



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Sistema para asegurar posición y  
flujo volumétrico durante el  
electrohilado**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecatrónico**

**P R E S E N T A**

Luis Darío Reyes Delgado

**DIRECTORA DE TESIS**

Dra. María del Pilar Corona Lira



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017**



## AGRADECIMIENTOS

A mis padres

A la Dra. María del Pilar Corona Lira y al Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich.

Al Departamento de Mecatrónica, al CDMIT y al CENISA por las facilidades otorgadas para el desarrollo del proyecto.

Agradezco en lo que le corresponde a la DGAPA, UNAM, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo, a través del PAPIIT IN114316: “Desarrollo y Caracterización de Nanofibras mediante la Técnica de Electrohilado aplicado en Sistemas Químico-Biológicos”

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>II</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>RESUMEN.</b> ....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT.</b> .....	<b>2</b>
<b>OBJETIVOS.</b> .....	<b>3</b>
<b>ANTECEDENTES (1), (2) Y (3)</b> .....	<b>4</b>
<b>NANOFIBRAS</b> .....	<b>4</b>
<i>Clasificación de la nanotecnología.</i> ....	<b>5</b>
<i>Procesos de fabricación de nanofibras</i> .....	<b>6</b>
Por extracción (drawing). ....	<b>6</b>
Síntesis de molde.....	<b>7</b>
Separación de fase. ....	<b>8</b>
Electrohilado. ....	<b>8</b>
<b>EL PROCESO DE ELECTROHILADO</b> .....	<b>9</b>
<i>Conceptos de electrostática</i> .....	<b>10</b>
Campo eléctrico .....	<b>10</b>
Diferencia de potencial.....	<b>11</b>
Ionización.....	<b>13</b>
<i>Parámetros característicos</i> .....	<b>13</b>
Parámetros de la disolución .....	<b>13</b>
Condiciones de procesamiento .....	<b>14</b>
Condiciones ambientales .....	<b>16</b>
<i>Generalidades del proceso</i> .....	<b>16</b>
Fases de la formación de la fibra. ....	<b>17</b>
<b>ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>19</b>
<b>ASPECTOS PREVIOS A LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.</b> ....	<b>21</b>
<b>DURANTE EL ELECTROHILADO.</b> .....	<b>22</b>
<b>ASPECTOS DE LAS VARIABLES DE PROCESAMIENTO O DE LOS DISPOSITIVOS</b> .....	<b>23</b>
<b>ASPECTOS POSTERIORES AL PROCESO.</b> .....	<b>25</b>
<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>27</b>
<b>CONFORMACIÓN DEL SISTEMA</b> .....	<b>27</b>
<i>Fase de pruebas preliminares.</i> .....	<b>28</b>
<i>Simulaciones de campo eléctrico.</i> .....	<b>33</b>
<i>Segundas pruebas preliminares</i> .....	<b>40</b>
<i>Diseño de los sistemas elaborados: conjunción bomba y posicionador de colector.</i> .....	<b>43</b>

	Medición de la corriente durante el electrohilado y observación del cono de Taylor... 53
	<i>Conclusiones de diseño</i> ..... 55
	<i>Aislamiento del microcontrolador con respecto de la etapa de control y potencia.</i> ..... 59
	<i>Programación del microcontrolador seleccionado.</i> ..... 60
	<i>Algoritmo propuesto.</i> ..... 61
	INTERFAZ GRÁFICA. .... 64
	CÁLCULO DEL VALOR PARA EL TEMPORIZADOR EMPLEADO EN EL BOMBEO DE LA DISOLUCIÓN..... 65
	Caracterización del actuador del posicionador. .... 69
	ETAPA EXPERIMENTAL. .... 73
	<i>Experimento sin campo eléctrico</i> ..... 73
	Materiales. .... 73
	<i>Desarrollo.</i> ..... 75
	Para la bomba inyectora. .... 75
	<i>Experimento con campo eléctrico.</i> ..... 77
	Materiales. .... 77
	Desarrollo..... 78
	<b>RESULTADOS.....81</b>
	EXPERIMENTO SIN CAMPO ELÉCTRICO..... 81
	EXPERIMENTO CON CAMPO ELÉCTRICO. .... 84
	Las condiciones para realizar el proceso..... 84
	Las observaciones durante el electrohilado. .... 84
	Medición del diámetro del fluido disparado. .... 85
III	<b>CONCLUSIONES.....89</b>
	<b>TRABAJO A FUTURO. .... 91</b>
	MECÁNICO..... 91
	ELÉCTRICO/ELECTRÓNICO. .... 91
	DE LA INTERFAZ GRÁFICA. .... 92
	<b>REFERENCIAS. ....93</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Figura 1 Diagrama comparativo de elementos presentes en la naturaleza con respecto a su escala. (3) .....	4
	Figura 2 Esquema de un punto cuántico. (4) .....	5
	Figura 3. Imagen obtenida por microscopia de fuerza magnética de una superficie de níquel empleada en juntas de superconductores. (5) .....	6
	Figura 4. Imágenes de nanofibras obtenidas por microscopía electrónica a partir del proceso de electrohilado. (6).....	6
	Figura 5. Esquema del proceso por extracción para la obtención de nanofibras. (1) .....	7
	Figura 6. Esquema del proceso por síntesis de molde. (1) .....	8
	Figura 7. Diagrama esquemático del proceso de separación de fase para obtener nanofibras. (1) .....	8
	Figura 8. Diagrama del proceso de electrohilado. (7) .....	9
	Figura 9. Imagen que ejemplifica líneas equipotenciales entre dos cuerpos a potenciales distintos.....	12
IV	Figura 10. Imagen que ejemplifica la interacción de líneas equipotenciales con las líneas de campo eléctrico (superficie de flechas rojas).....	12
	Figura 11. Esquema del cono de Taylor durante el electrohilado. (8).....	13
	Figura 12. Fotografía del cono de Taylor durante el electrohilado. (9).....	13
	Figura 13. Esquema de los parámetros y condiciones que intervienen en el electrohilado. (10) .....	16
	Figura 14. Fotografía de la jeringa desechable. (11) .....	17
	Figura 15. Imagen de una bomba de inyección. (13).....	17
	Figura 16. Imagen de una fuente de corriente directa de alto voltaje. (14) .....	17
	Figura 17. Diagrama de las etapas de la formación de la fibra (entre el disparo y la deposición). (15) .....	18
	Figura 18. Diagramas de las patentes de Formahls. (16) y (17) .....	19
	Figura 19. Imagen del primer prototipo de posicionador de colector. ....	29
	Figura 20. Esquema de la transmisión del primer prototipo. ....	29
	Figura 21. Fotografías de las pruebas realizadas en el laboratorio con el primer prototipo y la bomba disponible.....	30
	Figura 22. Fotografía del soporte añadido para asegurar que la altura la aguja coincidiera con la placa de recolección. ....	31

Figura 23. Fotografía donde se observa la deformación en la aguja durante la prueba. ....	31
Figura 24. Fotografía de la interfaz de la bomba de inyección disponible en el laboratorio... 32	32
Figura 25. Fotografía de la placa de recolección antes de ser retirada del dispositivo de posicionamiento. ....	32
Figura 26. Imagen de las distancias aguja-colector y bomba de inyección-posicionador. ....	33
Figura 27. Imagen de la simulación por elemento finito de la configuración convencional de electrohilado. ....	34
Figura 28. Imagen de la simulación por elemento finito de la configuración con placa paralela a la de recolección. ....	35
Figura 29. Gráfica comparativa de la intensidad de campo eléctrico en la punta del capilar metálico, para configuración convencional y placas paralelas. ....	35
Figura 30. Imagen de la simulación por elemento finito de la configuración convencional de electrohilado, para la propuesta de placas aterrizadas. ....	36
Figura 31. Imagen de la simulación por elemento finito de la configuración con placas paralelas y placas aterrizadas. ....	36
Figura 32. Gráfica comparativa de la intensidad de campo eléctrico en la punta del capilar metálico, para configuración convencional y placas paralelas con jaula aterrizada. ....	37
Figura 33. Imagen de la simulación por elemento finito de la configuración convencional de electrohilado con el colector de geometría distinta. ....	38
Figura 34. Imagen de la simulación por elemento finito de la configuración con placas paralelas y colector de geometría distinta. ....	38
Figura 35. Gráfica comparativa de la intensidad de campo eléctrico en la punta del capilar metálico, para configuración convencional y placas paralelas con la nueva geometría en la placa de recolección. ....	39
Figura 36. Imagen del experimento realizado con la carcasa metálica. ....	40
Figura 37. Fotografía con el colector y la aguja de la jeringa conectados directamente a la fuente de alto voltaje. ....	41
Figura 38. Fotografía tomada a través de la apertura en la cabina. ....	41
Figura 39. Fotografía de los paneles añadidos como elemento de contraste para la toma de fotografías. ....	42
Figura 40. Fotografía del arco eléctrico creado entre la aguja y cabina metálica. ....	42
Figura 41. Fotografías donde se observan más puntos de disparo que no se dirigen hacia la placa de recolección. ....	43
Figura 42. Imagen del sensor óptico para medir distancia. (19).....	44
Figura 43. Imagen del sensor resistivo para medir distancia. (20) .....	44
Figura 44. Imagen del sensor ultrasónico para medir distancia. (21).....	44

Figura 45. Imagen del sistema Spraybase® Platform. (22) .....	45
Figura 46. Imagen del sistema Contipro 4SPIN®. (23) .....	45
Figura 47. Imagen del sistema Elmarco NS Lab. (24).....	45
Figura 48. Bomba de inyección Harvard Apparatus. (25) .....	46
Figura 49. Bomba de inyección KD Scientific. (26) .....	46
Figura 50. Bomba de inyección New Era. (27) .....	46
Figura 51. Fotografía del elemento de transmisión flexible acoplado al motor de una bomba comercial. ....	47
Figura 52. Diagrama del mecanismo empleado en bombas comerciales para asegurar la posición de la jeringa. (28).....	48
Figura 53. Imagen donde se observa la diferencia entre el acoplamiento del eje para los motores empleados. (37) .....	50
Figura 54. Fotografía del motor empleado para la bomba inyectora propuesta. (38).....	51
Figura 55. Fotografía del actuador para el posicionador del colector. (39). ....	51
Figura 56. Imagen del modelo tridimensional de la bomba inyectora propuesta. ....	52
Figura 57. Esquema de las piezas impresas por estereolitografía para mantener la posición de la jeringa en la bomba de inyección.....	52
Figura 58. Diagrama de algunas de las características mecánicas de la bomba de inyección propuesta. ....	53
Figura 59. Esquema para una configuración convencional de electrohilado con la adición de un sensor de corriente.....	54
Figura 60. Diagrama de sensor óptico para medir corriente. (40) .....	54
Figura 61. Diagrama de sensor magnético para medir corriente. (40) .....	54
Figura 62. Fotografía de placa con sensor de efecto Hall para medir corriente. (41) .....	55
Figura 63. Esquema de sensor resistivo para medir corriente. (42).....	55
Figura 64. Imagen del dispositivo posicionador de colector propuesto.....	56
Figura 65. Esquema comparativo del nuevo posicionador del colector con respecto al primer prototipo.....	56
Figura 66. Vista lateral del nuevo posicionador para colector.....	57
Figura 67. Imágenes de las piezas del posicionador del colector obtenidas mediante estereolitografía. ....	58
Figura 68. Plataforma de desarrollo Arduino. (43) .....	58
Figura 69. Microcontrolador PIC16F887. (44).....	58
Figura 70. Esquema de las etapas que componen la sección electrónica del sistema. ....	60
Figura 71. Fotografía del microcontrolador conectado con los optoacopladores. ....	60

Figura 72. Fotografía del microcontrolador conectado con los optoacopladores y etapa de potencia. .... 60

Figura 73. Esquema de la comunicación entre la computadora y los dispositivos electrónicos. .... 61

Figura 74. Diagrama de la representación mediante estados del algoritmo programado en el microcontrolador. .... 63

Figura 75. Diagrama de la pantalla principal de la interfaz gráfica diseñada. .... 64

Figura 76. Fotografía de la conexión entre la jeringa y el capilar es de silicona flexible. .... 65

Figura 77. Diagrama de la sección que conecta la manguera con el capilar metálico. .... 65

Figura 78. Gráfica de los valores que debería tomar TMR1 para frecuencias entre 1 y 100 [Hz]. .... 68

Figura 79. Gráfica de los valores que debería tomar TMR1 para frecuencias de 1 a 100[Hz] con un escalamiento de 8. .... 69

Figura 80. Gráfica de los valores que debería tomar TMR1 para frecuencias menores a 40[Hz] con el escalamiento programado..... 69

Figura 81. Fotografía del colector colocado a 25[mm] del capilar, este sobresale 6[mm] con respecto al lugar donde se realiza la medición. .... 70

Figura 82. Diagrama de la distancia que hay entre el borde del capilar y la base del soporte es de 6[mm]. .... 70

Figura 83. Diagrama del espesor de la lámina, en conjunto con el acrílico es de 10[mm]. .... 71

Figura 84. Diagrama del espacio entre la pared de la caja del motor y la ranura es de 14[mm]. .... 71

Figura 85. Gráfica que relaciona los pasos con la distancia deseada (capilar-colector). .... 72

Figura 86. Fotografía de la jeringa colocada en la bomba inyectora ..... 73

Figura 87. Fotografía del posicionador de colector durante el experimento sin campo eléctrico. .... 74

Figura 88. Probeta empleada para medir el volumen de fluido bombeado. .... 74

Figura 89. Fotografía de la cámara con marcas para indicar la posición donde se observa claramente la gota formada a la salida del capilar. .... 74

Figura 90. Fotografía del soporte para la cámara USB adaptada para facilitar su ajuste. .... 75

Figura 91. Fotografía de la jeringa cargada con 9[mL] de agua. .... 75

Figura 92. Fotografía del capilar dentro de la probeta. .... 76

Figura 93. Fotografía del volumen ocupado por el fluido en la probeta tras cinco minutos de bombeo a  $200\mu Lmin$ . .... 76

Figura 94. Fotografía capturada con la cámara USB. .... 77

Figura 95. Fotografía de una gota de agua formada en la punta del capilar. .... 77

Figura 96. Sección escalada de la retícula milimétrica. .... 78

Figura 97. Fotografía del sistema completo instalado en el laboratorio. .... 78

Figura 98. Fotografía del posicionador con el colector instalado y fibras depositadas. .... 79

Figura 99. Fotogramas capturados de los vídeos obtenidos con la cámara USB. .... 80

Figura 100. Imagen donde se muestran los cambios en la pieza donde se coloca el émbolo de la jeringa. .... 81

Figura 101. Secuencia de imágenes donde se observa que el empuje del émbolo es intermitente. .... 82

Figura 102. Fotografía de la parte posterior de la pieza donde se coloca el colector. .... 83

Figura 103. Fotografía del material reflejante agregado a la parte posterior de la placa donde se coloca el colector. .... 83

Figura 104. Secuencia de estados modificada. .... 83

Figura 105. Imagen del volumen de la gota mayor que el volumen que es retirado por el campo eléctrico. .... 85

Figura 106. Fotografía del momento en que la fuerza del campo eléctrico vence la viscosidad y la tensión superficial de la gota. .... 85

Figura 107. Imagen del cono de Taylor formado e inicio del disparo de disolución hacia la placa de deposición .... 85

Figura 108. Fotografía donde se aprecia el incremento del volumen de la gota, después de que el actuador de la bomba inyectora se activó. .... 85

Figura 109. Fotografía del cono de Taylor formado en la gota. .... 86

Figura 110. Se observan los puntos donde se realizaron las mediciones en píxeles de la imagen capturada con la cámara USB. .... 86

Figura 111. Diagrama de la medición del largo y ancho de la gota formada en la punta del capilar. C. .... 87

Figura 112. Imagen con la sección de la retícula donde se aplicó el detector de bordes. .... 88

## ÍNDICE DE TABLAS

	Tabla 1. Tabla comparativa de los parámetros de la disolución que intervienen en el electrohilado. ....	14
	Tabla 2. Parámetros de procesamiento en el electrohilado. ....	15
	Tabla 3. Condiciones ambientales que intervienen en el electrohilado.....	16
	Tabla 4. Diferentes polímeros con los que se puede realizar el proceso de electrohilado así como las técnicas para el análisis de las fibras resultante. Tomada de (18) .....	26
	Tabla 5. Tabla de comparación de las características de un motor a pasos y uno de corriente directa. (18).....	28
	Tabla 6. Tabla con las condiciones para las simulaciones de campo eléctrico.....	34
	Tabla 7. Tabla comparativa de sensores de distancia. ....	44
	Tabla 8. Tabla comparativa de sistemas comerciales para electrohilado.....	45
	Tabla 9. Tabla comparativa de bombas de inyectoras comerciales.....	46
	Tabla 10. Tabla comparativa de la relación de micropasos. ....	47
	Tabla 11. Tabla comparativa de los controladores y etapas de potencia para motor a pasos bipolar. ....	50
IX	Tabla 12. Tabla comparativa de sensores para medir corriente. ....	55
	Tabla 13. Tabla de requerimientos para el microcontrolador. ....	58
	Tabla 14. Comparación entre plataforma de desarrollo Arduino y el microcontrolador PIC16F887.....	59
	Tabla 15. Tabla con los datos obtenidos para relacionar la distancia con el número de pasos. 72	

## RESUMEN.

El electrohilado es un proceso empleado para la obtención de nanofibras mediante la interacción de una fuerza ocasionada por un campo eléctrico de gran magnitud (en el orden de 10[kV]). Su implementación es sencilla en comparación con otros procedimientos para producir nanoestructuras; sin embargo, los fenómenos físicos que permiten llegar a dicho resultado son complejos. Por otra parte, su versatilidad en cuanto a los materiales que se pueden transformar en fibras ultradelgadas ocasiona que para cada uno de ellos sea necesario caracterizar los parámetros individuales involucrados en la obtención de fibras con características determinadas.

En este trabajo se expone el proceso para la obtención de un sistema mecatrónico compuesto por dos dispositivos que permiten controlar dos de estos parámetros: la distancia capilar - colector y el flujo volumétrico. Además de la observación del cono de Taylor durante el mismo, este último determinará si se obtienen fibras de manera continua o no. Estos fueron seleccionados ya que son fácilmente controlables mediante la incorporación de sensores y actuadores, además sus efectos han sido descritos en la literatura relacionada con el tema, por lo que pudieron ser validados mediante pruebas en el laboratorio.



**ABSTRACT.**

Electrospinning is a process employed to produce nanofibers as the result of a non-contact force (electric field between 10 [kV] and 30 [kV]), applied to different polymeric solutions. This technique has been broadly accepted between the scientific community due to its implementation requires less equipment than other ones. Nevertheless, the complexity of the physical phenomena happening during the process and the wide range of polymers which can become into nanofibers rises the challenge of knowing which parameters are associated in the development of fibers with certain properties, making characterization a must for each and every one.

This work is focused on the development of a mechatronic system consisting of two devices capable of controlling two parameters involved during the process: needle - collector distance and flow rate of the polymeric solution. Furthermore, it allows to look at the Taylor cone; which determines whether the process is running continuously or not. Both can be controlled by adding sensors and actuators, those variables where chosen, on the other hand, researches on the topic have been made before, thus experimental outcome can be validated.

## OBJETIVOS.

Diseñar un sistema para modificar la posición del colector y el flujo volumétrico del polímero durante el proceso de electrohilado.

Realizar el análisis mediante simulaciones computarizadas de los efectos del campo eléctrico por la adición de elementos en el proceso convencional de electrohilado.

## ANTECEDENTES (1), (2) Y (3)

### NANOFIBRAS

Antes de definir uno de los procesos de fabricación de las nanofibras, es necesario describir de donde proviene el término. Como se puede inferir, está compuesto por dos palabras: “fibra” y “nano”. La primera es más común y proviene del latín “*fibra*”. Con base en el contexto en que se aplique, puede tener diferentes connotaciones. Por ejemplo, en el contexto geométrico donde se denomina como una estructura fina y elongada similar a un hilo; mientras que en el contexto industria textil en la que se considera como aquel filamento de origen natural o sintético capaz de ser procesado para formar un hilo.

Por otro lado, el término “nano”, al igual que algunos de los prefijos empleados por el Sistema Internacional de Unidades; proviene del griego “*nannos*” que se puede traducir como “enano” u “hombre pequeño”.

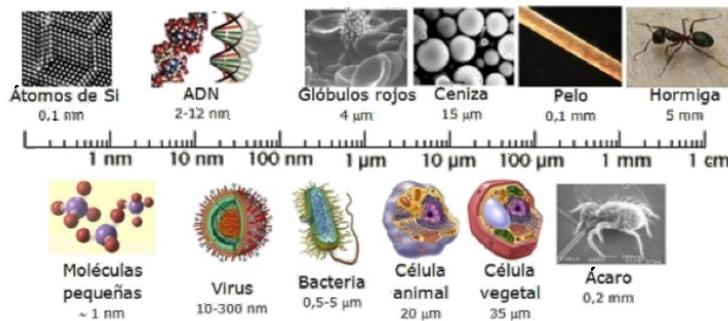


Figura 1 Diagrama comparativo de elementos presentes en la naturaleza con respecto a su escala.  
(3)

Finalmente, la nanotecnología se refiere a la ciencia e ingeniería de los materiales, estructuras y dispositivos con al menos una dimensión por debajo de 100[nm]. Por otro lado, también se refiere al diseño y fabricación de objetos cuya especificación requiere de la colocación de átomos o moléculas individuales que cumplan con el criterio anterior.

Con relación al número de dimensiones presentes en una nanoestructura es posible establecer un conjunto de niveles dependiente de estas; es decir, que la forma

más simple corresponde a un elemento cuya dimensión es cero (nanopartícula). Además de las anteriores, para la construcción de estructuras de mayor complejidad tales como nanodispositivos, se requieren elementos tanto de una dimensión como los nanotubos o nanobarras, o de dos dimensiones como los nanodiscos.

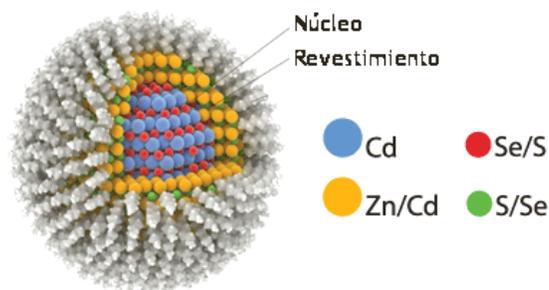
Un aspecto importante, es que existen un par de parámetros para la clasificación de la nanotecnología: el de la comunidad académica y el del sector comercial, respectivamente. El sector comercial es más flexible en cuanto a las dimensiones ya que su punto de referencia está establecido por debajo de los 300 [nm], mientras que en el sector académico las dimensiones se encuentran fijas en los 100 [nm] o menos.

---

#### CLASIFICACIÓN DE LA NANOTECNOLOGÍA.

La nanotecnología puede clasificarse con respecto a su campo de aplicación. Entre algunos de ellos se encuentran:

- La nanofotónica, encargada del estudio, desarrollo e investigación de dispositivos denominados puntos cuánticos (quantum dots) como el mostrado en la *Figura 2*.



*Figura 2 Esquema de un punto cuántico. (4)*

- El nanomagnetismo, que aprovecha el spin de los electrones que permiten obtener materiales con gran capacidad de almacenamiento de datos o en el área de los semiconductores, como en el ejemplo de la *Figura 3*.

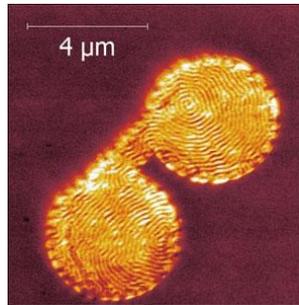


Figura 3. Imagen obtenida por microscopía de fuerza magnética de una superficie de níquel empleada en juntas de superconductores. (5)

- El área de los biomateriales, que ha tenido un gran crecimiento y ha sido del interés de la comunidad científica como resultado de la presencia de estructuras de escala nanométrica en los seres humanos.

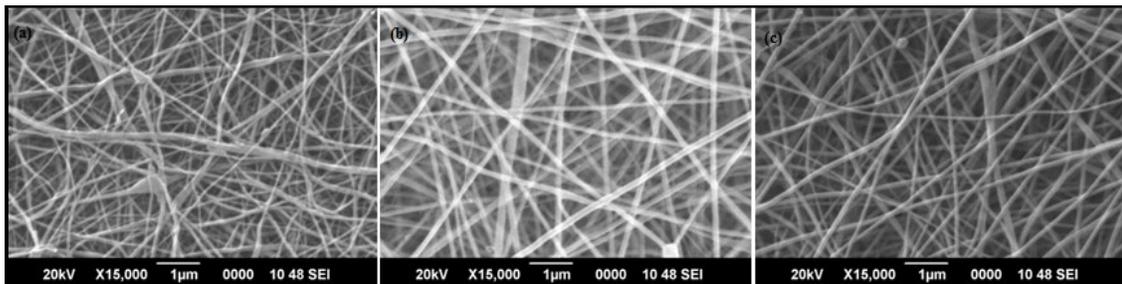


Figura 4. Imágenes de nanofibras obtenidas por microscopía electrónica a partir del proceso de electrohilado. (6)

Por otro lado, también hay que tener en cuenta los procesos y técnicas necesarias para obtener estructuras de nano-escala.

---

#### PROCESOS DE FABRICACIÓN DE NANOFIBRAS

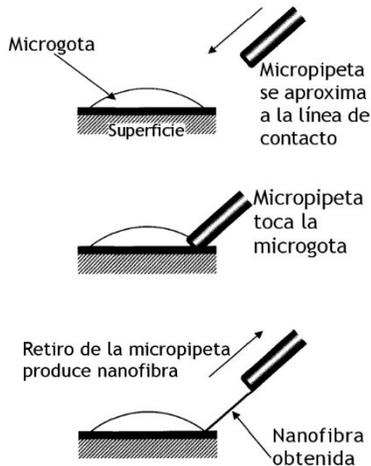
En términos de su geometría, las nanofibras corresponden a la clasificación de una dimensión, sin embargo, debido a su flexibilidad, pueden compararse con otros nanoelementos como moléculas globulares, así como con películas líquidas o sólidas de nanoespesor.

