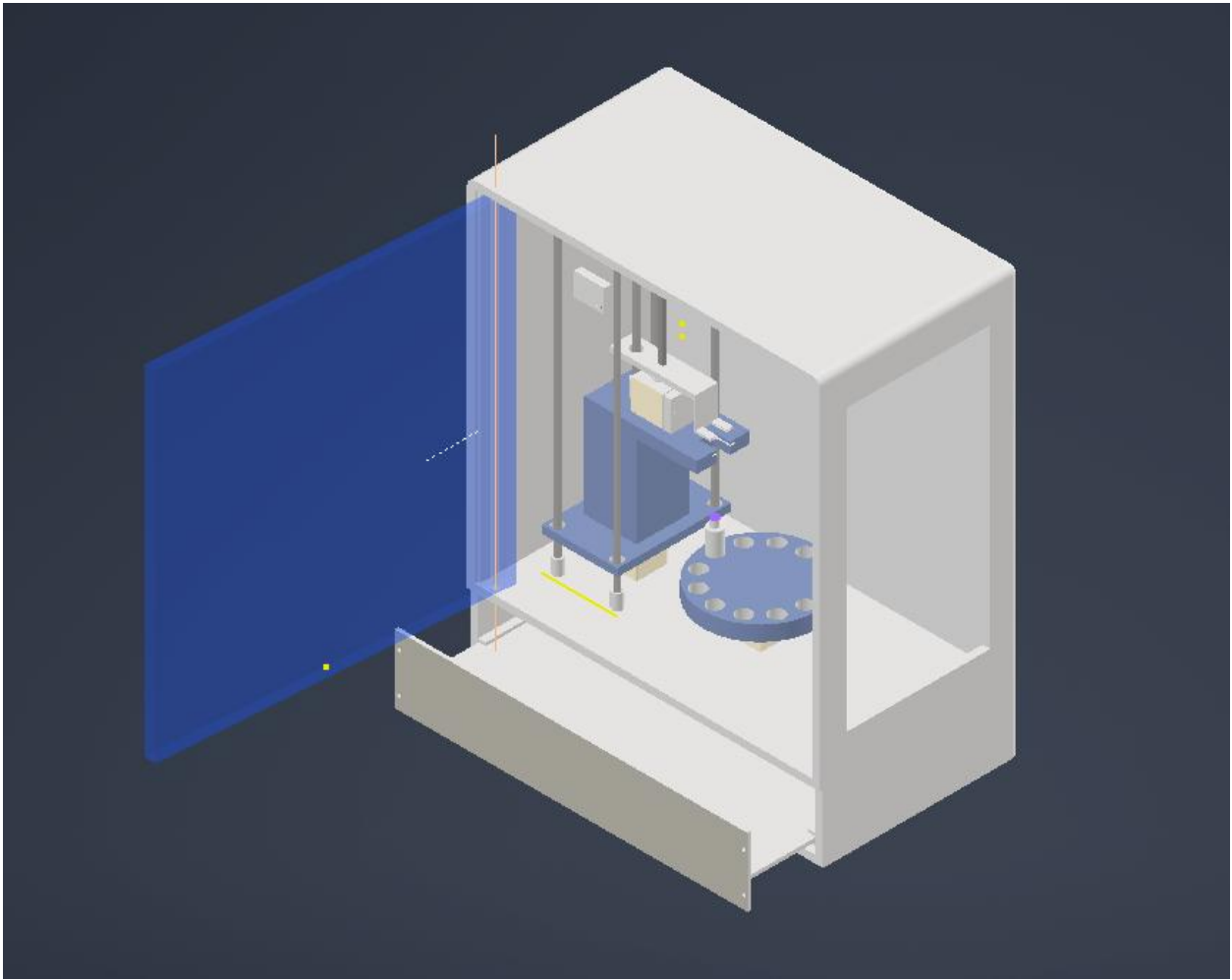


Fig. 34. Equipo ensamblado completamente.

15.3 Diagrama de bloques del sistema.

El diagrama mostrado en la Fig. 35 describe la arquitectura funcional del sistema automatizado en el cual se identifican los módulos principales y su interacción para logara una operación integral. Dicho sistema se puede agrupar en tres niveles fundamentales: interfaz de usuario, módulo de control y proceso físico.

