

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Reingeniería de un Micro extractor-dosificador para el
tratamiento de la Retinopatía del prematuro**

Trabajo de graduación presentado por Diego José Regalado Paiz para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2019

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Reingeniería de un Micro extractor-dosificador para el
tratamiento de la Retinopatía del prematuro**

Trabajo de graduación presentado por Diego José Regalado Paiz para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

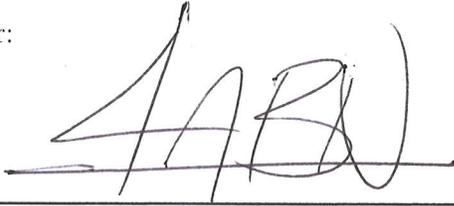
2019

Vo.Bo.:



(f) _____
MSc. Jose Antonio Bagur

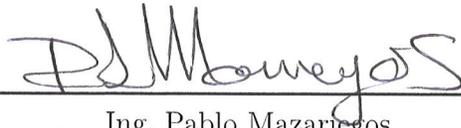
Tribunal Examinador:



(f) _____
MSc. Jose Antonio Bagur



(f) _____
MSc. Carlos Esquit



(f) _____
Ing. Pablo Mazariegos

Fecha de aprobación: Guatemala, 18 de Junio de 2019.

Este trabajo de graduación surgió de la necesidad de innovar una máquina ya existente y arreglar desperfectos que esta contenía. La retinopatía del prematuro es una enfermedad que a lo largo de los años se ha venido tratando de manera quirúrgica, el procedimiento utilizando avastin inyectado en el ojo del prematuro es algo nuevo, Pablo Javier Azurdia hizo una excelente investigación elaborando la máquina para extraer las microdosis de manera precisa.

Siempre he tenido el pensamiento de querer ayudar a las personas, al escuchar de este tema de investigación no dudé en trabajar en la reingeniería de la máquina diseñada por Pablo Javier Azurdia Lopez. Me satisface aportar algo que será útil para la sociedad, aportar algo al campo de la medicina.

Esta enfermedad de la que se ven afectados los bebés prematuros necesita de una herramienta de precisión que realice las extracciones con poco margen de error. Con la ayuda del Dr. Erick Saenz se realizó una entrevista para evaluar la experiencia de usuario de la máquina implementada anteriormente, esta entrevista nos llevó a identificar los puntos a innovar en la máquina.

Se hizo un nuevo diseño a nivel estructural, electrónico y de software, teniendo como base los puntos mencionados en el estudio etnográfico.

Prefacio	v
Lista de figuras	x
Lista de cuadros	xi
Resumen	xiii
Abstract	xv
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Retinopatía	3
2.1.1. Causas de la retinopatía del prematuro	3
2.1.2. Tratamiento	4
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
5. Marco teórico	11
5.1. Estudio etnográfico	11
5.1.1. Entrevista para evaluar la experiencia de usuario	11
6. Metodología y resultados	17
6.1. Fase de investigación	17
6.1.1. Propuesta de motores	17
6.1.2. Propuesta de drivers para el motor	21
6.1.3. Polímeros	23

6.1.4. Microcontrolador	24
6.2. Fase de diseño	25
6.2.1. Diseño del mecanismo	25
6.2.2. Diseño del circuito	30
6.3. Fase de manufactura	31
6.3.1. Ensamblaje	32
6.4. Fase de validación	33
7. Conclusiones	41
8. Recomendaciones	43
Bibliografía	45
Anexos	47
A. Planos de construcción	47
B. Plano esquemático PCB	59
C. Código fuente	61
D. Glosario	67

2.1. Anatomía del ojo con retinopatía.[4]	4
2.2. Anatomia del ojo con desprendimiento de retina.[4]	4
6.1. Stepper 28BYJ-48 [1]. [3]	18
6.2. Stepper bipolar 12V/400 mA [2].	18
6.3. Stepper nema 17 [3]. [7]	18
6.4. Stepper nema 8 [4]. [8]	19
6.5. Stepper nema 11 [5]. [9]	19
6.6. Stepper nema 11.	21
6.7. Driver DRV8834 [11]	21
6.8. Driver A4988 [11]	21
6.9. Driver DRV8825 [11]	22
6.10. Driver DRV8834.	23
6.11. Microcontrolador ATMEGA328p.	24
6.12. Datasheet del microcontrolador ATMEGA328p.[6]	25
6.13. Soporte micrómetro.	27
6.14. Soporte para jeringa.	27
6.15. Adaptador jeringa-micrómetro.	28
6.16. Soporte vial.	28
6.17. Base de movimiento motor.	28
6.18. Riel de dirección.	29
6.19. Adaptador micrometro-motor.	29
6.20. Base del motor.	29
6.21. Placa final	30
6.22. Circuitería de la placa.	30
6.23. Estructura metálica antigua.	31
6.24. Estructura metálica nueva.	31
6.25. Fresado de la placa diseñada.	32
6.26. Ensamblaje de la máquina microextractora-dosificadora.	32
6.27. Tubos capilares.	33
6.28. Diagrama de caja y bigote para las pruebas de 10 microlitros.	34
6.29. Gráfico de probabilidades para extracción de 10 microlitross.	35

6.30. Diagrama de caja y bigote para las pruebas de 20 microlitros.	36
6.31. Gráfico de probabilidades para extracción de 20 microlitros.	37
6.32. Diagrama de caja y bigote para las pruebas de 30 microlitros.	38
6.33. Gráfico de probabilidades para extracción de 30 microlitros.	39

6.1. Variables de selección establecidas.	20
6.2. Variables de selección con su peso establecido.	20
6.3. Matriz de decisión para la selección del motor.	20
6.4. Variables de selección establecidas para los drivers.	22
6.5. Variables de selección con su peso establecido.	22
6.6. Matriz de decisión para la selección del driver.	22
6.7. Ventajas y desventajas polímero PLA.	23
6.8. Ventajas y desventajas polímero ABS.	24
6.9. Resultados para las pruebas de 10 microlitros.	33
6.10. Datos estadísticos para pruebas de 10 microlitros.	34
6.11. Resultados para las pruebas de 20 microlitros.	35
6.12. Datos estadísticos para pruebas de 20 microlitros.	36
6.13. Resultados para las pruebas de 30 microlitros.	37
6.14. Datos estadísticos para pruebas de 20 microlitros.	38

Este trabajo de graduación se enfoca en la reingeniería de una máquina diseñada e implementada en la Universidad del Valle de Guatemala por Pablo Javier Azurdia López en el año 2013 [1]. La máquina diseñada en el 2013 tiene la capacidad de micro extraer una sustancia por medio de una jeringa de manera autónoma. Dicha máquina se utiliza para el tratamiento de una enfermedad llamada retinopatía del prematuro, la cual, se da en niños prematuros debido a un desarrollo anormal de los vasos sanguíneos de la retina [4].

El proceso de reingeniería a la máquina diseñada e implementada en la UVG en el 2013, se basó en la experiencia de las personas que ya utilizaron la máquina. Con el proceso de reingeniería lo que se pretendió fue mejorar y hacer más eficiente el primer diseño realizado en el 2013, tanto en términos mecánicos como electrónicos.

Se logró implementar un nuevo diseño a nivel estructural lo cual hace que la máquina sea más compacta y liviana, se implementó un nuevo motor para realizar el proceso de extracción mas rápido, se diseño y manufacturó una nueva PCB para el control del circuito y se elaboró un nuevo código para el microcontrolador seleccionado.

This graduation work focuses on the reengineering of a machine designed and implemented at the University Del Valle de Guatemala by Javier Azurdia López in the year 2013. This machine is used for the treatment of disease called Retinopathy of prematurity, which develops in premature infants due to abnormal development of the blood of the retina.

The process of reengineering to the machine designed and implemented in the UVG in 2013, was based on the experience of the people who already used the machine. With the reengineering process it was turned to improve and make more efficient the first design made in 2013, both in mechanical terms and in electronic terms.

It managed to implement a new design at the structural level which makes the machine more compact and light, a new engine was implemented to carry out the process of extraction faster, it was designed and manufactured a PCB for the control of the circuit and elaborate a new code for the selected microcontroller.

Este trabajo de graduación trata la reingeniería e implementación del Microextractor-Dosificador fabricado por Juan Pablo Azurdia López en el año 2013 en la Universidad del Valle de Guatemala. La máquina tiene como fin el tratamiento de la retinopatía del prematuro, esta es una enfermedad que se presenta en bebés prematuros causando desprendimiento de la retina debido al crecimiento anómalo de los vasos sanguíneos dentro de la retina y, por ende, puede causar ceguera.

La elaboración de la máquina se da debido a la complejidad que representa extraer una sustancia en el orden de los microlitros de forma manual, por esta razón se elaboró en el año 2013 una máquina que fuera capaz de extraer esta magnitud de sustancia de manera precisa. El proceso de reingeniería a la máquina diseñada en el 2013 con el fin de mejorar ciertas características establecidas por parte de los usuarios que han podido interactuar con dicha máquina y llegar a un modelo fácil de replicar. Las características que se mejoraron se distinguen en la parte mecánica, electrónica y a nivel de software.

En la parte mecánica se implementó un nuevo diseño a la estructura para que sea mas liviana y compacta para mejorar su facilidad de traslado, se realizó un nuevo diseño de las partes mecánicas del mecanismo que se ajusten al nuevo motor Nema 11. En la parte electrónica se diseñó una PCB, que conectara eléctricamente los componentes internos del circuito, como el driver, botones, lcd, motor y microcontrolador. Por último en la parte del software se elaboró un nuevo programa con un nuevo lenguaje debido al cambio de microcontrolador.

2.1. Retinopatía

La retinopatía del prematuro (retinopathy of prematurity, ROP) es una enfermedad que principalmente suele aparecer en bebés prematuros. Provoca el crecimiento de vasos sanguíneos anormales en la retina, la capa de tejido nervioso del ojo que nos permite ver. Este crecimiento puede provocar que la retina se desprenda de la parte posterior del ojo, lo cual puede producir ceguera.[1]

Algunos casos de retinopatía del prematuro son leves y se corrigen solos, pero otros requieren de cirugía para prevenir la pérdida de la vista o la ceguera. La cirugía implica el uso de láser u otros medios para detener el crecimiento de vasos sanguíneos anormales y asegurarse de que no se produzca un desprendimiento de retina.[1]

2.1.1. Causas de la retinopatía del prematuro

La retinopatía del prematuro provoca el crecimiento anormal y aleatorio de vasos sanguíneos, lo cual puede llegar a provocar que la retina finalmente se desprenda del ojo. Debido a que la retina es una de las partes esenciales de la vista, su desprendimiento causa ceguera.

Retinopatía de la prematuridad

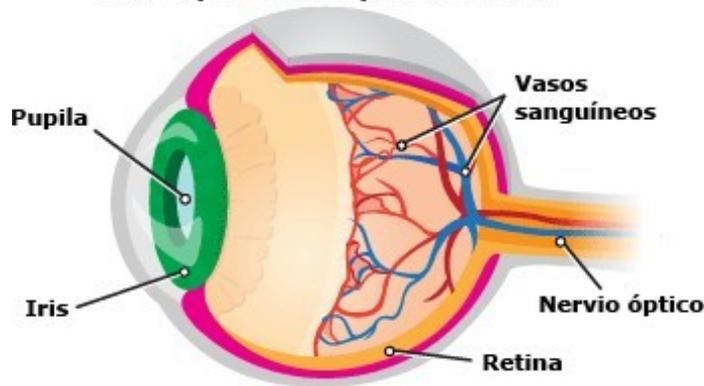


Figura 2.1: Anatomía del ojo con retinopatía.[4]

Desprendimiento de retina

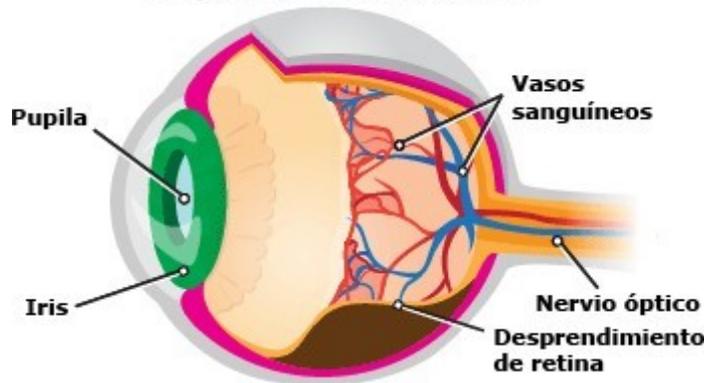


Figura 2.2: Anatomía del ojo con desprendimiento de retina.[4]

2.1.2. Tratamiento

La cirugía de la retinopatía del prematuro tiene el objetivo de detener el crecimiento de los vasos sanguíneos anormales centrandose el tratamiento en la retina periférica (los laterales de la retina) para preservar la retina central (la parte más importante de la retina). La cirugía para la retinopatía del prematuro consiste en cicatrizar las áreas de la retina periférica para detener el crecimiento anormal y eliminar el desprendimiento de la retina. [1]

Debido a que la cirugía se centra en el tratamiento de la retina periférica, estas áreas cicatrizarán y es posible que se pierda parte de la vista periférica. Sin embargo, al preservar la retina central, el ojo igualmente podrá realizar las funciones vitales como ver hacia adelante, distinguir colores, leer, etc

Metodos utilizados para el tratamiento

- **Cirugía láser:** el tipo más común de cirugía de retinopatía del prematuro, en el cual se usan pequeños rayos láser para cicatrizar la retina periférica (también denominada terapia láser o fotocoagulación). Este procedimiento dura alrededor de 30 a 45 minutos para cada ojo.
- **Crioterapia:** es el uso de temperaturas de congelamiento para cicatrizar la retina periférica con el fin de detener el crecimiento de vasos sanguíneos anormales. Durante muchos años, la crioterapia (también denominada criocirugía) era el método aceptado de cirugía para la retinopatía del prematuro, pero ha sido totalmente reemplazada por la terapia con láser.
- **Avastin:** método sumamente novedoso que consiste en la administración en una pequeña dosis en el orden μL (menos de 30). En realidad lo que hace el medicamento es neutralizar de manera permanente el crecimiento de los vasos sanguíneos.

Hay procedimientos médicos que requieren de mucha exactitud y que necesitan de instrumentos especializados para poder ser realizados. La retinopatía se produce cuando se da un desarrollo anormal dentro de la retina, muchas veces puede producir ceguera, cuando la retinopatía es severa puede inclusive causar un desprendimiento de la pared del ojo [3].

Para la solución de la retinopatía, se practica un procedimiento quirúrgico que surgió en el año 2006 de manera experimental por la doctora Susana Teixeira [2], el cual consiste en inyectar dosis menores a los 25 μL en el ojo del paciente y si en dado caso se cuenta con un paciente diabético se debe de inyectar dosis menores a los 50 μL . Si se llegara a aplicar más de la dosis se produciría un daño en el nervio óptico. Debido a la complejidad que supone la extracción de dosis en el orden de los microlitros, es necesario de un instrumento especializado. Por lo general, dichos instrumentos son caros y no son fácilmente encontrados en el mercado local.

Este trabajo de graduación busca que el proceso de reingeniería a la máquina ya existente tenga como resultado una máquina de bajo costo, fácilmente de replicar y amigable con el usuario.

4.1. Objetivo general

Reingeniería e implementación del Microextractor-dosificador fabricado por Juan Pablo Azurdia en el año 2013 en la Universidad del Valle de Guatemala [1].

