



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.

“DESARROLLO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO ESTRECHADOR DE MICRO-FIBRA ÓPTICA”



Tesis que para obtener el grado de Maestro en Ciencias (Óptica)

Presenta: Ing. Fís. Miguel Ángel Ramírez Hernández

Director de Tesis: Dr. Efraín Mejía Beltrán

León · Guanajuato · México
Julio de 2020

*Dedicado a mis padres:
Miguel Ángel Ramírez Hernández
Mercedes Hernández Velázquez*

*y a mi hermano:
Luis Ángel Ramírez Hernández
por su amor y apoyo incondicional.*

Agradecimientos

Agradezco primero a Dios por permitirme cursar un grado académico más, que culmina con el presente trabajo. Por su infinita bondad y por el invaluable regalo de la vida.

A mis padres y hermano, por la fortuna que tengo de contar con su amor, apoyo incondicional y el soporte emocional que siempre me brindan en cada momento de mi vida. Ustedes son mi fuerza y mi motor.

Al Dr. Efraín Mejía Beltrán por su admirable desempeño como asesor de tesis. Por su tiempo, apoyo y esfuerzo dedicado a este trabajo. Por ser un ejemplo a seguir como ser humano y como científico. Por su amistad.

Al I.F. Edgar Medina Segura por su amistad incondicional y por sus contribuciones en el desarrollo del modelo matemático de la enrolladora de fibra.

Al M. en C. Álvaro Guerra por sus contribuciones en la construcción de la enrolladora de fibra.

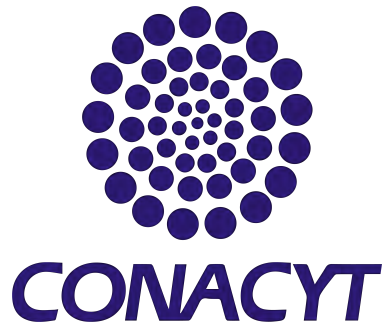
Al Dr. David Monzón Hernández, la Dra. Maribel Juárez Hernández y al Dr. Uladzimir Petróvich Minkóvich, por el tiempo invertido en la revisión de este trabajo. Por sus valiosas sugerencias y aportaciones.

A mis tíos Marcelo y Gloria, mis primas hermanas Nayeli y Alejandra, por su amor, apoyo e interés en todos mis proyectos.

Finalmente agradezco a todo el personal del CIO, incluyendo profesores y personal administrativo, por su excelente labor durante mi formación académica.

Agradecimientos institucionales

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado mediante la beca de maestría (CVU/becario No. 742457), el cual permitió financiar y consecuentemente obtener los resultados necesarios para la elaboración del presente trabajo.



Agradezco al Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) por darme la oportunidad de realizarme profesionalmente dentro de sus instalaciones, proporcionándome los recursos necesarios para la elaboración del presente trabajo. En general, por contribuir en mi formación científica.



Resumen

En este trabajo se describe el proceso de diseño y construcción de un prototipo estrechador de fibra óptica basado en la técnica de arco eléctrico, con la capacidad de fabricar tanto secciones cortas de algunos centímetros de fibra óptica estrechada (tapers), como longitudes de varios metros de micro-fibra óptica. Se trata de un prototipo a base de un par de electrodos conectados a una fuente de poder, cuyo circuito genera un arco eléctrico continuo para lograr el estrechamiento de la fibra al pasar por este, gracias a un sistema mecánico a base de motorreductores y cilindros con bandas que propician el desplazamiento controlado de la fibra. Como parte del prototipo general, se implementa además el uso de un dispositivo capaz de enrollar fibra de cualquier diámetro, estándar y estrechada, que a su vez mide la longitud de fibra enrollada a partir de un modelo matemático implementado al funcionamiento del dispositivo. Lo anterior con la finalidad de enrollar la fibra producida en la etapa de estrechamiento, en el caso de producir grandes longitudes de micro-fibra. El control de desempeño del prototipo general y de ambos dispositivos que lo componen (estrechador y enrollador de fibra), se realiza a partir del microcontrolador de software libre Arduino. La selección de componentes mecánicos y eléctricos, vuelven a este prototipo un desarrollo tecnológico de bajo costo, pero de gran alcance por sus aplicaciones.

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	IV
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	VIII
1 Fibras ópticas estrechadas	1
1.1 Introducción	1
1.2 Estructura	3
1.3 Criterio de adiabaticidad	5
1.4 Aplicaciones	6
1.5 Métodos de fabricación	8
1.5.1 Estrechamiento por llama	8
1.5.2 Descarga de arco eléctrico	9
1.5.3 Ataque químico	10
1.5.4 Láser	11
2 Estrechador de fibra	12
2.1 Operación	12
2.1.1 Componentes	12
2.1.2 Funcionamiento mecánico	14
2.1.3 Funcionamiento eléctrico	15
2.1.4 Instrucciones de programación	17
2.2 Prototipo final	19
3 Enrolladora de fibra	23
3.1 Operación	23
3.1.1 Componentes	23
3.1.2 Funcionamiento mecánico	25
3.1.3 Funcionamiento eléctrico	27
3.1.4 Instrucciones de programación	28
3.2 Modelo matemático	30
3.3 Error asociado como instrumento de medición	33
3.4 Prototipo final	35
4 Conclusiones	38
4.1 Trabajo a futuro	38
4.2 Mejoras del prototipo	38
4.3 Conclusiones generales	39

Índice de figuras

1.1	Estructura básica de una fibra óptica, en la que el revestimiento (cladding) tiene índice de refracción menor que el núcleo (core) [1].	1
1.2	Ángulo de aceptación θ_a de una fibra. (a) Fibra con apertura numérica $NA = \sin \theta_a$ pequeña. (b) Fibra con apertura numérica más grande [1].	2
1.3	Dimensiones de fibras mono-modo y multi-modo [2].	2
1.4	Perfil del índice de refracción y trayectoria de los rayos principales en MMF tipo step-index, SMF y MMF tipo graded index (GRIN MMF) [1].	3
1.5	<i>Taper bicónico</i> , utilizado para sensores.	3
1.6	Perfil longitudinal de una fibra estrechada [3].	4
1.7	Fibra óptica antes y después del estrechamiento.	4
1.8	Cambio de la cintura cilíndrica de un <i>taper</i> en el tiempo.	5
1.9	Dispositivos basados en fibra óptica estrechada.	6
1.10	Sección estrechada de una fibra óptica, en la que fotones de fluorescencia acoplados al modo guiado de la nano-fibra son detectados al final de la fibra óptica mono-modal, usando un fotodetector de avalancha (APD por sus siglas en inglés) [4].	8
1.11	Técnica de estrechamiento por llama [5].	9
1.12	Descarga de arco eléctrico.	9
1.13	Fibra óptica colocada en la empalmadora de fusión Fitel S153A [6].	10
1.14	Técnica de estrechamiento por ataque químico. (a) Fibra en un contenedor con una solución de ataque de HF , NH_4F y H_2O con relación 1.5:1:1, y encima una capa de solvente orgánico. (b) Punta de la fibra después de 100 minutos. (c) Punta de fibra en una relación de compuestos 7:1:1 de la misma solución por 140 minutos [7].	10
2.1	Motorreductores.	13
2.2	Componentes del estrechador de fibra.	13
2.3	Esquema general del estrechador de fibra.	14
2.4	Esquemático del circuito eléctrico de la fuente de poder.	16
2.5	Señales en el circuito.	16
2.6	Diagrama de flujo del código de programación sobre la operación del estrechador de fibra al fabricar tapers.	17
2.7	Diagrama de flujo del código de programación sobre la operación del estrechador de fibra al fabricar micro-fibra.	18
2.8	Prototipo final del estrechador de fibra (componentes y vista frontal).	20
2.9	Prototipo final del estrechador de fibra (vista superior y lateral).	21
2.10	Fuente de poder para generar arco eléctrico (componentes y vista superior).	22
3.1	Circuito integrado L293b [8].	24
3.2	Componentes de una tarjeta Arduino UNO [9].	24
3.3	Esquema general de la enrolladora de fibra.	25
3.4	Función de la polea para alineación de la fibra. La fibra proveniente del carrete pasa por la polea hacia el carrete vacío, con ángulos de a) -20° , b) 0° y c) 20°	26

3.5	Esquemático del circuito eléctrico de la enrolladora de fibra.	27
3.6	Diagrama de flujo del código de programación sobre la operación de la enrolladora de fibra. . .	29
3.7	Vista lateral y transversal del carrete.	30
3.8	Código en Python para calcular el número de revoluciones totales N_t	33
3.9	Prototipo final de la enrolladora de fibra (componentes, acercamiento y vista superior).	36
3.10	Prototipo final de la enrolladora de fibra (vista frontal y lateral).	37

Índice de tablas

1.1 Métodos para fabricar fibra óptica estrechada	23
2.1 Tabla de verdad compuerta lógica NAND.....	26
3.1 Secuencia de pasos en motores bipolares	40

Capítulo 1

Fibras ópticas estrechadas

1.1 Introducción

La inclusión de las fibras ópticas a los sistemas de comunicación marcó un avance significativo en el campo de la transferencia de información. Ha proporcionado los medios para transferir grandes cantidades de datos a una velocidad muy alta (con valores de ancho de banda, alcanzados en la actualidad, en el orden de los Tb/s) a través de un diámetro extremadamente pequeño (generalmente de $250\mu m$ para fibras estándar) de fibra ligera que además es inmune a perturbaciones electromagnéticas.

Una fibra óptica convencional es una guía de onda dieléctrica y cilíndrica hecha de un material con bajas pérdidas, tal como el vidrio de sílice (SiO_2). Tiene un *núcleo* central en el que la luz es guiada, incrustado en un *revestimiento* externo de índice de refracción ligeramente menor (Figura 1.1). Lo anterior, para satisfacer el guiado continuo de la luz a lo largo del núcleo de la fibra.

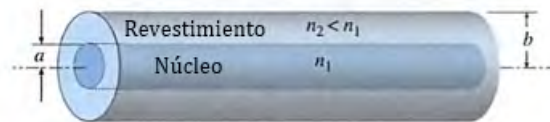


Figura 1.1: Estructura básica de una fibra óptica, en la que el revestimiento (cladding) tiene índice de refracción menor que el núcleo (core) [1].

Un rayo incidente procedente del aire hacia la fibra se convierte en un rayo guiado si, bajo refracción en el núcleo, forma un ángulo θ con el eje de la fibra más pequeño que $\bar{\theta}_c$ (complemento del ángulo crítico). El ángulo crítico es el ángulo mínimo que deben cumplir los rayos que inciden para que el ángulo de refracción sea mayor a 90° y por tanto se cumpla la condición de reflexión total interna (RTI) [1]. Como se muestra en la Figura 1.2, si aplicamos la ley de Snell a la interfaz aire-núcleo, se obtiene el ángulo θ_a en el aire, en función del ángulo $\bar{\theta}_c$ en el núcleo:

$$\begin{aligned} 1 \cdot \sin \theta_a &= n_1 \sin \bar{\theta}_c \\ \sin \theta_a &= n_1 \sqrt{1 - \cos^2 \bar{\theta}_c} \\ &= n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \\ &= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{aligned} \tag{1.1}$$

El ángulo de aceptación es entonces:

$$\theta_a = \sin^{-1} NA \quad \text{donde} \quad NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.2)$$

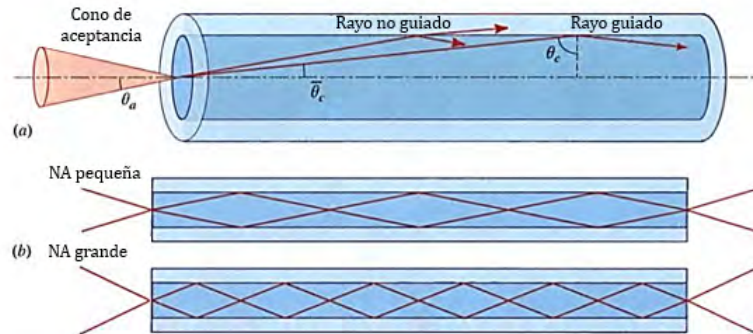


Figura 1.2: Ángulo de aceptación θ_a de una fibra. (a) Fibra con apertura numérica $NA = \sin \theta_a$ pequeña. (b) Fibra con apertura numérica más grande [1].

Existen diferentes clasificaciones de las fibras ópticas de acuerdo a sus características, estructura, aplicaciones, etc. La manera más simple de clasificarlas es considerando el número de modos o rayos luminosos que pueden ser transmitidos a través del núcleo de la fibra; si una fibra puede guiar un solo modo, entonces es llamada *Fibra Óptica Mono-modal* (SMF por sus siglas en inglés), pero si la fibra es capaz de guiar múltiples modos recibe el nombre de *Fibra Óptica Multi-modal* (MMF). Una SMF tiene un diámetro de núcleo muy pequeño en comparación con una MMF, ver Figura 1.3. Por esta razón este tipo de fibra sólo puede guiar un modo de propagación.

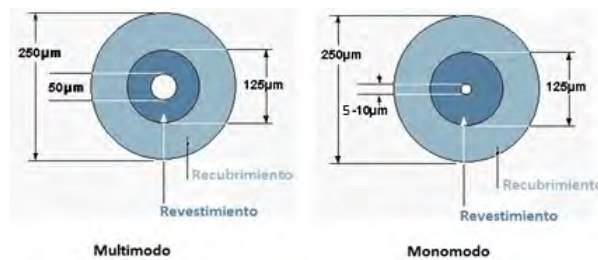


Figura 1.3: Dimensiones de fibras mono-modo y multi-modo [2].

El perfil de índice de refracción del núcleo es generalmente del tipo escalonado (*step-index*); es decir, el valor es constante en cualquier punto. En una MMF el perfil de índice de refracción del núcleo puede ser del tipo escalonado o índice gradual (*graded index* o *GRIN*), en donde el índice de refracción varía en la dirección radial. En la Figura 1.4 podemos apreciar como viajan los modos a través de las fibras mencionadas a partir de su perfil de índice de refracción.

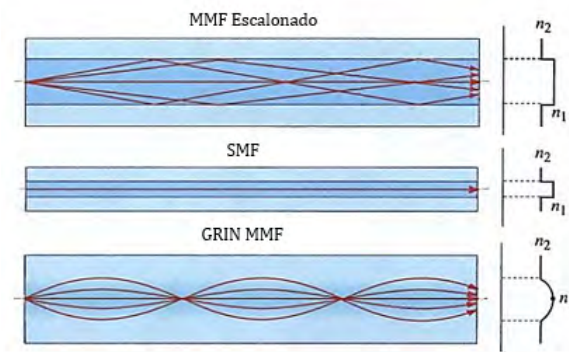


Figura 1.4: Perfil del índice de refracción y trayectoria de los rayos principales en MMF tipo step-index, SMF y MMF tipo graded index (GRIN MMF) [1].

Las fibras ópticas representan hoy en día la columna vertebral de la comunicación moderna. En una fibra estándar de telecomunicaciones, como ya se explicó, la luz es guiada dentro del núcleo y a la vez aislada del ambiente mediante el revestimiento, permitiendo pérdidas bajas y poca perturbación en la transmisión sobre grandes distancias. Sin embargo, existen otros tipos de fibras ópticas como: fibras de doble revestimiento, fibras dopadas con tierras raras, fibras con revestimiento reducido, fibras de alto índice, fibras foto-sensibles, fibras con lentes, fibras de cristal fotónico (PCF, por sus siglas en inglés), fibras de plástico, fibras de dispersión desplazada (DSF), fibras de polarización mantenida (PMF), fibras ópticas estrechadas (tapers), etc. Siendo este último ejemplo, de gran interés para nuestro trabajo.

La transmisión de la luz en una fibra óptica estrechada o *taper* se basa en las ecuaciones de Maxwell al igual que en una fibra estándar, aunque se debe considerar que existen variaciones de este tipo de fibras. El caso más común de un *taper*, que además es el utilizado para diferentes tipos de sensores, es el *taper bicónico* (Figura 1.5) de diámetro menor a la longitud de onda de la luz guiada, que muestra un confinamiento lateral fuerte del modo guiado además de un campo evanescente pronunciado rodeando la fibra.

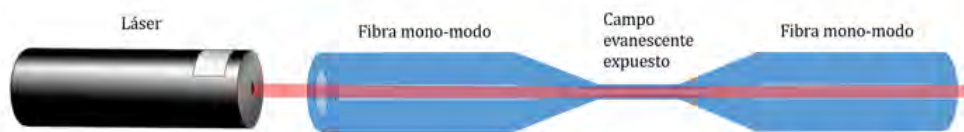


Figura 1.5: Taper bicónico, utilizado para sensores.

A continuación se presenta un modelo de la estructura de este tipo de estrechamiento, además de las ecuaciones fundamentales en las que se basa dicho modelo.

1.2 Estructura

Según el modelo del perfil de una fibra óptica estrechada o *taper* de Birks y Li [3], la estructura básica de una fibra óptica estrechada consiste en 5 regiones bien definidas, como se pueden apreciar en la Figura 1.6 denotadas por números griegos.

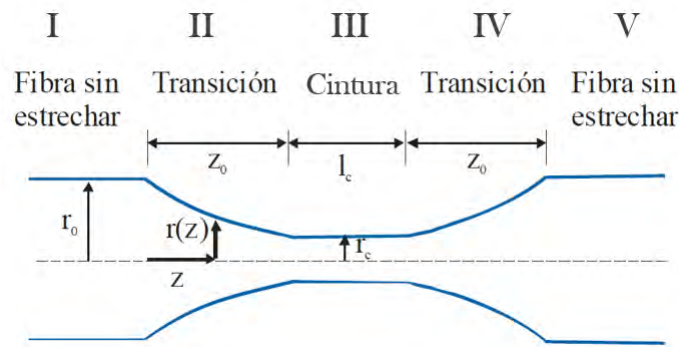
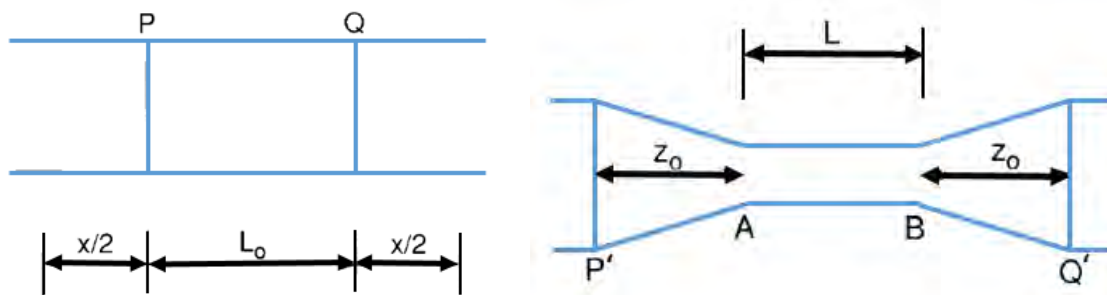


Figura 1.6: Perfil longitudinal de una fibra estrechada [3].

Durante el proceso de estrechamiento hay dos regiones de la fibra óptica estándar que no sufren alguna modificación (I y V), identificadas en la Figura 1.6 como *fibra sin estrechar*, con un radio constante r_0 . Las regiones II y IV, llamadas *transición* de longitud z_0 , corresponden a zonas de transición en las que el radio de la fibra decrece y crece mediante una función $r(z)$, donde z es una coordenada longitudinal. El origen de z esta al inicio de la transición de estrechamiento, por ello $r(0) = r_0$. Por último, la región III (*cintura*) es la zona más estrecha de la fibra de longitud l_c , que además presenta un radio constante de cintura r_c , por lo que $r(z_0) = r_c$.