Para su obtención, existen diferentes procesos, algunos de estos son:

---

POR EXTRACCIÓN (DRAWING).

Consiste en la colocación, en una superficie, de una microgota del material deseado. Este debe tener la viscosidad necesaria para resistir fuertes deformaciones. Posteriormente, esta entra en contacto con un capilar muy delgado (micropipeta) que se retira a una velocidad muy baja, como se observa en la *Figura 5*; para obtener una fibra que al final del proceso es colocada en la superficie original. El procedimiento se realiza varias veces con cada gota.



7

*Figura 5. Esquema del proceso por extracción para la obtención de nanofibras. (1)*

---

#### SÍNTESIS DE MOLDE.

Como su nombre lo indica, se requiere de una plantilla o molde a partir de la que se obtendrá el material o la estructura deseada. Se trata de un proceso de extrusión a nanoescala, ya que requiere de la aplicación de agua presurizada por uno de los lados de una membrana porosa como se observa en el esquema de la *Figura 6*. Mientras que del otro está presente una disolución solidificadora. El diámetro de los poros de la membrana rige el de la nanofibra obtenida.

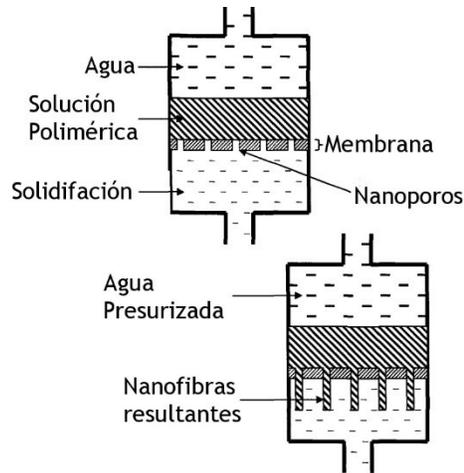


Figura 6. Esquema del proceso por síntesis de molde. (1)

SEPARACIÓN DE FASE.

En este caso, la disolución es mezclada con un disolvente. Para solidificarla posteriormente. El mecanismo principal de este proceso es la separación de fases debido a que son físicamente incompatibles. Al final, el disolvente es retirado, por lo que queda la fase correspondiente a las nanofibras como se observa en el diagrama de la *Figura 7*.

8

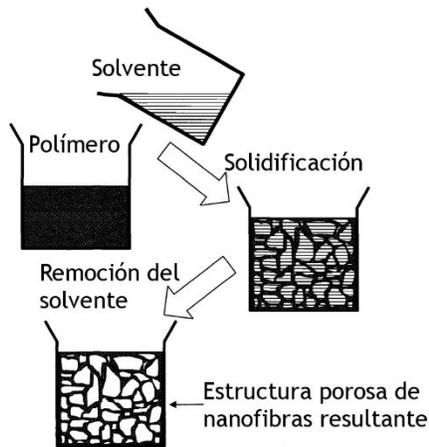
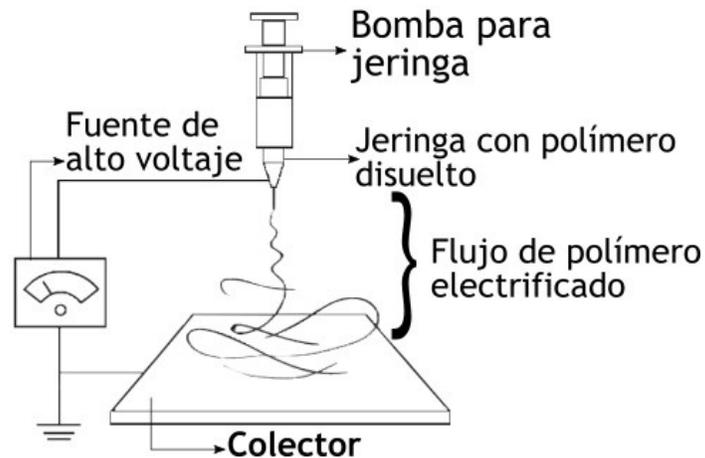


Figura 7. Diagrama esquemático del proceso de separación de fase para obtener nanofibras. (1)

ELECTROHILADO.

Este proceso fue patentado en 1934 por Formhals, donde se proponía la configuración experimental para la obtención de filamentos de un polímero mediante

fuerza electrostática. Básicamente consiste en la producción de nanofibras a partir de un polímero disuelto o fundido cargado eléctricamente. En su forma más simple requiere de una pipeta para contener la disolución polimérica, una fuente de corriente directa de alto voltaje y una superficie aterrizada para que las fibras sean depositadas como se muestra en la *Figura 8*.



*Figura 8. Diagrama del proceso de electrohilado. (7)*

9

## EL PROCESO DE ELECTROHILADO

Tal como sucede con el proceso de extrusión o inyección para obtener fibras de un polímero mediante las técnicas de manufactura convencionales, el electrohilado involucra la extracción de un fluido. Sin embargo, la naturaleza de las fuerzas presentes en cada uno es diferente. En el primero, una fuerza externa, de origen mecánico presiona el polímero fundido a través de un dado, mientras que en el segundo existe un gradiente de potencial hacia un colector, que produce el estiramiento en forma de nanofibras.

Para obtener nanofibras continuas mediante esta técnica, es necesario satisfacer una serie de condiciones:

- Proveer una diferencia de potencial suficientemente grande.
- Contar con la viscosidad adecuada en la disolución.
- Se debe hacer hincapié en que es posible obtener nanofibras a partir de diferentes

materiales, tales como cerámicos o materiales compuestos.

- Aparición del cono de Taylor, este efecto representa el equilibrio entre las fuerzas que mantienen la gota de polímero unida (viscosidad y tensión superficial) y las de las cargas electrostáticas que promueven la repulsión entre ellas al ser del mismo signo.
- Una vez que rompe dicho equilibrio, se tendrá como resultado un disparo de la disolución del polímero con el disolvente debido a la interacción de las propiedades del fluido con la fuerza del campo aplicado.
- La solidificación de la fibra dependerá de la tasa de evaporación del disolvente empleado en la disolución y la distancia entre la punta de la aguja y el colector.

Es importante destacar que la aplicación que se haga de las nanofibras es un factor determinante en la selección del polímero que será empleado durante el proceso; ya que, en algunos casos es necesario un procesamiento posterior de la fibra resultante. Este es el caso de los nanotubos de carbono o cerámicos.

A continuación, se explicarán conceptos básicos de electricidad, importantes para la comprensión del proceso que permite el disparo de disolución durante el proceso de electrohilado.

10

---

#### CONCEPTOS DE ELECTROSTÁTICA

Este proceso únicamente es posible mediante la presencia de una diferencia de potencial entre la aguja o capilar y la placa de recolección. Es por esta razón que se deben considerar factores cuyo impacto se verá reflejado en las características de la fibra obtenida, tales como: la capacidad de la disolución para transportar electrones, el campo eléctrico que rodea al fluido mientras es disparado hacia el colector, así como la disipación de cargas una vez que las fibras son depositadas.

---

#### CAMPO ELÉCTRICO

Es una región donde existe una fuerza que es ocasionada por la presencia de cargas eléctricas; puede ser de atracción o repulsión y puede ser expresada en términos de la ley de Coulomb.

$$\bar{F} = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi \cdot \epsilon_p \cdot d^2} \hat{r} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$q_1$  y  $q_2$  son las cargas puntuales.

$\epsilon_p$  es la permitividad absoluta del espacio entre las cargas.

$d$  es la distancia entre las mismas.

Sin embargo, la ley de Coulomb, sólo es válida para cargas puntuales, por lo que se emplea otra ecuación para representar su magnitud en una región.

$$\bar{F} = q \cdot \bar{E} \quad \text{Ecuación 2}$$

Para una carga puntual  $q$ , a una distancia  $d$ , el campo eléctrico está dado por:

$$\bar{E} = \frac{q}{4\pi \cdot \epsilon \cdot d^2} \hat{r} \quad \text{Ecuación 3}$$

11

Donde:

$\epsilon$  es la permitividad del medio que rodea a  $q$ .

#### DIFERENCIA DE POTENCIAL

El potencial ( $\Phi$ ) en un punto en el espacio está dado por el cociente del trabajo requerido para mover infinitamente lento una carga de prueba  $Q$ , dividido entre dicha carga, al trasladarla desde un punto de referencia hasta otro punto y se representa de la siguiente manera:

$$\Phi = \frac{dW}{dQ} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$U_{21} = \Phi_2 - \Phi_1 \quad \text{Ecuación 5}$$

$U_{21}$  representa la diferencia de potencial entre los puntos 2 y 1, esta se mide en Volts [V].

Otra forma de representar el campo eléctrico es mediante una cantidad geométrica descriptiva denominada superficie equipotencial. Son empleadas para unir

los puntos en el espacio que tienen el mismo potencial eléctrico. Las líneas de campo eléctrico son perpendiculares a las anteriores en todos los puntos de las superficies.

Líneas equipotenciales [V].

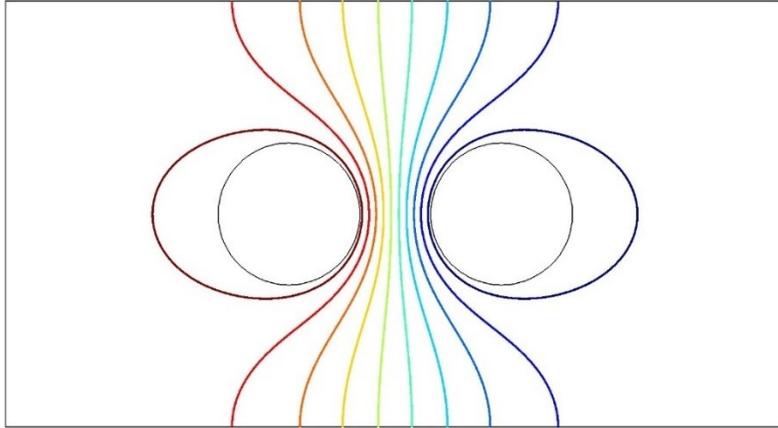


Figura 9. Imagen que ejemplifica líneas equipotenciales entre dos cuerpos a potenciales distintos.

Cuando están involucradas más de una carga, puede ser más ventajoso emplear la representación del campo eléctrico y potencial para definir sus interacciones. Aunque puede representarse vectorialmente, son más comunes las líneas de campo para dicho fin.

12

Líneas equipotenciales [V].

Superficie de flechas rojas: campo eléctrico [V/m]

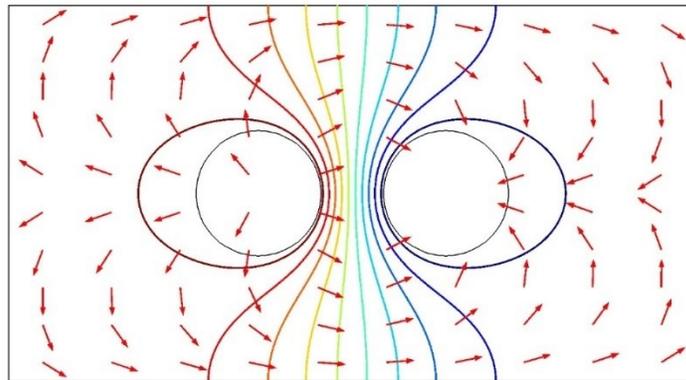


Figura 10. Imagen que ejemplifica la interacción de líneas equipotenciales con las líneas de campo eléctrico (superficie de flechas rojas).

IONIZACIÓN

En el electrohilado, cuando un alto voltaje es aplicado, en el rango de 1 a 30[kV] y una gota está presente en la punta de la aguja, como resultado de este fenómeno, las cargas se distribuirán sobre la superficie de la misma. La gota experimentará dos fuerzas electrostáticas, una originada por la repulsión de las cargas y otra como resultado de la exposición al campo eléctrico. La interacción de las mismas ocasionará la deformación de la gota de disolución, que tomará una geometría cónica característica, denominada cono de Taylor.

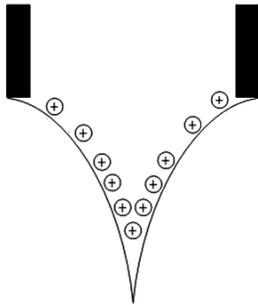


Figura 11. Esquema del cono de Taylor durante el electrohilado. (8)



Figura 12. Fotografía del cono de Taylor durante el electrohilado. (9)

13

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

Los parámetros que intervienen en el proceso se dividen en tres grandes áreas: los que son inherentes al polímero en disolución, los que dependen de las condiciones del procesamiento y finalmente los relacionados con las condiciones ambientales. A continuación, serán descritos brevemente.

PARÁMETROS DE LA DISOLUCIÓN

Las propiedades de esta tienen los efectos más significativos en la morfología de las fibras obtenidas mediante el electrohilado

Propiedad de la disolución	Descripción
Masa molecular	Este parámetro representa la longitud de las cadenas del polímero. Al estar disuelto, tiene una profunda relación con la viscosidad de la disolución. A su vez, es el arreglo de las cadenas poliméricas el que previene la ruptura de nanofibras cuando son

	depositadas en el colector.
<b>Viscosidad</b>	<p>Este factor se relaciona con dos aspectos importantes del electrohilado:</p> <p>Por un lado, si es muy alta, el bombeo del fluido sería más complicado o podría ocasionar un tapón en la punta de la aguja.</p> <p>Por el otro, las características de la fibra resultante, se ven comprometidas si esta disminuye. De tal forma que se podrían presentar cuentas de polímero a lo largo de la fibra recolectada.</p>
<b>Tensión superficial</b>	Tal como sucede con la viscosidad de la disolución, esta tiene el efecto de formar cuentas a lo largo de la fibra cuando es alta. Sin embargo, son resultado de la tendencia a agruparse por parte de las moléculas de disolvente cuando la concentración de este se incrementa.
<b>Conductividad de la disolución</b>	Si esta se incrementa, el fluido puede transportar más cargas, por lo que el voltaje necesario para realizar el proceso podría reducirse. Por otra parte, también podría traducirse en la obtención de fibras más delgadas.
<b>Efecto dieléctrico del disolvente</b>	Un disolvente cuya conducción sea menor, generalmente promueve la obtención de fibras continuas sin cuentas, así como la reducción del diámetro de la fibra.

*Tabla 1. Tabla comparativa de los parámetros de la disolución que intervienen en el electrohilado.*

CONDICIONES DE PROCESAMIENTO

El impacto de estos parámetros sobre la morfología de la fibra, es menor que el de las propiedades de la disolución. Sin embargo, son indispensables para el desarrollo del proceso.

**Condición del proceso**

**Descripción**

<b>Diferencia de Potencial (Voltaje)</b>	Es un elemento crucial para el proceso, ya que permite la inducción de cargas en la disolución
<b>Flujo volumétrico</b>	<p>Determina la cantidad de disolución disponible durante el proceso. Para un voltaje dado, hay un flujo correspondiente para obtener un cono de Taylor estable.</p> <p>Si este se incrementa, también el diámetro de la fibra, así como la cantidad de cuentas y el diámetro de las mismas.</p>
<b>Temperatura de la disolución</b>	Permite el incremento de la tasa de evaporación del disolvente, así como reducir la viscosidad de la disolución. Como consecuencia de esto, el diámetro de la fibra también se puede reducir debido a que el campo ejercería una fuerza de estiramiento mayor
<b>Material del colector</b>	Para obtener una diferencia de potencial estable, generalmente se emplea un material conductor para la recolección de las fibras. Sin embargo, es posible sustituirlo por uno cuyas propiedades sean aislantes. Lo anterior abre la posibilidad de obtener estructuras tridimensionales.
<b>Diámetro del tubo capilar (pipeta, aguja u orificio)</b>	Cuando se disminuye, la tensión superficial en la gota se incrementa; por lo que, para el mismo voltaje, se requiere una fuerza del campo eléctrico mayor para iniciar el proceso.
<b>Distancia entre el colector y la aguja</b>	Influye directamente en el tiempo de vuelo de la fibra, así como en la fuerza del campo. Ya que una distancia mayor, permite la evaporación del disolvente a la vez que permite la desaceleración de la fibra al depositarse en la placa de recolección.

*Tabla 2. Parámetros de procesamiento en el electrohilado.*

CONDICIONES AMBIENTALES

Este aspecto aún está bajo investigación ya que sus efectos sobre la morfología de las fibras son objeto de estudio.

Condición ambiental	Descripción
Humedad relativa	Si esta es elevada, puede ocasionar que moléculas de agua se condensen en la superficie de la fibra. También afecta la tasa de evaporación del disolvente.
Tipo de atmósfera	Se relaciona con el voltaje de ruptura ante la presencia de un campo eléctrico.

Tabla 3. Condiciones ambientales que intervienen en el electrohilado.

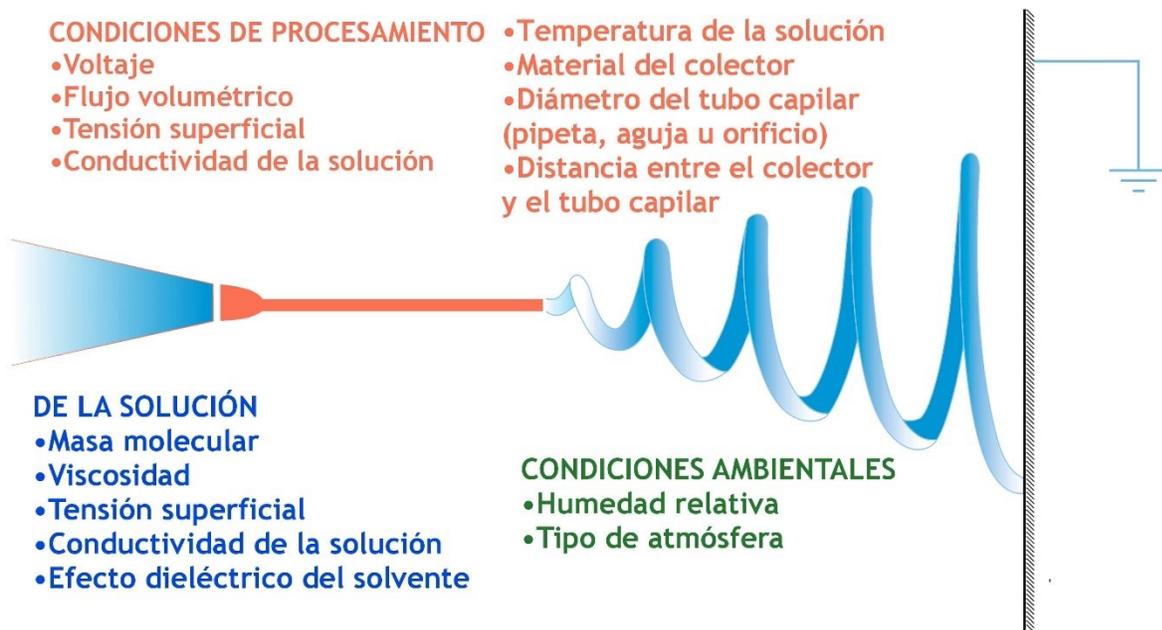


Figura 13. Esquema de los parámetros y condiciones que intervienen en el electrohilado. (10)

GENERALIDADES DEL PROCESO

El equipo mínimo necesario para llevar a cabo este proceso consiste en:

- Una jeringa convencional con una punta de metal (capilar) cuyo diámetro interno sea de un milímetro o menor. En ella se dispone:



Figura 14. Fotografía de la jeringa desechable. (11)

- Una disolución de algún polímero como nylon, acrílico, poliuretano, poliestireno o policaprolactona, entre otros.
- Un dispositivo que sea capaz de presionar el émbolo de la jeringa, para que este actúe como un dado para extrusión y descargue lentamente el polímero.



Figura 15. Imagen de una bomba de inyección. (13)

17

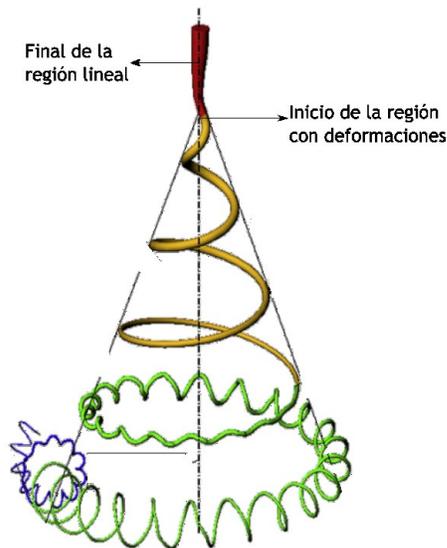
- Una superficie metálica, generalmente de lámina delgada de aluminio posicionado a unos centímetros frente a la punta metálica de la jeringa que actúa como colector de las fibras generadas.
- Una fuente de alto voltaje como la de la *Figura 16*, capaz de suministrar por lo menos 1[kV] a la corriente requerida, en el orden de microamperes.



Figura 16. Imagen de una fuente de corriente directa de alto voltaje. (14)

Durante el proceso de formación de la fibra, una vez que sale de la punta de la jeringa, se presentan una serie de fenómenos físicos que suceden en diferentes etapas y que se pueden dividir como se observa en la *Figura 17*:

- Formación de la gota en la punta metálica (dado), inicio del disparo del fluido.
- Comportamiento lineal de la disolución disparada.
- Inicio de deformaciones que provocan que la fibra gire y desarrolle trayectorias en forma de espiral.
- Una etapa donde al mismo tiempo que se describe una trayectoria en forma de espiral, fibra describe giros sobre sí misma en torno a esta dirección.
- Etapa final donde la fibra se deposita en el colector.



*Figura 17. Diagrama de las etapas de la formación de la fibra (entre el disparo y la deposición). (15)*

El análisis de las etapas de transición del polímero disuelto hasta su solidificación en la placa de recolección requiere del uso de técnicas de experimentación avanzadas, dado que sucede en un periodo de tiempo extremadamente reducido y se extiende en un espacio que puede llegar a los 50 [cm]. Las técnicas más adecuadas son: análisis de vídeo de alta velocidad, técnicas de trazado de trayectorias mediante partículas o el análisis de los colores de interferencia, entre otros. (15)

## ESTADO DEL ARTE

En esta sección se describen los trabajos previos revisados que se relacionan con el proceso de electrohilado.

Los primeros descubrimientos relacionados con el electrohilado fueron realizados con base en experimentos con líquidos expuestos a un campo eléctrico. En 1745, Bose describió la formación de aerosoles ocasionados por potenciales eléctricos en gotas. Por otro lado, la cantidad de cargas requeridas para su deformación fue descrita por Raleigh en 1885. Entre los años 1902 y 1903 Cooley y Moore describieron en patentes aparatos para el rocío de líquidos mediante el uso de cargas eléctricas. La preparación de seda artificial fue descrita por Hagiwaba en 1929. (2)

Antes del año 2000, el proceso estaba en el dominio de muy pocos especialistas. El promedio de artículos publicados por año en la materia se encontraba por debajo de los veinte. Sin embargo, esta situación se ha revertido durante los últimos años. Desde el 2009, el número de artículos superó los mil quinientos y se estima que más de  
19 doscientos de investigación, así como en la industria trabajan en el campo. (2)

En realidad, el proceso de electrohilado es más antiguo de lo que se podría pensar. Aunque el término fue acuñado durante la década de 1990, fue observado por primera vez en 1897 por Rayleigh y posteriormente estudiado detalladamente por Zeleny en 1914. Finalmente fue patentado por Formahls en 1934 para la producción de hilados textiles de acetato celulosa a 57[kV]. (2)

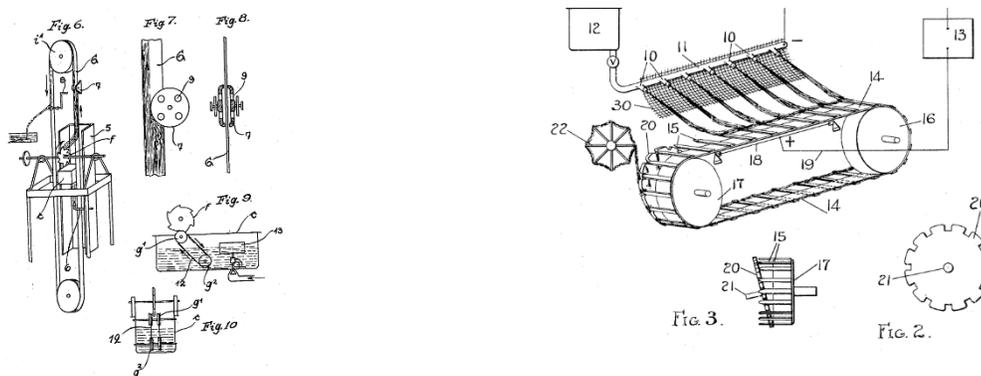


Figura 18. Diagramas de las patentes de Formahls. (16) y (17)

Aproximadamente cincuenta patentes han sido registradas en los últimos sesenta y siete años para el electrohilado de polímeros disueltos, así como fundidos. En el año de 1952 Vonnegut y Newbauer inventaron un aparato simple para atomización eléctrica; éste produjo flujos a partir de gotas altamente electrificadas de casi 0.1[mm] de diámetro. Posteriormente, Baumgarten (1971) creó un aparato para electrohilar fibras de acrílico con diámetros en el rango de 0.05 a 1.1 [ $\mu\text{m}$ ]. (18)

Existe un rango muy amplio de polímeros compatibles con el proceso a partir de los cuales es posible obtener nanofibras para un gran número de aplicaciones. (18)

Con respecto a la gota formada al final de la punta de metal de la jeringa. Taylor estudió la deformación de la misma al comparar su geometría con y sin la presencia de un campo eléctrico. Descubrió que para un voltaje crítico esta se descompone al vencer las fuerzas de tensión superficial y viscosidad. (19)

De la revisión de los trabajos relacionados con el electrohilado a lo largo del tiempo, se encontró que se relacionan con aspectos posteriores, anteriores y aspectos que se presentan durante el proceso de electrohilado, por lo que se propone la siguiente categorización y posteriormente se presentarán las referencias de las mismas:

20

**Aspectos previos a la implementación del sistema**, tales como modelos matemáticos para predecir las características de las fibras, así como visualizar la distribución del campo eléctrico para distintas geometrías de la placa de recolección.

