

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SENSOR DE FIBRA ÓPTICA
BASADO EN REDES DE DIFRACCIÓN DE PERIODO LARGO PARA EL
CONTROL DE CALIDAD DE HIDROCARBUROS**

LUZ GABRIELA MINGÁN NÚÑEZ

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
PROGRAMA INGENIERÍA FÍSICA**

POPAYÁN

2008

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SENSOR DE FIBRA ÓPTICA
BASADO EN REDES DE DIFRACCIÓN DE PERIODO LARGO PARA EL
CONTROL DE CALIDAD DE HIDROCARBUROS**

LUZ GABRIELA MINGÁN NÚÑEZ

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniera Física**

DIRECTOR

Dr. Pedro Torres

Universidad Nacional Sede Medellín

CODIRECTOR

Msc. Luis Fernando Echeverri

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN

PROGRAMA INGENIERÍA FÍSICA

POPAYÁN

2008

TABLA DE CONTENIDO

	No. Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. RESUMEN	2
3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	3
4. MARCO REFERENCIAL	7
4.1 Redes de Periodo Largo en Fibra LPFGs	8
4.1.1 Estado del arte	8
4.1.2 Marco Teórico	12
4.2 Fabricación de LPFGs	15
4.2.1 Técnicas de Fabricación	15
4.2.2 Fabricación por Descarga de Arco Eléctrico	16
4.3 Sensores LPFGs para Monitorear la Calidad de Hidrocarburos	18
5. DESARROLLO EXPERIMENTAL	19
5.1 Fabricación de Redes de Periodo Largo de Fibra - LPFG	19
5.1.2 Redes de período largo en fibra óptica inducidas y sintonizadas magneto-mecánicamente	28
5.2 Interrogación de LPFG	32
5.3 Diseño y elaboración sistema de medición	36
5.4 Calibración del sensor basado en LPFG	39
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	41
7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	47
8. BIBLIOGRAFÍA	49

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas, los sensores de fibra óptica han alcanzado un alto nivel de desarrollo, impulsado en gran medida por la industria de las comunicaciones, que cada vez más son utilizados en sistemas de sensado y control de estructuras y procesos productivos. El progreso ha sido tan grande, que hoy se reportan aplicaciones de sistemas ópticos capaces de supervisar el estado de edificios, puentes y, en general, de grandes estructuras civiles; en el sector eléctrico, particularmente en sistemas automatizados que operen en tiempo real. En el sector de petróleo y gas, brinda mayor seguridad a menor precio; dado que la fibra óptica puede trabajar en ambientes corrosivos y a elevadas temperaturas.

Con el apoyo del Grupo de Fotónica y Opto-electrónica de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín se elaboraron redes de período largo en fibra óptica empleadas como prototipo de sensor que permite diagnosticar de forma óptima diversas muestras de biocombustible adulterado con disolventes comerciales.

La perspectiva en realizar las redes de período largo, es de usar el dispositivo como sensor del control de calidad del combustible., midiendo el índice de refracción de una mezcla de etanol y gasolina. En Colombia esta mezcla tiene una validez legal para una proporción de alcohol del 20%. Sin embargo como el alcohol y otros disolventes de pinturas tiene un costo más bajo que la gasolina, la probabilidad en negligencia es alta aumentando la concentración de la proporción de alcohol dentro de la mezcla que es vendida directamente al consumidor. Los procedimientos para verificar el contenido de la mezcla de biocombustible se requieren para asegurar el límite legal y proteger los derechos del consumidor.

2. RESUMEN

En el siguiente trabajo se estudio la posibilidad de emplear las redes de período largo en fibras ópticas como sensores de índice de refracción para biocombustible, orientado al análisis de pureza de biocombustibles de acuerdo a la legislación del Ministerio de Minas y Transporte, como se describe en la formulación del problema y justificación.

A continuación se describe el estado del arte de las redes de período largo, las bases teóricas para su funcionamiento y los diversos métodos de fabricación. Para el proyecto se empleo la técnica de descarga de arco eléctrico y además se demostró la formación de redes de período largo por inducción magneto – mecánico; que permite sintonizar, borrar y reconfigurar la respuesta espectral de una red de período largo, ajustando tanto el período de la red como la intensidad del campo magnético.

En el capítulo 5 se detalla el desarrollo experimental del proyecto; la fabricación e interrogación de las redes para la implementar en la medición de muestras de biocombustible en diversas concentraciones de alcohol carburante y disolventes comerciales más comunes empleados en la adulteración del combustible: varsol y tiner.

En el capítulo 6 se exponen los resultados de las mediciones, la sensibilidad del dispositivo para el objetivo del proyecto. Por último se presentan las conclusiones y perspectivas del proyecto.

3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La introducción de combustibles renovables en la canasta energética nacional, se orienta a mejorar la calidad del aire, al tiempo que se hace un mejor uso de los recursos naturales renovables, generando un amplio estímulo al desarrollo del campo y reduciendo emisiones de gases de efecto invernadero. Esto genera la expansión de producción de bioetanol anhidro que se mezclara con la gasolina produciéndose un nuevo carburante para el país. Para garantizar la concentración de la mezcla, las terminales de los distribuidores mayoristas están diseñadas para realizar las mezclas, de acuerdo con lo establecido por el Ministerio de Minas y Energía, empleando análisis químico.

Actualmente en la distribución en las estaciones de servicio, no existe un mecanismo in situ para continuar la garantía de la concentración del carburante, lo cual facilita la alteración de los hidrocarburos con solventes de bajo costo. El problema de control de calidad para hidrocarburos radica en que las técnicas y procesos de análisis químico hasta hoy desarrollados no se pueden implementar directamente en las estaciones de servicio porque estas prácticas no ofrecen seguridad en un ambiente explosivo, detección remota, control en tiempo real, y son de técnicas de carácter destructivo, por lo tanto alteran la estabilidad en la medición.

El mundo de los sensores de fibra óptica está ligado a la industria de las comunicaciones y a la opto-electrónica, mostrando mejor desempeño que los sensores convencionales electrónicos y electro-mecánicos. Muchas de estas ventajas provienen del hecho de que

las fibras están hechas de vidrio (material no conductor), y a que los fotones, no los electrones, son utilizados como el elemento de propagación de señales, lo que ha llamado la atención en los últimos años para aplicaciones en sistemas de supervisión y control de procesos productivos, bioquímica y petroquímica; particularmente en este último sector son ideales por la necesidad de detección en ambientes corrosivos y peligrosos.

Colombia entra en la era de los combustibles limpios, de producción sostenible y respetuosa del medio ambiente. La Ley 693 de septiembre de 2001 obliga el uso de etanol en las gasolinas que se utilicen en las principales ciudades del país. Este hecho conlleva, no solamente a que se tenga un nuevo eslabón en la cadena productiva de los combustibles vehiculares, sino que además a que se asuman nuevos desafíos en términos del control de calidad de los mismos, dado que la mezcla con alcohol carburante es susceptible de alterarse fácilmente con otros alcoholes o hidro-químicos no autorizados para tal fin, debido en gran parte al relativo acceso que se tiene de ellos en el país. Esta preocupación es válida si se tiene en cuenta experiencias de otros países como Brasil, con más de una década de implantación de los bio-combustibles vehiculares en su territorio.

El interés de este proyecto radica en desarrollar un sistema óptico, altamente estable y portátil para el control de calidad de hidrocarburos en Colombia, atendiendo estándares de seguridad al obviar el uso de señales eléctricas que puedan aumentar el peligro de una explosión. Avances en esta materia son importantes, principalmente por la aparición de los bio-combustibles en el país, que exigen un mayor control de calidad debido a que al contener componentes oxigenantes como el etanol carburante, la mezcla debe estar en

la cantidad y calidad que establezca el Ministerio de Minas y Energía, de acuerdo con la reglamentación sobre control de emisiones derivadas del uso de este combustible, y los requerimientos de saneamiento ambiental que para cada región del país establezca el Ministerio del Medio Ambiente.

Para lograr este objetivo se quiere trabajar con un nuevo componente de la óptica como lo son las redes de difracción de período largo grabadas en fibras ópticas (LPFG, por su sigla en inglés). Este componente, junto con la redes de Bragg en fibras (FBG, por su sigla en inglés), están revolucionando la manera de procesar la luz, que en los últimos años se han convertido en elementos fundamentales de esta tecnología.

Con el empleo de la fibra óptica, se quieren aprovechar las ventajas de seguridad que ofrecen, además:

1. Los sensores basados en esta tecnología pueden ser interconectados fácilmente por telemetría y, por lo tanto, realizar la detección remota, localizando la electrónica de control para los LED/láseres y los detectores lejos de la cabeza del sensor y quedando, por lo tanto, siempre accesible para reparar/actualizar.
2. Su ancho de banda espectral es grande y por lo tanto se tiene la posibilidad de multiplexar una gran cantidad de sensores puntuales en una sola fibra.
3. Se tiene la posibilidad de hacer control de calidad de los combustibles en tiempo real, lo que se constituye en una ventaja frente a las técnicas químicas que son *a posteriori*.

Dadas las ventajas ya expuestas, es de gran interés investigar sobre sensores de fibra óptica basados en LPFGs, por las diversas aplicaciones en relación con las industrias de alto riesgo como es el caso de la industria química y petrolera. Además estos sensores pueden medir magnitudes físicas como temperatura, presión, nivel de líquidos, campos magnéticos y eléctricos, tensión mecánica; también magnitudes químicas y bioquímicas como detección y concentración de especies químicas, pH.

Este trabajo de investigación apunta a atender esta problemática, en donde además de propender por hacer desarrollos propios, clave en un mundo globalizado, se trabajará con componentes de avanzada tecnología en fibra óptica, por lo que se espera que el sensor sea seguro, pequeño, de bajo peso e inmune a interferencias electromagnéticas.

El trabajo de investigación se realizó en el Grupo de Fotónica y Optoelectrónica de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, en el que se han desarrollado prototipos de sensores individuales a fibra y en la actualidad cuenta con el conocimiento para el desarrollo de técnicas en este campo, siendo el único grupo de investigación a nivel nacional que tiene como objeto de estudio la fibra óptica. La participación en el proyecto se realizó como estudiante investigadora invitada y representando al Grupo de Óptica y Láser de la Universidad del Cauca.

4. MARCO REFERENCIAL

Las fibras ópticas tienen su mayor campo de aplicación en las telecomunicaciones. Su capacidad para transmitir datos de cualquier clase a altas velocidades y bajas pérdidas ha extendido su uso por todo el mundo. Pero hoy, estas mismas capacidades se han ampliado en áreas tales como la instrumentación, donde se utilizan para medir variables físicas. Hay muchos parámetros físicos, químicos y biológicos que se pueden detectar con fibras ópticas. Las ventajas de los sensores de fibra óptica resuelven muchos de los inconvenientes presentados por los dispositivos basados en tecnologías tradicionales. Una de las características que destaca a la fibra óptica, son sus propiedades dieléctricas, lo que impide que en caso de ruptura se generen chispas o cortos circuitos. Los sensores de fibra óptica presentan tal característica requerida para determinar la calidad de hidrocarburos, además de muchas otras que son de interés como por ejemplo, la inmunidad a interferencia electromagnética, alta sensibilidad, peso reducido, volumen pequeño, alta temperatura de fusión, y baja atenuación, inmunidad a la interferencia electromagnética, posibilidad de sensado remoto, multi-canalización y reporte en tiempo real de los datos. Estas propiedades hacen de los sensores de fibra óptica instrumentos muy seguros para industrias que manejan sustancias explosivas. De esta manera, los sensores ópticos pueden resultar seguros, pequeños, de bajo peso, y dispositivos a distancia [1].

Las redes de Bragg de fibra (FBG) y las redes de período largo (LPFG) son dispositivos basados en redes y ejemplos de este tipo de sensores que suministran estas capacidades.