La Figura 1.7(a) representa una fibra estándar, de la cual se desea estrechar una longitud L_0 medida del punto P al punto Q . Después del proceso de estrechamiento, la fibra aumenta una longitud x (longitud del *taper*), que se puede obtener con la resta de la longitud $P'Q'$ de la Figura 1.7(b) (después del estrechamiento) menos PQ de la Figura 1.7(a) (antes del estrechamiento). Típicamente, la variación de x se determina directamente con la velocidad relativa de los dos componentes que tiran de los extremos de la fibra durante la fabricación del *taper*.



(a) Fibra óptica previo al estrechamiento [3].

(b) Fibra óptica después del estrechamiento [3].

Figura 1.7: Fibra óptica antes y después del estrechamiento.

Este modelo se basa en dos ecuaciones fundamentales. La primera se obtiene a partir de las Figuras 1.7(a) y 1.7(b). Comparando la longitud total PQ de la fibra estrechada con la distancia inicial PQ antes del estrechamiento, se obtiene la "ley de distancia":

$$2z_0 + L = x + L_0, \quad (1.3)$$

donde L es función de x y L_0 es el valor inicial para $x = 0$. La segunda se obtiene de considerar un modelo en tres dimensiones de la variación del volumen de la cintura en el proceso de estrechamiento, tal como se muestra en las Figuras 1.8(a) y 1.8(b).

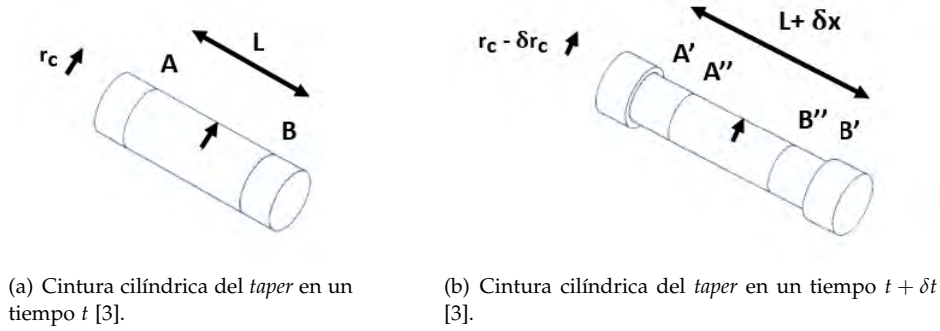


Figura 1.8: Cambio de la cintura cilíndrica de un taper en el tiempo.

Por conservación de masa (y con ello de volumen de fibra) en el proceso de estrechamiento. El volumen cilíndrico AB en un tiempo $t + \delta t$ debe ser igual al volumen también cilíndrico de la cintura AB en un tiempo t , así:

$$\pi(r_c - \delta r_c)^2(L + \delta x) = \pi r_c^2 L, \quad (1.4)$$

donde δr_c es la variación en el radio del cilindro. En el límite $\delta r_c = 0$ se obtiene la ecuación diferencial denotada como "ley de volumen", segunda ecuación fundamental:

$$\frac{dr_c}{dx} = \frac{r_c}{2L} \quad (1.5)$$

La longitud L , según el modelo de Birks y Li, se relaciona también con la longitud de fibra que debe calentarse mientras se genera tensión en los extremos de ésta. Por lo que para una fuente de calor puntual que no se mueve, se considera un valor constante de L ($L(x) = L_0$). Así, para una fibra con radio inicial r_0 en la que se desea estrechar una longitud L_0 , el comportamiento del radio de la cintura esta definido por una función exponencial dependiente de la distancia de elongación x , obtenida de la Ec.(1.5):

$$r_c(x) = r_0 e^{x/2L_0}, \quad (1.6)$$

donde además la cintura tiene una longitud L_0 . De la misma forma, al considerar $L(x) = L_0$ en la Ec.(1.3), se obtiene la relación:

$$z(x) = x/2, \quad (1.7)$$

o de otra forma $x = 2z$, que sustituyendo en la Ec.(1.6) se puede obtener también la función del perfil de la zona de transición del taper:

$$r(z) = r_0 e^{z/L_0}, \quad (1.8)$$

que muestra un perfil exponencial. Es importante mencionar que existen diferentes perfiles de un taper además del exponencial, tal como el perfil parabólico, sinusoidal, polinomial, etc. [3]. Por otro lado, el perfil de la transición de una fibra óptica estrechada esta sujeto al *criterio de adiabaticidad*, que se explica a continuación.

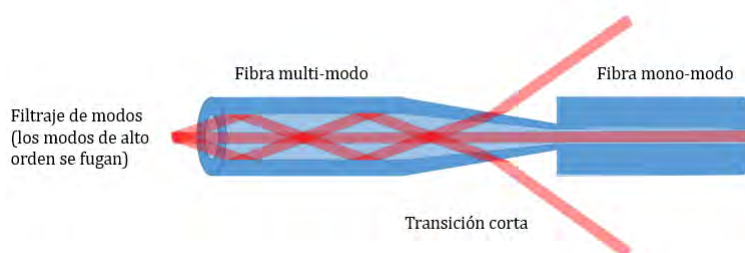
1.3 Criterio de adiabaticidad

Cuando la luz que viaja en una fibra óptica estrechada pasa de la zona sin estrechar a la primer zona de transición, la energía del modo guiado fundamental del núcleo se acopla a un modo local de la cintura del taper. Y cuando se llega a la segunda zona de transición, la energía se acopla de nuevo al modo fundamental. Esta transición debe ser suficientemente gradual para cumplir con el *criterio de adiabaticidad*, con el cuál se

garantiza básicamente que la perturbación causada por la variación del radio de la fibra es tan pequeña que las pérdidas de potencia del modo fundamental a modos de alto orden son despreciables [10].



(a) Convertidor multi-modo a mono-modo (transición gradual).



(b) Convertidor multi-modo a mono-modo (transición corta).

Figura 1.9: Dispositivos basados en fibra óptica estrechada.

Para ejemplificar este criterio tenemos el caso de un convertidor multi-modo a mono-modo en dos variantes, mediante una fibra estrechada con transición gradual y una con transición corta. Este convertidor consiste en una fibra multi-modo estrechada, acoplada a una fibra mono-modo. Al utilizar un *taper* de transición gradual, toda la concentración de modos se acoplan a un modo fundamental debido a las bajas pérdidas que presenta la transición del *taper* (Figura 1.9(a)). Mientras que al utilizar un *taper* de transición corta, al llegar a la zona de transición los modos de más alto orden se fugan, ocasionando un filtraje de modos para finalmente tener solo el modo fundamental en la fibra mono-modo (Figura 1.9(b)). Modo fundamental menos intenso que en el caso anterior debido a la fuga de modos de mayor orden.

En el siguiente apartado se muestra una serie de aplicaciones directas de las fibras ópticas estrechadas o *tapers* para diferentes áreas de la óptica, tales como detección óptica, espectroscopía basada en onda evanescente, óptica no lineal, física de átomos fríos, nano-cavidades, electrodinámica cuántica de cavidades, acoplamiento a nano-cavidades láser y espectroscopía puntos cuánticos.

1.4 Aplicaciones

Una fibra óptica estrechada también es llamada *micro-fibra* o *nano-fibra*, de acuerdo al orden de magnitud que alcanza el diámetro de la cintura. Las nano y micro-fibras son utilizadas en diversas aplicaciones para diferentes áreas de la óptica. Se tiene por ejemplo, en el área de sensores y detección óptica, la implementación y desarrollo de un sensor de hidrógeno a base de fibra óptica estrechada (nano-fibra) cubierta de una película ultra delgada de paladio, que a partir del campo evanescente expuesto por tener un diámetro de fibra menor a la longitud de onda utilizada (1550 nm), es capaz de detectar bajas concentraciones de hidrógeno en condiciones normales [11]. A partir del mismo principio pero utilizando un recubrimiento diferente; un dispositivo capaz de medir el índice de refracción de líquidos propagándose en canales microfluídicos, el cuál esta basado en una fibra mono-modo estrechada a dimensiones submicrométricas e inmersa en un polímero blando [12]. Por último, otro ejemplo dentro de la misma área es la de una fibra óptica estrechada con diámetro menor a la longitud de onda, cubierta con una capa gelatinosa para la detección rápida de humedad relativa, en la que se alcanza un ancho de la sección estrechada de 680 nm [13]. Se puede apreciar como en los ejemplos

mencionados se utiliza el mismo principio físico, medir las alteraciones que sufre el campo evanescente en la fibra estrechada rodeada de diferentes recubrimientos para así poder detectar diferentes sustancias, buscando siempre trabajar con longitudes de onda mayores al diámetro de la nano-fibra.

Las fibras estrechadas también son utilizadas en la rama de la espectroscopía, específicamente espectroscopía de onda evanescente (EWS por sus siglas en inglés) basada en fibra y espectroscopía de absorción de superficie (SAS) también basada en fibra. Un caso particular se muestra en el trabajo titulado "*Ultra-sensitive surface absorption spectroscopy using sub-wavelength diameter optical fibers*", en el que a partir de los modos guiados por las fibras, con diámetros menores a la longitud de onda y su pronunciado campo evanescente en la interfaz revestimiento-aire, se detecta la absorción de partículas en la superficie de la fibra a través de la transmisión en ella [14]. Una aplicación similar a la anterior se presenta en el artículo de investigación "*Ultra-sensitive fluorescence spectroscopy of isolated surface-adsorbed molecules using an optical nanofiber*", con la diferencia que en este método también se utiliza espectroscopía de fluorescencia [15].

La óptica no lineal también representa un campo de interés para aplicaciones de la fibra óptica estrechada. A continuación se presentan una serie de trabajos de investigación sobre la implementación de este tipo de fibras en el área de la óptica no lineal: Generación de supercontinuo en una fibra estándar de telecomunicaciones estrechada a un diámetro de $\sim 2 \mu\text{m}$ sobre 90 mm de longitud, mediante pulsos de femtosegundos con un láser de Titanio-Zafiro sin amplificar [16]; Generación eficiente de tercer armónico mediante una micro-fibra con diámetro casi igual a la mitad de la longitud de onda fundamental, mediante el uso de un láser infrarojo [17]; Generación de supercontinuo mediante pulsos de un láser de femtosegundos en fibra estrechada con diámetro promedio en el rango de $200\text{-}1200 \text{ nm}$ y longitud estrechada entre los $400\text{-}800 \text{ nm}$ [18]; Medición óptica del diámetro estrechado de una fibra óptica mediante la generación de segundo y tercer armónico, con exactitud mayor al 2% [19].

Cuando se enfrían átomos a temperaturas cercanas al cero absoluto, estos revelan su naturaleza ondulatoria, y las leyes de la mecánica cuántica reemplazan a las de la mecánica clásica para describir el comportamiento de estos sistemas [20]. El campo de los gases cuánticos o átomos fríos representa uno de los temas de mayor interés y más multidisciplinarios en la física hoy en día. La rama experimental de este campo utiliza técnicas de física atómica, molecular y óptica para estudiar este tipo de sistemas, para descubrir nuevos comportamientos cuánticos y nuevos estados de la materia. Así mismo, existen diferentes aplicaciones de interés de las nano-fibras en el campo de los átomos fríos. El campo evanescente fuerte alrededor de una fibra óptica adelgazada conlleva a un alto potencial para detectar, atrapar y manipular átomos fríos. Un ejemplo de ello se muestra en el artículo científico "*Cold-atom Physics using ultrathin optical fibers: light-induced dipole forces and surface interactions*", en el cual introduciendo nano-fibras en una nube de átomos fríos, se investiga la interacción de un pequeño número de átomos de cesio con el modo guiado y con la superficie de la fibra [21]. Otra aplicación directa es la detección de átomos individuales usando nano-fibras de sílice, mediante el hecho de que los fotones emitidos espontáneamente desde los átomos pueden ser guiados a través de una fibra óptica mono-modal para finalmente ser detectados por un fotodetector de avalancha, tal y como se muestra en la Figura 1.10 [4]. Adicionalmente, tenemos dos casos relacionados con las trampas ópticas; primero una técnica específica para medir las características de una trampa magneto-óptica para átomos fríos, mediante el monitoreo de la emisión espontánea de átomos atrapados y acoplados dentro del modo guiado de una fibra óptica estrechada [22]; y en el segundo caso, una interfaz óptica creada mediante átomos enfriados por láser, atrapados en el campo evanescente al rededor de una nano-fibra óptica [23].

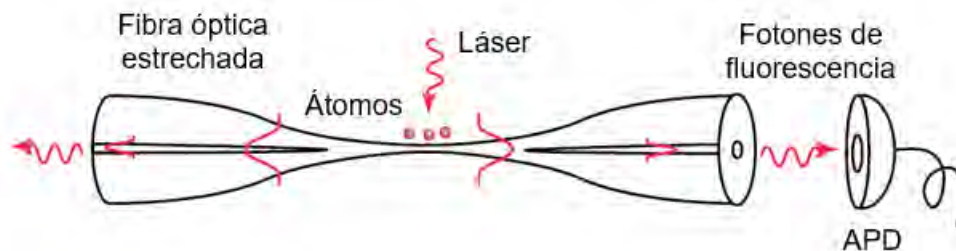


Figura 1.10: Sección estrechada de una fibra óptica, en la que fotones de fluorescencia acoplados al modo guiado de la nano-fibra son detectados al final de la fibra óptica mono-modal, usando un fotodetector de avalancha (APD por sus siglas en inglés) [4].

Los micro-resonadores han generado un interés considerable para la investigación de procesos fundamentales en el área de electrodinámica cuántica de cavidades principalmente, y en otras como óptica no lineal, fotónica y detección química/biológica. Los resonadores que presentan modos con factores de calidad muy grandes (Q) y pequeño volumen modal, tal como las micro-esferas de sílice, pueden introducir un acoplamiento fuerte entre un sistema atómico y el modo de la cavidad electromagnética, así como reducciones drásticas de la potencia necesaria para observar efectos no lineales. Un par de ejemplos específicos son el de una micro-cavidad bidimensional semiconductor de cristal fotónico con factor de calidad $Q \sim 40,000$ y volumen modal $V_{eff} \sim 0.9$ longitudes de onda cúbicas [24]. Y el de resonadores ópticos de micro-disco de nitruro de silicio con $Q = 3.6 \times 10^6$ y volumen modal efectivo de $15(\lambda/n)^3$ para longitudes de onda cercanas al visible [25]. Un requerimiento importante para tales estudios (en particular, experimentos óptico-cuánticos) son las pérdidas de acoplamiento de campo ultra-bajas tanto hacia, como desde el micro-resonador. Los acopladores de guía de onda basados en fibra óptica estrechada proveen una alta eficiencia de acoplamiento para micro-resonadores con baja pérdida de inserción no resonante, por ello su inclusión y uso en el estudio de las cavidades óptico-cuánticas. La naturaleza de pérdida en la unión de una guía de onda y un resonador se describe mediante una figura de mérito llamada *idealidad*. Existen técnicas para verificar el nivel de acoplamiento midiendo la idealidad para micro-resonadores acoplados a una fibra estrechada [26].

Por último, se tienen algunas otras aplicaciones específicas de las fibras estrechadas, como el acoplamiento de éstas con micro-cavidades láser, para reducir la energía umbral en comparación con el espacio libre, que se atribuye a la entrega eficiente de pulsos de bombeo a la región del medio activo en la micro-cavidad [27]. O el desarrollo de espectroscopía foto-luminiscente de puntos cuánticos de arseniuro de indio (InAs) a temperaturas criogénicas (~ 14 K), utilizando guías de onda de fibra estrechada de campo cercano [28].

1.5 Métodos de fabricación

Un *taper* se obtiene a partir de una fibra óptica estándar y algún procesamiento de esta para obtener el estrechamiento. Existen diferentes métodos para fabricar *tapers*, sin embargo algunos son más simples de realizar o de más bajo costo. En esta sección se presentan los métodos reconocidos para fabricar secciones estrechadas de fibra óptica, haciendo mayor énfasis en la técnica de *descarga de arco eléctrico* para fines prácticos de este trabajo.

1.5.1 Estrechamiento por llama

La técnica consiste en una llama de gas oxhídrico, que solo calienta una pequeña sección de la fibra por un tiempo específico. Este calentador está hecho para viajar a una velocidad constante de manera oscilatoria a lo largo de la sección con cierta longitud. De esta forma, en cada ciclo de oscilación cada elemento en dicha longitud de la fibra se calienta idénticamente. Mientras el calentador actúa, se produce una tensión en cada

extremo de la fibra por la acción de motores adecuados, como motores a pasos.

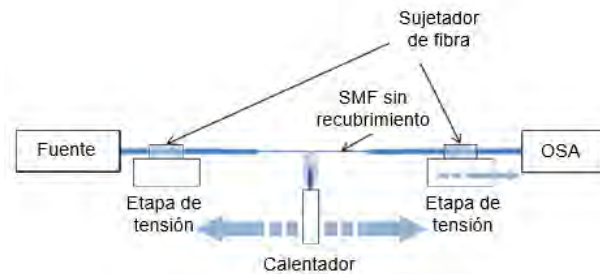


Figura 1.11: Técnica de estrechamiento por llama [5].

Además de la fabricación de *tapers* con esta técnica, también se utiliza para construir acopladores de fibra. Una de las razones por las que se uso es tan común, es su alta flexibilidad en el control del movimiento de la flama, la longitud estrechada de la fibra y su reproducibilidad. Además, la dimensión de la fibra estrechada o micro-fibra puede ser obtenida con precisión y repetibilidad. Pero la principal razón para utilizar esta técnica, es debido a que es posible fabricar fibras estrechadas bicónicas, en donde ambos extremos de la fibra estrechada están conectados a una fibra mono-modo. Este tipo de fibras pueden ser utilizadas para la fabricación de dispositivos de baja pérdida basados en micro-fibra [5].

1.5.2 Descarga de arco eléctrico

Otra técnica importante utilizada para la fabricación de fibra estrechada es mediante el uso de un arco eléctrico. La fibra óptica es calentada por un arco eléctrico generado por un par de electrodos, al pasar por estos. Al mismo tiempo se debe generar tensión en los extremos de la fibra para su estrechamiento. Una descarga de arco es un fenómeno complejo durante el cual ocurren diferentes procesos, como la emisión de electrones por un electrodo, donde se produce una alta intensidad de campo eléctrico generado por las puntas de los electrodos, y mientras la fibra transita entre los electrodos se ionizan átomos de nitrógeno y oxígeno, a través de impactos, creando un plasma de alta temperatura que comprende electrones y iones. Este fenómeno se aprecia en la Figura 1.12, en donde se muestra el arco eléctrico que se utiliza en el prototipo estrechador de fibra en el siguiente capítulo.