**Aspectos presentes durante el electrohilado**, en comparación con las otras categorías. Se encontraron menos trabajos en esta área; principalmente se enfocan en la detección de la geometría del cono de Taylor, que se forma en la punta de la aguja o tubo capilar desde donde se dispara el fluido.

**Aspectos de las variables de procesamiento o de los dispositivos**, en esta categoría se localizaron otros estudios cuya aportación para el proceso de electrohilado se centra en la caracterización de los diferentes dispositivos para producir la gota que desencadena el proceso. Por otro lado, en esta categoría también se encontraron trabajos donde se analiza la posibilidad de sustituir la fuente de corriente directa por

una de corriente alterna o el efecto de la alineación entre los elementos del sistema, entre otros.

**Aspectos posteriores al proceso**, se enfocan en el análisis de las características de las fibras mediante el empleo de técnicas como la microscopía electrónica. Otra área de interés es la de la caracterización de las deformaciones del polímero presentes en el área llamada de inestabilidad, así como la medición de la longitud del área lineal. El primero es posible mediante el uso de cámaras convencionales, mientras que el segundo se realiza con cámaras de alta velocidad.

#### ASPECTOS PREVIOS A LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.

Como resultado del análisis de diversos trabajos, se procede a enumerar una serie de aspectos que se pueden traducir en la mejora del sistema de electrohilado

Xie, et al. observaron que, mediante la simulación con software de análisis por elemento finito de una configuración de múltiples agujas, así como con la adición de una placa conectada a estas, paralela a la de recolección, la distribución del campo eléctrico durante el electrohilado era más uniforme en comparación con la omisión de dicha placa. Con este experimento también se puede concluir que el diseño de la distribución del campo eléctrico para el proceso puede alterar el diámetro de las fibras obtenidas y mejorar el área para su recolección. (20)

Angamma y Jayaram desarrollaron un experimento en el que establecieron las regiones de trabajo para obtener diámetros de fibra estables para distintas distancias y voltajes. Mediante un programa de análisis por elemento finito estudiaron la distribución del campo eléctrico en la aguja y encontró que para diferentes longitudes y diámetros esta es proporcional a la magnitud del voltaje aplicado. También determinaron los umbrales entre dicha zona y la que provoca inestabilidades en el cono de Taylor antes mencionado. (21)

Karatay y Dogan, desarrollaron un modelo matemático para evaluar la adición de un cilindro metálico a la configuración de un sistema convencional de electrohilado. Mediante su simulación numérica y posterior validación experimental encontraron que

con la adición de dicho componente se obtienen fibras de menor diámetro resultado de la atenuación de las inestabilidades en el polímero previas a su deposición. (22)

Zheng, et al., compararon la distribución del campo eléctrico a través de un programa de análisis por elemento finito para una configuración convencional (aguja - colector) con una propuesta de sustitución del tubo capilar de acero inoxidable que ofrece la aguja por un par de placas de aluminio y politetrafluoroetileno con un orificio al centro por el que el fluido es empujado. Encontraron que para la primera configuración la distribución es menos homogénea. (23)

Gou, et al., estudiaron el efecto de cambiar la geometría del colector en una configuración convencional (aguja - colector) de una superficie continua a placas paralelas; mediante la simulación por elemento finito encontró que la distribución del campo es simétrica y que puede favorecer la alineación de las fibras. (24)

Del análisis de los trabajos previamente mencionados, se puede observar que independientemente de la disolución con la que se trabaje, hay consenso con relación a los efectos en la distribución del campo eléctrico dados por la adición de una placa paralela a la de recolección, que es conectada a la aguja o en su defecto se da la sustitución de la misma por un orificio que supla su función.

22

Además, un aspecto importante es el de la adición de otros elementos como un cilindro, con el que es posible minimizar las inestabilidades antes de recolectar la fibra, y además la elección de una geometría distinta en el colector puede ser beneficioso en caso de requerir fibras alineadas.

#### DURANTE EL ELECTROHILADO.

A continuación, se describen los aspectos más representativos que se deben tener en cuenta durante el proceso de electrohilado.

Fallahi, et al., estudiaron el comportamiento de la corriente durante el electrohilado de PAN (poliacrilonitrilo). La midieron como función del voltaje aplicado. Cuando el polímero no es disparado, su magnitud no es significativa. Sin embargo, cuando el voltaje variaba, ocasiona dos regímenes: uno continuo y uno fluctuante. El

primero ocurre cuando permanece suficiente polímero disponible de tal forma que se necesita un voltaje menor y corriente constante; mientras que el segundo se caracteriza por requerir un voltaje mayor y corriente oscilante. Este fenómeno se presenta como resultado de que el fluido disponible, en la punta de la jeringa, se retira más rápido de lo que se bombea. (25)

Yang, et al. (2005), realizaron un estudio con PEO (óxido de polietileno) con conclusiones similares. Adicionalmente, se observó que a un voltaje mayor el diámetro de la fibra obtenida era menor. (26)

#### ASPECTOS DE LAS VARIABLES DE PROCESAMIENTO O DE LOS DISPOSITIVOS

En esta sección se introducen los aspectos más destacables que se relacionan con los dispositivos o las variables de procesamiento (distancia aguja-colector y flujo volumétrico) durante el electrohilado.

Yang, et al. (2011), realizaron un estudio de los efectos tanto de la distancia aguja-colector como del flujo volumétrico con óxido de Polietileno (PEO) determinando, que el conjunto de estos parámetros define la “*electrohilabilidad*”. El primero altera la distribución del campo eléctrico, mientras que el efecto del segundo se relaciona con la interacción de las fuerzas eléctricas, la viscosidad y la tensión superficial que permiten mantener un disparo de polímero estable. (27)

Manea, et al., presentaron un estudio acerca del impacto de la distancia aguja - colector en el diámetro promedio de las fibras electrohiladas de polieterimida (PEI). En este caso, se encontró que un incremento de este parámetro ocasiona que la fibra obtenida presente un diámetro mayor. En contraste, y relacionado con estos dos aspectos, encontró un valor de distancia para el que el último es mínimo. (28)

Hekmati, et al., analizaron la influencia del mismo parámetro además de las características del tubo capilar metálico. En sus resultados, destacaron que afectan tanto la zona de recolección de las fibras como el diámetro de las mismas. Así mismo, se podría decir que la relación entre distancia y diámetro de la fibra es tal que: para una disminución del primero, el segundo será mayor y viceversa. (29)

Wang, et al., analizaron el efecto del cambio en la distancia aguja - colector en polifenileno vinileno. Informaron que, para una disminución en dicho parámetro, se producían esferas o cuentas en las fibras resultantes. Lo anterior fue atribuido al tiempo que necesita el disolvente para evaporarse. Dado que, si las fibras tenían una distancia más corta antes de depositarse en el colector, aún tenía la capacidad de disolver las fibras depositadas anteriormente. En contraste, para distancias mayores, el diámetro de las fibras obtenidas fue menor. (30)

Basu, et al., integraron el concepto de voltaje mínimo para electrohilado, correspondiente al necesario para realizar la máxima conversión de disolución polimérica en nanofibras. En su estudio utilizó acrílico y de sus resultados, concluyeron que, para su configuración, el diámetro de la fibra obtenida es independiente de la distancia aguja - colector. (31)

El aspecto más importante de estos trabajos radica en la falta de consenso en el caso de la distancia en contraste con el flujo volumétrico o el campo eléctrico. Aunque distintos polímeros han sido evaluados, dichas discrepancias en la primera variable mencionada, pueden ser consecuencia de algunos parámetros externos como; la humedad relativa, la temperatura de la disolución o asociado a los parámetros propios de la disolución, como la conductividad, tensión superficial, viscosidad o concentración.

Otros trabajos se han realizado con enfoques diferentes, bajo la línea de la posición aguja - colector. Como el de Sivri, et al., en el que propusieron uno en el que es posible ajustar la distancia entre ambos, además de recolectar fibras de características diferentes (diámetro) simultáneamente con un solo tubo capilar a través del cambio de la geometría de la placa de recolección. (32)

Uno de los trabajos más representativos es el desarrollado por, fuera del área del electrohilado; por Zeng, et al., quien comparó dos diferentes sistemas de bombeo, uno basado en jeringas y otra basado en aire comprimido. El principal resultado de su análisis se encuentra en el tiempo de estabilización del flujo deseado, para el primer tipo de sistema, por la clase de actuador empleado, es de 100 [s], mientras que para

el segundo es de 1 [s] además de ser mejorado mediante un controlador de lazo cerrado proporcional integral. (33)

#### ASPECTOS POSTERIORES AL PROCESO.

Finalmente, se enumeran los aspectos más importantes, relacionados en este caso con los aspectos que se desarrollan después del proceso de electrohilado.

En todos los trabajos mencionados anteriormente, salvo en el que se comparan los sistemas de bombeo (33), las fibras resultantes se analizan mediante microscopía electrónica de barrido. Adicionalmente, con el uso de cámaras convencionales, la posibilidad de observar la trayectoria del polímero una vez disparado es posible mediante la iluminación y el fondo apropiados. Por otro lado, como se menciona en el trabajo de Reneker y Yarin, aquellas capaces de capturar mil fotogramas por segundo facilitan el cálculo de la velocidad del polímero. (15).

A continuación, se presenta en la *Tabla 4 un* resumen donde se enumeran las disoluciones, las aplicaciones y los métodos empleados para caracterizar las nanofibras obtenidas mediante el proceso de electrohilado.

Polímero (s)	Aplicaciones	Caracterización
Poli (glicólido) (PGA)	Ingeniería de tejidos, andamios celulares	SEM, TEM
Poli (láctico-co-glicólico) (PLGA)	Aplicaciones biomédicas, curación de heridas	SEM, WAXD, SAXS
Poli ( $\epsilon$ -caprolactona) (PCL)	Ingeniería de tejidos óseos	SEM
Poli (l-láctico) (PLLA)	Sustrato tridimensional para células	SEM
Poliuretano (PU)	Plantilla de tejido para tratamiento de cicatrices	SEM
Poli (etileno-co-vinil alcohol) (PEVA)	Andamios celulares	SEM
Poliestireno (PS)	Ingeniería de tejidos cutáneos	SEM
1,2-Polibutadieno sindiotáctico	Aplicaciones de ingeniería de tejidos	ESEM, XRD, FTIR
Fibrinógeno	Tratamiento de heridas	SEM, TEM
Poli (Vinil alcohol/ Celulosa acetato (PVA/CA)	Biomateriales	SEM, FTIR, WAXD
Celulosa acetato	Membranas o fieltros absorbentes	SEM, FTIR
Poli (vinil alcohol)	Apósitos para heridas	SEM, EDX
Fibroína de seda, seda/ PEO	Andamios de nanofibras para ingeniería de tejidos	SEM, FTIR, XPS
Seda	Aplicaciones biomédicas	SEM, TEM, WAXD
Fibroína de Seda	Andamios de nanofibras para apósitos para heridas	SEM, ATR-IR, C CP/MAS NMR, WAXD, NMR
Seda/ chitosan	Apósitos para heridas	SEM, análisis de viscosidad
Chitosan/ PEO	Andamios para ingeniería de tejidos, distribución de medicamentos, tratamiento de heridas	SEM, XPS, FTIR, DSC
Gelatina	Andamio para apósito de heridas	SEM, evaluación mecánica
Ácido Hialurónico, (HA)	Implantes médicos	SEM
Celulosa	Membrana de afinidad	SEM, DSC, ATR-FTIR
Gelatina/ polianilina	Andamios de nanofibras para ingeniería de tejidos	SEM, DSC
Colágeno/ chitosan	Biomateriales	SEM, FTIR

Tabla 4. Diferentes polímeros con los que se puede realizar el proceso de electrohilado así como las técnicas para el análisis de las fibras resultante. Tomada de (18)

## METODOLOGÍA

El campo de las nanofibras es muy amplio, desde la aplicación de los andamios celulares hasta la ingeniería de superficies (recubrimiento de metales). Las nanofibras también se pueden utilizar para la elaboración de filtros de alta calidad. Sin embargo, el uso que se le da en el campo médico, donde se ha visto su empleo en el desarrollo de telas estériles o compresas que se aplican a las heridas para protegerlas y acelerar su recuperación y sanación.

Como se ha mencionado, no es muy clara la existencia de un consenso en cuanto al impacto de la variable distancia colector-emisor (aguja o capilar metálico) en la morfología de las fibras obtenidas. Sin embargo, varios autores hacen énfasis en su importancia. Un ejemplo de la relevancia de esta variable en el proceso, es que, si el colector y la aguja se encuentran muy cerca, puede que se produzca un arco debido a la fuerza causada por el campo eléctrico, lo que deriva en que no se produzca fibra alguna (dado que los electrones no se transfieren al fluido). En el caso contrario, algunos autores sustentan que hay un umbral de distancia para obtener fibras de cierta morfología o con ciertas características. De esta manera, cuando se encuentran fuera de éste, se obtienen características diferentes.

27

Teniendo en cuenta estas consideraciones junto con el resultado de las observaciones realizadas durante la configuración del sistema de electrohilado utilizado en este trabajo, surgió la necesidad de contar con un equipo de mayor precisión para optimizar el proceso. De esta forma es como se generó la idea de proponer un primer prototipo posicionador de colector para controlar la distancia colector-aguja, dando paso a la fase de pruebas preliminares.

## CONFORMACIÓN DEL SISTEMA

El primer paso para la construcción del sistema consistió en la búsqueda de actuadores disponibles, motores de corriente directa o motores a pasos, así como los componentes que deben ser acoplados para que sean capaces de colocar la placa de recolección a una distancia deseada.

De lo anterior se encontró que ambos motores pueden realizar dicha tarea, aunque en el caso de los motores a pasos, se puede disponer de la realimentación para controlar su velocidad, ya que esta es proporcional a la frecuencia de los pulsos de entrada. Además de que una sola vuelta puede ser dividida en un número conocido y constante de pasos o micropasos. En la *Tabla 5* se presenta una comparación de las características de los posibles actuadores para el sistema.

Tipo de Motor	Ventajas	Desventajas
<b>Motor a pasos</b>	La posición del eje es precisa (proporcional a los pulsos de entrada) Alto par de retención No requiere realimentación	Requiere de un controlador para manejar los pulsos de entrada Baja velocidad angular
<b>Motor de corriente directa</b>	La velocidad angular depende del voltaje aplicado Alta disponibilidad	Su vida útil es menor, debido a la conmutación en las escobillas

*Tabla 5. Tabla de comparación de las características de un motor a pasos y uno de corriente directa. (18)*

---

**FASE DE PRUEBAS PRELIMINARES.**

En una primera etapa, se construyó el prototipo que se muestra en la *Figura 19*. Para este caso se seleccionó un motor a pasos y fue construido con acrílico y componentes disponibles en el momento del ensayo, tales como:

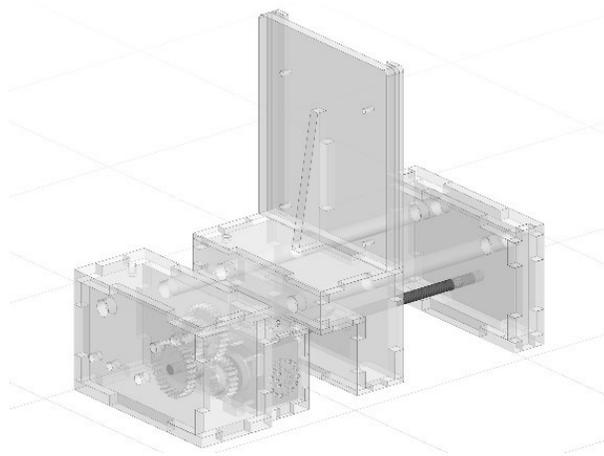


Figura 19. Imagen del primer prototipo de posicionador de colector.

- Motor de 200 pasos por vuelta.
- Tornillo estándar.
- Anillos de retención.
- Acoplamiento para el tornillo y el eje del motor.

29 Por otro lado, para disminuir el desplazamiento por vuelta del tornillo, así como para incrementar el par de torsión que éste experimenta, se decidió acoplar una transmisión de engranes con una reducción de 2:1 que se muestra en la *Figura 20*. La relación de los dientes fue obtenida mediante un programa de diseño asistido por computadora.

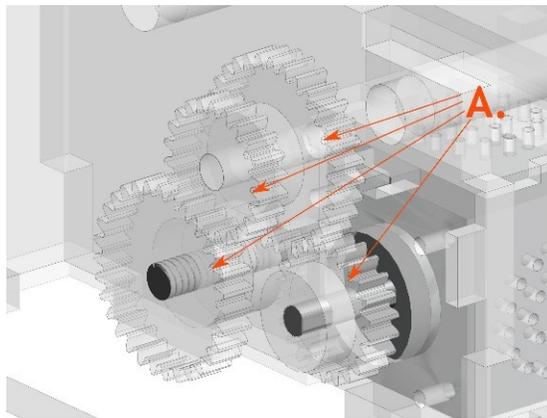
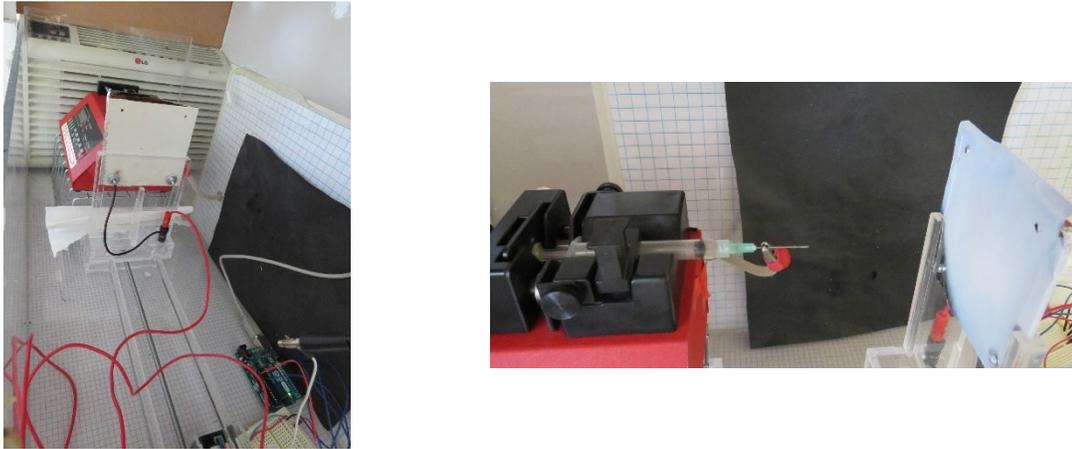


Figura 20. Esquema de la transmisión del primer prototipo.

Respecto a la parte de electrónica se diseñó un programa para contar el número

de pasos requeridos y así desplazar la tuerca, acoplada al tornillo, la distancia correspondiente. De esta forma se permite hacer la transición de un sistema mecánico a uno controlado electrónicamente. A continuación, en la *Figura 21* se muestran las imágenes del dispositivo durante el proceso de electrohilado.



*Figura 21. Fotografías de las pruebas realizadas en el laboratorio con el primer prototipo y la bomba disponible.*

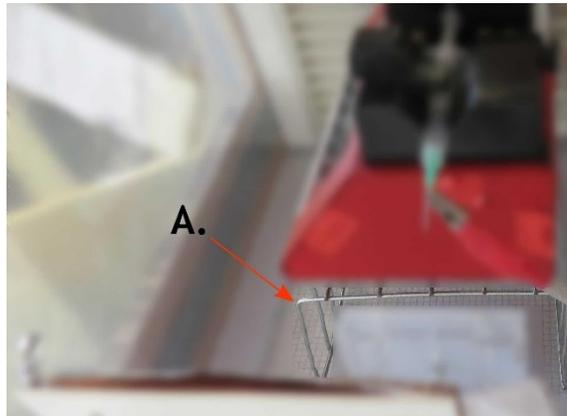
Como se ha mencionado, la propuesta de este dispositivo surgió como respuesta a la problemática observada en el laboratorio. Donde al posicionar el colector de forma manual, no existe certeza de la distancia colector-aguja. Como se vio en los trabajos bibliográficos consultados, este factor es importante cuando se desea tener un mejor control durante el proceso de electrohilado en la morfología de las fibras obtenidas.

La función principal del prototipo propuesto, consiste en colocar la placa colectora a una distancia específica de la aguja, de tal forma que se asegure que esta corresponda con la medida.

Como resultado de las primeras pruebas, se observaron los siguientes inconvenientes con respecto a la configuración disponible en el laboratorio al momento de llevarlas a cabo. Estos inconvenientes se enlistan a continuación:

- a) La bomba de inyección ocasionaba que la aguja colocada en ésta, se orientara a una altura distinta a la necesaria para la recolección de fibras.
- b) La carcasa de la bomba interfería con el mecanismo propuesto (posicionador del

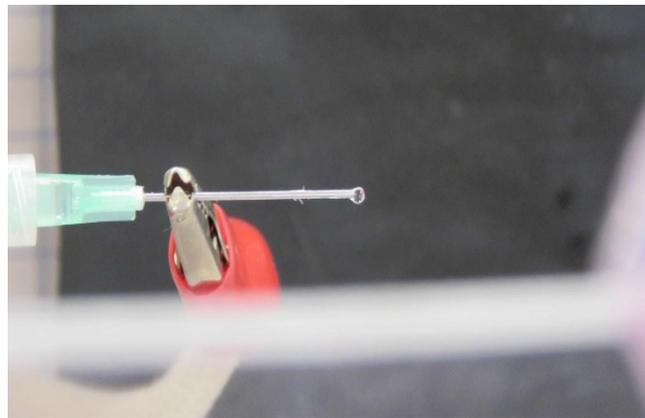
colector). Es por esto que se añadió el soporte (A.) que se observa en la *Figura 22*.



*Figura 22. Fotografía del soporte añadido para asegurar que la altura la aguja coincidiera con la placa de recolección.*

- c) La conexión de la fuente de alto voltaje hacia la aguja, ocasionaba una deformación en ésta como se muestra en la *Figura 23*; por lo que ya no se encontraba de forma perpendicular a la superficie de recolección.

31



*Figura 23. Fotografía donde se observa la deformación en la aguja durante la prueba.*

- d) Debido a que la interfaz de la bomba está basada en botones y una pantalla LCD que se localiza en la carcasa y esta bomba se localiza en el interior de la cabina de electrohilado, es inevitable detener todo el proceso en caso de que sea necesario modificar algún parámetro del proceso de bombeo. En la *Figura 24* se aprecia la fotografía de la bomba de inyección empleada.

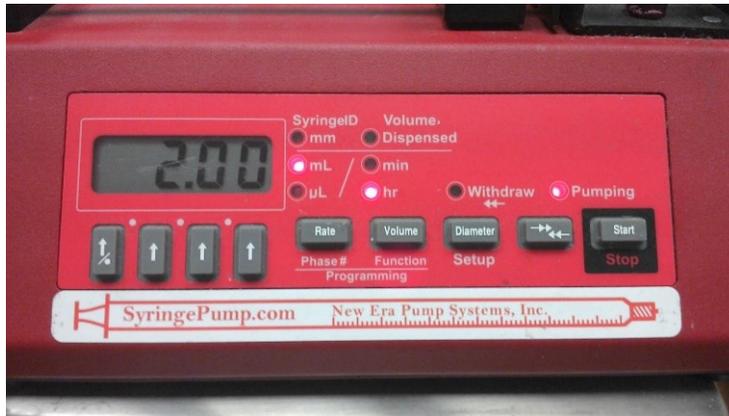


Figura 24. Fotografía de la interfaz de la bomba de inyección disponible en el laboratorio.

- e) Los componentes electrónicos se encontraban en el área de electrohilado, por lo que éstos permanecían altamente expuestos al campo eléctrico.
- f) La forma de ensamblar el colector, así como los materiales del mismo, ocasionaban que una región del material se perdiera al finalizar el proceso, ya que éste era depuesto sobre el tornillo destinado a la conexión con la fuente de alto voltaje como se aprecia en la *Figura 25*. En A. se observan los espacios dejados tras retirar los tornillos que sostienen la placa de recolección, en B. se observa el tornillo cubierto por polímero, antes de ser retirado.

32

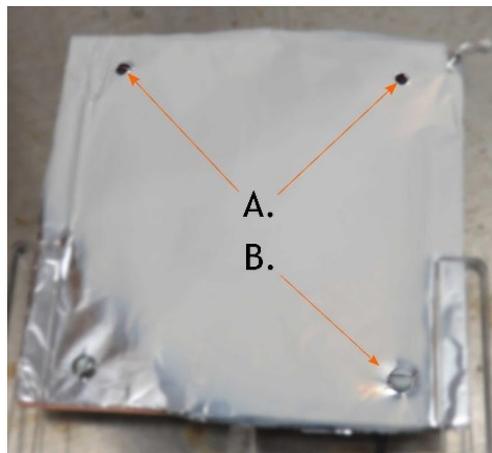
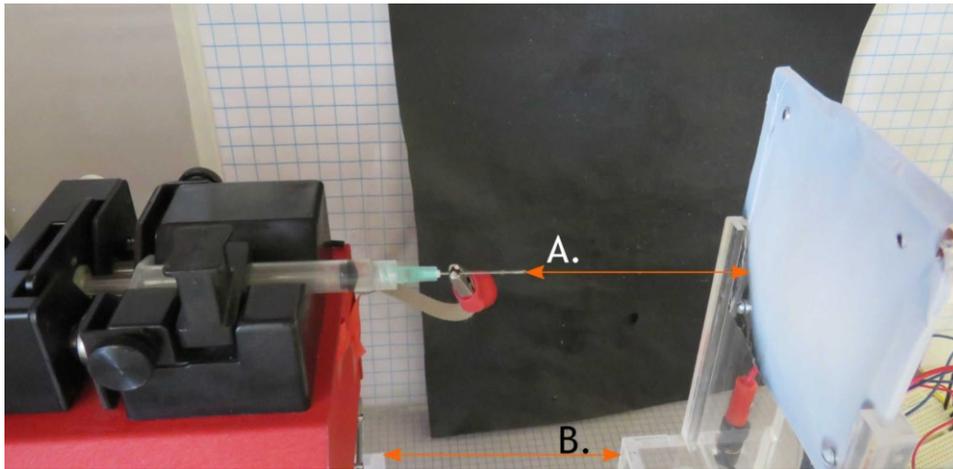


Figura 25. Fotografía de la placa de recolección antes de ser retirada del dispositivo de posicionamiento.