La sensibilidad de la LPFG frente a diversos solventes del hidrocarburo precisa el uso de este tipo de redes ópticas para determinar las concentraciones del hidrocarburo cuando se mezclan dos diversos solventes.

4.1 Redes de Periodo Largo en Fibra

4.1.1 Estado del arte

Las redes de período largo (LPFGs) se definen como una perturbación periódica del índice de refracción del núcleo de las fibras ópticas. Son dispositivos foto, elasto o electro inducidos de fibra óptica, que acoplan luz de ciertas longitudes de onda desde el núcleo a la región del revestimiento de la fibra óptica, produciendo bandas de atenuación en el espectro de transmisión de la señal que se propaga por su estructura como se esquematiza en la Fig. 1 [2].

Una característica extraordinaria que presentan es que su respuesta espectral depende fuertemente del índice de refracción del medio que circunda a la fibra, causada por la influencia que tiene dicho índice de refracción en los modos de propagación del revestimiento. Este hecho se aprovecha para usar las LPFGs como sensores de índice de refracción, determinando los pequeños desplazamiento de una, o varias, bandas de atenuación en su espectro de transmisión.

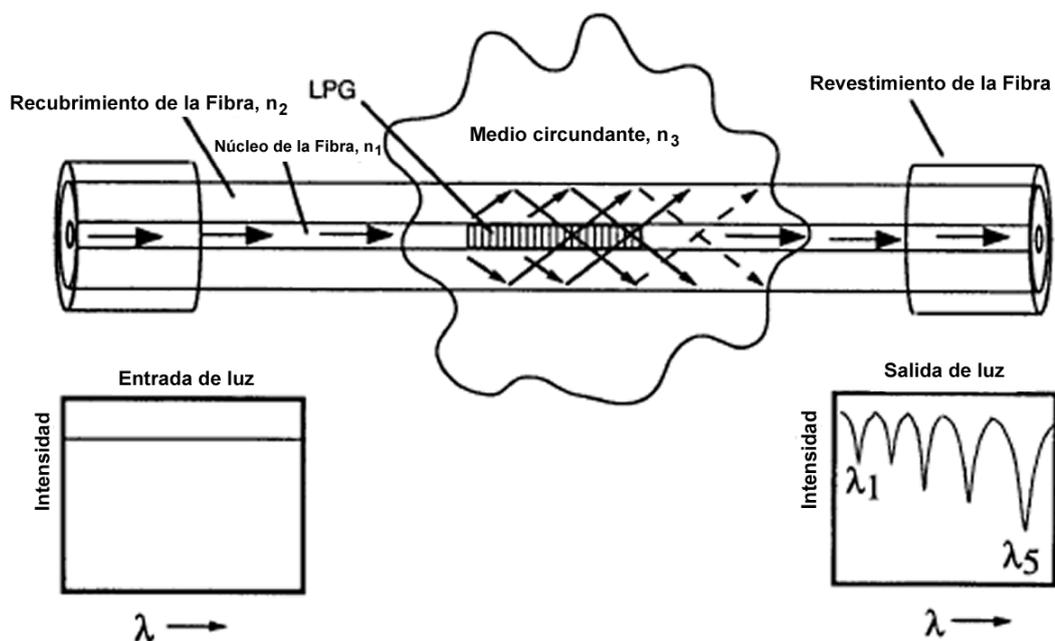


Fig. 1. Esquema de una red de difracción de periodo largo grabada en el núcleo de una fibra óptica (LPFG). La LPFG acopla luz desde el núcleo hacia el revestimiento de la fibra para ciertas longitudes de onda λ_i , las cuales dependen de n_3 .

Desde 2001 se han reportado sensores basados en LPFGs para determinar la concentración de compuestos químicos, pero estos se han elaborado con técnica de radiación ultravioleta (UV). Algunos reportes, por ejemplo, muestran que el corrimiento en la respuesta espectral de una LPFG puede ser del orden de 100 nm cuando se varía el índice de refracción del medio circundante entre $n = 1$ y $n = 1.45$ [3-7]. De igual manera se ha investigado la respuesta espectral de una de las bandas de atenuación de una LPFG para índices externos de $n = 1$ a $n = 1.72$ como en la Fig. 2 [8], en donde por primera vez el índice de refracción del medio circundante es mayor que el del revestimiento de la fibra, probando el uso de una LPFG como sensor de concentración. Los cálculos se realizaron con índices externos, $n_3(\lambda_i)$, con valores nominales de $n_3 = 1$ (aire), $n_3 = 1.33$ (agua), $n_3 = 1.40, 1.41, 1.42, 1.43$ y 1.44 (índices de aceites), con una red de período 275 μm .

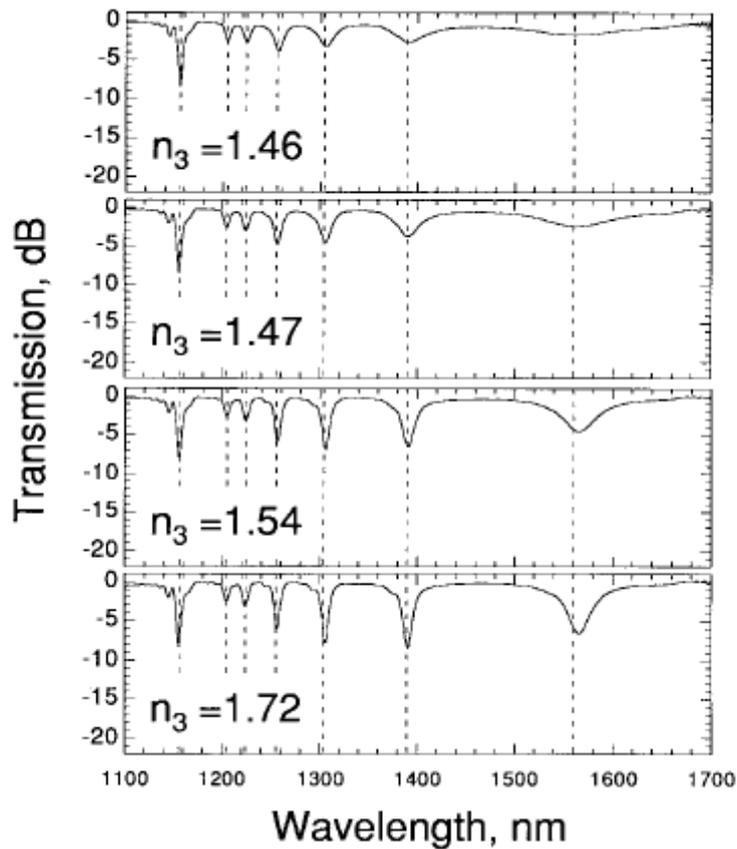


Fig. 2. Espectro de transmisión del ancho de banda de una LPFG de $\Lambda = 275 \mu\text{m}$ para n_3 que se extiende de $n_3 = 1.46$ a $n_3 = 1.72$. Las líneas punteadas indican longitudes de onda de la banda de atenuación en $n_3 = 1$.

Para aplicaciones en bio-química y medio ambiente, son deseables grandes corrimientos de las longitudes de onda de las bandas de atenuación de las LPFGs, λ_i , con n_3 para alcanzar una alta sensibilidad. Se ha encontrado que en la longitud de onda más larga, las bandas de atenuación de orden más alto es la más sensible a n_3 , y que los mayores cambios en λ_i ocurren a medida que n_3 se acerca al índice de refracción del revestimiento.

De otro lado, los corrimientos de las bandas de atenuación de una LPFG son altamente dependientes en el período de la red. Para un índice de refracción n_3 menor al del revestimiento de la fibra, la sensibilidad relativa de las bandas de atenuación se puede

predecir usando el modelo del perfil de índice de paso para calcular tanto los modos del núcleo como del revestimiento; esto permite diseñar LPFGs para usos específicos.

Una red de período largo de fibra se puede diseñar con sus bandas de atenuación cercanas a la longitud de onda $\lambda = 1550$ nm como sensor de concentración de algunos compuestos químicos [8].

Dado que el parámetro a medir cuando se usa una LPFG como transductor es el corrimiento espectral que sufren las bandas de atenuación de su espectro de transmisión, estos sensores son auto-referenciados (la longitud de onda es un parámetro absoluto), eliminándose los problemas de amplitud o de variaciones de intensidad que afecta a los otros tipos de sensores a fibra óptica [9]. Por sus bandas de atenuación estrechas, varias LPFGs pueden ser grabadas en una misma fibra sin que perturbe el desempeño de la otra, lo que permite el desarrollo de sensores ópticos distribuidos. Todas estas características han hecho que en los últimos años, este componente junto con las FBG, sean objeto de intensas investigaciones en muchos laboratorios alrededor del mundo.

Algunas aplicaciones de mayor impacto de las LPFGs son, por ejemplo, como filtro de rechazo en amplificadores Raman conectados en cascada [10], para la supresión de la emisión espontánea amplificada y la ecualización de ganancia en amplificadores de fibra dopada con erbio. También se han utilizado en la compensación de dispersión [11], como convertidor de modos de propagación en fibras [12-13] y en las aplicaciones en sensor de fibra óptica [3, 14, 15].

4.1.2 Marco Teórico

Las LPFGs fueron introducidas por Vengsarkar en 1995 [16], exponiendo una pequeña región de una fibra monomodo a un patrón periódico de radiación UV mediante una máscara de fase de período largo. Posteriormente se descubrió que este cambio permanente periódico del índice de la fibra también se puede inducir por descarga de arco eléctrico. Una LPG típica tiene un período Λ entre 100-500 μm , una longitud de 1 a 3 cm., y un índice de modulación de profundidad de 10^{-4} o mayor.

En la fibra, el índice del núcleo es n_1 , el índice del revestimiento es n_2 , y el índice del material circundante, el cual puede ser aire o líquido, n_3 , ver Fig. 1. Los acoples de luz en la LPFG desde el núcleo de la fibra hacia los modos del revestimiento ocurren en bandas centradas a la longitud de onda λ_i .

Para el caso de los modos propagantes de núcleo y del revestimiento, es decir, $n_3 < n_2 < n_1$, la longitud de onda central λ_i de las bandas de atenuación es dada por la ecuación:

$$[n_{core}(\lambda) - n_{clad}(\lambda)]\Lambda = \lambda_i, \quad (1)$$

donde $n_{core}(\lambda_i)$ es el índice de refracción efectivo del modo del núcleo ($n_2 < n_{core} < n_1$), $n_{clad}^{(i)}(\lambda_i)$ es el índice de refracción efectivo del i -ésimo modo del revestimiento ($n_3 < n_{clad} < n_2$), y Λ es el período de la red [16]. El modo del núcleo de una fibra monomodo es el LP₀₁ (modo de propagación fundamental) y su índice de refracción efectivo del núcleo n_{core} es determinado solamente por n_1 y n_2 ; es decir, es insensible a

n_3 . El índice efectivo de los modos del revestimiento, sin embargo es determinado por la diferencia entre n_2 y n_3 , llevando a cambios en el acople de longitud de onda λ_i con el índice externo. En general n_1 , n_2 y n_3 dependen de la longitud de onda.

Para determinar las longitudes de onda de acoplamiento λ_i , $n_{core}(\lambda)$ se calcula usando $n_1(\lambda)$ y $n_2(\lambda)$ en la ecuación de Helmholtz, mientras que $n_{clad}^{(i)}(\lambda)$ se calcula de $n_2(\lambda)$ y $n_3(\lambda)$; luego, (1) se resuelve para λ_i como una función de Λ . Para predecir la dependencia de λ_i con n_3 , el índice efectivo de núcleo y los modos del revestimiento son calculados usando la aproximación de perfil de índice de refracción paso [8].