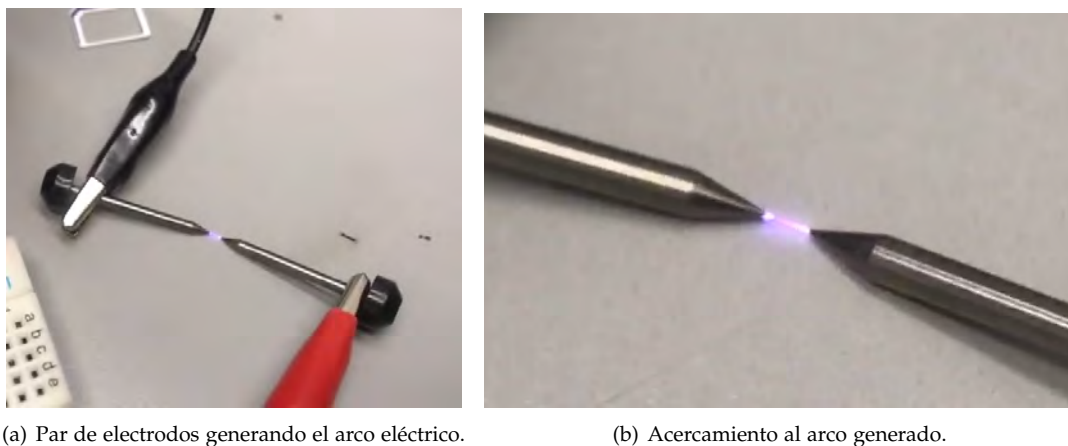


Figura 1.12: Descarga de arco eléctrico.

Se trata de una técnica simple, económica debido al no uso de consumibles, y no dañina en comparación

con la técnica de radiación láser. Otra característica importante de la técnica, es que permite la fabricación de longitudes grandes de estrechamiento. La descarga de arco fue primero aplicada para el empalme de fibras por fusión. Se pueden generar otros dispositivos básicos como sondas de fibra y micro-esferas. Mientras que otros como acopladores de fibra o rejillas de fibra de largo periodo (LPFGs por sus siglas en inglés) son más complejos [29].

Existen diferentes instrumentos comerciales de gran costo para fabricar un taper basados esta técnica, como la empalmadora de fusión *LZM-100 Series* utilizando el software de estrechamiento de fibras *SpliceLab 2.0 Fiber Taper Software*, que permite controlar la longitud del taper, la posición de la fibra y los motores, potencia de calentamiento absoluta o relativa, y la combinación de motores. Otro ejemplo, es de la empalmadora de fusión *Fitel S153A* de *Furukawa*. En la Figura 1.13 se muestra una fibra óptica multi-modal (1) colocada en los surcos (4) de la empalmadora, sostenida por las abrazaderas (3) entre los dos electrodos (2).

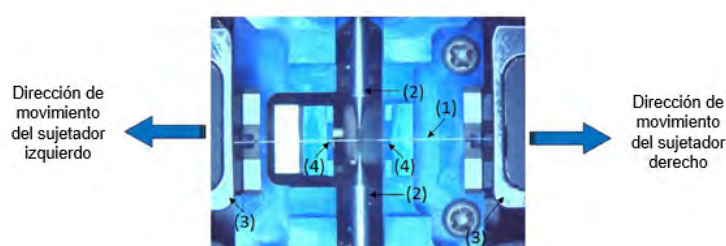


Figura 1.13: Fibra óptica colocada en la empalmadora de fusión *Fitel S153A* [6].

1.5.3 Ataque químico

El ataque químico es una técnica principalmente utilizada para fabricar sondas de fibra óptica con puntas de fibra adelgazadas o estrechadas, en áreas de interés como biosensores y microscopía óptica de barrido de campo cercano (SNOM por sus siglas en inglés). Se trata de una técnica en la que existen variaciones técnicas en sus diferentes aplicaciones, sin embargo consiste básicamente en insertar un extremo de la fibra, la longitud deseada, en un compuesto químico por un determinado tiempo para que éste modifique la estructura de la fibra. Por ejemplo, en un contenedor con una solución de ataque de HF , NH_4F y H_2O , y encima una capa de solvente orgánico, se coloca el extremo de la fibra a $120\mu m$ de la superficie de la solución de ataque, con una relación de composición de 1.5:1:1 por 100 minutos, ver Figura 1.14(a). La punta obtenida al final tiene la forma que se presenta en la Figura 1.14(b). Después se vuelve a colocar la punta de la fibra, ahora en una relación de compuestos 7:1:1 de la misma solución por 140 minutos, obteniendo finalmente una punta con doble estrechamiento como se muestra en la Figura 1.14(c) [7].

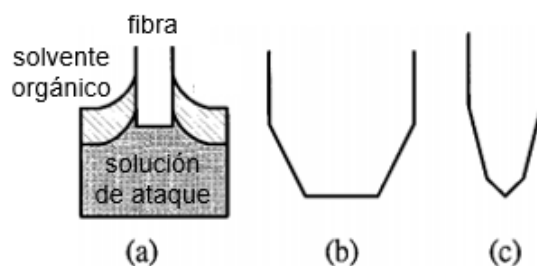


Figura 1.14: Técnica de estrechamiento por ataque químico. (a) Fibra en un contenedor con una solución de ataque de HF , NH_4F y H_2O con relación 1.5:1:1, y encima una capa de solvente orgánico. (b) Punta de la fibra después de 100 minutos. (c) Punta de fibra en una relación de compuestos 7:1:1 de la misma solución por 140 minutos [7].

1.5.4 Láser

El principio de estrechamiento en esta técnica consiste en utilizar un láser como fuente térmica para calentar la fibra, y al generar tensión en sus extremos con motores a pasos, lograr el estrechamiento de ésta. Comúnmente se utiliza un láser de CO_2 debido a la alta potencia que alcanza. Al utilizar un láser, se tiene la ventaja de utilizar una fuente de puntual de calor, y de esta forma poder controlar con precisión la longitud de las fibras estrechadas [30].

Además de éste y los métodos de estrechamiento antes mencionados, existen otras menos comunes pero igual importantes como el estrechamiento mediante la corriente de una bobina, o la técnica micrométrica de pulido de fibra en D.

Por último se presenta un resumen en la Tabla 1.1 de las ventajas y desventajas de las técnicas presentadas:

Tabla 1.1: Métodos para fabricar fibra óptica estrechada		
Método	Ventajas	Desventajas
Por llama	Fácil control. Método más utilizado por su simplicidad de operación.	Las fluctuaciones en la llama producen alteraciones en el diámetro de la cintura de la fibra. Uso de consumibles.
Arco eléctrico	Proceso controlado. Capaz de producir grandes longitudes de fibra estrechada, así como <i>tapers</i> convencionales.	Asimetrías de calentado. Gran costo de instrumentos comerciales, como empalmadoras de fusión.
Ataque químico	Capaz de fabricar puntas de fibra estrechadas, con alta reproducibilidad. Proceso controlado.	Gran duración del proceso debido a los tiempos de corrosión. Uso de consumibles.
Láser	Alta estabilidad de la fuente de calor.	Costo del láser. El montaje debe presentar una buena alineación para su funcionamiento adecuado.

Capítulo 2

Estrechador de fibra

En el primer capítulo se abordaron algunos de los parámetros más importantes que se deben tener en cuenta antes de diseñar y construir un dispositivo capaz de estrechar fibra óptica, basado en la técnica de descarga de arco eléctrico. El desempeño mecánico y eléctrico de este dispositivo considera justamente, aspectos como la estructura de una fibra óptica estrechada, el criterio de adiabaticidad y la implementación de un arco eléctrico para generar tanto secciones cortas de algunos centímetros de fibra óptica estrechada, como longitudes de algunos metros de micro-fibra óptica. A lo largo de este capítulo se presenta el funcionamiento general del dispositivo, así como los componentes que lo integran.

2.1 Operación

2.1.1 Componentes

Cada elemento mecánico y eléctrico que forma parte del prototipo estrechador de fibra óptica fue seleccionado particularmente con alguna justificación y finalidad. A continuación se da una breve descripción del funcionamiento individual de algunos de estos componentes, así como la razón de su uso para el desempeño general del prototipo.

Comenzando con la operación mecánica, existen dos elementos fundamentales en los que se basa el mecanismo general del dispositivo, un par de motorreductores. El primero es conocido como *micro motorreductor* (Figura 2.1(a)) y el segundo como *motorreductor Arduino* (Figura 2.1(b)). La razón de utilizar motorreductores en lugar de cualquier otro tipo de motor, es debido a la reducción de velocidad que ofrecen por su sistema de engranajes integrado. El movimiento generado por estos motores debe ser lo más bajo posible. Al desplazar la fibra estándar hacia el arco eléctrico y así generar fibra estrechada, ésta reduce su diámetro y aumenta su longitud. La velocidad del motor encargado de generar este desplazamiento, debe ser considerablemente baja para que al obtener mayor longitud de fibra estrechada, un segundo motor pueda recibir y llevar esta fibra a una etapa de enrollamiento, a una velocidad considerable que no rebase las capacidades del motor. El micro motorreductor presenta una velocidad mínima de 30 RPM, mientras que el motorreductor Arduino de 190 RPM. Por ello, el micro motorreductor es el encargado de recibir la fibra óptica estándar y el motorreductor Arduino, la fibra óptica estrechada. Sin embargo, se utiliza además un sistema de dos engranes y cadena en el micro motorreductor para conseguir una velocidad aún menor (hasta 0.7 RPM) y así tener un margen considerable de velocidad para las pruebas de estrechado. El esquema general del mecanismo aquí descrito se muestra en la siguiente sección.

Otros elementos importantes que forman parte de la estructura mecánica de este prototipo son: 3 puntas de jeringa que actúan como canal por el que se transporta la fibra antes y después de su estrechamiento, 2 soportes ajustables para sujetar las puntas de jeringa, 3 cilindros de metal rodeados de banda de caucho para desplazar la fibra óptica, tornillos de diferentes medidas que sirven como soporte de los motores y de los cilindros metálicos, y una base de acrílico sobre la cual se montan todos los componentes mencionados.



(a) Motorreductor Arduino [31].

(b) Micro motorreductor [32].

Figura 2.1: Motorreductores.

Entre los componentes eléctricos más importantes presentes en la fuente de poder que genera el arco eléctrico, está una bobina de ignición *Performance 5527* de marca *Street Fire* (Figura 2.2(a)). Esta bobina genera una chispa con duración de $250 \mu s$, con corriente máxima de $300 mA$ y voltaje máximo de $48 kV$, a partir de un voltaje de operación de $12 V$. Sin embargo, se utiliza también un módulo generador de pulsos *NE555*, como el de la Figura 2.2(b), para variar la duración de la chispa generada por la bobina. A la salida de este módulo se encuentra una compuerta lógica *NAND* proporcionada por el circuito integrado *MC14011B*, que cuenta con 4 compuertas del mismo tipo (Figura 2.2(c)). En la Tabla 2.1 se presenta la tabla de verdad de la compuerta lógica *NAND*, que será de utilidad para la comprensión del circuito eléctrico de la fuente de poder, presentado más adelante.

Tabla 2.1: Tabla de verdad compuerta lógica *NAND*

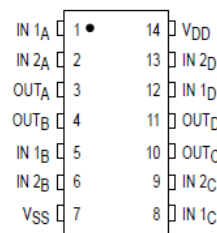
Entrada A	Entrada B	Salida
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



(a) Bobina de ignición [33].



(b) Módulo *NE555* [34].



(c) Circuito integrado *MC14011B* [35].



(d) Transistor de efecto de campo MOSFET [36].

Figura 2.2: Componentes del estrechador de fibra.

Por último, otro componente a destacar es el transistor de efecto de campo de tipo MOSFET. Los transistores MOSFET o Metal-Óxido-Semiconductor (MOS) son dispositivos de efecto de campo que utilizan un campo eléctrico para crear un canal de conducción. Existen dos tipos de MOSFET, el de empobrecimiento y el de enriquecimiento. Aparte de algunas aplicaciones específicas, el MOSFET de empobrecimiento está

prácticamente en desuso. Por otro lado, el MOSFET de enriquecimiento se usa mucho, tanto en circuitos discretos como integrados. En circuitos discretos se usan como interruptores de potencia, que significa conectar y desconectar corrientes grandes. Siendo justamente esta función, la implementada en nuestro dispositivo. Los canales del MOSFET de enriquecimiento utilizado, se muestran en la Figura 2.2(d), donde G corresponde a *gate* (puerta), *D-drain* (drenaje) y *S-source* (fuente) [37, 38].

2.1.2 Funcionamiento mecánico

El proceso de diseño de cualquier prototipo ingenieril y tecnológico consta de varios bosquejos preliminares, de los cuales se realizan modificaciones hasta llegar a un esquema final. A partir de este esquema, se buscan los componentes necesarios que satisfagan las necesidades y funcionalidades del dispositivo, tal como se muestra en la sección anterior. En esta sección, se presenta el esquema general del prototipo estrechador de fibra, conseguido después de diferentes adecuaciones de operación y de componentes, teniendo siempre en cuenta las funciones para las que se construye. La estructura de este dispositivo, que se muestra en la Figura 2.3, fue diseñada para la implementación de dos funciones: generar *tapers* de no más de algunos centímetros, generando tensión en direcciones opuestas en ambos extremos de la fibra al pasar por el arco eléctrico, y producir *micro-fibra* de diversas longitudes, llegando inclusive hasta el orden de los metros.

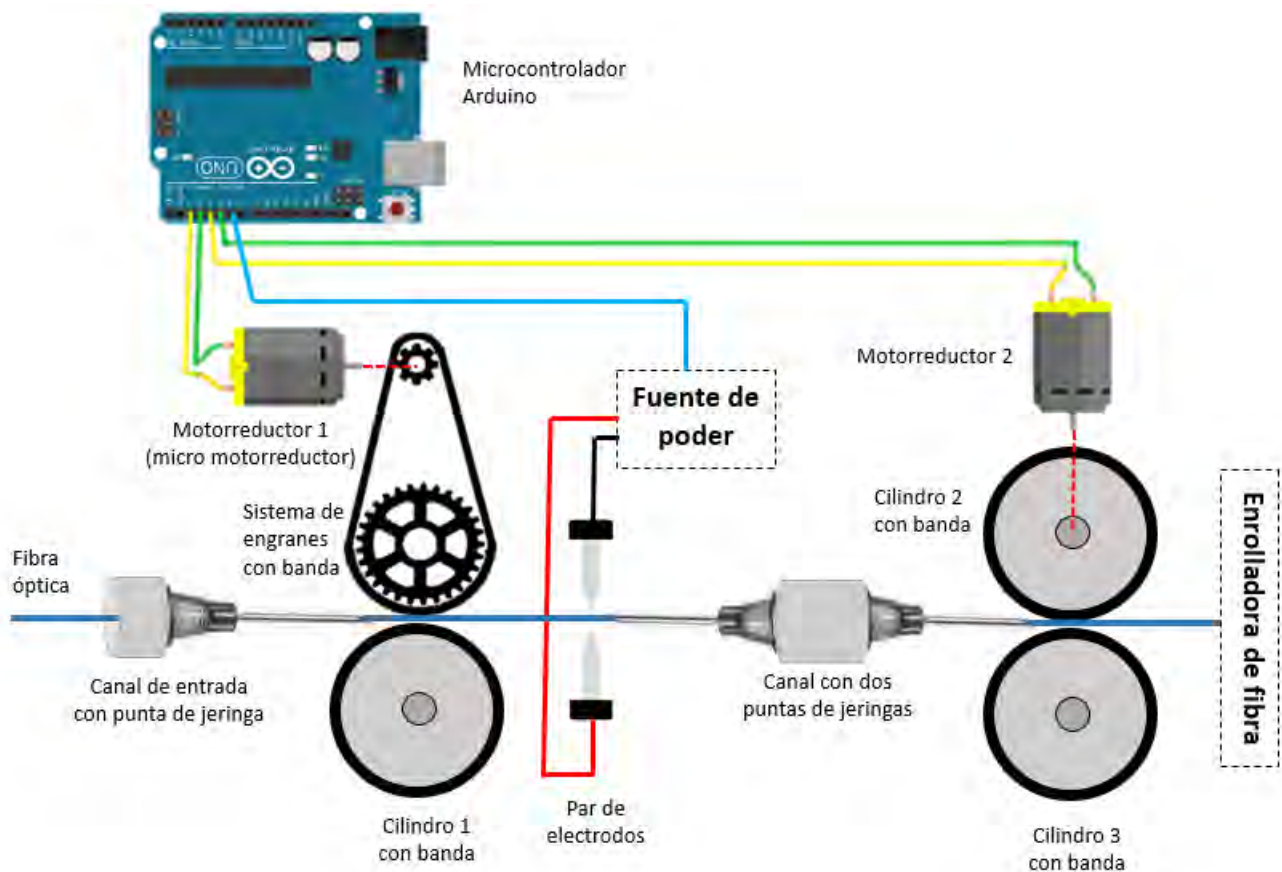


Figura 2.3: Esquema general del estrechador de fibra.

Para ambas funciones es necesario tener un desplazamiento controlado y dirigido de la fibra, para llevarla exactamente al punto donde se genera el arco eléctrico. Para lograr lo anterior se utiliza como canal, puntas de jeringas en las que puedan entrar fibras de $250 \mu\text{m}$ de diámetro (tamaño estándar). Entre más angosto sea el canal, se tendrá mejor conducción de la fibra. En la Figura 2.3 se muestra la configuración de cómo son utilizadas tres de estas puntas. La punta 1 y punta 2 sirven como alineador de la fibra para hacerla pasar

por el arco eléctrico generado por los electrodos, proporcionándole soporte. La punta 3 es utilizada para direccionar la fibra hacia un sistema mecánico con bandas para desplazar o jalar la fibra antes y después de su estrechamiento. Este desplazamiento es apoyado por un sistema mecánico similar pero colocado a la salida de la punta 1, ya que una vez estrechada, al ser excesivamente delgada, esta podría reventarse debido a la tensión provocada por el desenrollamiento del carrete que contenga la fibra, en el caso de generar varios metros de micro-fibra. Por otro lado, en el caso de fabricación de *tapers*, los sistemas mecánicos generan tensión en direcciones opuestas mientras se acciona el arco eléctrico. La punta 1, así como la punta 2 y 3, son sostenidas por 2 soportes ajustables, que permiten el alineamiento adecuado del canal por el que pasa la fibra.

El primer sistema mecánico de bandas, es decir, el que se encuentra a la salida de la punta 1; esta conformado por un cilindro metálico rodeado de banda de caucho (cilindro 1 con banda) y un sistema de engranes con cadena, rodeada también de banda de caucho. El engrane más pequeño se encuentra acoplado al motorreductor 1, que corresponde al micro motorreductor descrito anteriormente. El cilindro metálico y los dos engranes están soportados por tres tornillos de tal forma que el movimiento rotacional no presente fricción. Los tres tornillos pueden ser ajustados para acercar o alejar ambas bandas a la fibra, y también para ajustar la altura de los componentes que sostienen. El sistema mecánico de bandas a la salida de la punta 2, muestra un esquema similar al anterior, con la diferencia que en este caso que se utilizan dos cilindros metálicos rodeados de banda de caucho. El cilindro 2 esta acoplado al motorreductor 2 (motorreductor Arduino). De la misma forma, la posición el motorreductor 2 y el cilindro 3 pueden ser ajustados. El ajuste de estos componentes juega un papel importante en el desplazamiento de la fibra, ya que cada par de bandas debe estar lo suficientemente cercanas para lograr el arrastre de la fibra por fricción. Al utilizar este tipo de bandas, se evitan fracturas en la fibra debido a la compresión que presentan el caucho por su elasticidad. El movimiento y sincronización de los motorreductores se ejecuta mediante un microcontrolador Arduino.