- g) Con respecto a la distancia aguja-colector (A.), se carecía de certeza suficiente para asegurar que ésta coincidiera con la distancia deseada, ya que la longitud

del segmento entre el dispositivo de posicionamiento y la bomba de inyección (B.) era desconocida. En la *Figura 26* se aprecia que como consecuencia de que esta última sea desconocida, no se puede asegurar que A. sea la distancia deseada.



*Figura 26. Imagen de las distancias aguja-colector y bomba de inyección-posicionador.*

33

h) Debido a que la alineación de los engranes era inapropiada (resultado del proceso mediante el cual fueron obtenidos), así como por el material de los mismos, se ocasionaron vibraciones en todo el sistema y éstos sufrieron cierto desgaste, por lo que tuvieron que ser reemplazados.

Adicionalmente a este estudio y teniendo en cuenta la bibliografía consultada, se realizaron simulaciones de la distribución del campo eléctrico mediante una aplicación de modelado por elemento finito con la finalidad de observar los efectos de introducir elementos de distintas geometrías en las líneas de campo eléctrico como en las equipotenciales en la configuración de electrohilado convencional.

---

#### SIMULACIONES DE CAMPO ELÉCTRICO.

Como se mencionó, el objetivo de estas simulaciones fue el de observar, en primera instancia las líneas de campo eléctrico y equipotenciales para una configuración convencional de electrohilado como para visualizar los efectos de añadir geometrías distintas conectadas a la jeringa como a la placa de recolección.

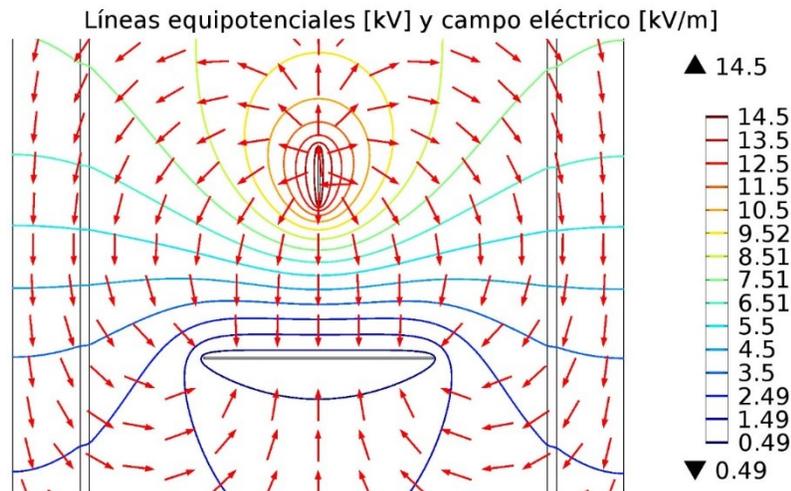
Las simulaciones fueron realizadas bajo las consideraciones mostradas en la *Tabla 6*:

Distancia aguja-colector	100[mm]
Diferencia de potencial aplicada	15[kV]
Medio en el que se realizó	Aire
Material para el capilar metálico	Acero inoxidable
Material para la placa de recolección	Lámina de cobre de 1.25[mm] de espesor

*Tabla 6. Tabla con las condiciones para las simulaciones de campo eléctrico.*

En las imágenes que se muestran a continuación, correspondientes a la *Figura 27* y *Figura 28* se observan las simulaciones realizadas para la configuración convencional de electrohilado aguja-colector, así como con la adición de una placa paralela a la de recolección conectada a la aguja, respectivamente.

34



*Figura 27. Imagen de la simulación por elemento finito de la configuración convencional de electrohilado.*

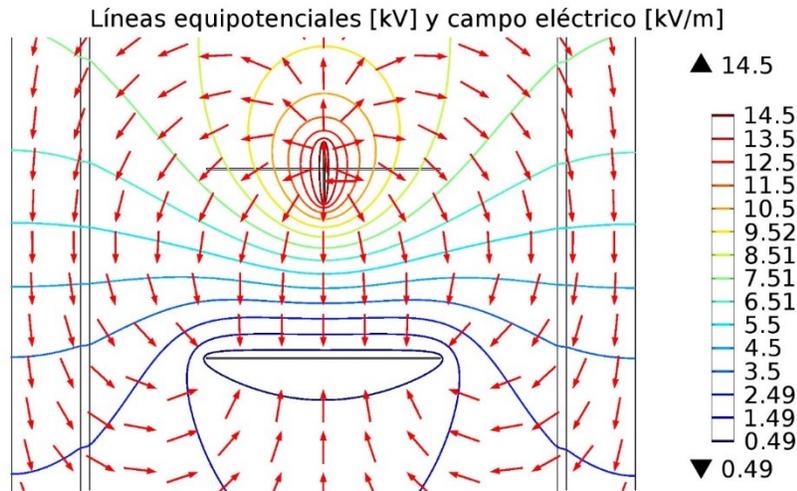


Figura 28. Imagen de la simulación por elemento finito de la configuración con placa paralela a la de recolección.

35

Para facilitar el análisis de la información proporcionada por las simulaciones anteriores, se realizó una gráfica (Figura 29) en la que se compara la intensidad del campo eléctrico con respecto a la distancia entre la aguja y la placa de recolección para las configuraciones de la Figura 27 y la Figura 28. En esta se puede apreciar que, para la convencional, la intensidad del campo eléctrico decrece conforme se aproxima a la posición de la placa de recolección. En contraste, con la incorporación de la placa conectada a la aguja, esta se mantiene constante.

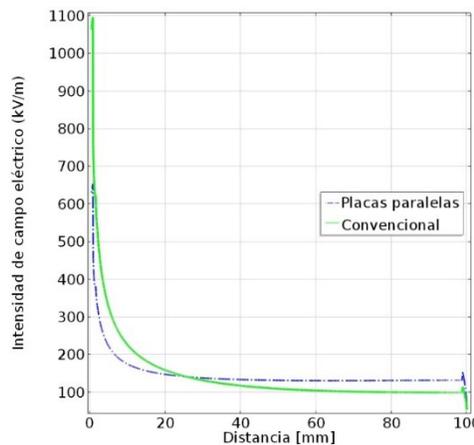


Figura 29. Gráfica comparativa de la intensidad de campo eléctrico en la punta del capilar metálico, para configuración convencional y placas paralelas.

Por otra parte, se propuso una manera para contener el campo eléctrico dentro del área de electrohilado, donde el área para desarrollar este proceso fue rodeada por placas metálicas (acero) aterrizadas. En la *Figura 30* y la *Figura 31* se visualizan las simulaciones correspondientes a la configuración convencional como a la de placas paralelas con la propuesta mencionada.

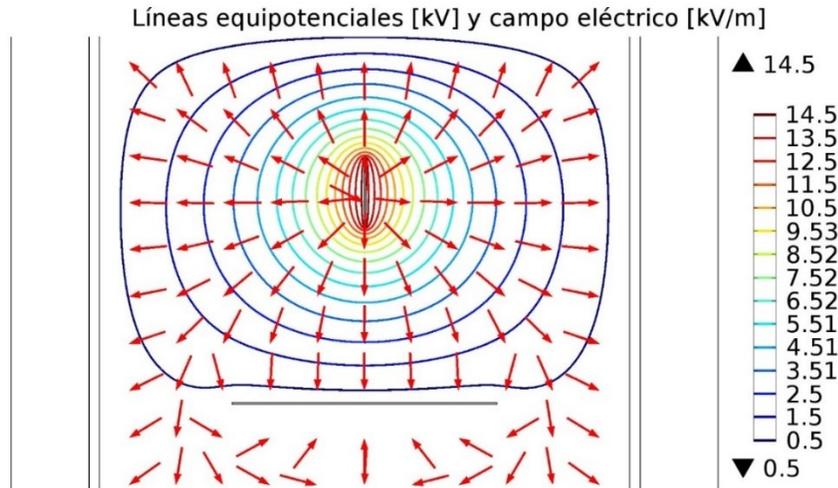


Figura 30. Imagen de la simulación por elemento finito de la configuración convencional de electrohilado, para la propuesta de placas aterrizadas.

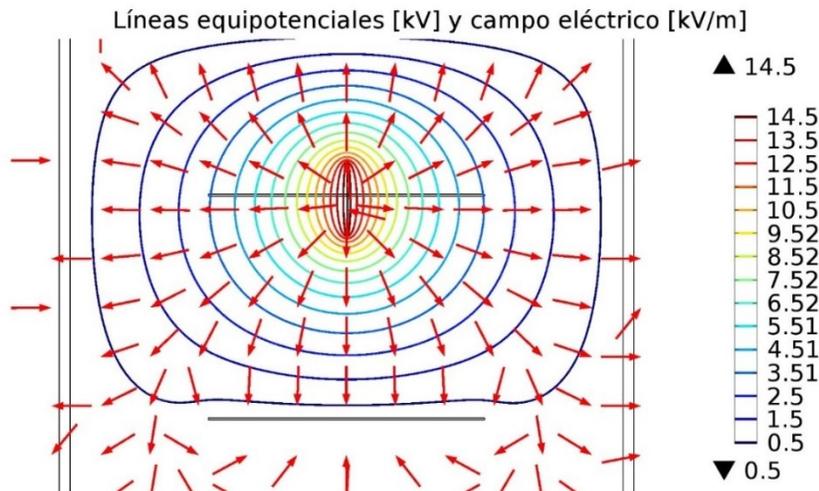
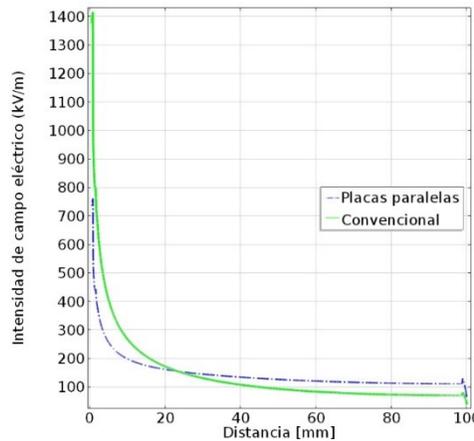


Figura 31. Imagen de la simulación por elemento finito de la configuración con placas paralelas y placas aterrizadas.

Del análisis de las simulaciones anteriores, se puede observar que para ambos

casos (configuración convencional y placas paralelas) el campo eléctrico se mantiene dentro del área delimitada por las placas de acero que fueron aterrizadas. Sin embargo, la incorporación de estas tiene la consecuencia de que la caída de potencial entre la aguja con respecto a la placa de recolección sea mayor que la apreciada en la *Figura 27* y la *Figura 28*.

Con respecto a la intensidad del campo eléctrico, en la *Figura 32* se puede observar que, en el caso de la configuración convencional, en el área cercana a la aguja, la intensidad del campo eléctrico es mayor que para la de placas paralelas. Por otro lado, el comportamiento presentado es similar al de la *Figura 29*.



*Figura 32. Gráfica comparativa de la intensidad de campo eléctrico en la punta del capilar metálico, para configuración convencional y placas paralelas con jaula aterrizada.*

Finalmente, para observar los cambios en la distribución del campo eléctrico como de las líneas equipotenciales, se alteró la geometría de la placa de recolección. Esta fue dividida en dos secciones de tal forma que existe un espacio entre ellas, mostrada en la *Figura 33*. Adicionalmente a la nueva configuración, se incorporó una placa paralela conectada a la aguja, correspondiente a la *Figura 34*.

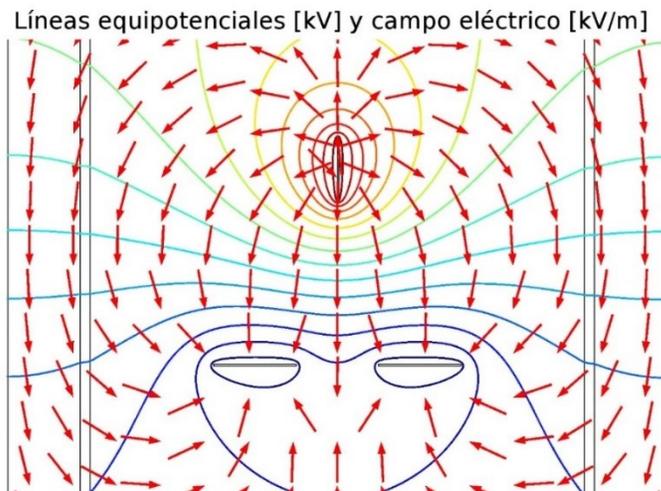


Figura 33. Imagen de la simulación por elemento finito de la configuración convencional de electrohilado con el colector de geometría distinta.

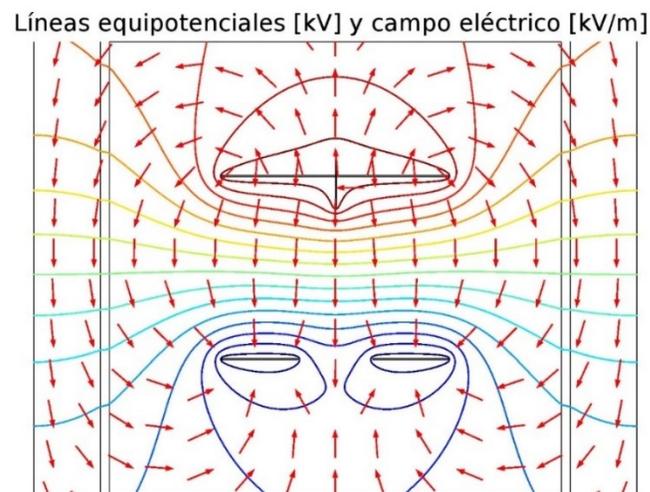


Figura 34. Imagen de la simulación por elemento finito de la configuración con placas paralelas y colector de geometría distinta.

Nuevamente, para realizar el análisis de estas simulaciones, se graficó en la *Figura 35* la intensidad del campo eléctrico para las condiciones de la *Figura 32* y la *Figura 29*. En este caso el comportamiento observado para la configuración convencional como para la de placas paralelas fue similar. Sin embargo, conforme el campo eléctrico se aproxima a la sección con el espacio entre las placas, la intensidad se incrementa nuevamente.

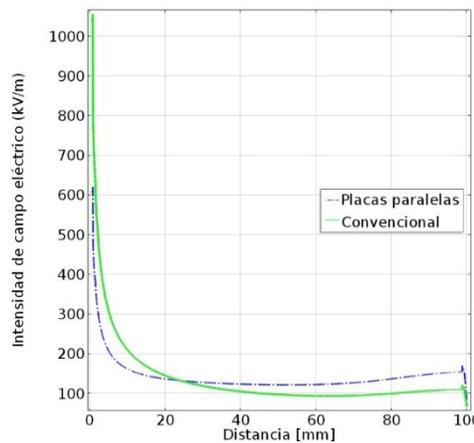


Figura 35. Gráfica comparativa de la intensidad de campo eléctrico en la punta del capilar metálico, para configuración convencional y placas paralelas con la nueva geometría en la placa de recolección.

En conclusión, del conjunto de simulaciones realizadas, los aspectos más relevantes de las mismas radican en los siguiente:

- La intensidad del campo eléctrico es más uniforme cuando se añade una placa paralela a la de recolección, conectada a la aguja.
- Es posible confinar el campo eléctrico al área de electrohilado. Sin embargo, la diferencia de potencial dentro de dicha área cae rápidamente.
- La división de la placa de recolección puede ayudar a una disminución de la inestabilidad cercana a esta área como resultado del incremento observado en la *Figura 35*.

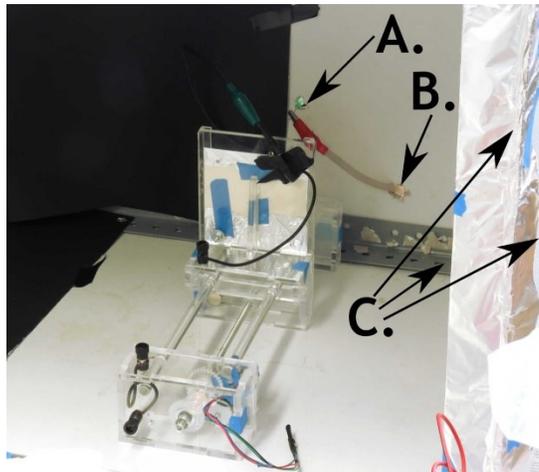
De este modo, retomando los inconvenientes descritos anteriormente y en conjunto con las conclusiones de las simulaciones realizadas, se propuso la siguiente solución:

- a) Construir una cabina con la capacidad de mantener el campo eléctrico “encerrado” para evitar daños, tanto en la bomba de inyección, como en los componentes electrónicos que se pudieran añadir para adquirir señales o mover actuadores.

## SEGUNDAS PRUEBAS PRELIMINARES

Para verificar los conceptos anteriores, se realizó otra prueba bajo las siguientes condiciones:

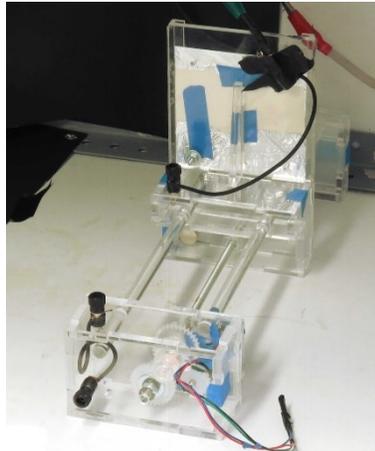
- a) Se conservó la misma bomba de inyección de la primera prueba, así como el posicionador del colector, pero esta vez la bomba de inyección se colocó por detrás de una carcasa de metal (cabina) y el segundo dentro de ella, como se aprecia en la *Figura 36*. Esto con el fin de que el campo eléctrico se conservara dentro de la misma.



*Figura 36. Imagen del experimento realizado con la carcasa metálica.*

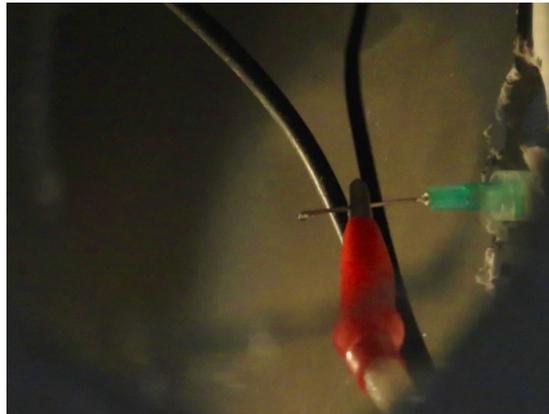
También se observa que en la *Figura 36*, **A.** corresponde a la jeringa colocada en la bomba e introducida hacia la cabina metálica, **B.** al orificio para una de las terminales de la fuente de alto voltaje y **C.** a algunas de las partes metálicas con las que se cubrió la cabina.

- b) Las terminales de la fuente se introdujeron en la cabina propuesta a través de orificios en las caras de la misma. Además, las conexiones de las terminales de la fuente de alto voltaje se realizaron directamente en la aguja como en el colector como se observa en la *Figura 37*.



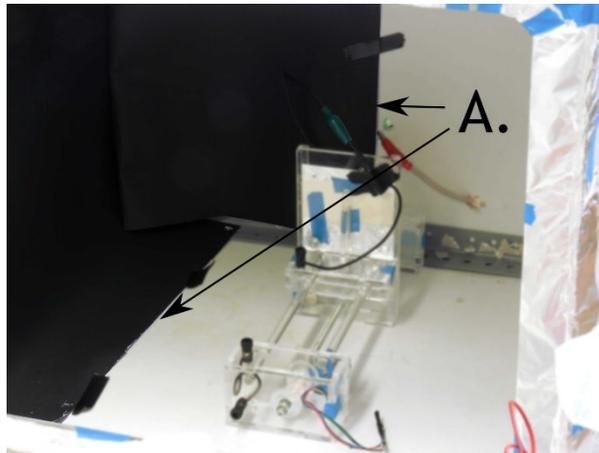
*Figura 37. Fotografía con el colector y la aguja de la jeringa conectados directamente a la fuente de alto voltaje.*

- c) En una de las caras de la cabina se realizó un orificio para poder capturar fotografías y vídeo mediante la cámara como la realizada para la *Figura 38*.



*Figura 38. Fotografía tomada a través de la apertura en la cabina.*

- d) Adicionalmente, la cabina metálica se cubrió con paneles negros y se añadió una fuente de iluminación para intentar controlar las condiciones en que se capturó el vídeo y las fotografías como se muestra en **A.** de la *Figura 39*.

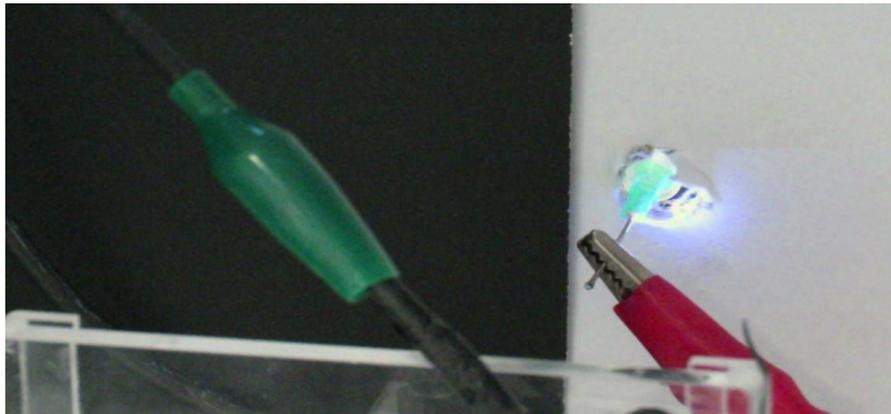


*Figura 39. Fotografía de los paneles añadidos como elemento de contraste para la toma de fotografías.*

Los resultados de este experimento fueron valiosos en términos del diseño, debido a que pudo observarse lo siguiente:

- 1) En caso de conservar la cabina de metal, se debe considerar el diámetro de los oroficios, ya que puede generarse un arco como resultado de la magnitud del potencial presente.

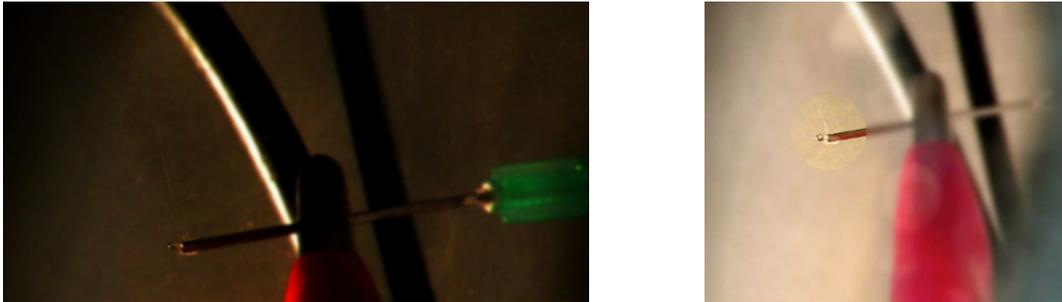
42



*Figura 40. Fotografía del arco eléctrico creado entre la aguja y cabina metálica.*

- 2) A pesar de que fue visible el inicio del jet mediante la cámara convencional y las condiciones propuestas, no fue posible observar el cono de Taylor.
- 3) Durante la emisión de la disolución del polímero, gotas de la disolución se derramaron de la punta de la aguja hacia la base de la cabina.

- 4) Debido a que la cabina propuesta se encontraba conectada a la otra terminal de la fuente de alto voltaje, al igual que la placa de recolección, las fibras también se depositaban en ella, por lo que, en lugar de tener un solo hilo constante, se obtuvieron varios puntos de disparo y recolección.



*Figura 41. Fotografías donde se observan más puntos de disparo que no se dirigen hacia la placa de recolección.*

Finalmente, en relación con la cabina metálica, se pudo validar mediante la simulación de la distribución del campo que éste no escapaba, de tal forma que los elementos que fueran colocados por fuera de ella estarían protegidos de una descarga. Sin embargo, su implementación previene que la deposición de las fibras se produzca únicamente en la placa colectora.

43

---

#### DISEÑO DE LOS SISTEMAS ELABORADOS: CONJUNCIÓN BOMBA Y POSICIONADOR DE COLECTOR.

Como resultado de las dos pruebas preliminares, se decidió proponer el diseño de un nuevo prototipo de posicionador para el colector y una nueva bomba de inyección. A continuación, se describe el proceso seguido para la obtención de los dispositivos mencionados.