4.2. Objetivos específicos

- Verificación y redefinición de los requerimientos de la maquina en base a la experiencia de los usuarios de la primera versión funcional de la máquina.
- Rediseño y manufactura de las partes mecánicas que conforman al microextractor-dosificador.
- Rediseño y manufactura de la estructura que sostiene el microextractor-dosificador.
- Rediseño e implementación de los circuitos eléctricos que controlan al microextractor-dosificador.
- Revisión de la programación del microcontrolador que controla la maquina dosificadora.

5.1. Estudio etnográfico

5.1.1. Entrevista para evaluar la experiencia de usuario

Para poder aplicar el proceso de reingeniería a la máquina se requirió el conocer mas acerca del funcionamiento. Se llevó a cabo un estudio etnográfico que consistió en una entrevista al Dr. Erick Saenz, esta entrevista se hizo para conocer la experiencia de usuario y conocer que tan bien funciona la máquina. A continuación se muestra una transcripción de la entrevista realizada al Doctor.

Entrevista

Diego: Buenas tardes, mi nombre es Diego Regalado, estudiante de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG). Actualmente estoy realizado una reingeniería de un micro extractor-dosificador diseñado y construido en la UVG en el 2013. Dicho aparato es utilizado para el tratamiento de la retinopatía del prematuro.

La información que usted me proporcione será tratada de forma confidencial, sin embargo, será utilizada durante el proceso de reingeniería que estoy realizando actualmente, omitiendo detalles de información delicada.

Esta entrevista tendrá una duración aproximada de 30 minutos. ¿Está usted de acuerdo que se grabe esta entrevista?

Doctor: Sí, estoy de acuerdo

Diego: Básicamente le tengo que realizar una entrevista, para tener constancia

en mi fase de investigación, sobre la experiencia usuario de la máquina diseñada por Pablo Javier Azurdia López.

Doctor: Ah va.

Diego: De antemano, le agradezco por su tiempo.

Entonces, prosigamos con las preguntas, la primera es:

¿Podría platicarnos un poco acerca de la retinopatía del prematuro?

Doctor: Esta enfermedad, ocurre en bebés prematuros que han estado en intensivo, la enfermedad, si los niños sobreviven, pueden desarrollar esta enfermedad, aquellos niños que estuvieron en intensivo y recibieron oxígeno, en Estados Unidos y en Europa, esto ocurre en niños menores de 1.5 Kilogramos, sin embargo en Latinoamérica, puede ocurrir en niños menores de 2 Kilogramos.

Esta enfermedad que ocurre por la inmadurez de la retina, hay isquemia en la retina, de la cual comienza en la periferia de la retina, y esta isquemia provoca una reacción inflamatoria fuerte, según el grado de la inflamación y la población de la enfermedad tiene sus estadios, y el último es el desprendimiento de retina, la inflamación es tan intensa que desprende la retina y esto conlleva a la pérdida de la visión, es decir, muchos de los niños que sufren de la enfermedad, pueden sobrevivir al intensivo y a las enfermedades por las cuales estuvieron ahí, sin embargo terminan con la pérdida de la visión.

Esto tiene un impacto, fuertísimo desde el punto de vista social, psicológico y económico, a diferencia de quedarse ciego cuando ya se es un anciano, quedarse ciego cuando se acaba de nacer es una carga, es un inválido al cual llega a la familia, está el aspecto psicológico de que bueno, pues si un viejito se queda ciego es malo, pero ya hizo su vida, y sus hijos o nietos pueden cuidar de él. Sin embargo, en un bebé pues van a tener que cuidar de él, su familia toda la vida, el impacto económico es fuertísimo, el impacto psicológico es fuertísimo, y hay un alto riesgo en países como los nuestros.

Los intensivos de neonatos están haciendo un mejor trabajo, como están haciendo un mejor trabajo en todo el país, los niños están saliendo vivos, pero no se les está dando la atención oftalmológica y bueno, eso sería la actualidad, de lo que es la retinopatía del prematuro, y una actualidad de lo que está ocurriendo en el país el día de hoy.

Diego: ¿Podría platicarnos un poco acerca del tratamiento que se le da a esto?

Doctor: Sí, el tratamiento pues ha tenido una evolución muy interesante, la primera vez que se reportó que algo funcionaba era la crioterapia, esto consiste con nitrógeno líquido, quemar la retina desde afuera, esto fue el primer tratamiento, es algo muy destructivo, es algo que deja muchas lesiones en el ojo, pero eso era mejor que nada, era mejor que quedarse completamente ciego. A raíz de los años 80 ya se

comenzó a usar el láser, para aplicar el láser en los bebés, pues bueno tienen que ser trasladados a la sala de operaciones, tienen que ser anestesiados y una sesión de láser, lo que se hace con el láser es quemar la periferia de la retina, con la intención que la cantidad de retina que quede viable, sea poca, pero ya no hay isquemia, isquemia es falta de oxígeno, los nutrientes y el oxígeno alcanza para la poca retina que se deja. Esa es la idea de dar el láser, y se comprobó que funcionaba, los ojos se salvan y estos niños no son ciegos.

El láser tiene la desventaja que la retina periférica se destruye, la segunda es que se necesita un equipo sofisticado, y sumamente caro. La tercera, creería que también es muy importante, es que tienen que estar más o menos 1 hora bajo anestesia general, el problema con estos, es que estos son niños que de por sí ya están enfermos, que están muy mal, son débiles, someterlos a una hora de anestesia, es un insulto, es decir una carga más a un niño ya enfermo; sin embargo este tratamiento es altamente utilizado, y es indiscutible, ya que ha ayudado a salvar muchos ojos y ha impedido que estos niños sean ciegos.

Otro tratamiento que es el que hemos estado utilizando ahora, son los angiogénicos, hay varios y el más económico es el avastin, pues bueno, al colocar dentro del ojo del bebé esto es una molécula que bloquea a otra molécula, a una molécula propia de la inflamación, que es el factor de crecimiento endotelial, este factor de crecimiento endotelial provoca vasos sanguíneos anormales, estos son los vasos sanguíneos que terminan fibrosándose y termina desprendiendo la retina.

Los angiogénicos en general inhiben la formación de estos vasos y los nuevos vasos anormales, los regresan, hacen que desaparezcan, la colocación es relativamente sencilla, en la actualidad lo estamos haciendo en sala de operaciones pero nos tardamos aproximadamente de 5 a 10 minutos en todo el tratamiento del bebé, que equipo necesitamos, pues necesitamos unas jeringas cargadas, no necesitamos llevar un equipo muy sofisticado. Con respecto al seguimiento de los pacientes y como quedan los ojos, hay que decir que hay una gran diferencia entre utilizar angiogénicos como el avastin con respecto al láser, la diferencia es que no es lo mismo que un niño crezca con una buena parte de la retina periférica quemada, a que crezca con el ojo sin ningún daño en absoluto, la visión es mejor con el tratamiento de avastin, es decir con los angiogénicos, vuelvo a recalcar que el gold estándar es el láser y este es ampliamente utilizada, aunque cada vez se usa más el avastin, juega un papel sumamente importante en hacer que no hayan ciegos.

En mi opinión personal, yo prefiero el avastin porque es más económico, es más fácil de realizar, es fácil de transporte y se necesita menos anestesia, eso es el tratamiento de la retinopatía del prematuro el día de hoy.

Diego: Interesante verdad doctor, cómo la ciencia va evolucionando para adaptarse de mejor manera al tratamiento de las diversas enfermedades que se van presentando.

¿Considera que el funcionamiento de la máquina diseñada e implementada por Juan Pablo Azurdia en el año 2013 cumple con los requerimientos

para el tratamiento de la retinopatía del prematuro?

Doctor: Yo creo que sí, creo que fue un gran aporte, es algo muy original, el deseo de hacer una microdosis surge precisamente en el año 2013 porque algunos problemas que se están teniendo con el avastin en los bebés, o alguno de los problemas que existen el día de hoy es cuál es la dosis eficaz, no se sabe, a pesar de que el medicamento se está usando ampliamente en el mundo, prácticamente en todos los continentes, no se sabe cuál es la dosis verdadera, se coloca cierta cantidad y funciona pero no se sabe cuál es la dosis verdadera, hay mucha duda con respecto a la toxicidad que pueda provocar el avastin, así que colocar una microdosis sería de mucha utilidad.

La máquina que diseñó Pablo Azurdia cumplía los requisitos de poder calcular una microdosis y que pudiera ser colocada dentro del ojo, también nosotros por nuestro lado los oftalmólogos, tuvimos que diseñar otra forma de entrar al ojo, que eso no es trabajo de Pablo Azurdia sino que fue parte de nuestro trabajo, diseñamos una forma de entrar de forma valvulada para que no hayan fugas.

La máquina sí cumplía con los requerimiento de poder hacer una microdosis que pudiera colocarse dentro del ojo. Otro de los grandes aportes que se hizo en la investigación de Pablo Azurdia fue que él descubrió que las distintas velocidades cambiaban el volumen del líquido que salía, esto parece ser que estamos hablando de dinámica de microfluidos y no de dinámica de fluidos, la física ocurre un poco distinta a esta nivel a mi criterio. Yo diría que sí nos dio una gran ayuda para poder calcular microdosis para colocar dentro del ojo, fue de mucha ayuda.

Diego:¿Qué tan efectiva le pareció la máquina?

Doctor: Me pareció en un inicio que era efectiva, ahora, hay que ver que la máquina fue diseñada en el año 2013 y del 2013 para acá, como cualquier equipo tiene cierta vida media, algunas piezas empezaron a dar ciertas fallas, la primera falla fue la pieza que gira se trabaja, lo cual lo resolvimos con aceite, al aplicar aceite conseguimos que volviera a caminar, había otra pieza que iba conectada al émbolo, de alguna forma se zafó, pero logramos cómo ponerlo, también los alambres del motor se zafaron perdiendo el contacto, quiero aclarar que esto no sucedió porque la máquina estuviera mal hecha, esto fue porque ya en el último año vimos que con el tiempo tuvo cierto desgaste, diría que un principio me pareció muy eficiente.

Diego: ¿Qué mejoras considera pertinentes hacerle a la máquina?

Doctor: Si pudiera ser más rápido sería bueno, la rapidez sería un punto. Otro es pensar en una forma en cual esterilizar el equipo o limpiarlo de una forma fácil, creo que esas serían unas buenas mejoras, el tamaño si fuera un poco más pequeño fuera útil ya que el tamaño que tenía era un poco grande, pero si fuera más pequeño también tendría una portabilidad mejor.

También si pudiera tener alguna especie de cubierta, algo que ocurre es que la máquina se empolvaba debido a que esta se utilizaba 1 vez cada 2 meses ya que no todos requieren del tratamiento, yo lo que hacía era colocarle una bolsa encima pero

aún así le llegaba el polvo. Debería de tener una tipo cubierta y también una forma de saber que la máquina esté bien calibrada, porque la pieza que gira a veces estaba más arriba y a veces más abajo y yo tenía que ver más o menos como colocarlo, si yo tuviera certeza de saber que ya está calibrado me sentiría más cómodo.

Diego: ¿Cómo considera usted que podría ser más amigable para el usuario el uso de la máquina? Entiendo que lo que tiene ahorita la máquina para la interacción es una pantalla y tres botones, cree que debería de tener algo más para que sea más amigable con el usuario?

Doctor: Creo que en un inicio fue mejor así, sin embargo cuando se lleva un tiempo sin usarla, es cierto que solo son 3 botones, pero sería bueno que los botones estuvieran rotulados ya que veces cuando se deja de usar como mencioné, se olvida cuáles son las secuencias. Por ejemplo, yo sé cómo funciona en este momento y la secuencia que debo de hacer para cumplir con el objetivo, pero si yo le explico a alguien y lo pongo a usar la máquina, se confunde con facilidad, si pudiera estar indicado en los botes en aras de que sea más amigable, una rotulación podría ser más amigable y más fácil de manejar.

Diego: Muchas gracias Doctor, vamos a tomar en cuenta estas consideraciones, esperamos realizar una buena reingeniería y que se adapte de mejor manera a las consideraciones que usted comentó.

Doctor: Muchas gracias y gracias por ayudarme en este proyecto, yo creo que ha sido interesante y no está demás mencionar ya que se está grabando, no presente la máquina como tal porque no se puede por cuestiones de patentamiento, pero sí presenté que estábamos calculando microdosis acá en Guatemala en el Congreso Mundial de Retinopatía del Prematuro, hubo gente muy interesada, una ventaja que tiene este proyecto sobre otro parecido en el mundo, sé que hay 3 proyectos pero solo conozco 1 de los otros dos que está dirigiendo el doctor Wallas, ellos están utilizando diluciones del medicamento, es poco reproducible porque necesitan que farmacia les calcule las diluciones, eso causó mucho interés en muchas personas.

5.1.1.1. Descubrimientos de la entrevista

- La enfermedad ocurre en bebés prematuros que han estado en intensivo.
- La enfermedad ocurre por la inmadurez de la retina, hay isquemia en la retina.
- La inflamación es tan intensa que desprende la retina y esto conlleva a la pérdida de la visión.
- La primera vez que se reportó que algo funcionaba era la crioterapia, esto consiste en quemar la retina desde afuera con nitrógeno líquido.
- A raíz de los años 80 se comenzó a usar el láser, lo que se hace con el láser es quemar la periferia de la retina, con la intención que la cantidad de retina que quede viable sea poca, pero ya no hay isquemia.

- El láser tiene la desventaja que la retina periférica se destruye.
- Otro tratamiento que es el se ha estado utilizando ahora, son los angiogénicos.
- El factor de crecimiento endotelial provoca vasos sanguíneos anormales, estos son los vasos sanguíneos que terminan fibrosándose y termina desprendiendo la retina
- Los angiogénicos en general inhiben la formación de estos vasos y los nuevos vasos anormales.
- El avastin es el mejor metodo porque es más económico, más fácil de practicar, es fácil de transporte y se necesita menos anestesia.
- La máquina que diseño Pablo Azurdia cumplia los requisitos de poder calcular una microdosis.

5.1.1.2. Conclusiones de la entrevista

Según la entrevista elaborada se pudieron encontrar ciertos factores que el doctor como usuario considera pertinentes para la mejora de la máquina. La primera es mejorar el peso de la máquina, se desea tener una máquina que sea más compacta y liviana para hacer más fácil su traslado, ya que debido a que la máquina anterior contaba con exceso de peso y tamaño, complicaba al usuario su traslado a diferentes lugares, por tal razón se realizó una nueva estructura que cumpliera con la necesidad de ser compacta y liviana.

El segundo factor a mejorar es la velocidad del proceso, el motor con el que contaba la máquina es un motor de fabricación china, este motor cuenta con una caja reductora incorporada en su mecanismo haciendo que incremente notablemente la cantidad de pasos para realizar un revolución y, por consiguiente, hace que su proceso sea más lento, al aumentar la velocidad de rotación del eje motor para tener un proceso más rápido se llega a perder precisión, por lo que se decidió implementar un nuevo motor y un nuevo driver para que se ajuste a los requerimientos propuestos por el doctor.

Por último, se incorporó una cubierta a la máquina que la resguarde de polvo y ciertos tipos de daños al mecanismo que pueden presentarse por estar expuesto.