15.3.1 Usuario

Representa al operador del sistema, es decir que representa la interacción directa con la plataforma por medio de una interfaz gráfica. Cumpliendo funciones como definir parámetros para la preparación de la vacuna, selección de modo de operación y también supervisar la ejecución del proceso.

15.3.2 Módulo de usuario

Este bloque constituye la interfaz que relaciona al usuario con todo el sistema, es decir la interacción hombre-maquina (HMI), cumpliendo con la gestión de alto nivel de dicho proceso.

15.3.3 Capa de supervisión

Corresponde al núcleo del módulo por medio del entorno de programación de LabVIEW, cumpliendo principalmente las siguientes funciones:

- Lógica de cálculos: permite la realización de los cálculos necesarios para la preparación de las mezclas, como es el caso de la determinación de volúmenes de concentrado y volúmenes de diluyente.
- Control y monitoreo: proporciona el panel gráfico frontal que permita al usuario visualizar el estado del proceso en tiempo real, así como también permite enviar comandos de control a los actuadores del sistema.

15.3.4 Interfaz de comunicación (NI-VISA)

Aquí se encuentra el puente entre la capa de supervisión y el módulo de control, es decir que permite la transmisión de datos entre el software y el hardware por medio de comunicación serial y dentro de sus principales funciones están:

- Configuración del puerto de comunicación.
- Conversión de datos a formato de cadena de caracteres.
- Envío estructurado de comandos.

15.3.5 Módulo de control

Cumple la función de recibir las instrucciones de alto nivel y las traduce las acciones correspondientes en el sistema físico.

1. **Microcontrolador (Arduino Mega):** representa el núcleo de control del sistema, ya que permite la ejecución de procesos físicos en tiempo real al encargarse de ejecutar las siguientes funciones:
 - Recepción e interpretación de comandos seriales.
 - Control de secuencias operativas.
 - Coordinación de actuadores y sensores.

Este sistema distingue tres tipos distintos de comandos: dosificación de concentrados, adición de diluyente y ejecución de diluciones seriadas.

2. **Actuadores:** aquí se agrupan los elementos electromecánicos responsables de ejecutar todos los procesos físicos esperados, siendo constituido primordialmente por:
 - Motores paso a paso para el posicionamiento del carrusel.
 - Sistema de accionamiento de jeringa para aspiración y dispensación.

- Mecanismo de movimiento vertical (eje Z).

15.3.6 Proceso físico

Es la conclusión de todo el flujo de trabajo del sistema, pues que es donde se lleva a cabo la preparación de la vacuna mediante procesos como dosificación de concentrados alérgicos, adición de diluyente, mezcla de componentes en el vial de destino, etc.

Dentro de este se encuentra la línea de retroalimentación contemplado para el sistema de posicionamientos, incluyendo:

- Posiciones de viales
- Movimiento controlado
- Coordinación con actuadores

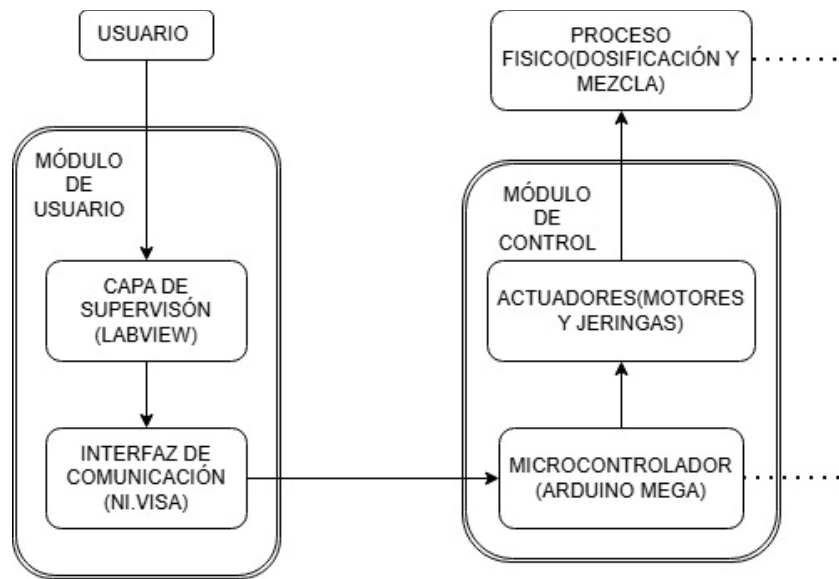


Fig. 35. diagrama de bloques del equipo

15.4 Diagrama de flujo

En el diagrama que se muestra en la Fig. 36 representa la secuencia lógica que conlleva la operación del sistema, partiendo de la interacción inicial con el usuario hasta la finalización del proceso.