El primer aspecto que se tuvo en cuenta fue el referente a la medición de la distancia para posicionar el colector. Se investigaron sensores con las características necesarias para poder medirla de forma precisa. A continuación, se muestra en la *Tabla 7* una comparación de su rango:

Sensor	Características
 <p data-bbox="212 520 643 579"><i>Figura 42. Imagen del sensor óptico para medir distancia. (19)</i></p>	<p data-bbox="678 310 1351 401">Rangos de operación entre los 20[mm] hasta 1500[mm]</p> <p data-bbox="678 443 1157 478">La respuesta es no lineal (analógica)</p> <p data-bbox="678 520 1179 556">No requiere acoplamientos mecánicos</p>
 <p data-bbox="212 821 643 879"><i>Figura 43. Imagen del sensor resistivo para medir distancia. (20)</i></p>	<p data-bbox="678 638 1330 674">Rango de operación desde 15 [mm] hasta 60[mm]</p> <p data-bbox="678 716 964 751">La respuesta es lineal</p> <p data-bbox="678 793 1346 829">Requiere forzosamente un acoplamiento mecánico</p>
 <p data-bbox="224 1115 631 1205"><i>Figura 44. Imagen del sensor ultrasónico para medir distancia. (21)</i></p>	<p data-bbox="678 926 1292 961">Rango de operación desde 0 [m] hasta 7.65[m]</p> <p data-bbox="678 1003 1351 1094">La respuesta es no lineal (digital, con incrementos cada 10[mm])</p> <p data-bbox="678 1136 1179 1171">No requiere acoplamientos mecánicos</p>

*Tabla 7. Tabla comparativa de sensores de distancia.*

Por otro lado, se investigaron dispositivos para electrohilado comerciales para averiguar si alguno de ellos posee algún sistema para posicionar el colector independientemente de la forma en que se hiciera la colocación de este: automáticamente o manualmente. Como se muestra en la *Tabla 8*

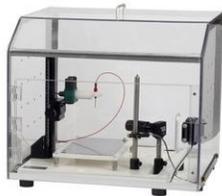
Dispositivo	Especificaciones con respecto a la distancia del colector
 <p data-bbox="228 636 740 716"><i>Figura 45. Imagen del sistema Spraybase® Platform. (22)</i></p>	<p data-bbox="792 394 1349 474">Ajuste de la distancia aguja - colector manual.</p> <p data-bbox="792 520 1211 554">Se omite el rango de operación.</p>
 <p data-bbox="245 1083 724 1146"><i>Figura 46. Imagen del sistema Contipro 4SPIN®. (23)</i></p>	<p data-bbox="792 804 1349 884">Ajuste de la distancia mediante controlador</p> <p data-bbox="792 930 1122 963">Desde 50 hasta 250 [mm]</p>
 <p data-bbox="204 1486 764 1549"><i>Figura 47. Imagen del sistema Elmarco NS Lab. (24)</i></p>	<p data-bbox="792 1220 1252 1253">Se omite como se realiza el ajuste.</p> <p data-bbox="792 1299 1321 1333">Rango de operación: 120 hasta 240[mm]</p>

Tabla 8. Tabla comparativa de sistemas comerciales para electrohilado.

De esta revisión se puede concluir que a los fabricantes les preocupa resolver la necesidad del usuario sobre el posicionamiento del colector, ya que de no ser así, no ofrecerían una alternativa para ello. Asimismo, puede notarse que depende de la escala del equipo si el posicionador es automático o manual.

Con respecto al diseño de la bomba, con base en el primer prototipo para el posicionador del colector y la búsqueda de bombas de inyección comerciales cuya comparación se observa en la *Tabla 9*, se encontró que el actuador empleado en estas consiste en un motor a pasos.

Bomba comercial	Fabricante y especificaciones
 <p data-bbox="250 800 721 863"><i>Figura 48. Bomba de inyección Harvard Apparatus. (25)</i></p>	<p data-bbox="792 537 1065 573">Harvard apparatus.</p> <p data-bbox="792 594 1333 630">Motor a pasos de 0.9 grados por paso.</p> <p data-bbox="792 651 1349 737">Permite micropasos de hasta un dieciseisavo.</p> <p data-bbox="792 758 1349 844">15360 micropasos por vuelta de tornillo.</p>
 <p data-bbox="217 1163 753 1226"><i>Figura 49. Bomba de inyección KD Scientific. (26)</i></p>	<p data-bbox="792 900 984 936">KD Scientific.</p> <p data-bbox="792 957 1333 993">Motor a pasos de 0.9 grados por paso.</p> <p data-bbox="792 1014 1349 1100">15360 micropasos por vuelta de tornillo.</p>
 <p data-bbox="217 1514 753 1549"><i>Figura 50. Bomba de inyección New Era. (27)</i></p>	<p data-bbox="792 1264 919 1299">New Era.</p> <p data-bbox="792 1320 1333 1356">Motor a pasos de 0.9 grados por paso.</p> <p data-bbox="792 1377 1349 1463">Permite micropasos de un medio o hasta un octavo.</p> <p data-bbox="792 1484 1349 1520">Tornillo de veinte vueltas por pulgada.</p>

*Tabla 9. Tabla comparativa de bombas de inyectoras comerciales.*

Un aspecto interesante de las especificaciones de las dos primeras bombas de inyección, consiste en que la relación de micropasos para una revolución del motor difiere de la esperada (múltiplos de 2 o 16) como se muestra en la *Tabla 10*:

	Pasos por vuelta para medios pasos	Pasos por vuelta para pasos de un dieciseisavo
Motor de 200 pasos	400	3200
Motor de 400 pasos	800	6400

Tabla 10. Tabla comparativa de la relación de micropasos.

De lo anterior, se puede observar que la relación proporcionada por los fabricantes no corresponde a algún múltiplo de la *Tabla 10*, por lo que se pueden concluir aspectos importantes relacionados con la transmisión del movimiento del motor hacia el émbolo de la jeringa es necesario:

- a) El empleo de un tornillo con características especiales, excepto para la bomba New Era ya que se proporcionan en su hoja de especificaciones.
- b) El uso de elementos de transmisión de potencia como el de la *Figura 51*, tales como engranes o bandas que permitan cambiar la relación de vueltas del motor con respecto al tornillo.

47

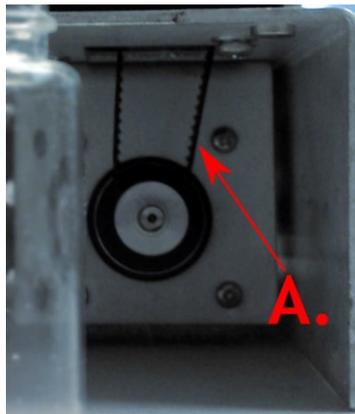


Figura 51. Fotografía del elemento de transmisión flexible acoplado al motor de una bomba comercial.

- c) Implementar los dos puntos anteriores para obtener mayor resolución de desplazamiento por cada revolución del actuador.
- d) En adición a lo anterior, el uso del mismo tipo de componentes para asegurar la jeringa y empujar el émbolo como se muestra en la *Figura 52*

## SISTEMA PARA ASEGURAR POSICIÓN Y FLUJO VOLUMÉTRICO DURANTE EL ELECTROHILADO

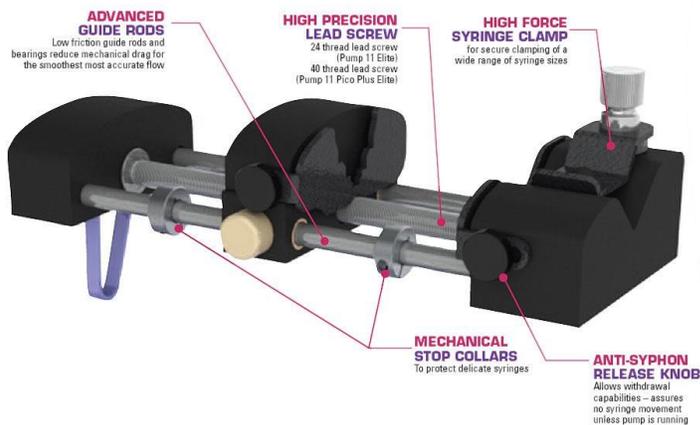


Figura 52. Diagrama del mecanismo empleado en bombas comerciales para asegurar la posición de la jeringa. (28)

Con base en los factores mencionados, se buscó construir el prototipo de una bomba de inyección que tuviera las siguientes ventajas frente a las comerciales:

- 1) Aplicación directa del movimiento producido por el motor (eliminación de la transmisión mecánica).
- 2) Reducción del número de componentes mecánicos.

Adicionalmente y bajo la premisa de que tanto el posicionador del colector como la nueva bomba de inyección funcionaran bajo el mismo principio del actuador lineal del primer prototipo y con el objetivo de sustituir la transmisión mecánica por dispositivos electrónicos capaces de controlar tanto los pasos como la potencia para el actuador se retomaron las ventajas propuestas para la bomba de inyección frente a las comerciales mencionadas anteriormente. Es por esto que se investigaron dispositivos disponibles comercialmente para lograrlo. Estos se comparan en la *Tabla 11*.

Modelo	Características	
<b>ULN2803 (29)</b>	Etapa de potencia únicamente. La secuencia para polarizar las bobinas está dada por un dispositivo externo.	Arreglo de ocho canales de pares Darlington en ánodo común. Maneja hasta 50[V] y 500[mA] por canal.
<b>L293D (30)</b>		Arreglo de cuatro canales de medios puentes H con diodos de protección. Soporta hasta 36[V] y 600[mA] por canal.
<b>STSPIN220 (31)</b>	Etapa de potencia. Control de corriente para cada bobina y secuencia de polarización integradas.	Operación en bajo voltaje: 1.8-10[V]. Corriente máxima: 1.3 [A] por bobina. Opción de pasos completos o múltiplo de hasta 256 micropasos por paso.
<b>L6219 (32)</b>	Protección térmica y contra circuito corto.	Rango de voltaje: 10 a 46[V] Corriente máxima: 750[mA] por bobina. Pasos completos o múltiplo de hasta 2 micropasos por paso.
<b>DRV8825 (33)</b>	Requieren de una fuente de reloj externa.	Rango de voltaje: 8.2 a 45[V] Corriente máxima: 2.5[A] por bobina. Pasos completos o múltiplo hasta de 32 micropasos por paso.
<b>DRV8880 (34)</b>		Rango de voltaje: 6.5 a 45[V] Corriente máxima: 2[A] por bobina. Pasos completos o múltiplo de hasta 16 micropasos por paso.
<b>L6474 (35)</b>	Además de las funciones anteriores, ofrecen interfaz mediante protocolo SPI.	Rango de voltaje: 8 a 45[V] Corriente máxima: 3[A <sub>rms</sub> ] por bobina. Pasos completos o múltiplo de hasta 16 micropasos por paso. Fuente de reloj integrada.

AMIS-30543 (36)

Rango de voltaje: 6 a 30[V]

Corriente máxima: 3[A] por bobina.

Opción de pasos completos o divisiones de hasta 128 micropasos por paso.

Tabla 11. Tabla comparativa de los controladores y etapas de potencia para motor a pasos bipolar.

Para alcanzar dichos objetivos, anteriormente planteados, se encontraron motores a pasos con características especiales:

- a) Con el tornillo acoplado directamente al imán como el mostrado en la *Figura 55*.
- b) A diferencia del mecanismo mostrado en la *Figura 55*, se visualiza uno con la tuerca acoplada al rotor en lugar de un eje sólido, como se muestra en la siguiente figura



Figura 53. Imagen donde se observa la diferencia entre el acoplamiento del eje para los motores empleados. (37)

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, los motores propuestos son los siguientes:



Figura 54. Fotografía del motor empleado para la bomba inyectora propuesta. (38)



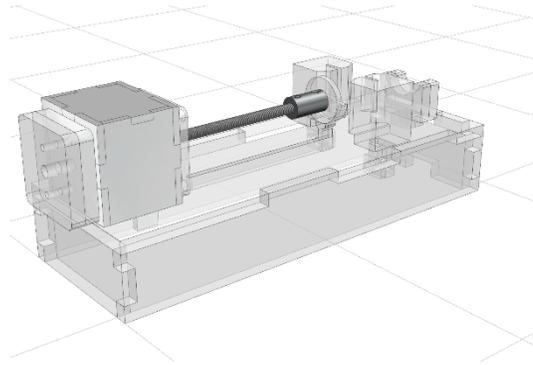
Figura 55. Fotografía del actuador para el posicionador del colector. (39).

El factor decisivo para la elección del actuador para la bomba se basó en la longitud del tornillo, ya que el desplazamiento necesario para empujar el émbolo de la jeringa es de 10[cm]. Un elemento menos importante radicó en evitar cortar el tornillo para ajustarse a dichas dimensiones.

Las especificaciones del motor seleccionado relacionadas con el desplazamiento del tornillo, son las siguientes:

- a) Doscientos pasos por vuelta.
- b) Desplazamiento de dos milímetros por revolución.
- c) Longitud del tornillo 100 [mm].

A continuación, se presenta el esquema del prototipo para bomba inyectora propuesto (Figura 56).



*Figura 56. Imagen del modelo tridimensional de la bomba inyectora propuesta.*

Para la manufactura del resto de las piezas del prototipo de la bomba de inyección propuesta, se seleccionaron dos procesos. Uno con base en el material elegido (acrílico de 6[mm] y 3 [mm]) y otro basado en la geometría de las piezas y en el proceso de manufactura, en este caso, impresión tridimensional por estereolitografía como en el caso de las piezas de la *Figura 57*.



*Figura 57. Esquema de las piezas impresas por esterolitografía para mantener la posición de la jeringa en la bomba de inyección.*

En la se observa un diagrama de la nueva bomba inyectora, donde se resaltan sus características mecánicas con respecto a las bombas de inyección comerciales.

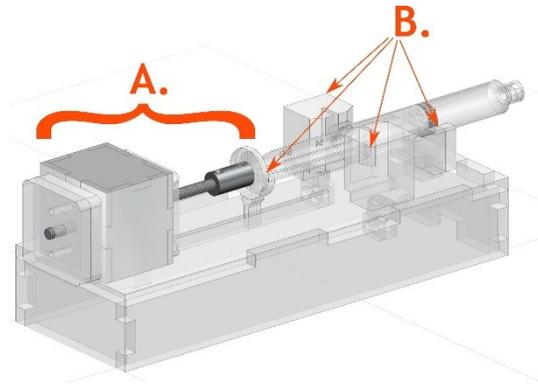


Figura 58. Diagrama de algunas de las características mecánicas de la bomba de inyección propuesta.

Las nuevas características mecánicas de la bomba propuesta consisten en:

- A. Conexión directa del motor al émbolo de la jeringa.
- B. Elementos distintos a los comerciales para mantener la posición de la jeringa.

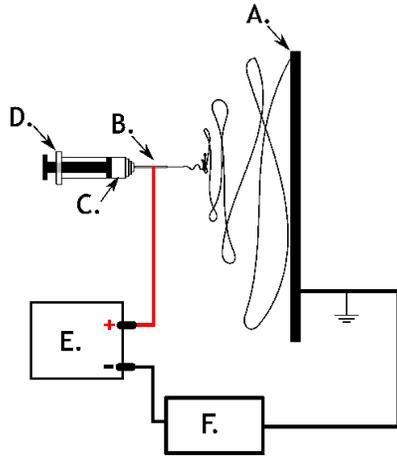
---

MEDICIÓN DE LA CORRIENTE DURANTE EL ELECTROHILADO Y OBSERVACIÓN DEL CONO DE TAYLOR.

53

En paralelo al proceso de diseño de la bomba de inyección como del posicionador del colector, se buscó observar el cono de Taylor con una cámara USB, este aspecto es trascendental en el electrohilado, ya que de éste depende que el proceso se realice continuamente.

Para asegurar que el proceso de obtener fibras sea continuo una estrategia que se puede tomar es la de observar el cono de Taylor mediante un microscopio. Además, si por alguna razón la fibra se interrumpe, la corriente será cero, como lo menciona la literatura revisada. Haciendo una analogía con un circuito eléctrico, equivaldría a que este estuviera abierto. Lo descrito anteriormente es útil en el sentido de que proporciona información adicional que puede ser empleada para lograr un mejor control del proceso de electrohilado, para esto, es necesario añadir un sensor en la posición F. como se muestra en el diagrama de la *Figura 59*:



- A. Placa de recolección.
- B. Capilar metálico.
- C. Solución de polímero.
- D. Jeringa.
- E. Fuente de alto voltaje.
- F. Sensor de corriente.

Figura 59. Esquema para una configuración convencional de electrohilado con la adición de un sensor de corriente.

Por esta razón, se consideró incluir un sensor que permita medir de manera directa o indirecta la corriente que circula a través del circuito formado por la fuente de alto voltaje, la fibra, el capilar y el colector. A continuación, se muestra una tabla con los dispositivos o configuraciones mediante los cuales se podría realizar esta medición:

**Comparativo de medición de la corriente**

<p><b>Óptico</b> (optoacoplador y resistencia)</p>	<p>Tipo de medición: Indirecto Aislado: Si Precisión: De baja a media</p>	<p>Figura 60. Diagrama de sensor óptico para medir corriente. (40)</p>
<p><b>Magnético</b></p>	<p>Tipo de medición: Indirecto Aislado: No Precisión: Media</p>	<p>Figura 61. Diagrama de sensor magnético para medir corriente. (40)</p>

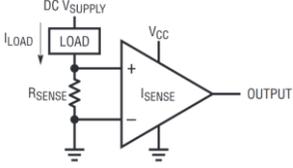
<p><b>Efecto Hall</b></p>	<p>Tipo de medición: Directo Aislado: Si Precisión: Alta</p>	 <p>Figura 62. Fotografía de placa con sensor de efecto Hall para medir corriente. (41)</p>
<p><b>Resistivo*</b></p>	<p>Tipo de medición: Indirecto Aislado: No Precisión: Alta</p>	 <p>Figura 63. Esquema de sensor resistivo para medir corriente. (42)</p>

Tabla 12. Tabla comparativa de sensores para medir corriente.

\* En este caso la corriente está dada por la ley de Ohm

#### CONCLUSIONES DE DISEÑO

En comparación con la disponible en el laboratorio, el diseño de la bomba de inyección cuenta con las siguientes características:

- a) La fuerza del actuador es ejercida directamente al centro del émbolo de la jeringa, sin pérdidas mecánicas resultado de algún elemento de transmisión de potencia como engranes o bandas.
- b) Se dispone de la pantalla LCD para observar el flujo volumétrico deseado, presente en los modelos comerciales.
- c) Se puede colocar fuera del área de electrohilado.
- d) Evita detener el proceso de electrohilado si se desea realizar algún cambio de flujo volumétrico.

En cuanto al posicionador del colector, la diferencia entre el nuevo diseño y el primer prototipo radica en que

- a) La superficie de recolección es lisa, de tal forma que el material recolectado ya no se pierde en los tornillos o en algún otro elemento en donde las fibras recolectadas puedan atorarse o sean difíciles de retirar.

- b) Eliminación del acoplamiento entre el motor y el tornillo debido a que este se encuentra integrado en el actuador.
- c) Se puede asegurar la distancia aguja-colector.
- d) El soporte de la aguja evita que esta se deforme cuando se conecta la terminal de la fuente de alto voltaje correspondiente.

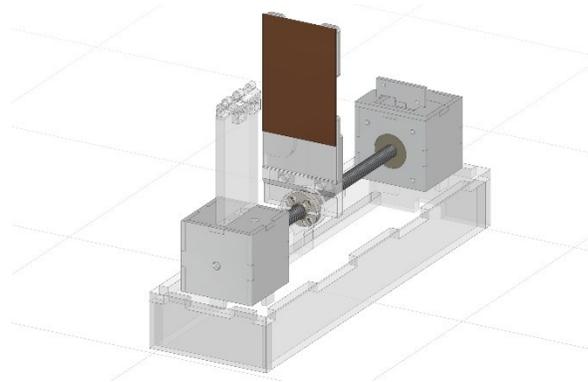


Figura 64. Imagen del dispositivo posicionador de colector propuesto.

En la *Figura 65* se comparan el primer prototipo y el nuevo posicionador de colector. En **A.** se observa que en el primero eran necesarios tornillos para conectar la placa de recolección a la terminal correspondiente de la fuente, mientras que en el segundo estos fueron eliminados. De esta manera, se proporciona una superficie lisa para conectar la placa de recolección al sistema.

56

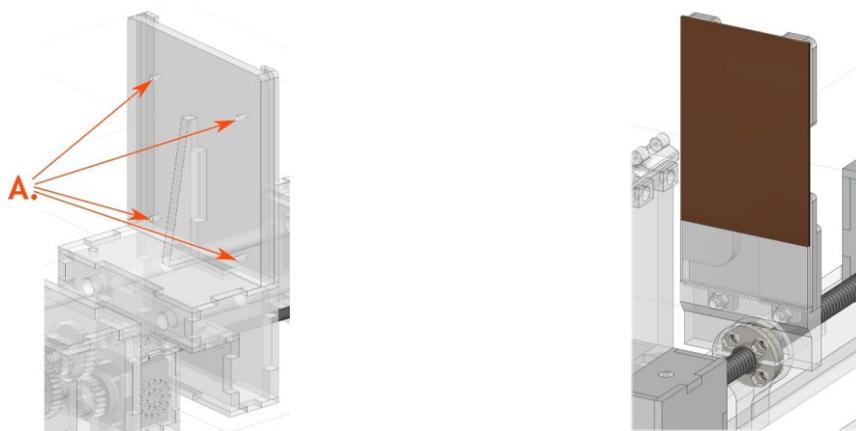
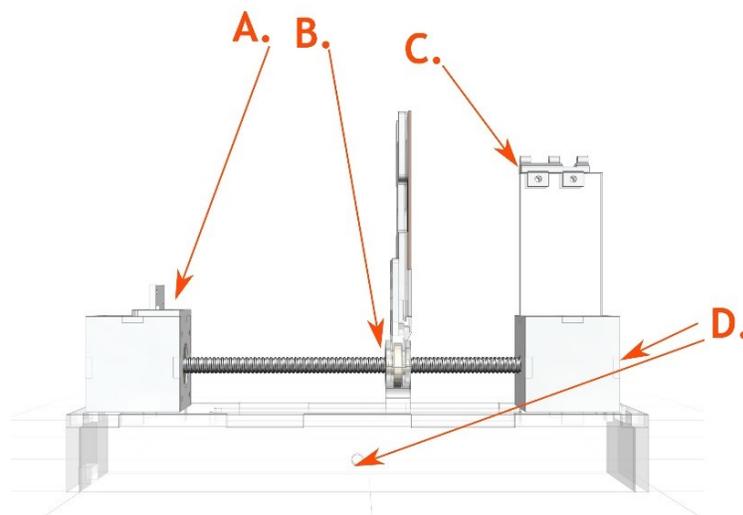


Figura 65. Esquema comparativo del nuevo posicionador del colector con respecto al primer prototipo.

- e) En cuanto al posicionador del colector, éste cuenta con un sensor de posición para asegurar que la distancia que se especifica desde la interfaz sea la misma que existe entre la aguja y la placa de recolección.
- f) Cuenta con bornes para facilitar la conexión de las terminales de la fuente. Además, éstos se encuentran alejados uno del otro.
- g) Con respecto a la integración de la cámara USB y la medición de la corriente, son integrados como módulos externos a los dispositivos de inyección y posicionamiento. En conjunto permiten la adquisición de imágenes de la punta de la aguja para observar el cono de Taylor así como verificar la continuidad del proceso.
- h) Finalmente, todos los cálculos requeridos para la operación de ambos dispositivos son realizado externamente en una computadora mediante una interfaz gráfica cuyo diseño se expondrá posteriormente.

En la *Figura 66* se observa el espacio para el sensor de posición (**A.**). Por otro lado, en **B.** el mecanismo incluido en el actuador, que, en conjunto con el controlador electrónico, permite la sustitución de la transmisión de engranes. **C.** se trata de la pieza que mantiene la posición de la jeringa a la vez que facilita su conexión con la terminal de la fuente. Finalmente, en **D.** se encuentran los barrenos para introducir terminales.

57



*Figura 66. Vista lateral del nuevo posicionador para colector.*

Para obtener las características del nuevo dispositivo, fue necesario el diseño de

piezas que permitieran acoplarse directamente a la tuerca del tornillo del actuador, así como la colocación de la aguja. Tal como sucedió con la bomba, estas se obtuvieron mediante estereolitografía.

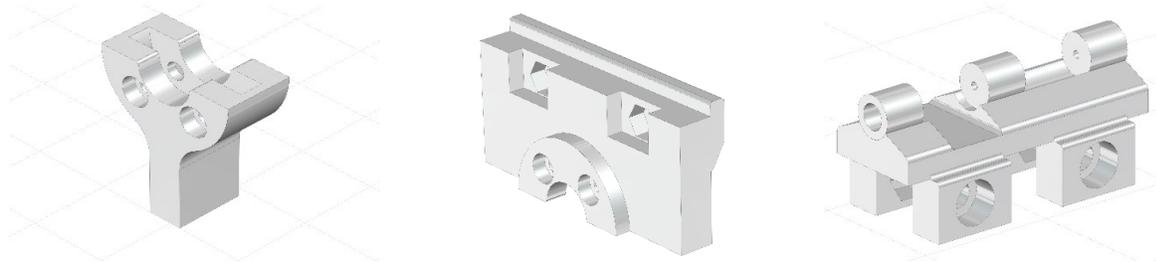


Figura 67. Imágenes de las piezas del posicionador del colector obtenidas mediante estereolitografía.

Número de salidas/entradas digitales requeridas	13	58
Canales analógicos de para los sensores (posición y corriente)	2	
Temporizadores requeridos para controlar los pasos de los actuadores	2	

Tabla 13. Tabla de requerimientos para el microcontrolador.

Adicionalmente a los requerimientos para el microcontrolador, se realizó una comparación entre las *funciones* que ofrece la plataforma Arduino con las del otro microcontrolador, esta se muestra en la Tabla 14.



Figura 68. Plataforma de desarrollo Arduino. (43)



Figura 69. Microcontrolador PIC16F887. (44)

	Tarjeta de desarrollo Arduino (ATMEGA328P)	PIC16F887
Pines digitales de entrada o salida	14	35
Canales del convertidor analógico/digital	6	14
Temporizadores	**	2 de 8 bits y uno de 16 bits
Frecuencia del oscilador	16[MHz]	20[MHz]

Tabla 14. Comparación entre plataforma de desarrollo Arduino y el microcontrolador PIC16F887.

\*\*Se omite la información relacionada con los temporizadores o sus modos de funcionamiento.

De la *Tabla 14*, se puede observar que tanto la tarjeta de desarrollo como el microcontrolador poseen características similares. Sin embargo, el aspecto determinante para seleccionar uno u otro radicó en el enfoque que posee la plataforma Arduino, ya que limita la versatilidad, así como las capacidades de sus periféricos. Resultado de esto, sería necesario instalar el compilador provisto por el fabricante (Atmel) para acceder a las bibliotecas necesarias que faciliten el manejo de los registros de configuración para los periféricos a través del ambiente de desarrollo disponible en la página de Arduino. Es por esto, que se prefirió emplear el microcontrolador PIC16F887.

59

---

#### AISLAMIENTO DEL MICROCONTROLADOR CON RESPECTO DE LA ETAPA DE CONTROL Y POTENCIA.

Para evitar daños en el dispositivo de control de todo el sistema electrónico en caso de sobredemanda de corriente o descarga ocasionada por el campo eléctrico al que está expuesto, se añadieron optoacopladores por cada uno de los pines de entrada/salida digital utilizados.