Los componentes restantes en este esquema son la fuente de poder que proporciona la energía eléctrica para generar el arco eléctrico en el par de electrodos, y la enrolladora de fibra que recibe y contabiliza la longitud de fibra estrechada; ambos componentes se abordan con más detalle en la siguiente sección y en el siguiente capítulo, respectivamente.

2.1.3 Funcionamiento eléctrico

Si dos conductores separados por el vacío o por un gas tienen potenciales eléctricos diferentes, existe campo eléctrico no nulo entre ellos. Y existe, por tanto, fuerza sobre las cargas que estén entre los conductores. De esta manera los electrones libres del conductor de menor potencial que lo abandonen pueden ser atraídos hacia el conductor de mayor potencial, mientras exista diferencia de potencial suficiente. Si en el espacio entre los dos conductores a diferentes potenciales hay gas, algunos electrones de los que salen del conductor de menor potencial hacia el otro pueden chocar contra las moléculas de ese gas. El resto pasa a través del gas hasta alcanzar el conductor de mayor potencial. Al colisionar con las moléculas del gas, le ceden su energía aumentando la temperatura de las mismas. Cuando se alcanza la energía térmica suficiente, las moléculas de gas se ionizan. Así, los electrones de esos átomos de gas saltan a órbitas más externas. Cuando retornan a su órbita inicial, emiten energía electromagnética que, si su frecuencia es del espectro visible, es detectada por el ojo humano como luz. Como el gas se calienta, tiende a subir hacia arriba. Si la trayectoria recta entre los dos conductores es horizontal, la zona emisora de luz aparece como un arco. De aquí el nombre de *arco eléctrico* para las descargas eléctricas en gases [39].

El arco eléctrico implementado en nuestro prototipo, encargado de estrechar la fibra óptica estándar, es generado por una fuente de poder diseñada por el Dr. Efraín Mejía Beltrán (asesor de Tesis). El primer componente de esta fuente es un transformador que reduce el voltaje de entrada a un valor adecuado (entre 10 y 11 V) para su uso en los demás componentes, se puede ubicar en la Figura 2.4 en la que cada componente tiene una etiqueta asignada, en este caso T1. El transformador utilizado es un *Dar plus SZ 0734* reciclado de un regulador *No-Break Forza NT*.

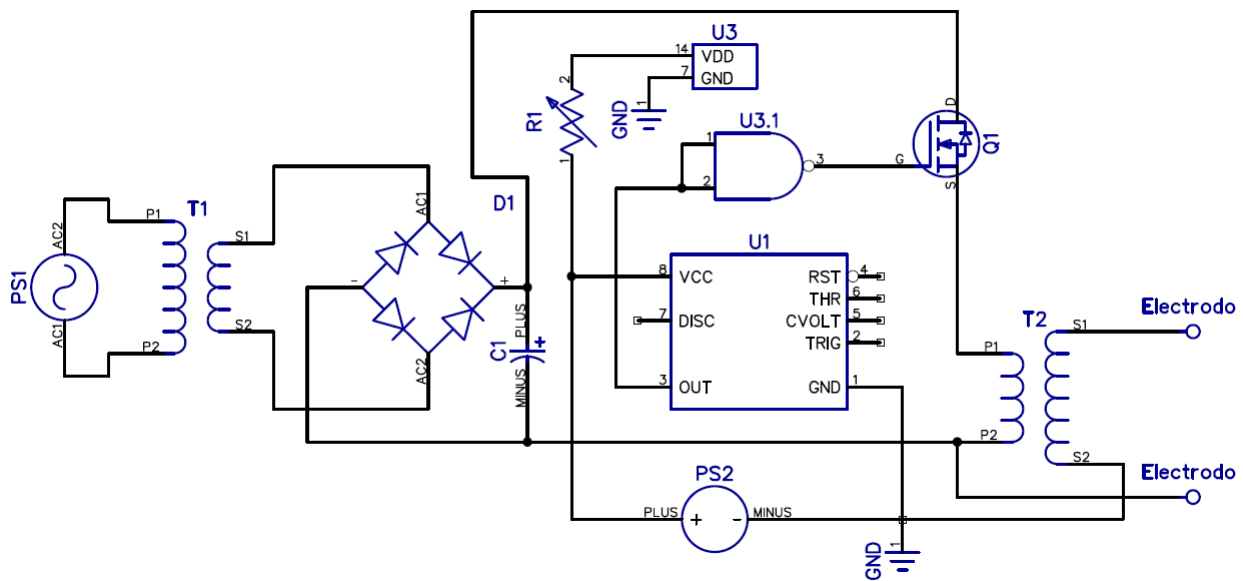


Figura 2.4: Esquemático del circuito eléctrico de la fuente de poder.

El componente *PS1* ilustra una toma de corriente convencional (120 V, 60 Hz) que lleva la energía al transformador *T1*. Enseguida se utiliza un puente rectificador (*D1*) para convertir la corriente alterna AC en corriente directa DC, se pasa de una señal sinusoidal típica (Figura 2.5(a)), a una señal como la de la Figura 2.5(b) en la que se aprovecha la corriente de los dos semi-ciclos. Entre la señal positiva y negativa del puente rectificador se utiliza un capacitor *C1* de 5600 μF en paralelo, como filtro para minimizar el efecto ondulante o rizado de la señal que se obtiene (Figura 2.5(d)). Al añadir un capacitor a la salida del puente rectificador, amortiguamos la onda debido a que el condensador se carga mientras la onda asciende, y se descarga lentamente cuando desciende, logrando así una señal como la de la Figura 2.5(c). Se utiliza un capacitor con un valor suficientemente alto para reducir el rizado en la señal, ya que la caída de la corriente es más lenta, ocasionando que la curva se suavice [40].

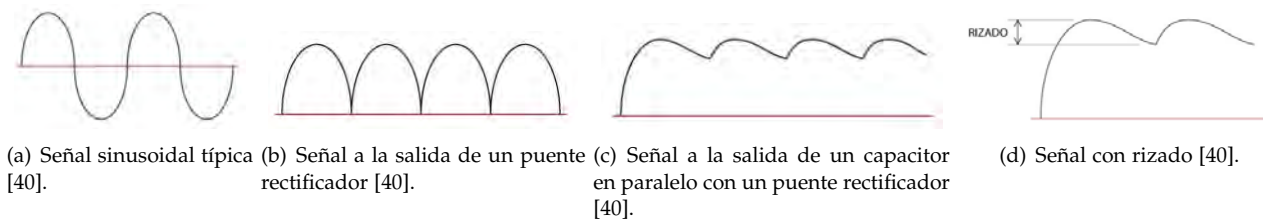


Figura 2.5: Señales en el circuito.

La señal, ahora rectificadas, se dirige hacia el puerto D del transistor *Q1*, que regula el paso de corriente a la bobina de ignición *T2*, mediante los pulsos generados por el circuito integrado *U1*. A la salida del generador de pulsos se utiliza una compuerta NAND (*U3.1*), con un corto en sus entradas para actuar como inversor de señal (consultar Tabla 2.1), con el único objetivo de obtener 0's y 1's absolutos, evitando así fluctuaciones en la señal. De esta forma, el generador de pulsos controla la duración y la amplitud de la corriente que llega a la bobina de ignición, y por lo tanto también de la chispa generada. La duración de los pulsos se controla variando los potenciómetros internos del módulo NE555 (generador de pulsos) y la amplitud mediante el potenciómetro *R1* que se localiza antes de la alimentación del circuito integrado que contiene la compuerta NAND (*U3*, circuito MC14011B descrito anteriormente), componentes alimentados por una fuente auxiliar de corriente directa *PS2*. Por último, el arco eléctrico es producido por la bobina de ignición y la corriente controlada que llega a ésta, al descargar dicha corriente del electrodo conectado a la salida de la bobina, hacia

el otro electrodo.

En el siguiente apartado se muestran dos diagramas de flujo que representan las instrucciones de los programas desarrollados en el microcontrolador Arduino del prototipo estrechador de fibra, para la fabricación de *tapers* y micro-fibra con diferentes características.

2.1.4 Instrucciones de programación

Ya fue descrito en las dos secciones anteriores, el funcionamiento y desempeño del prototipo para el que fue diseñado. Ahora, es necesario describir paso a paso, cómo se ejecutan las instrucciones de programación que permiten tal desempeño. Existen dos funciones generales que lleva a cabo el prototipo, para cada una de ellas se implementó un programa preliminar en el software libre Arduino para su ejecución en el microcontrolador de la misma marca. La primera función, es fabricar *tapers* o secciones cortas de fibra óptica estrechada. Para esta función se ejecutan las instrucciones resumidas en el diagrama de flujo de Figura 2.6. El programa recibe sólo un parámetro de entrada, el diámetro de la cintura del *taper* que se desea fabricar. Por conservación de volumen, a partir de la longitud final del *taper* se puede calcular el diámetro de la cintura resultante. Así, la longitud final se puede estimar mediante la velocidad v de operación de los motorreductores 1 y 2, y mediante el tiempo de operación t de ambos.

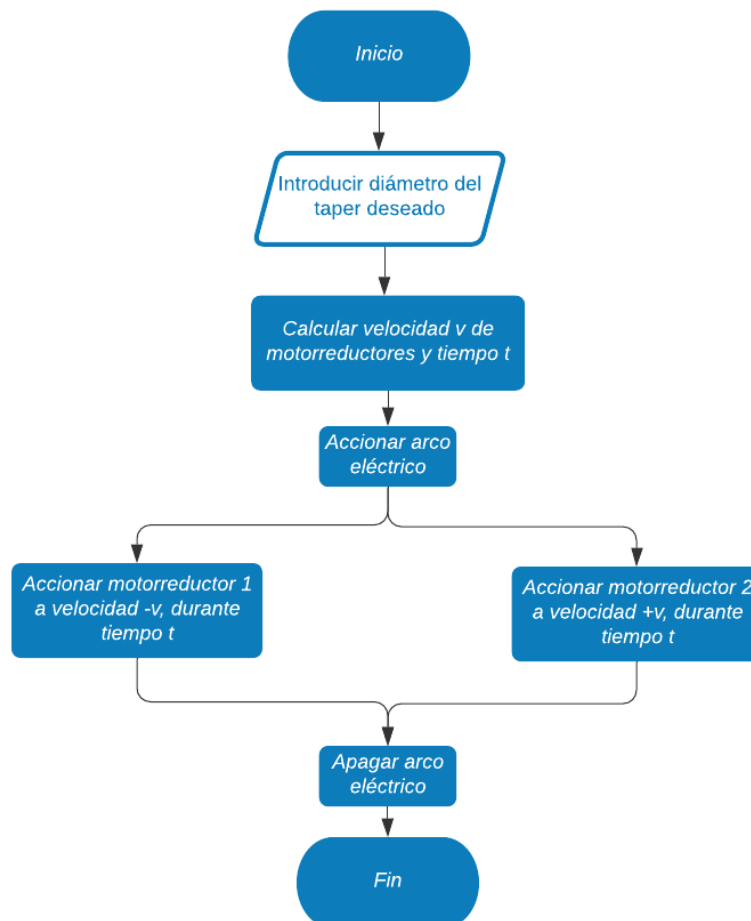


Figura 2.6: Diagrama de flujo del código de programación sobre la operación del estrechador de fibra al fabricar *tapers*.

El modelo matemático que permite obtener los cálculos necesarios para realizar el proceso descrito, se desarrolla a partir parámetros teóricos como el perfil en la zona de transición del *taper* (Capítulo 1: Fibras

ópticas estrechadas - Estructura) y además de pruebas experimentales del prototipo que demuestren la reproducibilidad de los *tapers* fabricados bajo las mismas condiciones iniciales.

Una vez calculado la velocidad y tiempo de operación de los motorreductores, se procede a accionar el arco eléctrico generado por los electrodos, y el par de motorreductores de forma paralela para obtener un *taper* simétrico. Cada motor debe operar a la velocidad v constante calculada pero en direcciones opuestas, el motorreductor 1 en dirección negativa (de derecha a izquierda según el esquema de la Figura 2.3) y el motorreductor 2 en dirección positiva (de izquierda a derecha). Este procedimiento debe tener una duración total t para así obtener una longitud de *taper* asociada al diámetro de cintura deseado. Por último, al completarse el tiempo de operación, se apaga el arco eléctrico para evitar daños en el *taper*. De esta forma, se da por terminado el proceso de fabricación.

La segunda función que desempeña nuestro prototipo, es la fabricación de grandes longitudes de micro-fibra con un diámetro específico. El programa encargado de ejecutar esta función se resume en el diagrama de flujo de la Figura 2.7.

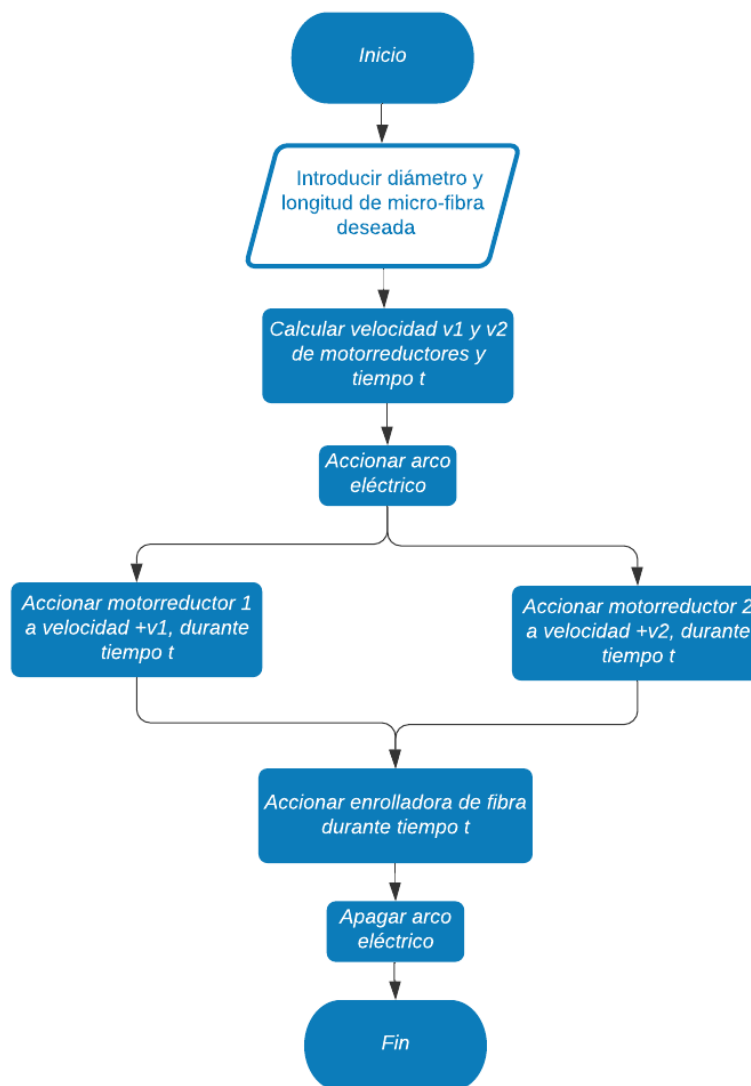


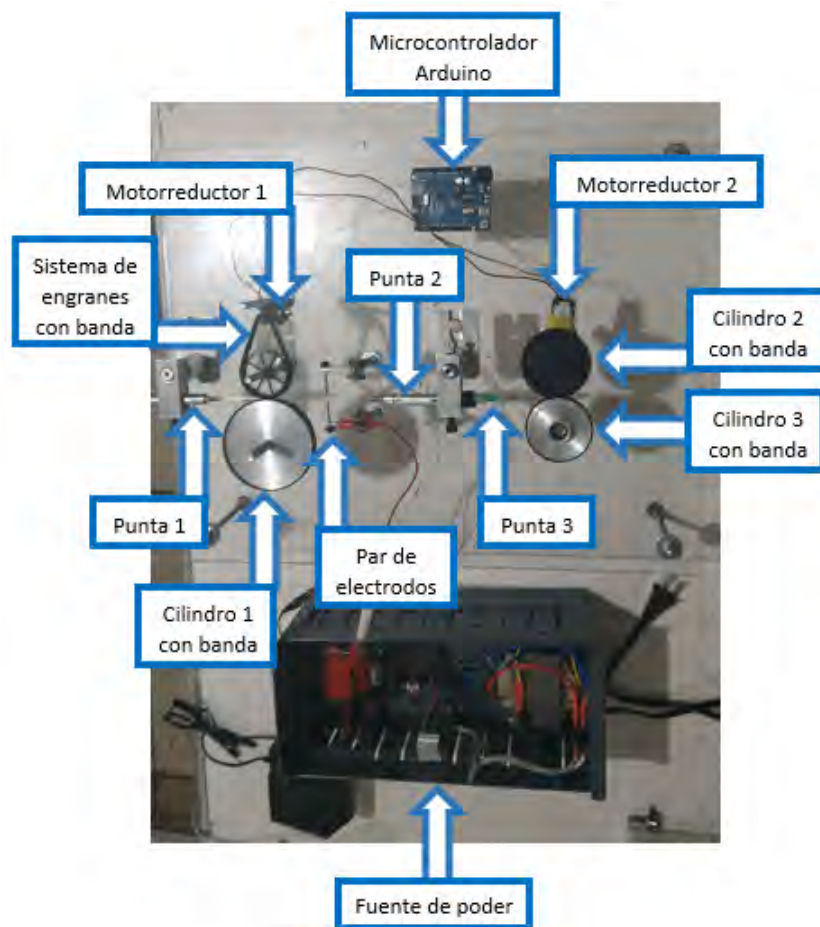
Figura 2.7: Diagrama de flujo del código de programación sobre la operación del estrechador de fibra al fabricar micro-fibra.

La lógica de operación de este programa es muy similar al anterior. En este caso, existen dos parámetros de entrada: el diámetro que se espera alcanzar en el proceso de estrechamiento y la longitud total de micro-fibra a fabricar que cuente con este diámetro. Ahora, los motorreductores deberán operar a velocidades diferentes. El motorreductor 1 a una velocidad v_1 y el motorreductor 2 a v_2 , donde debe cumplirse la condición $v_2 > v_1$. La longitud de la fibra cambia después del estrechamiento, considerando un volumen constante, al reducir el diámetro de la fibra aumentará su longitud. Debido a dicho aumento, la velocidad del motorreductor 2 debe ser mayor que la velocidad del primer motorreductor para compensar el movimiento de la fibra y así evitar posibles fallas durante el proceso de estrechamiento. Aunque la velocidad de los motores es diferente, el tiempo de operación debe ser el mismo. El modelo matemático para calcular los parámetros v_1 , v_2 , t y el diámetro final de la micro-fibra se obtiene, al igual que en el programa anterior, después de la etapa experimental, en la que se caracterizan los parámetros de operación de los motores y el arco eléctrico, en el sistema mecánico general del prototipo. Sin embargo, una vez obtenido el modelo, las ecuaciones necesarias se ejecutan dentro del programa para obtener los parámetros necesarios en tiempo real.

