

Universidad Politécnica del Estado de Morelos



Generador de gotas con distribución de tamaños mono–dispersa para
sus aplicaciones en espectroscopia atómica de líquidos.

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

P r e s e n t a

Luis Aarón Díaz Calleja

Directores de Tesis

M. C. Miguel Ángel Velasco Castillo

Dr. Víctor Ulises Lev Contreras Loera

Contenido

Agradecimientos:	i
Resumen:	ii
Lista de abreviaturas	iii
Lista de Figuras.....	iv
Lista de Tablas	vi
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción	2
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Planteamiento del problema.....	3
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo General	3
1.4.2 Objetivos específicos	3
1.5 Justificación	4
1.6 Hipótesis	4
1.7 Alcances.....	4
1.8 Limitaciones	5
1.9 Metodología.....	5
1.10 Organización de la tesis	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1 Microcontroladores.....	9
2.2 ATMEGA328P	10
2.3 Proteus.....	11
2.4 Atmel Studio 7.0.....	11
2.5 Eagle	11
2.6 Piezoeléctrico.	11
2.7 Transistor BJT	12
2.8 Arduino Mega.	13
2.9 Propiedades físicas del agua.	13
2.9.1 Densidad	13
2.9.2 Mojabilidad.....	13
2.9.3 Adhesión.....	14

2.9.4 Cohesión.....	14
2.9.5 Tensión superficial.....	15
2.9.6 Viscosidad.	15
2.9.7 Capilaridad	15
2.9.8 Número de Ohnesorge.	16
2.9.9 Número de Reynolds	16
2.10 Generador de gotas en demanda.....	16
2.11 Diseño de ecuaciones o modelo.....	17
2.11.1 Cálculo de diferencias de altura entre el reservorio de agua y la boquilla.	17
2.11.2 Número de Ohnesorge.	17
2.11.3 Número de Reynolds.....	18
2.11.4 Criterio de eyección de gotas	19
2.12 Ecuaciones de diseño de la fuente.	19
2.12.1 Voltaje máximo	19
2.12.2 Capacitor de filtrado.....	20
CAPÍTULO III: DESARROLLO.....	21
3.1 Requisitos	22
3.1.1 Requisitos funcionales nominales.....	22
3.1.2 Requisitos funcionales no nominales	22
3.1.3 Requisitos de interfaz.....	23
3.1.4 Requisitos de calidad	23
3.1.5 Requisitos de soporte.....	23
3.1.6 Requisitos evolutivos.....	23
3.1.7 Restricciones de diseño	24
3.2 Modelo mecánico.....	24
3.3 Modelo matemático	27
3.3.1 Criterio para determinar si una gota tiene suficiente energía cinética para ser eyectada	27
3.3.2 Número Z.....	29
3.3.3 Número de Reynolds	29
3.3.4 Número de Oh.....	30
3.3.5 Determinación del criterio de eyección de gotas	30
3.3.6 Diferencia de alturas entre el reservorio y la aguja	31

3.4 Implementación del piezoeléctrico	32
3.5 Elección del circuito electrónico.....	33
3.6 Circuito electrónico	37
3.7 Programación del microcontrolador	43
3.8 Tratamiento y uso de las agujas de jeringas.....	46
3.9 Funcionamiento del sistema	47
3.10 Diagrama de procesos del sistema.....	49
3.11 Arreglo experimental.....	50
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	52
4.1 Pruebas del dispositivo.....	53
4.2 Mediciones de las gotas	54
4.3 Análisis de resultados.....	57
4.3.1 Punta 21G	57
4.3.2 Punta 22G	59
4.3.3 Puntas 23G	60
4.4 Comparativa de desempeño del sistema.....	62
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....	63
5.1 Logro de objetivo.....	64
5.2 Aportaciones.....	65
5.3 Trabajos futuros	65
Referencias Bibliográficas.....	66
Anexo I: Código del microcontrolador.....	68
Anexo II: Código para sincronizar el flash con el disparo del sistema	72
Anexo III: Código para obtener las barras de error.....	73

Agradecimientos:

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme llegar hasta este momento de mi vida y cumplir esta meta. Extiendo mi agradecimiento total a mis padres, quienes siempre me han apoyado desde el principio de mi carrera, por su interés en mi crecimiento académico y personal. Gracias al Instituto de Ciencias Físicas, en especial al Dr. Víctor Contreras, por brindarme su confianza y su apoyo para la realización del presente trabajo, así como a los técnicos académicos Héctor Hugo Hinojosa y Osvaldo Flores Cedillo, por colaborar con el proyecto, facilitando la maquila del diseño mecánico en su taller así como apoyo técnico. Por último, gracias a todas aquellas personas que involucraron en mi formación académica: mis profesores, tutores, amigos que conocí en Upemor y por supuesto, agradezco al M.C Miguel Ángel Velasco Castillo, asesor interno, por su tiempo y respaldo en este trabajo.

Resumen:

Los generadores de gotas son dispositivos utilizados para procesos de dosificación controlados. La inyección controlada de líquidos con volúmenes específicos del orden de nanolitros es importante para el análisis cuantitativo de líquidos a través de técnicas analíticas. El presente documento muestra el desarrollo y adaptación de un generador de gotas con distribución de tamaños mono-dispersos para su implementación en el análisis químico del agua por medio de técnicas de levitación acústica y LIBS (acrónimo del inglés Laser Induced Breakdown Spectroscopy). El trabajo de tesis incluye los cálculos necesarios para el modelo físico del sistema, así como el diseño de la circuitería electrónica y la programación del microcontrolador que controla el circuito. La parte final de este trabajo muestra la caracterización del generador operando con agua destilada.

Lista de abreviaturas

1. ICF: Instituto de Ciencias físicas.
2. LIBS: Espectroscopia de Rompimiento Inducido por Láser.
3. Re: Número de Reynolds.
4. Oh: Número de Ohnesorge.
5. Tp: Tiempo de pulso
6. G: Calibre de agujas para jeringa.
7. PCB: Printed Circuit Board.

Lista de Figuras

Figura 1.1 Metodología de solución	6
Figura 2.1 Arquitectura Harvard	9
Figura 2.2 Arquitectura general de un microcontrolador AVR.....	10
Figura 2.3 Microcontrolador ATMEGA328P	10
Figura 2.4 Piezoeléctrico	12
Figura 2.5 Transistor NPN (izquierda) y PNP (derecha)	12
Figura 2.6 Arduino MEGA	13
Figura 2.7 Ángulo de contacto de un fluido con la superficie	14
Figura 2.8 Puentes de Hidrógeno de moléculas de agua.....	14
Figura 2.9 Capilaridad del agua.....	15
Figura 3.2.1 Modelo mecánico del sistema.....	25
Figura 3.2.2 Modelo mecánico en físico	26
Figura 3.2.3 Modificación para acoplar agujas de jeringas	26
Figura 3.3.1 Gráfica de las regiones de operación de un sistema de dispensación de fluidos	28
Figura 3.4.1 Puntos de alimentación del piezoeléctrico.....	33
Figura 3.5.1 Tiempo de respuesta del NE555	34
Figura 3.5.2 Tiempo de respuesta del relevador RAS 0510	35
Figura 3.5.3 Tiempo de conmutación de los transistores de potencia + ATMEGA328P	35
Figura 3.5.4 Tiempo de respuesta a la salida del sistema.....	36
Figura 3.6.1 Simulación del puente H, microcontrolador y LCD	39
Figura 3.6.2 Esquemático del puente H	40
Figura 3.6.3 Esquemático de la fuente variable	40
Figura 3.6.4 Esquemático de la fuente de 5V	41
Figura 3.6.5 Esquemático del microcontrolador y LCD.....	41
Figura 3.6.6 Diseño en PCB de la fuente variable	42
Figura 3.6.7 Diseño en PCB de la fuente de 5V	42
Figura 3.6.8 Diseño en PCB del puente H	43

Figura 3.6.9 Diseño en PCB de la placa de control.....	43
Figura 3.7.1 PINOUT ATMEGA328P.....	44
Figura 3.7.2 Señal de control del piezoeléctrico.....	45
Figura 3.7.3 Menú "pulse width".....	45
Figura 3.7.4 Menú "Action".....	46
Figura 3.8.1 Aguja con punta desbastada.....	47
Figura 3.9.1 Funcionamiento del sistema.....	48
Figura 4.1.1 Diagrama de tiempos para el arreglo experimental.....	53
Figura 4.1.2 Foto de gota eyectada.....	54
Figura 4.2.1 Selección del área de procesamiento de imagen.....	55
Figura 4.2.2 Selección del contraste.....	55
Figura 4.2.3 Gráfica de tamaño de la gota en pixeles para cada foto.....	56
Figura 4.3.1 Gráfica de diámetros de gotas contra anchos temporales de pulso para la punta 21G.....	59
Figura 4.3.2 Gráfica de diámetros de gotas contra anchos temporales de pulso para la punta 22G.....	60
Figura 4.3.3 Gráfica de diámetros de gotas contra anchos temporales de pulso para la punta 23G.....	61
Figura 4.4.1 Comparación de los diámetros de gotas más pequeños eyectados con todas las agujas.....	62

Lista de Tablas

Tabla 3.3.1 Propiedades físicas del agua y diámetros internos de las agujas	28
Tabla 3.3.2 Número Z para cada diámetro de aguja	29
Tabla 3.3.3 Número de Re para cada diámetro de aguja	30
Tabla 3.3.4 Número de Oh para cada diámetro de aguja	30
Tabla 3.3.5 Criterio de eyección de gotas para cada diámetro de aguja	31
Tabla 3.3.6 Criterio de diferencia de alturas	32
Tabla 3.5.1 Comparativa de voltaje máximo de operación	34
Tabla 4.3.1 Datos de la punta 21G	58
Tabla 4.3.2 Datos de la punta 22G	59
Tabla 4.3.3 Datos de la punta 23G	61

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El estudio de aerosoles y gotas de líquidos es importante en muchas áreas de la ciencia y la industria. En el caso particular de las líneas de investigación que se desarrollan en el laboratorio de Óptica del ICF (Instituto de Ciencias Físicas, UNAM, 2018) , se utiliza la espectroscopia de rompimiento inducido por láser (LIBS), para analizar la composición química de una muestra (sólida, líquida o gaseosa) a través de la formación de un micro – plasma producido por pulsos láser (Hahn & Omenetto, 2012). La técnica de LIBS permite monitorear cualitativamente (y en algunos casos, cuantitativamente) la composición química en tiempo real de prácticamente cualquier material (Hahn & Omenetto, 2012).

1.2 Antecedentes

En el laboratorio de óptica del ICF, se ha desarrollado recientemente una metodología para analizar la composición química del agua, permitiendo conocer cualitativamente y cuantitativamente las impurezas presentes (Peralta, 2018). En términos generales, la metodología consiste en dirigir un pulso láser a una gota, que se encuentra levitada por métodos acústicos para preconcentrar sus impurezas. El pulso láser genera un plasma a partir de la gota remanente para su posterior análisis químico a través de la detección de su luz emitida (LIBS). El espectro obtenido por LIBS se compara con espectros sintéticos característicos de los elementos (es decir, cada elemento emite en una o varias longitudes de ondas específicas), utilizando una base de datos del NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología), para determinar la presencia de un elemento en el agua (Peralta, 2018). Para el análisis cuantitativo se generan curvas de calibración con muestras control, para posteriormente analizar muestras desconocidas.

1.3 Planteamiento del problema

La técnica de LIBS aplicada a líquidos es más compleja y menos sensible si se compara con el análisis de muestras sólidas, debido a que la energía enfocada con el láser se pierde en procesos diversos como la evaporación de la muestra o producción de ondas mecánicas (Lazic, 2014). Para contrarrestar estos efectos, se hace levitar acústicamente una gota de agua y se evapora parcialmente para preconcentrar las impurezas (Bosch Ojeda & Sánchez Rojas, 2009). El resultado final es una optimización de la señal respecto a la energía que emplea el láser (Peralta, 2018). Previa a este trabajo de tesis, en investigaciones que se realizan en el laboratorio de óptica, el suministro a la trampa acústica de gotas con volúmenes de nano-litros (10^{-9} litros) se realizaba a través de una micropipeta. Al no existir un control preciso en el tamaño de las gotas suministradas, debido al volumen considerablemente menor a lo que proveen las micropipetas (microlitros), volúmenes depositados presentaban una dispersión considerable, dificultando el análisis cuantitativo.

1.4 Objetivos

Los objetivos de este proyecto son:

1.4.1 Objetivo General

- Construir y caracterizar un generador gotas con distribución de tamaños monodispersos a partir de instrumentación simple y de bajo costo.

1.4.2 Objetivos específicos

- Generar gotas de diferentes dimensiones a partir de puntas o agujas de distintos diámetros.
- Generar un sistema de provea gotas a demanda (Drop on demand) y pueda ser integrado a los experimentos de levitación acústica y análisis químico a través de LIBS.

1.5 Justificación

Los dispensadores de gotas son dispositivos utilizados en muchas áreas de la ciencia y la industria para procesos de dosificación controlada, permitiendo generar gotas de un líquido específico con una dispersión de tamaños muy pequeña. La monodispersión en el tamaño de las gotas reduce la variación de los resultados obtenidos en el análisis del agua con LIBS, al controlar los volúmenes de las gotas, permitiendo que aumente la exactitud y eficiencia en el método, por lo que diseñar y construir un dispensador que controle el diámetro de las gotas de acuerdo con la necesidad del usuario es de suma importancia. En este trabajo se analiza el desempeño del generador de gotas utilizando agua destilada. Sin embargo, puesto que el objetivo que tiene este dispositivo es generar gotas de muestras de agua con impurezas diversas, el generador de gotas se caracterizará en un rango relativamente amplio de condiciones (diferentes agujas inyectoras, diferentes amplitudes de voltaje y anchos temporales del pulso que controla al piezoeléctrico, etc.), lo que permitirá un uso más general del dispositivo.

1.6 Hipótesis

Se pueden generar gotas de tamaño micrométrico si se utilizan agujas comerciales de acero, con diámetros del mismo orden de magnitud que el diámetro de la gota deseada. Además, variando las condiciones electrónicas del generador (amplitud de voltaje y duración de pulsos), se puede variar ligeramente el tamaño de la gota, en cierto rango.

1.7 Alcances

- Mono dispersión en las gotas utilizando boquillas de distintos diámetros.
- Definir parámetros de operación del sistema.
- Generador de gotas diseñado para implementarse al sistema de LIBS – levitación acústica.

1.8 Limitaciones

- Tiempo de desarrollo del proyecto.
- Tiempos de entrega de los proveedores.
- Tiempo de maquila de las piezas mecánicas.
- Tiempo del proceso administrativo en relación con las compras de componentes electrónicos y materiales necesarios.
- Nulo conocimiento en el área de dinámica de fluidos.

1.9 Metodología

Las etapas de desarrollo completo de la tesis se pueden observar en la figura 1.1, donde se propone la metodología a seguir para dar solución a la problemática.

1. Investigación documental: Reunir información que presente potencial para dar solución al problema, consultando fuentes de información en español e inglés, a fin de compilar todas las fuentes de información posibles.
2. Selección de la información de acuerdo con las necesidades del proyecto: Filtrar la información a fin de excluir las fuentes que no aporten al proyecto o salgan de las especificaciones de operación.
3. Análisis de las técnicas utilizadas en la información seleccionada: Comprender el funcionamiento de las técnicas empleadas en cada uno de los trabajos previos, así como sus ventajas y desventajas.
4. Desarrollo de las técnicas: En base al análisis de las técnicas, desarrollar un dispensador de gotas, realizando modificaciones y ajustes de acuerdo con la aplicación que tendrá dentro de las líneas de investigación en el laboratorio de óptica.
5. Implementación del desarrollo: Realizar un plan de pruebas en donde se evalúe el desempeño del dispensador en diferentes condiciones de operación.
6. Análisis y comparación de resultados: En base a los resultados obtenidos en la implementación realizar un análisis, estipular si el sistema satisface las necesidades del proyecto, de no ser así, se realizarán modificaciones y se

implantaré de nuevo. Cuando el sistema cumpla con las necesidades, comparar los resultados obtenidos para cada punta de aguja

7. Validación del sistema: Comprobar que el sistema es capaz de entregar resultados satisfactorios de acuerdo con la problemática a resolver.

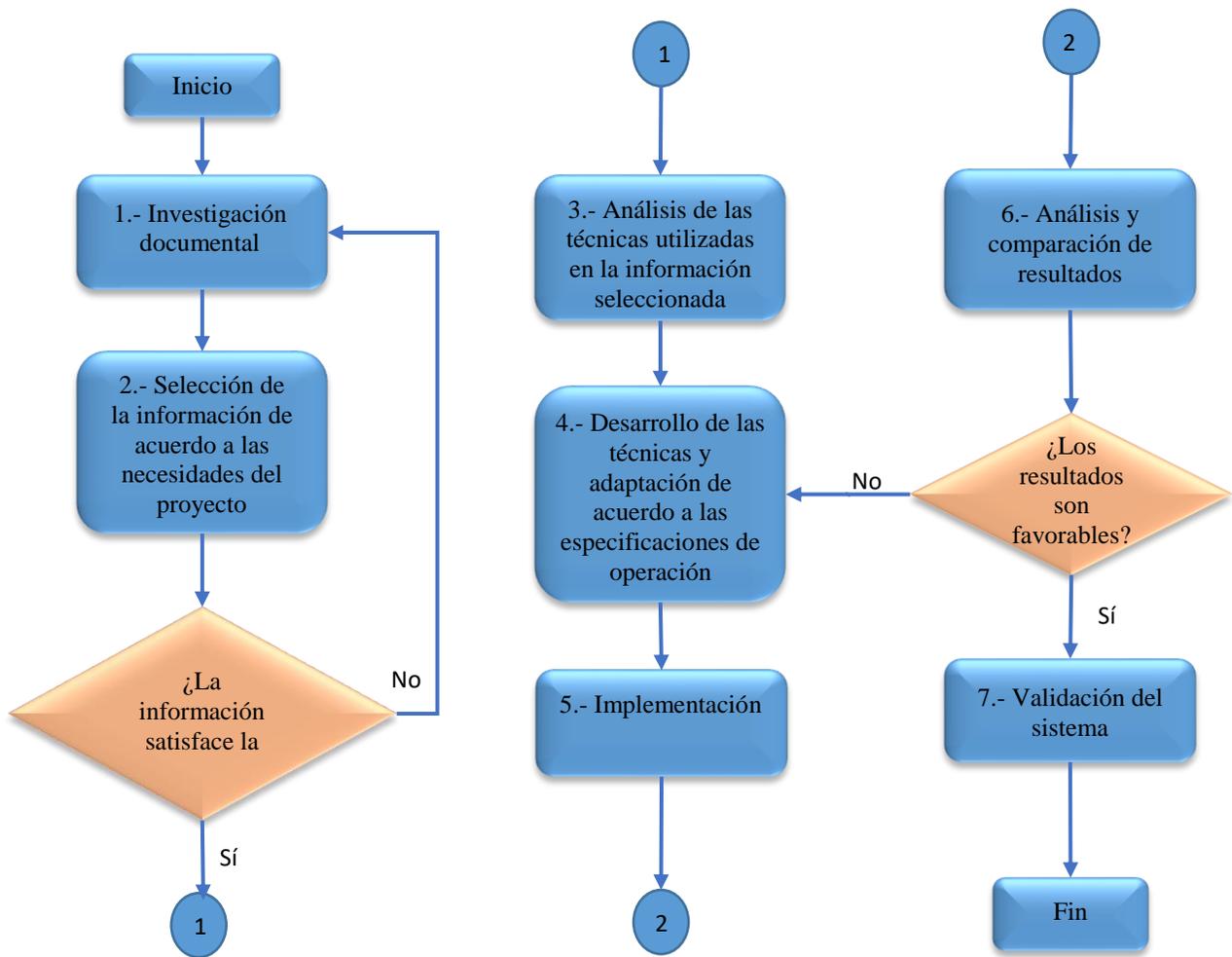


Figura 1.1 Metodología de solución

1.10 Organización de la tesis

1. Capítulo 1: Análisis del problema, se expone el panorama general del proyecto.
2. Capítulo 2: Marco teórico del proyecto, donde se sustenta todo el apartado técnico del mismo.
3. Capítulo 3: Desarrollo detallado del proyecto, etapa donde se explica cómo se realizó el proyecto, exponiendo las actividades hechas y su procedimiento.
4. Capítulo 4: Realización de pruebas, análisis y comparación de resultados obtenidos.
5. Capítulo 5: Desarrollo de conclusiones y trabajos futuros.