La interacción del modo de propagación en la fibra óptica ocurre con un modo del revestimiento, que es afectado fuertemente por las imperfecciones de la fibra, las micro y macro curvaturas, y por la condición en la interfase revestimiento-medio externo. Así, la luz acoplada del modo del núcleo se escapa fuera de la fibra, no siendo registradas por el detector, produciendo cambios que se observan en el espectro de transmisión como pérdidas (depressiones).

Si el parámetro que se mide afecta cualquiera de los tres términos del lado derecho en la ecuación (1), éste conducirá a cambios en la longitud de onda central de las bandas de atenuación (depressiones) en el espectro de la transmisión de la LPFG.

Chiang [17] da una expresión analítica para describir el cambio en la longitud de onda central de las bandas de atenuación de una LPFG en respuesta al adelgazamiento del revestimiento de la fibra o a los cambios en el índice de refracción del ambiente externo.

Así, para los cambios en el índice de refracción externo de n_{ex0} al n_{ex} , el cambio de la longitud de onda $\delta\lambda_0$ es :

$$\delta\lambda_0 = \frac{u_\infty^2 \lambda_0^3 \Lambda}{8\pi^3 n_{clad} \rho^3} \left[\frac{1}{(n_{clad}^2 - n_{ex0}^2)^{1/2}} - \frac{1}{(n_{clad}^2 - n_{ex}^2)^{1/2}} \right], \quad (2)$$

donde u_∞ es la m-ésima raíz de la función de Bessel J_0 [18], λ_0 es la longitud de onda de resonancia en n_{ex0} , Λ es período de la red, y ρ es el radio del revestimiento. La ecuación (2) muestra que el funcionamiento de la LPFG y su operación son dependientes en el orden del modo del revestimiento, resultando en una sensibilidad mayor en tanto u_∞ aumenta [17], [19]

Para una LPFG, la pequeña diferencia entre los vectores de la onda co-propagantes requiere períodos espaciales más largos en la modulación del índice. Para una periodicidad de red Λ , la condición es:

$$\beta_{core} - \beta_{clad}^m = \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (3)$$

donde β_{core} y β_{clad}^m son, respectivamente, las constantes de propagación del modo del núcleo y el m-ésimo orden del modo del revestimiento [20].

4.2 Fabricación de LPFGs

4.2.1 Técnicas de Fabricación

Una técnica de fabricación de LPFGs emplea un láser UV, que aprovecha la fotosensibilidad del núcleo de la fibra; este es el método más común para grabar esta componente. Sin embargo, aunque la fabricación de redes basada con radiación UV es ampliamente conocida, tiene defectos [21].

Las primeras redes fueron escritas exponiendo una fibra dopada con germanio a la radiación ultravioleta (UV) de un láser de KrF a través de una máscara de fase. Este método necesita fibras fotosensibles con un alto nivel del dopado de germanio. Se han sugerido varias maneras de mejorar la fotosensibilidad [22, 23]: codopando la fibra con elementos fotosensibles, hidrogenación, recocido térmico, y la exposición de la fibra a radiación láser de CO₂ [24] o radiación γ [25]. La hidrogenación de la fibra es una manera excelente de aumentar la fotosensibilidad, aunque requiere un tratamiento térmico y una posterior re-irradiación UV con el fin de restaurar la posición de los picos de atenuación debido a la difusión del hidrógeno; además, el hidrógeno en la fibra acelera de los cambios de decaimiento del índice de refracción inducidos por la radiación UV [26,27]. La inscripción de redes por radiación UV también requiere equipo láser costoso. Otra dificultad con la fabricación UV es que altera el cambio de la longitud de onda resonante con el aumento de fuerza de red. La longitud de onda resonante depende no solamente del período de la red, también del cambio UV-inducido del índice en el núcleo de la fibra [15].

Recientemente se han publicado varios métodos de fabricación de LPFGs sin UV. Entre ellos, la deformación física de la fibra por efecto elasto-óptico [28], la difusión de los dopantes del núcleo en especial las fibras libres de Ge dopadas con nitrógeno [29, 13], o la variación del índice de refracción producida por láser de CO₂ [30, 31], láser CO [29], láser infrarrojo [32], implantación de iones [33], ó descargas eléctricas [29, 34, 35, 36]. En la referencia [37], se reportan redes fabricadas usando un arco eléctrico aplicando tensión lateral a una fibra estándar de telecomunicación.

Las LPFGs escritas por calentamiento local periódico de la fibra con radiación láser CO₂ [38, 39] ó CO han mostrado estabilidad térmica muy alta. En el proceso de la inscripción de la red por descargas del arco eléctrico, también ocurre el calentamiento local de la fibra. Los métodos de la fabricación que implican un arco eléctrico son atractivos, pues, son simples, flexibles, no necesita equipos costosos y se pueden escribir LPFG en cualquier tipo de fibra óptica

4.2.2 Fabricación por Descarga de Arco Eléctrico

Aunque se han divulgado características básicas de la transmisión de LPFG inducida por arco eléctrico, no se han investigado completamente su potencial y las limitaciones en usos prácticos. Es necesario conocer las características de funcionamiento de LPFG usando una descarga de arco de alta frecuencia en una fibra estándar de telecomunicación [15].

Para la fabricación de una LPG se utiliza una técnica similar a la descrita en [16] y que se esquematiza en la Fig. 3. Una fibra descubierta, sin su capa protectora se inserta, por

ejemplo, entre los electrodos de una máquina de empalme comercial. Un peso pequeño se suspende en una de las extremidades de la fibra para mantener una tensión longitudinal constante. La otra extremidad de la fibra se monta en una etapa de posicionamiento que es controlada desde el computador. Se aplica un arco eléctrico con la máquina empalmadora, usando una corriente adecuada y ajustes del tiempo de duración. Después de la descarga, la fibra se mueve con el período requerido de la red, antes de que se aplique otro arco.

Después de que un número conveniente de descargas punto a punto, un patrón periódico se graba en el perfil del índice de refracción de la fibra, debido al proceso activo de calentamiento. Es requerido durante el proceso de la escritura un Analizador de Espectros Ópticos (OSA, por su sigla en inglés) para monitorear el espectro de la transmisión a través de la fibra. Cuando el espectro medido muestra características convenientes al interés de la aplicación, se interrumpe el proceso. Generalmente son necesarios 40- 70 puntos para formar una red para el sensor de concentración. La ventaja de usar el arco eléctrico es que no se requiere ninguna fibra especial (hidrogenada o presensibilizada). Además, las máquinas que empalman son muy comunes en laboratorios de la fibra óptica. [15]

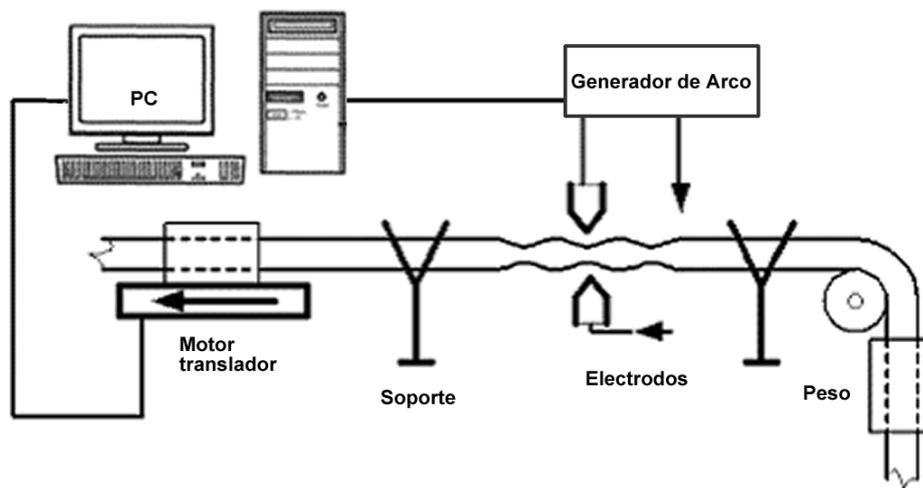


Fig.3. Esquema de fabricación de LPFGs por descarga de arco

4.3 Sensores de LPFG para Monitorear la Calidad de Hidrocarburos

Hay dos tipos principales de dispositivos ópticos de fibra que se puedan utilizar como sensores de la fibra: la red de Bragg de fibra (FBG) [40] y la red de período largo (LPFG) [16]; ambas son producidas por un cambio periódico del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica. Aunque ambos tipos de red se podrían utilizar para la detección de hidrocarburos, la primera será sensible solamente si el revestimiento de la fibra se reduce para permitir el acceso al campo evanescente. Este procedimiento hace que la FBG sea un dispositivo muy frágil y el direccionamiento rompe fácilmente la red. La LPFG acopla la luz desde el núcleo a los modos del revestimiento, que son muy sensibles a los cambios del índice de refracción del ambiente externo [16, 8]. Esta característica permite su uso sin el ataque del revestimiento, afectando drásticamente las propiedades mecánicas de la fibra, siendo más atractiva que la FBG para el propósito de detección.

La sensibilidad de la LPFG frente a diversos solventes del hidrocarburo precisa el uso de este tipo de redes ópticas para determinar las concentraciones del hidrocarburo cuando se mezclan dos diversos solventes. [41]

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1 Fabricación de Redes de Periodo Largo de Fibra - LPFG

Para la elaboración de redes de período largo en fibra óptica se construyó un sistema para desplazar la fibra óptica y con la técnica de descarga de arco eléctrico se realizó la inscripción de las LPFGs.

El diseño implementado para el microdesplazamiento de la fibra y fabricación de LPFGs esta esquematizado en la Fig. 4.

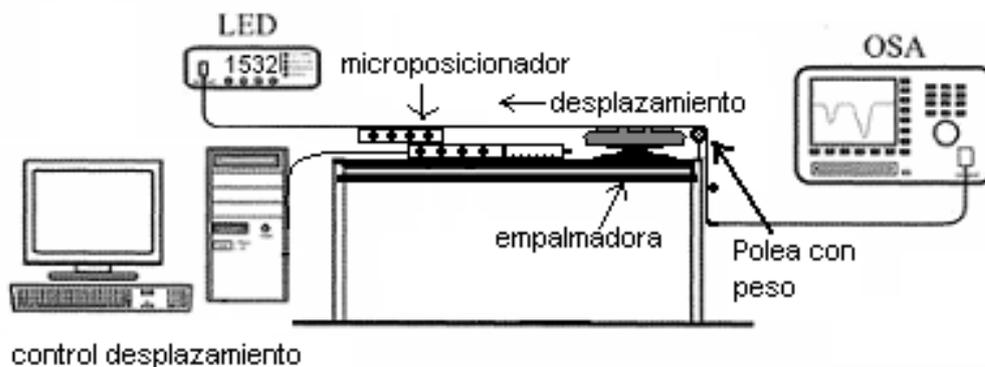


Fig.4. Esquema de montaje para fabricación de LPFGs empleando técnica de descarga con arco eléctrico

Para esta fase del proyecto se logró controlar parcialmente el proceso de inscripción por computador, con un programa diseñado en LabView se generó un control para el microposicionador a través del puerto serial del computador, ver circuito eléctrico implementado en la Fig.5 El microposicionador esta constituido por un motor paso a paso (motor de 200 pasos) conectado a un tornillo micrométrico con paso de rosca de 0.5 mm., con una escala dividida en 50 partes, el avance corresponde a $0.5/50$, es decir

0.01 mm. por cada avance o retroceso. Se elaboró una pieza que al avanzar o retroceder el tornillo trasladara en la misma distancia en micras una pequeña mesa (Referencia Newport®) empleada para este tipo de desplazamientos a través de un actuador de la misma referencia implementado para trasladar entre 0.1 y 2 micras. Observar Fig.7.