Se decidió emplear dos encapsulados que contienen cuatro y dos de estos dispositivos, respectivamente, correspondientes al PS2501-2 y PS2501-4 (45).

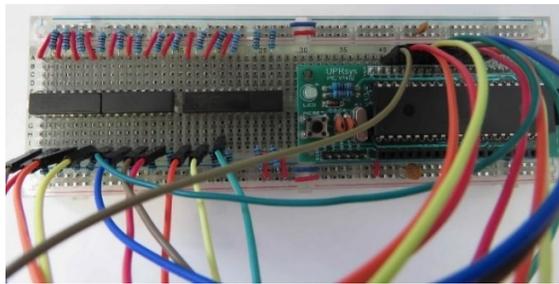
Con base en la consideración anterior, se planteó la conformación del sistema

electrónico como se muestra en la *Figura 70*.

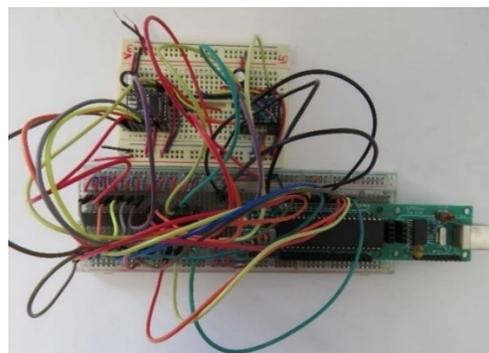


*Figura 70. Esquema de las etapas que componen la sección electrónica del sistema.*

Posteriormente se realizó de la implementación de la configuración del sistema electrónico planteado en tableros para prototipos de circuitos, como se muestra en la *Figura 71* y la *Figura 72*.



*Figura 71. Fotografía del microcontrolador conectado con los optoacopladores.*



*Figura 72. Fotografía del microcontrolador conectado con los optoacopladores y etapa de potencia.*

---

#### PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR SELECCIONADO.

En el diagrama siguiente, se explica, mediante bloques el proceso de interacción entre la computadora, el microcontrolador y los dispositivos propuestos.

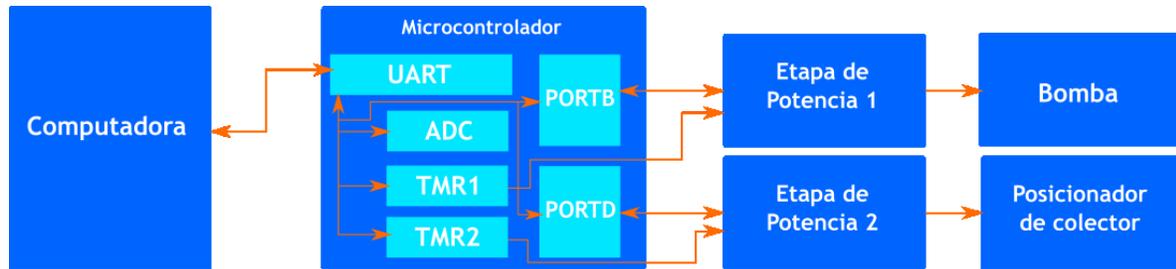


Figura 73. Esquema de la comunicación entre la computadora y los dispositivos electrónicos.

#### ALGORITMO PROPUESTO.

La programación del microcontrolador está organizada en estados, de tal forma que se encuentra en espera de alguna orden mediante el protocolo RS232.

Cada una de ellas corresponde a los siguientes estados para el sistema de bombeo:

- Ajuste hacia adelante.
- Ajuste hacia atrás.
- Bombeo a un flujo volumétrico constante.

61

Para el posicionador del colector:

- Obtención de la posición inicial mediante la lectura del sensor.
- Ajuste hacia la posición deseada a través del conteo de pasos.

En caso de que la función de protección de los circuitos se active debido a que alguno de los actuadores se bloqueó, estos se deshabilitan y el sistema regresa al estado de espera.

A su vez, se puede detener cualquiera de los dos actuadores bajo demanda mediante la interfaz durante la etapa de posicionamiento del colector o de bombeo.

Se emplearon dos de los temporizadores disponibles en el microcontrolador, uno de 16 bits, el primero para lograr el desplazamiento del colector y el segundo para el bombeo, respectivamente.

La configuración de ambos requiere de un procedimiento similar, sin embargo,

del segundo depende el flujo volumétrico deseado, por lo que los cálculos deben realizarse cada vez que se desarrolle el proceso de electrohilado; por lo tanto, estos son realizados dentro de la interfaz.

Para el posicionador, la velocidad angular se fijó en 240[rpm], que corresponden a 80[Hz], para una configuración del controlador en pasos completos.

$$f_m = \eta_{actuador} \cdot \left(\frac{360^\circ}{60 [s]}\right) \cdot \left(\frac{200[pasos]}{360^\circ}\right) \quad \text{Ecuación 6.}$$

$$f_m = \eta_{actuador} \cdot \left(\frac{10}{3}\right) \left[\frac{pasos}{s}\right] \quad \text{Ecuación 7.}$$

$$f_m = 800[Hz]$$

Con respecto al temporizador de ocho bits y con base en la hoja de especificaciones del microcontrolador, el valor de desbordamiento para este, es calculado de la siguiente manera y corresponde a un semiperiodo ( $\tau$ ) de dicha señal, además, es importante mencionar que el microcontrolador funciona con un oscilador de 20[MHz] y que cada instrucción se ejecuta en cuatro ciclos de reloj:

62

$$T_D = \frac{4}{20[MHz]} \cdot Pre \cdot (TMR2 + 1) \cdot Post \quad \text{Ecuación 8.}$$

Donde *Pre* y *Post* corresponden a escaladores, el primero aplicado directamente a la frecuencia de oscilación y puede tomar valores de 1, 4 o 16 mientras que el segundo cuenta las veces que se desborda y se puede establecer desde 1 hasta 16. En este caso se usaron los siguientes valores:

$$Pre = 16$$

$$Post = 2$$

Entonces TMR2 queda de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot f_m} \quad \text{Ecuación 9.}$$

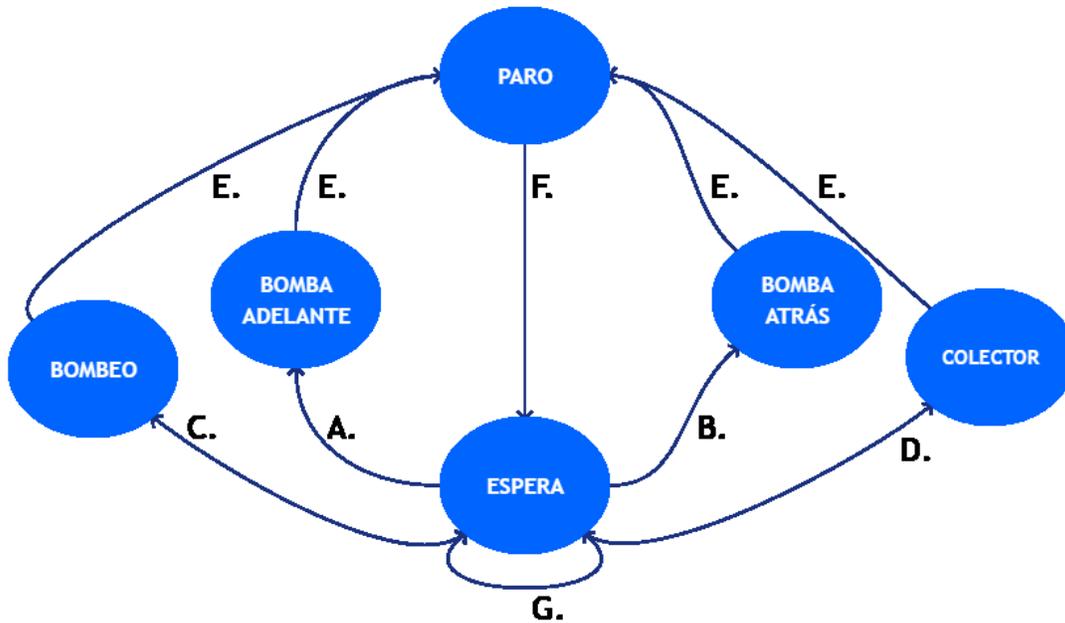
$$\tau = 625[\mu s]$$

$$TMR2 = \frac{20[MHz] \cdot T_D}{4 \cdot Pre \cdot Post} - 1 \quad \text{Ecuación 10.}$$

$$TMR2 = 97$$

Con respecto al algoritmo desarrollado, este se planteó como una serie de estados que corresponden a una acción determinada del sistema, como se muestra en el diagrama de la *Figura 74*. De esta forma se asegura que cada acción deseada se ejecutará solo cuando se desee y dejará de hacerlo en caso de que se indique desde la computadora o los controladores detecten que los actuadores se atascaron.

63



*Figura 74. Diagrama de la representación mediante estados del algoritmo programado en el microcontrolador.*

INTERFAZ GRÁFICA.

Esta fue diseñada con base en Windows Forms y las acciones de cada botón, programadas en C#. La operación básica de la misma es la siguiente:

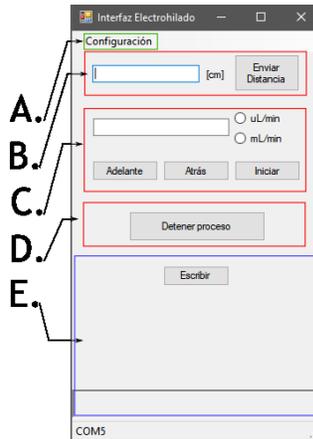


Figura 75. Diagrama de la pantalla principal de la interfaz gráfica diseñada.

En A. se observa el botón que permite establecer o cerrar la comunicación con el microcontrolador. En el cuadro de texto mostrado en B. se introduce la distancia en centímetros a la que se desea colocar el colector con respecto a la aguja; mientras que en el botón “*Enviar distancia*” se calculan el número de pasos deseados para llegar a dicha posición.

64

La sección C. es la correspondiente a la bomba para jeringas. A su vez, está dividida en la parte manual, para ajustar la posición de la pieza donde se deposita el émbolo con la disolución cargada en la jeringa; y en la parte automática, que comprende el cuadro de texto, los botones que permiten establecer las unidades del flujo volumétrico y finalmente, el botón donde se realizan los cálculos para obtener los valores que son enviados al microcontrolador y cargados en el registro del temporizador correspondiente.

Por otra parte, el botón presente en D. permite detener el bombeo o posicionamiento en cualquier momento, mientras la comunicación con el microcontrolador haya sido establecida, por último, E. consiste en un cuadro de texto donde se despliegan mensajes de error enviados por el microcontrolador, así como las lecturas obtenidas del sensor de corriente. Con respecto a este, se cuenta con un botón

(“Escribir”) que permite trasladar estos datos a un archivo de texto para su procesamiento posterior.

**CÁLCULO DEL VALOR PARA EL TEMPORIZADOR EMPLEADO EN EL BOMBEO DE LA DISOLUCIÓN.**

La carga de este valor en el microcontrolador es la más importante para todo el sistema propuesto, ya que, de esta depende que el flujo volumétrico deseado corresponda con el real. Es por esto que se realizaron los cálculos bajo las siguientes consideraciones:

El diámetro de la jeringa es constante, se seleccionó una jeringa desechable de 10[mL] del fabricante BD.

Se consideró que no hay pérdidas ocasionadas por la conexión entre la jeringa y el tubo capilar metálico.

65



Figura 76. Fotografía de la conexión entre la jeringa y el capilar es de silicona flexible.

El flujo volumétrico es el mismo en todo el cuerpo de la jeringa como en la manguera y en el capilar.

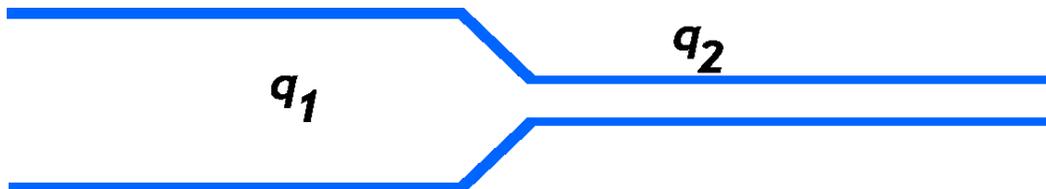


Figura 77. Diagrama de la sección que conecta la manguera con el capilar metálico.

Con base en lo anterior, se tiene que:

$$q_1 = q_2$$

Donde  $q$  representa el flujo volumétrico en  $\left[\frac{mm^3}{min}\right]$

El flujo volumétrico en el cuerpo de la jeringa está dado por la velocidad a la que el émbolo es desplazado, por lo que queda expresado como:

$$q = A_j \cdot v_j \quad \text{Ecuación 11.}$$

Donde:

$$A_j = \frac{\pi}{4} (D_j)^2 \quad \text{Ecuación 12.}$$

Es el área transversal de la jeringa de 10[mL] y el diámetro  $D_j$  corresponde a 14.43[mm].

$$A_j = 163.539[mm^2]$$

Y  $v_j$ , la velocidad a la que el émbolo se desplaza, a su vez, establecida por el paso del tornillo ( $p_T$ ) acoplado al actuador y su velocidad angular ( $\eta_{actuador}$ ), de la siguiente manera:

$$v_j = \eta_{actuador} \cdot p_T \quad \text{Ecuación 13.}$$

$$p_T = 2 \left[ \frac{mm}{revolución} \right]$$

Por lo que de las ecuaciones 12, 13 y 14; despejando  $\eta_{actuador}$  queda como:

$$\eta_{actuador} = \frac{q}{2 \cdot 163.539}$$

Se verifican las unidades:

$$[rpm] = \frac{\left[\frac{\mu L}{min}\right] \cdot \left[\frac{mm^3}{\mu L}\right]}{\left[\frac{mm}{revolución}\right] \cdot [mm^2]}$$

Tras simplificar:

$$[rpm] = \left[\frac{revoluciones}{min}\right]$$

Finalmente, dado que en un motor a pasos la velocidad angular es proporcional a la frecuencia que se energizan las bobinas:

$$f_m = \eta_{actuador} \cdot \left(\frac{360^\circ}{60 [s]}\right) \cdot \left(\frac{200[pasos]}{360^\circ}\right) \quad \text{Ecuación 14.}$$

Simplificando la *ecuación 15*.

$$f_m = \eta_{actuador} \cdot \left(\frac{10[pasos]}{3 [s]}\right) \quad \text{Ecuación 15.}$$

67

La *ecuación 16* es válida para pasos completos, sin embargo, mediante la adición del múltiplo correspondiente a los micropasos, es posible ajustarla para su uso:

$$f_m = \eta_{actuador} \cdot \left(\frac{10[pasos]}{3 [s]}\right) \cdot \left(\frac{N[micropasos]}{1[paso]}\right) \quad \text{Ecuación 16.}$$

En el caso de la bomba, **N** corresponde a 32 micropasos por paso, de tal forma que la *ecuación 17* queda de la siguiente forma:

$$f_m = \eta_{actuador} \cdot \frac{320}{3} \left[\frac{micropasos}{s}\right] \quad \text{Ecuación 17.}$$

Finalmente, para cargar el valor del temporizador, se requiere el conocer la duración de uno de los semiperiodos ( $\tau$ ) de  $f_m$  que corresponderá al tiempo de desbordamiento del temporizador, retomando la *Ecuación 9*:

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot f_m}$$

Con base en que cada instrucción se ejecuta en cuatro ciclos de reloj y que el

temporizador es de 16 bits, de la siguiente relación se despeja el valor de desbordamiento:

$$T_D = \frac{4}{20[\text{MHz}]} \cdot Pr \cdot (2^{16} - TMR1) \quad \text{Ecuación 18.}$$

$Pr$  corresponde al valor del escalador del temporizador, en este caso se estableció en uno. Despejando de la ecuación 16.

$$TMR1 = 2^{16} - \frac{T_D \cdot 20[\text{MHz}]}{4}$$

Debido a que durante el proceso de electrohilado el flujo volumétrico es del orden de  $\left[\frac{nL}{min}\right]$  la frecuencia resultante también. Esto tiene como consecuencia que los valores para el temporizador queden fuera del rango de los dieciséis bits como se muestra en la siguiente gráfica:

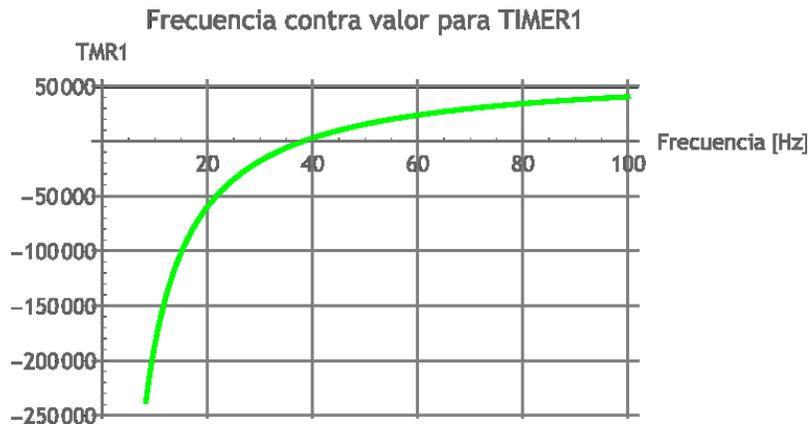


Figura 78. Gráfica de los valores que debería tomar TMR1 para frecuencias entre 1 y 100 [Hz].

Por debajo de 40[Hz] los valores para el temporizador también serían menores a cero para las otras opciones de escalamiento: 2, 4 u 8.

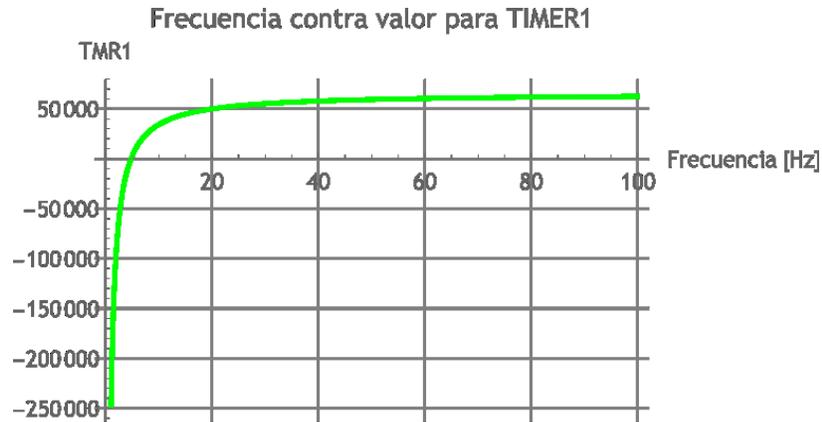


Figura 79. Gráfica de los valores que debería tomar TMR1 para frecuencias de 1 a 100[Hz] con un escalamiento de 8.

Para evitar añadir otro oscilador para obtener las señales de reloj por debajo de 40[Hz], se programó un escalador de tal forma que se acumulara por un múltiplo de veces el desbordamiento del temporizador con la configuración del escalamiento unitario.

69

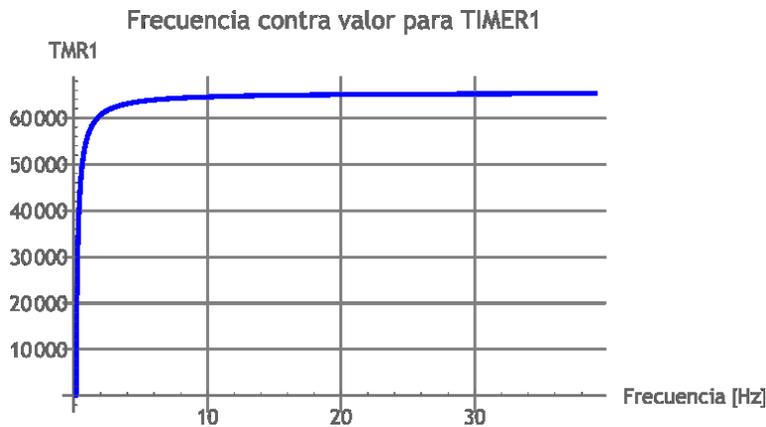


Figura 80. Gráfica de los valores que debería tomar TMR1 para frecuencias menores a 40[Hz] con el escalamiento programado.

CARACTERIZACIÓN DEL ACTUADOR DEL POSICIONADOR.

Se buscó obtener una función que relacionara la distancia capilar-colector con el número de pasos que el actuador debe dar para que fueran calculados mediante la interfaz, de tal forma que:

$$pasos = f(distancia\ deseada)$$

Con base en la interfaz, fue enviado hacia el posicionador, el número de pasos

deseados en múltiplos de mil.

El sensor de distancia instalado en este dispositivo se emplea para obtener la posición inicial del colector para cada vez que un valor de distancia es recibido en el microcontrolador.

Con ayuda de un calibrador con Vernier, se midió la distancia resultante.

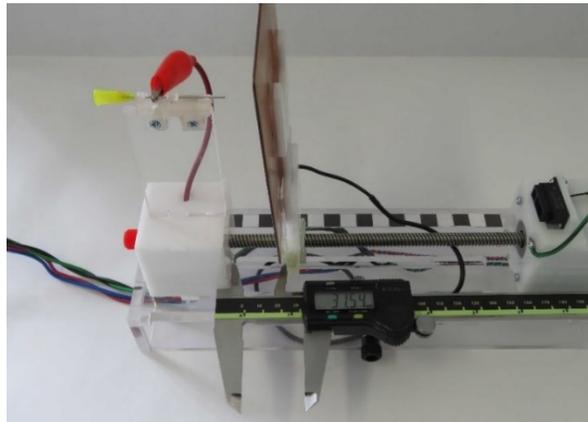


Figura 81. Fotografía del colector colocado a 25[mm] del capilar, este sobresale 6[mm] con respecto al lugar donde se realiza la medición.

70

Considerando en la distancia que sobresale el capilar metálico con respecto al soporte observada en la *Figura 82*. El espesor del arreglo donde se coloca el colector, mostrado en la *Figura 83*. Así como la distancia existente entre el borde de la caja del motor con la ranura de la base donde se desliza dicha pieza correspondiente a la *Figura 84*, se realizó el ajuste lineal de los datos mostrados en la *Tabla 15*:

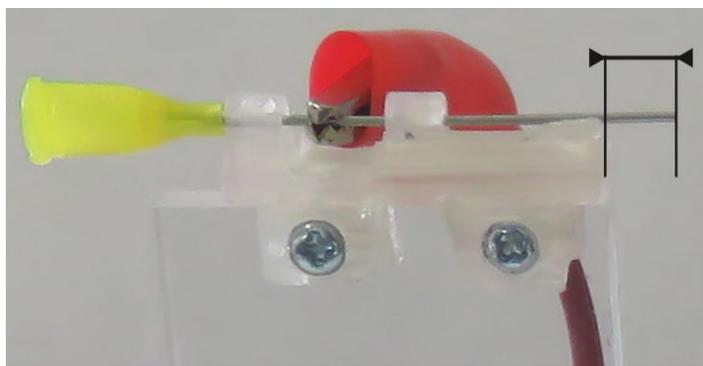


Figura 82. Diagrama de la distancia que hay entre el borde del capilar y la base del soporte es de 6[mm].

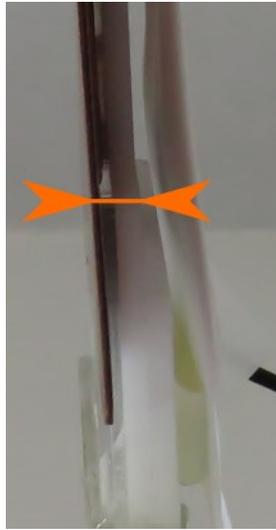


Figura 83. Diagrama del espesor de la lámina, en conjunto con el acrílico es de 10[mm].

71

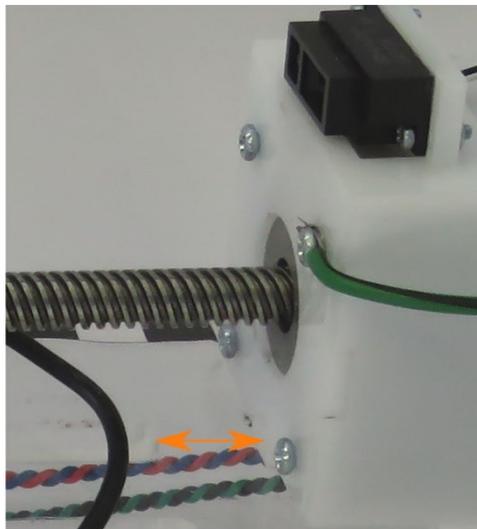


Figura 84. Diagrama del espacio entre la pared de la caja del motor y la ranura es de 14[mm].

Distancia deseada [mm]	Número de pasos
132.25	0
112.95	1000
92.65	2000

72.97	3000
52.53	4000
31.44	5000
12.03	6000
0	6550

Tabla 15. Taba con los datos obtenidos para relacionar la distancia con el número de pasos.

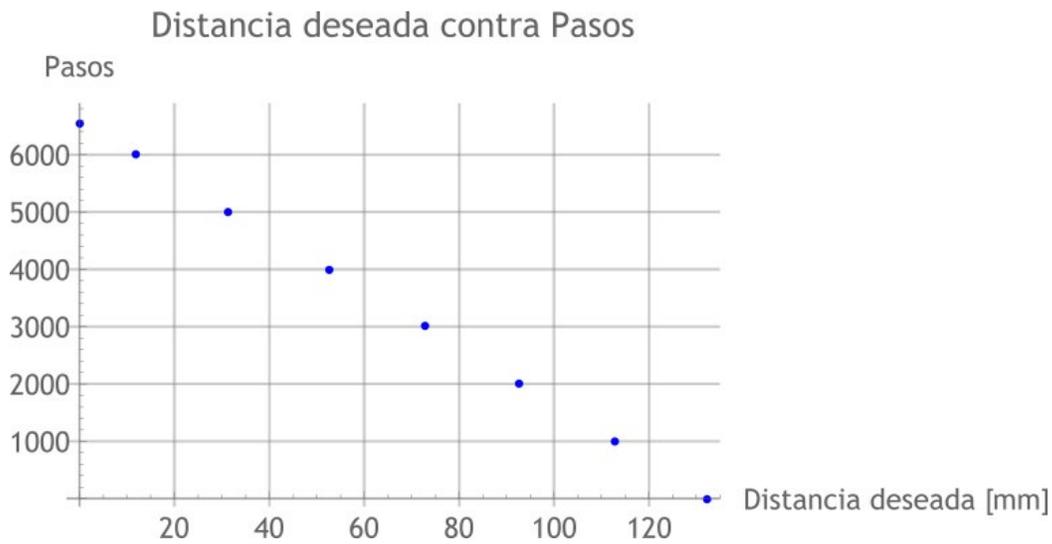


Figura 85. Gráfica que relaciona los pasos con la distancia deseada (capilar-colector).