CAPÍTULO II:

MARCO

TEÓRICO

A continuación, se definen los conceptos básicos que se involucran en el desarrollo de la tesis. Los conceptos básicos comprenden componentes electrónicos utilizados para la operación del generador, así como conceptos básicos de física de fluidos.

2.1 Microcontroladores.

Un microcontrolador es un dispositivo electrónico de alto nivel de integración, con una arquitectura similar a la de una computadora, ya que cuenta con bloques de memoria FLASH, donde se guardan las instrucciones del programa (código), memoria ROM (Only Read Memory) y RAM (Random Access Memory), puertos de entrada y salida para dispositivos periféricos, así como un microprocesador (Mendoza, 2011). Los microcontroladores de AVR, como lo son los Atmega, utilizan el modelo de arquitectura de Harvard (figura 2.1), debido al gran número de pines que el microprocesador necesita para su funcionamiento, se puede observar la arquitectura general de un microcontrolador AVR en la figura 2.2, (Ali Mazidi, Naimi, & Naimi, 2011).

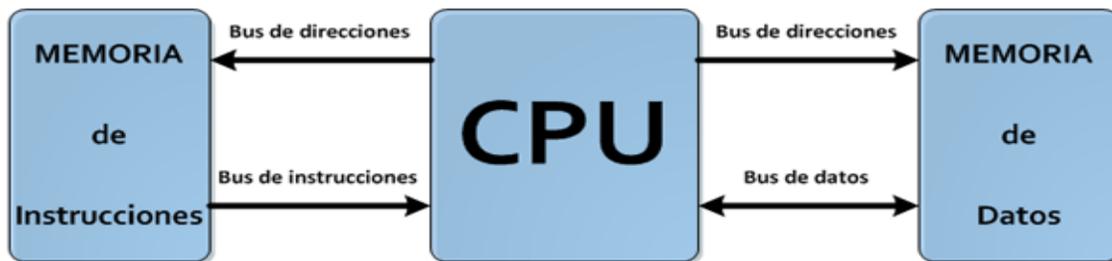


Figura 2.1 Arquitectura Harvard

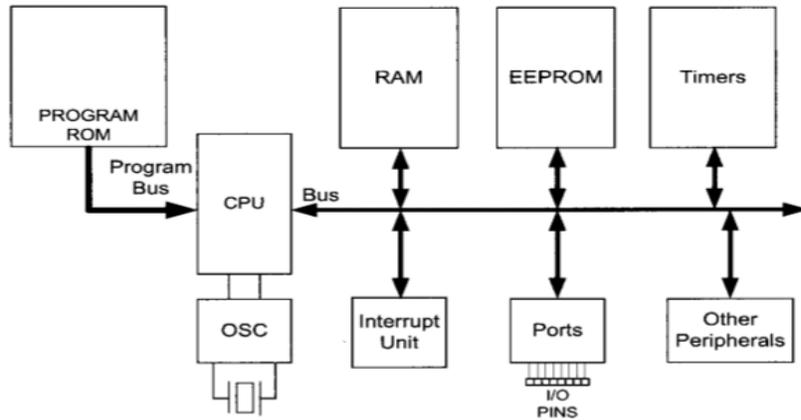


Figura 2.2 Arquitectura general de un microcontrolador AVR

2.2 ATMEGA328P

AVR comprende la línea de microcontroladores de ATMEL (hoy propiedad de la empresa Microchip) que trabajan con 32 registros de propósito general, directamente conectados a la Unidad Aritmética Lógica (ALU), permitiendo el acceso a dos registros independientes en un solo ciclo de reloj, teniendo como consecuencia una mayor eficiencia de desempeño, operando diez veces más rápido que microcontroladores convencionales. El microcontrolador ATMEGA328P (figura 2.3) es un dispositivo de 8 bits basado en la mejora de la arquitectura propuesta por AVR, dispone de 28 pines, de los cuales 23 son puertos de entrada y salida (I/O). El ATMEGA328P es un microcontrolador de alto rendimiento utilizado para tareas convencionales que no requieren de una alta velocidad de procesamiento (Atmel Corporation, 2016).

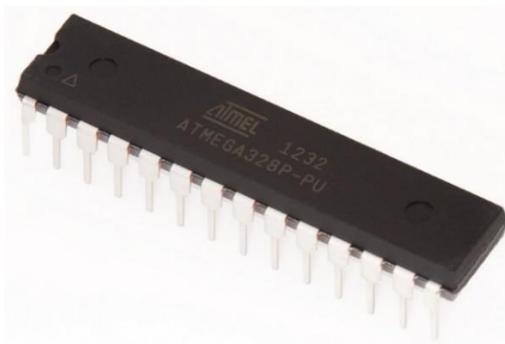


Figura 2.3 Microcontrolador ATMEGA328P

2.3 Proteus

Proteus 8.0 es un software de simulación de dispositivos electrónicos desarrollado por Labcenter Electronics. Proteus permite la simulación de microcontroladores, que además de contar con una amplia librería de distintas marcas y gamas, como lo son Microchip o Atmel, también, cuenta con una gran variedad de dispositivos digitales, como lo son los convertidores digital - analógico (DAC), convertidores analógico digital (ADC), LCDs, displays, actuadores, luces incandescentes, etc. (Mendoza, 2011).

2.4 Atmel Studio 7.0

Atmel Studio 7.0 es una plataforma integrada de desarrollo para los sistemas AVR y microcontroladores, permitiendo el desarrollo, construcción y depuración de proyectos desarrollados en lenguaje C, C++ o Ensamblador (Atmel Corporation, 2016).

2.5 Eagle

Eagle es un software de diseño de diagramas y PCBs desarrollado por Autodesk, permite el posicionamiento de los componentes en una placa y diseño de layouts (Autodesk Inc., 2018).

2.6 Piezoeléctrico.

Los piezoeléctricos son componentes que funcionan por el “efecto piezoeléctrico”, descubierto en 1880 por Jaques y Pierre Curie, el cual consiste en aplicar presión sobre un cristal de cuarzo para generar cargas eléctricas en este, también otros materiales además del cristal, pueden convertirse en piezoeléctricos en presencia de un campo eléctrico, como por ejemplo el titanio de bario cerámico. Los materiales piezoeléctricos tienen además una frecuencia de resonancia, que es donde el efecto piezoeléctrico puede presentarse en su óptimo punto de operación, esto se puede

presentar a partir de vibraciones externas, se genera una diferencia de potencial que puede ser aprovechada para distintos propósitos. En el campo de la ingeniería se suele aplicar tensión alterna a los piezoeléctricos para que estos vibren a la frecuencia de la señal o se suele aprovechar el efecto piezoeléctrico para la construcción de sensores, en el desarrollo de este trabajo se utilizará un piezoeléctrico de disco, como se observa en la figura 2.4 (Cúpich Rodríguez & Elioizondo Garza, 2000).



Figura 2.4 Piezoeléctrico

2.7 Transistor BJT

El transistor bipolar (también llamado BJT por sus siglas en inglés Bipolar Junction Transistor) es un componente semiconductor con capas de dopaje NPN o PNP, cuenta con tres terminales: base (B), emisor (E) y colector (C), se utiliza como amplificador de corriente en sistemas analógicos y como interruptor en circuitos digitales cuando este trabaja en las zonas de corte o saturación, siendo la zona de corte como interruptor abierto y la de saturación como interruptor cerrado (Boylestad & Nashelsky, 2009), la representación esquemática del transistor puede observar en la figura 2.5.



Figura 2.5 Transistor NPN (izquierda) y PNP (derecha)

2.8 Arduino Mega.

El Arduino MEGA2560 (figura 2.6) es una tarjeta de desarrollo de código libre basada en el microcontrolador ATMEGA2560, cuenta con 54 pines digitales I/O y con 16 pines analógicos, funciona con un cristal externo de 16MHz. Cuenta con su propia IDE para programar la tarjeta por medio de comunicación ISP.



Figura 2.6 Arduino MEGA

2.9 Propiedades físicas del agua.

2.9.1 Densidad

La densidad (ρ) se define como la cantidad de masa por unidad de volumen ($\rho=V/m$), para un fluido homogéneo, la densidad es constante. Debido a la baja compresibilidad la densidad depende más de la temperatura que de la presión (SHAMES, 1995).

La densidad del agua es de 997 kg/m^3 .

2.9.2 Mojabilidad

La mojabilidad es la preferencia de un sólido a estar en contacto con un fluido, es decir, describe qué tanto se esparcirá un fluido en una superficie de determinado material. Una alta mojabilidad implica que el fluido se dispersará por toda la superficie, mientras una baja mojabilidad desplaza el fluido sin que este se disperse por la superficie (tiende a conservar la forma de una gota), esto es lo que pasa con los materiales hidrofóbicos (Abdalla, y otros, 2007). Una forma de medir mojabilidad es con el ángulo de contacto con respecto a la superficie (ver figura 2.7).

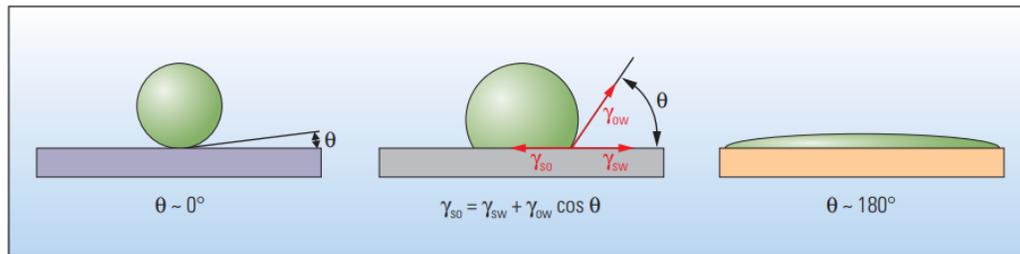


Figura 2.7 Ángulo de contacto de un fluido con la superficie

2.9.3 Adhesión

Las fuerzas de adhesión se originan por la atracción de unas moléculas hacia otras totalmente distintas, uniendo las distintas moléculas y oponiéndose a ser separadas. Las fuerzas de adhesión en el agua son fuertes, especialmente si se encuentra interactuando con moléculas polarizadas con cargas positivas o negativas (OpenStax, 2015).

2.9.4 Cohesión

Las fuerzas cohesivas (o de cohesión) son la consecuencia de la atracción entre moléculas del mismo tipo, el agua tiene una fuerza de cohesión particularmente fuerte, debido a los puentes de hidrógeno que se forman entre moléculas (figura 2.8). Las fuerzas cohesivas ofrecen resistencia ante la separación de moléculas al aplicar tensión o estrés, dando origen a la tensión superficial (OpenStax, 2015).

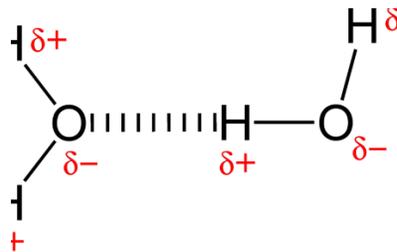


Figura 2.8 Puentes de Hidrógeno de moléculas de agua

2.9.5 Tensión superficial.

La tensión superficial (σ) es la fuerza que se distribuye a lo largo de una superficie debido a la atracción de moléculas parecidas (fuerzas cohesivas) y a la atracción entre moléculas diferentes (fuerzas de adhesión). En el interior de un líquido las fuerzas cohesivas se cancelan debido a que existen fuerzas en todas las direcciones, mientras que en la superficie las fuerzas internas superan a las fuerzas externas causadas por la interacción con un gas (ya sea aire u otro gas específico), dando como resultado la tensión superficial. Es por este fenómeno que las gotas tienden a tener una forma circular (SHAMES, 1995). La tensión superficial del agua es de 0.074 N/m.

2.9.6 Viscosidad.

La viscosidad es un fenómeno asociado a la cohesión de moléculas, se define como la velocidad a la que un líquido se desplaza por una superficie. El coeficiente de viscosidad (μ) se mide en $\text{kg}/(\text{m}^*\text{s})$, disminuye con el incremento de la temperatura y por lo tanto, la cohesión. (SHAMES, 1995). La viscosidad del agua es $1.0 \times 10^{-3} \text{ N}^*\text{s}/\text{m}^2$.

2.9.7 Capilaridad

La capilaridad es el movimiento ascendente del agua a través de un tubo, desafiando las fuerzas de la gravedad. Las moléculas del agua son atraídas por las moléculas del tubo (que tienen mayor fuerza de atracción por polaridad que a las mismas moléculas de agua), el agua tiene su punto más alto en las paredes del tubo y el más bajo en el centro, a esa geometría formada se le llama menisco (figura 2.9). La altura del nivel del agua en el tubo capilar es proporcional al diámetro del tubo.

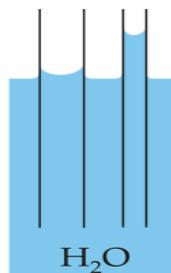


Figura 2.9 Capilaridad del agua

2.9.8 Número de Ohnesorge.

El número de Ohnesorge expresa la relación entre las fuerzas viscosas y las fuerzas de tensión superficial, siendo un número adimensional, se utiliza para conocer la influencia de la viscosidad en la dinámica de dispersión de fluidos, números de Oh grandes indican mayor influencia de fuerzas viscosas en el fluido (McKinley & Renardy, 2011).

2.9.9 Número de Reynolds

El número de Reynolds es un número adimensional que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas del fluido (McKinley & Renardy, 2011). Este número se utiliza comúnmente para identificar si un flujo es laminar o turbulento.

2.10 Generador de gotas en demanda.

Los generadores de gotas son dispositivos utilizados en campos de la ciencia (como la farmacia, medicina, análisis químicos o sistemas de dosificación) e industria (impresoras de tinta, impresoras 3D, etc.) donde es necesario la aplicación de una sustancia en pequeñas cantidades. Estos sistemas se pueden dividir en dos tipos de funcionamiento: a demanda, también conocido como Drop on demand (DOD) y continuo (es decir, cada cierto tiempo se genera una gota).

Los sistemas DOD suelen funcionar a partir de piezoeléctricos, donde el piezoeléctrico es el actuador que desplaza el agua hasta la boquilla y genera la gota, o con resistencias térmicas (la mayoría de los cartuchos de tinta de impresora utilizan este método) que calientan el líquido, creando una burbuja, una vez esta revienta, la presión que libera la explosión expulsa el fluido interno, generando gotas.

El artículo “A low-cost, precise piezoelectric droplet-on-demand generator” (Harris, Liu, & Bush, 2015) presenta un generador DOD utilizando un piezoeléctrico como actuador para producir las gotas, utilizando aceite de silicón puro para realizar sus pruebas, obteniendo diámetros de gotas de 0.78 a 0.94mm empleando una boquilla de 0.5in.

Otro trabajo acerca de la generación de gotas utilizando un piezoeléctrico es el artículo “Control of Droplet Formation in Inkjet Printing Using Ohnesorge Number Category: Materials and Processes” (Tai, Yap Gan, Nan Liang, & Keng Lok, 2008), exponen las cuestiones físicas que involucra la mecánica de fluidos en los sistemas de generación de gotas (en este caso se empleó agua con diferentes porcentajes de glicerol), así como las condiciones a las que trabaja su sistema. Los resultados obtenidos son voltajes de operación, anchos de pulso para la acción del piezoeléctrico de acuerdo con Oh, utilizando una boquilla de 25µmde diámetro.

2.11 Diseño de ecuaciones o modelo.

2.11.1 Cálculo de diferencias de altura entre el reservorio de agua y la boquilla.

La ecuación 2.1 se utiliza para el cálculo de diferencia de alturas entre el reservorio y la boquilla, ayuda a regular el nivel de agua y la presión que esta ejerce dentro del sistema (Harris, Liu, & Bush, 2015).

$$|\Delta h| = \frac{2\sigma}{g\rho\alpha}$$

Ecuación 2.1 Cálculo de diferencias de alturas

Donde:

- $|\Delta h|$: Diferencial de alturas entre el reservorio y la boquilla del sistema.
- σ : Tensión superficial del agua.
- ρ : Densidad del agua.
- α : Diámetro de la boquilla del sistema.
- g : Gravedad

2.11.2 Número de Ohnesorge.

Para obtener el número de Ohnesorge (Oh) se emplea la ecuación 2.2.

$$Oh = \frac{\mu}{Re}$$

Ecuación 2.2 Cálculo del número Oh

Donde:

- μ : Viscosidad del agua.
- Re: Número de Reynolds.
- Oh: Número de Ohnesorge.