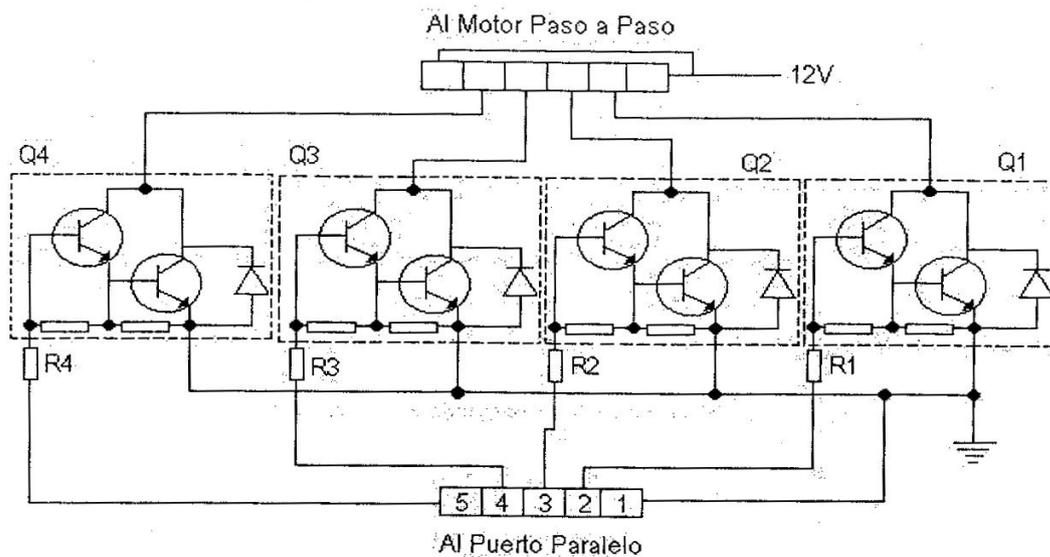


Fig.5. Diagrama esquemático del circuito para accionar el motor paso a paso por comunicación desde el puerto paralelo.

El programa para controlar el motor, se diseñó de tal manera que permitiera modificar las condiciones para la elaboración de la LPFGs, el periodo de desplazamiento, el tiempo y cantidad de paradas del motor para accionar manualmente la descarga de la empalmadora para formar la red en la fibra, como se observa en la interfaz usuario de la Fig.6. La especificación de estos parámetros tan importantes para la elaboración de la LPFG según la caracterización son las siguientes:

La periodicidad de la descarga requerida en la fibra óptica para la fuente de luz empleada se calcula de ecuación (1). Para la fuente de luz (LED) con $\lambda = 1550$ nm y las

especificaciones de la ficha técnica la fibra óptica tipo monomodo Corning® SMF 28, se obtuvo un periodo de 625 μm .

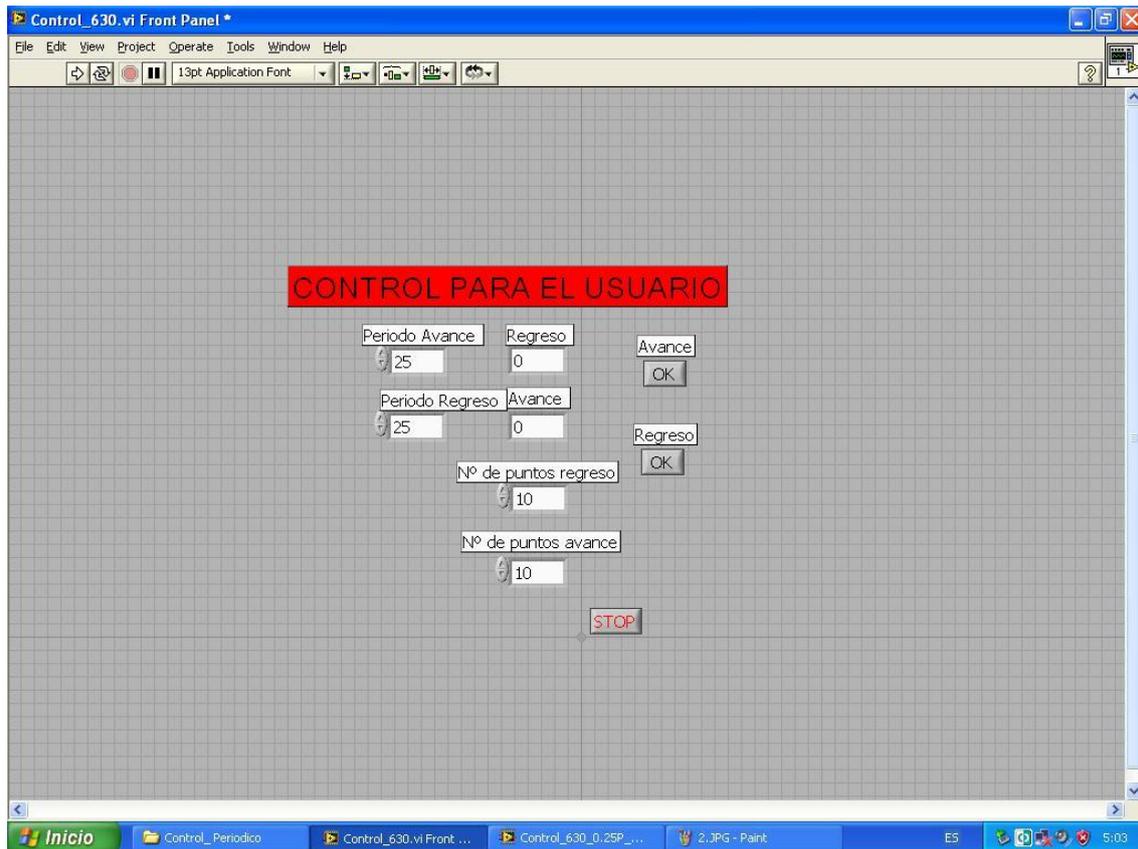


Fig.6. Imagen de la interfaz de usuario realizado en Labview para desplazar a través del puerto serial el motor paso a paso empleado en el montaje de fabricación de LPFG.

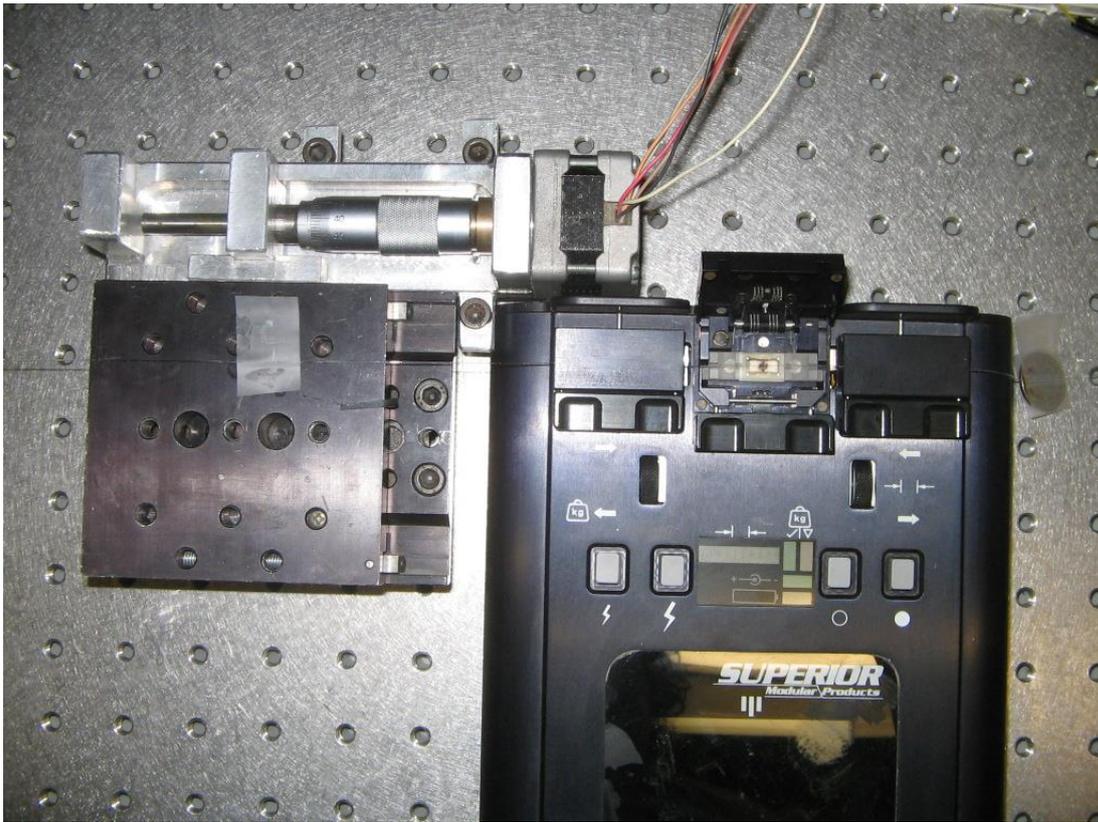


Fig.7. Imagen de montaje para fabricación de LPFGs. Izquierda: Motor paso a paso traslada tornillo micrométrico y a su vez desplaza mesa (guía en cola de Milano) que sujeta la fibra óptica. Derecha: empalmadora, genera arco eléctrico y LPFG.

La empalmadora permite la selección del tipo de descarga, controlando el tiempo de exposición de la fibra al arco eléctrico. Después de realizar diferentes pruebas se determino emplear 2 segundos para una descarga de arco eléctrico de 1mA. En cuanto para el espectro de transmisión de la red se monitoreo en tiempo real con un analizador de espectros ópticos (OSA).

En las figuras de 8 a 11 se muestran varias imágenes de la red de período largo en las que se observa la modulación de la fibra causado por la fusión con la descarga de arco eléctrico.

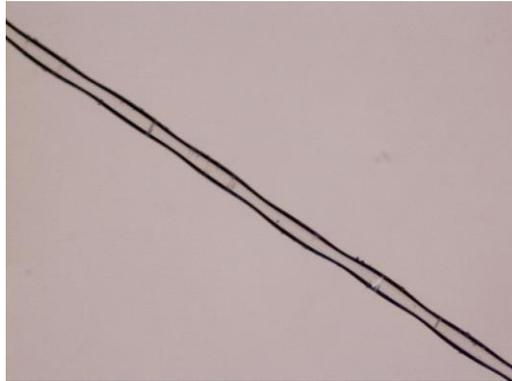


Fig.8. Imagen de LPFG fabricada empleando técnica de descarga con arco eléctrico, tomada con microscopio (aumento: 4x).

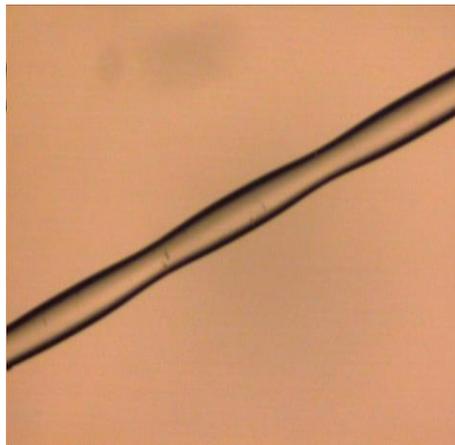


Fig.9. Imagen de LPFG fabricada empleando técnica de descarga con arco eléctrico, tomada con microscopio (ampliación: 10x).



Fig.10. Imagen de LPFG (40 puntos), tomada con estereoscopio (ampliación: 1x).