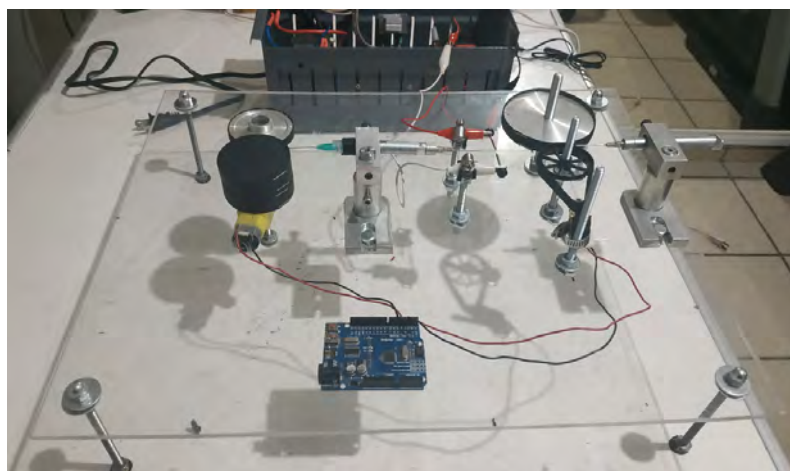
Al obtener las velocidades y el tiempo de operación, se acciona el arco eléctrico junto con los motorreductores de manera simultánea. En este caso, la dirección de movimiento en los motores es la misma, para así desplazar la cantidad necesaria de fibra hacia el arco eléctrico y obtener la longitud deseada de micro-fibra. Después de haber comenzado el proceso de estrechamiento, debe accionarse también la enrolladora de fibra para recibir la fibra estrechada o micro-fibra producida. Una vez completado este proceso, se desactiva el arco eléctrico y culmina así el proceso de fabricación.

2.2 Prototipo final

El proceso de construcción de cualquier prototipo involucra una serie de pasos específicos importantes. Se parte de un diseño preliminar, selección y ensamblaje de componentes, pruebas experimentales de desempeño, y constantes adecuaciones para finalmente obtener un dispositivo funcional, que cumpla con el propósito para el cual fue diseñado. Así, después de completar adecuadamente cada una de estas etapas, se pueden presentar los resultados obtenidos de este arduo proceso. En las Figuras 2.8, 2.9 y 2.10 se presentan imágenes reales del prototipo final del estrechador de fibra óptica, en las que además, se destacan cada uno de los componentes que lo conforman.



(a) Componentes del prototipo estrechador de fibra.

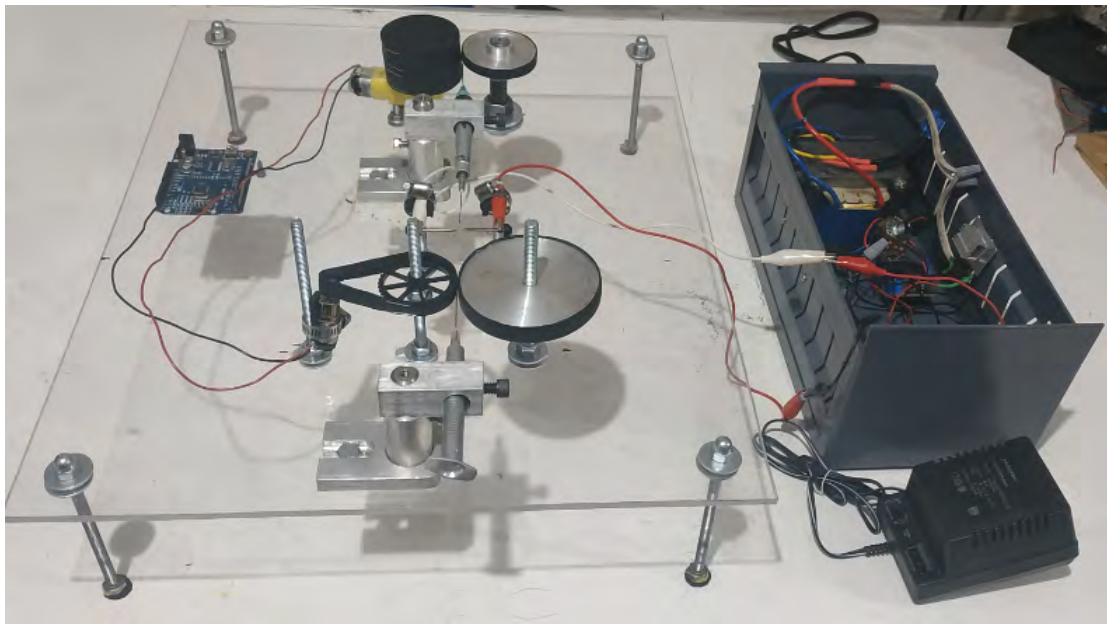


(b) Vista frontal del prototipo.

Figura 2.8: Prototipo final del estrechador de fibra (componentes y vista frontal).

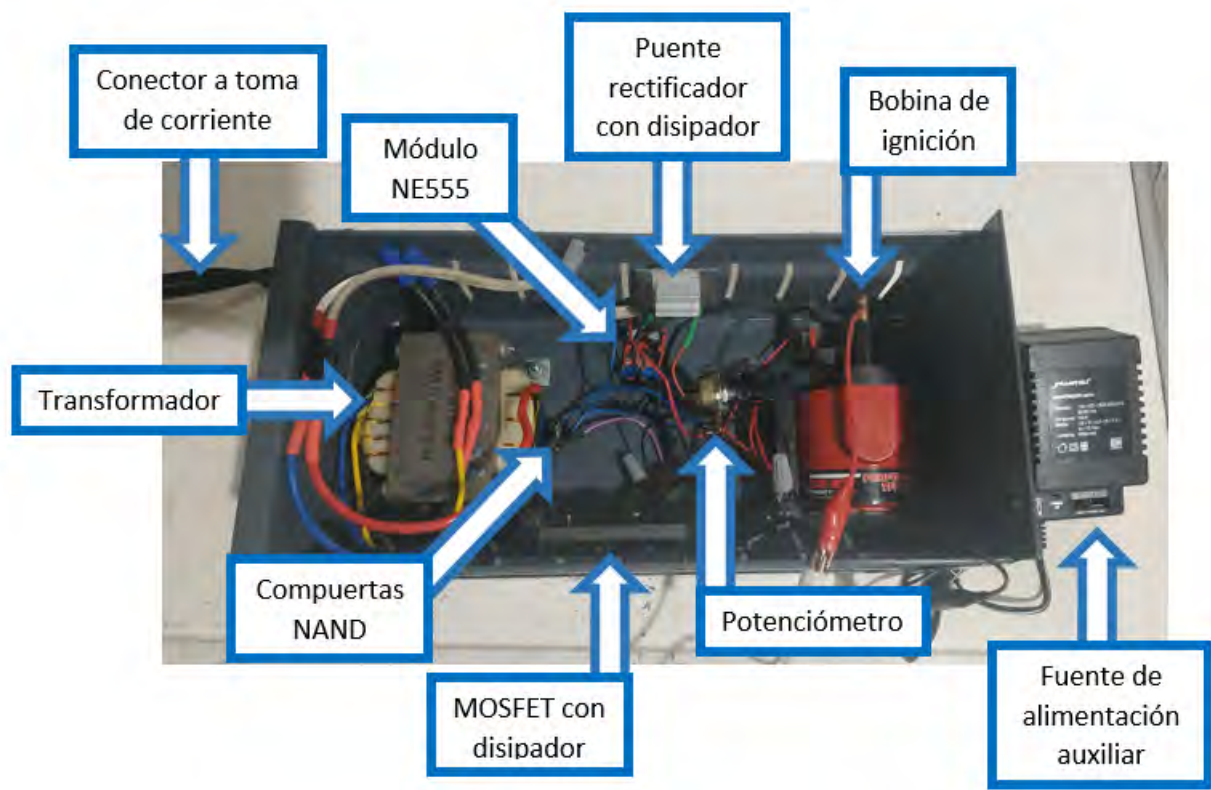


(a) Vista superior del prototipo.



(b) Vista lateral del prototipo.

Figura 2.9: Prototipo final del estrechador de fibra (vista superior y lateral).



(a) Componentes de la fuente de poder.



(b) Vista superior de la fuente.

Figura 2.10: Fuente de poder para generar arco eléctrico (componentes y vista superior).

Capítulo 3

Enrolladora de fibra

El último componente que forma parte del prototipo estrechador de fibra, es un dispositivo capaz de enrollar la fibra producida en la etapa de estrechamiento, en el caso de producir grandes longitudes de micro-fibra. Además, es posible calcular la longitud de fibra enrollada mediante un modelo matemático que describe el proceso de enrollado. Adicionalmente, la enrolladora de fibra puede funcionar de manera aislada al prototipo general, para enrollar una cierta longitud deseada de fibra estándar no estrechada, por lo que cumple con una doble función. El funcionamiento general y de componentes que integran este dispositivo, así como el modelo matemático desarrollado son descritos en este capítulo.

3.1 Operación

3.1.1 Componentes

Antes de presentar la estructura y el funcionamiento general de este dispositivo, se muestran los componentes que forman parte del mecanismo de la enrolladora de fibra, así como la justificación de su uso.

El mecanismo general parte de un par de motores a pasos bipolares. Hay una gran variedad en tipos de motores utilizados en sistemas mecánicos, sin embargo los motores a pasos son ampliamente utilizados en sistemas que requieren de una alta precisión. Tal es el caso en este proceso, debido a las pequeñas dimensiones de la fibra óptica y más aún la micro-fibra. Pero además de la precisión, este tipo de motores ofrecen una ventaja por la gran cantidad de pasos que pueden dar en cada revolución, 200 para el caso particular de los motores utilizados en este prototipo, que equivalen a 1.8° por paso. Este tipo de motores constan generalmente de 4 pines de entrada. Esto debido a que requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de las dos bobinas por las que esta compuesto el motor. Esta inversión de corriente se realiza en una secuencia determinada por unos y ceros (1 y 0) lógicos en los extremos de ambas bobinas, dicha secuencia se muestra en la Tabla 3.1. Cada inversión de la polaridad genera el movimiento del eje en un paso, donde el sentido de giro está determinado por la secuencia consecuente [8].

Tabla 3.1: Secuencia de pasos en motores bipolares

Paso	Bobina A1	Bobina A2	Bobina B1	Bobina B2
1	1	0	1	0
2	1	0	0	1
3	0	1	0	1
4	0	1	1	0

Para controlar adecuadamente la inversión de polaridad en ambas bobinas de cada motor a pasos bipolar,

es necesario utilizar un *punte H* por cada bobina del motor. Esto debido a que la corriente empleada en el funcionamiento de los motores a pasos es muy alta con respecto a lo que puede soportar un microcontrolador. Existen diferentes circuitos integrados controladores de motores a pasos, que incluyen en su interior distintas cantidades de *puentes H*. En este caso particular se utiliza un par de circuitos integrados L293b, ya que cada uno contiene 2 *puentes H* en su interior, para así controlar el par de bobinas de los 2 motores utilizados. Este circuito integrado es un controlador de cuatro canales capaz de entregar hasta 1 A de salida cada uno y 2 A pico. Cada par de canales (un puente completo) tiene un habilitador de tipo TTL, que activa o desactiva uno de los cuatro transistores que lo componen. Tiene una alimentación lógica de 5 V separada de la alimentación de los motores de hasta 36 V, además de 4 pines a tierra para disipar el calor. En la Figura 3.1 se muestran los pines de entrada y salida de este circuito integrado [8].

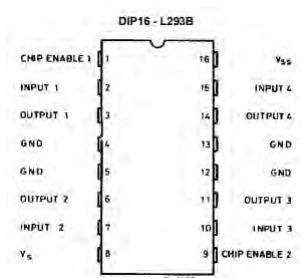


Figura 3.1: Circuito integrado L293b [8].

Tanto para la operación del circuito integrado L293b, como para el funcionamiento general de la enrolladora de fibra, es conveniente el uso de un microcontrolador. En este caso, se utiliza la plataforma de código abierto Arduino. Arduino es utilizado en múltiples proyectos de electrónica debido a su facilidad de uso por ser una versión simplificada de programación C++. El microcontrolador que utiliza Arduino es el ATmega328, el cual es capaz de programar, borrar y reprogramar múltiples instrucciones mediante el software también de Arduino, de acceso libre en cualquier computadora. Además de su simplicidad y fácil manejo, Arduino ofrece la ventaja de contar con múltiples sensores independientes y otros dispositivos de entrada para diferentes propósitos. Existen diferentes tipos de tarjetas Arduino en las que varía el tamaño, componentes y especificaciones internas. Para este caso particular se utiliza la tarjeta *Arduino UNO* (Figura 3.2), la cual opera con un voltaje de entrada de 7-12 V, ofrece un voltaje operativo de 5 V, cuenta con 14 entradas/salidas digitales (6 de las cuales ofrecen modulación por ancho de pulsos, PWM por sus siglas en inglés), 6 entradas analógicas, una memoria flash de 32 kB, memoria SRAM de 2 kB, memoria EEPROM de 1 kB y una velocidad de reloj de 16 MHz [9].

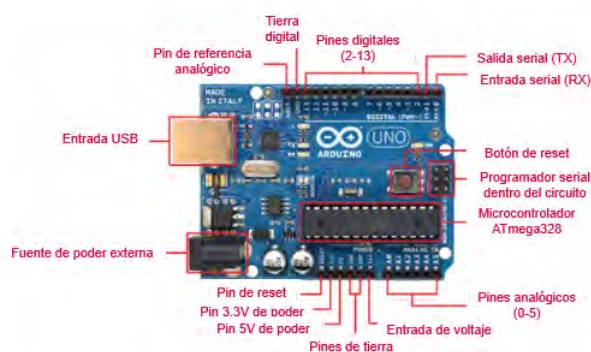


Figura 3.2: Componentes de una tarjeta Arduino UNO [9].

Además de los componentes eléctricos mencionados, los componentes mecánicos son fundamentales en el mecanismo de este dispositivo, entre los que destacan: una varilla roscada, una montura con rosca, un par de varillas paralelas, una polea que funciona como aliviador de tensión y una base de madera en la que descansan todos los componentes anteriores. El funcionamiento conjunto de los componentes aquí mencionados permiten a este dispositivo enrollar fibra y micro-fibra óptica, el cual se describe a detalle en la siguiente sección.

3.1.2 Funcionamiento mecánico

El proceso de ensamblaje de elementos mecánicos requiere de una supervisión constante para el buen funcionamiento conjunto. Aspectos como esfuerzos mecánicos innecesarios, falta de lubricación en acopladores con movimiento longitudinal y rotatorio, soporte inadecuado de componentes y otros factores de este tipo pueden afectar en el desempeño del dispositivo. Por ello, lograr un funcionamiento eficiente en sistemas mecánicos es una tarea ardua en la que se deben realizar adecuamientos y ajustes constantemente.

El funcionamiento general de la enrolladora de fibra se resume en dos movimientos. Movimiento longitudinal para el colocamiento adecuado de la fibra y movimiento rotacional para su enrollado. Para el movimiento longitudinal se utiliza un varilla roscada sujeta al motor 1 por un extremo, que a la vez se encuentra acoplada a una montura con rosca que permite su desplazamiento a lo largo de la varilla roscada. Esta montura sostiene un par de varillas paralelas que descansan sobre monturas con baleros para su correcto deslizamiento, las varillas sirven como soporte de una pequeña plataforma en la que descansa el motor 2, encargado del movimiento rotacional. El motor 2 contiene un acoplador capaz de sujetar un carrete vacío en el que se deposita fibra proveniente de otro carrete. Es indispensable que el acoplador y el carrete se encuentren adecuadamente alineados para que el proceso de enrollado no sufra perturbaciones. Tanto el motor 1 como las monturas con valeros de las varillas paralelas, están atornillados sobre una base de madera que sirve además como soporte de todos los componentes. En la Figura 3.3 se muestra un esquema general de la enrolladora de fibra, en el que esta presente la configuración de componentes mecánicos hasta ahora descritos.

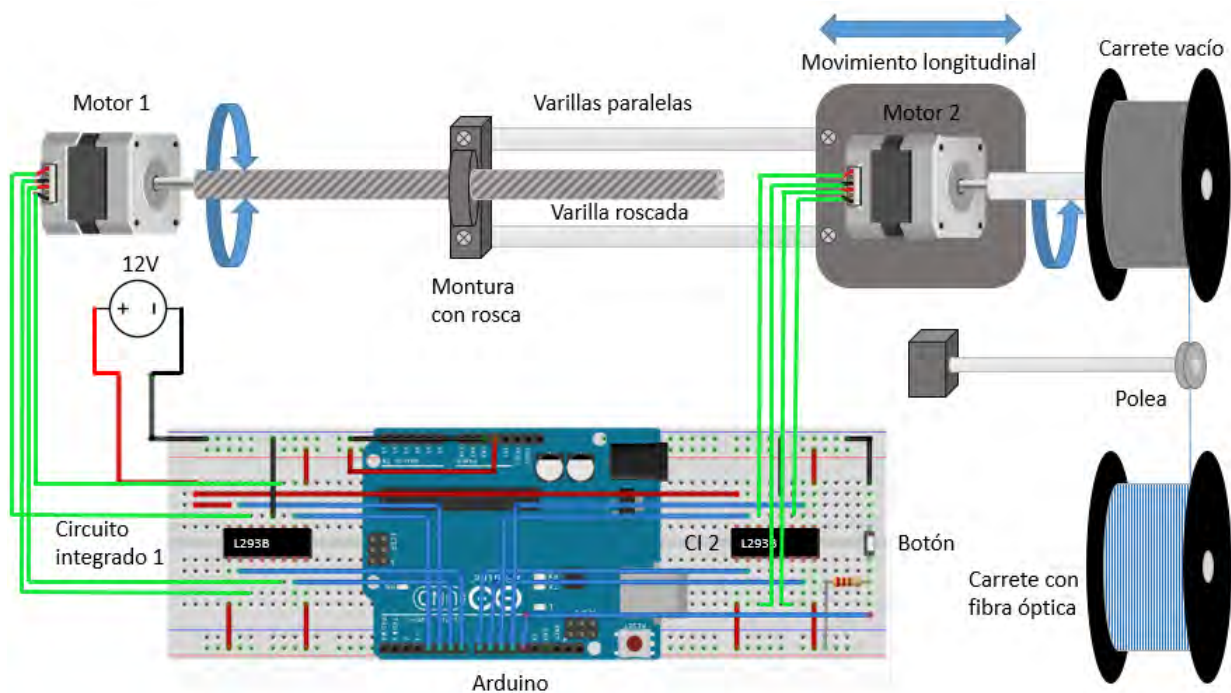


Figura 3.3: Esquema general de la enrolladora de fibra.

Debido a la estructura del sistema mecánico, el movimiento rotacional del Motor 1 en el sentido de las manecillas del reloj y en el sentido inverso, propicia un movimiento longitudinal hacia adelante y hacia atrás del carrete vacío. De esta forma, con la cantidad adecuada de pasos, es posible situar una fibra al lado de la otra después de cada vuelta en el proceso de enrollamiento. Por otro lado, mientras se transfiere la fibra del carrete lleno al carrete vacío se utiliza una polea (colocada de manera independiente, es decir, que no se mueve de manera longitudinal con el carrete) en el paso de la fibra, que cumple una doble función. Primero, la polea permite dirigir la fibra de forma paralela al sentido de giro del carrete, independientemente del ángulo θ que forma la fibra con respecto a la vertical al entrar a la polea (Figura 3.4). Así, considerando que cuando se desenrolla fibra del carrete lleno se desalinea con respecto al carrete vacío, la polea compensa el desalineamiento redirigiendo la fibra. Adicionalmente, la polea cumple una segunda función al servir como aliviador de tensión. Cuando gira el carrete vacío, jala la fibra del carrete lleno propiciando el giro de éste, la tensión generada por este movimiento podría causar el rompimiento de la fibra. Así, el giro de la polea al pasar la fibra, permite reducir la tensión generada, ya que además la polea esta colocada ligeramente por encima del paso natural de la fibra al desenrollarse. A pesar de esto, es recomendable colocar el carrete lleno lo más alejado posible de la polea para que los ángulos θ que se formen sean pequeños y así evitar fracturas en la fibra.