2.11.3 Número de Reynolds

Para determinar el número de Reynolds (Re) se utiliza el número Z (ecuación 2.3), que es el inverso al número Oh (Jang, Kim, & Moon, 2009). Una vez obtenido el número Z, se obtiene Re con la ecuación 2.4.

$$Z = \frac{(d\rho\sigma)^{\frac{1}{2}}}{\mu}$$

Ecuación 2.3 Cálculo de número Z

Donde:

- μ : Viscosidad del agua.
- Oh: Número de Ohnesorge.
- σ : Tensión superficial del agua.
- ρ : Densidad del agua.
- d: Diámetro de la boquilla del sistema.
- Z: Número zeta.

$$Re = Z^{-2}$$

Ecuación 2.4 Cálculo del número de Reynolds

Donde:

- Z: Número zeta.
- Re: Número de Reynolds.

2.11.4 Criterio de eyección de gotas

El criterio de eyección de gotas está descrito en la ecuación 2.5 y establece si la gota posee suficiente energía cinética para ser eyectada de la boquilla (McKinley & Renardy, 2011).

$$\text{Re} \leq \frac{2}{\text{Oh}}$$

Ecuación 2.5 Criterio para eyección de las gotas

Donde:

- Re: Número de Reynolds.
- Oh: Número de Ohnesorge.

2.12 Ecuaciones de diseño de la fuente.

2.12.1 Voltaje máximo

Para el diseño de la fuente se calculó el valor de voltaje máximo que entrega el transformador, este se puede conocer a partir del voltaje que especifica el fabricante, el cuál es el valor eficaz (o RMS), por lo que se utiliza la ecuación 2.6.

$$V_{\max} = (V_{\text{RMS}})(\sqrt{2})$$

Ecuación 2. 6 Ecuación para conocer el voltaje máximo del transformador

Donde:

- V_{\max} : Voltaje máximo que otorga el transformador.
- V_{RMS} : Valor de voltaje eficaz.

Al valor obtenido se le resta la caída de tensión de los diodos del puente rectificador de onda completa, utilizando la ecuación 2.7.

$$V = V_{\max} - 2V_{\text{diodo}}$$

Ecuación 2.7 Voltaje rectificado

Donde:

- V_{diodo} : Caída de tensión producida por el consumo del puente de diodos.
- V: Voltaje rectificado.

2.12.2 Capacitor de filtrado

Para el cálculo del capacitor de filtrado se utiliza la ecuación 2.8.

$$C = \frac{(5)I_{\text{max}}}{(\text{freq})(V)}$$

Ecuación 2.8 Valor del capacitor de filtrado

Donde:

- C: Capacitor de filtrado para un voltaje de rizo del 10%.
- freq: Frecuencia de la señal del transformador después de la rectificación.
- V: Voltaje rectificado.
- Imax: Corriente máxima que suministra el transformador.

La ecuación anterior se contempla para un filtrado con un voltaje de rizo del 10%, si se desea un rizo del 7%, se utiliza la ecuación 2.9, donde el valor obtenido del capacitor de filtrado se multiplica por 1.4.

$$C_f = C * 1.4$$

Ecuación 2.9 Capacitor para rizo del 7%

Donde:

- C_f : Capacitor de filtrado para un voltaje de rizo del 7%.
- C: Capacitor de filtrado para un voltaje de rizo del 10%.

CAPÍTULO III: DESARROLLO

El desarrollo de este trabajo está basado principalmente en el trabajo realizado en el MIT en 2015 (Harris, Liu, & Bush, 2015), en donde se utiliza el efecto piezoeléctrico para eyectar gotas fuera de la boquilla de un generador, además, el artículo proporciona los planos del diseño de su generador de gotas y sus componentes mecánicos (para las condiciones expuestas en el artículo). Sin embargo, el diseño y algunas características principales se han adecuado de acuerdo con los requerimientos necesarios para su implementación en el sistema de levitación acústico utilizado para el análisis químico de líquidos.

3.1 Requisitos

Los requisitos del sistema son:

3.1.1 Requisitos funcionales nominales

1. Fuente de alimentación variable: Debe operar desde un valor de 10 V hasta 60 V para proteger la integridad del piezoeléctrico, siendo el usuario capaz de manipular el voltaje de operación, además, un display indica el voltaje de la fuente variable.
2. Módulo de operación: Compuesto por un LCD y tres pulsadores, el LED rojo del módulo debe encender para indicar que este se encuentra prendido, de la misma manera, el LCD debe estar encendido.
3. Manipulación del dispositivo: Navegación en el menú mostrado a través del LCD, utilizando los pulsadores, cada uno correspondiente a una acción en particular, la cual es mostrada en pantalla.

3.1.2 Requisitos funcionales no nominales

1. LED indicador del módulo de operación: Indica si el regulador interno del módulo está en funcionamiento, de no ser así, es posible que la integridad del microcontrolador y el módulo LCD esté en riesgo.

3.1.3 Requisitos de interfaz

1. Interfaz de usuario: Se llevará a cabo a través de un LCD que muestre un menú donde el usuario pueda escoger el ancho de pulso deseado para operar el sistema, así como realizar la dosificación de la gota en demanda.
El sistema contará con pulsadores, que permitirán al usuario navegar a través del menú y realizar acciones.
2. Voltaje variable: El voltaje de la fuente de alimentación se manipulará utilizando un potenciómetro.

3.1.4 Requisitos de calidad

1. Protección del microcontrolador: Con el objetivo de evitar cortos circuitos o sobretensiones que afecten al sistema, el microcontrolador es alimentado mediante un regulador de 5 V.
2. Protección en el puente H: Para asegurar que el microcontrolador esté protegido de cualquier cortocircuito que pueda llegar a ocurrir en el puente H, se utilizaron dos transistores más para la conmutación de los estados, en caso de que suceda un percance, los transistores protegen al microcontrolador.

3.1.5 Requisitos de soporte

1. El usuario no deberá remover el piezoeléctrico cuando el sistema esté encendido.
2. El usuario debe evitar manipular e incluso tocar el piezoeléctrico si este se encuentra conectado al sistema.

3.1.6 Requisitos evolutivos

1. Implementar el sistema en PCB: El sistema deberá estar presentado en PCB para su implementación final, con su respectivo gabinete para facilitar su portabilidad.
2. Reducir el tamaño del dispositivo: Atendiendo a la portabilidad, el dispositivo se debe diseñar pensando en ocupar el menor espacio posible sin perder robustez.

3.1.7 Restricciones de diseño

1. Robustez del dispositivo: El dispositivo estará sometido al movimiento, por lo que debe estar fijo al gabinete para evitar daño en las placas. El dispositivo debe tener la capacidad de ser transportable.

3.2 Modelo mecánico

El diseño del generador de gotas consiste en 5 partes principales:

- Reservorio: como su nombre lo indica, es una cámara de reserva cuyo propósito es suministrar el fluido a la cámara donde se genera la gota.
- Placa de traslación: permite manipular milimétricamente la altura del reservorio, se utilizó una placa MELLES GRIOT, la cual tiene un rango de movimiento de 1 in.
- Piezoeléctrico: el disco piezoeléctrico utilizado es CUI CEB-35D26 (disponible en mouser electronics), este componente se encarga manipular la presión del agua de la cámara principal.
- Cámara del fluido: cámara principal, está acoplada al piezoeléctrico y a la boquilla, es el lugar donde se lleva a cabo la manipulación de la presión interna del sistema a través del piezo, por lo que es importante verificar que los acoples estén completamente sellados.
- Boquilla: cavidad de salida del agua, el orificio de salida tiene un diámetro interno de 0.05 in, está hecha de acero inoxidable.

En adición a las piezas anteriores, también se incluye una base y una placa vertical (upright) con entradas de tornillos cada 0.25 pulgadas (in) para acoplar la placa de traslación y la cámara de fluido. Todas las piezas, a excepción de la boquilla, fueron hechas de aluminio. Todo el modelo mecánico puede ser visto en la figura 3.2.1.

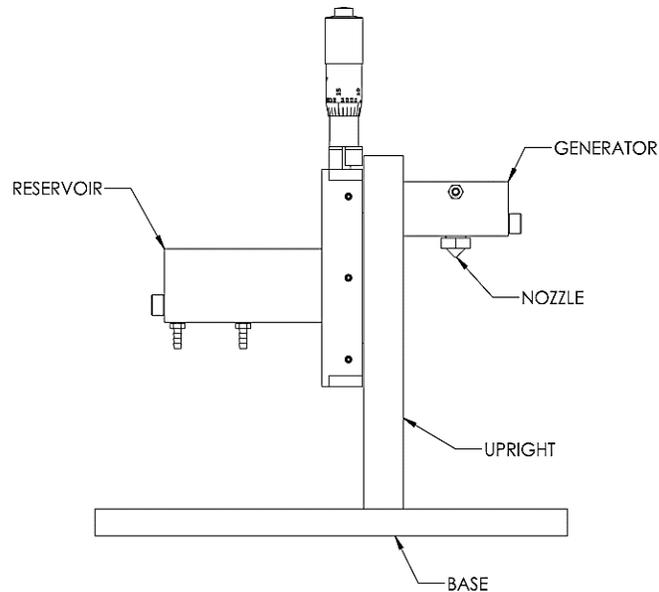


Figura 3.2.1 Modelo mecánico del sistema

Se realizaron algunas modificaciones al diseño original (Harris, Liu, & Bush, 2015): debido a que la placa de traslación utilizada en la referencia es diferente a la que se usó para el desarrollo del proyecto. La separación entre cada fila de tornillos fue adaptada a 1 in, para que la placa traslacional pueda atornillarse al sistema, ya que la placa MELLES GRIOT tiene una separación de 1 in entre cada guía para los tornillos. Además, su tamaño fue ampliado a 30 cm de altura, es necesario colocar una pieza de acrílico encima de los bordes del piezoeléctrico para asegurar un sellado hermético.

Por último, el cambio más importante está relacionado con la boquilla, la cual se sustituyó por agujas de jeringas. La boquilla requerida debe ser capaz de inyectar gotas de líquidos dentro de una trampa acústica de dimensiones limitadas a pocos milímetros sin perturbar al potencial acústico dentro de la trampa. Por esta razón, además del tiempo y dificultad de maquilar la boquilla diseñada en la referencia, se utilizan agujas de jeringas comerciales. Este cambio brinda ventajas sobre la punta maquinada: sus dimensiones no alteran al potencial acústico, además de que se ahorra el tiempo y los costos de maquilar, y se pueden experimentar con diversos tamaños de acuerdo a las necesidades de inyección ya que existen agujas

comerciales de distintos calibres. En relación con este cambio se adaptó un acople para la aguja, utilizando un empaque cónico de 22 mm junto a un acoplador de manguera, esto se selló con plástiacero. Finalmente, para colocarlo en el orificio de la cámara de fluido donde originalmente se encontraría la boquilla, se empleó silicón RVT, esto tuvo como objetivo sustituir la boquilla por agujas de jeringas comerciales. El modelo mecánico, así como la modificación para utilizar agujas de jeringas como boquillas se pueden observar en la figura 3.2.2 y 3.2.3, respectivamente.

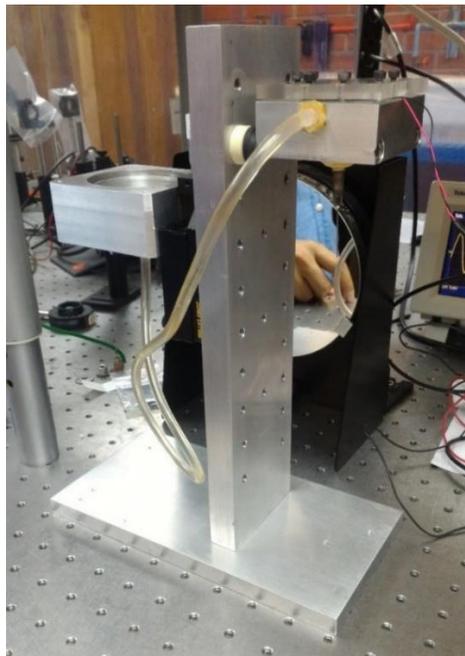


Figura 3.2.2 Modelo mecánico en físico



Figura 3.2.3 Modificación para acoplar agujas de jeringas

3.3 Modelo matemático

El modelo matemático del sistema se basa en las condiciones en las que el generador puede eyectar una sola gota por demanda del usuario, para esto existen fuerzas físicas que están involucradas en el sistema, las cuales hay que vencer para romper las gotas de agua y que éstas salgan eyectadas de la jeringa.

Las propiedades físicas del agua que están involucradas en el sistema son: capilaridad, densidad, cohesión, adhesión, viscosidad y tensión superficial, además se contempla la mojabilidad de la aguja, que definirá qué tan hidrofóbico es el material, es decir, qué tan difícil será eyectar gotas de la aguja. Todas estas propiedades se opondrán a la generación de gotas cuando el sistema se encuentre en una zona donde el agua esté en equilibrio (es decir, no gotea de la aguja, pero puede ser eyectada por acción del piezoeléctrico), por lo que la fuerza física que puede romper el equilibrio para generar gotas es la presión, la cual se manipula a través del movimiento del piezoeléctrico y variando la distancia del reservorio con respecto a la punta de la aguja.

3.3.1 Criterio para determinar si una gota tiene suficiente energía cinética para ser eyectada

Primero se debe conocer si es posible que el sistema eyecte gotas según la dinámica de fluidos, esto se realiza a partir de los números de Ohnesorge, Reynolds y el número Z, estos valores adimensionales establecen la relación de las fuerzas de inercia, viscosas y de tensión superficial presentes en un sistema, en función a las propiedades físicas del fluido utilizado. La relación del número de Ohnesorge y el número de Reynolds resulta en una gráfica (McKinley & Renardy, 2011) donde observan las regiones de operación del sistema de dispensación de fluidos según los parámetros obtenidos (figura 3.3.1).

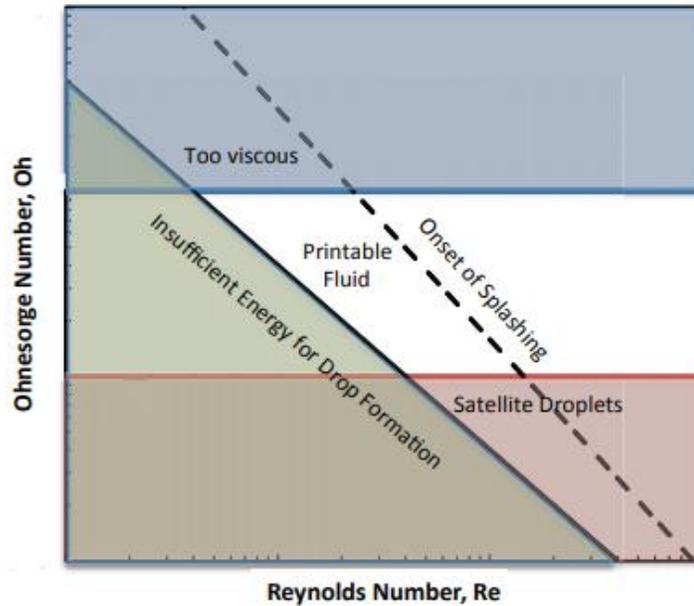


Figura 3.3.1 Gráfica de las regiones de operación de un sistema de dispensación de fluidos líquidos

De acuerdo con las propiedades físicas del agua (tabla 3.3.1) se calcula primero el número Z (ecuación 3.3.1), variable que se utilizará para calcular el número de Reynolds (ecuación 3.3.2), una vez obtenido el número de Re, se calcula el número de Ohnesorge (ecuación 3.3.3), por último, se calcula el criterio de eyección de gotas para verificar que el sistema es capaz de eyectar una gota.

Tabla 3.3.1 Propiedades físicas del agua y diámetros internos de las agujas

Viscosidad (Agua a 25°)	μ	$1.0 \times 10^{-3} \text{N*s/m}^2$
Densidad (Agua)	ρ	997kg/m^3
Tensión superficial (Agua)	σ	0.074 N/m
Diámetros de internos de las agujas	d	$0.514 \text{mm}, 0.413 \text{mm}, 0.337 \text{mm}$

Los números de Oh, Re y Z son distintos en función al diámetro interno de las agujas, por lo que los resultados para cada caso son mostrados en las tablas 3.3.2 para el número Z, 3.3.3 para el número Re, 3.3.4 para el número Oh, 3.3.5.

3.3.2 Número Z

Se determina el número Z (ecuación 3.3.1) para cada diámetro de aguja. La Tabla 3.3.2, muestra el diámetro interno correspondiente a cada calibre de agujas utilizado en este trabajo y su correspondiente numero Z. El valor del diámetro interno fue obtenido de la página web de SIGMA – ALDRICH (Sigma -Aldrich, 2012).

$$Z = \frac{\left((d) \left(997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(0.074 \frac{\text{N}}{\text{m}} \right) \right)^{\frac{1}{2}}}{1 \times 10^{-3} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}}$$

Ecuación 3.3.1 Número Z

Tabla 3.3.2 Número Z para cada diámetro de aguja

Diámetro interno d (mm)	Número Z
0.514	194.74
0.413	174.56
0.337	157.68

3.3.3 Número de Reynolds

A partir del número Z, se calculó el número de Reynolds correspondiente a cada diámetro de aguja (tabla 3.3.3) de acuerdo con la ecuación 3.3.2.

$$\text{Re} = Z^{-2}$$

Ecuación 3.3.2 Número de Re

Tabla 3.3.3 Número de Re para cada diámetro de aguja

Número Z	Diámetro interno d (mm)	Número Re
194.74	0.514	26.37x10 ⁻⁶
174.56	0.413	32.82x10 ⁻⁶
157.68	0.337	40.22x10 ⁻⁶

3.3.4 Número de Oh

Posteriormente se calculó el número de Ohnesorge (ecuación 3.3.3) cada partir del número de Re correspondiente a cada diámetro interno de aguja (tabla 3.3.4).

$$Oh = \frac{1.0 \times 10^{-3} \frac{N * s}{m^2}}{Re}$$

Ecuación 3.3.3 Número de Oh

Tabla 3.3.4 Número de Oh para cada diámetro de aguja

Número de Re	Diámetro interno d (mm)	Número de Oh
26.37x10 ⁻⁶	0.514	37.92
32.82 x10 ⁻⁶	0.413	30.47
40.22 x10 ⁻⁶	0.337	24.86

3.3.5 Determinación del criterio de eyección de gotas

Una vez obtenidos todos los parámetros de Re y Oh es posible realizar el cálculo para el criterio de eyección de gotas, el cual establece que para que una gota tenga la energía suficiente para ser eyectada del sistema, se tiene que cumplir la siguiente condición: $Re \leq 2/Oh$. Se calculó el criterio para cada valor de Re y Oh correspondiente a cada diámetro interno de las agujas utilizadas en este trabajo (tabla 3.3.5).