La función quedó definida como:

$$\text{pasos} = -49.4772426644838 \cdot (\text{distancia deseada}) + 6578.257015901711$$

ETAPA EXPERIMENTAL.

Para la validación de los prototipos se realizaron dos etapas de experimentación, una sin campo y con la sustitución de la disolución de polímero con agua, para verificar el flujo volumétrico y la otra en la presencia del campo eléctrico.

EXPERIMENTO SIN CAMPO ELÉCTRICO.

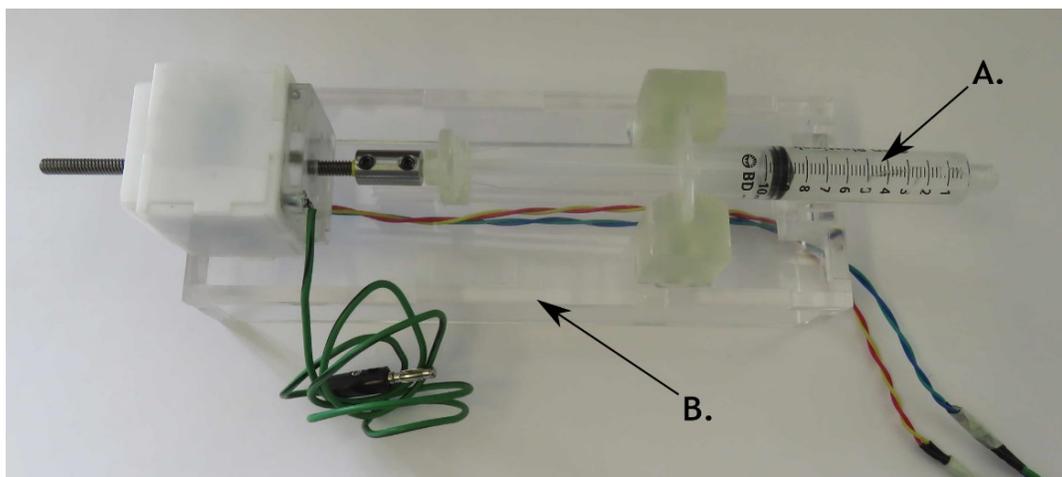
A continuación, se describirá el experimento realizado sin la presencia del campo eléctrico. Este se realizó para verificar el funcionamiento de la bomba inyectora como del posicionador del colector.

MATERIALES.

Los materiales empleados para el desarrollo del experimento sin campo eléctrico son los siguientes:

- Bomba de inyección (B.) propuesta mostrada en la *Figura 86*.
- Jeringa desechable (A.) de 10[mL] observada en la *Figura 86*.

73



*Figura 86. Fotografía de la jeringa colocada en la bomba inyectora*

- Posicionador de colector.
- Retícula con marcas por cada centímetro mostrada en la *Figura 87*.
- La disolución de polímero se sustituyó por agua para realizar el experimento.

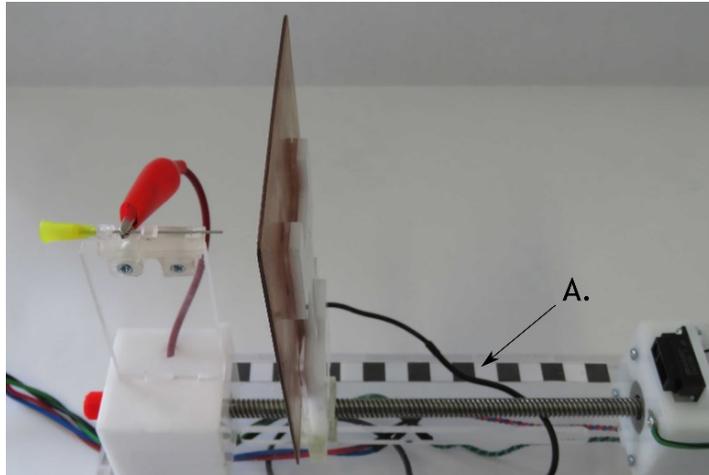


Figura 87. Fotografía del posicionador de colector durante el experimento sin campo eléctrico.

- Probeta de 10[mL] con graduaciones cada 200[ $\mu$ L] correspondiente a la Figura 88.



Figura 88. Probeta empleada para medir el volumen de fluido bombeado.

- Cámara web USB con zoom óptico (Figura 89).



Figura 89. Fotografía de la cámara con marcas para indicar la posición donde se observa claramente la gota formada a la salida del capilar.

- Base para cámara desarrollada por (46) mostrada en la *Figura 90*.



*Figura 90. Fotografía del soporte para la cámara USB adaptada para facilitar su ajuste.*

- Conexión flexible de la jeringa hacia el capilar (Ver *Figura 76*).
- Interfaz modificada para bombear durante un minuto y detener el proceso automáticamente.

75

---

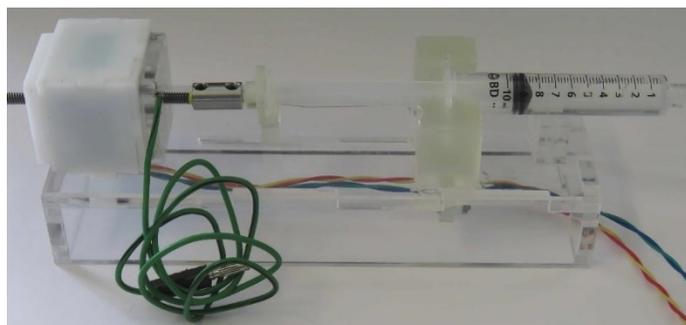
#### DESARROLLO.

En este apartado se explican las actividades realizadas durante el experimento sin campo eléctrico desarrollado con la bomba inyectora únicamente.

---

#### PARA LA BOMBA INYECTORA.

1. Se cargó la jeringa con 9[mL] como se observa en la *Figura 91*.
2. Se ajustó la posición inicial de la bomba para recibir la jeringa.



*Figura 91. Fotografía de la jeringa cargada con 9[mL] de agua.*

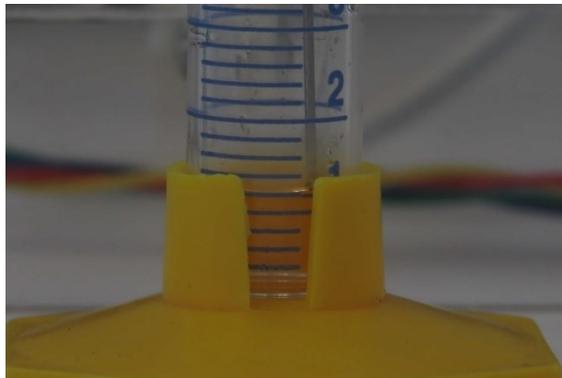
3. Se conectó la jeringa con el capilar.

4. Con el ajuste manual, se ocupó el volumen de la manguera conectada a la jeringa, que fue de 3[mL], como se muestra en la *Figura 92*.



*Figura 92. Fotografía del capilar dentro de la probeta.*

5. Se especificó en la interfaz un flujo volumétrico para bombear durante un tiempo determinado y cuantificar dicho volumen resultante con la probeta graduada.
6. Dicha variable comenzó en  $200\left[\frac{\mu\text{L}}{\text{min}}\right]$  y se incrementó por cada minuto hasta llegar a 1[mL].



*Figura 93. Fotografía del volumen ocupado por el fluido en la probeta tras cinco minutos de bombeo a  $200\left[\frac{\mu\text{L}}{\text{min}}\right]$ .*

7. Durante el bombeo se capturaron fotografías con la cámara USB, se observa un ejemplo en la *Figura 94* fuera de la posición establecida mediante el soporte, mientras que en la *Figura 95* se encuentra en su posición durante el experimento.

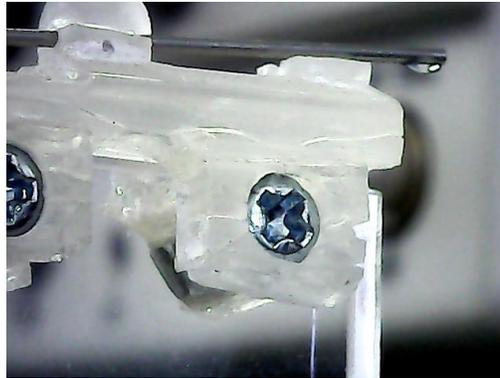


Figura 94. Fotografía capturada con la cámara USB.

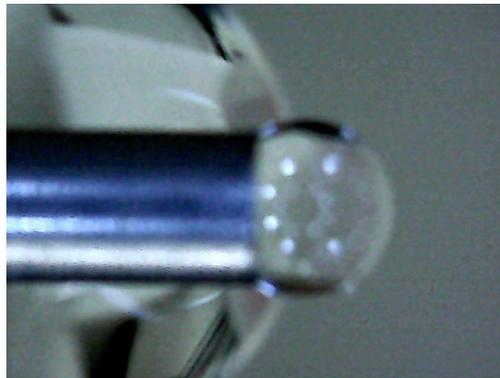


Figura 95. Fotografía de una gota de agua formada en la punta del capilar.

77

---

#### EXPERIMENTO CON CAMPO ELÉCTRICO.

En este se integraron los sistemas diseñados, tanto la bomba de inyección como el posicionador del colector en conjunto con la disolución del polímero y la presencia del campo eléctrico.

---

#### MATERIALES.

Los materiales empleados para el desarrollo del experimento donde se integraron los dispositivos diseñados durante el proceso de electrohilado fueron los siguientes:

- Disolución de PVA (alcohol polivinilo).
- Bomba para jeringas diseñada.
- Posicionador de colector diseñado.

- Interfaz gráfica diseñada.
- Jeringa desechable de 10[mL].
- Cámara web USB con zoom óptico.
- Retícula graduada en milímetros.

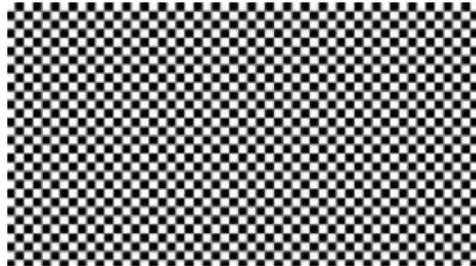


Figura 96. Sección escalada de la retícula milimétrica.

- Base para colocar la cámara.
- Fuente de alto voltaje.

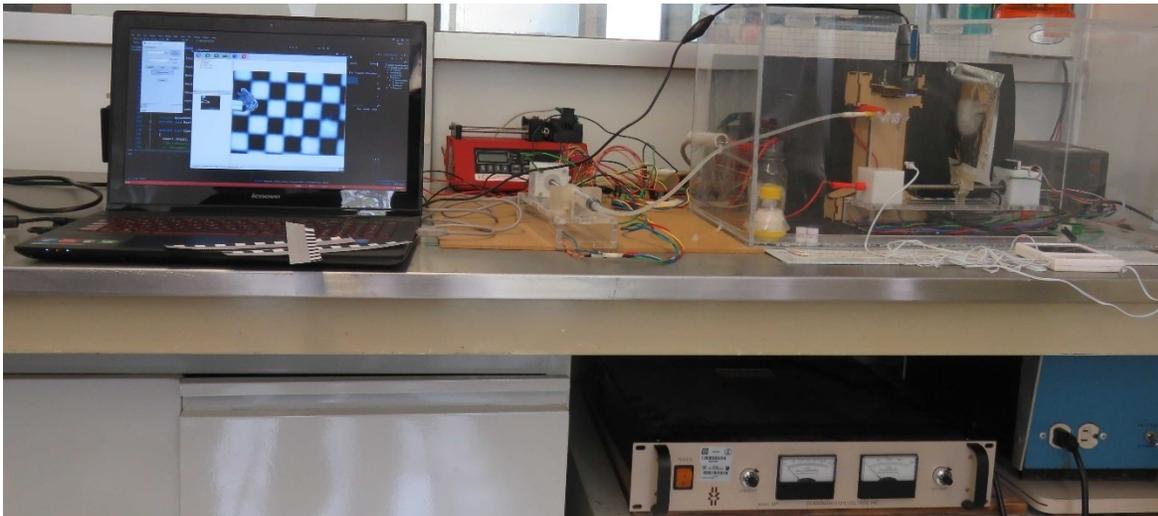


Figura 97. Fotografía del sistema completo instalado en el laboratorio.

---

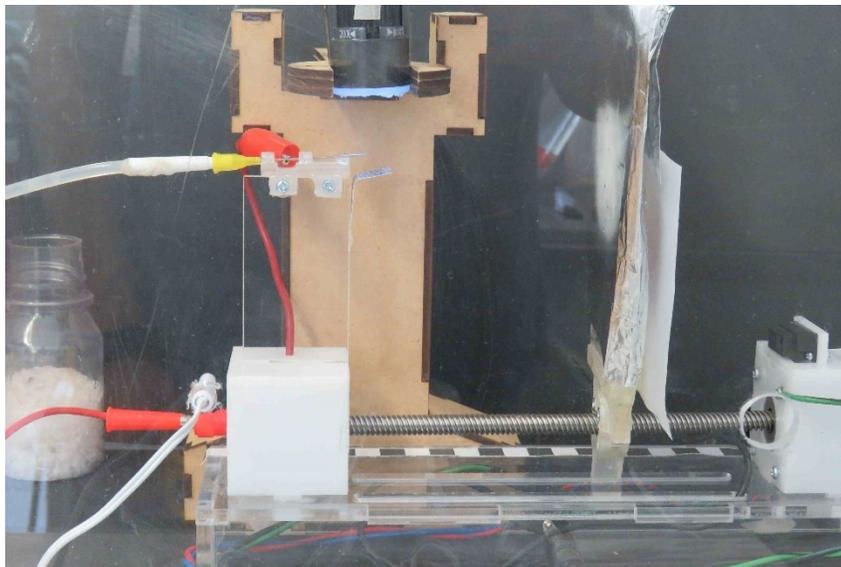
#### DESARROLLO.

En este apartado se explican las actividades realizadas durante el experimento realizado en el laboratorio con la configuración convencional de electrohilado.

1. Al igual que con la prueba sin campo eléctrico para el bombeo, se realizaron los primeros cuatro puntos señalados anteriormente usando PVA (Poli vinil alcohol).
2. Se conectó el sensor de corriente entre la placa de recolección y a la terminal de

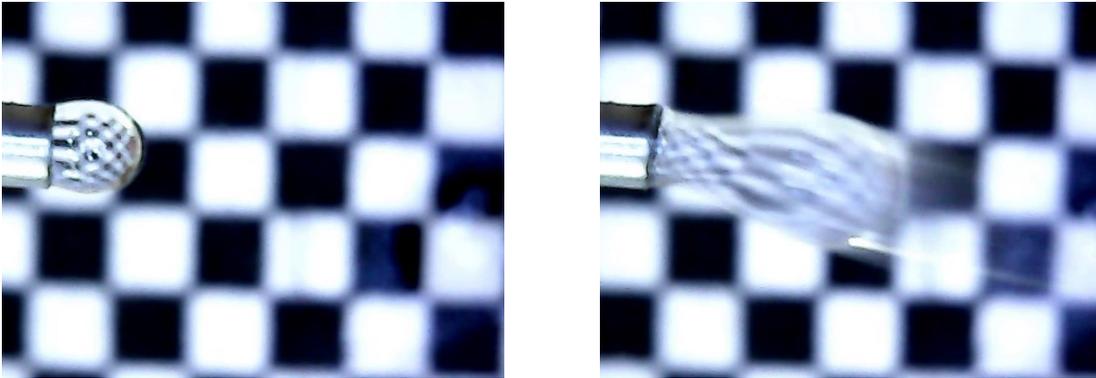
tierra física correspondiente de la fuente de alto voltaje.

3. Se conectaron las terminales de la fuente de alto voltaje a los bornes correspondientes en el posicionador del colector.
4. Mediante la interfaz se envió la distancia deseada a la que el colector debía quedar con respecto a la aguja
5. Se envió el flujo volumétrico para la disolución.
6. Se colocó la retícula por debajo de la posición de la gota y dentro del campo de visión de la cámara.
7. Posteriormente se encendió la fuente de alto voltaje a una corriente fija menor a  $1[\text{mA}]$  y el voltaje se fue cambiando hasta llegar a los  $10[\text{kV}]$ .
8. Con el programa de la cámara, se observó la gota y los cambios en su geometría ocasionados por el cambio del campo eléctrico en la punta de la jeringa.



*Figura 98. Fotografía del posicionador con el colector instalado y fibras depositadas.*

Durante el experimento se capturaron en vídeo la gota y los cambios que esta experimentaba, resultado de alterar el campo eléctrico o el flujo volumétrico. En la *Figura 99* se muestran dos ejemplos tomados de dicha secuencia de imágenes.



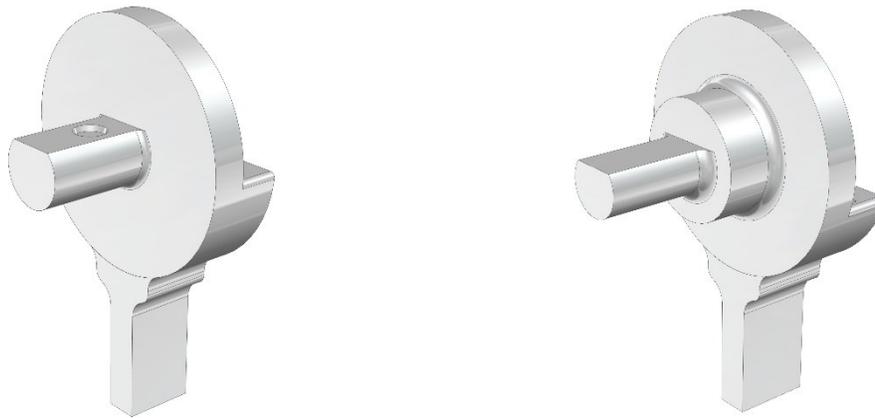
*Figura 99. Fotogramas capturados de los vídeos obtenidos con la cámara USB.*

## RESULTADOS.

### EXPERIMENTO SIN CAMPO ELÉCTRICO.

De este se encontró que el flujo volumétrico deseado corresponde para el que se ha bombeado mediante la jeringa al menos para la escala del experimento sin campo eléctrico, esto es, en el orden de  $\left[\frac{\mu L}{min}\right]$ .

Resultado de las pruebas realizadas, la pieza que recibe el émbolo de la jeringa se dañó, por lo que en primera instancia fue reparado y posteriormente rediseñado para evitar una falla similar.



81

*Figura 100. Imagen donde se muestran los cambios en la pieza donde se coloca el émbolo de la jeringa.*

La cámara USB fue útil para observar que, aunque el flujo volumétrico es constante para un periodo de tiempo fiho, la gota formada en la punta del capilar metálico tiende a deformarse y en ocasiones a desaparecer hasta que el tornillo empuja el émbolo nuevamente.



Figura 101. Secuencia de imágenes donde se observa que el empuje del émbolo es intermitente.

Este fenómeno puede ser ocasionado por dos factores:

Uno relacionado con el fluido y que está asociado con la conexión entre el capilar y la jeringa es flexible, de tal forma que esta podría deformarse mientras la disolución es bombeada a través de esta.

Y otro asociado a la construcción del actuador, resultado de la interacción entre el paso del tornillo y la tuerca acoplada al mismo en el interior del actuador de la bomba, con la frecuencia requerida para desplazar el émbolo a la velocidad deseada. Por ejemplo:

Para un flujo volumétrico de  $3.32 \left[ \frac{nL}{min} \right]$ , en una configuración de 32 micropasos por paso, la frecuencia a la que las bobinas deben energizarse es de 1.02[Hz], por lo que el desplazamiento del tornillo actual, cuyo paso es de  $2 \left[ \frac{mm}{revolución} \right]$  correspondiente a la transición de uno de los semiperiodos de la señal generada con el microcontrolador es significativamente mayor que para una frecuencia más alta.

A su vez, con esto se pudo verificar lo reportado en la literatura relacionado con el tiempo de asentamiento para el flujo volumétrico en bombas para jeringas actuadas mediante motores a pasos.

Por otro lado, para el posicionador fue necesario aumentar el área reflejante para el sensor de distancia (Figura 103), ya que las lecturas entregadas previamente eran poco confiables resultado de los bordes presentes (A.) en la parte posterior, como se aprecia en la Figura 102.



## EXPERIMENTO CON CAMPO ELÉCTRICO.

Con relación al experimento realizado en presencia de campo eléctrico, los resultados obtenidos, se dividen en las siguientes categorías:

---

### LAS CONDICIONES PARA REALIZAR EL PROCESO.

Se encontró que el sistema es capaz de funcionar en un rango de hasta 10[kV]; fuera de este, se producía una descarga que no fue posible observar. La distancia de operación del sistema para que se puedan recolectar fibras fue de 95[mm], fuera de esta, se depositaban en lugares distintos a la placa destinada para esa función.

---

### LAS OBSERVACIONES DURANTE EL ELECTROHILADO.

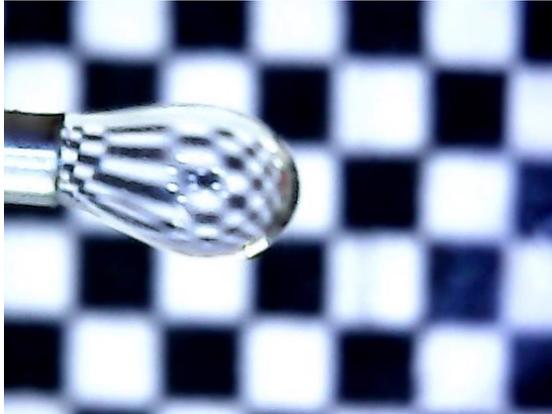
En este apartado, se observó que las características del sensor de corriente seleccionado, a pesar de los beneficios provistos: tanto aislamiento físico de la señal resultante de la medición de corriente con respecto al dispositivo del que se desea conocer dicho parámetro como respuesta lineal, es inapropiado, por sí solo, para la aplicación, ya que, con base en lo reportado en la literatura, la magnitud de la corriente medida es del orden de nanoamperes. Por lo que los datos obtenidos del mismo no son representativos del fenómeno que se deseaba observar.

84

Para el sensor de distancia, en presencia de campo eléctrico cumplió con la función de obtener la posición inicial para colocar el colector.

Las imágenes capturadas mediante la cámara USB permitieron observar el cono de Taylor, así como una sección del flujo hacia la placa de recolección después de ser disparado. Por otra parte, se pudo comprobar lo mencionado en la literatura con respecto al balance entre las fuerzas viscosas y de tensión superficial en el fluido con la ocasionada por el campo eléctrico:

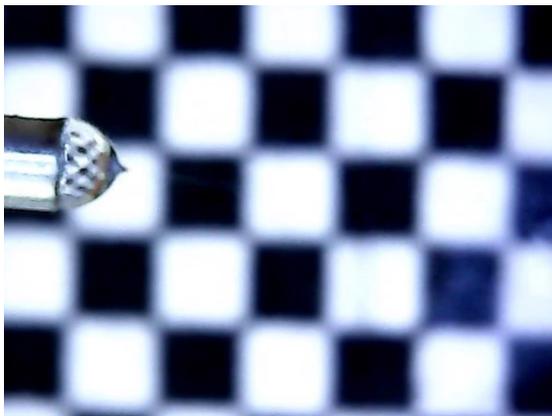
**Secuencia de la formación del cono de Taylor y disparo del fluido.**



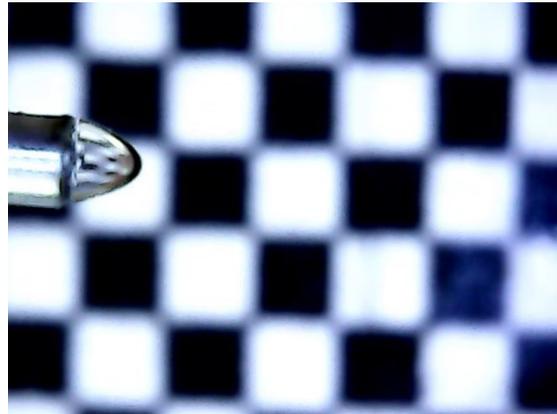
*Figura 105. Imagen del volumen de la gota mayor que el volumen que es retirado por el campo eléctrico.*



*Figura 106. Fotografía del momento en que la fuerza del campo eléctrico vence la viscosidad y la tensión superficial de la gota.*



*Figura 107. Imagen del cono de Taylor formado e inicio del disparo de disolución hacia la placa de deposición*



*Figura 108. Fotografía donde se aprecia el incremento del volumen de la gota, después de que el actuador de la bomba inyectora se activó.*

85

---

**MEDICIÓN DEL DIÁMETRO DEL FLUIDO DISPARADO.**

Para medir el tamaño de la gota al final del capilar, así como el diámetro del fluido disparado, se utilizó la retícula graduada en milímetros y el programa de manipulación de imágenes GIMP 2.82.

En las figura se observa la imagen seleccionada para realizar la medición del diámetro de la gota formada en la punta del capilar, así como una sección de la disolución mientras esta es disparada hacia el colector.



Figura 109. Fotografía del cono de Taylor formado en la gota.

Por otro lado en la se aprecian los puntos de referencia empleados para realizar las mediciones basadas en la .