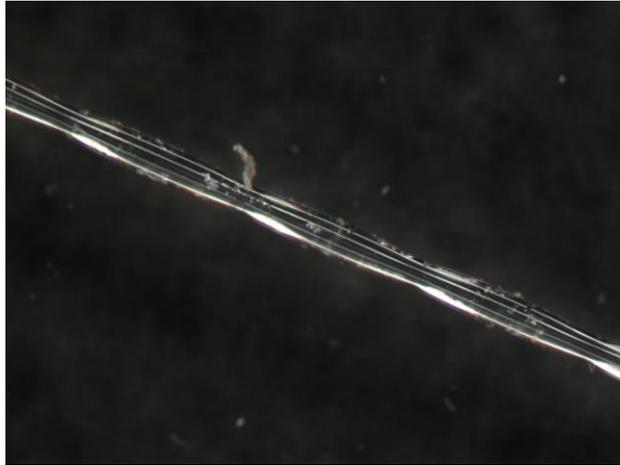


Fig.11. Imagen de LPFG (40 puntos), tomada con estereoscopio (ampliación: 3x)

Un factor importante en el momento de realizar las LPFG es mantener una tensión longitudinal constante a medida que se desplaza la fibra en la mesa de microposicionamiento, ya que esta permitirá una periodicidad fija en la red. Para este objetivo a un extremo de la empalmadora se ubico una polea para guiar la fibra mientras es desplazada por el microposicionador; fijando a la fibra un peso de 2 g. Esta misma tensión se aplicó en el montaje cuando se realizó las mediciones de biocombustible, ya que después de realizadas las descargas en la fibra, al retirar la tensión sobre la fibra, esta tiende a regresar a su estado inicial y esto se puede observar en el espectro de transmisión de la Fig. 12.

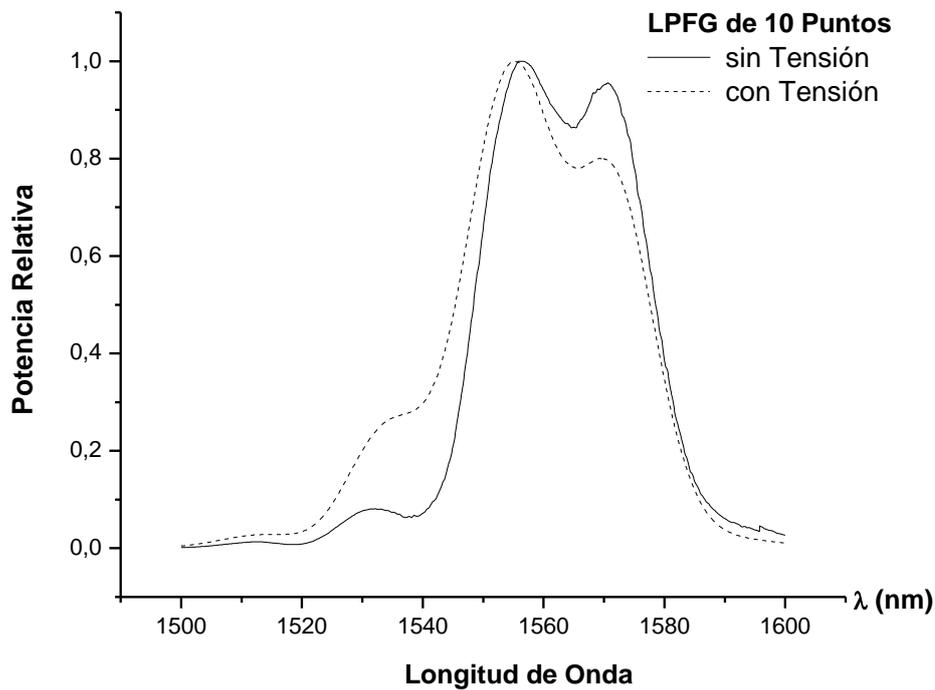


Fig.12. Medida del espectro de transmisión normalizado de una LPFG modificando la tensión.

También para demostrar la sensibilidad de la LPFG se sometió a diferentes tensiones y cambios de temperatura. El cambio de temperatura se realizó aumentando gradualmente la temperatura de agua destilada entre 16 y 59 °C, empleando un calorímetro en el que se inserto el recipiente de medición de biocombustible que contiene la LPFG, elaborada con una descarga de 1mA y 2 segundos de exposición a la descarga, con 10 puntos en su red. La medición en el cambio de temperatura se registro empleando una termocupla con un rango de medición entre -20 °C ~ 1000 °C. Con esta experiencia se confirmo la sensibilidad de la LPFG frente a la variación de temperatura del medio circundante, para establecer el control de la temperatura en el momento de realizar la medición de las muestras de biocombustible, garantizando no alterar los resultados en la calibración del sensor. Este control se efectuó manteniendo la temperatura constante en el laboratorio a

18°C, gracias al diseño del aire acondicionado empleado en el recinto, garantizó una temperatura homogénea al montaje y muestras a medir. En la experiencia se observó un incremento gradual de la longitud de onda de 0.11864 nm ~ 0.11865 nm con el aumento de la temperatura hasta 59°C. El cambio de la longitud de onda se presentó de forma grupal como se muestra en la Fig.13. Después de pasar la temperatura a 47°C la longitud de onda empieza a disminuir en la misma magnitud; 0.11864 nm ~ 0.11865 nm, también en forma grupal. Ver Fig.14. Para realizar el ajuste de los datos se tomó el cambio en la longitud de onda central de la LPFG que corresponde a la banda de atenuación entre 1556.4 nm y 1566.4 nm. Debido a que la variación de la longitud de onda central con el incremento de la temperatura no se presenta de forma constante, sino que varía por grupos que no son constantes, no fue posible determinar la sensibilidad exacta de la LPFG empleada.

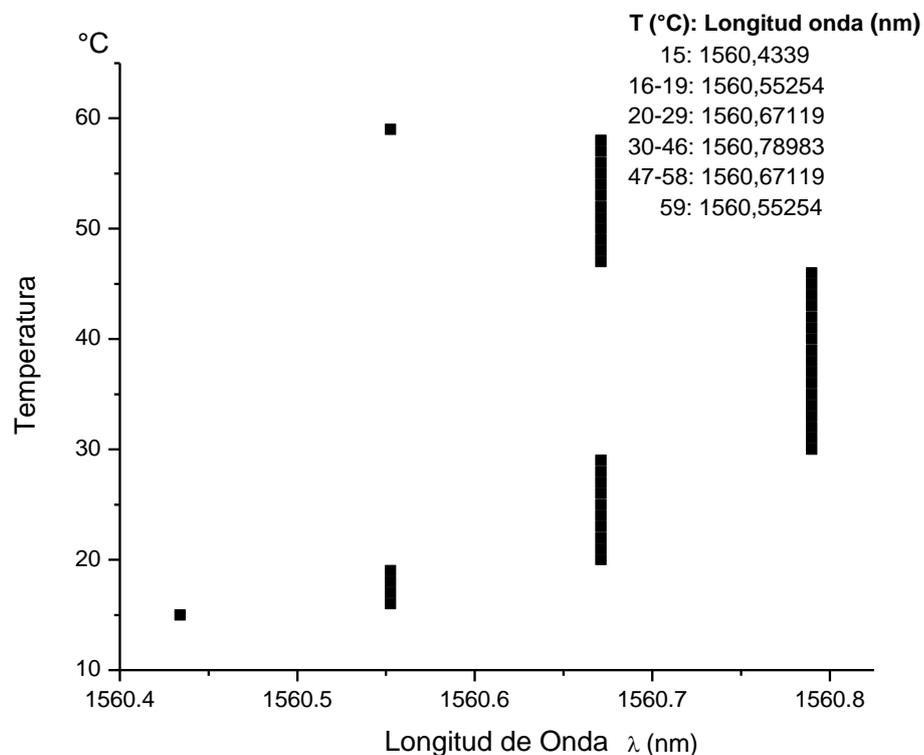


Fig.13. Temperatura Vs. Longitud de Onda para LPFG de 20 puntos.

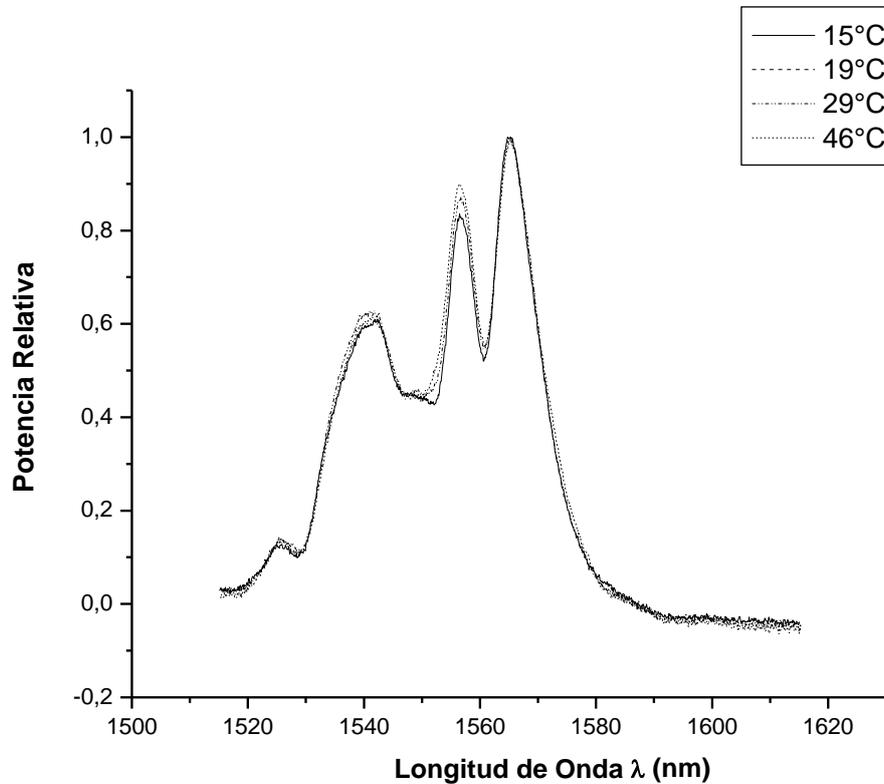


Fig.14. Medida del espectro de transmisión normalizado de LPFG frente a la variación de la temperatura.

Frente al cambio de tensión se observó un efecto similar al presentado con el aumento en la cantidad de descargas de arco eléctrico sobre la fibra, este incremento de tensión genera aumento atenuación sobre las bandas. No se tomaron espectros ya que la fragilidad causada por el desnudamiento y previa tensión de la fibra (peso adherido de 2 g), adicionar el mismo peso causaba la ruptura de la red. Para observar la variación se realizó una pequeña tensión adicional manual antes de generar la ruptura de la LPFG.

5.1.2 Redes de período largo en fibra óptica inducidas y sintonizadas magneto-mecánicamente

En esta etapa del proyecto también se analizó el espectro de transmisión de LPFG realizado con una nueva metodología para inducir y sintonizar LPFG, mediante la presión que ejercen dos imanes permanentes a una placa con un arreglo de fibras de vidrio contra una pequeña longitud de fibra óptica. Una de las ventajas de este método de fabricación es que permite sintonizar, borrar y reconfigurar la respuesta espectral de una LPFG, ajustando tanto el período de la red como la intensidad del campo magnético.

Para la demostración experimental se trabajó con la misma fuente, LED de 50 nm de ancho espectral centrado a longitud de onda $\lambda = 1530$ nm. Para esta longitud de onda, la periodicidad de la red, de acuerdo con (1), es de $\Lambda = 625.86 \mu\text{m}$. Como el diámetro de una fibra óptica desnuda es de $125 \mu\text{m}$, se hizo un arreglo adosado de estas fibras de tal manera que al retirar 4 de estas fibras en medio las que quedarán fijas se logra una periodo de $625 \mu\text{m}$ aproximadamente, muy próximo del periodo requerido. Para mayor sensibilidad de las bandas de atenuación de la LPFG se diseñaron 80 puntos de presión, con lo cual se tiene una red de 5 cm. Un ejemplo de la placa con el arreglo periódico de fibras ópticas se muestra en la Fig. 15.

El montaje experimental completo para la demostración se esquematiza Fig. 16. Una fibra estándar para telecomunicaciones, sin remover su capa protectora, se conecta al LED y, para monitorear el espectro de transmisión de la LPFG, el extremo opuesto de la

fibra va a un analizador de espectros ópticos (OSA). La fibra es fijada entre dos placas de vidrio, siendo que una de ellas contiene el arreglo periódico de 80 fibras de vidrio.