6.1. Fase de investigación

6.1.1. Propuesta de motores

Para tener un proceso de extracción más rápido se requirió de un nuevo motor que supliera esa necesidad, se propusieron un análisis comparativo buscando una selección objetiva del nuevo motor. Para esto se establecieron variables de selección y estableciendo un peso para cada una de las variables dependiendo de la importancia de cada una, con ello se realizó una matriz de selección para poder determinar cual era el motor que mejor se adaptara a la necesitada de una extracción más rápida manteniendo un costo aceptable. Los motores propuestos son los siguientes:

Propuesta 1

- Motor stepper 28BYJ-48 y controlador ULN2003
- Precio: Q45
- Torque: 4.166 onz-in



Figura 6.1: Stepper 28BYJ-48 [1]. [3]

Propuesta 2

- Stepper bipolar de 12V/400 mA
- Precio: Q95
- Torque: 1.388 onz-in



Figura 6.2: Stepper bipolar 12V/400 mA [2].

Propuesta 3

- Stepper nema 17
- Precio: Q185
- Torque: 36.8 onz-in



Figura 6.3: Stepper nema 17 [3]. [7]

Propuesta 4

- Stepper nema 8
- Precio: Q135
- Torque: 2.5 onz-in



Figura 6.4: Stepper nema 8 [4]. [8]

Propuesta 5

- Stepper nema 11
- Precio: Q120
- Torque: 8.3 onz-in



Figura 6.5: Stepper nema 11 [5]. [9]

Según la información presentada anteriormente, se analizaron los distintos motores para determinar cuál era el mejor para para la aplicación realizada. Para elegir una propuesta se necesita establecer cuáles son las características que se tomaran en cuenta, así como asignarle un valor a cada una de las características seleccionadas para realizar una forma objetiva de selección. Por tal razón se establecieron variables de selección y se realizó una matriz de selección.

Motor/variables de selección	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
Masa (oz)	1.23	2	8	2	4
Número de pasos por revolución	1024	48	200	200	200
Costo (Q)	45	95	185	135	150
Torque (Onz-in)	4.2	1.4	36.8	2.5	8.3
Voltaje (V)	5	12	12	3.9	3.8

Cuadro 6.1: Variables de selección establecidas.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa (oz)	1	8									1.2
Numero de pasos por revolución	5	1024									48
Costo (Q)	2	185									45
Torque (Onz-in)	4	36.8									1.4
Voltaje (V)	3	12									3.8

Cuadro 6.2: Variables de selección con su peso establecido.

Motor/variables de selección	Peso (1-5)	Matriz de decisión									
		[1]		[2]		[3]		[4]		[5]	
		NV	T	NV	T	NV	T	NV	T	NV	T
Masa (oz)	1	10	10	9	9	1	1	9	9	6	6
Numero de pasos por revolución	5	1	5	10	50	8	40	8	40	8	40
Costo (Q)	2	10	20	8	16	5	10	7	14	7	14
Torque (Onz-in)	4	10	40	8	32	1	4	7	28	8	32
Voltaje (V)	3	8	24	1	3	1	3	9	27	9	27
			99		110		58		118		122

Cuadro 6.3: Matriz de decisión para la selección del motor.

6.1.1.1. Motor seleccionado: Nema 11

El motor que seleccionamos de acuerdo a nuestro análisis de selección fue el Nema 11, este motor es un motor de paso bipolar, cuenta con un ángulo de paso de 1.8 grados lo que se convierte a 200 pasos por cada revolución.

Los motores de paso bipolares necesitan de ciertas manipulaciones para poder ser controlados, ya que requieren de inversión de la corriente que circula por cada una de sus bobinas para poder realizar la secuencia deseada. [9]



Figura 6.6: Stepper nema 11.

6.1.2. Propuesta de drivers para el motor

Para la selección del driver se hizo el mismo tipo de análisis que se aplicó para la selección del motor, estableciendo variables de selección y otorgándoles un peso en base a la importancia que cada una conlleva. Los drivers propuestos son los siguientes:

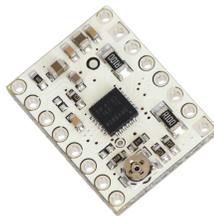


Figura 6.7: Driver DRV8834 [11]



Figura 6.8: Driver A4988 [11]



Figura 6.9: Driver DRV8825 [11]

Drivers/variables de selección	DRV8825	DRV8834	A4988
Costo (Q)	67	45	75
Voltaje mínimo de operación (V)	8.2	2.5	8
Corriente continua por fase (A)	1.5^2	1.5^2	1.2^2

Cuadro 6.4: Variables de selección establecidas para los drivers.

Variables de selección/Peso	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Costo (Q)	5	100								30
Voltaje mínimo de operación (V)	4	10								2
Corriente continua por fase (A)	3	3^2								1^2

Cuadro 6.5: Variables de selección con su peso establecido.

		Matriz de decisión					
Drivers		DRV8825		DRV8834		A4988	
Variables de selección	Peso (1-5)	NV	T	NV	T	NV	T
Costo(Q)	5	5	25	8	40	3	15
Voltaje mínimo de operación (V)	4	3	12	9	36	4	16
Corriente por fase (A)	3	5	15	5	15	8	24
		52		91		55	

Cuadro 6.6: Matriz de decisión para la selección del driver.

6.1.2.1. Driver seleccionado: DRV8834

El driver seleccionado es el DRV8834 de micropasos, este driver es una placa que permite controlar el motor de paso. Este driver opera en un rango de 2.5-10.8 V, lo que es una ventaja ya que permite que los motores de paso sean alimentados con voltajes bastante bajos, lo que otros drivers no son capaz de realizar. [10]

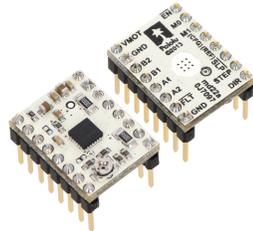


Figura 6.10: Driver DRV8834.

6.1.3. Polímeros

Los polímeros son materiales formados por macromoléculas, cada polímero es sintetizado de manera diferente para darle ciertas características específicas al material. En el medio se conocen comúnmente como plásticos y tienen una enorme cantidad de aplicaciones dependiendo de las características del polímero. Estos tipos de materiales son muy utilizados debido a su bajo costo y su amplia gama de aplicación. [2]

Para el maquinado de las piezas a utilizarse en la estructura se proponen dos tipos de polímero, el PLA y el ABS. Se compara en la siguiente sección las diferentes ventajas y desventajas que presenta cada uno de estos materiales para posterior a ello poder seleccionar cual es el más adecuado para la tarea.

6.1.3.1. Ventajas y desventajas PLA y ABS

Ventajas	Desventajas
No emite gases nocivos	No resiste altas temperaturas
Se puede imprimir sin base	El post proceso es complicado
Bajo costo	Requiere mayor fuerza para ser extruído
Es biodegradable	Más frágil
Facilidad de impresión	

Cuadro 6.7: Ventajas y desventajas polímero PLA.

Ventajas	Desventajas
Resiste altas temperaturas	Requiere una cama más caliente
más flexible	Propenso a grietas y deformaciones
Se pueden unir piezas de manera sencilla. Ej. Empleando acetona	Los gases que emite son desagradables y nocivos en espacios cerrados
Apto para aplicaciones industriales	Es derivado del petróleo
	Es afectado por humedad

Cuadro 6.8: Ventajas y desventajas polímero ABS.

El polímero seleccionado para la fabricación de las piezas fue el PLA. Para esta selección se tomó en cuenta el bajo costo de este material y la facilidad de impresión. Ya que no estará expuesto a un ambiente con altas temperaturas que le afecten y el mecanismo no es para ninguna aplicación industrial, este material es el más indicado.

6.1.4. Microcontrolador

6.1.4.1. ATMEGA328p

El ATMEGA328p es un microcontrolador creado por ATMEL. Este chip tiene un circuito integrado de alto desempeño, cuenta con una arquitectura RISC. [6]. Se eligió este microcontrolador debido a que se buscó tener una máquina fácil de replicar, es por ello que se decidió ya no usar el PIC16F887 con el que ya contaba el control de la máquina. El atmega328p tiene una plataforma de código abierto y esto hace que el trabajo sea más sencillo y accesible para las personas, a diferencia del PIC que muchas veces puede ser muy complicada su programación.

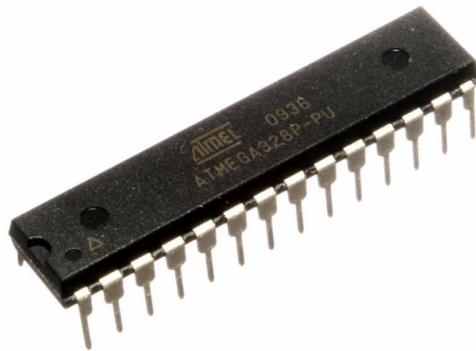


Figura 6.11: Microcontrolador ATMEGA328p.

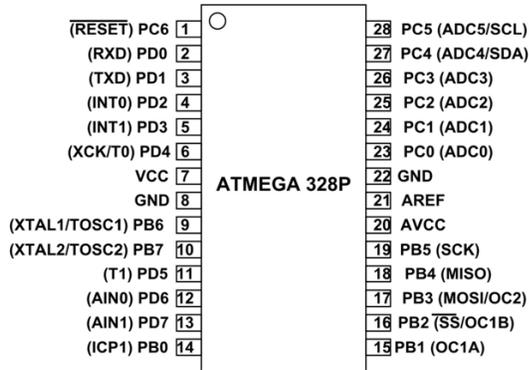


Figura 6.12: Datasheet del microcontrolador ATMEGA328p.[6]

Características:

- 32 KB memoria flash.
- 1 KB memoria EEPROM.
- 2 KB SRAM.
- 23 líneas de E/S de propósito general.
- 32 registros de propósito general.
- 3 temporizadores flexibles/contadores.
- Interrupciones internas y externas.
- Modo USART.
- SPI e I2C.
- 6 canales 10 bit convertidor A/D.
- Watchdog timer programable.
- 5 modos de ahorro de energía seleccionables por software.

6.2. Fase de diseño

6.2.1. Diseño del mecanismo

En la parte mecánica se diseñaron las piezas del mecanismo para que se adaptaran al nuevo motor implementado en este trabajo de investigación. Se utilizó el software Autodesk Inventor para modelar las partes mecánicas, este es un software CAD 3D que brinda herramientas de diseño mecánico 3D. El maquinado de las piezas diseñadas

se realizó en una impresora 3D modelo Creality CR-10S con material PLA. En el Cuadro 6.7 se mencionan algunas características de este material.

Cada una de las piezas se diseñaron nuevamente, siempre tomando como base los modelos diseñados para la máquina antigua, no se decidió cambiar el diseño de las piezas ya que el diseño con el que se contaba ya era bastante bueno. La única pieza que se diseñó de manera diferente es la de la base del motor, la razón es debido a la implementación de un nuevo motor, en la Figura 6.20 se puede apreciar esta pieza. La función de la pieza de la Figura 6.13 es poder sostener el micrómetro, son dos piezas del mismo diseño las cuales sirven como soporte del instrumento de medición, los diseños de las Figuras 6.14 y 6.15 son parte de un soporte de la jeringa, estas dos piezas se encargan del agarre de la jeringa en el mecanismo, la Figura 6.16 nos muestra el diseño para el soporte del vial, el vial es donde se encontrara el medicamento a extraer, la Figura 6.17 nos muestra el diseño de la pieza que funcionará como carrilero para la base del motor ya que el motor tendrá desplazamiento vertical, el diseño de la Figura 6.18 nos sirve para obligar al eje del micrómetro a desplazarse solo linealmente. Por último, el funcionamiento de la pieza de la Figura 6.19 es adaptar el micrómetro con el eje del motor, ambos sistemas irán conectados a este adaptador para que el movimiento angular del motor sea transmitido al micrómetro.

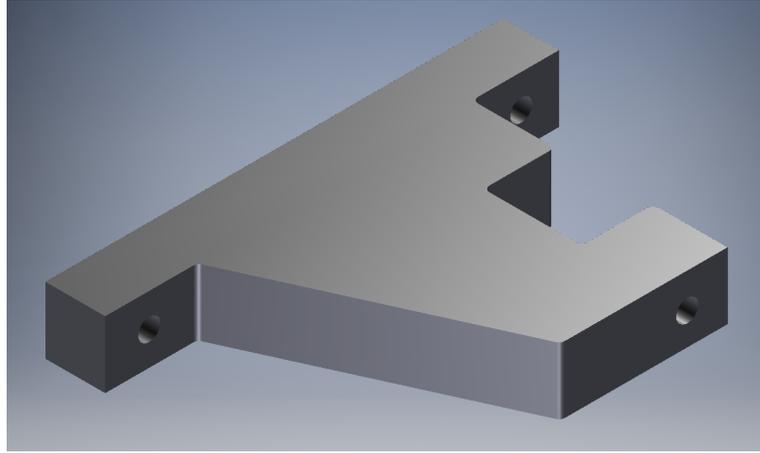


Figura 6.13: Soporte micrómetro.

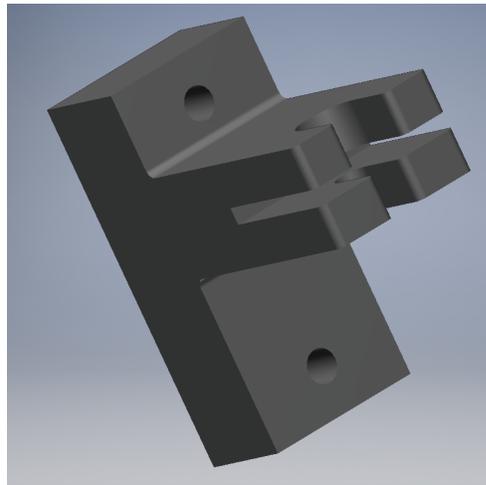


Figura 6.14: Soporte para jeringa.

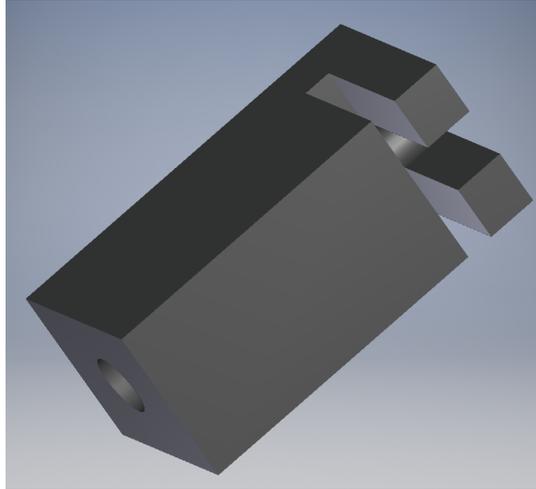


Figura 6.15: Adaptador jeringa-micrómetro.

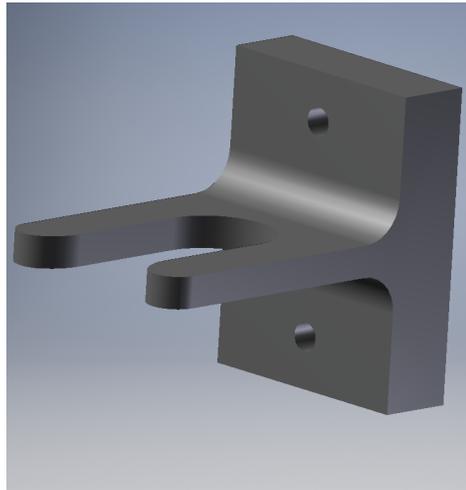


Figura 6.16: Soporte vial.