Tabla 3.3.5 Criterio de eyección de gotas para cada diámetro de aguja

Número Re	Número Oh	Diámetro interno d (mm)	Criterio $Re \leq 2/Oh$
26.37×10^{-6}	37.92	0.514	$26.37 \times 10^{-6} \leq 52.74 \times 10^{-3}$
32.82×10^{-6}	30.47	0.413	$32.82 \times 10^{-6} \leq 65.64 \times 10^{-3}$
40.22×10^{-6}	24.86	0.337	$40.22 \times 10^{-6} \leq 80.44 \times 10^{-3}$

Para que el criterio de eyección de gotas se pueda cumplir, es necesario comparar el número de Re con $2/Oh$, en la tabla anterior se puede observar la comparación de estos dos números, donde se observa que en todos los casos el número de Reynolds (izquierda) es menor a $2/Oh$ (derecha), por lo tanto, el criterio se cumple para todas las condiciones de este sistema.

Cuando el número de Re es pequeño, las gotas no se alcanzan a formar, debido a que no se superan las fuerzas de tensión superficial. Es posible superar esta condición debido a que la gota posee suficiente energía para ser eyectada de la aguja (como se observó en el criterio de eyección de gotas). Para romper el punto de equilibrio y superar las condiciones que establece un Re pequeño se manipula la presión en el sistema. Las variables que pueden manipular la presión en el sistema son: la altura del reservorio con respecto a la punta (esto es posible gracias a la placa traslacional milimétrica), la amplitud del voltaje suministrado al piezoeléctrico, el tiempo correspondiente a la inversión de voltaje del piezoeléctrico (t_p), el nivel del agua y el diámetro de las agujas (tanto interno como externo).

3.3.6 Diferencia de alturas entre el reservorio y la aguja

Este criterio establece la diferencia de alturas para que el agua dentro de la aguja no caiga por gravedad o no salga de la aguja, por lo que se utiliza la ecuación 3.3.4 para determinar el rango de alturas para los distintos diámetros de aguja (tabla 3.3.6).

$$|\Delta h| \leq \frac{2(0.074 \frac{N}{m})}{\left(997 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9.8 \frac{m}{s^2}\right) (d)}$$

Ecuación 3.3.4 Diferencia de alturas

Tabla 3.3.6 Criterio de diferencia de alturas

Díámetro interno d (mm)	$ \Delta h $ (mm)
0.514	29.4
0.413	36.6
0.337	44.9

3.4 Implementación del piezoeléctrico

El piezoeléctrico es el actuador típico de los sistemas DOD, debido a la facilidad con la que es controlado; cuando es alimentado con voltaje de corriente directa (CD) tiende a mantener constante una posición de contracción. Dependiendo de la polaridad de la alimentación es el movimiento del piezoeléctrico, si se polariza directamente, el piezoeléctrico se mueve hacia adelante, mientras que si se polariza en inversa (es decir, las terminales de alimentación están intercambiadas), se moverá hacia atrás (en dirección a la cerámica). Este movimiento genera una presión dentro de la cámara de fluido, dependido del movimiento del piezoeléctrico, la presión será positiva (empuja el agua fuera del sistema) o negativa (devuelve el agua a su posición inicial), tal que si el piezoeléctrico es alimentado constantemente con $-V_{cc}$ la presión será negativa hasta el instante donde sea interrumpido por un pulso de V_{cc} que genere una presión positiva, esta presión también depende del tiempo en el que el piezoeléctrico esté polarizado directamente, por lo cual, variar el tiempo de polarización directa variará la cantidad de presión aplicada. Esta alternancia de la polaridad de alimentación causa que el movimiento de desplazamiento del

piezoeléctrico sea del doble, al ir de un voltaje de alimentación con referencia negativa a una positiva, como consecuencia, el movimiento del material del piezoeléctrico a causa del suministro de voltaje se incrementa en comparación al que se obtendría polarizando el piezoeléctrico de una sola forma, con esto se consigue el máximo aprovechamiento del piezoeléctrico, por último, se modificó la distancia de los puntos de alimentación del piezoeléctrico (figura 3.4.1), incrementando su voltaje máximo de alimentación de 30 V a un valor aproximado de 100 V, esta modificación se observó en el trabajo “On-Demand Liquid Droplet Generation”, donde también utilizan un piezoeléctrico de disco como actuador para su sistema (Cornella, Hammerland, & Laabs, 2009), el cambio del voltaje máximo se justifica con la ecuación $V = LE$, donde “V” es el voltaje del piezo, “L” la distancia entre los electrodos y “E” es el campo eléctrico, se observa que si se aumenta la distancia entre los electrodos, aumenta la tensión (Uchino, 2003).

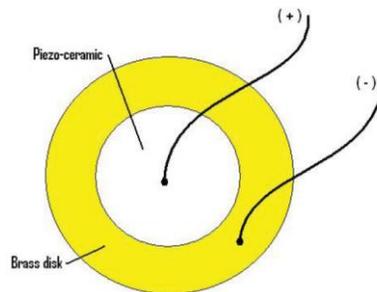


Figura 3.4.1 Puntos de alimentación del piezoeléctrico

3.5 Elección del circuito electrónico

Para realizar el control del piezoeléctrico se tiene que utilizar un circuito generador de pulsos con las especificaciones necesarias para que el piezoeléctrico pueda operar, las especificaciones son:

- Voltaje máximo de 60 V_{pp}.
- Tiempo de respuesta corto.
- Tiempo de pulso variable.

Se consideraron 3 opciones de generadores de pulsos para el sistema:

1. NE555.
2. Transistores de potencia TIP31C y TIP32C en arreglo de puente H + ATMEGA328P como controlador del circuito.
3. Relevador RAS 0510.

La primera comparativa es el voltaje máximo de operación para el piezoeléctrico, el cual es 60 V_{pp}, la comparación entre los tres componentes se puede observar en la tabla 3.5.1.

Tabla 3.5.1 Comparativa de voltaje máximo de operación

Componente	Voltaje máximo de operación
NE555	20 V
TIP31/32C en arreglo de puente H	100 V
Relevador RAS 0510	24 V – 10 A

Tanto el NE555, como el relevador RAS 0510 están limitados en voltaje de alimentación, sin embargo, el NE555 se podría utilizar como controlador del arreglo de puente H, ya que los transistores de potencia son capaces de soportar el voltaje requerido.

Para medir el tiempo de respuesta se utilizó un osciloscopio, en el caso del NE555, el tiempo de respuesta (rise time) es especificado por el fabricante (figura 3.5.1).

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
Output Voltage Drop (High)	I _{SOURCE} = 200 mA, V _{CC} = 15 V		12.5		V
	I _{SOURCE} = 100 mA, V _{CC} = 15 V	12.75	13.3		V
	V _{CC} = 5 V	2.75	3.3		V
Rise Time of Output			100		ns

Figura 3.5.1 Tiempo de respuesta del NE555

Se midió el tiempo de respuesta del relevador con respecto a un pulsador que lo acciona, para determinar el tiempo de retardo que existe debido a que la conmutación es mecánica y no electrónica, en la figura 3.5.2 se observa una captura de osciloscopio, la señal azul es la señal del pulsador, mientras que la señal morada es la terminal comúnmente abierta del relevador, se observa que existe un tiempo de retardo de 4.4 ms.

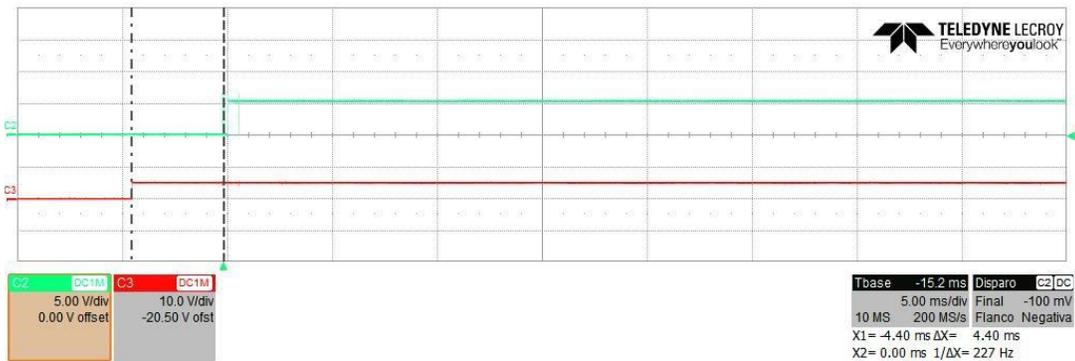


Figura 3.5.2 Tiempo de respuesta del relevador RAS 0510

Para el caso del puente H con transistores, se utilizó el microcontrolador ATMEGA328P para realizar las conmutaciones de ambas direcciones del flujo de la corriente, por lo que se muestra en la figura 3.5.3 la conmutación del puente H en conjunto con las señales de salida del microcontrolador en un tiempo de 200 μs/div (cabe aclarar que en el canal 1 del osciloscopio se utilizó una punta reductora con un factor de 10) y en la figura 3.5.4, la respuesta de la salida del sistema.

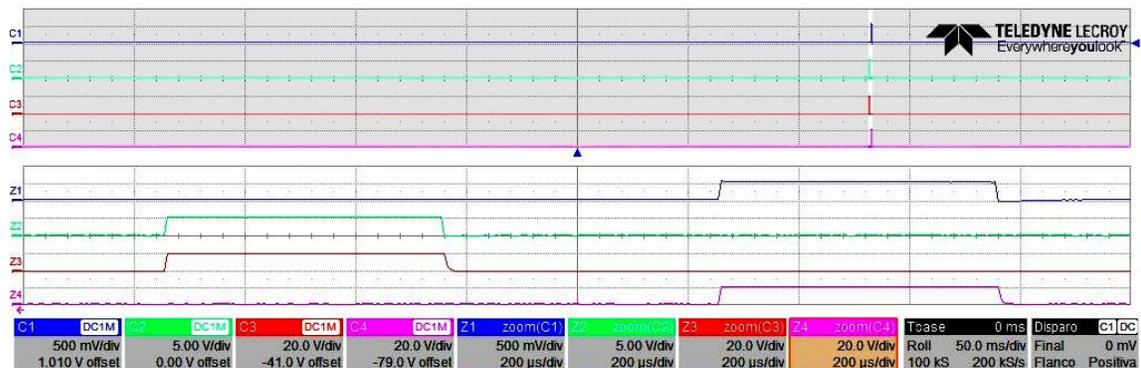


Figura 3.5.3 Tiempo de conmutación de los transistores de potencia + ATMEGA328P

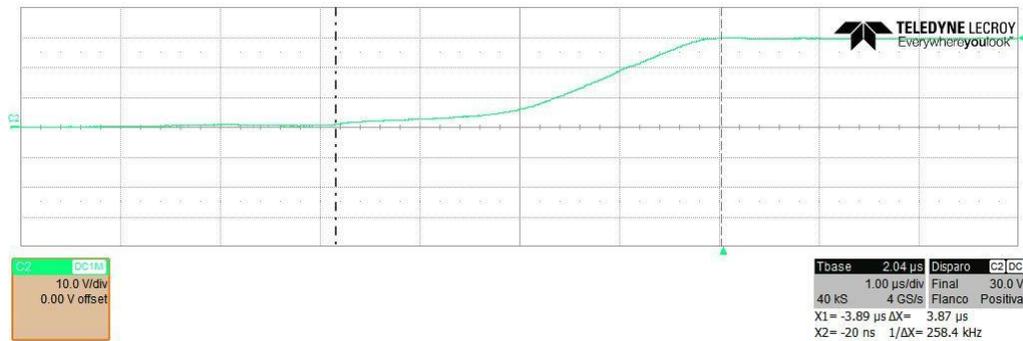


Figura 3.5.4 Tiempo de respuesta a la salida del sistema

Para el apartado de tiempo de respuesta, el NE555 es la mejor opción para la conmutación del piezoeléctrico, utilizando un puente H, también se observa que el arreglo de puente H con el ATMEGA328P tiene un tiempo de respuesta aceptable, ya que el retardo no es apreciable en una escala de milisegundos. Para el relevador, es evidente que el tiempo de respuesta es mucho mayor a los dos anteriores.

Por último, la variación del tiempo de pulso ayudará a manipular la presión ejercida por el piezoeléctrico, tener control sobre dicha variable simplificará la caracterización del sistema, por lo que se busca que la variación del tiempo sea lo más precisa posible.

Para variar el tiempo del pulso en el NE555, es necesario manipular los valores de resistencia y capacitancia, esto tiene como consecuencia una baja precisión debido a la tolerancia de los componentes y al comportamiento no lineal de los componentes variables, además que, para conocer el tiempo del pulso, es necesario que el usuario realice operaciones de constantes de tiempo de carga del capacitor.

Si se utilizan los transistores de potencia TIP31/32C + ATMEGA328P, la variación del tiempo de pulso se puede realizar por medio de líneas de código, teniendo un error de 62.9 ns, tiempo en el que el microcontrolador realiza la ejecución de las instrucciones en el código, utilizando un cristal oscilador externo de 16 MHz, además, se le puede dar a conocer al usuario la duración del tiempo de pulso utilizando un LCD para mostrar los datos en tiempo real. El uso del relevador RAS 0510 se descarta debido al retardo en su respuesta.

Con la comparativa anterior, se determinó que la mejor opción para el sistema es utilizar los transistores de potencia TIP31/32C en arreglo de puente H, controlado con un ATMEGA328P.

3.6 Circuito electrónico

El circuito electrónico se compone de 3 secciones: puente H, fuente de alimentación (variable y de 5 V) y un microcontrolador con un LCD para la visualización de las variables, junto con push - botton para la interfaz con el usuario.

El puente H es un arreglo de transistores que permite controlar el sentido de flujo de la corriente en una carga a partir de la conmutación de uno de los dos transistores de control, que a su vez conmutan a otros transistores, cerrando el circuito y permitiendo el flujo de corriente en un sentido específico, este circuito es comúnmente utilizado para controlar la dirección de giro motores de DC.

Se diseñó una fuente de voltaje variable capaz de suplir desde 10 hasta 60 V, utilizando un transformador de 48 V a 1 A, un puente rectificador, capacitores de filtraje, un arreglo de resistencias para limitar la corriente y un potenciómetro que permitirá la manipulación del voltaje de la fuente, junto con un segundo capacitor para filtrar el ruido eléctrico de alta frecuencia. El diseño de la fuente consiste en obtener el voltaje máximo que puede otorgar el transformador, para lo cual se utiliza la ecuación 3.6.1.

$$V_{\max} = (48V)(\sqrt{2})$$
$$V_{\max} = 67.8822V$$

Ecuación 3.6.1 Voltaje máximo que otorga el transformador

Posteriormente, al voltaje máximo se le resta la caída de tensión del puente rectificador de diodos, empleando la ecuación 3.6.2.

$$V = 67.8822V - 2(1.10V)$$
$$V = 65.6822V$$

Ecuación 3.6.2 Voltaje rectificado

Con la ecuación 3.6.3, se calcula el valor del capacitor para la etapa de filtrado, eligiendo un valor de rizo del 7% para evitar grandes variaciones de voltaje y conservar la estabilidad en la salida.

$$C = \frac{(5)(1A)}{(120Hz)(65.6822V)}$$

$$C = 684.3677 \mu F \rightarrow 10\% \text{ de rizo}$$

$$C_f = (684.3677 \mu F) * 1.4 = 888.1147 \mu F \rightarrow 7\% \text{ de rizo}$$

Ecuación 3.6.3 Capacitor de filtraje

Finalmente, el voltaje es regulado utilizando un divisor de tensión, el cual varía con un potenciómetro; cabe destacar que es posible implementar este diseño de fuente por el poco consumo de corriente del sistema (2 μA), no se recomienda utilizar un potenciómetro si el consumo la potencia del potenciómetro es mayor a 250 mW, para este caso, la potencia máxima que consume el potenciómetro es 120 μW .

De la misma manera se diseñó una fuente de alimentación de 5 V para el microcontrolador y el LCD, para lo cual se utilizó un transformador de 6.5 V a 500 mA y se realizaron los cálculos correspondientes, la ecuación 3.6.4 muestra el voltaje máximo que puede otorgar este transformador.

$$V_{\max} = (6.5V)(\sqrt{2})$$

$$V_{\max} = 9.1923V$$

Ecuación 3.6.4 Voltaje máximo del transformador de 6.5v

Se toma en cuenta la caída de tensión debido al puente rectificador para conocer el valor del voltaje rectificado (ecuación 3.6.5).

$$V = 9.1923V - 2(1.10V)$$

$$V = 6.9923V$$

Ecuación 3.6.5 Voltaje rectificado

Para calcular el capacitor de filtraje después de la rectificación se utiliza la ecuación 3.6.6, para un rizo del 7% y limitando la corriente a 100 mA.

$$C = \frac{(5)(100\text{ mA})}{(120\text{ Hz})(6.9923\text{ V})}$$

$$C = 595.8935\ \mu\text{F} \rightarrow 10\% \text{ de rizo}$$

$$C_f = (595.8935\ \mu\text{F}) * 1.4 = 834.2510\ \mu\text{F} \rightarrow 7\% \text{ de rizo}$$

Ecuación 3.6.6 Capacitor de filtraje para fuente de 5V

El voltaje se regula con un LM7805 para evitar que alguna variación de voltaje llegue al microcontrolador o al LCD y produzca algún daño.

Por último, el microcontrolador se encarga de controlar la conmutación de los transistores del puente H, así como de accionar la eyección de la gota por medio de un botón de disparo, además cuenta con una interfaz de usuario a través de un LCD, donde es posible seleccionar el ancho de pulso (tp) deseado para el puente H, por medio del uso de push-botton que permiten la navegación en el menú. El circuito del puente H con el microcontrolador y el LCD (simulados en el software Proteus 8), se puede observar en la figura 3.6.1.