15.4.1 Primer segmento

Inicio

Se inicia el proceso con la ejecución de LabVIEW, en donde se habilita la interfaz gráfica para la interacción con el usuario.

Selección de modo de operación

En este punto al usuario se le presenta una bifurcación del sistema mediante un control numerado, dándole a elegir entre dos operaciones:

- Mezcla personalizada
- Diluciones seriadas

a. Modo de mezcla personalizada

Ingreso de datos

Se habilita el ingreso de los siguientes parámetros requeridos para generación de una mezcla específica:

- Volumen total de mezcla (V1).
- Volumen de inyección.
- Concentración deseada (C1).
- Concentración comercial del extracto (C2).

Selección de viales

El usuario selecciona los viales de concentrado por medio de un sistema basado en arreglos y estructuras tipo cluster, lo que permite que únicamente se activen aquellos viales que formaran parte de la mezcla que se desea realizar.

Cálculo de volúmenes

El sistema ejecuta el cálculo del volumen requerido para cada vial activo mediante la siguiente relación:

$$V2 = V1 \times \frac{C1}{C2}$$

Cálculo de diluyente

El sistema continúa con el cálculo del volumen del diluyente mediante la siguiente relación:

$$Vd = V1 - \sum V2$$

b. Modo de diluciones seriadas

Selección de volumen

El usuario establece el valor de volumen del vial a trabajar, ya sea de 5ml o 10 ml.

Cálculo de diluciones

En este punto el sistema ejecuta un ciclo de cuatro iteraciones donde se determina:

- Volumen por transferir
- Volumen de diluyente

Permitiendo generar las diluciones sucesivas (1:10, 1:100, 1:1000, 1:10000).

Generación de comandos

Todos los resultados obtenidos en cualquiera de los dos caminos que pudo haber tomado el usuario son convertidos en cadenas de caracteres estructuradas que sirven para representar las instrucciones específicas del usuario al microcontrolador.

15.4.2 Segundo segmento

Comunicación mediante NI-VISA

El proceso de comunicación se lleva a cabo por medio de la utilización de NI-VISA, ya que permite enviar las instrucciones específicas al microcontrolador por medio de una transmisión ordenada de los comandos.

Ejecución del módulo de control

En esta parte el microcontrolador inicializa el sistema por medio de un proceso de calibración (homing) para posteriormente ejecutar las acciones en función del tipo de comando recibido:

- Dosificación de concentrados
- Adición del diluyente
- Ejecución de diluciones seriadas

Para cada acción se ejecutan una serie de movimientos coordinados de posicionamiento, aspiración y dispensación de cada volumen en cuestión.

Verificación de ejecución

El mismo sistema evalúa si todos los comandos que se enviaron fueron procesados, de no ser así el sistema continúa ejecutando las acciones restantes.

Finalización del proceso

Una vez se ha corroborado la ejecución de todos los comandos el sistema concluye con la preparación de la vacuna, ya sea mezcla personalizada o una serie de diluciones.