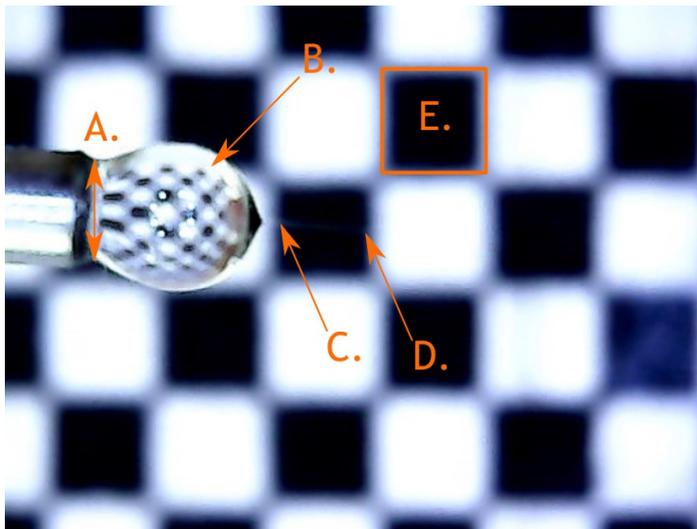


Figura 110. Se observan los puntos donde se realizaron las mediciones en píxeles de la imagen capturada con la cámara USB.

Se midió uno de los cuadros de la retícula para conocer su tamaño en píxeles (E.), este fue de:

110[píxeles] $\times$ 110[píxeles]

Con esto, se obtuvo el siguiente factor de conversión para la longitud o el ancho de milímetros a píxeles:

$$1[mm] = 110[píxeles]$$

En la figura 111 se muestra el diagrama donde se incluye la elipse empleada para aproximar la geometría de la gota y posteriormente obtener su longitud y altura en píxeles.

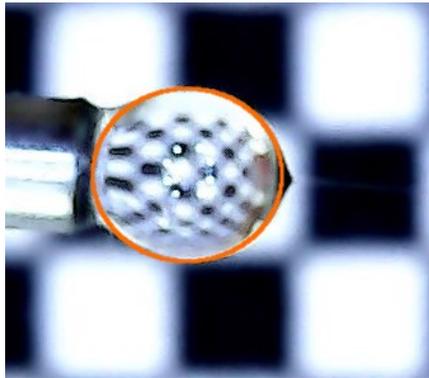


Figura 111. Diagrama de la medición del largo y ancho de la gota formada en la punta del capilar. C.

87

Para la medida de la gota **B.** (Figura 110), se empleó la herramienta de selección “elipse” y con esta se aproximó la geometría, que resultó de:

$$149[píxeles] \times 138[píxeles]$$

Con base en esta medida, la longitud y altura de la gota resultó de:

$$1.35[mm] \times 1.25[mm]$$

Adicionalmente, para obtener el error de la aproximación se tomó como referencia la medida del diámetro interno **A.** (Figura 110) del capilar empleado, que en este caso fue de 0.6[mm]. La altura correspondiente en píxeles fue de:

$$84[píxeles]$$

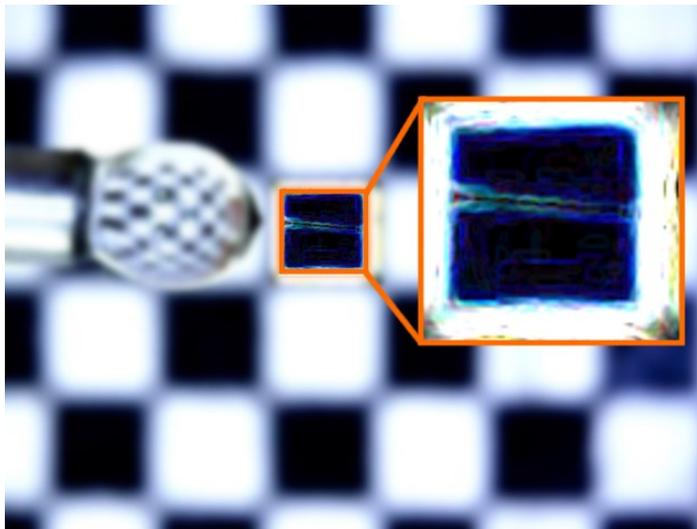
De acuerdo con el factor de conversión mencionado, la altura en milímetros correspondió a:

0.763[mm]

Con lo que el error absoluto de la medición resultante fue de:

27.1%

En el caso de la medición del diámetro del fluido disparado cerca del cono de Taylor C. y D. (*Figura 110*), se utilizó un algoritmo de detección de bordes apreciado en la *Figura 112* para cuantificar los píxeles correspondientes a la longitud y altura respectivas. Resultó de 5 y 4 píxeles para C. y D. con su equivalente de 45[ $\mu\text{m}$ ] y 36[ $\mu\text{m}$ ] respectivamente.



*Figura 112. Imagen con la sección de la retícula donde se aplicó el detector de bordes.*

## CONCLUSIONES.

Para el desarrollo de este proyecto, la mecatrónica y su proceso de diseño, más allá de proveer la integración entre los componentes electrónicos, mecánicos y de informática, permitió obtener una disolución que proporciona para al problema de posicionar el colector con la certeza a la distancia deseada. Por otro lado, con ayuda de la interfaz gráfica, se facilita la introducción del flujo volumétrico deseado.

Los experimentos realizados, aportaron información útil con respecto a los objetivos de los dispositivos diseñados, ya que permiten bombear flujo volumétrico deseado y colocar el colector a la distancia especificada por el usuario a través de la interfaz gráfica. Es por esto que se puede concluir que ambos cumplieron su función.

Se logró diseñar e implementar un dispositivo mecatrónico de bombeo para jeringas y uno para posicionar la placa de deposición durante el electrohilado. Además, se verificó su funcionamiento ante la exposición a un campo eléctrico de 10[kV] y una distancia aguja-colector de 9.5[mm]. Con el soporte de la interfaz gráfica diseñada y con el programa de captura de imágenes de la cámara USB empleada, se pudo hacer una medición aproximada de las dimensiones de la gota en la que se formó el cono de Taylor, así como del diámetro del jet una vez expulsada la disolución hacia el colector.

Las especificaciones de estos dispositivos quedaron definidas de la siguiente manera:

Flujo mínimo	0.5ul/min
Flujo máximo	10mL/min
Velocidad del posicionador	60mm/s
Rango de distancia (aguja-colector)	0 - 132.25[mm]
Diferencia de potencial admitida	1 - 10[kV]

Con relación al campo eléctrico, se deben tomar medidas que permitan incrementar el rango de operación del sistema, ya que hay soluciones de polímero que

requieren magnitudes mayores de voltaje para la producción de campo eléctrico.

El empleo de dispositivos mecatrónicos durante el electrohilado, hace posible que, a pesar de la complejidad de los fenómenos físicos que suceden durante este proceso, se facilite el desarrollo de los experimentos necesarios para caracterizar la disolución y sus parámetros de procesamiento.

Cabe señalar que la geometría del cono de Taylor es un indicador del proceso de electrohilado; de tal forma que alteraciones en su forma repercutirán en la morfología de las nanofibras obtenidas y por ende en la calidad del proceso de electrohilado por sí mismo. En resumen, la adquisición de imágenes del cono de Taylor permite proporcionar un control directo e instantáneo mientras se obtienen nanofibras mediante el proceso de electrohilado.

Se proporciona una herramienta que permite cambiar los parámetros de procesamiento mencionados de una forma más segura y sin la necesidad de apagar la fuente de alto voltaje o detener todo el proceso para realizar cambios sobre dichos parámetros.

## TRABAJO A FUTURO.

Este se enfoca en una serie de recomendaciones resultantes del análisis del sistema diseñado y se divide en los siguientes aspectos:

### MECÁNICO.

Para mejorar la respuesta del fluido ante el empuje del émbolo, será conveniente sustituir el actuador actual por uno en el que el paso del tornillo sea menor a  $2\left[\frac{mm}{revolución}\right]$ , asimismo, es recomendable que las características del motor, si es a pasos, permitan al menos duplicar el número de pasos por revolución. En contraste con esta disolución también podría sustituirse por un motor de corriente directa acoplado a una transmisión mecánica basada en engranes o elementos flexibles, con su respectiva etapa de control para comparar la respuesta entre ambas clases de actuadores.

91 Con respecto al posicionador del colector, se empleará la carrera completa del actuador. El conjunto de piezas donde se instala la placa de recolección debería plantearse nuevamente para que su centro de masa quede alineado con el eje de giro, para evitar el cabeceo de esta sección.

Para ambos sistemas, las piezas impresas por manufactura aditiva, deberían construirse con otro material, como ABS, de tal forma que sean más rígidas.

### ELÉCTRICO/ELECTRÓNICO.

En este aspecto, se trasladará el circuito a una placa impresa, de tal forma que se eliminen los cables con los que se conectaron los optoacopladores, las etapas de potencia y el microcontrolador.

En el ámbito de los sensores, para el de corriente, se diseñará el circuito acondicionador de la señal, para conservar las ventajas actuales, pero con los beneficios de detectar cambios más pequeños en la corriente y verificar el fenómeno reportado en la literatura. Para el sensor de distancia, se sustituirá el óptico por uno basado en sonar con las medidas de protección necesaria para exponerlo al campo eléctrico.

En combinación con la propuesta mecánica, especialmente para el dispositivo de bombeo, se cambiará la etapa de potencia y control de pasos por una que permita hacer obtener un mayor número de micropasos, así como la adición de un sensor de flujo volumétrico a la salida de la jeringa.

Se incluirán LEDs notificadores, así como una pantalla LCD donde se observen los parámetros enviados a través de la interfaz en la computadora.

Para la parte eléctrica, se construirá una carcasa para los controladores, sensor de corriente y microcontrolador, que pueda conectarse a tierra en su superficie y los mantenga aislados de descargas del campo eléctrico.

Finalmente, para el posicionador, el borne de tierra física se colocará a una distancia mayor de la conexión del ánodo de la fuente de alto voltaje.

#### DE LA INTERFAZ GRÁFICA.

Se agregará la función de toma de fotografías y vídeo dentro de la misma, y se podrá especificar el tiempo durante el que se realizará el bombeo del fluido; de tal forma que puedan asociarse a una medida de corriente y flujo volumétrico y se facilite el análisis posterior de las condiciones de procesamiento durante el electrohilado.

## REFERENCIAS.

1. **Ramakrishna, Seerman, y otros.** *An Introductcion to Electrospinning and Nanofibers.* Singapore : World Scientific, 2005.
2. **Wendorff, Joachim H., Agarwal, Seema y Greiner, Andreas.** *Electrospinning Materials, Processing and Applications.* Weinheim : Wiley-VCH Verlag & Co., 2012.
3. **Andrady, Anthony L.** *Science and Technology of Polymer Nanofibers.* Hoboken : John Wiley & Sons, 2008.
4. **Brito, Fionna M. y Castro, Guillermo R.** Nanotecnología, hacia un nuevo portal científico-tecnológico. *Revista Química Viva.* [En línea] 2 de diciembre de 2016. [https://cienciaetecnologias.com/wp-content/uploads/2013/08/Escala\\_nano.jpg](https://cienciaetecnologias.com/wp-content/uploads/2013/08/Escala_nano.jpg).
5. **Johnston, Hamish.** Quantum dots entangled with single photons. *Tao Patch Human Upgrade Device.* [En línea] 10 de diciembre de 2016. <http://www.taopatch.com/blog/quantum-dots-entangled-with-single-photons/>.
6. **National Physycal Laboratory.** Nanomagnetism. *National Physycal Laboratory.* [En línea] 5 de diciembre de 2016. <http://www.npl.co.uk/science-technology/quantum-detection/research/nanomagnetism/>.
7. **Preparation and Characterization of Polymer Nano Fibres Produced from Electrospinning. Thiyagarajan, Raja y Omprakash, Sahu.** 2014, Journal of Optoelectronics Engineering, pág. 4.
8. **Delvon2.** File:Electrospinning Image for Wikipedia.tif. *Wikimedia Commons.* [En línea] 8 de diciembre de 2016. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electrospinning\\_Image\\_for\\_Wikipedia.tif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electrospinning_Image_for_Wikipedia.tif).
9. *Characterization of microstructured fibre emitters: in pursuit of improved nano electropray ionization performance.* **Wu, Xinyin, Oleshuck, Richard D. y Cann, Natalie M.** 2012, Analyst, pág. 2.
10. **Yflow®.** Coaxial Electro spraying & Electrospinning Machine & Equipment. *Yflow.* [En línea] 15 de diciembre de 2016. <http://www.yflow.com/electrospinning-machine/professional-electrospinning-machine/#prettyPhoto>.
11. **Gatford, Joanna.** Formación de fibras mediante electrospinning. *Wikimedia Commons.* [En línea] 8 de diciembre de 2016. [https://es.wikipedia.org/wiki/Electrospinning#/media/File:Electrospinning\\_Diagram.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Electrospinning#/media/File:Electrospinning_Diagram.jpg).
12. **MedSupplier.com.** BD General Use Luer-Lok Tip Syringes with Needles. *MedSupplier.com.* [En línea] 10 de diciembre de 2016. <http://www.medsupplier.com/bd-general-use-syringes-with-needles-309580-C.aspx>.
13. **Hreumtech.** NE-1002X Microfluidics Syringe Pump. *Hreumtech.* [En línea] 8 de diciembre de 2016. <http://hreumtech.com/xs/Syringepump6>.

14. **Glassman High Voltage Incorporated.** EH Series 100 Watt Regulated High Voltage DC Power Supplies. *Glassman High Voltage Incorporated* . [En línea] 7 de diciembre de 2016. [http://www.glassmanhv.com/ByWattage/eh\\_series.shtml](http://www.glassmanhv.com/ByWattage/eh_series.shtml).
15. *Electrospinning jets and polymer nanofibers.* **Reneker, Darrell H. y Yarin, Alexander L.** 2008, *Polymer*, págs. 3,8,10,17,19.
16. **Formhals, Anton.** *Process and Apparatus for preparing artificial threads.* US1975504 United States, 1934.
17. —. *Method and Apparatus for the production of fibers.* US2116942 United States, 1938.
18. *Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique.* **Bhardwaj, Nandana y Kundu, Subhas C.** 2010, *Biotechnology Advances*, pág. 5.
19. *Disintegration of water drops in an electric field.* **Taylor, Geoffrey.** London : s.n., 1964, *Proceedings of the Royal Society*, págs. 3,11.
20. *Effects of Electric Field on Multineedle Electrospinning: Experiment and Simulation Study.* **Xie, Sheng y Zeng, Yongchun.** 2014, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, págs. 1-6.
21. *Investigation of the Optimum Electric Field for a Stable Electrospinning Process.* **Angamma, C. J. y Jayaram, S. H.** Houston, Texas : IEEE, 2010. *Industry Applications Society Annual Meeting*. págs. 1,3-5.
22. *Modelling of electrospinning process at various electric fields.* **Karatay, O. y Dogan, M.** 2011, *IET Micro & Nano Letters*, págs. 1,3,5.
23. *Electric field distribution and jet motion in electrospinning process: from needle to hole.* **Zheng, Yuansheng, Xie, Sheng y Zeng, Yongchun.** 2013, *Journal of Material Science*, págs. 3-5.
24. *Nanofiber alignment during electrospinning: Effects of collector structures and governing parameters.* **Gou, Yanli, Liu, Canhua y Lei, Tingping.** Taipei, Taiwan : IEEE, 2014. *International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO)*. págs. 1-3.
25. *Effect of applied voltage on jet electric current and flow rate in electrospinning of polyacrylonitrile solutions.* **Fallahi, Delaram, Rafizadeh, Mehdi y Mohammadi, Naser.** 2008, *Polym. Int*, págs. 2-5.
26. *Controlling the electrospinning process by jet current and Taylor cone.* **Yang, Ying, Zhidong, Jia y Qiang, Li.** Nashville, TN, USA : IEEE, 2005. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*.
27. *The effects of flow rate and the distance between the nozzle and the target on the operating conditions of electrospinning.* **Yang, Ying, y otros.** 2011, *Journal of Polymer Engineering*, págs. 7-10,18.
28. *Mathematical Model of the electrospinning process. I. Effect of the distance between*

*electrodes on the electrospun fibers diameter.* Manea, Liliana Rozemarie, y otros. 2016, Revista de Chimie-Bucharest-Original Edition, págs. 1,5.

29. *Effect of needle length, electrospinning distance, and solution concentration on morphological properties of polyamide-6 electrospun nanowebs.* Hekmati, Amir Houshang, y otros. 2013, Textile Journal Research, págs. 9-14.

30. *Effect of concentration, voltage, take-over distance and diameter of pinhead on precursory poly (phenylene vinylene) electrospinning.* Wang, C., y otros. 2006, Pigment & Resin Technology, págs. 1,5,6.

31. *Concept of minimum electrospinning voltage (MEV) in electrospinning of PAN-DMF system: effect of distance.* Basu, Sandip, Jassal, Manjeet y Agrawal, Ashwini K. 2013, The Journal of the Textile Institute, págs. 1-3.

32. *Development of PEO nanofibers having novel morphologies via distance positioning apparatus.* Sivri, Çağlar, Dayik, Mehmet y Aksoy, Sennur Alay. 2016, The Journal of The Textile Institute, págs. 2-5.

33. *Characterization of Syringe-pump-driven Versus Pressure-driven Microfluidic Flows.* Zeng, Weng, Li, Songjing y Wang, Zuwen. Harbin, China : IEEE, 2015. International Conference on FLuid Power and Mechatronics (FPM). págs. 1-4.

34. **Microchip.** Brushed DC Motor Basics. *Microchip.* [En línea] 6 de diciembre de 2010. [http://www.microchip.com/stellent/groups/SiteComm\\_sg/documents/DeviceDoc/en543041.pdf](http://www.microchip.com/stellent/groups/SiteComm_sg/documents/DeviceDoc/en543041.pdf).

35. **Sharp.** GP2Y0A41SK0F. *Pololu Robotics and Electronics.* [En línea] 2014. [Citado el: 16 de mayo de 2016.] <https://www.pololu.com/file/OJ845/GP2Y0A41SK0F.pdf>.

36. **Sparkfun Electronics Inc.** Slide Pot - X-Large (10k Linear Taper). *Sparkfun Electronics Inc.* [En línea] 2012. [Citado el: 10 de diciembre de 2016.] <https://www.sparkfun.com/products/9119>.

37. **MaxBotix® Inc.** LV-MaxSonar®-EZ™ Series. *MaxBotix® Inc. High Performance Ultrasonic Rangefinders.* [En línea] 2016. [Citado el: 6 de diciembre de 2016.] [http://maxbotix.com/documents/LV-MaxSonar-EZ\\_Datasheet.pdf](http://maxbotix.com/documents/LV-MaxSonar-EZ_Datasheet.pdf).

38. **Spraybase®.** What is electrospinning? *Spraybase®.* [En línea] 2016. [Citado el: ] <https://www.spraybase.com/electrospinning/>.

39. **4SPIN®.** Specifications. *4SPIN®.* [En línea] 2016. [Citado el: ] <https://www.4spin.info/images/brochures/4spin-technical-specification.pdf>.

40. **Elmarco.** NS Lab. *Elmarco.* [En línea] 2016. [Citado el: ] <http://www.elmarco.com/nanofiber-equipment/electrospinning-equipment-ns-lab/>.

41. **Harvard Apparatus U.K.** Standard Infusion Only Pump 11 Elite Syringe Pumps. *Harvard Apparatus U.K.* [En línea] 10 de diciembre de 2016.

[http://www.harvardapparatus.co.uk/webapp/wcs/stores/servlet/haisku3\\_10001\\_11051\\_63954\\_-1\\_HAUK\\_ProductDetail\\_N\\_37295\\_37313\\_37315#specificationstab](http://www.harvardapparatus.co.uk/webapp/wcs/stores/servlet/haisku3_10001_11051_63954_-1_HAUK_ProductDetail_N_37295_37313_37315#specificationstab).

42. **KDScientific**. KDS Legato 100 Series User's Manual. *KDScientific*. [En línea] 2015. [http://www.kdscientific.com/media/manuals/KDS%20Legato%20100%20Series\\_5617-006REV2.0.pdf](http://www.kdscientific.com/media/manuals/KDS%20Legato%20100%20Series_5617-006REV2.0.pdf).

43. **New Era Pump Systems, Inc.** syringepump.com. *New Era Pump Systems, Inc.* [En línea] 2012. [Citado el: 20 de mayo de 2016.] <http://www.syringepump.com/download/NE-1000Brochure.pdf>.

44. **Warner Instruments**. Syringe Pump 11 Elite. *Warner Instruments*. [En línea] 2015. [Citado el: 10 de diciembre de 2016.] [https://warneronline.com/img\\_lg/704500\\_Pump11Elite\\_diagram.jpg](https://warneronline.com/img_lg/704500_Pump11Elite_diagram.jpg).

45. **STMicroelectronics**. ULN2801A,ULN2802A,ULN2803A,ULN2804A Eight Darlington array. *STMicroelectronics*. [En línea] 2016. [Citado el: 10 de diciembre de 2016.] <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/e4/fa/1c/16/4e/39/49/04/CD00000179.pdf/files/CD00000179.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000179.pdf>.

46. —. L293D,L293DD PUSH-PULL FOUR CHANNEL DRIVER WITH DIODES. *STMicroelectronics*. [En línea] 2016. [Citado el: 10 de diciembre de 2016.] <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/04/ac/22/f9/20/5d/43/a1/CD00000059.pdf/files/CD00000059.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000059.pdf>.

96

47. —. STSPIN220 Low voltage stepper motor driver. *STMicroelectronics*. [En línea] 10 de diciembre de 2016. <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/group3/42/7e/5c/90/70/ef/47/95/DM00291865/files/DM00291865.pdf/jcr:content/translations/en.DM00291865.pdf>.

48. —. L6219 Stepper motor driver. *STMicroelectronics*. [En línea] 10 de diciembre de 2016. <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/14/73/aa/3a/2b/cd/46/b1/CD00000092.pdf/files/CD00000092.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000092.pdf>.

49. **Texas Instruments**. DRV8825 Stepper Motor Controller IC. *Texas Instruments*. [En línea] 10 de diciembre de 2016. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf>.

50. —. DRV8880 2-A Stepper Motor Driver With AutoTune™. *Texas Instruments*. [En línea] 10 de diciembre de 2016. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8880.pdf>.

51. **STMicroelectronics**. L6474 Fully integrated microstepping motor driver. *STMicroelectronics*. [En línea] 10 de diciembre de 2016. <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/group3/57/28/bd/09/23/1f/47/1f/DM00043117/files/DM00043117.pdf/jcr:content/translations/en.DM00043117.pdf>.

52. **ON Semiconductor®**. AMIS-30543 Micro-Stepping Motor. *ON Semiconductor®*. [En línea] 10 de diciembre de 2016. <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/AMIS-30543-D.PDF>.

53. **Lin Engineering**. ZH417 Series Hollow Shaft Stepper Motor. *Lin Engineering the step motor specialists*. [En línea] 10 de diciembre de 2016. <https://www.linengineering.com/products/stepper-motors/zh417-series-hollow-shaft-stepper-motor/>.

54. **Sparkfun Electronics Inc.** Stepper Motor - 29 oz.in (200 steps/rev, Threaded Shaft). *Sparkfun Electronics Inc.* [En línea] 7 de diciembre de 2011. <https://www.sparkfun.com/products/10848>.

55. **Pololu Robotics and Electronics**. Stepper Motor with 18cm Lead Screw: Bipolar, 200 Steps/Rev, 42×38mm, 2.8V, 1.7 A/Phase. *Pololu Robotics and Electronics*. [En línea] 8 de diciembre de 2013. <https://www.pololu.com/product/2689>.

56. **Zetex Semiconductors**. AN39 Current measurement applications handbook. *Diodes Incorporated*. [En línea] 2016. [Citado el: 1 de febrero de 2017.] <https://www.diodes.com/assets/App-Note-Files/an39.pdf>.

57. **Pololu Robotics and Electronics**. ACS714 Current Sensor Carrier -5A to +5A. *Pololu Robotics and Electronics*. [En línea] 11 de diciembre de 2015. <https://www.pololu.com/product/1185>.

58. **Linear Technology**. Current Sense Circuit Collection Making Sense of Current. *Linear Technology*. [En línea] 2005. [Citado el: 10 de febrero de 2017.] <http://cds.linear.com/docs/en/application-note/an105fa.pdf>.

59. **Arduino**. Arduino/Genuino UNO. *Arduino*. [En línea] 5 de diciembre de 2016. <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>.

60. **Microchip**. PIC16F887. *Microchip*. [En línea] 4 de diciembre de 2016. <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/pic16f887>.

61. **California Eastern Laboratories**. Photocoupler PS2501-1,-4,PS2501L-1,-4. *California Eastern Laboratories*. [En línea] 8 de febrero de 2017. <http://www.cel.com/pdf/datasheets/ps2501.pdf>.

62. **Meixueiro, Daphne C.** *Efectos de la corriente sobre el cono de Taylor durante el electrohilado*. Ciudad de México : Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2016.

63. **Kulkarni, Sulabha K.** *Nanotechnology: Principles and Practices*. Cham : Springer International Publishing, 2015.

64. *Electrospinning of Nanofibers: Reinventing the Wheel?* Li, Dan y Xia, Younan. 2004, *Advanced Materials*, págs. 1,3,13.

65. *Affecting parameters on electrospinning process and characterization of electrospun gelatin nanofibers*. Okutan, Nagihan, Terzi, Pinar y Altay, Filiz. 2014, *Food Hydrocolloids*,

págs. 3-7.

66. *Application of direct tracking method for measuring electrospun nanofiber diameter.* Ziabari, M., Mottaghitalab, V. y Haghi, A. K. 2009, Brazilian Journal of Chemical Engineering, págs. 2-7.

67. Wildi, Theodore. Motores de velocidad gradual o de pasos. *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*. Naucalpan de Juárez, Estado de México : Perason Educación, 2007, págs. 425-442.

68. Chapman, Stephen J. Motores de avance paso a paso (motres a pasos). [aut. libro] Stephen J. Chapman. *Máquinas Eléctricas*. Distrito Federal, México : McGrawHill/, 2012, págs. 439-442.