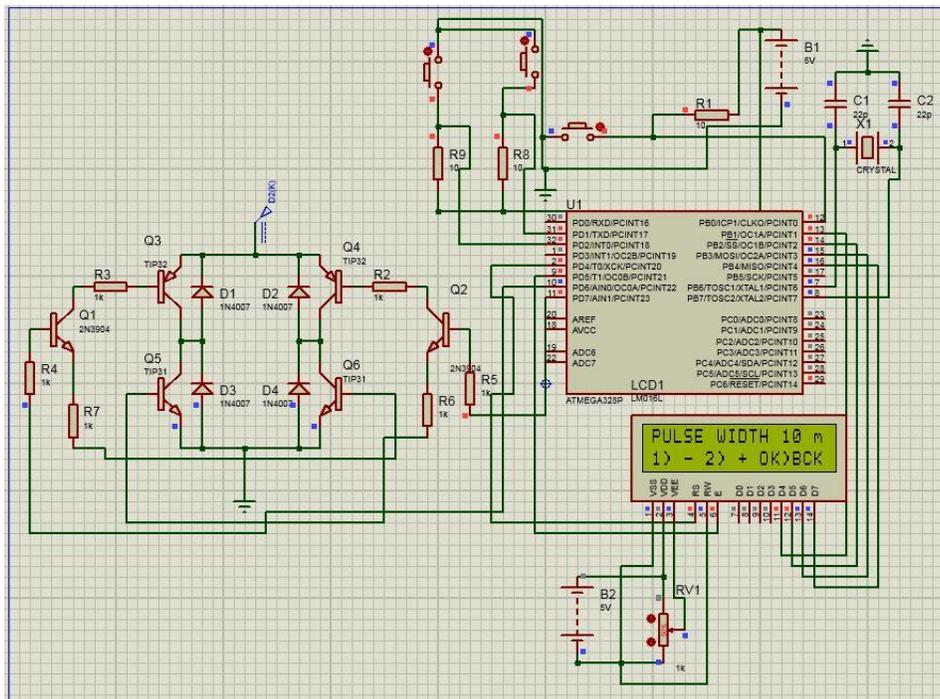


Figura 3.6.1 Simulación del puente H, microcontrolador y LCD

Así mismo, se realizó el diseño esquemático del puente H, la fuente variable, la fuente de 5V y la placa del LDC en el software Eagle (figura 3.6.2, 3.6.3 y 3.6.4, respectivamente), es importante aclarar que EAGLE no tiene disponible el microcontrolador ATMEGA328P, sin embargo, el MEGA8 es su circuito equivalente.

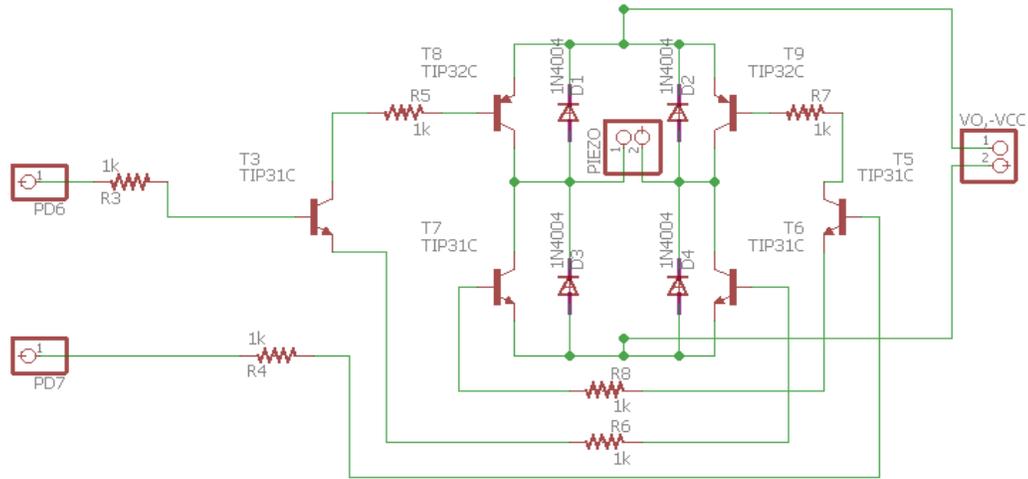


Figura 3.6.2 Esquemático del puente H

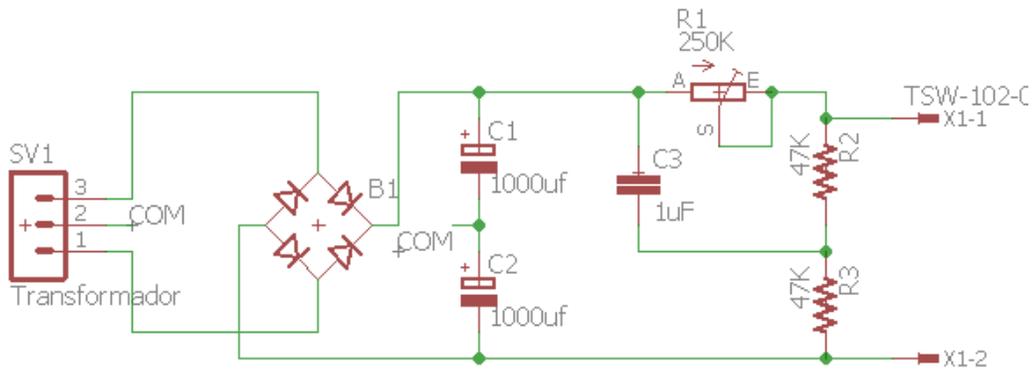


Figura 3.6.3 Esquemático de la fuente variable

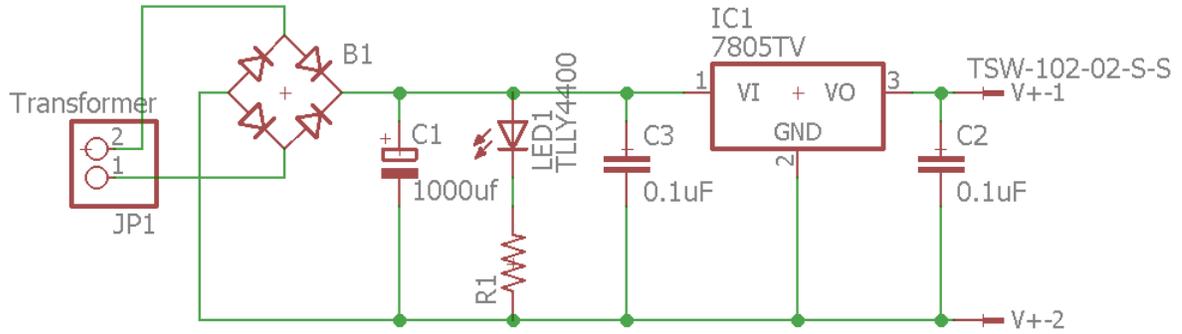


Figura 3.6.4 Esquemático de la fuente de 5V

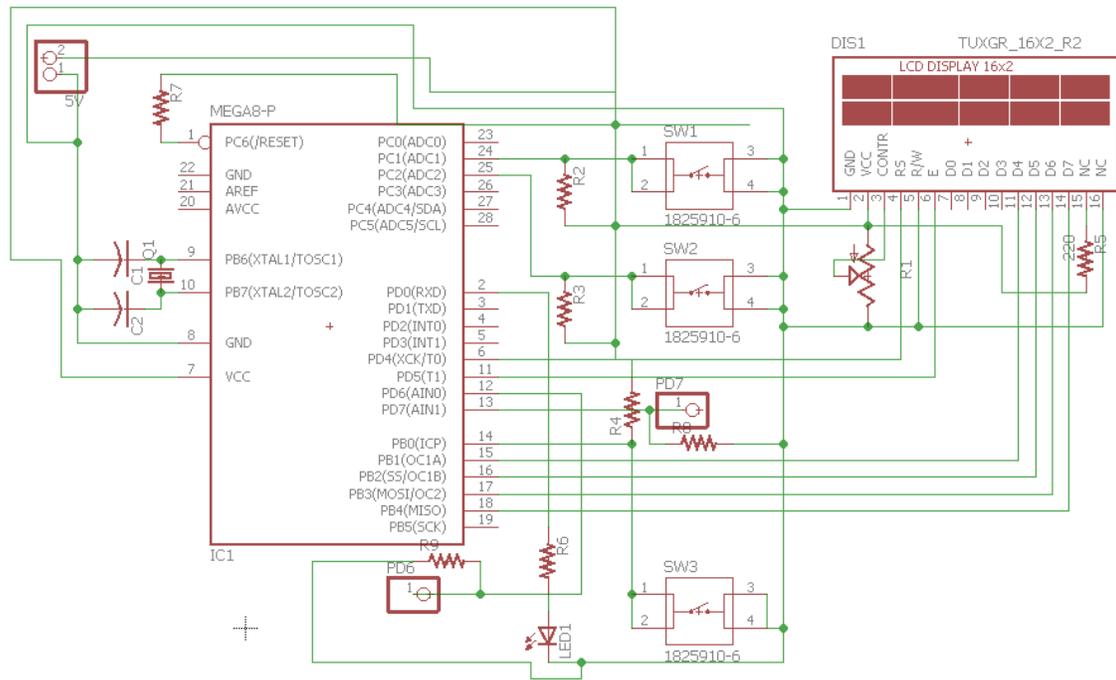


Figura 3.6.5 Esquemático del microcontrolador y LCD

Se elaboró el diseño del PCB de cada esquemático, la figura 3.6.6 muestra la fuente en PCB, así como la figura 3.6.7, 3.6.8 y 3.6.9 el diseño de la fuente de 5V, el puente H y el microcontrolador con el LCD, respectivamente.

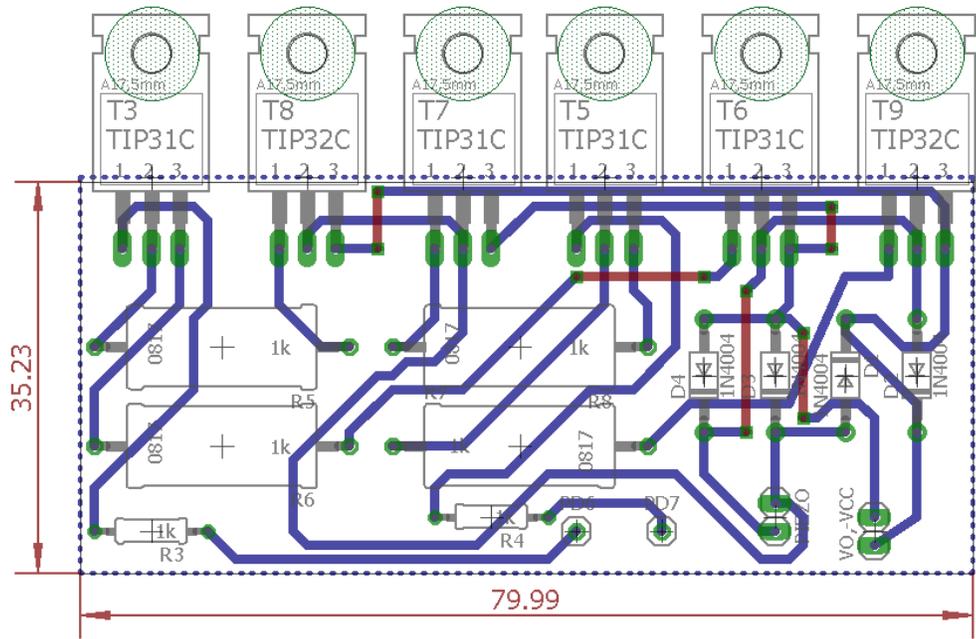


Figura 3.6.8 Diseño en PCB del puente H

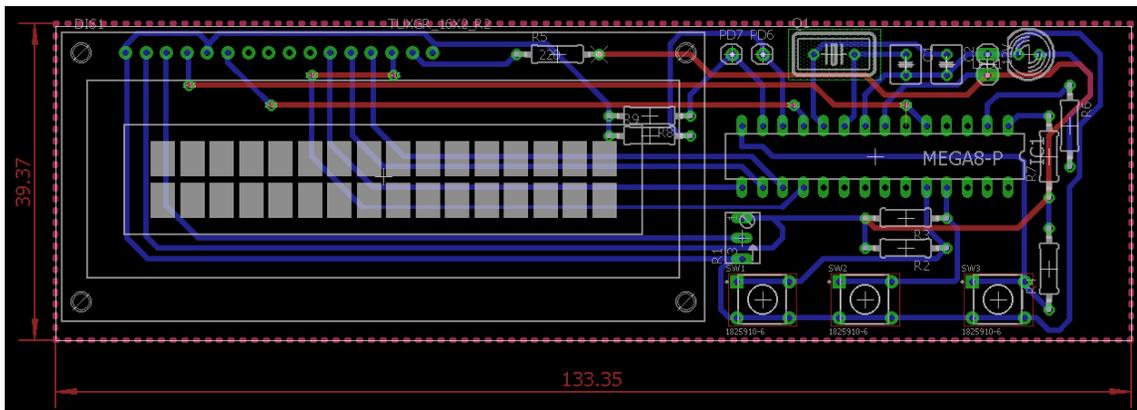


Figura 3.6.9 Diseño en PCB de la placa de control

3.7 Programación del microcontrolador

Se utilizó un microcontrolador ATMEGA328P (Pinout en figura 3.7.1) de la compañía ATMEL para generar las señales de control del puente H hacia el piezoeléctrico, que es el actuador del generador, así como de mostrar el menú para el LCD.

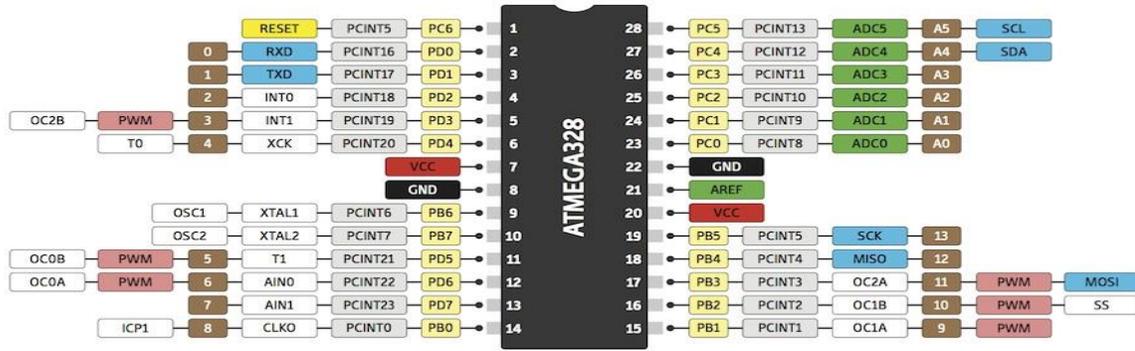


Figura 3.7.1 PINOUT ATMEGA328P

La gestión de las señales de control del piezoeléctrico se lleva a cabo de la siguiente manera: una señal continua de salida correspondiente al pin PD7 se coloca en estado alto (5 V), conmutando un transistor del puente H para polarizar inversamente al piezoeléctrico, de modo que este se encuentre contraído hacia afuera de la cámara. Esta señal permanecerá así hasta que el botón de eyección sea accionado, cambiando a un estado bajo (0 V) la señal del pin PD7 y haciendo que el pin de salida PD6 pase de estado bajo a alto por un tiempo de pulso (t_p), una vez cumplido este tiempo, el sistema vuelve a su condición inicial (PD6 en estado bajo y PD7 en estado alto). La señal de respuesta que es suministrada desde el puente H al piezoeléctrico se puede observar en la figura 3.7.2.

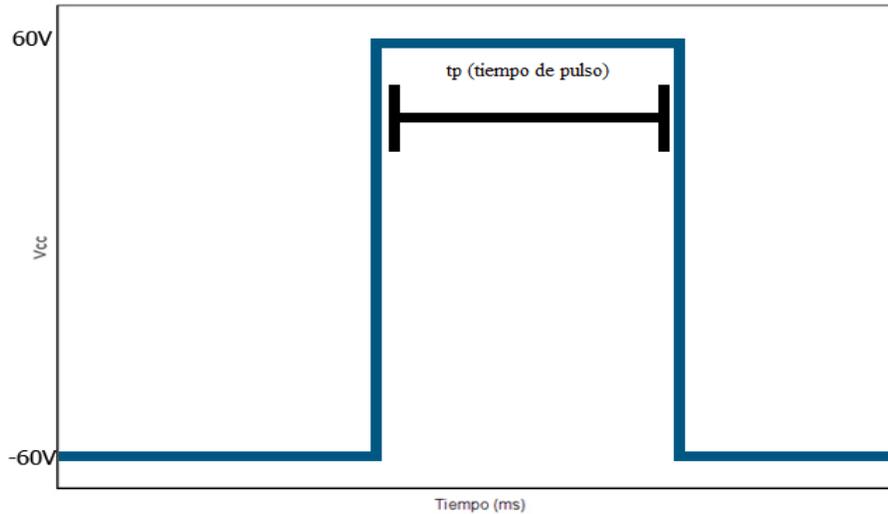


Figura 3.7.2 Señal de control del piezoeléctrico

El LCD se utiliza como interfaz de usuario, se muestra un menú principal con dos opciones “1) PULSE WIDTH” (figura 3.7.3) que es la sección correspondiente para cambiar el ancho de pulso (t_p) y “2) ACTION” (figura 3.7.4) para ir a la sección que permite eyectar la gota. Es posible variar el t_p desde 10 hasta 40 ms, rango que contempla todas las regiones de operación de todas las puntas de aguja.

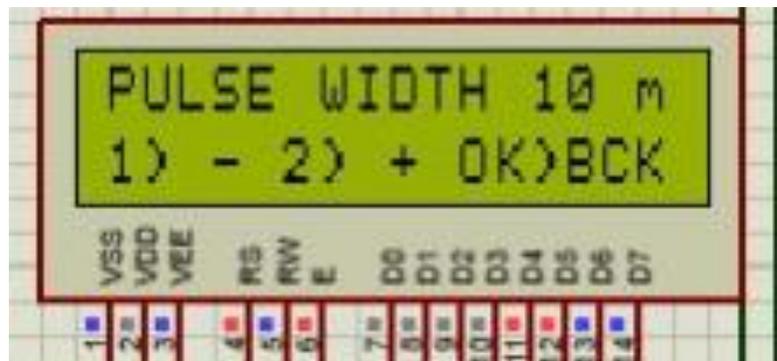


Figura 3.7.3 Menú "pulse width"



Figura 3.7.4 Menú "Action"

El microcontrolador funciona con un oscilador externo de 16MHz para incrementar la velocidad de instrucciones por ciclos y evitar retardos que puedan afectar al sistema, en especial al LCD, que está operando en modo de 4 bits, permitiendo su funcionamiento con menos pines, pero, empleando más tiempo para la ejecución de instrucciones. La programación se realizó en el software Atmel Studio 7.0 y se utilizó un UBSASP V2.0 para quemar el microcontrolador (código en Anexo I), así como el software Proteus 8 para su simulación.