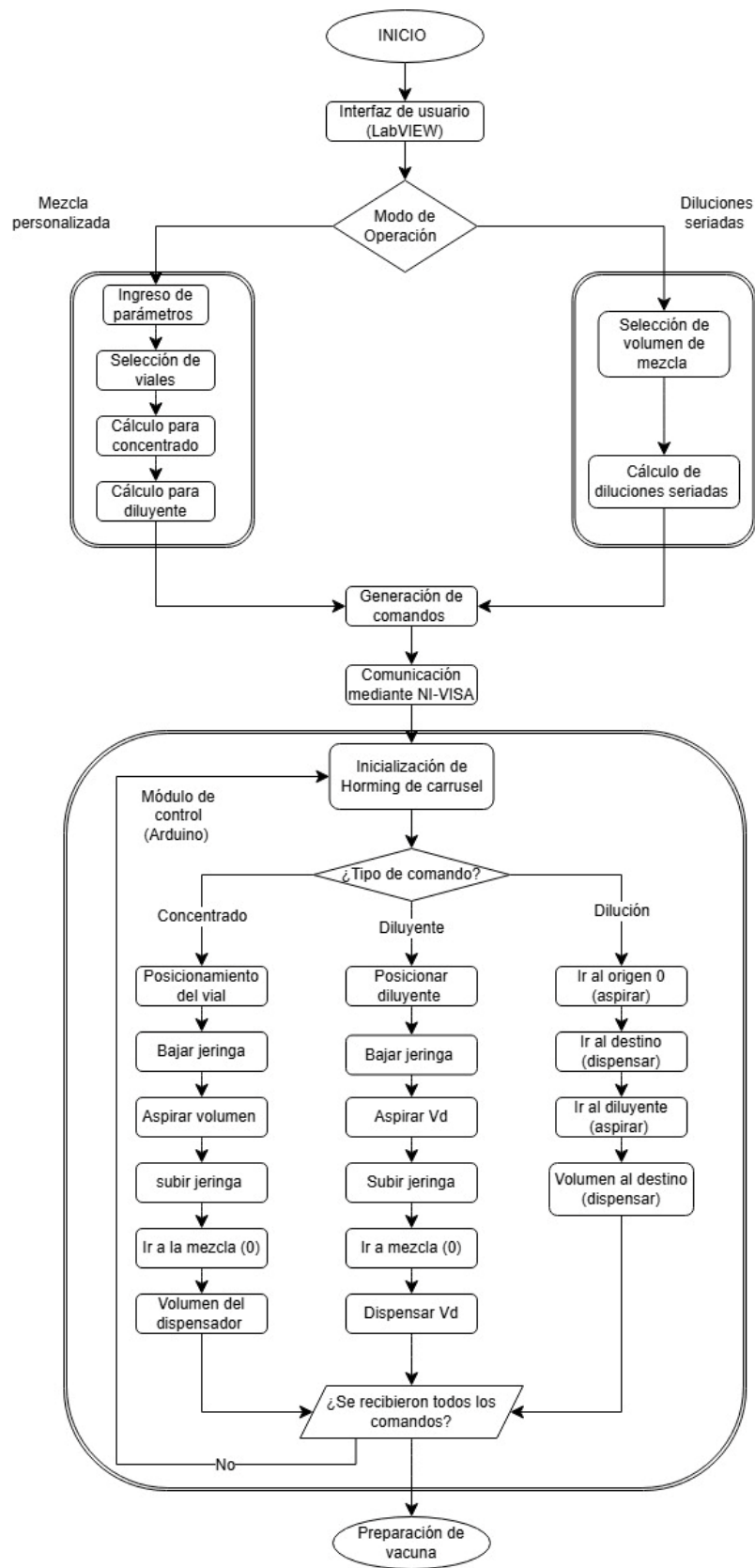


Fig. 36. Diagrama de flujo de los procesos del equipo

16. Discusión

El sistema logró automatizar el proceso de creación de vacunas, el cual hasta el momento se tiene conocimiento que, a nivel nacional e internacional, se mantiene un proceso manual en cual el alergólogo está encargado de llevar a cabo todo el proceso, desde el cálculo del volumen de cada uno de los concentrados que desea agregar a la mezcla, hasta la dosificación y dilución de estas. De igual manera, se adicionó otro proceso hecho de forma manual, el cual es la dilución seriada de la mezcla generada de concentrados, ya que, al igual que el otro proceso, está muy mecanizado, lo que permite una fácil automatización. También se logró diseñar un chasis, pensado para que el sistema se mantenga protegido y almacenado en un ambiente cerrado y se tengan expuestos al usuario solo los actuadores, y no los controladores. El equipo está pensado para poder ser utilizado en ambientes clínicos y hospitalarios, por lo que tiene las siguientes dimensiones: 56 cm de altura, 46.5 cm de ancho, y 25.5 cm de profundidad. Con estas dimensiones el equipo puede ser fácilmente utilizado en una clínica, o un área hospitalaria, ya que está pensado para que sea un equipo de sobremesa.

El método manual es una técnica que los alergólogos deben aprender y perfeccionar, al punto que se vuelve habitual por la cantidad de veces que repiten un mismo proceso, pero en el proceso no solo se deben tomar en cuenta los aspectos de capacidades del personal, sino también el estado físico y mental de la persona encargada de hacer la mezcla, ya que puede presentar fatiga, y sin querer agregar a la mezcla la cantidad incorrecta debido a un mal cálculo que pasó por alto, y es aquí donde la automatización de un proceso reduce el error humano, mejorando la confiabilidad del proceso, puesto al ser un equipo médico, este no presenta fatiga como una personal, y no puede omitir un paso porque lo olvidó. Esto mejora por completo el método de mezcla y diluciones seriadas y además disminuye la carga laboral del personal encargado de dichos procesos.