El arreglo se posiciona entre un par de imanes con los polos magnéticos opuestos para generar atracción de tal forma que presionan la fibra con el arreglo periódico de fibras de vidrio para comenzar a generar la LPFG. Sobre todo este conjunto se ubica un tercer imán con un sistema de microposicionamiento, con el polo magnético similar al del imán más próximo, generando repulsión y, por lo tanto aumentando la presión sobre la fibra. Controlando la variación de la distancia, y midiendo el campo magnético con ayuda de un gaussímetro, se tomaron los registros del cambio del espectro de transmisión de la LPFG generada. Con la decisión de mantener el recubrimiento primario de la fibra, se busca, por una parte, proteger la fibra y, por otra parte, reducir las pérdidas por microcurvaturas y tener espectros más “limpios”.

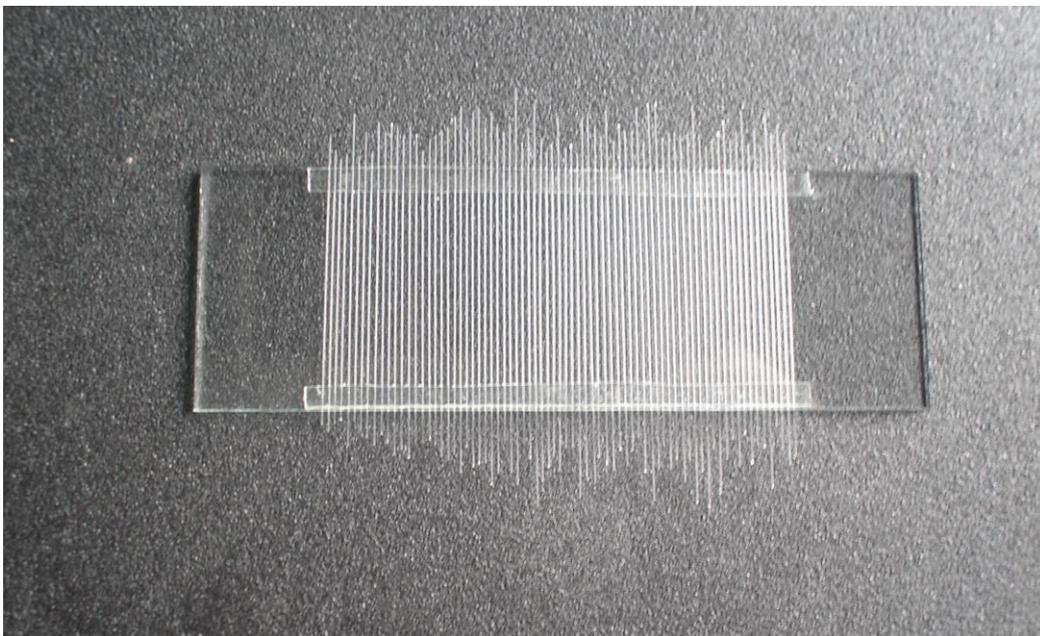


Fig.15. Patrón de inscripción de LPFGs por efecto magneto-mecánico

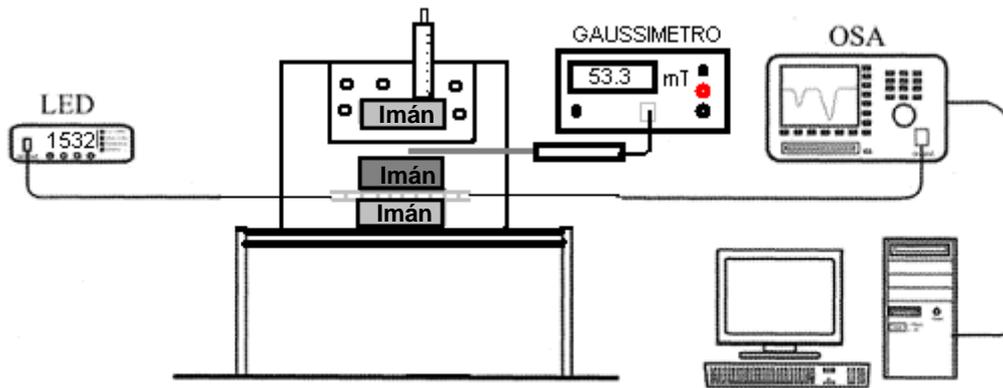


Fig.16. Montaje experimental.

Un ejemplo de sintonización de una LPFG a través del efecto magneto-mecánico se ilustra en la Fig. 17. Como se puede ver, el espectro cambia considerablemente al aumentar el campo magnético entre los imanes que presiona la fibra óptica, generando grandes modos de acople observable en el aumento de la profundidad de una de las bandas de atenuación del espectro. En la Fig. 18 se detalla la dependencia de la profundidad de las bandas de transmisión con el aumento del campo magnético. Se observa una dependencia inversa para el rango de valores de campo magnético registrado; sin embargo, si se aumenta la presión en la fibra más allá de un cierto punto, se espera que la profundidad de los bandas disminuya, dado a que para ciertos rangos de longitudes de red y de constante de acoplamiento, la función de transmisión de una LPFG es de la forma $\sin^2 c^2$ [42].

En este trabajo no se evaluó la dependencia de la LPFG con la polarización de la luz que, como ya se indicó, aparecerá con más fuerza para una señal con polarización perpendicular a la dirección de la fuerza. Es decir, en los espectros de la Fig. 17 no se

debe esperar que las bandas de transmisión sean tan profundas por el poco efecto que se tiene en las componentes del LED con polarización paralela a la dirección de la fuerza.

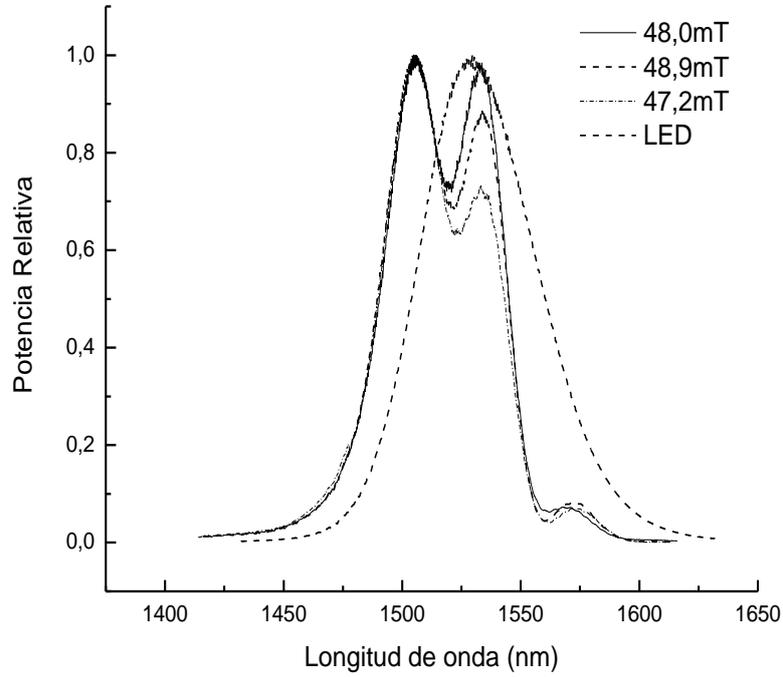


Fig.17. Medida del espectro de transmisión normalizado de una LPFG para diferentes intensidades de campo magnético, espectro del LED.

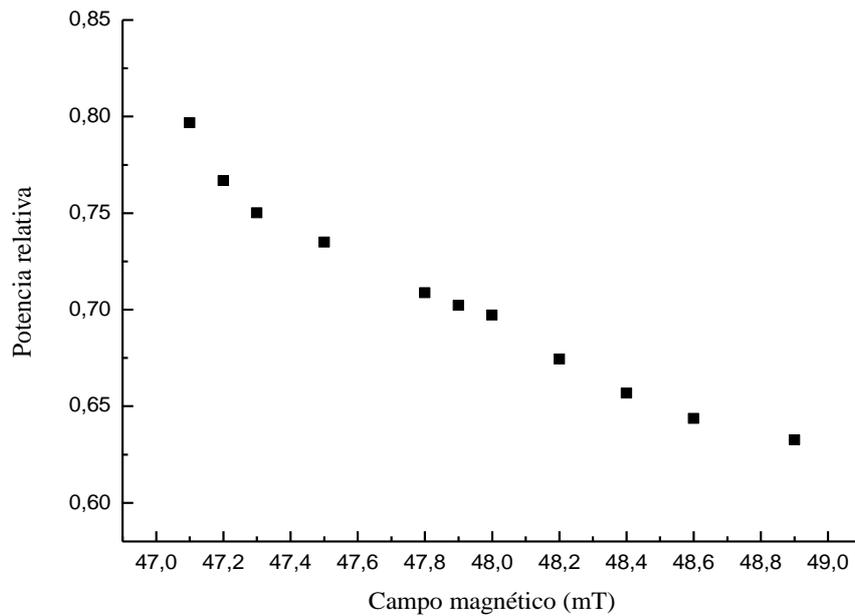


Fig.18. Potencia relativa Vs. Intensidad de campo magnético para $\lambda = 1523.23$ nm.

5.2 Interrogación de LPFG

Tomando referencias de fabricación de LPFGs, para el período y longitud de onda requerida en la medición de biocombustible, la cantidad de puntos oscilaba entre 25 y 40 puntos, trabajando con una fuente de luz blanca, es decir un ancho de banda espectral bastante amplio para detectar la atenuación en diferentes bandas del espectro. Inicialmente se diseñaron este tipo de LPFGs para realizar las mediciones de biocombustible con una lámpara halógena de tungsteno, con ancho espectral para el visible e infrarrojo cercano (VIS-NIR 360-2500 nm) utilizada en el laboratorio de cerámicos como fuente de un espectrofotómetro, diseñada para ser especialmente conectorizada a fibra óptica. Debido a la baja potencia lumínica de la lámpara se determinó emplear otro tipo de fuente para las mediciones del biocombustible. Se empleó una fuente de luz LED con $\lambda = 1550$ nm, Potencia lumínica hasta 1mW, la cuál era medida para su ajuste a través de un Optical Power Meter. En la experiencia, se obtuvieron mejores resultados con las LPFGs entre 10 y 20 puntos (en comparación a las superiores, por ejemplo las de 40 puntos), debido al ancho espectral que se maneja con la fuente LED que era monitoreado en el OSA entre 1500 nm y 1600 nm, el cual se aprovechó para determinar la cantidad de puntos requeridos, ya que entre mayor cantidad de puntos en la LPFG, mayor cantidad de bandas de atenuación, el espectro de transmisión se torna más ruidoso (las bandas no son tan definidas) y baja mucho la potencia óptica; estos son factores que afectan al momento de realizar la medición del biocombustible. El registro de la respuesta espectral de la luz transmitida acoplada al OSA se observa en la Fig. 19. Aunque estos equipos proporcionan una indicación de la longitud de onda central de la banda de atenuación en estudio, para este trabajo se

posprocesaron los datos para reducir la incertidumbre en la medida. Para ello, la posición del pico se obtiene ajustando los puntos experimentales del espectro de la red con una curva Gaussiana y considerando el valor máximo de la curva que se ajusta como el valor real.



Fig.19. Espectro de transmisión obtenido a través del OSA para LPFG de 20 puntos.

Para demostrar la variación y aumento en la banda de atenuación de la LPFG debido a la cantidad de descargas (puntos de la red de difracción), se elaboró una LPFG de 11 puntos con corriente de 1mA y tiempo de exposición de la descarga de 2 segundos.

En la Fig. 20. se observa la formación de la banda de atenuación a medida que aumentan las descargas de la empalmadora que permiten la formación de la LPFG.