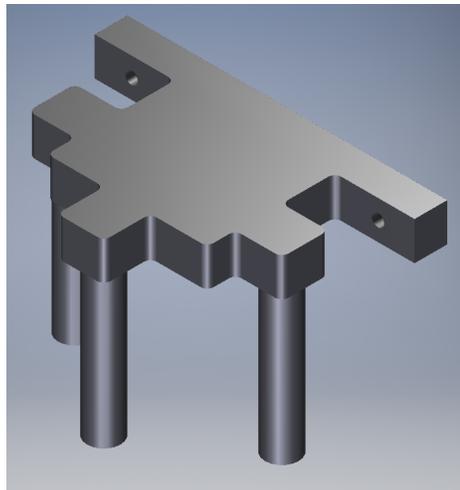


Figura 6.17: Base de movimiento motor.

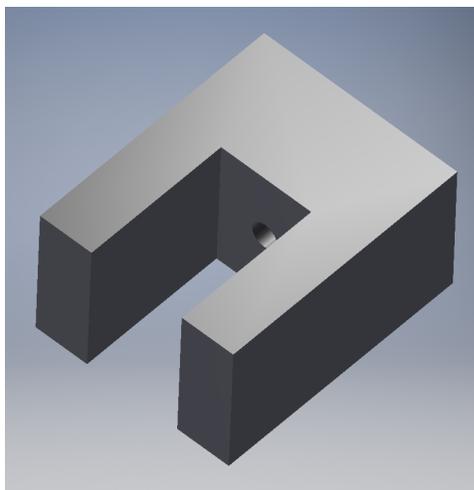


Figura 6.18: Riel de dirección.



Figura 6.19: Adaptador micrometro-motor.

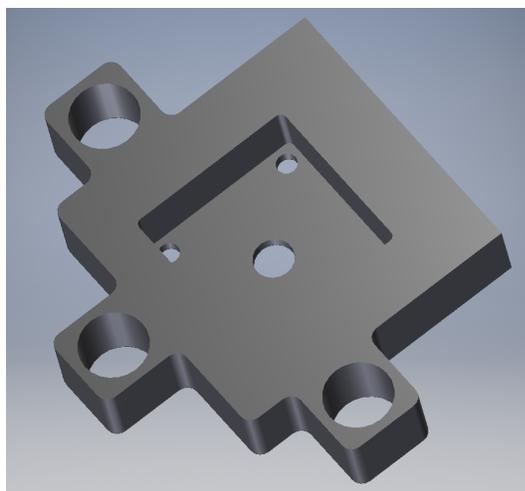


Figura 6.20: Base del motor.

6.2.2. Diseño del circuito

En esta parte del trabajo de investigación se realizó un rediseño a los circuitos electrónicos de la máquina diseñada en el 2013. La razón del rediseño se da debido a los componentes nuevos que se integraron al sistema debido a la reingeniería aplicada a la máquina, se contó con un nuevo driver, un nuevo microcontrolador y un nuevo motor stepper. Para el diseño del circuito eléctrico se utilizó Altium Designer, este es un software de automatización de diseño de PCB y para trabajo de circuitos impresos. Un diseño en altium designer está conformado por varias etapas. [5]

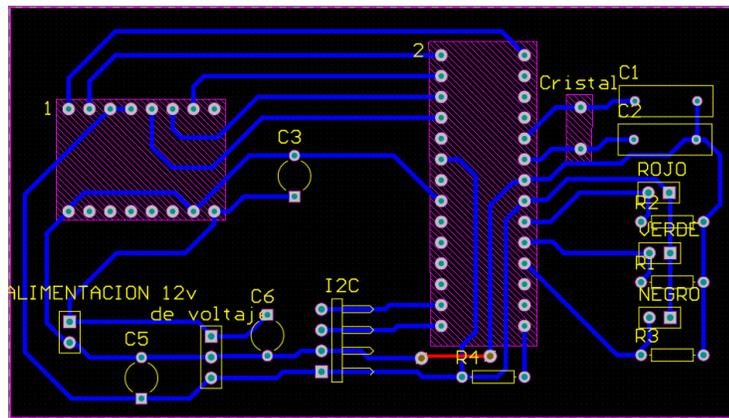


Figura 6.21: Placa final

En la Figura 6.21 se puede observar el diseño realizado para la PCB, este cumple con todas las demandas por parte de los componentes del circuito. Cuenta con una entrada de 12V que va al driver y al regulador, este último se encarga de regular el voltaje a 5V para el resto de los componentes. Como se mencionó se realizó un nuevo diseño debido a la integración de nuevos componentes, la manufactura de la placa se dio en una fresadora automática. En la Figura 6.22 se observan todos los tracks y los pads del circuito.

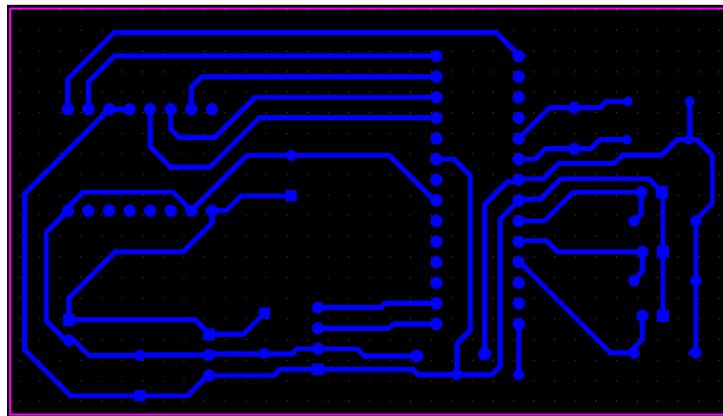


Figura 6.22: Circuitería de la placa.

6.3. Fase de manufactura

El objetivo de la manufacturación de una nueva estructura es reducir el peso y el tamaño de la antigua estructura, por lo que se hizo un diseño más liviano y compacto. Se utilizó lámina negra 1/16, tomando en cuenta que es una lámina más liviana a la utilizada en la estructura antigua, se hizo la estructura sin desperdicio de espacio y más atractiva a la vista del usuario.



Figura 6.23: Estructura metálica antigua.



Figura 6.24: Estructura metálica nueva.

Para la manufactura de la PCB se utilizó una placa de cobre y una fresadora. Con los archivos Gerber exportados del software Altium Designer, la fresadora se encargó de manufacturar la placa de manera autónoma.

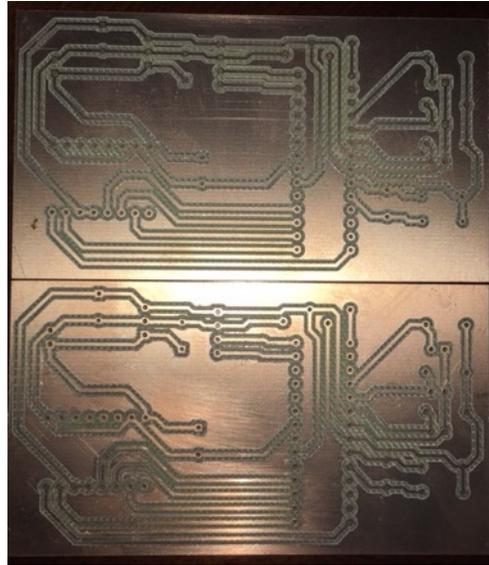


Figura 6.25: Fresado de la placa diseñada.

6.3.1. Ensamblaje



Figura 6.26: Ensamblaje de la máquina microextractora-dosificadora.

6.4. Fase de validación

Para esta fase se estandarizó la forma de medir cada extracción utilizando tubos capilares. El tubo capilar es un pequeño tubo de vidrio con diámetro pequeño que es utilizado en el campo de la química para demostrar los efectos de la capilaridad. Con la sustancia dentro del tubo capilar se realiza una medición con un instrumento de alta precisión, 1 mm lineal equivale a 1 microlitro.

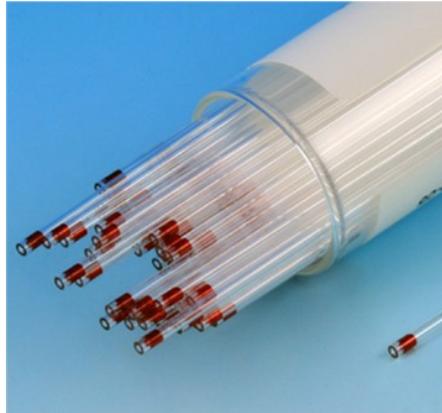


Figura 6.27: Tubos capilares.

10 microlitros	
Número de prueba	Resultado
1	11
2	9
3	8
4	10
5	10
6	9
7	11
8	10
9	11
10	8
11	11
12	9
13	10
14	9
15	11
16	10
17	7
18	9
19	10

Cuadro 6.9: Resultados para las pruebas de 10 microlitros.

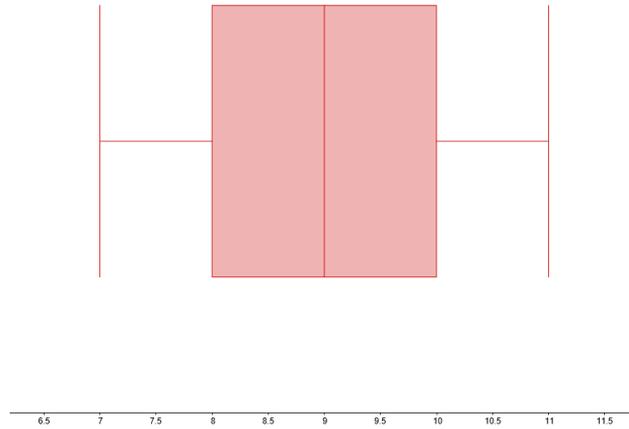


Figura 6.28: Diagrama de caja y bigote para las pruebas de 10 microlitros.

Para realizar un análisis de la extracción de 10 uL se realizaron 19 pruebas, esto es para poder realizar un mejor análisis estadístico, y así poder evaluar los datos con mayor exactitud. Debido a que la frecuencia con la que utilizan la máquina es pequeña, cualquier número de muestras puede ser representativa, se utilizó ese criterio para establecer que 19 pruebas serían suficientes para favorecer el análisis estadístico. En el Cuadro 6.9 se pueden observar los resultados de las pruebas. Con los resultados de las pruebas se realizó un diagrama de caja y bigote, la Figura 6.28 nos muestra que la mediana se encuentra en medio de la caja, quiere decir que tenemos simetría en nuestra distribución de resultados, no tenemos datos atípicos en nuestro diagrama, también podemos observar en los bigotes del diagrama son similares, esto quiere decir que existe la misma variación para los valores mayores y menores a la mediana.

Datos estadísticos	
Mediana	9.63
Desviación estandar	1.16
Porcentaje de error	3.68 %
% de confianza	95
Intervalo de confianza	0.02
Max	9.61
Min	9.65

Cuadro 6.10: Datos estadísticos para pruebas de 10 microlitros.

En el Cuadro 6.10 podemos ver el análisis estadístico realizado, encontramos una mediana de 9.63, una desviación estándar de 1.16 que está bastante bien ya que no tenemos datos atípicos. El porcentaje de error de 3.68 % es mínimo, este pequeño porcentaje de error se debe a la variación de los datos debido a que no se tiene una fuerza constante aplicada a la jeringa en las diferentes pruebas. Se propuso un intervalo de confianza del 95 % y se obtuvo un valor máximo y mínimo mostrado en el Cuadro 6.10.

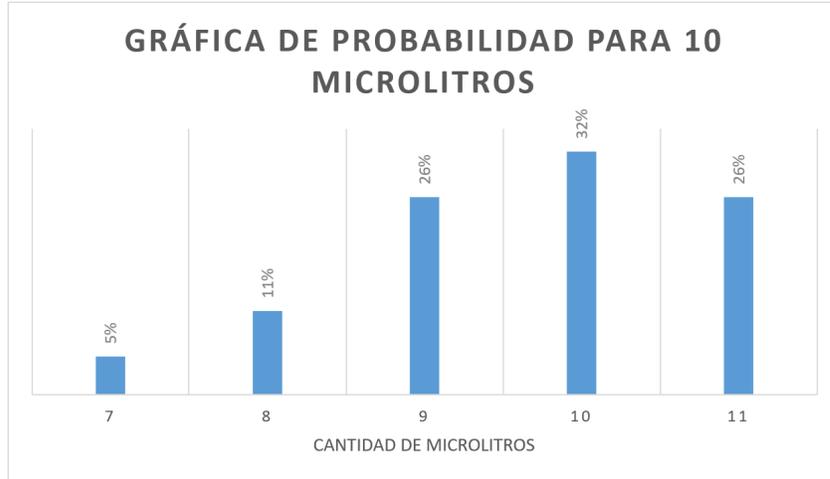


Figura 6.29: Gráfico de probabilidades para extracción de 10 microlitros.

La Figura 6.29 nos muestra cuál es la probabilidad de obtener cada uno de los valores obtenidos dentro de las pruebas. El mayor porcentaje de probabilidad es para 10 microlitros, tiene un 32 %, eso está bien ya que siendo la cantidad que deseamos extraer es la cantidad más probable en ser extraída.

20 microlitros	
Número de prueba	Resultado
1	18
2	20
3	22
4	18
5	18
6	19
7	22
8	20
9	20
10	17
11	20
12	21
13	23
14	18
15	17
16	19
17	20
18	18
19	19

Cuadro 6.11: Resultados para las pruebas de 20 microlitros.

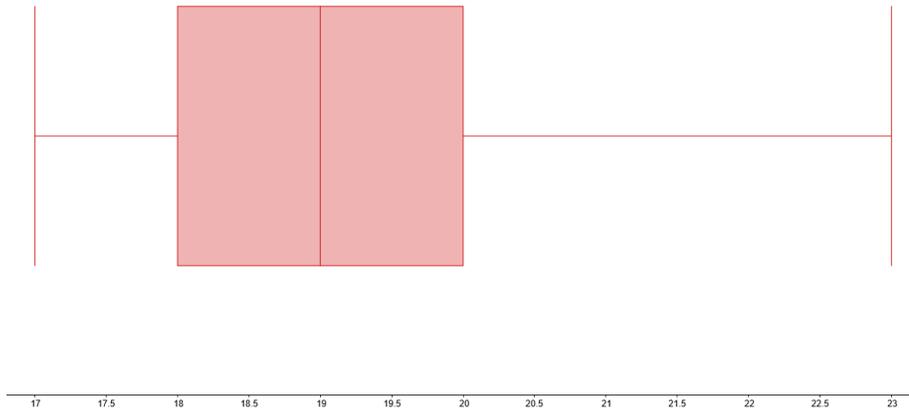


Figura 6.30: Diagrama de caja y bigote para las pruebas de 20 microlitros.

De igual manera que en las pruebas de 10 uL, se realizaron 19 pruebas, los datos se pueden observar en el Cuadro 6.11, se realizó un diagrama de caja y bigote que se puede apreciar en la Figura 6.30, podemos ver que la mediana esta a la mitad de la caja, lo que quiere decir que tenemos simetría en nuestra distribución de resultados, en estas pruebas tampoco tenemos ningún dato atípico en nuestro diagrama. También podemos observar en los bigotes del diagrama, que el bigote del lado derecho es más largo, lo que quiere decir que hay mayor variación en los datos que son mayores a la mediana que los datos menores.

Datos estadísticos	
Mediana	19.42
Desviación estándar	1.71
Porcentaje de error	2.9 %
% de confianza	95
Intervalo de confianza	0.025
Max	19.40
Min	19.45

Cuadro 6.12: Datos estadísticos para pruebas de 20 microlitros.

En el Cuadro 6.12 podemos observar el análisis realizado a las pruebas de 20 microlitros. Se encontró que la mediana es de 19.42, la desviación estándar de 1.71, la desviación esta bastante bien ya que siendo de magnitud pequeña no nos genera ningún valor atípico. El porcentaje de error obtenido es de 2.9 % que es bastante bajo, este porcentaje se debe a la misma situación que se menciono en el análisis estadístico para 10 microlitros. También se propuso un intervalo de confianza del 95 % y se obtuvieron los valores máximos y mínimos mostrados en el Cuadro 6.12.