Se investigó el proceso, y se encontró que luego de las pruebas cutáneas o de sangre para saber las alergias del paciente y que tanto le afectan, los alergólogos aparte de dar un diagnóstico, deben usar sus conocimientos para saber que cantidad de concentrado es lo que deben poner de cada una las mezclas para que este no sea contraproducente, y para ello se debe calcular a mano cada uno de los volúmenes para una muestra, y para cada uno de los pacientes, ya que, cada paciente tiene un tratamiento individualizado.

Con el equipo, se logró tener un cálculo de estos volúmenes solamente poniendo 4 datos, de los cuales dos de ellos son de manera global para toda la mezcla, y los otros dos son específicos para cada concentrado de alérgeno. Los datos globales son: la capacidad de volumen del vial que está utilizando la cual puede ser 5 o 10 ml, como

se encontró en diferentes bibliografías, y el volumen aplicado en la primera inyección. Los datos que son específicos para cada uno de los viales son: la cantidad de unidades alérgicas biológicas (BAU) de concentrado que se desean en la mezcla, y la cantidad de BAU que contiene el concentrado que se está utilizando. De esta manera el equipo replica el mismo cálculo que el que está estandarizado, y con ello los alergólogos solo ingresan los datos necesarios y el sistema creado envía los comandos al microcontrolador para que este pueda dar las instrucciones a los actuadores y se cree la mezcla personalizada o las diluciones seriadas.

Para el proyecto se decidió fijar un enfoque orientado principalmente en el diseño conceptual, desarrollo lógico y la simulación del sistema automatizado de fabricación de vacunas, por lo que se tomó a bien no contemplar dentro de nuestro alcance la construcción física del dispositivo. Esto a razón de una serie de limitaciones que impidieron su ejecución.

En primer lugar, se presentaron limitaciones de tiempo que impidieron abarcar de manera simultánea procesos de diseño, desarrollo de software, modelado mecánico y además fabricación física, puesto que la fabricación de un prototipo funcional implica ciclos de ensamblaje, prueba, análisis de resultados y correcciones, que en conjunto representan una gran inversión de tiempo que se ve limitado por cumplimiento de fechas establecidas para la ejecución del proyecto.

En segundo lugar, se evaluó el apartado correspondiente a los recursos económicos, dado que estos representaron una restricción determinante al momento de considerar un prototipo físico. Si bien el análisis evidenció que el costo de materiales era de aproximadamente \$261.33 USD lo cual no representa un monto excesivo, al momento de tomar en cuenta la implementación de una licencia de LabVIEW el costo se incrementa a un total de \$821.83 USD, este monto no considera costos asociados a herramientas de fabricación como impresión 3D, gastos de producción, instrumentación de calibración, ni los gastos que se generan de las correcciones realizadas durante la fase de prueba.

En tercer lugar, debido a la naturaleza biomédica de la aplicación se presentan requerimientos técnicos y regulatorios que trascienden de un proyecto académico de esta escala si se desea realizar un prototipo implementable. En el caso específico de El Salvador se establece que todo dispositivo medico destinado a ser utilizado en seres humanos debe de cumplir con las disposiciones técnicas específicas desde que se fabrica el dispositivo hasta su vigilancia post implementación, actualmente el encargado de regular el cumplimiento de estas especificaciones es la Superintendencia de Regulación Sanitaria (SRS) a través de los Reglamentos Técnicos Salvadoreños RTS 11.03.02:21, RTS 11.03.03:22 y RTS 11.03.04:23. Un prototipo como el diseñado debe de cumplir con estos estrictos protocolos de

bioseguridad, condiciones controladas y además procesos de validación de exactitud volumétrica de los procesos por medio de certificaciones de calibración. (OSARTEC, 2023)

Pese a lo anterior mencionado, los resultados que se obtuvieron en esta investigación permitieron evidenciar la viabilidad técnica de la propuesta, esto por medio del diseño lógico implementado en LabVIEW, el modelado del sistema mecánico desarrollado en Autodesk Inventor y la simulación funcional del flujo de trabajo de sistema, permitiendo establecer una base sólida y documentada para ser candidata a futuros desarrollos orientados a la construcción física del prototipo y todo lo que esto conlleva.