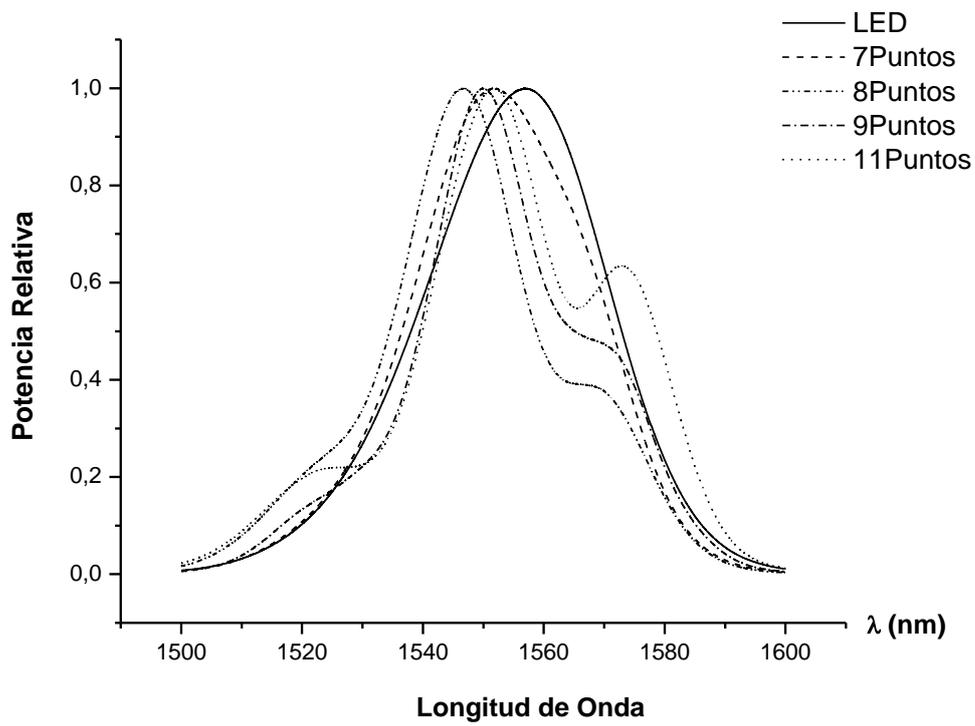
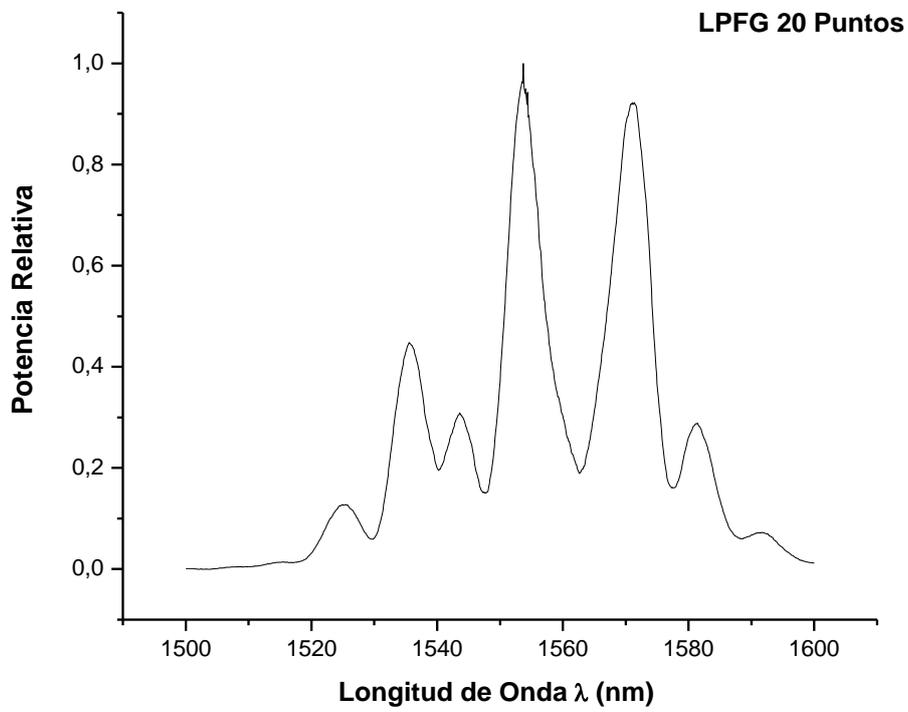
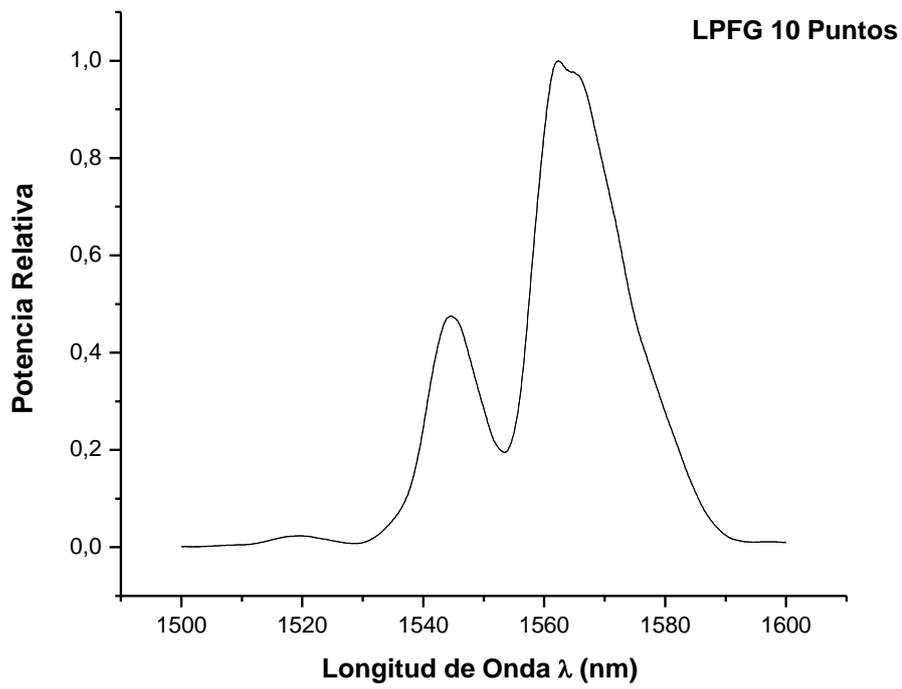
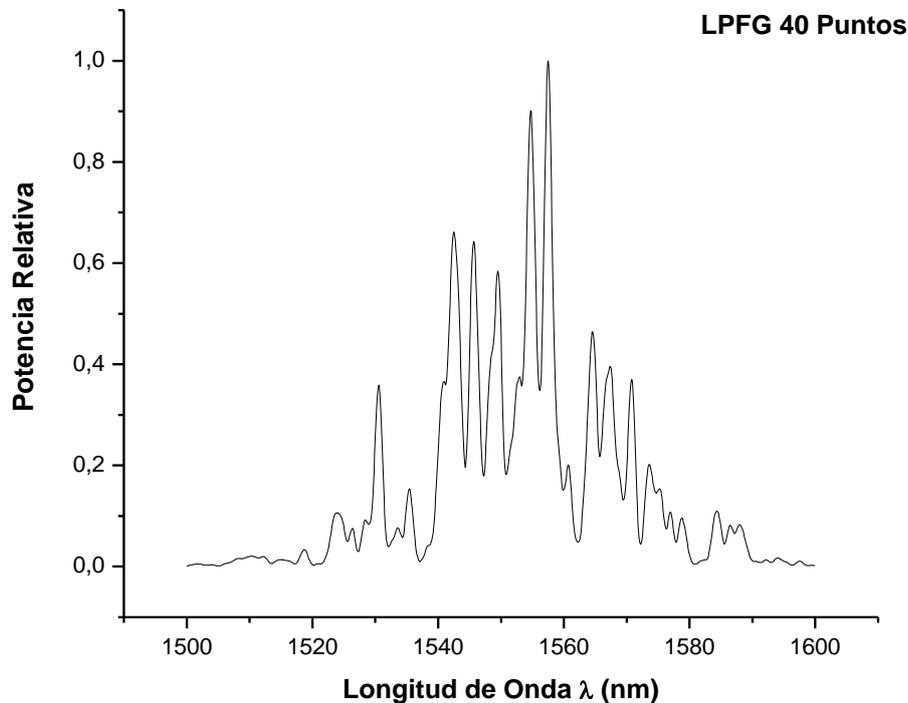


Fig.20. Evolución del espectro de transmisión normalizado de una LPFG con el aumento en descargas de arco eléctrico.

Entre mayor cantidad de puntos aparecen más bandas de atenuación en la LPFG, como se observa en las siguientes gráficas de LPFG con variedad de periodos.





Gráficas. Medida del espectro de transmisión normalizado de LPFGs con diferente cantidad en descargas de arco eléctrico.

5.3 Diseño y elaboración sistema de medición

En esta etapa del proyecto se diseñó un recipiente y el montaje experimental considerando reuniera las condiciones de estabilidad para la muestra y LPFG mientras se realizara la medición. La mezcla de biocombustible al contener alcohol, requiere un recipiente de medición hermético para evitar se volatilice. Para este objetivo se tomó un tubo en forma de U en vidrio refractario y se adiciono dos boquillas para ingresar y desalojar las muestras, las cuales se ubicaron de tal forma que no causaran vibraciones o

perturbaciones mecánicas a la LPFG en el instante de cambiar la mezcla, como se puede observar en la Fig. 21.

Las entradas principales del tubo en U fueron selladas con tapas de goma, después de insertar con ayuda de una aguja de jeringa la fibra al recipiente. En la boquilla que se introducía la muestra se fijo a la tapa una aguja a la cual se conectaba la jeringa con cada cambio de muestra a medir. En la boquilla empleada para desalojar la muestra se acondicionó un kit intravenoso para reciclar la muestra después de cada cambio.

La forma del recipiente se aprovechó para ubicar la LPFG en la curvatura del tubo, soportando la tensión generada en los extremos de la fibra. El tubo era sostenido por una pinza unida a un soporte universal atornillado en la mesa antivibratoria, también las poleas se fijaron a la mesa.

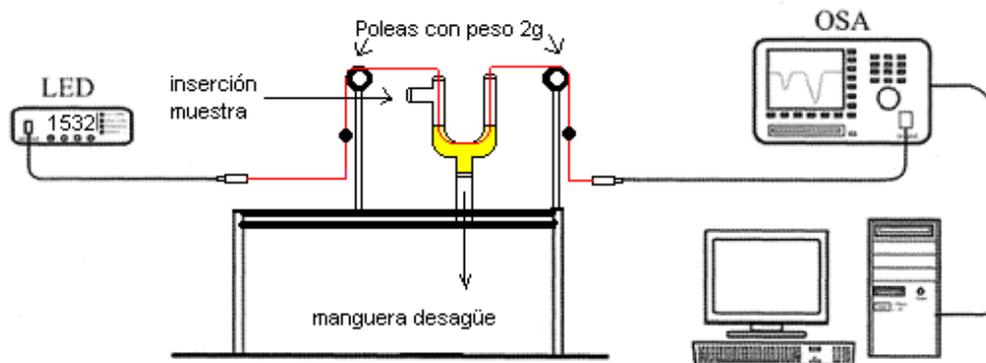


Fig.21. Montaje experimental.

5.4 Calibración del sensor basado en LPFG

Particularmente el interés en la aplicación del sensor en este proyecto es para el control de calidad de los bio-combustibles, basados en el hecho de que el índice de refracción de una mezcla de dos líquidos tiene un valor dependiendo de su concentración respectiva (partes por volumen); de esta forma se determinó la calidad del bio-combustible en base a los requerimientos establecidos por el Ministerio de Minas y Energía, que determina la proporción de alcohol carburante dentro de la mezcla debe ser de un 10%.