3.8 Tratamiento y uso de las agujas de jeringas

La implementación de agujas como boquillas es una ventaja, ya que se evita el maquilado de una boquilla generalmente en acero, con diámetros pequeños, lo cual implica el uso de herramientas de precisión. Además, las agujas para jeringas se consiguen fácilmente, disponiendo de una amplia gama de distintos diámetros internos y externos medidos en gauge (G). Se asume que el tamaño de la gota es proporcional al diámetro interno y externo de la boquilla, comercialmente las puntas de las agujas están diseñadas con un ángulo que les permite perforar la superficie donde se busca dosificar un líquido. Para la aplicación que se necesita en el ICF, se modificó esta característica, desbastando la punta hasta que quede completamente plana, tal y como se observa en la figura 3.8.1.

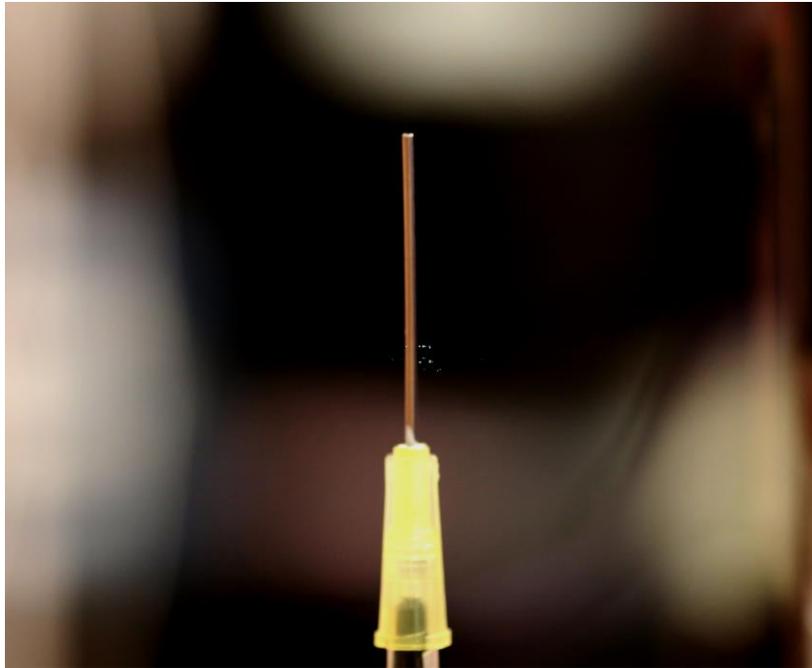


Figura 3.8.1 Aguja con punta desbastada

3.9 Funcionamiento del sistema

Para el correcto funcionamiento del sistema, primero es necesario asegurarse que no exista alguna burbuja de aire dentro del mismo. El proceso de sustracción del aire se denomina purgamiento. Una vez purgado el sistema, se busca un punto de equilibrio entre la altura del reservorio y la cámara del fluido, utilizando la placa trasnacional, si la altura es mayor que la que establece el rango (que cambia en función a la aguja que se utilice), el agua comenzará a gotear de la aguja. Si la diferencia de alturas es grande, el agua no saldrá, por lo que se debe operar en un punto donde se logre observar un menisco en la punta de la aguja.

Cuando el sistema se acciona, la presión positiva ejercida por el piezoeléctrico empuja al agua hacia todas las direcciones de la cámara, saliendo de la aguja. El retorno del piezoeléctrico a su posición original genera el rompimiento de la gota, consecuencia de la succión causada por la presión negativa (ver figura 3.9.1).

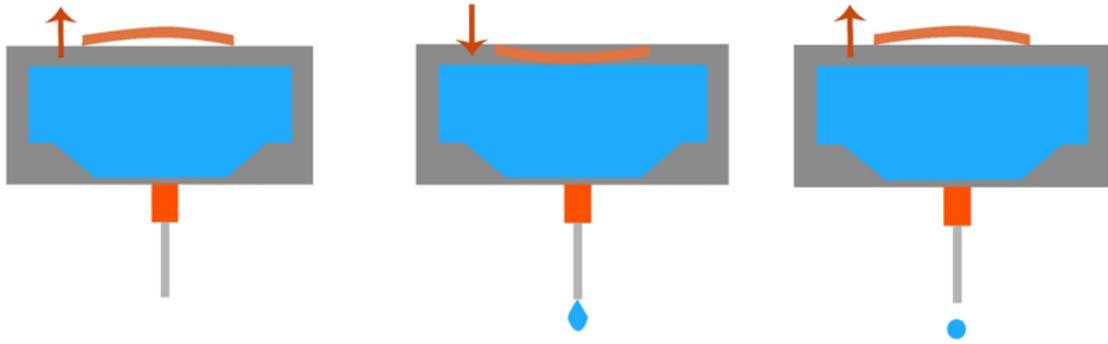


Figura 3.9.1 Funcionamiento del sistema

Si el proceso de purgamiento no fue bien ejecutado existirán burbujas de aire en el sistema (ya sea en la cámara o en las mangueras), el desempeño del piezoeléctrico se verá afectado, debido a que el aire es un fluido difícil de comprimir, lo cual amortiguará la presión ejercida por el piezoeléctrico.

3.10 Diagrama de procesos del sistema.

El funcionamiento completo del sistema se puede observar en el siguiente algoritmo (figura 3.10.1).

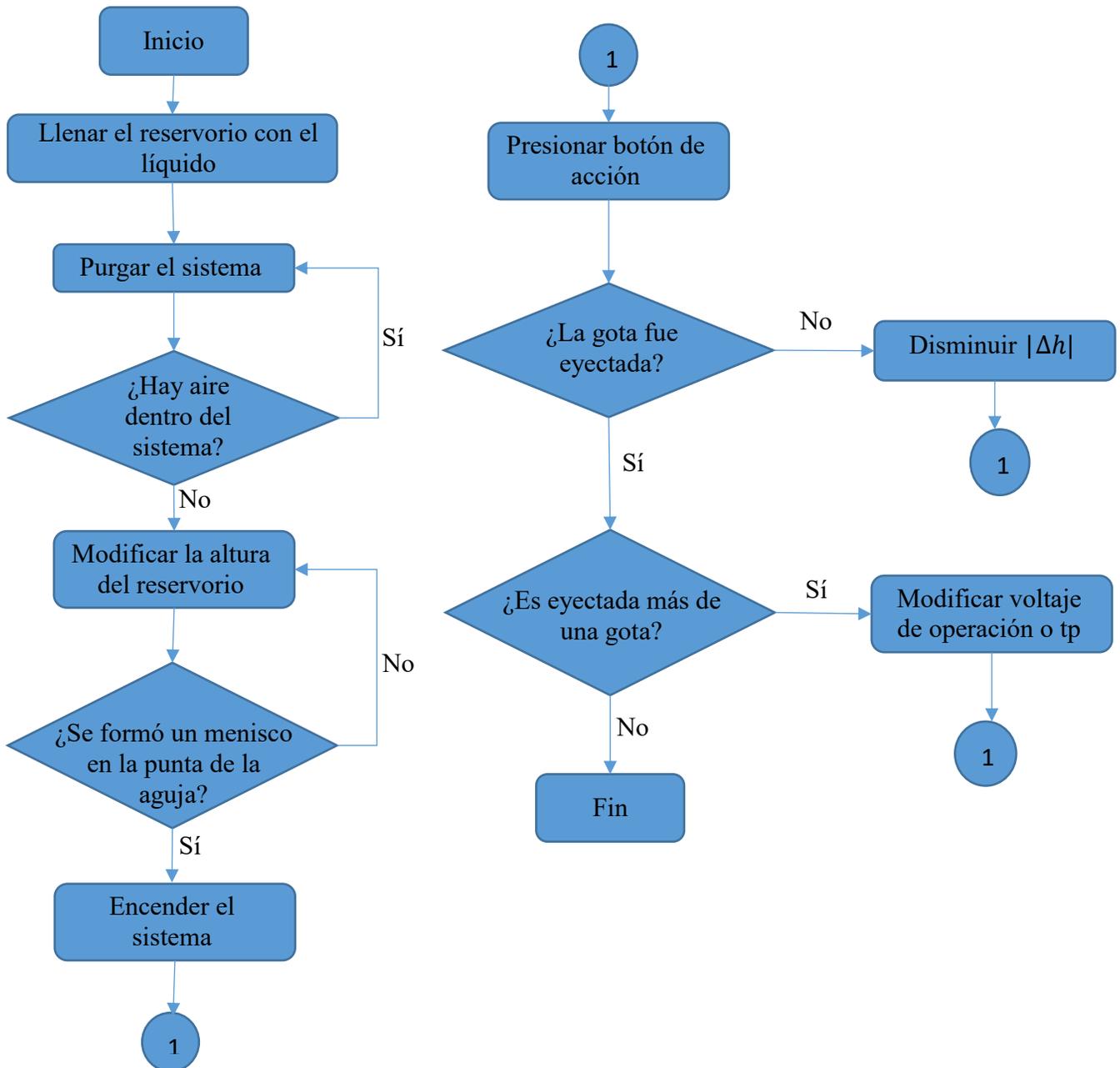


Figura 3.10.1 Algoritmo de funcionamiento del sistema

3.11 Arreglo experimental

Se montó un arreglo experimental para la caracterización de las gotas generadas con el sistema, utilizando distintas agujas. El arreglo experimental consiste en el generador de gotas, una cámara CANON EOS6D para tomar fotos a las gotas y determinar su tamaño en base al número de pixeles y tomando como punto de referencia de medición el valor de un pixel empleando un lente macro con un factor de amplificación 1:1. Un flash que excita al sensor de la cámara para capturar la imagen de la gota eyectada y un difusor que funcionará como pantalla que permitirá observar la gota a contraluz. Para que la cámara logre capturar de forma nítida a la gota en algún punto del recorrido desde la punta hasta la base, el flash debe tener una duración de milisegundos y dispararse después de que la gota haya sido eyectada. Es decir, se debe sincronizar la ventana de adquisición de la cámara, la eyección de la gota y el disparo del flash.

Debido al modelo de la cámara no fue posible utilizar algún software que permita la sincronización de las tres variables, por lo que se configuró su tiempo de disparo en 1.3 s, es decir, el obturador de la cámara abre durante 1.3 segundos. En dicho intervalo se debe accionar el generador y el flash.

Para el flash se empleó un LED de potencia accionado por un pulso de 25 μ s desde una salida digital de Arduino, que a su vez responde al pulso de acción por el microcontrolador del generador. El flash es activado por medio de un transistor en configuración de switch, el circuito electrónico se puede observar en la figura 3.11.1, el tiempo de retardo entre la acción del generador y el flash es de 140 ms y fue encontrado de forma experimental.

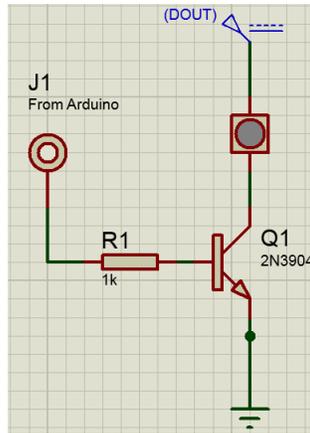


Figura 3.11.1 Circuito para el flash

El arreglo experimental montado se puede observar en la figura 3.11.2, se recomienda aislar toda la luz posible para obtener un mejor contraste entre la luz del difusor y la gota (para este experimento se utilizó una caja).

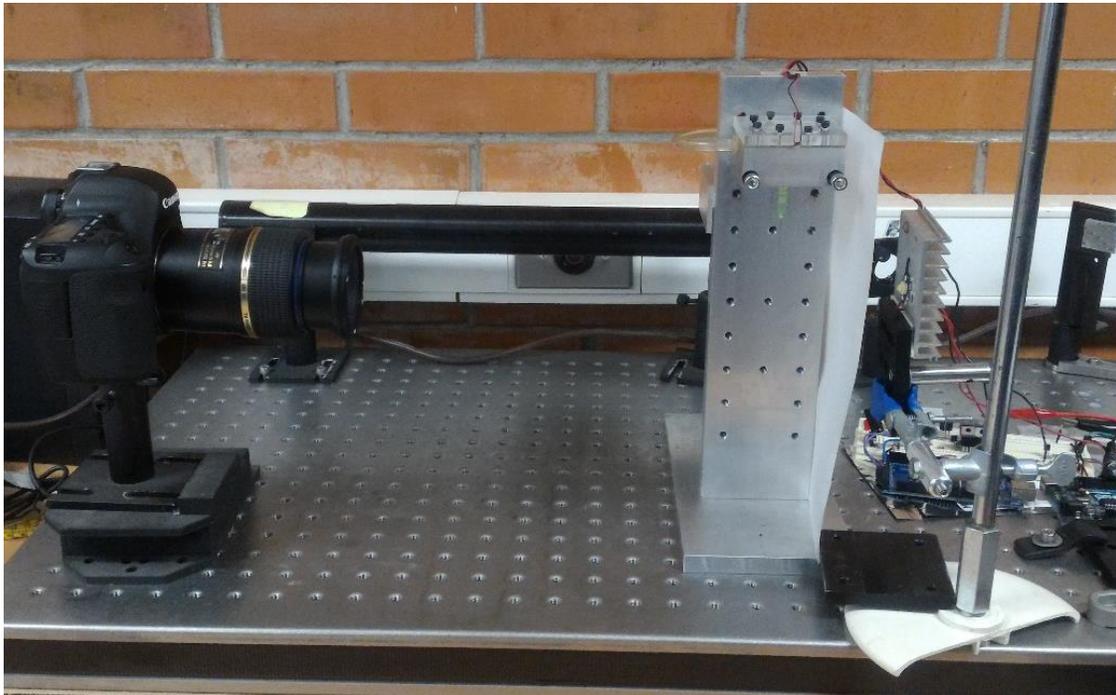


Figura 3.11.2 Arreglo experimental

Una vez montado el arreglo experimental se procedió a realizar pruebas para verificar el funcionamiento del sistema y hacer mediciones.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Pruebas del dispositivo

Para realizar las pruebas del dispositivo se empleó el arreglo experimental descrito en el capítulo 3. El objetivo fue tomar una foto de la gota en el aire, milisegundos después de que esta haya sido eyectada del generador. En pruebas preliminares a las que reportamos en la siguiente sección se encontró el agua se energizaba con el mismo voltaje del piezoeléctrico, ya que ambos se encontraban en contacto directo; como consecuencia, el desempeño del movimiento del piezoeléctrico fue afectado. Por esta razón el piezoeléctrico fue aislado eléctricamente. Se contemplaron varias alternativas para el aislamiento del piezoeléctrico, tales como: pintura dieléctrica, cinta de aislar, cinta de asilar líquida y papel contact, siendo este último el que tuvo menos efectos negativos en el desempeño del sistema.

Se tomaron 40 fotos de cada condición de voltaje y t_p para las tres agujas y así, observar las variaciones que el sistema presenta, con esto se lograron determinar los parámetros de trabajo más óptimos de cada aguja. La cámara se colocó a una distancia de 43 cm con respecto al sistema, la apertura de la cámara se configuró en F5, el ISO en 1000 y el obturador fue configurado para abrirse 1.3 s, intervalo en el cual debió ser accionado el piezoeléctrico para generar la gota y 140 ms después activar el flash para capturar la imagen, el diagrama de tiempos se puede observar en la figura 4.1.1 (código de Arduino en anexo II).

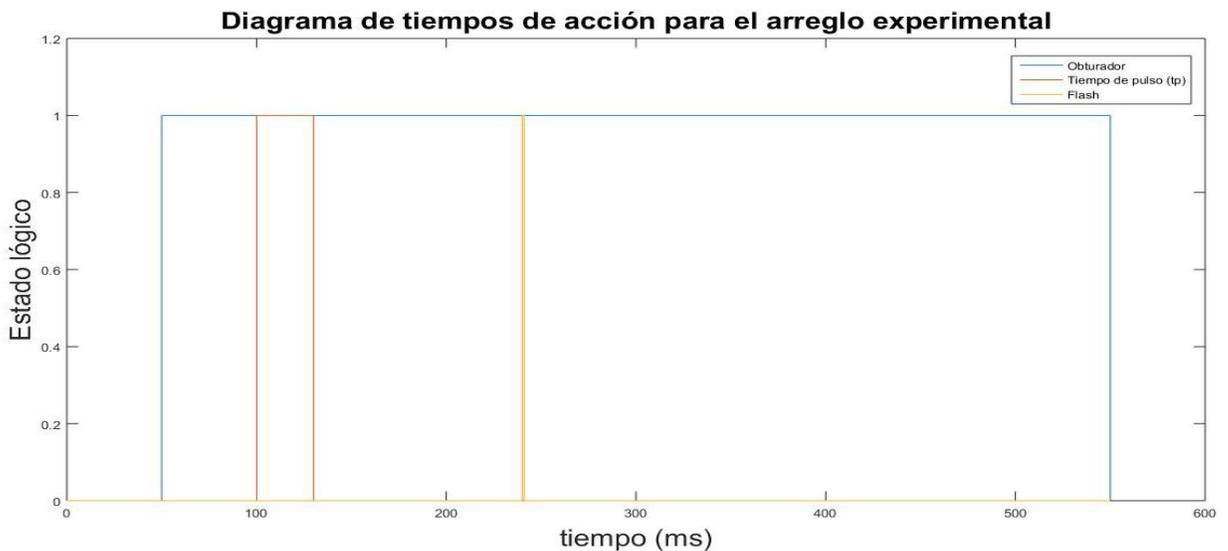


Figura 4.1.1 Diagrama de tiempos para el arreglo experimental

Para obtener mejores resultados en la calidad de las fotos, se aisló el sistema con el objetivo de obstruir la luz exterior, para que la luz del flash pudiera dispersarse en el difusor eficientemente, causando un contraste entre la gota y el difusor; de esta forma se distinguen claramente los pixeles que conforman las gotas y los que pertenecen al fondo, como se aprecia en la figura 4.1.2, donde se puede observar la gota eyectada en el centro, siendo de suma importancia que la luz del flash realice un buen contraste entre la gota y el fondo para su correcta cuantificación.



Figura 4.1.2 Foto de gota eyectada

4.2 Mediciones de las gotas

Para realizar las mediciones de las gotas, se utilizó como referencia el tamaño de un pixel utilizando un lente macro, con un factor de amplificación 1:1, por lo que cada pixel mide 6.5 μm . Haciendo uso de un software desarrollado en Matlab se procesa digitalmente la imagen para cuantificar la cantidad de pixeles que conforman la gota y así, determinar su diámetro. Al final del proceso, el programa guarda los datos en un archivo “.dat”. Para la implementación del software, primero se define el área donde se va a llevar a cabo el análisis de la imagen (figura 4.2.1), después, el programa realiza la conversión a imagen binaria para realizar la cuantificación, el usuario puede modificar el contraste para ajustar la precisión de la cuantificación (figura 4.2.2), mostrando el contorno externo del círculo con color ajustable. Por último, el software realiza la medición de cada imagen, presentando una gráfica de los tamaños en pixeles de cada foto (figura 4.2.3), después, el usuario puede guardar los datos.