17. Conclusiones y Recomendaciones

Se logró desarrollar una propuesta de diseño para un dispositivo automatizado orientado a la producción de vacunas para inmunoterapia con alérgenos, integrando componentes mecánicos, electrónicos, y de control que permiten automatizar el proceso manual de preparación y dosificación. Para ello se analizó el proceso manual, lo cual permitió identificar etapas importantes relacionadas con la manipulación de alérgenos, y como integrarlas a un sistema automatizado.

Se establece que el sistema electromecánico desarrollado en esta investigación ha sido diseñado bajo un enfoque de bajo flujo, ideal para entornos de clínicas especializadas o laboratorios de inmunoterapia focalizados. No obstante, la arquitectura modular y el software de control desarrollados dejan las bases tecnológicas asentadas para una escalabilidad de alto flujo, proyectada para abastecer las demandas de un centro hospitalario de gran afluencia de pacientes.

Se investigaron estándares y protocolos que permitieran establecer lineamientos para la correcta manipulación de sustancias alergénicas, las cuales contribuyeron a orientar el diseño hacia un entorno biomédico y clínico. También se investigaron normativas relacionadas a equipos médicos y la gestión de calidad de estos.

Como líneas de investigación y desarrollo futuro, se plantea la evolución de este prototipo hacia una plataforma macro-industrial, lo cual implicaría un nuevo diseño, donde pase del carrusel de 12 viales, hacia sistemas de transporte lineal, y la sustitución de la dosificación por medio de la jeringa descartable.

Se planteó un diseño mecánico que permite la integración de un sistema de carrusel para el posicionamiento de los viales, un mecanismo de desplazamiento vertical, un sistema de dosificación, la cual disminuye el proceso de manipulación humana, solamente al correcto posicionamiento de los viales en el carrusel para hacer el proceso deseado.

El desarrollo del sistema electrónico y de control permitió establecer comunicación entre la interfaz desarrollada en LabVIEW y el microcontrolador facilitando la automatización de secuencias de movimiento, aspiración y dispensación de volúmenes previamente calculados.

La integración de los elementos mecánicos, electrónicos y de software permitió obtener una propuesta funcional capaz de simular la lógica operativa, requerida para la preparación automatizada de las vacunas.

Al evaluar el diseño general, se concluye que la propuesta es viable técnicamente como base para futuros desarrollos, y a la vez demuestra el potencial de la automatización en procesos de inmunoterapia que aun dependen de procedimientos manuales para llevarse a cabo por falta de tecnología innovadora.

En conclusión, este proyecto no solo resuelve de manera eficiente la problemática de la dosificación personalizada a pequeña escala, sino que se consolida como la matriz tecnológica y la prueba de concepto fundamental necesaria para el futuro desarrollo de sistemas de alto flujo orientado a la red de hospitales públicos del país.