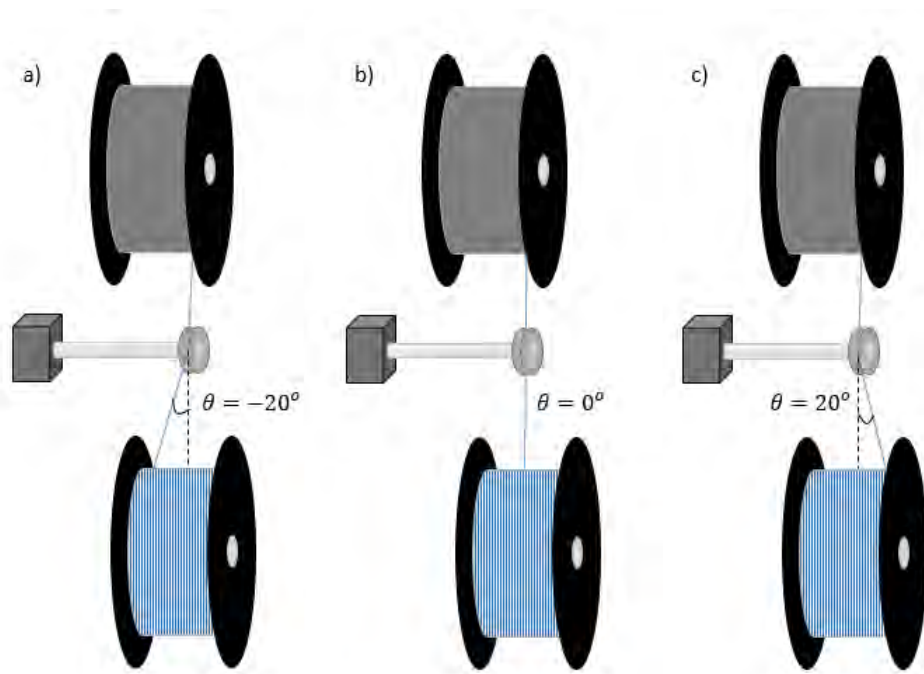


Figura 3.4: Función de la polea para alineación de la fibra. La fibra proveniente del carrete pasa por la polea hacia el carrete vacío, con ángulos de a) -20° , b) 0° y c) 20° .

3.1.3 Funcionamiento eléctrico

Después de conseguir un sistema mecánico funcional, es necesario implementar un circuito eléctrico destinado al funcionamiento adecuado de los motores utilizados para cuidar aspectos como la fuerza necesaria en los motores para evitar fallas o la sincronización adecuada de estos para su operación conjunta. El circuito eléctrico que se utiliza en la operación de la enrolladora de fibra se muestra en la Figura 3.5, en el cual se utiliza un microcontrolador Arduino para controlar las instrucciones de operación de los motores mediante el mismo lenguaje de programación del microcontrolador utilizado. El circuito consiste de los siguientes componentes individuales, identificados por su respectiva etiqueta en la Figura 3.5: *ARD1*-tarjeta de microcontrolador Arduino UNO, *R1*-resistencia con valor de 220Ω , *S1*-pulsador, *U1, U2*-circuitos integrados L293b, *PS1*-fuente de voltaje con valor de $12 V$, *M1, M2*-motores a pasos.

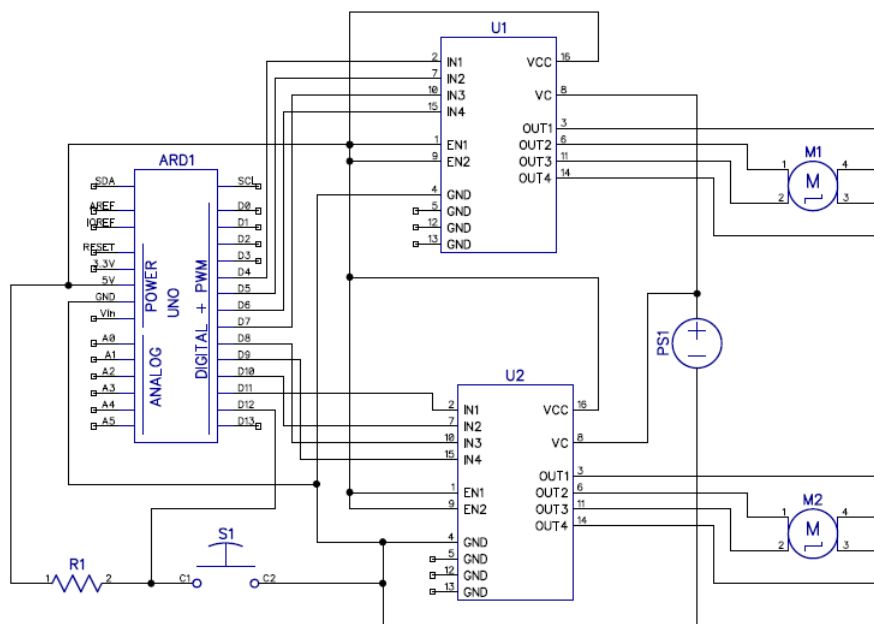


Figura 3.5: Esquemático del circuito eléctrico de la enrolladora de fibra.

Durante el proceso de enrollado, cuando la fibra completa una revolución por la acción del motor *M2*, el microcontrolador tiene la instrucción de accionar el motor *M1* una cantidad de pasos tal que el carrete vacío se desplace "un diámetro de fibra", para colocar la siguiente revolución justo al lado de la anterior. Se ejecuta esta instrucción iteradamente hasta llegar a completar una capa completa de diámetros de fibra a lo largo de todo el ancho del carrete. Al llegar a este límite, el operador tiene que presionar el pulsador *S1* para ordenar un cambio de dirección del Motor 1 para así comenzar el enrollado de la segunda capa de fibra pero ahora en dirección contraria. La función del pulsador es justamente ejecutar un cambio de dirección cada que se completa una capa de fibra, independientemente de la dirección en la que se esta enrollando. Los circuitos integrados *U1* y *U2* se utilizan para que los motores tengan la capacidad de cambiar de dirección mediante instrucciones de programación cuando esto sea requerido. Por último, la fuente de voltaje *PS1* otorga la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento adecuado de los motores, para así tener la fuerza suficiente para generar el movimiento rotacional en el caso del motor *M2*, y para generar el movimiento rotacional del carrete vacío considerando el aumento de peso constante en el proceso de enrollado y el esfuerzo necesario para jalar la fibra del carrete lleno, en el caso del motor *M1*. En la siguiente sección se presenta un análisis más detallado de todas las instrucciones programadas para el desempeño óptimo de nuestro dispositivo.

3.1.4 Instrucciones de programación

Una vez que el dispositivo cuenta con las capacidades mecánicas y eléctricas para su correcto funcionamiento, es necesario implementar la programación del microcontrolador para ejecutar las acciones individuales y colectivas de cada componente. Además, durante el proceso de programación se deben considerar posibles errores de funcionamiento que puedan ser corregidos con instrucciones de código. En esta sección se da una breve descripción de las instrucciones implementadas en el funcionamiento de la enrolladora de fibra, así como algunas instrucciones que tienen la finalidad de evitar fallas en el proceso de enrollado. Todo resumido en el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 3.6.

Por simplicidad, el programa recibe una sola variable de entrada, que es el número de vueltas total N que debe ejecutar el motor 2 para enrollar la longitud de fibra deseada (en la siguiente sección se muestra el procedimiento para calcular este valor). Se utiliza una variable auxiliar de nombre "cuenta" como contador cada vez que se completa una revolución en el motor 2, de esta forma, una vez que *cuenta* tenga el mismo valor que N , habrá finalizado el programa.

Para que comience el proceso de enrollado, es decir que el motor 2 inicie el movimiento rotacional, se debe presionar el botón una vez. La velocidad del motor 2 aumenta gradualmente desde una velocidad 0 hasta su velocidad máxima, con el fin evitar vibraciones que provoquen que la fibra se mueva de su posición inicial (debe estar colocada justo a un costado de la pared interna del carrete y de forma paralela para su correcto enrollamiento).

El siguiente proceso se repite de forma iterada hasta que una de dos condiciones se cumplen. El proceso inicia ejecutando una revolución completa del motor 2, seguido de 8 pasos en dirección positiva longitudinal (de izquierda a derecha) del motor 1. Los 8 pasos que tiene que dar el motor 1, se deben a la resolución del mecanismo utilizado para generar el movimiento longitudinal. Al dar 8 pasos se avanzan $314 \pm 50 \mu\text{m}$, longitud suficiente para colocar una fibra de $250 \mu\text{m}$ de diámetro, al lado de la otra considerando el error asociado a esta medición (resolución de Vernier de $0.05\text{mm} = 50\mu\text{m}$), además dejando un pequeño espacio entre ellas para evitar desacomodo ocasionado por factores como vibraciones o backlash. Cada paso de los 8 en el motor 1 se reparten a lo largo de los 200 pasos que da el motor 2 para lograr una revolución. Se realiza de esta forma para que el movimiento sea continuo y no sea necesario que un motor se detenga cuando se accione el otro. Al completar el giro completo del motor 2, *cuenta* aumenta en 1 unidad y se imprime para conocer el número de vueltas que se lleva hasta el momento. Este proceso se repite en múltiples ocasiones hasta que se completa el número de revoluciones deseadas ($\textit{cuenta} = N$), significando ésta, una de las condiciones que rompen este ciclo, ya que de cumplirse terminaría el programa. La segunda condición ocurre cuando, durante el proceso, ha sido presionado el botón para indicar cambio de dirección, es decir, cuando se ha completado una capa completa de fibra en todo el ancho del carrete. Si se ejecuta esta segunda condición, se regresa al proceso repetitivo ya descrito, con una diferencia: los 8 pasos del motor 1 ahora se dan en dirección negativa (de derecha a izquierda). Las demás instrucciones son iguales. En ambos casos, el programa termina cuando se cumplen el número de vueltas.

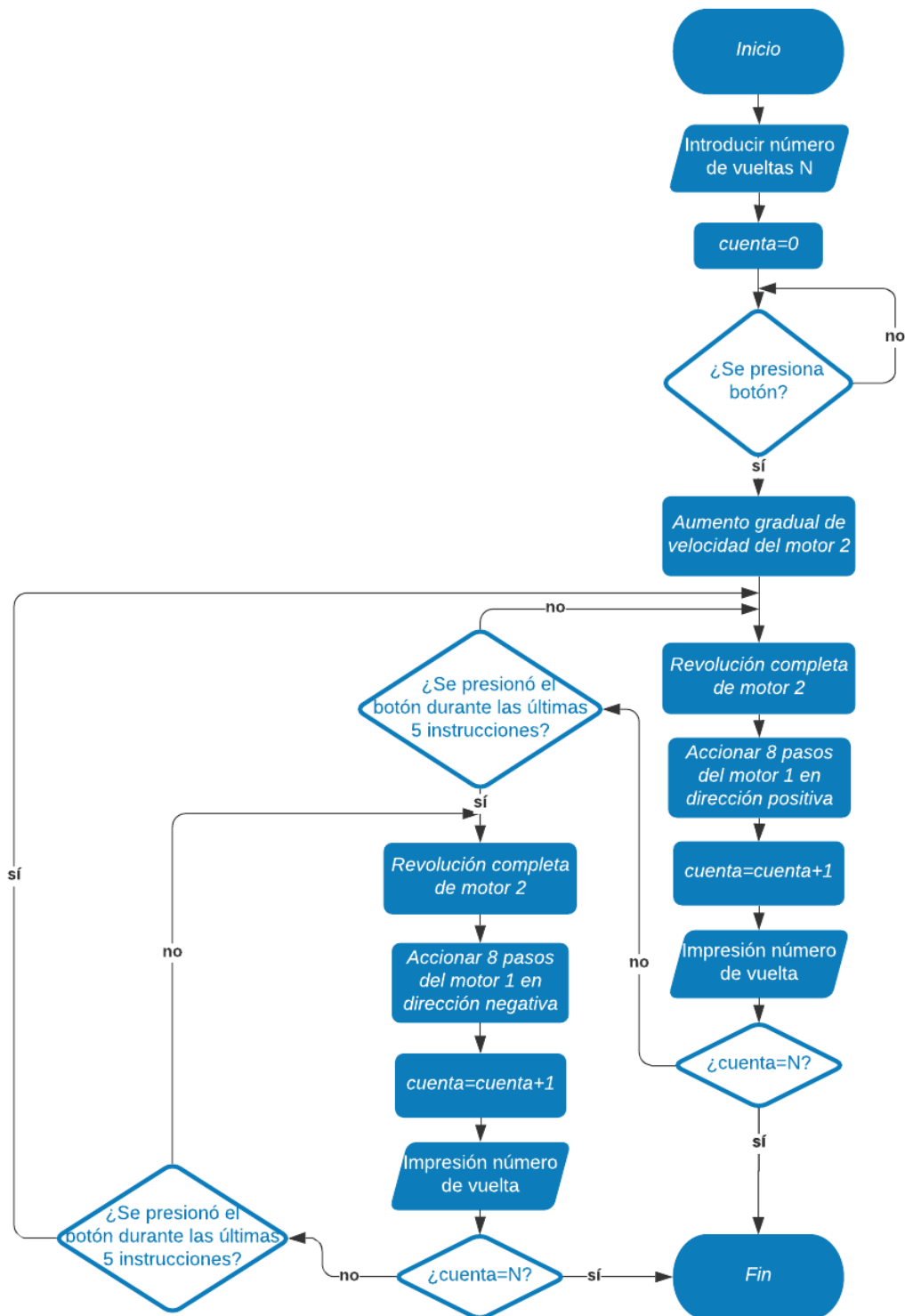


Figura 3.6: Diagrama de flujo del código de programación sobre la operación de la enrolladora de fibra.

En el siguiente apartado se desarrolla un modelo matemático adecuado al proceso de enrollamiento para obtener el número de revoluciones necesarias que debe ejecutar el motor 2, para enrollar una cierta longitud de fibra deseada.

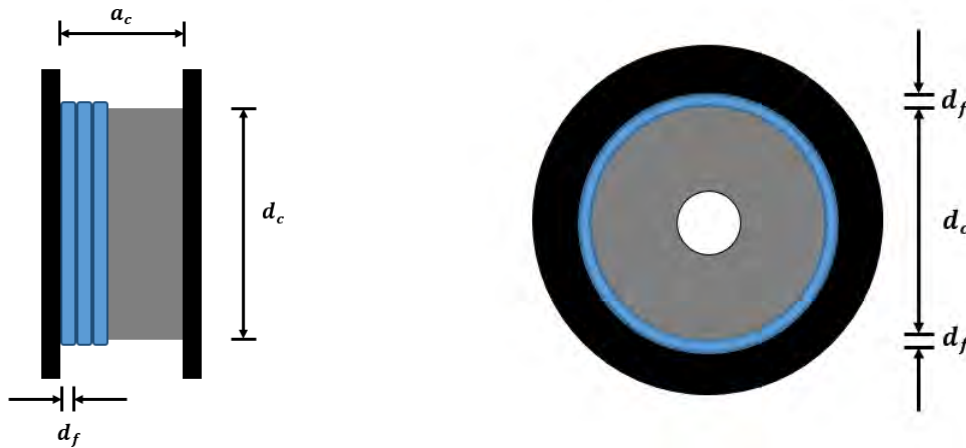
3.2 Modelo matemático

Para obtener un modelo general para calcular la longitud de fibra enrollada, es necesario primero hacer un análisis del caso más simple, considerando pocos metros de longitud de fibra, y después generalizar para grandes longitudes de enrollado. La longitud de fibra en una sola revolución se puede calcular utilizando la expresión del perímetro de un círculo $L = \pi d_c$, donde L es la longitud de fibra enrollada y d_c el diámetro del carrete utilizado. A partir de esta expresión, se puede generalizar para calcular la longitud de fibra en un N número de revoluciones o vueltas completas, así

$$L = N\pi d_c \quad \text{para} \quad N = 1, 2, 3 \dots \quad (3.1)$$

Sin embargo, esta expresión es válida para un número límite de revoluciones. El mecanismo de la enrolladora de fibra permite colocar una fibra tras otra a lo largo del ancho del carrete cada que se completa una revolución, tal como se muestra en la Figura 3.7(a). Por ello, el número de veces que cabe un diámetro de fibra d_f en el ancho del carrete a_c define el límite de revoluciones N_{lim} que se pueden dar, antes de completar una capa completa de fibra.

$$N_{lim} = \frac{a_c}{d_f}, \quad (3.2)$$



(a) Fibra de diámetro d_f enrollada en un carrete de diámetro d_c y ancho a_c (vista lateral).

(b) Una sola capa de fibra sobre carrete (vista transversal).

Figura 3.7: Vista lateral y transversal del carrete.

Sustituyendo Ec.(3.2) en Ec.(3.1), se obtiene una expresión para calcular una longitud L_1 de fibra para una capa completa de diámetros de fibra sobre el ancho del carrete.

$$L_1 = \frac{a_c}{d_f} \pi d_c \quad \text{para una capa completa de fibra.} \quad (3.3)$$

Por lo que para un número de revoluciones $N < a_c/d_f$ se utiliza la Ec.(3.1) y para $N = a_c/d_f$ la Ec.(3.3). Para el caso $N > a_c/d_f$, la fibra se colocará encima de la primera capa y comenzará el llenado de la segunda capa de fibra. Esto significa un cambio en el diámetro utilizado para realizar los cálculos, que anteriormente (primera capa) era el diámetro del carrete. Por la Figura 3.7(b) obtenemos la expresión del nuevo diámetro d_2 para la segunda capa de fibra:

$$d_2 = d_c + 2d_f. \quad (3.4)$$

Para de esta forma, obtener la longitud L_2 de fibra para dos capas completas de fibra:

$$L_2 = \frac{a_c}{d_f} \pi(d_c + 2d_f) \quad \text{para dos capas completas de fibra.} \quad (3.5)$$

De la Ec.(3.6), generalizando para la capa número n , se obtiene

$$d_n = d_c + 2(n-1)d_f. \quad (3.6)$$

Por lo tanto, considerando la variación del diámetro de enrollado en función del número de capas (Ec.(3.6)), podemos obtener expresiones de la longitud de enrollado para un número n de capas:

$$L_1 = \frac{a_c}{d_f} \pi d_c \quad \text{1er capa.} \quad (3.7)$$

$$L_2 = \frac{a_c}{d_f} \pi [d_c + 2d_f] \quad \text{2da capa.} \quad (3.8)$$

$$L_3 = \frac{a_c}{d_f} \pi [d_c + 2(2d_f)] \quad \text{3er capa.} \quad (3.9)$$

⋮

$$L_n = \frac{a_c}{d_f} \pi [d_c + 2(n-1)d_f] \quad \text{capa n.} \quad (3.10)$$

De esta forma, para obtener la longitud L_c para un n número de capas y no solo la longitud de cada capa, se debe sumar todas las longitudes calculadas $L_c = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$, obteniendo:

$$L_c = \frac{a_c}{d_f} \pi \sum_{i=1}^n [d_c + 2(i-1)d_f]. \quad (3.11)$$

Considerando las expresiones de sumatorias $\sum_{i=1}^n c = nc$ y $\sum_{i=1}^n i = n(n+1)/2$, donde c es una constante y n un número entero positivo, la Ec.(3.11) puede simplificarse de la forma:

$$L_c = \frac{a_c}{d_f} \pi n [d_c + (n-1)d_f]. \quad (3.12)$$

La Ec.(3.11) o Ec.(3.12), nos permite calcular la longitud de fibra en un proceso de enrollado, considerando únicamente capas completamente llenas de fibra a lo largo del ancho del carrete. Sin embargo, en el caso de requerir enrollar cualquier longitud de fibra, difícilmente dicha longitud corresponderá a un número de capas completas, por lo que para calcular la longitud restante L_r después de completar un cierto número de capas, se debe considerar la capa número $n+1$. Considerando este número de capa en la Ec.(3.6) y sustituyendo en la Ec.(3.1), se llega a la expresión:

$$L_r = N\pi(d_c + 2nd_f) \quad (3.13)$$

Finalmente, para enrollar una longitud total L_t de fibra se considera:

$$L_t = L_c + L_r \quad (3.14)$$

En el Ejemplo 3.2.1 se muestra el procedimiento para obtener los parámetros necesarios para obtener una cierta longitud de fibra que se desea enrollar, a partir de la ecuaciones anteriores.