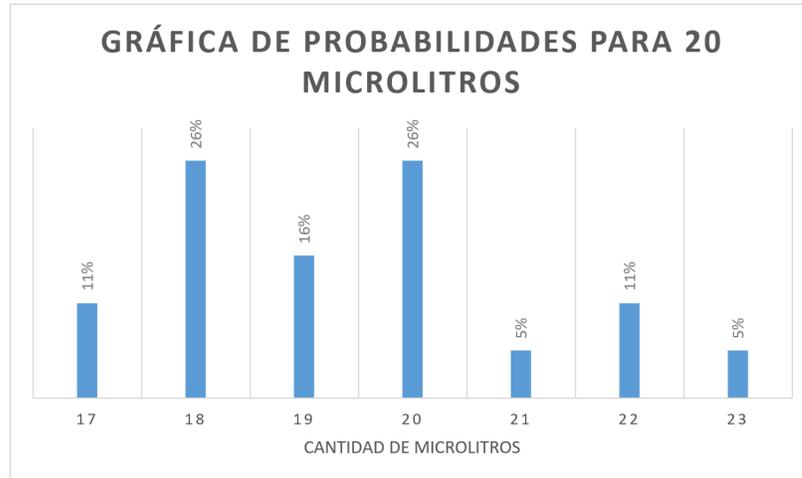


Figura 6.31: Gráfico de probabilidades para extracción de 20 microlitros.

La Figura 6.31 nos muestra cual es la probabilidad de que salga cada uno de los valores obtenidos dentro de las pruebas. El mayor porcentaje de probabilidad es para 20 microlitros, tiene un 22 %, eso esta bien ya que siendo la cantidad que deseamos extraer es la cantidad más probable en ser extraída, aunque 18 microlitros tiene el mismo porcentaje de probabilidad, no es una cantidad muy alejada a la cantidad real.

30 microlitros	
Número de prueba	Resultado
1	29
2	30
3	30
4	28
5	31
6	29
7	27
8	32
9	29
10	32
11	31
12	27
13	30
14	30
15	29
16	31
17	28
18	28
19	30

Cuadro 6.13: Resultados para las pruebas de 30 microlitros.

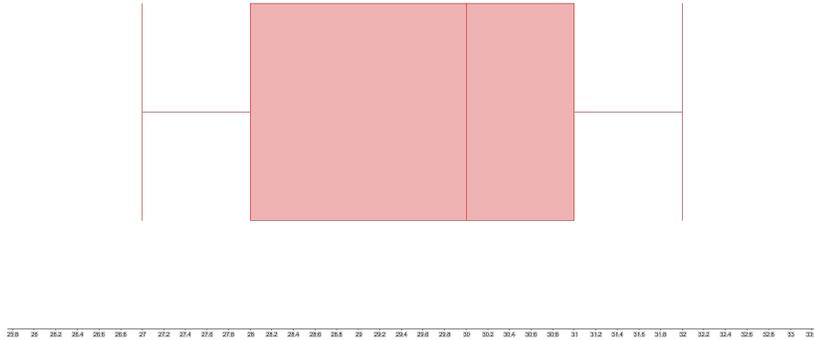


Figura 6.32: Diagrama de caja y bigote para las pruebas de 30 microlitros.

Por ultimo se realizaron 19 pruebas para la extracción de 30 uL, manteniendo el mismo tipo de análisis. Los resultados de las pruebas se pueden observar en el Cuadro 6.13. Según nuestro diagrama de caja y bigote 6.32 la mediana se encuentra más a la derecha, lo que quiere decir las cantidades menores a la mediana se encuentran más dispersas que las cantidades mayores. No se cuenta con ningún dato atípico. Los bigotes son del mismo tamaño por lo que existe la misma variación para los valores mayores y menores a la mediana.

Datos estadísticos	
Mediana	29.53
Desviación estándar	1.50
Porcentaje de error	1.57 %
% de confianza	95
Intervalo de confianza	0.022
Max	29.50
Min	29.55

Cuadro 6.14: Datos estadísticos para pruebas de 20 microlitros.

En el Cuadro 6.14 podemos observar el análisis realizado a las pruebas de 20 microlitros. Se encontró que la mediana es de 29.53, la desviación estándar de 1.50, la desviación esta bastante bien ya que siendo de magnitud pequeña no nos genera ningún valor atípico. El porcentaje de error obtenido es de 1.57 % que es bastante bajo. También se propuso un intervalo de confianza del 95 % y se obtuvieron los valores máximos y mínimos mostrados en el Cuadro 6.14.

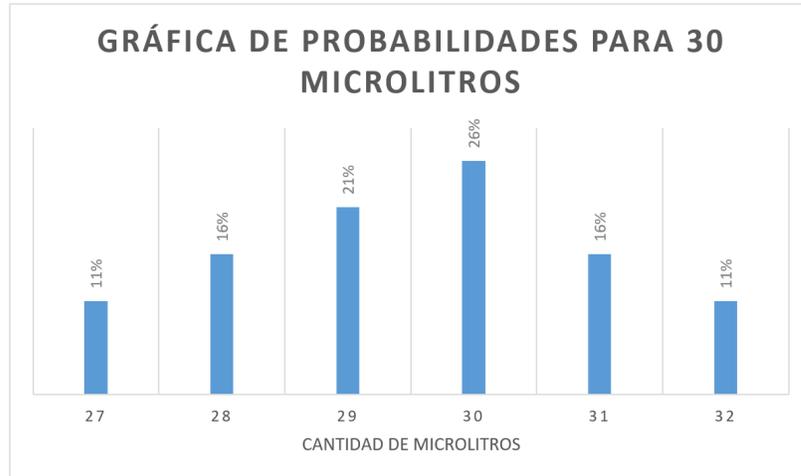


Figura 6.33: Gráfico de probabilidades para extracción de 30 microlitros.

La Figura 6.33 nos muestra cual es la probabilidad de que salga cada uno de los valores obtenidos dentro de las pruebas. El mayor porcentaje de probabilidad es para 20 microlitros, tiene un 26 %, eso esta bien ya que siendo la cantidad que deseamos extraer es la cantidad más probable en ser extraída.

Para las diferentes pruebas hay variaciones de hasta 3 uL, esto se debe a la mecánica de micro fluidos, el líquido se ve afectado por la fricción que se da dentro de la jeringa debido al embolo que empuja la sustancia, para que esta variación se pueda considerar en futuros análisis se debe de contar con una velocidad constante a la hora de la aplicación, ya que si le aplicamos diferentes fuerzas externas al embolo va a tener diferentes velocidades (considerando diferentes pruebas) y vamos a tener la variación como se tubo en las pruebas antes mostradas.

A partir de nuestro análisis estadístico podemos concluir que la máquina funciona, contamos con un porcentaje de error mínimo. Las variaciones son lo suficientemente pequeñas como para poder considerar esta diferencia que se da debido a la velocidad de aplicación de la extracción.

- Se verificaron y redefinieron los requerimientos de la máquina según el estudio etnográfico realizado y se llegó a la conclusión que la velocidad de extracción era muy lenta y la estructura muy robusta.
- Se diseñó y manufacturó toda la parte mecánica para que se adaptara a la implementación del nuevo motor de paso seleccionado.
- Se consiguió diseñar y manufacturar una nueva estructura más liviana y compacta.
- Se consiguió realizar un nuevo diseño y fabricación satisfactorio de PCB para la implementación de los circuitos eléctricos.
- Se revisó la programación y se utilizó un nuevo lenguaje debido a la implementación de un microcontrolador diferente.
- La manera y los materiales con que se fabricó la máquina permiten que sea fácil de replicar.

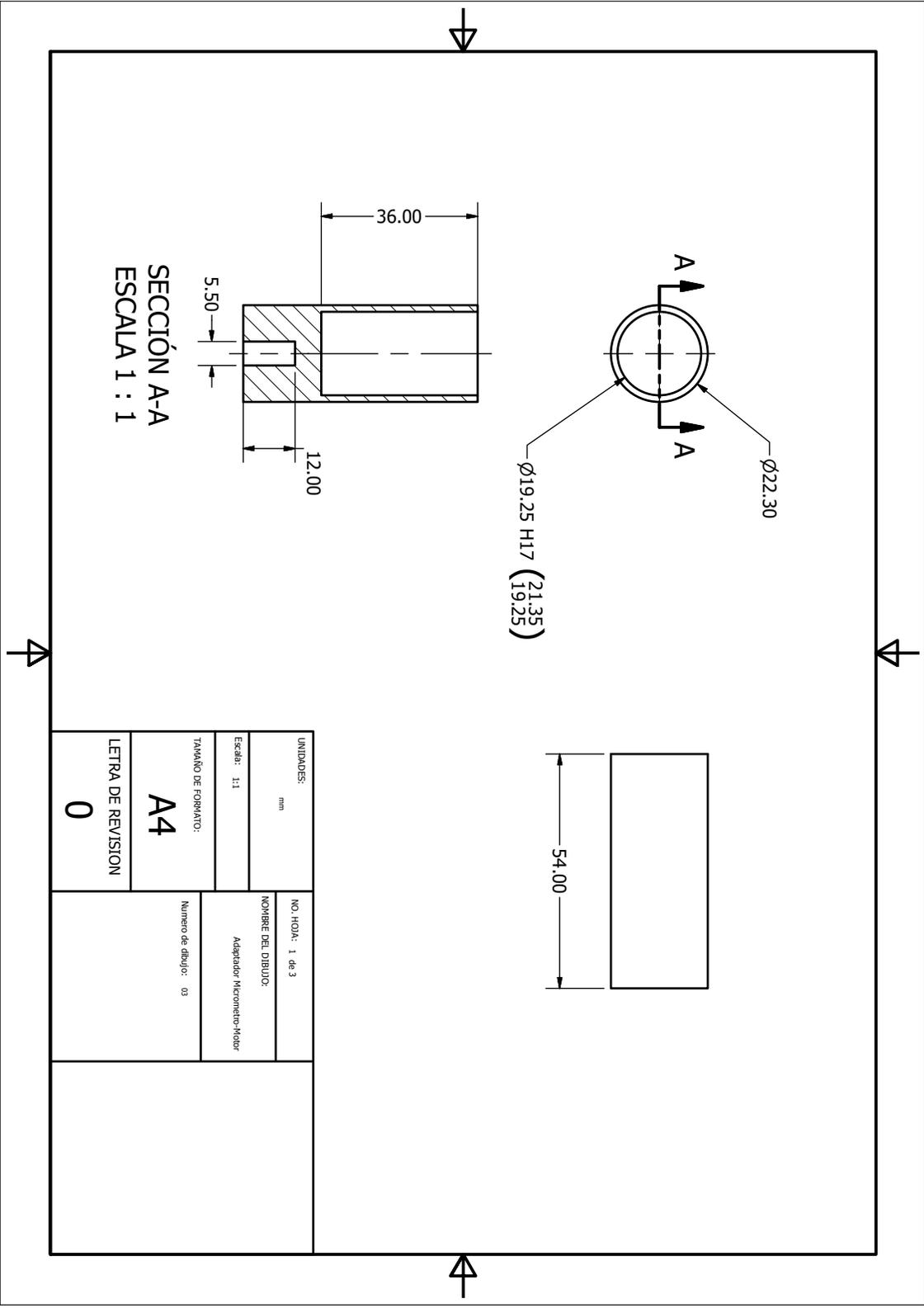
Recomendaciones

- Elaborar un mecanismo para la aplicación de la sustancia en el ojo. El mecanismo tiene que ser capaz de mantener una velocidad constante para no tener variación en la cantidad suministrada por la extracción.
- Cambiar de material para la fabricación de las piezas. Lo mejor para este tipo de mecanismos es utilizar aluminio y fresar las piezas, el PLA que se usa es un polímero que se ve afectado por las temperaturas altas.
- Hacer un test de medición con agua antes de realizar la extracción del medicamento para observar si la extracción se está llevando a cabo de manera correcta.
- Regresar el micrómetro al punto inicial después de cada extracción.

- [1] Azurdia, Pablo Javier: *Dosificador para el tratamiento de Retinopatía del prematuro*.
- [2] Crawford, R. J.: *Plastics Engineering*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999.
- [3] DIY Electronica: <https://www.electronicadiy.com/product-page/motor-stepper-y-cont> 2018.
- [4] Elana Pearl Ben-Joseph: <https://kidshealth.org/es/parents/rop-esp.html>, Enero de 2018.
- [5] Glen Mercier: <http://web.eecs.utk.edu/~dcostine/ECE482/Spring2015/materials/Altiv>
- [6] Microchip Technology Inc.: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328P>, 2018.
- [7] Pololu: <https://www.pololu.com/product/1200>, 2018.
- [8] Pololu: <https://www.pololu.com/product/1204>, 2018.
- [9] Pololu: <https://www.pololu.com/product/1205>, 2018.
- [10] Pololu: <https://www.pololu.com/product/2134>, 2018.
- [11] Pololu: <https://www.pololu.com/search?query=DRV8825x=0y=0>, 2018.