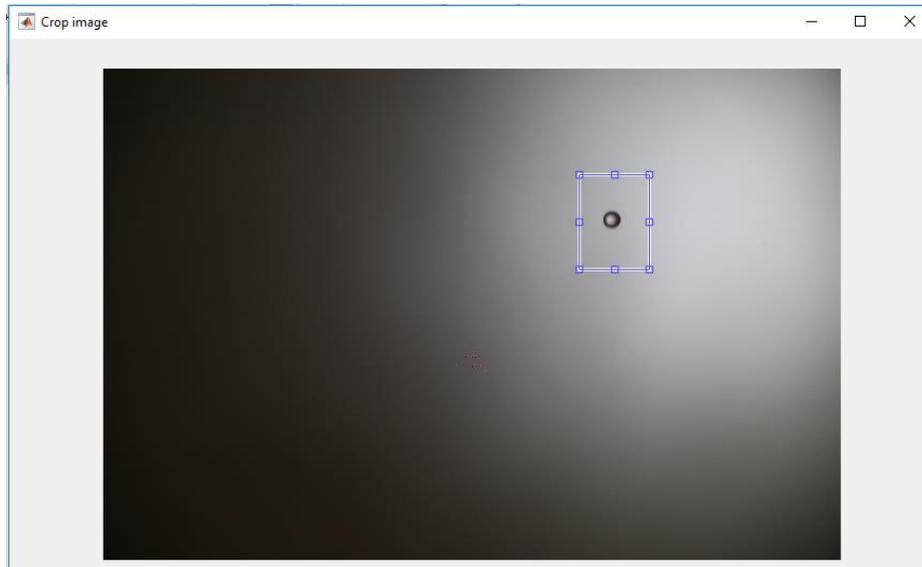


Figura 4.2.1 Selección del área de procesamiento de imagen

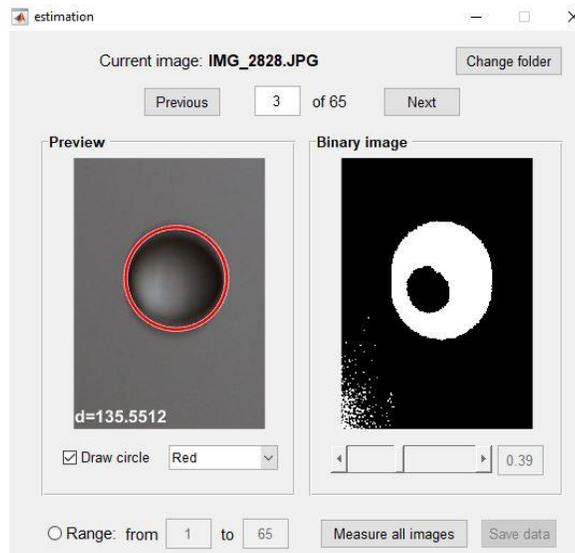


Figura 4.2.2 Selección del contraste

El programa estima el diámetro de la gota a partir del área de la imagen analizada, computándola como $diámetro = \sqrt{(4 * \text{área}/\pi)}$, obteniendo el valor en pixeles (MathWorks, 2006).

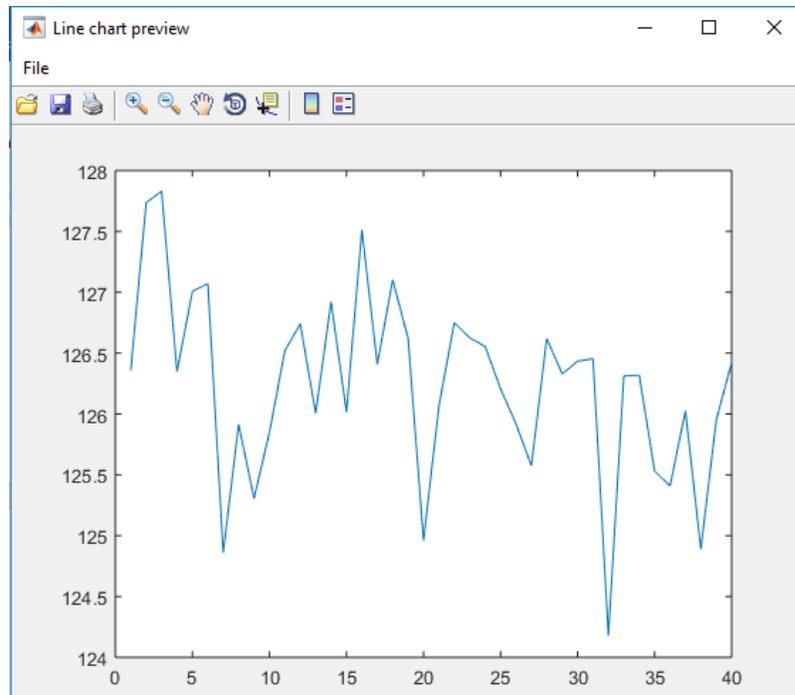


Figura 4.2.3 Gráfica de tamaño de la gota en pixeles para cada foto

Para la adquisición de los datos se tomó en cuenta que solo estuviese presente una gota en la foto, discriminando los parámetros donde no salían gotas de la aguja, se eyectaba más de una gota (figura 4.2.4) o existían satélites, es decir, una gota acompañada por otra gota de menor tamaño (figura 4.2.5).

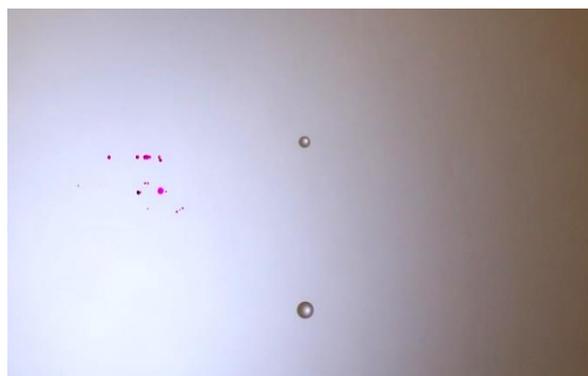


Figura 4.2.4 Gotas eyectadas con un solo pulso

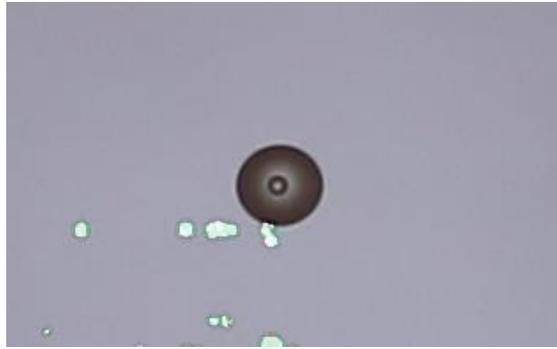


Figura 4.2.5 Gota acompañada de un satélite

Se ingresaron los archivos “.dat” a Matlab y realizó la conversión de pixeles a milímetros en código, por medio del producto del número de pixeles y 6.5×10^{-6} m/pixel (tamaño en metros que equivale cada pixel). Una vez obtenidos los tamaños de las gotas en milímetros, se calculó su media y su desviación estándar para cada condición de operación. Posteriormente se calcularon las barras de error de las mediciones (el código para el cálculo de las barras de error realizado en Matlab se puede consultar en el anexo III).

Las barras de error ayudan a determinar qué tan confiables son los datos obtenidos a partir de la longitud de las barras, una longitud grande implica que los datos son poco confiables, por el contrario, una longitud pequeña quiere decir que los datos son sumamente confiables, para obtener la longitud de las barras se utiliza la desviación estándar. Se realizó el análisis de las barras de error correspondientes a cada aguja de acuerdo con las condiciones de voltaje de operación.

4.3 Análisis de resultados

4.3.1 Punta 21G

Para la punta de calibre 21G, con un diámetro externo de $819.2 \mu\text{m}$ y un diámetro interno de $514 \mu\text{m}$, se realizaron pruebas para un pulso con una amplitud de voltaje de 50 V, 55 V y 60 V y se realizó un gráfico el tamaño de la gota en función al ancho de pulso (t_p), obteniendo los siguientes resultados:

En la tabla 4.3.1 se encuentran los datos obtenidos para cada t_p y amplitud de voltaje en el que se eyectan gotas individuales. Se observa como la media del tamaño de las gotas disminuye cuando el ancho del pulso aumenta, de la misma manera, cuando el voltaje aumenta. La desviación en los tamaños de las gotas también decreció cuando el ancho de pulso aumentó, de manera que el tamaño de las gotas se reduce cuando el t_p aumenta. Para valores fuera de los rangos reportados en la tabla no se eyectan gotas individuales, sino dos o más gotas, o satélites

Tabla 4.3.1 Datos de la punta 21G

V	50V			55V				60V			
t_p (ms)	13	14	15	18	19	20	21	15	16	17	18
Media (mm)	1.41	1.37	1.32	1.46	1.32	1.34	1.31	1.37	1.30	1.23	1.24
σ (μm)	26.94	15.98	5.32	26.45	33.45	23.18	17.01	10.44	15.33	14.32	16.57

La desviación de tamaños más grande es de 33.45 μm con un pulso de 55 V y t_p de 19 ms, mientras que la desviación más pequeña fue en 60 V para un t_p de 15 ms, por lo que la gota más pequeña que se puede obtener para la aguja de 21G es de 1.37 mm \pm 10.44 μm . En la figura 4.3.1 se muestra el gráfico de los promedios de los diámetros de las gotas en el eje “y” y el ancho temporal de pulso en el eje “x”. Para cada promedio del diámetro de las gotas se muestra su barra de error correspondiente.

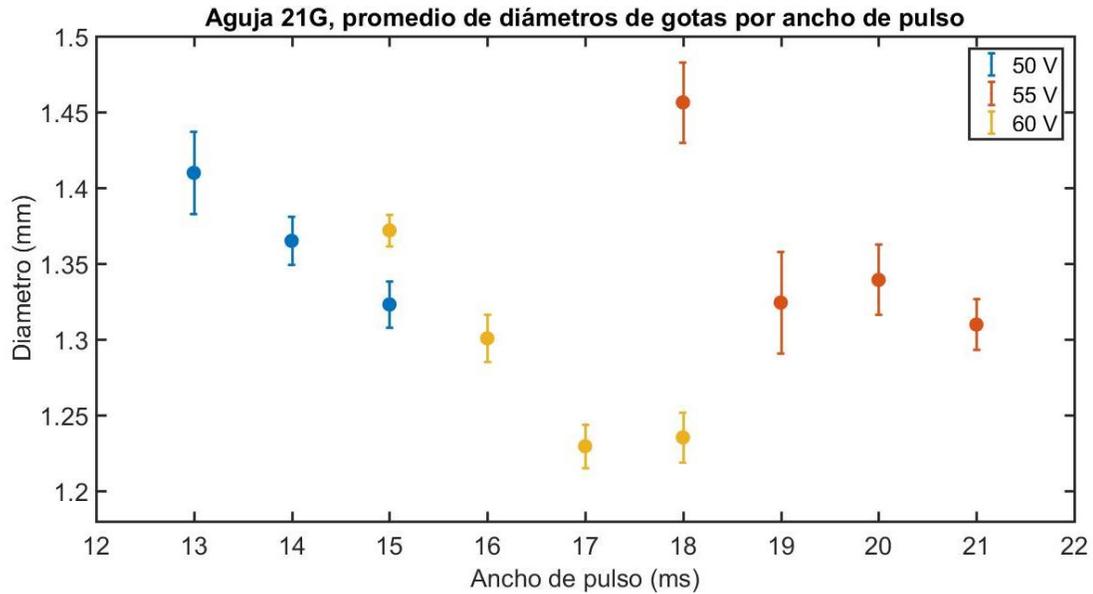


Figura 4.3.1 Gráfica de diámetros de gotas contra anchos temporales de pulso para la punta 21G

4.3.2 Punta 22G

La punta de 22G tiene un diámetro externo de 717.6 μm e interno de 413 μm , para este caso se realizaron pruebas para pulsos con una amplitud de 55 V y 60 V, que son las dos amplitudes de voltaje donde el sistema es capaz de eyectar una gota.

En la tabla 4.3.2 se muestran los datos del promedio de los diámetros de las gotas, junto con la desviación de los datos. Nuevamente el tamaño de las gotas tiende ser menor cuando el ancho del pulso (t_p) aumenta.

Tabla 4.3.2 Datos de la punta 22G

Voltaje	55V			60V	
	t_p (ms)	16	17	18	14
Media (mm)	1.16	1.15	1.09	1.17	1.09
σ (μm)	13.73	16.94	14.93	20.32	23.91

En la tabla anterior se observa que ambas condiciones de voltaje son capaces de generar el diámetro de gota más pequeño, de 1.09 mm, sin embargo, la diferencia se encuentra en la desviación en el tamaño de las gotas. Para pulsos con una amplitud de 55 V la gota más pequeña es de 1.09 mm \pm 14.93 μ m, mientras que en 60 V la gota más pequeña es de 1.09 mm \pm 23.91 μ m, por lo que utilizando el sistema con 55 V de amplitud en un tp de 18 ms se eyecta la gota más pequeña y con la menor desviación en su tamaño.

La gráfica de los promedios del diámetro de las gotas contra el ancho temporal del pulso del piezoeléctrico se puede observar en la figura 4.3.2, donde se muestra que el rango de las gotas que se pueden eyectar utilizando la aguja de 22G.

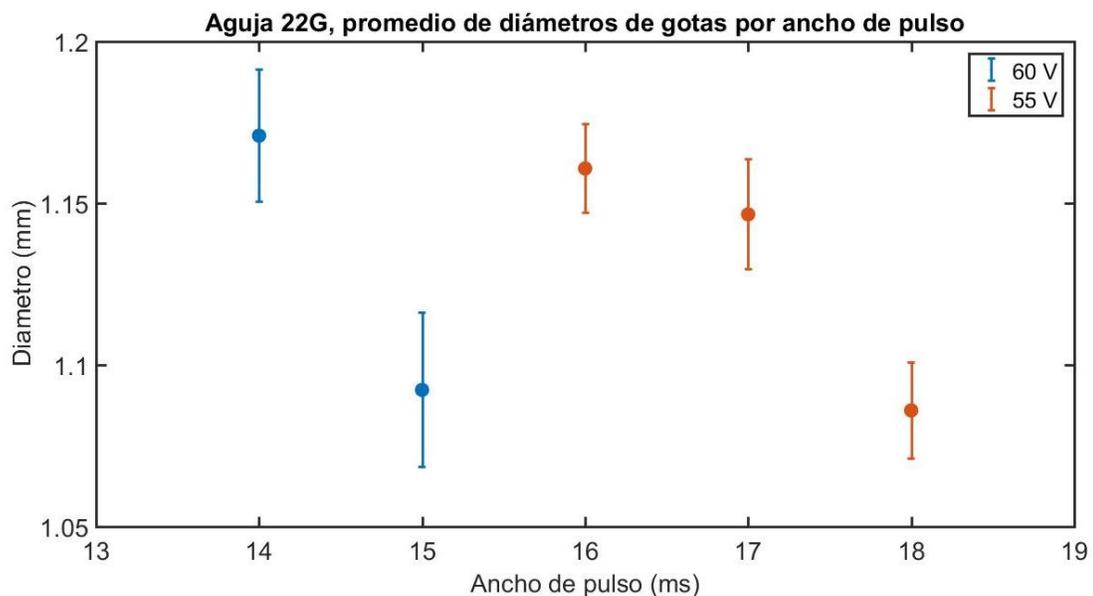


Figura 4.3.2 Gráfica de diámetros de gotas contra anchos temporales de pulso para la punta 22G

4.3.3 Puntas 23G

La punta de calibre 23G tiene un diámetro externo de 641.4 μ m y 337 μ m de diámetro interno, la punta solo es capaz de operar a un voltaje de 60 V. En la tabla 4.3.3 se observan los datos del promedio de las gotas y su desviación en los tamaños.

Se puede observar la misma tendencia a disminuir el tamaño de las gotas en función al aumento del ancho de pulso (t_p).

Tabla 4.3.3 Datos de la punta 23G

Voltaje	60V		
t_p (ms)	22	23	24
Media (μm)	856.72	828.86	809.17
σ (μm)	10.04	6.56	5.17

Con los datos obtenidos se realizó la gráfica del promedio de los tamaños del diámetro de las gotas contra el ancho temporal del pulso (figura 4.3.3), cada condición muestra sus barras de error correspondientes.

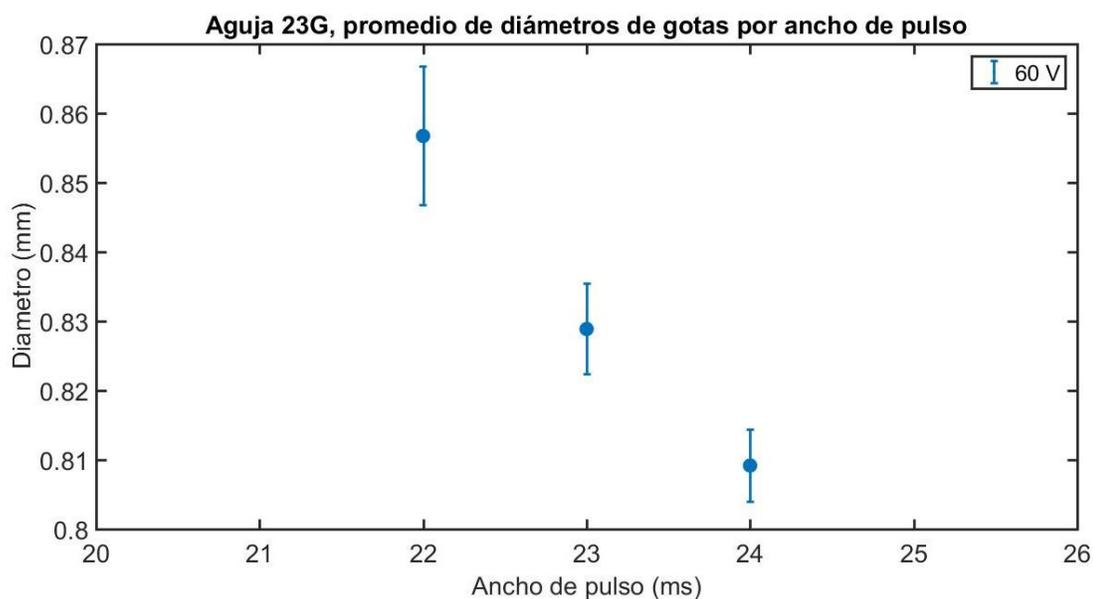


Figura 4.3.3 Gráfica de diámetros de gotas contra anchos temporales de pulso para la punta 23G

Nuevamente se puede observar en la Figura 4.3.3 una tendencia a disminuir el tamaño de las gotas en relación al aumento del t_p . El tamaño de las gotas disminuyó notablemente al de las eyectadas por las agujas de 21G y 22G, siendo menor a 900

μm . Las gotas más pequeñas eyectadas con la aguja de 23G son de $807.17 \mu\text{m} \pm 5.17 \mu\text{m}$.