Ejemplo 3.2.1: Enrollado de fibra

En el laboratorio de Conversión Fotónica en Fibras Ópticas comúnmente es necesario enrollar grandes cantidades de fibra para diversos procesos experimentales. Tal fue el caso para enrollar una longitud de 1 km de fibra mono-modal Nufern 980-HP, para el proyecto de obtención de grado de título "Caracterización de una fibra óptica mono-modal bajo la ganancia Raman" del compañero de laboratorio, el M. en C. Álvaro Guerra.

La operación de la enrolladora de fibra recibe como único parámetro el número de revoluciones total N_t que debe dar para enrollar la longitud de fibra deseada, por lo que en el presente ejemplo se muestra cómo obtener este parámetro a partir del modelo matemático desarrollado. Partimos de la Ec.(3.14), considerando que se desea enrollar 1 km (100000 cm) de fibra.

$$100000 = L_c + L_r \quad (3.15)$$

Primero es necesario obtener la longitud L_c de un número de capas completas n de fibra que se llenarán en el proceso de enrollado, teniendo en cuenta que el valor de L_c debe ser lo más cercano a 1 km sin pasarse. A partir de la Ec.(3.11), considerando un diámetro de fibra de $250 \mu\text{m} = 0.025 \text{ cm}$, un carrete de ancho $a_c = 3.70 \text{ cm}$ y diámetro $d_c = 10.52 \text{ cm}$:

$$\begin{aligned} L_c &= \frac{3.70 \text{ cm}}{0.025 \text{ cm}} \pi \sum_{i=1}^n [10.52 \text{ cm} + 2(i-1)(0.025 \text{ cm})] \\ L_c &= 148\pi \sum_{i=1}^n [10.52 \text{ cm} + 0.05 \text{ cm}(i-1)]. \end{aligned} \quad (3.16)$$

La longitud que cumple la condición mencionada y la Ec.(3.16) es $L_c = 96910.72 \text{ cm}$ para $n = 19$. Conociendo L_c podemos calcular L_r , $L_r = L_t - L_c = 100000 \text{ cm} - 96910.72 \text{ cm} = 3089.28 \text{ cm}$. Para de esta forma, despejando N de la Ec.(3.13):

$$\begin{aligned} N &= \frac{L_r}{\pi(d_c + 2nd_f)} \\ N &= \frac{3089.28 \text{ cm}}{10.52 \text{ cm} + 2(19)(0.025 \text{ cm})} \\ N &= 85.73 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Finalmente, el número de capas completas n también puede interpretarse como un cierto número de revoluciones, mediante la expresión:

$$\begin{aligned} N &= n \frac{a_c}{d_f} \\ N &= 19 \frac{3.70 \text{ cm}}{0.025 \text{ cm}} \\ N &= 2812 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Para así obtener el número total de revoluciones $N_t = 2812 + 85.73 = 2897.73$ revoluciones.

En la Figura 3.8 se muestran unas líneas de código en lenguaje de programación Python, en donde se realiza todo el procedimiento anterior. Esto para facilitar cálculos posteriores en los que sea necesario enrollar distintas longitudes de fibra o con distintas dimensiones del carrete utilizado.

```

In [80]: #En este código se calcula el número de capas y revoluciones extras a partir de la longitud deseada
l=100000 #Longitud deseada (cm)
dc=10.52 #diámetro del carrete (cm)
ac=3.70 #ancho del carrete (cm)
df=0.025 #diámetro de la fibra (cm)

#Inicialización de variables
aux=0 #variable auxiliar
n=0 #capa actual

def l(capas): #Longitud de fibra en función del número de capas (Ec.)
    return (ac/df)*np.pi*(dc+(capas-1)*2*df)

while l>aux: #Se busca la longitud acumulada hasta la última capa completa según la longitud deseada
    aux+=l(n+1)
    n+=1
Lc=aux-l(n) #Longitud acumulada de un cierto número de capas
cap=n-1 #El número de capas completas es igual al número de capa actual menos 1

def N(longitud): #Número de revoluciones restantes en función de una cierta longitud
    return longitud/(np.pi*(dc+2*cap*df))

Lr=l-Lc #Longitud restante
rev=N(Lr) #Se calcula el número de revoluciones restantes a partir de la longitud restante y el número de capas
Nt=(cap*ac/df)+rev #Número total de revoluciones

#Impresión de resultados
print "Número de capas completas n=",cap
print "Número de revoluciones restantes N=",rev
print "Número de revoluciones totales Nt=", Nt

Número de capas completas n= 19
Número de revoluciones restantes N= 85.7322247933
Número de revoluciones totales Nt= 2897.73222479

```

Figura 3.8: Código en Python para calcular el número de revoluciones totales N_t .

3.3 Error asociado como instrumento de medición

Como ya se mencionó, además de tener la función de enrollar fibra, este dispositivo es capaz de medir la longitud de fibra enrollada, por ello se debe calcular el error asociado a dicha medición. Las mediciones pueden ser divididas en dos tipos diferentes; primero están las llamadas mediciones directas, que son aquellas que se obtienen al medir alguna magnitud utilizando directamente algún instrumento de medida. Por otro lado, las mediciones indirectas son aquellas que se calculan a partir de las mediciones directas. Por ejemplo, el volumen que ocupa un líquido será una medida directa si se mide con una probeta graduada, y se considera una medición indirecta si se obtiene de la medición de las dimensiones del recipiente que lo contiene. Mientras que las mediciones directas, sean o no reproducibles, tienen asociada una incertidumbre que puede ser obtenida de manera relativamente simple, las mediciones indirectas tienen asociada una incertidumbre que se origina de la propagación de la incertidumbre de las mediciones directas de las que se derivan [41].

Considerando dos magnitudes x y y que se obtienen mediante una medición directa y con incertidumbre asociada Δx y Δy , respectivamente; si se desea calcular la incertidumbre de una medida indirecta z que está dada por $z = x + y$ o $z = x - y$, es decir la suma o la resta de estas medidas, entonces la incertidumbre asociada a esta variable es la suma de las incertidumbres asociadas a x y y , es decir:

$$\Delta z = \Delta x + \Delta y \quad (3.19)$$

Por otro lado, si se desea calcular la incertidumbre de una medida indirecta w , la cual se puede calcular mediante el producto $w = x \cdot y$ o el cociente $w = x/y$, entonces la incertidumbre asociada a w , está dada por:

$$\Delta w = |w| \left[\frac{\Delta x}{|x|} + \frac{\Delta y}{|y|} \right] \quad (3.20)$$

Y de forma particular para $w = x \cdot y$:

$$\Delta w = |y| \Delta x + |x| \Delta y \quad (3.21)$$

A partir de la Ec.(3.19), se puede obtener la incertidumbre o error asociado a la longitud enrollada dada por la Ec.(3.14), así:

$$\Delta L_t = \Delta L_c + \Delta L_r \quad (3.22)$$

Para calcular la longitud de fibra L_c , en la Ec.(3.11), el cociente a_c/d_f corresponde al número de fibras que caben dentro del ancho del carrete utilizado para llenarlo por completo. Sin embargo, existe un error visual asociado al operador al presionar el botón para cambiar el sentido del movimiento longitudinal al completarse una capa completa de fibra en el carrete, dicho error ocasiona que el número de fibras dentro del carrete no corresponda con exactitud al cociente mencionado. Debido a este factor y otros como la resolución del movimiento longitudinal del motor a pasos, la perturbación en el movimiento de la fibra al pasar de un carrete a otro y la adecuada colocación inicial de la fibra antes del proceso de enrollamiento; se debe sustituir el cociente a_c/d_f como una variable independiente c . Una manera de medir esta variable es hacer un análisis estadístico para una muestra de al menos 30 mediciones del número de fibras de un cierto diámetro (d_f) dentro de un carrete de ancho a_c , para de esta forma obtener el valor final asociado al promedio (\bar{c}) de las mediciones realizadas, así como su incertidumbre asociada a la desviación estándar (σ_c) de la forma: $c \pm \Delta c = \bar{c} \pm 1.96\sigma_c$, para obtener un 95% de confiabilidad [42]. Así, por la Ec.(3.21), el error asociado ΔL_c es:

$$\Delta L_c = c\pi \sum_{i=1}^n [\Delta d_c + 2(i-1)\Delta d_f] + \Delta c\pi \sum_{i=1}^n [d_c + 2(i-1)d_f]. \quad (3.23)$$

Por otro lado, el error asociado ΔL_r queda:

$$\Delta L_r = N\pi(\Delta d_c + 2n\Delta d_f), \quad (3.24)$$

obteniendo finalmente:

$$\Delta L_t = c\pi \sum_{i=1}^n [\Delta d_c + 2(i-1)\Delta d_f] + \Delta c\pi \sum_{i=1}^n [d_c + 2(i-1)d_f] + N\pi(\Delta d_c + 2n\Delta d_f). \quad (3.25)$$

A continuación se muestra el Ejemplo 3.3.1 para calcular el error asociado al kilómetro de fibra enrollado del ejemplo 3.2.1, mediante la Ec.(3.25).

Ejemplo 3.3.1: Error asociado a la longitud enrollada de fibra

En el ejemplo 3.2.1 se calcularon tanto el número de capas completas de fibra n , como el número de vueltas restantes N para completar la longitud requerida, obteniendo para 1 km de fibra $n = 19$ y $N = 85.73$. Para este proceso se utilizó una fibra de diámetro $d_f = 250 \mu m = 0.025 \text{ cm}$ y un carrete de diámetro $d_c = 10.52 \text{ cm}$, medidos con un Vernier con resolución de $0.05 \text{ mm} = 0.005 \text{ cm}$, por lo que $\Delta d_f = \Delta d_c = 0.005 \text{ cm}$.

En el caso de la variable c , se realizaron 30 mediciones del número de fibras que caben a lo largo del ancho del carrete $a_c = 3.7 \text{ cm}$, considerando únicamente el llenado de la primer capa y al finalizar repitiendo el proceso. Así, el promedio y desviación estándar obtenidos son: $\bar{c} = 147.73$ y $\sigma_c = 1.59$. Por ello el error asociado a c es: $\Delta c = 1.96\sigma_c = 3.13$.

Por ello, podemos calcular ΔL_t :

$$\begin{aligned}
 \Delta L_c &= c\pi \sum_{i=1}^n [\Delta d_c + 2(i-1)\Delta d_f] + \Delta c\pi \sum_{i=1}^n [d_c + 2(i-1)d_f] \\
 \Delta L_c &= 147.73\pi \sum_{i=1}^1 9[0.005cm + 2(i-1)(0.005cm)] + 3.13\pi \sum_{i=1}^1 9[10.52cm + 2(i-1)(0.025cm)] \\
 \Delta L_c &= 2887.24cm. \tag{3.26}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta L_r &= N\pi(\Delta d_c + 2n\Delta d_f) \\
 \Delta L_r &= 85.73\pi[0.005cm + 2(19)(0.005cm)] \\
 \Delta L_r &= 52.52cm. \tag{3.27}
 \end{aligned}$$

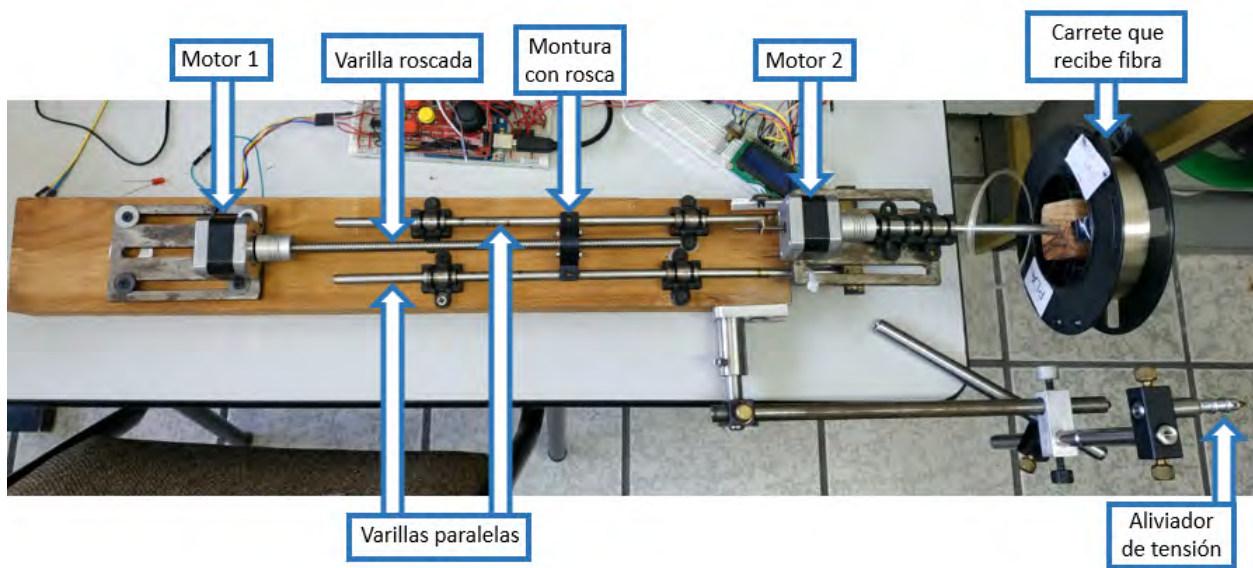
$$\begin{aligned}
 \Delta L_t &= \Delta L_c + \Delta L_r \\
 \Delta L_t &= 2887.24cm + 52.52cm \\
 \Delta L_t &= 2939.76cm \\
 \Delta L_t &= 29.40m. \tag{3.28}
 \end{aligned}$$

Este error corresponde al 2.94% de la longitud total enrollada. Finalmente, la longitud enrollada de fibra se puede expresar:

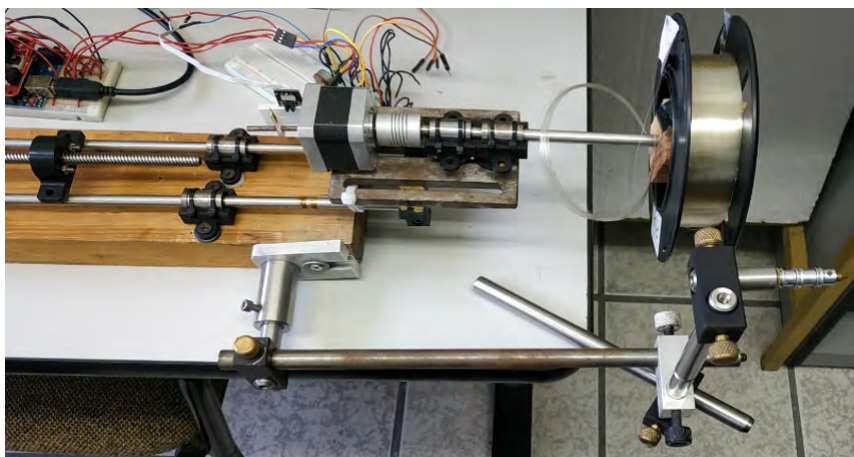
$$L_t = 1000 \pm 29.40m \tag{3.29}$$

3.4 Prototipo final

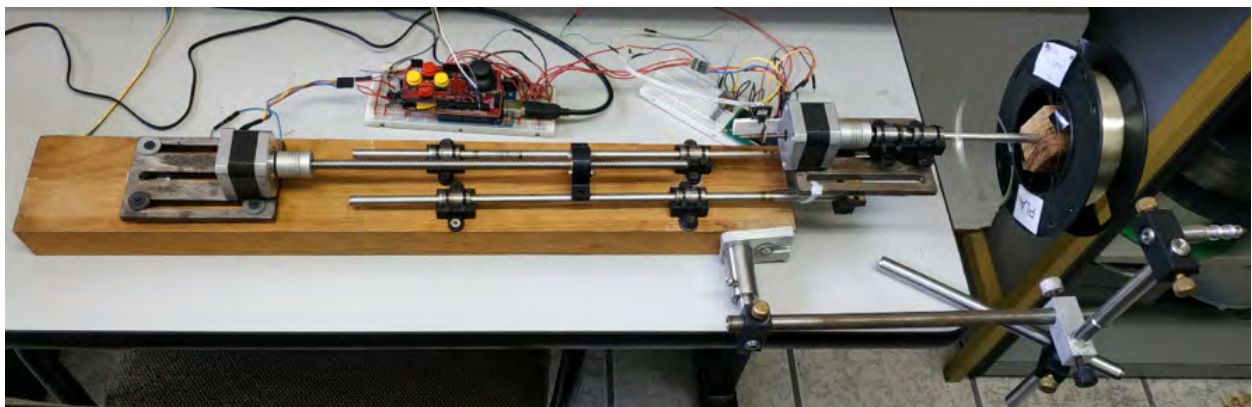
Una vez que termina el proceso de construcción de este dispositivo, que va desde acoplar cada uno de los componentes que conforman este prototipo en un sistema electromecánico funcional, programar las instrucciones necesarias que generan una operación sincronizada del prototipo e implementar un modelo matemático adecuado para obtener mediciones precisas con su respectivo error asociado; se obtiene un instrumento con la capacidad de enrollar longitudes específicas de fibra óptica de cualquier diámetro, que arroja medidas reproducibles. A continuación se presentan como evidencia en las Figuras 3.9 y 3.10, imágenes tomadas del prototipo final de la enrolladora de fibra que muestra cada uno de sus componentes.



(a) Componentes de la enrolladora de fibra.

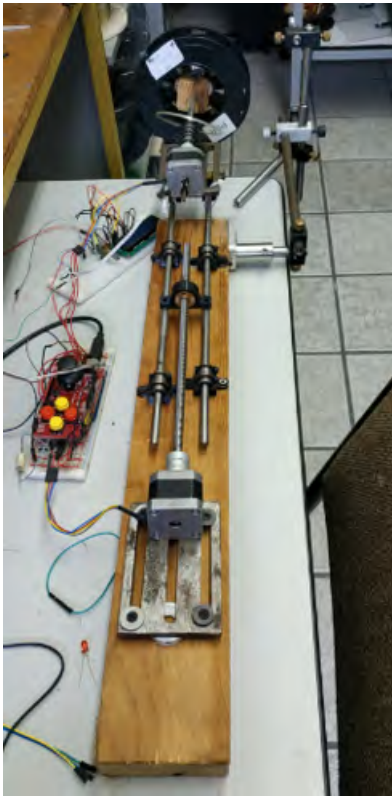


(b) Acercamiento al motor 2 y polea.