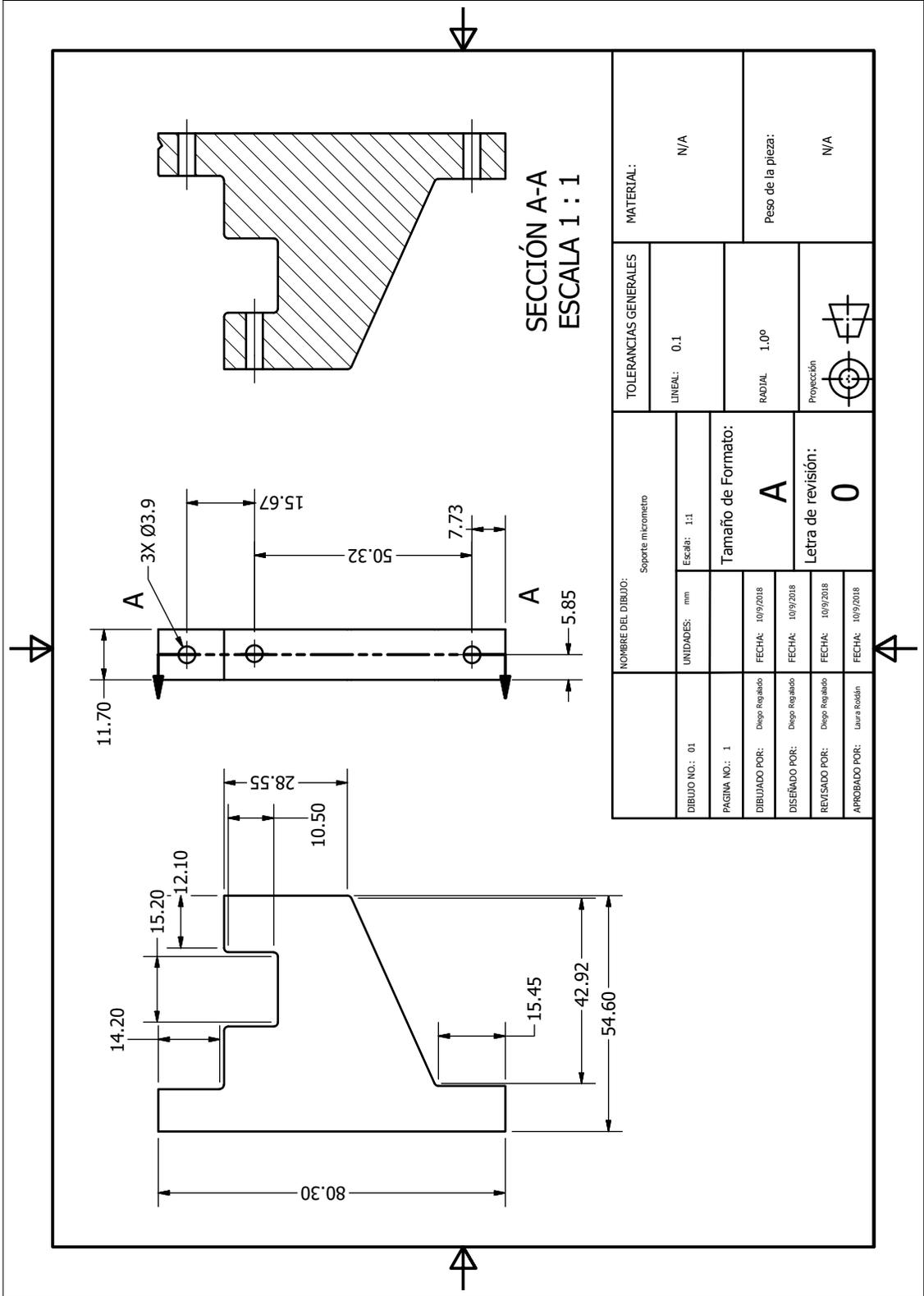
ANEXO A

Planos de construcción

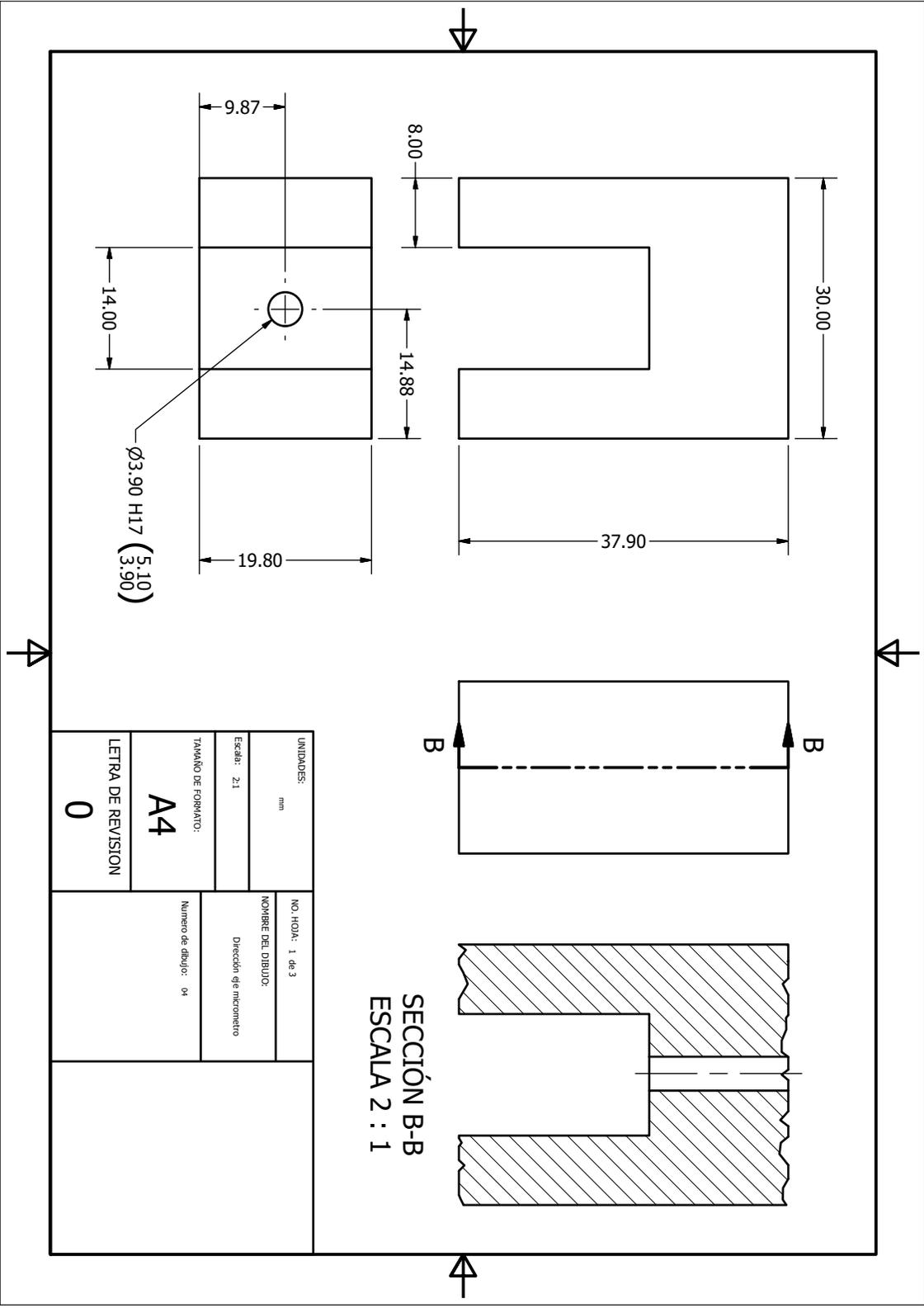


SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1

UNIDADES: mm	NO. HOJA: 1 de 3	NOMBRE DEL DIBUJO: Adaptador Micrometro-Hidror	Número de dibujo: 03
Escala: 1:1	TAMAÑO DE FORMATO: A4		
LETRA DE REVISION 0			

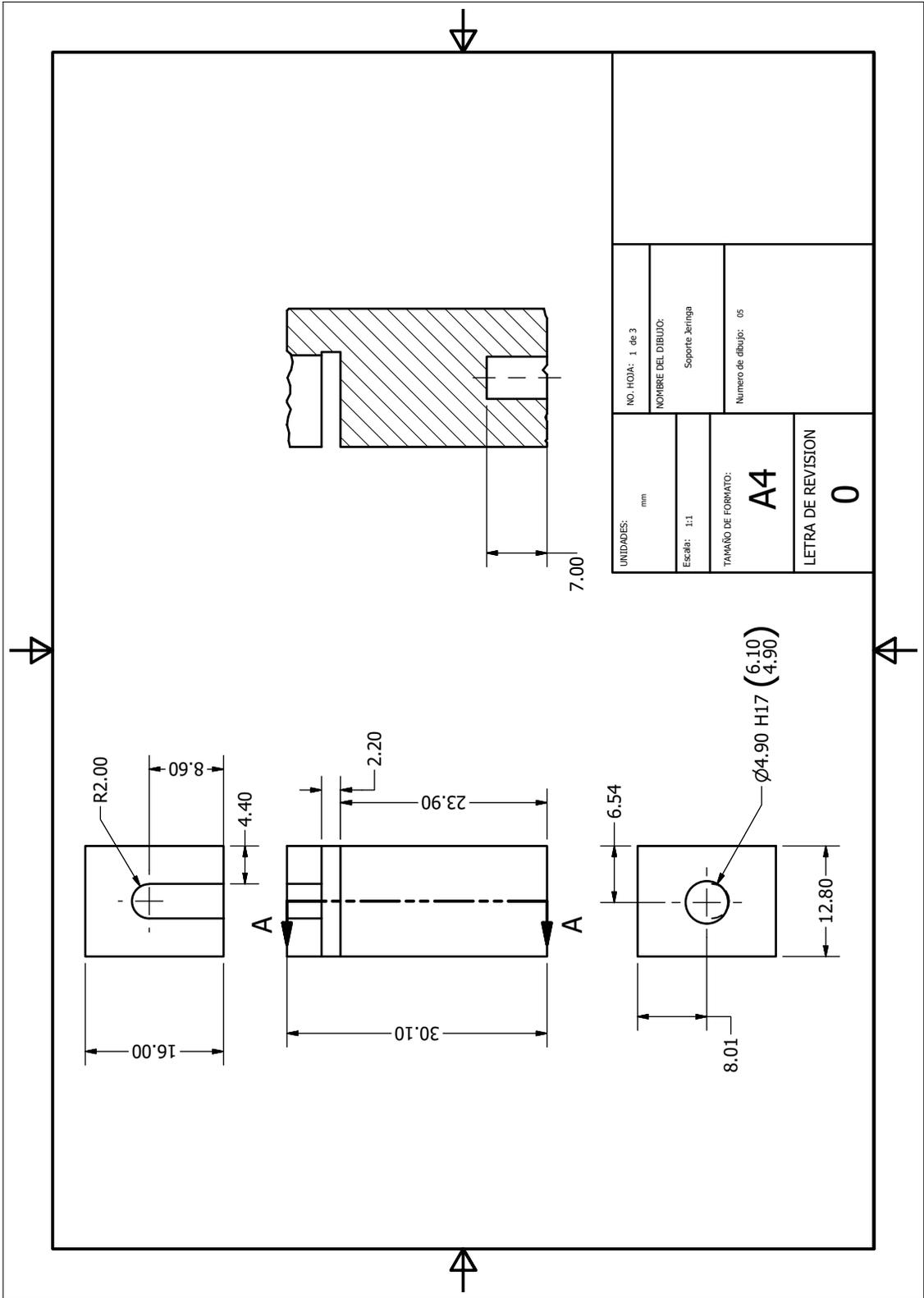


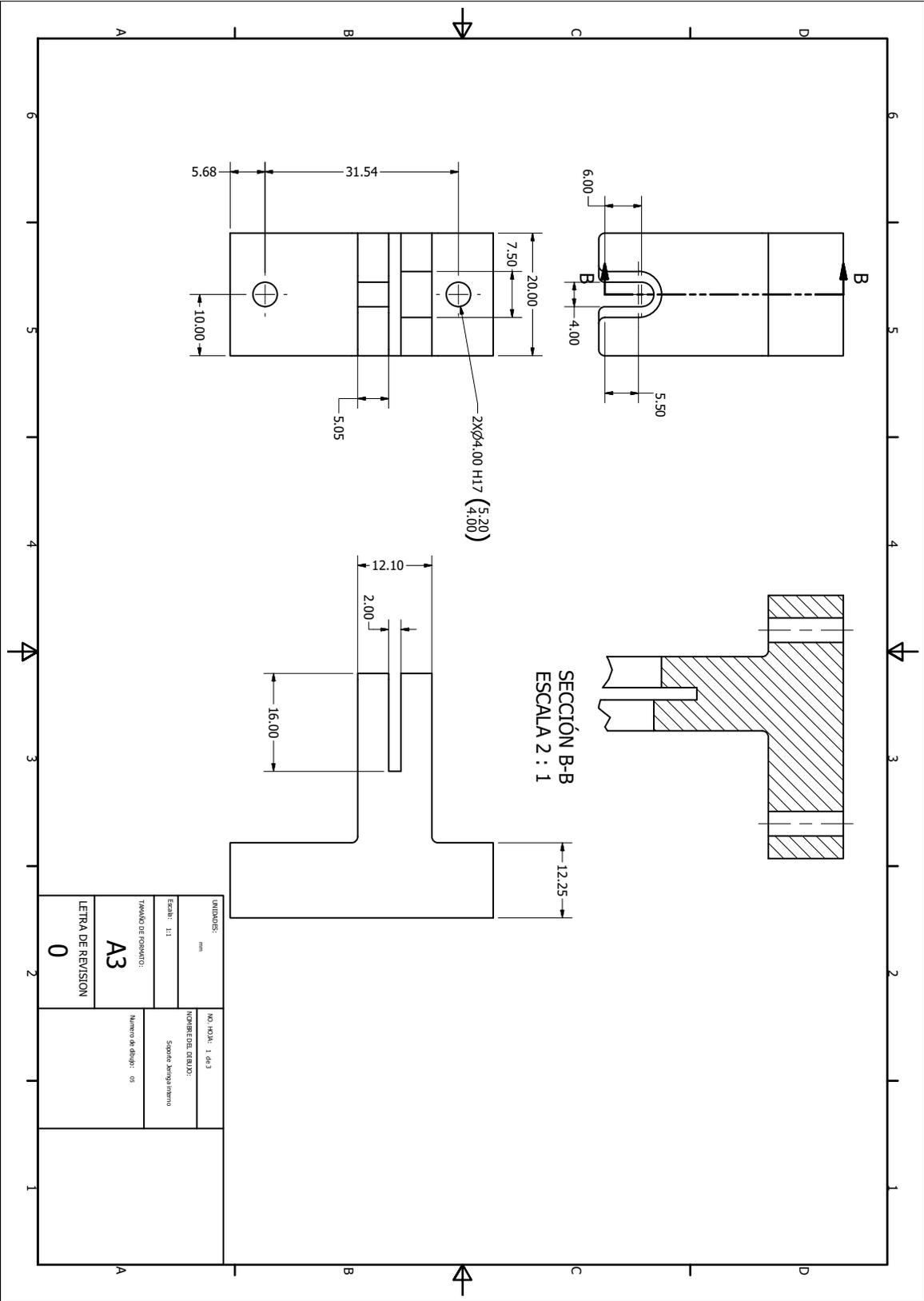
NOMBRE DEL DIBUJO:		Soporte micrometro		MATERIAL:		N/A		
DIBUJO NO.: 01	UNIDADES: mm	ESCALA: 1:1	TOLERANCIAS GENERALES		LINEAL: 0.1		RADIAL: 1.0°	
PAGINA NO.: 1	Tamaño de Formato:		Proyección		Peso de la pieza:		N/A	
DIBUJADO POR: Diego Regalado	FECHA: 10/9/2018	Letra de revisión:		Proyección		N/A		
DISENADO POR: Diego Regalado	FECHA: 10/9/2018	0		Proyección		N/A		
REVISADO POR: Diego Regalado	FECHA: 10/9/2018			Proyección		N/A		
APROBADO POR: Laura Rodón	FECHA: 10/9/2018			Proyección		N/A		