18. Referencias

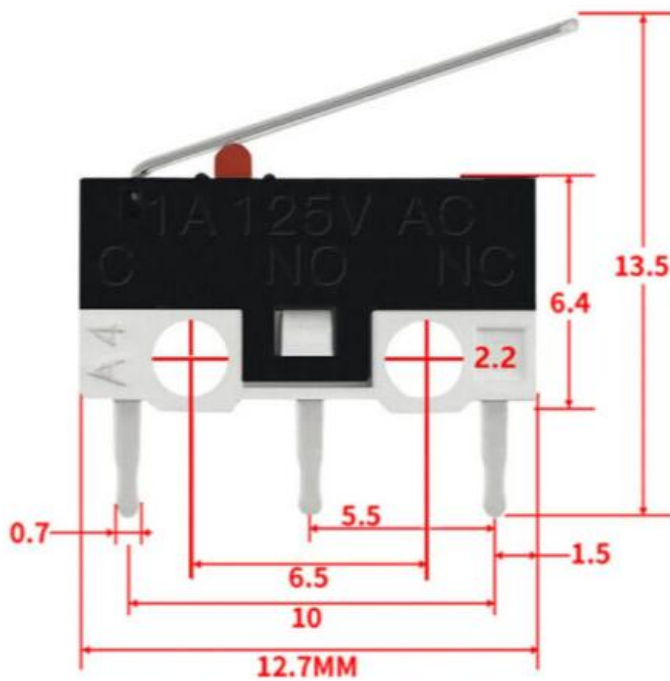
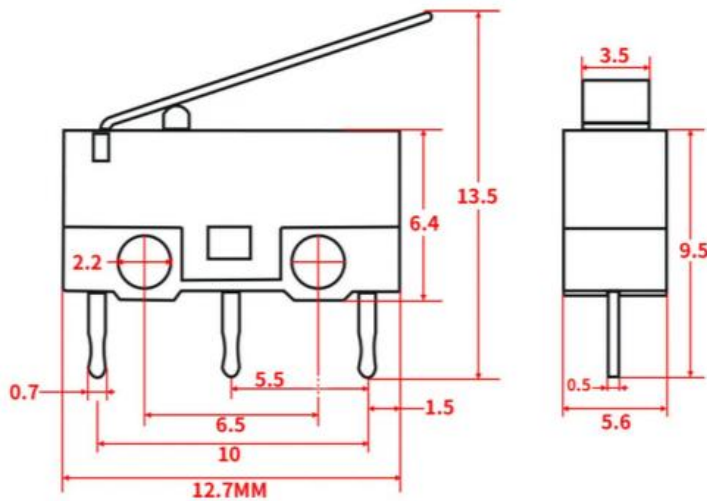
- Allegro MicroSystems. (2014). *A4988 datasheet*. Obtenido de <https://components101.com/modules/a4988-stepper-motor-driver-module>
- Allegro MicroSystems. (s.f). *A4988 DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection Datasheet* . Obtenido de <https://www.allegromicro.com/~media/files/datasheets/a4988-datasheet.pdf>
- Arduino. (2024). *Arduino IDE*. Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/software>
- Arduino. (2025). *Arduino Documentation (Serial Communication)*. Recuperado el 09 de 04 de 2026, de <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/serial/>
- Arduino. (s.f.). *Arduino Mega 2560 Rev3*. Obtenido de <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
- Arduino IDE . (2025). *Arduino Mega 2560 Rev3*. Obtenido de ARDUINOSTORE: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
- Autodesk. (2024). *Autodesk Inventor*. Obtenido de <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>
- Bolton, W. (2015). Programmable logic controllers. En W. Bolton. Oxford: Newnes.

- Chu, T. J. (2024). *Allergy Shots*. Obtenido de Allergy and Asthma, Inc.:
<https://chuallergy.com/allergy-asthma-info/allergy-shots/>
- Corp, National Instruments. (2026). *LabVIEW: Software de sistemas de ingeniería*.
 Obtenido de <https://www.ni.com/es/shop/labview.html>
- Dbouk, T., Visez, N., & Ali, S. e. (2022). Risk assessment of pollen allergy in urban environments. *Scientific Reports*. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-022-24819-w>
- Dougherty, J., Alsayouri, K., & Sadowski, A. (31 de Julio de 2023). *Allergy* . Obtenido de National Library of Medicine :
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/books/NBK545237/>
- Durham, S., & Shamji, M. (2023). Allergen immunotherapy: past, present and future. *Nature Reviews Immunology*, 317-328.
- Ebo, D., Hagendorens, M. M., Bridts, C., Schuerwegh, A. J., De Clerck, L. S., & Stevens, W. J. (2004). In vitro allergy diagnosis: should we follow the flow? *Clinical and Experimental Allergy*, 332-339.
- Ebo, D., Leysen, J., Mayorga, C., Rozieres, A., Knol, E., & Terreehorst, I. (1998). In Vitro and skin Testin for Allergy: Comparable Clinical Utility and Costs. *The american journal of managed care*, 1275-1286.
- Extractopedia. (s.f.). *How to Perform Dilutions*. Obtenido de Extractopedia:
<https://www.extractopedia.com/use-of-allergen-extracts/how-to-perform-dilutions/>
- Fundación IVI. (2025). *IVI FOUNDATION* . Obtenido de <https://www.ivifoundation.org/>
- GDSTIME. (s.f). *Amazon*. Obtenido de GDSTIME 40mm x 10mm 12V brushless cooling fan: <https://www.amazon.com/dp/B00Q7XB5AS>
- Groover, M. P. (2015). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. Pearson .
- Handson Technology. (2023). *Tecnologia practica* . Obtenido de 17HS4401S 1.7A Torque:43N.cm Stepper Motor Datasheet:
<https://www.handsontec.com/dataspecs/17HS4401S.pdf>
- Heinzerling, L., Mari, A., Bergmann, K.-C., Bresciani, M., Burbach, G., Darsow, U., . . . Haahtela, T. (2013). The skin prick test--European standards. *Clinical and translational allergy*, 3(3).