4.4 Comparativa de desempeño del sistema.

Se realizó la comparación de las condiciones de amplitud de voltaje donde se obtuvieron los tamaños de gotas más pequeños para cada aguja. En la figura 4.4.1 se muestran las gráficas con los promedios de los tamaños de las gotas eyectadas por cada aguja, para un ancho de pulso específico, en donde se observa el cambio en el diámetro de las gotas cuando se cambia de calibre de aguja. Para la aguja 21G las gotas están en un rango de entre 1.2 - 1.4 mm, mientras que la aguja 22G puede eyectar gotas en un rango de 1.05 - 1.2 mm, por otro lado, la aguja 23G eyecta gotas con un diámetro de entre 800 - 860 μm . Fue posible determinar que la condición donde se obtiene la gota más pequeña con una desviación insignificante es con la aguja 23G, utilizando pulsos con amplitud de 60 V y un t_p de 24 ms.

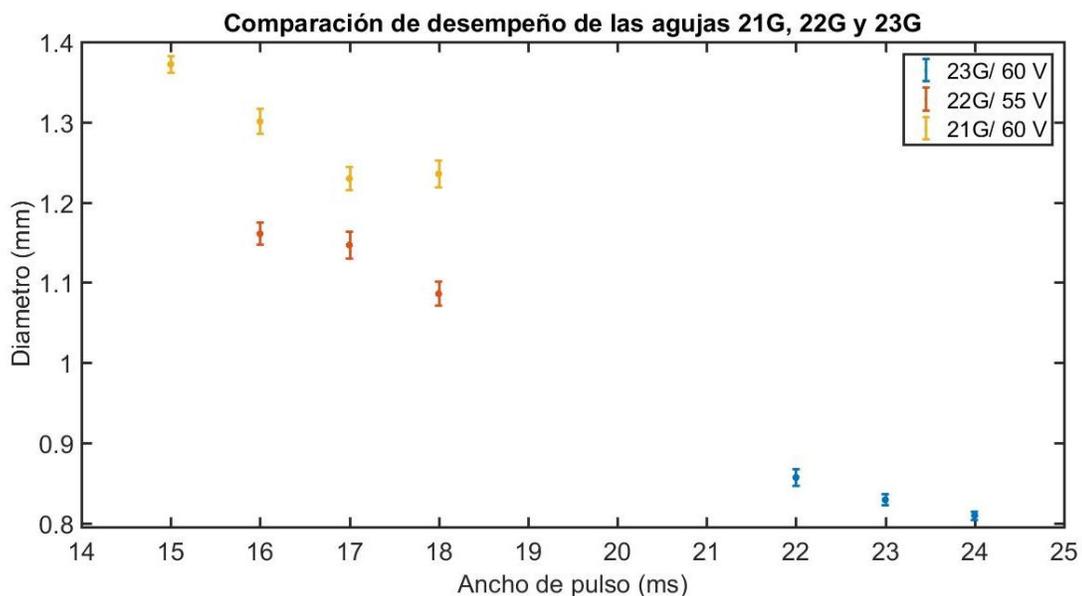


Figura 4.4.1 Comparación de los diámetros de gotas más pequeños eyectados con todas las agujas

CAPÍTULO V:

CONCLUSIONES

5.1 Logro de objetivo

De acuerdo con el objetivo general, establecido en el capítulo 2: se logró construir un sistema generador de gotas y caracterizar su comportamiento de acuerdo a los parámetros de operación establecidos en base a la experimentación. Acorde con el análisis de resultados en el capítulo 4, las desviaciones estándar en algunas zonas de operación son máximo de 33.45 μm para gotas de 1.32 mm, resultando en una desviación del 2.57 %. Para la gota más pequeña que se eyectó (809.17 μm), la desviación en el tamaño fue de 5.17 μm , dando como resultado una desviación de 0.63 %, por lo que se puede afirmar que sí hay mono-dispersión en el tamaño de las gotas.

En base a los objetivos específicos, el sistema fue capaz de generar gotas con todas las puntas utilizadas: 21G, 22G y 23G, además, se establecieron condiciones para que el sistema eyecte una gota cada que el usuario lo desee, sin gotas de más o satélites.

Fue posible observar que el diámetro de la gota generada se reducía si también lo hacía el diámetro de la aguja (es decir, aumentando el calibre), también se observa que la amplitud de voltaje de operación del piezoeléctrico es un factor que influye bastante en el rango del tamaño de las gotas. Además, se puede variar ligeramente el diámetro de la gota si se aumenta el ancho de pulso (t_p), ampliando el rango de los tamaños que se pueden obtener.

En el análisis de resultados se observó que el sistema presenta un comportamiento contrario a los sistemas generadores de gotas reportados en las fuentes bibliográficas. En estos sistemas, el diámetro de las gotas tiende a aumentar proporcionalmente con el ancho de pulso, obteniendo gráficas con una tendencia inversa a la presentada en este trabajo (Harris, Liu, & Bush, 2015). Los resultados podrían estar influenciados por la geometría de las agujas, su largo, la viscosidad del agua, así como su tensión superficial y la mojabilidad del material utilizado en las agujas.

5.2 Aportaciones

Las aportaciones al proyecto son:

- Utilizar agujas como boquillas en lugar de la boquilla especificada por el MIT, con esto se reduce el costo de maquinado, al ser más fáciles de conseguir, además, permite variar el tamaño de las gotas de una forma más sencilla, debido a que cada calibre de aguja tiene un rango de diámetros que es capaz de generar.
- Este proyecto ayuda a mejorar la técnica de LIBS, al tener gotas con mono-dispersión en tamaños ayudará a que los análisis de los espectros obtenidos de gotas de agua contaminada no tengan variaciones tan grandes, por lo que será más sencillo realizar un análisis cualitativo.

5.3 Trabajos futuros

En los trabajos futuros se encuentran los siguientes puntos:

- Acoplar el sistema generador de gotas con el levitador acústico y hacer levitar las gotas.
- Construir un sistema de traslación en el eje “y” para que la aguja no esté al alcance del pulso láser y este ablacione la aguja, contaminando los resultados obtenidos.
- Adaptar el diseño mecánico para su aplicación en espectroscopia atómica de líquidos.
- Analizar por qué se obtiene un comportamiento contrario al que establece la bibliografía.

Referencias Bibliográficas

- Abdalla, W., Buckley, J., Carnegie, A., Edwards, J., Herold, B., Fordham, E., . . . Ziauddin, M. (2007). <https://cnx.org/contents/WgINhlpX@3/Properties-of-Liquids>. Bahrain: Schlumberger.
- Ali Mazidi, M., Naimi, S., & Naimi, S. (2011). *THE AVR MICROCONTROLLER AND EMBEDDED SYSTEMS USING ASSEMBLY AND C*. New Jersey: PEARSON.
- Atmel Corporation. (November de 2016). *Microchip*. Obtenido de <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328p>
- Autodesk Inc. (2018). *Autodesk*. Obtenido de <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>
- Ayala, J. C. (2018). *Esoectroscopia de rompimiento inducido por laser en gotas acústicamente levitadas*. Cuernavaca, Morelos.
- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2009). *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. Mexico: PEARSON.
- Cornella, B., Hammerland, S., & Laabs, S. (2009). *On-Demand Liquid Droplet Generation*. Colorado: Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering.
- Cúpich Rodriguez, M., & Eliazondo Garza, F. (2000). *Actuadores piezoeléctricos*. Academia de Dinámica Aplicada del Departamento de Diseño Mecánico de la FIME.
- Harris, D. M., Liu, T., & Bush, J. W. (10 de Abril de 2015). *SpringerLink*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00348-015-1950-6>
- Harris, D., Liu, T., & Bush, J. (2015). *A low-cost, precise piezoelectric droplet-on-demand*. Springer Berlin Heidelberg.
- Instituto de Ciencias Físicas, UNAM. (2018). *Intituto de Ciencias Físicas*. Obtenido de <https://www.fis.unam.mx/laboratorios/42/laboratorio-de-optica-aplicada>
- Jang, D., Kim, D., & Moon, J. (2009). *Influence of Fluid Physical Properties on Ink-Jet Printability*. Washington DC: American Chemical Society.
- MathWorks. (2006). Obtenido de MathWorks: <https://la.mathworks.com/help/images/ref/regionprops.html>
- McKinley, G. H., & Renardy, M. (2011). *Wolfgang von Ohnesorge*. Massachusetts: American Institute of Physics (AIP).
- Mendoza, J. R. (2011). *Diseño y simulación de sistemas microcontrolados en lenguaje C*. Colombia.
- OpenStax. (7 de may de 2015). *cnx.org*. Obtenido de <https://cnx.org/contents/WgINhlpX@3/Properties-of-Liquids>

SHAMES, I. H. (1995). *MECÁNICA DE FLUIDOS*. Colombia: McGRAW-HILL.

Sigma -Aldrich. (12 de Marzo de 2012). *Sigma - Aldrich*. Obtenido de <https://www.sigmaaldrich.com/chemistry/stockroom-reagents/learning-center/technical-library/needle-gauge-chart.html>

Tai, J., Yap Gan, H., Nan Liang, Y., & Keng Lok, B. (2008). *Control of Droplet Formation in Inkjet Printing Using Ohnesorge Number*. Singapore: Singapore Institute of Manufacturing Technology.

Uchino, K. (2003). *Introduction to Piezoelectric Actuators and Transducers* . Pennsylvania: International Center for Actuators and Transducers.

Anexo I: Código del microcontrolador

```
* Generador de gotas.  
  
* Created: 26-Jul-18 2:04:09 PM  
  
* Author: Aaron  
  
*/  
  
#define F_CPU          16000000ul  
  
#include <avr/io.h>  
  
#include <util/delay.h>  
  
#include <inttypes.h>  
  
#include "lcd/lcd_lib.h"  
  
//#include <stdio.h>  
  
char bot1= 0, bot2=0, ok=0, n[100];  
  
int  a=0, b=0, num=10, c=1,d=1,i=0;  
  
int main(void)  
  
{  
  
  DDRD |= (0<<6) |(0<<7)|(0<<0)|(0<<4)|(0<<5); //6pulso positivo 7pulso negativo  
  Oled indicador 1bot1 2bot2 4RS lcd 5 Elcd  
  
  PORTD |= (0<<6) |(1<<7)|(0<<0)|(0<<4)|(0<<5);  
  
  DDRD |= (1<<1)|(1<<2);  
  
  PORTC |= (1<<1)|(1<<2); //botones  
  
  DDRB |= (1<<0)|(0<<1)|(0<<2)|(0<<3)|(0<<4);  
  
  PORTB |= (1<<0)|(0<<1)|(0<<2)|(0<<3)|(0<<4); ///botón y datos del LCD  
  
  LCDinit(); //inializa el lcd
```

```

LCDclr(); //limpiar lcd

while (1)

{PORTD=0b10000000; //PULSO NEGATIVO

    LCDGotoXY(0, 0); //UBICACIÓN DEL CURSOR

    printf("1) PULSE WIDTH");

    LCDGotoXY(0,1);

    printf("2) ACTION");

    bot1=(PINC & (1<<PC1)); //lectura de botones

    bot2=(PINC & (1<<PC2));

    _delay_ms(250);////////////////////////////////////150

    if(bot1==0){

        a=1; }

    if(bot2==0){

        a=2; }

    switch (a)

    {case 1:

        LCDclr(); //limpiar lcd

        LCDGotoXY(0, 0); //UBICACIÓN DEL CURSOR

        printf("PULSE WIDTH (ms)");

        _delay_ms(1500);//////////////////////////////////// 1500

        c=1;

        LCDclr();

        do {LCDGotoXY(0, 0); //UBICACIÓN DEL CURSOR

```

```
sprintf(n,"PULSE WIDTH %d ms",num);
```

```
printf(n);
```

```
    LCDGotoXY(0, 1);
```

```
    printf("1) - 2) + OK)BCK");
```

```
    bot1=(PINC & (1<<PC1)); //lectura de botones
```

```
    bot2=(PINC & (1<<PC2));
```

```
    ok=(PINB & (1<<PB0));
```

```
    _delay_ms(250);//////////////////// //para evitar
```

rebotes en la lectura

```
    //selección de numero
```

```
        if (bot1==0)
```

```
            {if (num==10)
```

```
                { num=40;
```

```
                }
```

```
                else{ num=num-1;
```

```
                }
```

```
            }
```

```
        if (bot2==0){if (num==40)
```

```
            {num=10;
```

```
            }
```

```
            else{num=num+1;
```

```
            } }
```

```
        if (ok==0) {c=0;
```

```

    }

} while (c==1);

//c=1;

LCDclr();

    break;

case 2:

c=1;

LCDclr(); //limpiar lcd

do {LCDGotoXY(0, 0); //UBICACIÓN DEL CURSOR

    printf("PRESS OK TO DROP");

    LCDGotoXY(0, 1); //UBICACIÓN DEL CURSOR

    printf("1) BACK");

_delay_ms(250);////////////////////////////////////150

    //Generación del pulso

    bot1=(PINC & (1<<PC1));

    ok=(PINB & (1<<PB0));

    if (ok==0) { PORTD=0b01000000; //PULSO POSITIVO

        for (i=0;i<=num;i++){_delay_ms(1);

        }

        PORTD=0b10000001; ///PULSO NEGATIVO CON LED

_delay_ms(1500);////////////////////////////////////

    }

    if (bot1==0) {c=0;

```

```

        }
    } while (c==1);

    LCDclr();

    break;

default:

    break;    }

}}

```

Anexo II: Código para sincronizar el flash con el disparo del sistema

```

int a;

void setup() {

    // put your setup code here, to run once:

    pinMode(6,OUTPUT);

    pinMode(13,INPUT);

}

void loop() {

    // put your main code here, to run repeatedly:

    a=digitalRead(13);

    if(a==LOW){

        delay(140);

        digitalWrite(6,HIGH);

        delayMicroseconds(25);

        digitalWrite(6,LOW);

        delay(2);}

```

```
}
```

Anexo III: Código para obtener las barras de error

```
%cargar archivos del tamaño de gotas
```

```
load 15ms.dat
```

```
load 16ms.dat
```

```
load 17ms.dat
```

```
load 18ms.dat
```

```
load 16ml.dat
```

```
load 17ml.dat
```

```
load 18ml.dat
```

```
load 22ms.dat
```

```
load 23ms.dat
```

```
load 24ms.dat
```

```
%%
```

```
%conversión de pixeles a milímetros
```

```
gotas=40:2
```

```
for i=1:1:40
```

```
    gotas(i,1)=X16ml(i,1)*6.5e-6
```

```
    gotas(i,2)=i
```

```
end
```

```
gotas2=40:2
```

```
for i=1:1:40
```

```
    gotas2(i,1)=X17ml(i,1)*6.5e-6
```

```
    gotas2(i,2)=i
```

```
end
```

```
gotas3=40:2
```

```
for i=1:1:40
```

```
    gotas3(i,1)=X18ml(i,1)*6.5e-6
```

```
    gotas3(i,2)=i
```

```
end
```

```
%calcula de media y desv std
```

```

hold on
med= 1:3
des=1:3
med(1)=mean(gotas(:,1))
med(2)=mean(gotas2(:,1))
med(3)=mean(gotas3(:,1))
desv(1)=std(gotas(:,1))
desv(2)=std(gotas2(:,1))
desv(3)=std(gotas3(:,1))
% grafica de barras de error
x=[16 17 18];
errorbar(x,med,desv)
box on
axis([15 19, 1e-3 1.25e-3])
set(gca,'FontSize',20)
xlabel('Ancho de pulso (ms)','FontSize',20)
ylabel('Diametro (m)','FontSize',20)
title('22G Plana, barras de error', 'FontSize',20)
%%
gotas=40:2
for i=1:1:40
    gotas(i,1)=X22ms(i,1)*6.5e-6
    gotas(i,2)=i
end
gotas2=40:2
for i=1:1:40
    gotas2(i,1)=X23ms(i,1)*6.5e-6
    gotas2(i,2)=i
end
gotas3=40:2
for i=1:1:40
    gotas3(i,1)=X24ms(i,1)*6.5e-6

```

```

    gotas3(i,2)=i
end
med= 1:3
des=1:3
med(1)=mean(gotas(:,1))
med(2)=mean(gotas2(:,1))
med(3)=mean(gotas3(:,1))
desv(1)=std(gotas(:,1))
desv(2)=std(gotas2(:,1))
desv(3)=std(gotas3(:,1))
x=[22 23 24];
errorbar(x,med,desv)
box on
axis([14 25, 795e-6 0.9e-3])
set(gca,'FontSize',23)
xlabel('Ancho de pulso (ms)','FontSize',20)
ylabel('Diametro (m)','FontSize',20)
title('22G Plana, barras de error', 'FontSize',20)

%%
gotas=40:2
for i=1:1:40
    gotas(i,1)=X15ms(i,1)*6.5e-6
    gotas(i,2)=i
end
gotas2=40:2
for i=1:1:40
    gotas2(i,1)=X16ms(i,1)*6.5e-6
    gotas2(i,2)=i
end
gotas3=40:2
for i=1:1:40

```

```

    gotas3(i,1)=X17ms(i,1)*6.5e-6
    gotas3(i,2)=i
end
gotas4=40:2
for i=1:1:40
    gotas4(i,1)=X18ms(i,1)*6.5e-6
    gotas4(i,2)=i
end
med= 1:4
des=1:4
med(1)=mean(gotas(:,1))
med(2)=mean(gotas2(:,1))
med(3)=mean(gotas3(:,1))
med(4)=mean(gotas4(:,1))
desv(1)=std(gotas(:,1))
desv(2)=std(gotas2(:,1))
desv(3)=std(gotas3(:,1))
desv(4)=std(gotas4(:,1))
x=[15 16 17 18];
errorbar(x,med,desv,'+', 'linewidth',1.7)
box on
axis([14 25, 795e-6 1.4e-3])
set(gca,'FontSize',23)
xlabel('Ancho de pulso (ms)', 'FontSize',20)
ylabel('Diametro (m)', 'FontSize',20)
title('Comparación de barras de error', 'FontSize',20)

```