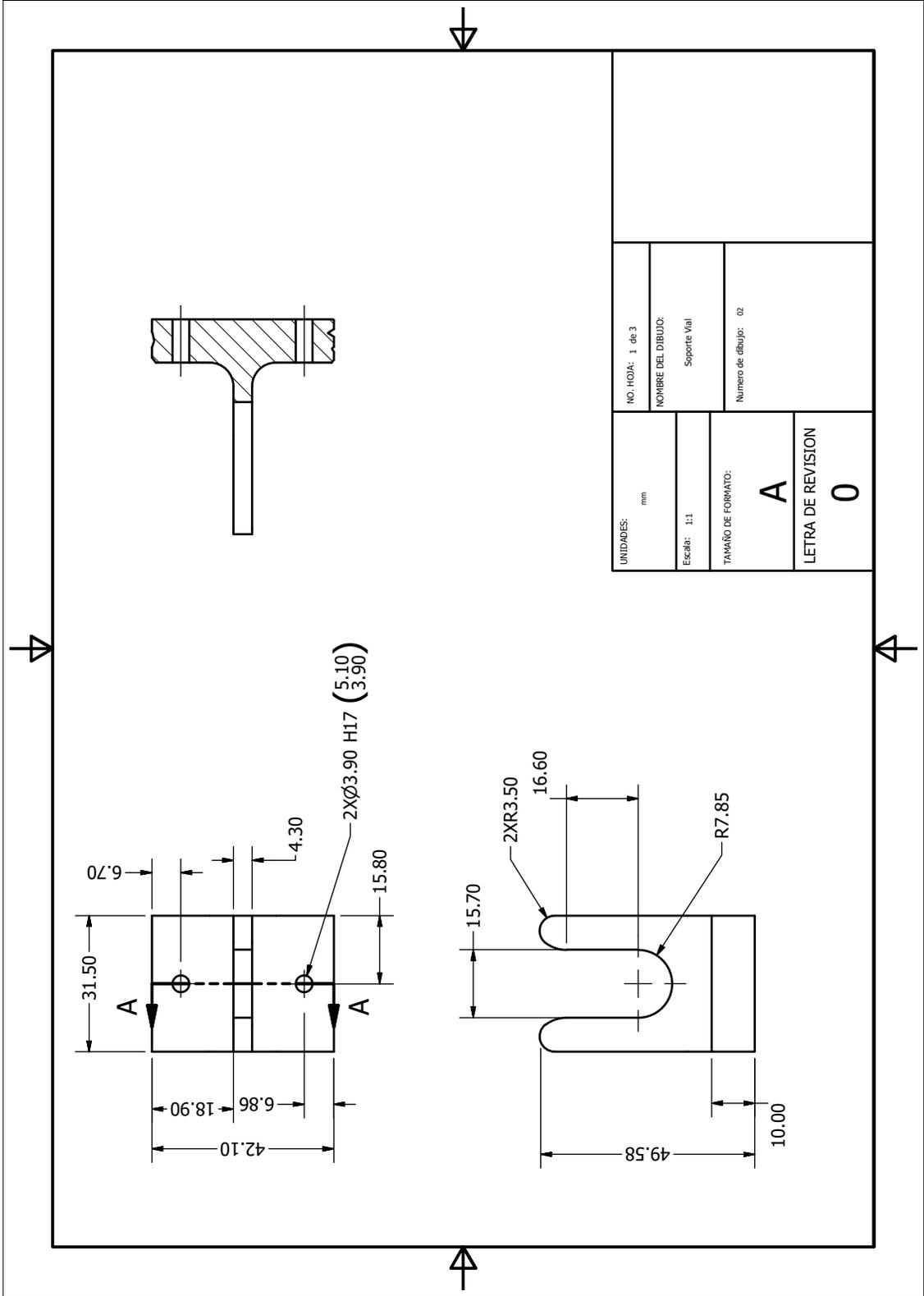
UNIDADES: mm	NO. HOJA: 1 de 3
Escala: 2:1	NOMBRE DEL DIBUJO: Diseño de micrometro
TAMAÑO DE FORMATO: A4	Numero de dibujo: 04
LETRA DE REVISION 0	

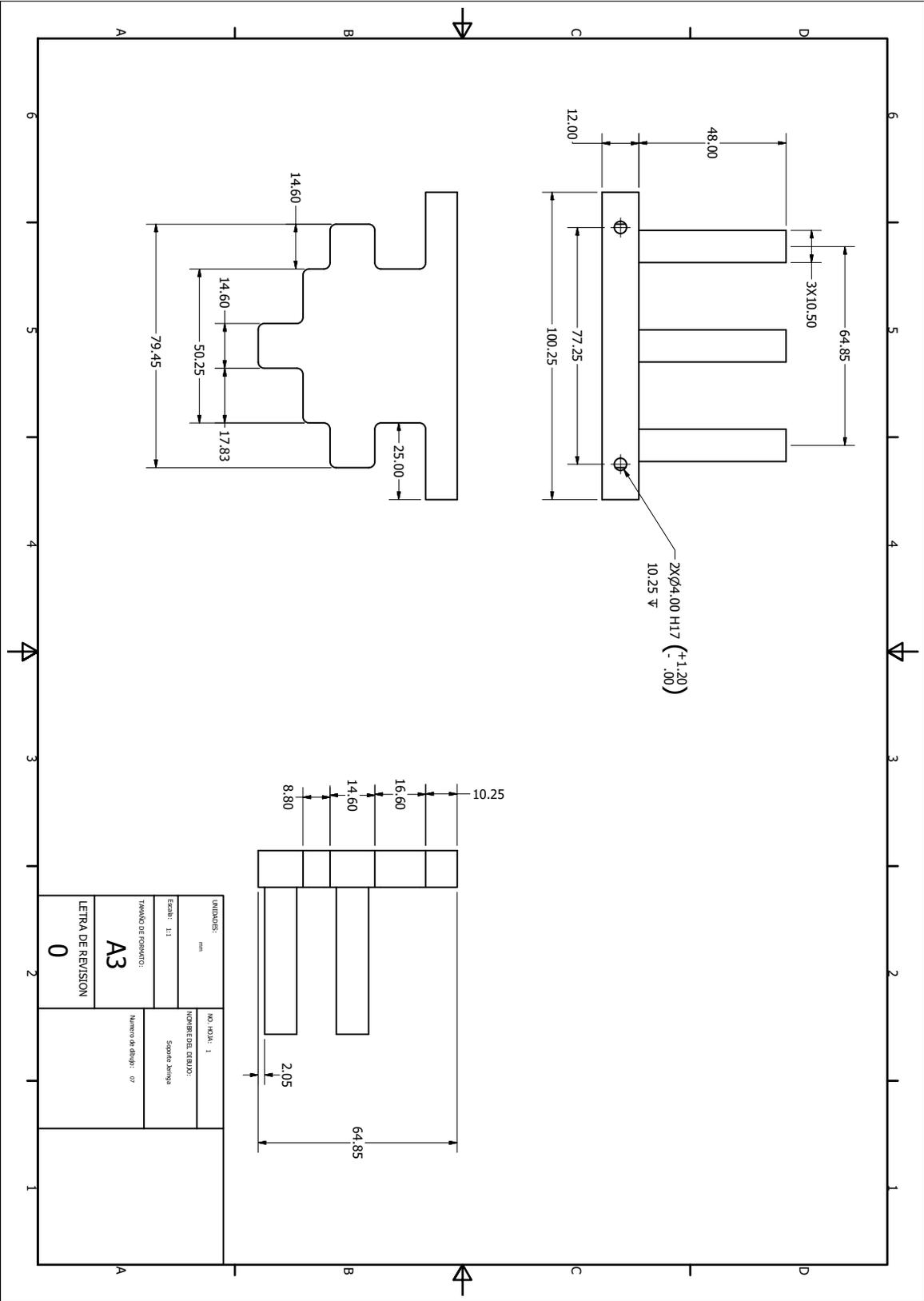
SECCIÓN B-B
ESCALA 2 : 1





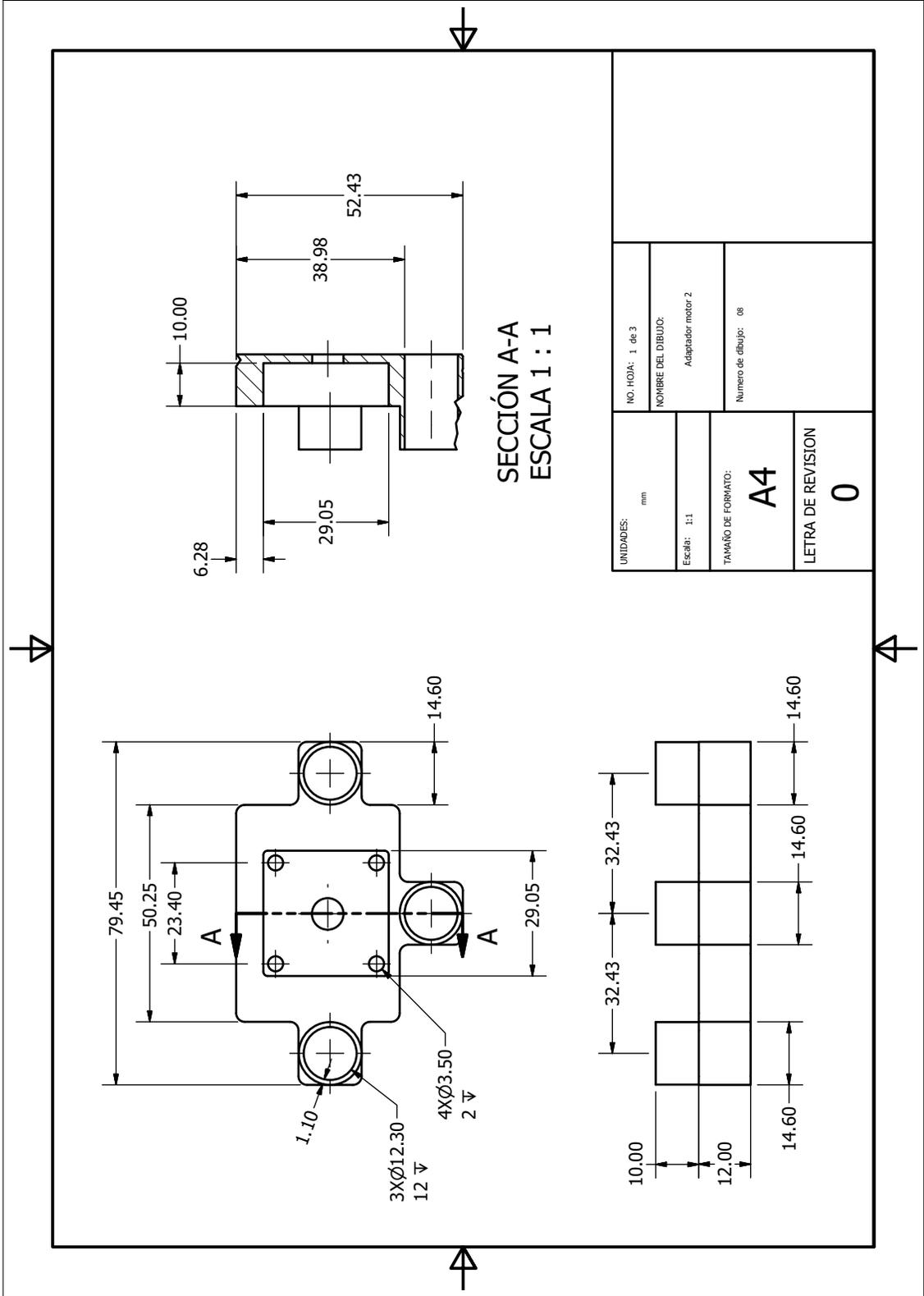
ENTRADA:	mm	NO. MOD.: 1 de 3	REVISIÓN DE DIBUJO: Sopete Alejandro Moreno
Escala:	1:1	Número de dibujo:	
TÍTULO DE PROYECTO:		LETRA DE REVISIÓN	
A3		0	