- Independence . (12 de febrero de 2020). *Medical Policy Bulletin: Allergy Immunotherapy*.
Obtenido de Independence:
<https://medpolicy.ibx.com/ibc/Commercial/Pages/Policy/7cda42a8-62ee-45b1-837c-48fc772dba27.aspx>
- Kuby. (2013). *Immunology*. England: W. H. Freeman and Company.
- Larin, M. A. (27 de Octubre de 2023). Inmunoterapia por alérgenos. (B. Larrama, Entrevistador)
- LeWine, H. E. (9 de Febrero de 2024). *Allergy Overview*. Obtenido de Harvard Health Publishing: https://www.health.harvard.edu/a_to_z/allergy-overview-a-to-z
- Mohamed H. Shamji, Cezmi A. Akdis, Kari C. Nadeau, Thomas B. Casale, Alkis Togias, & Carsten B. Schmidt-Weber. (2023). Allergen immunotherapy: Past, present and future. *Nature Reviews Immunology*.
- Monteiro, F., Akio, E., Santos, C., & Solé, D. (2022). Good clinical practice recommendations in allergen immunotherapy: Position paper of the Brazilian Association of Allergy and Immunology – ASBAI. *World Allergy Organization Journal*.
- My Tech Tutor. (24 de octubre de 2022). *A4988 Stepper Motor Driver with Arduino*. Obtenido de My Tech Tutor: <https://mytectutor.com/a4988-stepper-motor-driver-with-arduino/#:~:text=A4988%20Microstepping%20Settings,step%20resolutions%20as%20indicated%20below.>
- National Instruments . (2024). *LabVIEW System Design Software*. Obtenido de <https://www.ni.com/en/shop/labview.htm>
- National Instruments. (16 de 10 de 2025). *Configure the Termination Character for VISA Serial Reads*. Obtenido de <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z0000019L6gSAE&l=es-SV>
- National Instruments. (04 de 02 de 2026). *Función de cierre de VISA*. Obtenido de <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-api-ref/page/functions/visa-close.html>
- National Instruments. (04 de 02 de 2026). *Manual de referencia de programación de LabVIEW*. Obtenido de <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-api-ref/page/functions/visa-write.html>

- National Instruments. (31 de 03 de 2026). *NI-VISA Overview*. Obtenido de <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-visa/page/ni-visa-overview.html>
- Nelson, M. R., & Cox, L. (2014). *Practice Management Resource Guide, Chapter: 9*. Obtenido de American Academy of Allergy, Asthma & Immunology: <https://www.aaaai.org/Aaaai/media/MediaLibrary/PDF%20Documents/Practice%20Management/PM%20Resource%20Guide/Ch-9-Allergen-Immunotherapy-Extract-Preparation-Manual-correction-July-19-12.pdf>
- OSARTEC. (2023). *Reglamentos Técnicos Salvadoreños relacionados con dispositivos médicos: RTS*. Obtenido de <https://osartec.gob.sv/conoce-los-reglamentos-tecnicos-salvadorenos-relacionados-con-los-dispositivos-medicos/>
- Raspberry Pi Ltd. (2025). *Raspberry Pi 4 Model B. Raspberry Pi*. Obtenido de Raspberry Pi: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>
- Sicherer, S. H., Wood, R. A., IMMUNOLOGY, S. O., Sicherer, S. H., Abramson, S., Chipps, B. E., . . . Matsui, E. C. (2012). Allergy testing in childhood: using allergen-specific IgE tests. *Pediatrics*, 193-197.
- SparkFun Electronics. (s.f). *LED - Basic Red 5mm. SparkFun*. Obtenido de <https://www.sparkfun.com/led-basic-red-5mm.html>
- Systems, Espressif. (2025). *ESP32 — wi-fi & bluetooth SoC. Espressif Systems*. Obtenido de ESPRESSIF: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>

19.2 Anexo B



Anexo B tomado del sitio web: Electronilab (<https://electronilab.co/tienda/interruptor-final-de-carrera-limit-switch/>)