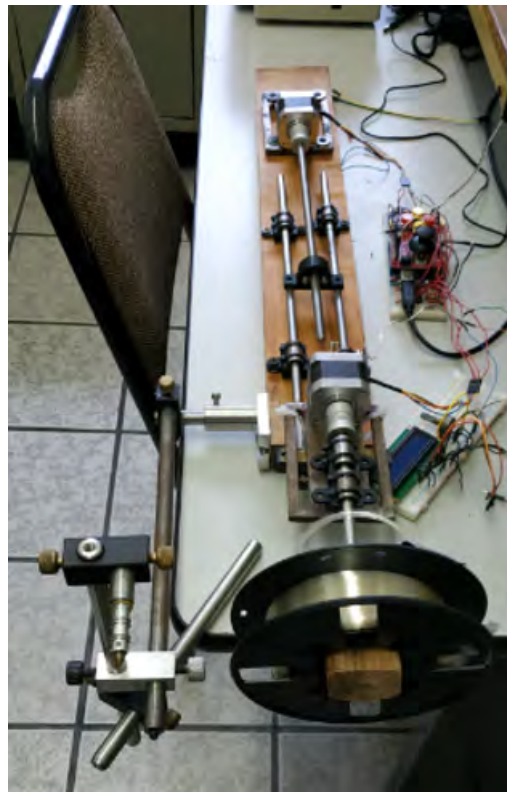


(c) Vista superior de la enrolladora.

Figura 3.9: Prototipo final de la enrolladora de fibra (componentes, acercamiento y vista superior).



(a) Vista frontal de la enrolladora.



(b) Vista lateral de la enrolladora.

Figura 3.10: *Prototipo final de la enrolladora de fibra (vista frontal y lateral).*

Capítulo 4

Conclusiones

4.1 Trabajo a futuro

Inicialmente, los objetivos de este proyecto incluían la fabricación y prueba de dispositivos basados en fibras ópticas estrechadas como micro-fibra, *tapers* y convertidores multi-modo a mono-modo (adiabáticos y no adiabáticos), a partir del prototipo construido, tal y como se presentó en el protocolo de Tesis. Sin embargo, se trata de un objetivo de perfil experimental que no pudo ser alcanzado debido a la contingencia sanitaria a causa de la pandemia mundial del coronavirus SARS-CoV-2 / COVID-19, imposibilitando de esta forma el acceso a las instalaciones del CIO y por lo tanto limitando el trabajo experimental de cualquier índole en el Centro. Se cita a continuación el acuerdo logrado por el Comité Académico en la reunión con fecha: 15/06/20, ante esta situación:

Acuerdo 05/15JUN20: En el marco de la contingencia sanitaria a causa de la pandemia del coronavirus SARS-CoV-2 / COVID-19 y con fundamento en las facultades del Comité Académico señaladas en los puntos II, VIII y XIII del artículo 2.1.4 del Lineamiento Académico de Posgrados así como del Acuerdo 04/15JUN20, el Comité Académico exhorta a los estudiantes de la Maestría en Ciencias (Óptica) y de la Maestría en Optomecatrónica que culminan el Plan de Estudios entre Agosto 2020 y Diciembre 2020, a realizar en conjunto con sus Directores de Tesis los ajustes que consideren pertinentes en los alcances del proyecto, tomando en consideración que no será viable el regreso a actividades experimentales en el CIO en el corto plazo. Se sugiere sustituir el trabajo experimental que estuviera previsto con la revisión de los resultados que se hubieran alcanzado hasta antes del inicio de la contingencia, o bien, con una revisión teórica sobre el proyecto que se desarrolla, así como a iniciar los trámites de graduación al menos cuatro semanas antes del término del posgrado, de acuerdo a lo establecido en la Guía de obtención de grado vigente.

Sin embargo, uno de los objetivos principales es la implementación del prototipo estrechador de fibra en la fabricación de fibras ópticas estrechadas reproducibles para su utilización en aplicaciones de gran alcance en diferentes áreas de la óptica, tal como las mostradas en el *Capítulo 1: Fibras ópticas estrechadas - Aplicaciones*. Por lo que una vez restablecidas las actividades experimentales para los estudiantes en los laboratorios del Centro, se continuará con el desarrollo de este trabajo para alcanzar tales objetivos. Considerando también que se busca utilizar este prototipo como instrumento de apoyo en el desarrollo del proyecto de investigación titulado: *Investigación y desarrollo de láseres y dispositivos basados en fibras ópticas*. Proyecto a realizar durante el programa de 4 años para la obtención del grado de Doctor en Ciencias, para el cual ya fui aceptado en el Centro de Investigaciones Óptica, una vez culminados mis estudios de Maestría.

4.2 Mejoras del prototipo

Cualquier prototipo destinado a la automatización de procesos requiere de ajustes durante el proceso de fabricación del mismo y después, en la etapa de pruebas. En este caso particular, el prototipo desarrollado fue diseñado y construido con los ajustes necesarios para su funcionamiento adecuado, con la limitación de no

poder realizar ajustes durante una etapa experimental y de pruebas de desempeño, por la situación descrita en la sección anterior. Dicha etapa resulta muy importante, ya que da sustento a la elaboración del prototipo al poder obtener resultados reproducibles, o en este caso fibras estrechadas de iguales características bajo las mismas condiciones iniciales.

Posterior a la etapa experimental o de desempeño del prototipo, se debe implementar un modelo matemático adaptado al funcionamiento del prototipo estrechador de fibra, tal como se hizo para la enrolladora de fibra en el *Capítulo 3: Enrolladora de fibra - Modelo matemático*. Es a partir de dicho modelo, que es posible caracterizar los parámetros de operación del prototipo como velocidades y tiempos de ejecución de los motores, intensidad y duración del arco eléctrico generado por los electrodos, inclusión de nuevos componentes y sensores no considerados, o inclusive modificaciones en la estructura y de componentes. Todo de acuerdo a las necesidades del prototipo que se presentan hasta las pruebas experimentales.

Hablando ahora de la enrolladora de fibra, componente del prototipo general, se pretende también mejorar su funcionamiento general, modificando específicamente dos puntos. Contamos hasta el momento con un dispositivo semi-automático debido a que requiere de la interacción de un operador para presionar un botón cada vez que se debe cambiar la dirección del movimiento longitudinal de enrollado por haber completado una capa de fibra a lo largo de todo el carrete utilizado. La implementación de un sensor que sea capaz de detectar la última revolución de enrollado antes de completar la capa de fibra, ayudaría a obtener así un dispositivo totalmente automático. Además, de esta forma se evitaría o disminuiría una fuente de error que afecta directamente al valor de la longitud de fibra calculada al ser enrollada. La segunda modificación también tiene que ver con esta fuente de error y con la resolución del mecanismo utilizado. El movimiento longitudinal del dispositivo esta limitado por dos aspectos, los componentes mecánicos utilizados que propician dicho movimiento y los motores a pasos utilizados. El motor a pasos tiene un límite de pasos que puede dar por revolución (200 para los motores utilizados), sin embargo, mediante *drivers* para motores a pasos como el *A4988*, se puede aumentar el número de pasos por revolución fraccionando dichos pasos. Con este *driver* se pueden fraccionar cada paso en hasta 1/16, lo que significa obtener hasta 3200 pasos por revolución. De lograrlo, sería mucho más preciso colocar una fibra al lado de la otra al completar una revolución, obteniendo así un enrollado más uniforme y una longitud de fibra final con un error asociado mucho más bajo que el actual.

Realizar cada una de estas modificaciones en el prototipo favorecen no solo el desempeño del mismo sino también su competitividad frente a otros dispositivos comerciales utilizados con la misma finalidad, la fabricación de fibras ópticas estrechadas. Por ello, su pronta implementación es de suma importancia y se llevará cabo una vez que la situación lo permita.

4.3 Conclusiones generales

Algunos de los componentes utilizados en la estructura de los prototipos estrechador y enrolladora de fibra, fueron reutilizados o reciclados de material disponible en el Laboratorio de Conversión Fotónica en Fibras Ópticas, en donde se ejecutó cada etapa de construcción de estos dispositivos. Como es el caso de la base de madera utilizada como soporte de la estructura de la enrolladora de fibra; varillas, tornillos, soportes y piezas metálicas utilizados en ambos dispositivos; las bandas que rodean los cilindros metálicos en el mecanismo del estrechador de fibra (recicladas de la cámara de una llanta de bicicleta desechada); la caja metálica de la fuente de poder para generar el arco eléctrico, que era antes un contenedor en desuso; el transformador de la misma fuente, reciclado de un regulador desechado; y un cargador de voltaje variable inutilizado como fuente de alimentación auxiliar. Esto con la finalidad de reducir costos en la elaboración de ambos prototipos y de reutilizar material dándole un nuevo uso, en lugar de desecharlo como basura.

A pesar de haber reutilizado algunos componentes disponibles, muchos otros se tuvieron que adquirir nuevos. Tal es el caso de la bobina de ignición, el par de motores a paso, la placa de acrílico y la varilla roscada con su montura, por mencionar los más costosos. A partir del registro de gastos de estos componentes, se

puede obtener un estimado del costo total del prototipo general, rondando los \$4000, sin considerar el precio de los componentes reutilizados y de \$5300 considerándolos. De esta forma, se puede concluir que se trata de un prototipo de bajo costo considerando el alcance que tiene al ser capaz de fabricar secciones de fibra óptica estrechada (*tapers*) y micro-fibra. Además de enrollar tanto fibra producida por el estrechador como fibra estándar, y obtener al final la longitud de enrollado.

La producción científica cada vez toma mayor fuerza en México, sin embargo la situación es diferente con respecto a los aportes tecnológicos por parte de la comunidad científica. Los estudiantes de posgrados científicos, como futuros investigadores, estamos en la posición de cambiar poco a poco esta situación. Ser partícipe de la implementación tecnológica en aplicaciones de carácter científico resulta para mí una tarea fundamental en mi formación académica, como es el caso de este trabajo particular. Ya que así, las investigaciones científicas de interés actual y de alto impacto en la óptica que pueda generar, toman mayor peso por utilizar tecnología desarrollada de autoría propia. De esta forma, la incursión en el desarrollo de prototipos para aplicaciones de automatización en los múltiples procesos experimentales que se desarrollan en los laboratorios de óptica, representa una línea de investigación en la cuál deseo continuar y que me llevó a la construcción del prototipo presentado en este trabajo.

Referencias

- [1] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, vol. 5 of *Wiley Series in Pure and Applied Optics*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., aug 1991.
- [2] "EMTT: Relaciones de núcleo en fibras ópticas." <http://marismas-emtt.blogspot.com/2010/10/relaciones-de-nucleo-en-fibras-opticas.html>. Fecha de consulta: 12/07/2020.
- [3] T. A. Birks and Y. W. Li, "The Shape of Fiber Tapers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, no. 4, pp. 432–438, 1992.
- [4] K. P. Nayak and K. Hakuta, "Single atoms on an optical nanofibre," *New Journal of Physics*, vol. 10, p. 053003, may 2008.
- [5] K. S., S. W., H. Arof, and H. Ahm, "Fabrication and Applications of Microfiber," in *Selected Topics on Optical Fiber Technology*, InTech, feb 2012.
- [6] M. Lakowski, B. Guzowski, and A. Wozniak, "Fabrication of ultra-long tapered optical fibers," *Micro-electronic Engineering*, vol. 221, p. 111193, jan 2020.
- [7] Y.-H. Chuang, K.-G. Sun, C.-J. Wang, J. Y. Huang, and C.-L. Pan, "A simple chemical etching technique for reproducible fabrication of robust scanning near-field fiber probes," *Review of Scientific Instruments*, vol. 69, pp. 437–439, feb 1998.
- [8] I. I. H. Bello and C. O. Luna, *Control difuso y construcción de un mecanismo capaz de golpear con distintos efectos una bola de billar*. PhD thesis, Universidad de las Américas Puebla., jan 2004.
- [9] Y. A. Badamasi, "The working principle of an Arduino," in *Proceedings of the 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation, ICECCO 2014*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., dec 2014.
- [10] J. D. Love, W. M. Henry, W. J. Stewart, R. J. Black, S. Lacroix, and F. Gonthier, "Tapered single-mode fibres and devices Part 1. Adiabaticity criteria," *IEE proceedings. Part J, Optoelectronics*, vol. 138, no. 5, pp. 343–354, 1991.
- [11] J. Villatoro and D. Monzón-Hernández, "Fast detection of hydrogen with nano fiber tapers coated with ultra thin palladium layers," *Optics Express*, vol. 13, p. 5087, jun 2005.
- [12] P. Polynkin, A. Polynkin, N. Peyghambarian, and M. Mansuripur, "Evanescent field-based optical fiber sensing device for measuring the refractive index of liquids in microfluidic channels," *Optics Letters*, vol. 30, p. 1273, jun 2005.
- [13] L. Zhang, F. Gu, J. Lou, X. Yin, and L. Tong, "Fast detection of humidity with a subwavelength-diameter fiber taper coated with gelatin film," *Optics Express*, vol. 16, p. 13349, aug 2008.
- [14] F. Warken, E. Vetsch, D. Meschede, M. Sokolowski, and A. Rauschenbeutel, "Ultra-sensitive surface absorption spectroscopy using sub-wavelength diameter optical fibers," *Optics Express*, vol. 15, p. 11952, sep 2007.

- [15] A. Stiebeiner, O. Rehband, R. Garcia-Fernandez, and A. Rauschenbeutel, "Ultra-sensitive fluorescence spectroscopy of isolated surface-adsorbed molecules using an optical nanofiber," *Optics Express*, vol. 17, p. 21704, nov 2009.
- [16] H. Li, L. Wei, X. Zhang, and Y. Song, "Supercontinuum generation in tapered fibers," in *Optics InfoBase Conference Papers*, vol. 25, pp. 1415–1417, Optical Society of America, oct 2009.
- [17] V. Grubsky and A. Savchenko, "Glass micro-fibers for efficient third harmonic generation," *Optics Express*, vol. 13, p. 6798, sep 2005.
- [18] R. R. Gattass, G. T. Svacha, L. Tong, and E. Mazur, "Supercontinuum generation in submicrometer diameter silica fibers," *Optics Express*, vol. 14, p. 9408, oct 2006.
- [19] U. Wiedemann, K. Karapetyan, C. Dan, D. Pritzkau, W. Alt, S. Irsen, and D. Meschede, "Measurement of submicrometre diameters of tapered optical fibres using harmonic generation," *Optics Express*, vol. 18, p. 7693, apr 2010.
- [20] "¿Qué son los átomos fríos y cuál es su utilidad?." <https://nmas1.org/blog/2018/12/16/atomos-frios>. Fecha de consulta: 12/07/2020.
- [21] G. Sagué, E. Vetsch, W. Alt, D. Meschede, and A. Rauschenbeutel, "Cold-Atom Physics Using Ultrathin Optical Fibers: Light-Induced Dipole Forces and Surface Interactions," *Physical Review Letters*, vol. 99, p. 163602, oct 2007.
- [22] M. J. Morrissey, K. Deasy, Y. Wu, S. Chakrabarti, and S. Nic Chormaic, "Tapered optical fibers as tools for probing magneto-optical trap characteristics," *Review of Scientific Instruments*, vol. 80, p. 053102, may 2009.
- [23] E. Vetsch, D. Reitz, G. Sagué, R. Schmidt, S. T. Dawkins, and A. Rauschenbeutel, "Optical interface created by laser-cooled atoms trapped in the evanescent field surrounding an optical nanofiber," *Physical Review Letters*, vol. 104, p. 203603, may 2010.
- [24] K. Srinivasan, P. E. Barclay, M. Borselli, and O. Painter, "Optical-fiber-based measurement of an ultra-small volume high-Q photonic crystal microcavity," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 70, p. 081306, aug 2004.
- [25] P. E. Barclay, K. Srinivasan, O. Painter, B. Lev, and H. Mabuchi, "Integration of fiber-coupled high-Q SiN x microdisks with atom chips," *Applied Physics Letters*, vol. 89, p. 131108, sep 2006.
- [26] S. M. Spillane, T. J. Kippenberg, O. J. Painter, and K. J. Vahala, "Ideality in a Fiber-Taper-Coupled Microresonator System for Application to Cavity Quantum Electrodynamics," *Physical Review Letters*, vol. 91, p. 043902, jul 2003.
- [27] B. Min, S. Kim, K. Okamoto, L. Yang, A. Scherer, H. Atwater, and K. Vahala, "Ultralow threshold on-chip microcavity nanocrystal quantum dot lasers," *Applied Physics Letters*, vol. 89, p. 191124, nov 2006.
- [28] K. Srinivasan, O. Painter, A. Stintz, and S. Krishna, "Single quantum dot spectroscopy using a fiber taper waveguide near-field optic," *Applied Physics Letters*, vol. 91, p. 091102, aug 2007.
- [29] G. Rego, "Fibre optic devices produced by arc discharges," *Journal of Optics*, vol. 12, p. 113002, nov 2010.
- [30] S. Zhu, J. W. Xing, F. F. Pang, and T. Y. Wang, "Temperature sensor based on a single-mode tapered optical fiber," *Journal of Shanghai University*, vol. 15, pp. 101–104, apr 2011.
- [31] "Motorreductor Proyectos Arduino - CDMX Electrónica." <https://www.cdmxelectronica.com/producto/motorreductor-proyectos-arduino/>. Fecha de consulta: 18/06/2020.
- [32] "Micro Motorreductor 6VDC - 30 RPM | SANDOROBOTICS." <https://sandorobotics.com/producto/hr0244-30/>. Fecha de consulta: 18/06/2020.

- [33] "MSD Bobina - Ignicion (Performance) 5527." https://www.autozone.com.mx/encendido/bobina-ignicion-performance/msd-bobina-ignicion-performance-5527/631100_882027_17367. Fecha de consulta: 19/06/2020.
- [34] "Modulo Generador De Pulsos Ne555 – DIPMECATRONICA." <https://www.dipmecatronica.com.mx/product/modulo-generador-de-pulsos-ne555/>. Fecha de consulta: 19/06/2020.
- [35] "MC14011B Datasheet(PDF) - Motorola, Inc." <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/90025/MOTOROLA/MC14011B.html>. Fecha de consulta: 19/06/2020.
- [36] "IRFP460LC Datasheet(PDF) - Vishay Siliconix." <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/251459/VISHAY/IRFP460LC.html>. Fecha de consulta: 19/06/2020.
- [37] A. P. Malvino and D. J. Bates, *Principios de electrónica*. McGraw-Hill, 2007.
- [38] G. A. Ruiz Robredo, *Electrónica básica para ingenieros*. Publican, Ediciones de la Universidad de Cantabria, 2009.
- [39] R. Félix, R. C. Quintela, and M. Redondo, "Descarga eléctrica y arco eléctrico," tech. rep., Universidad de Salamanca, España.
- [40] "Fuentes conmutadas III. Rectificador y condensador Fidestec." <https://fidestec.com/blog/fuentes-de-alimentacion-conmutadas-03/>. Fecha de consulta: 23/06/2020.
- [41] D. C. Baird, *Experimentacion : una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 2a ed., 2005.
- [42] R. Blaine, "Understanding Precision Statements for Standard Reference Materials," tech. rep.