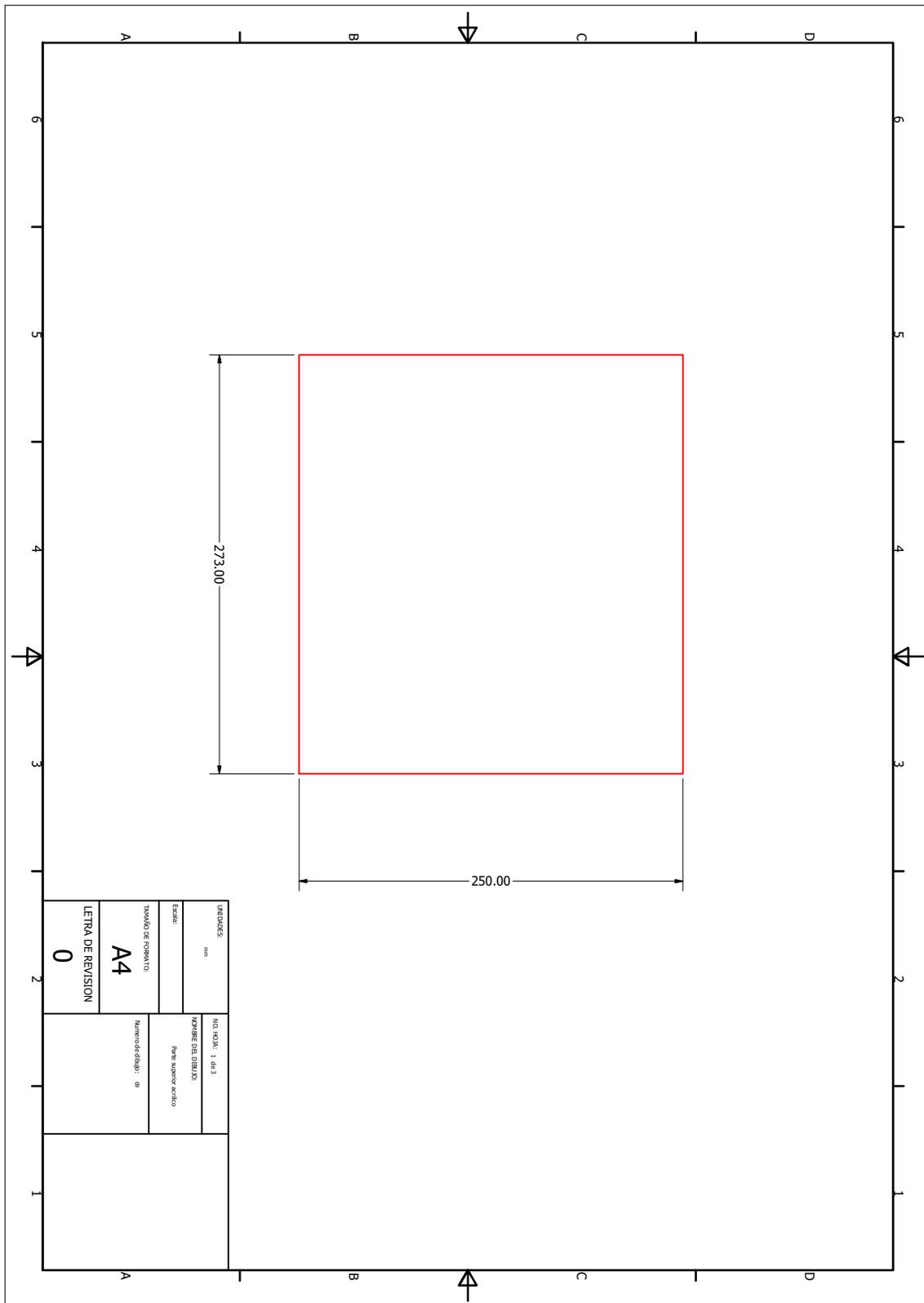


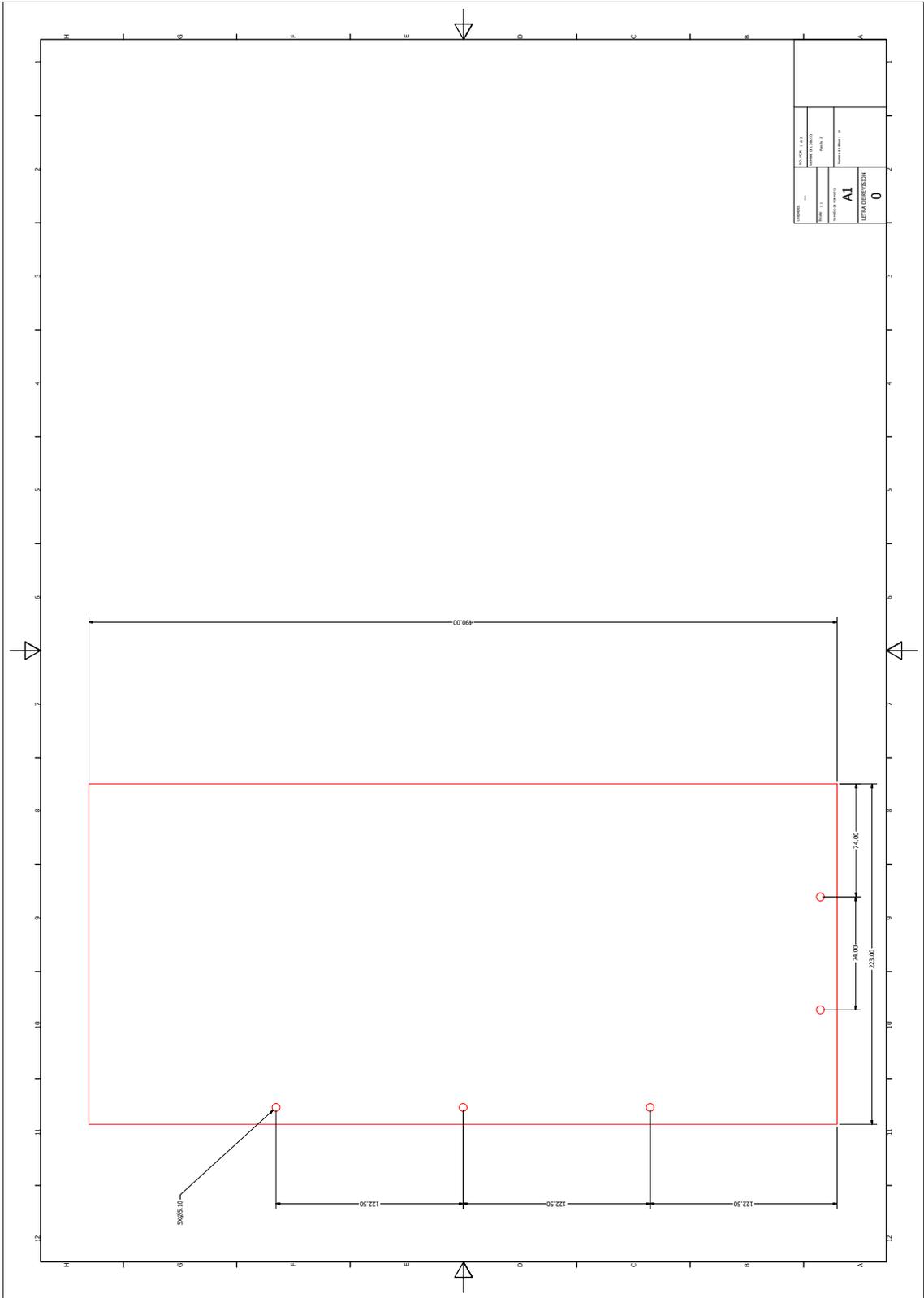
2XØ4.00 H17 (+1.20)
10.25

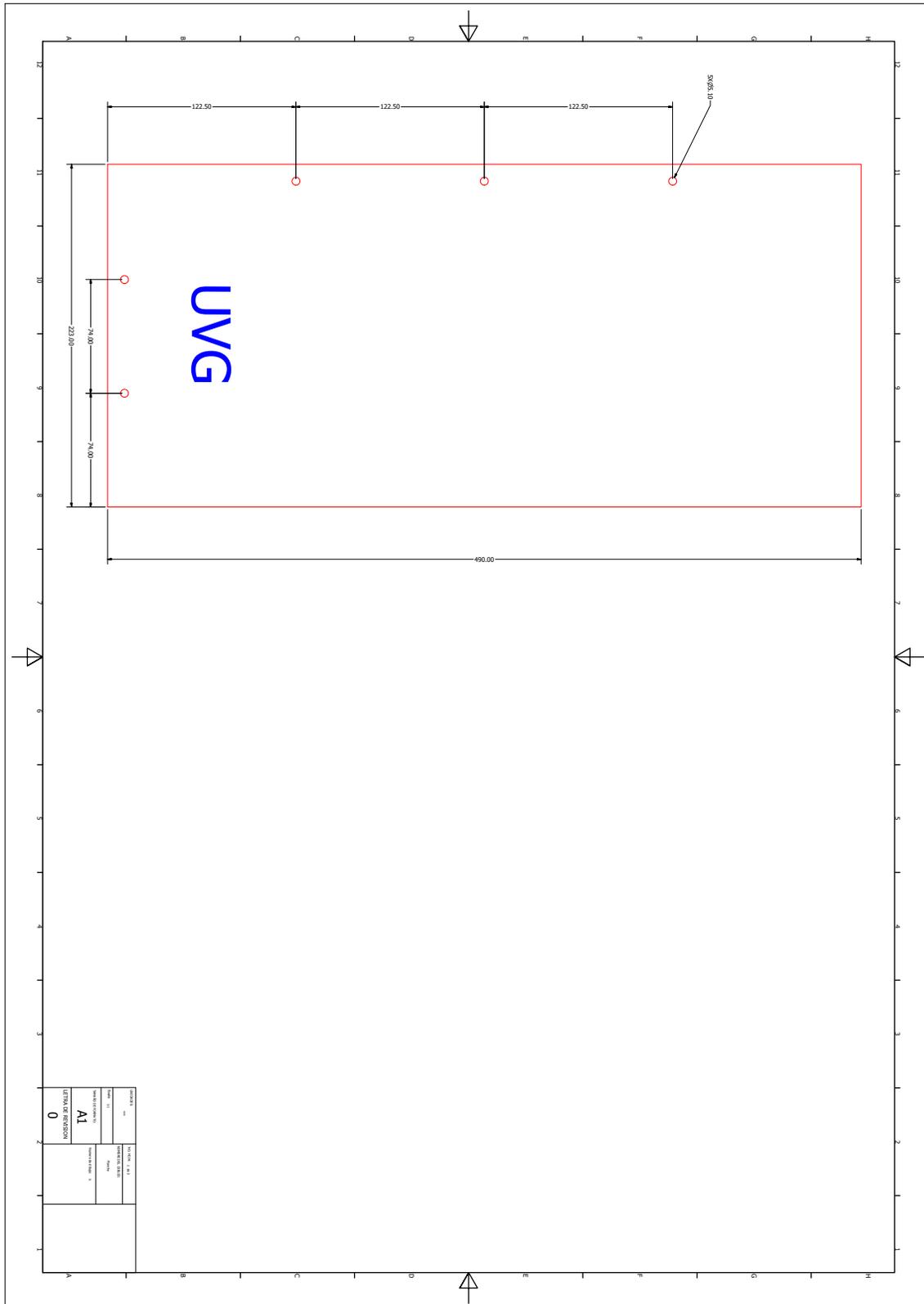
ENTRADA:	NO. HOJA: 1	REVISIÓN DE DIBUJO:	
mm		Sopora Arroya	
Escala: 1:1		Número de dibujo: 07	
TÍTULO DE PROYECTO:			
A3			
LETRA DE REVISIÓN			
0			



UNIDADES: mm	NO. HOJA: 1 de 3
Escala: 1:1	NOMBRE DEL DIBUJO: Adaptador motor 2
TAMAÑO DE FORMATO: A4	Numero de dibujo: 08
LETRA DE REVISION 0	

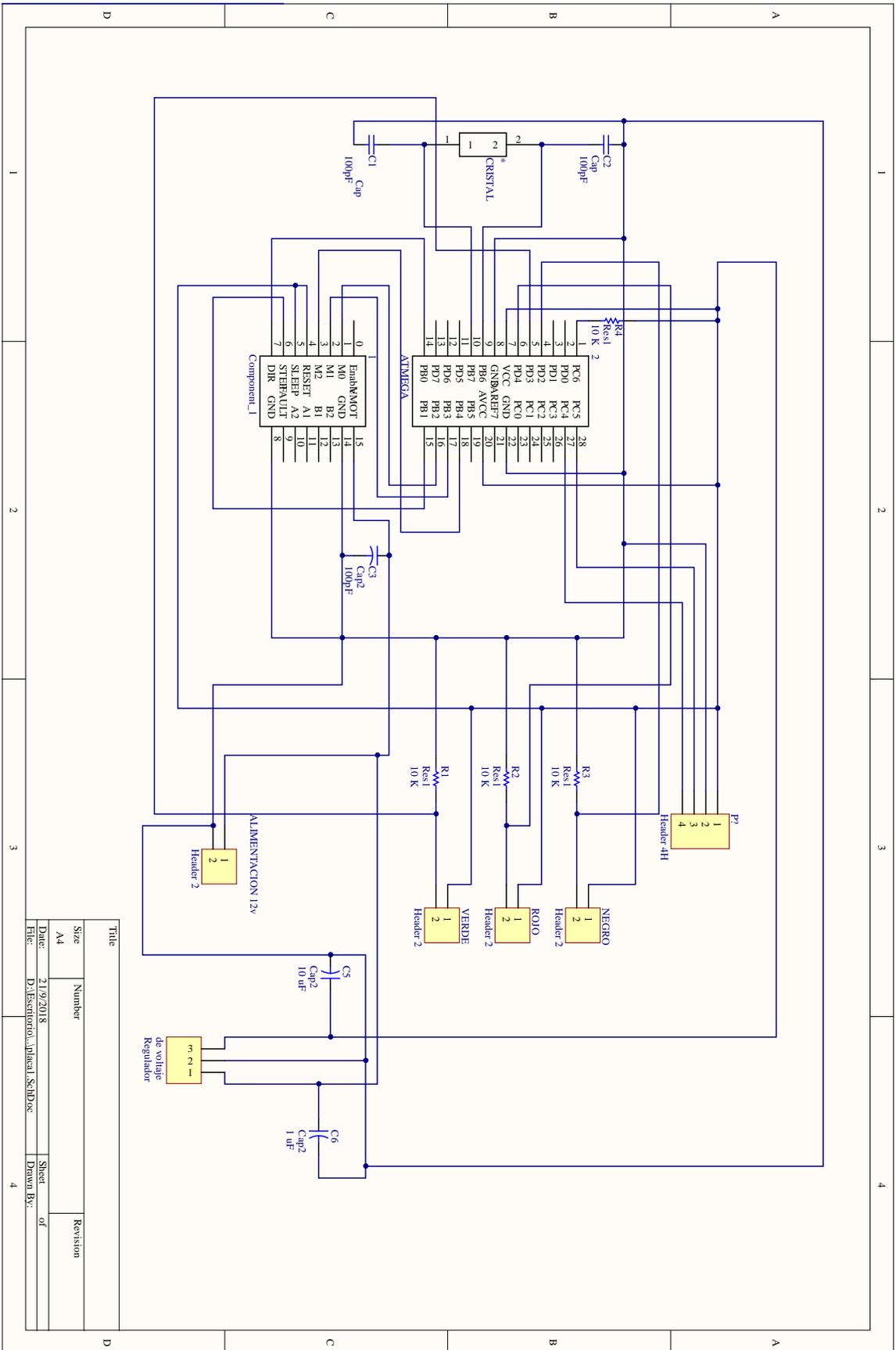






ANEXO B

Plano esquemático PCB



Title		Revision	
Size	Number		
A4			
Date:	21/9/2018	Sheet	of
File:	D:\Exertronia\Apical_SchDoc	Drawn By:	

ANEXO C

Código fuente

```

//UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
// TRABAJO DE GRADUACIÓN
// DIEGO REGALADO

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "DRV8825.h"
// using a 200-step motor (most common)
#define MOTOR_STEPS 200
// configure the pins connected
#define DIR 8
#define STEP 9
#define MS1 10
#define MS2 11
#define MS3 12
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);
A4988 stepper(MOTOR_STEPS, DIR, STEP, MS1, MS2, MS3);

int boton1=0;
int boton2=0;
int boton3=0;
int estado=0;
int puntero=0;
boolean puntero2=false;
int cantidad=0;

void setup() {

// Set target motor RPM to 1RPM and microstepping to 1 (full step mode)
stepper.begin(20, 1);
lcd.begin(16,2);// Columnas y filas de LCD
pinMode(2, INPUT);
pinMode(3, INPUT);
pinMode(4, INPUT);
lcd.clear(); // Borra pantalla
lcd.setCursor(3,0); // Inicio del cursor
lcd.print("BIENVENIDO");
lcd.setCursor(4,1);
lcd.print("DOCTOR");
delay (1500);
lcd.clear(); //Borra pantalla
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("PRESIONE 1 BOTON");
lcd.setCursor(1,1);
lcd.print("PARA CONTINUAR");
delay(1500);

}

void loop() {

```

```

//-----
//boton negro cuando esta en menu principal
if((digitalRead(2)==HIGH)&& (puntero2==false)){

  if(puntero==1){
    puntero=0;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(3,0);
    lcd.print("PREPARACION");
    lcd.setCursor(4,1);
    lcd.print("JERINGA");
  }

  else{
    puntero=1;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(3,0);
    lcd.print("EXTRACCION");
    lcd.setCursor(1,1);
    lcd.print("MICROLITROS: "+ String(cantidad));

  }

  delay(1000);

}

//-----
//boton negro cuando esta en extraccion
if((digitalRead(2)==HIGH)&&(puntero2==true)){

  lcd.clear();
  lcd.setCursor(3,0);
  lcd.print("EXTRACCION: ");

  if (cantidad<41){
    cantidad=cantidad+5;
  }

  else{
    cantidad=5;
  }

  lcd.clear();
  lcd.setCursor(3,0);
  lcd.print("EXTRACCION");
  lcd.setCursor(1,1);
  lcd.print("MICROLITROS: "+String(cantidad));

  delay(200);
}

//-----
//boton verde cuando esta en menu principal
if((digitalRead(3)==HIGH)&&(puntero==0)){

```

```

//funcion para preparacion de jeringa
//pjeringa();

delay(200);

}
//-----
//boton verde cuando esta en extraccion
if((digitalRead(3)==HIGH)&&(puntero==1)){
  puntero2=true;
  delay(200);

}
//-----
//boton verde cuando esta en extraccion y lo mantiene presionado
if((digitalRead(3)==HIGH)&&(puntero==1)&&(cantidad>0)){
  delay(2000);

  if((digitalRead(3)==HIGH)&&(puntero==1)&&(cantidad>0)){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("EXTRAYENDO....");
    motor();
    //-----
    //funcion de extraer
    //-----
    delay(400);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(3,0);
    lcd.print("FINALIZADO!");
    delay(2000);
    cantidad=0;
    puntero2=false;
    puntero=0;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(3,0);
    lcd.print("PREPARACION");
    lcd.setCursor(4,1);
    lcd.print("JERINGA");

  }
}

//-----
//boton rojo
if((digitalRead(4)==HIGH)&&(puntero==1)&&(cantidad>0)){
  puntero2=false;
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(3,0);
  lcd.print("RETORNANDO");
  delay(2000);
}

```

```
puntero=0;
lcd.clear();
lcd.setCursor(3,0);
lcd.print("PREPARACION");
lcd.setCursor(4,1);
lcd.print("JERINGA");

}
//-----

}

void motor(){
  // Tell motor to rotate 360 degrees. That's it.
  stepper.rotate(cantidad*54);
}

}

void pjerina():
  stepper.rotate(3*(-360));
  delay(10 segundos);

}
```


dosificador Aparato o mecanismo que sirve para suministrar cantidades determinadas de un producto o sustancia.. 1

etnográfico La etnografía es el estudio sistemático de persona y culturas. Es un método de investigación de las ciencias sociales.. 11

retinopatía La Retinopatía del Prematuro es una enfermedad en la que se observa en los niños prematuros y se da por un desarrollo anormal de los vasos sanguíneos de la retina. Por esta razón es una enfermedad que puede producir ceguera. La retina es la capa interna del ojo que percibe la luz y la convierte en mensajes visuales que son transmitidos al cerebro. Cuando un bebé nace antes de tiempo, los vasos sanguíneos de la retina crecen de manera anormal.. 4