Para realizar las mediciones correspondientes, la LPFG se expuso a la mezcla de hidrocarburos líquidos: diferentes concentraciones de mezcla de gasolina y alcohol carburante y pequeñas proporciones de aditivos como tiner y varsol, además se realizaron las mediciones para alcohol al 96%, es decir no corresponde al grado de pureza requerido en el proceso de destilación para catalogarse como alcohol carburante. Ver Tablas No1 a No.4.

GASOLINA		ALCOHOL CARBURANTE (99,8%)	
%	ml	%	ml
80,00	24,00	20,00	6,00
82,00	24,60	18,00	5,40
84,00	25,20	16,00	4,80
86,00	25,80	14,00	4,20
88,00	26,40	12,00	3,60
90,00	27,00	10,00	3,00
92,00	27,60	8,00	2,40
94,00	28,20	6,00	1,80
96,00	28,80	4,00	1,60
98,00	29,40	2,00	0,60

Tabla No.1 Muestras de 1 a 10: Mezcla Gasolina / Alcohol 99.8%

GASOLINA		ALCOHOL (96%)	
%	ml	%	ml
80,00	24,00	20,00	6,00
82,00	24,60	18,00	5,40
84,00	25,20	16,00	4,80
86,00	25,80	14,00	4,20
88,00	26,40	12,00	3,60
90,00	27,00	10,00	3,00
92,00	27,60	8,00	2,40
94,00	28,20	6,00	1,80
96,00	28,80	4,00	1,60
98,00	29,40	2,00	0,60

Tabla No.2 Muestras de 11 a 20: Mezcla Gasolina / Alcohol 96%

GASOLINA		ALCOHOL CARBURANTE (99,8%)		TINER	
%	ml	%	ml	%	ml
84,00	25,20	8,00	2,40	8,00	2,40
86,00	25,80	7,00	2,10	7,00	2,10
88,00	26,40	6,00	1,80	6,00	1,80
90,00	27,00	5,00	1,50	5,00	1,50
92,00	27,60	4,00	1,20	4,00	1,20
94,00	28,20	3,00	0,90	3,00	0,90

Tabla No.3 Muestras de 21 a 26: Mezcla Gasolina / Alcohol 99.8% / Tiner

GASOLINA		ALCOHOL CARBURANTE (99,8%)		VARSOL	
%	ml	%	ml	%	ml
84,00	25,20	8,00	2,40	8,00	2,40
86,00	25,80	7,00	2,10	7,00	2,10
88,00	26,40	6,00	1,80	6,00	1,80
90,00	27,00	5,00	1,50	5,00	1,50
92,00	27,60	4,00	1,20	4,00	1,20
94,00	28,20	3,00	0,90	3,00	0,90

Tabla No.4 Muestras de 27 a 32: Mezcla Gasolina / Alcohol 99.8% / Varsol

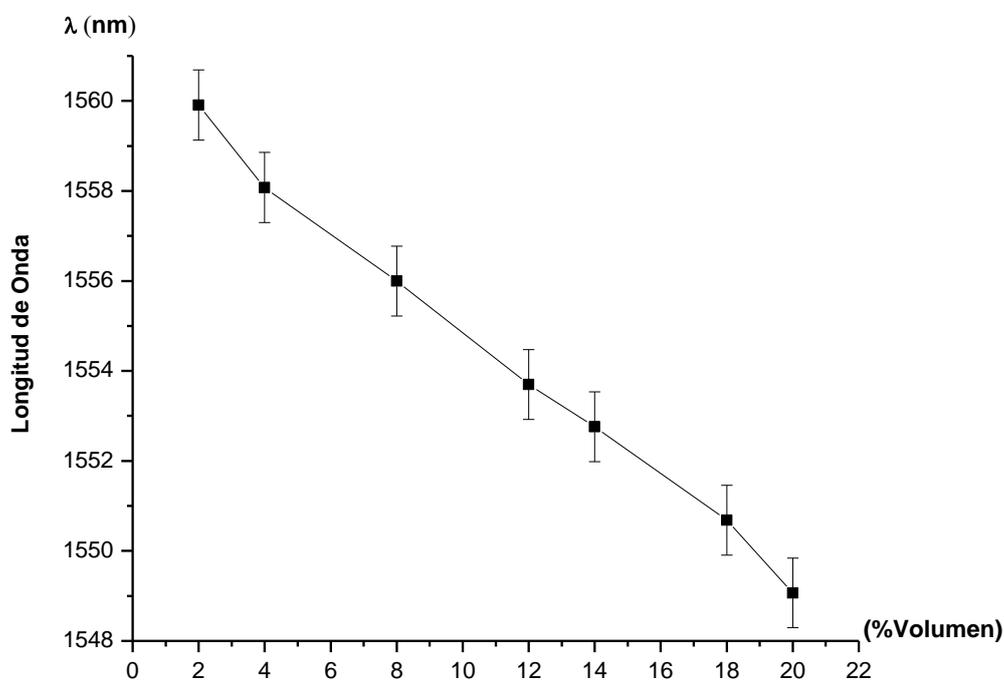
Son varios los factores que se deben mantener constantes para no alterar las medidas como se mencionó; la temperatura, tensión y vibraciones mecánicas. Debido a que la

LPFG debe permanecer en el tubo y el montaje sin realizar ningún cambio que perturbe el espectro de transmisión para la calibración del sensor, se determinó para garantizar la calidad de las mediciones de cada muestra, limpiando el recipiente con la siguiente muestra a medir de la siguiente manera: después de desalojar la última muestra medida se retiró los residuos colocando en el recipiente una misma proporción de la siguiente muestra a medir, luego desechándola y colocando la muestra a medir.

También se demostró en esta etapa del proyecto que al someter la LPFG en una muestra que no es completamente homogénea, la red no genera un espectro de transmisión definido que permita establecer las características de la muestra. Este caso ocurre por ejemplo al mezclar la biogasolina con alcohol etílico, que contiene un porcentaje de agua, causando en la mezcla la formación de dos fases en el recipiente. A pesar de que las mezclas con este tipo de alcohol se realizaron con anterioridad, y al introducir la muestra en el recipiente se espero un tiempo prudente mientras se estabilizaba esta mezcla en el recipiente; el espectro de transmisión no presento estabilidad para realizar un análisis de datos con este tipo de alcohol como aditivo para el biocombustible.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

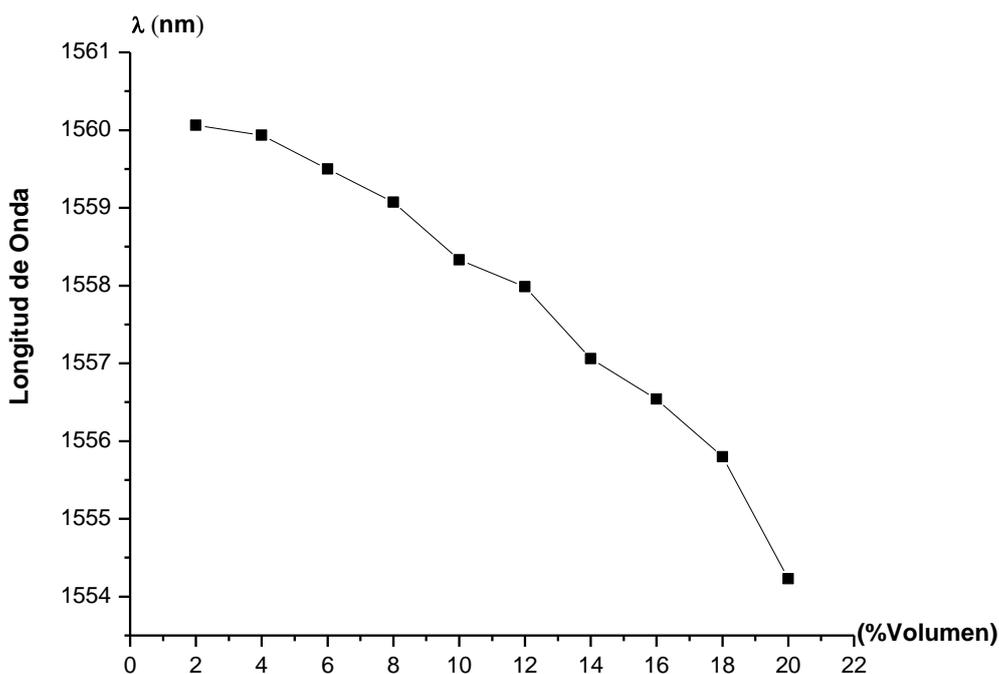
Los datos de los espectros de transmisión obtenidos al someter una LPFG de 20 puntos elaborada mediante la descarga de arco eléctrico, con corriente de 1ma y tiempo de exposición de 2 segundos, se procesaron mediante el ajuste de una curva Gaussiana para obtener la longitud de onda central de la banda de atenuación más definida de la LPFG al exponerse con la diversas muestras. Para cada muestra con una variación de concentración de alcohol carburante (99.8%), se tomo la longitud de onda central para la banda de atenuación central más representativa se encuentra entre 1544nm y 1560.4nm, como se observa en la gráfica 1.



Gráfica 1. Concentración porcentual de Alcohol Carburante (99,8% pureza) en mezcla con Gasolina

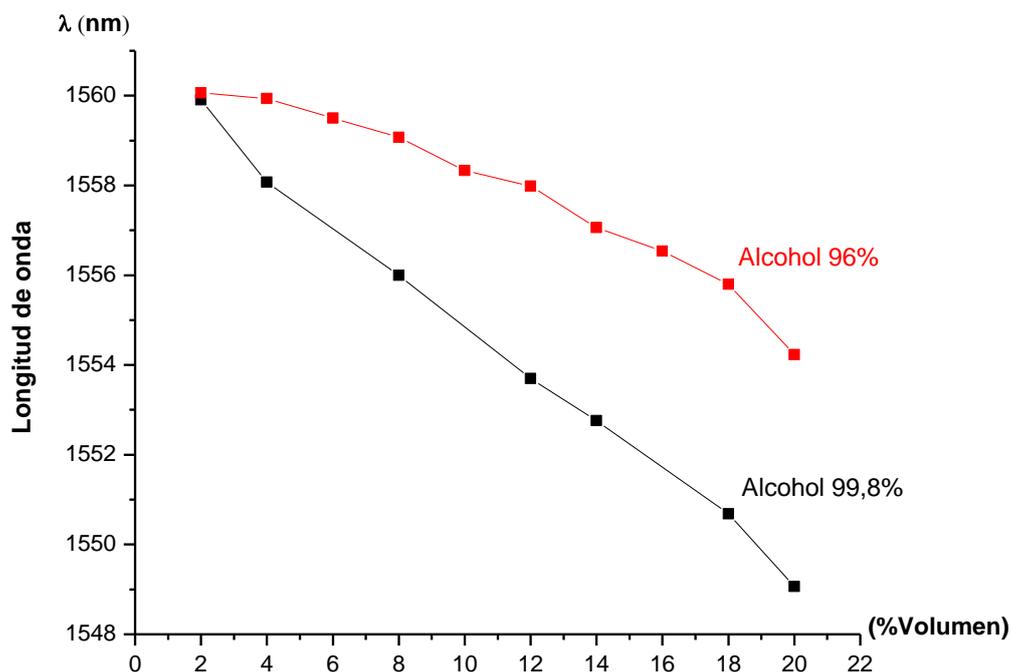
El margen de error se obtuvo al promediar los datos en tres mediciones del espectro de transmisión para cada muestra, que es aproximadamente 0.05% de la medición y corresponde a 0.0745 nm por cada nivel de concentración en la mezcla.

Para las mismas concentraciones de alcohol dentro de la muestra de biocombustible se empleo etanol al 96%, donde se registraron resultados similares a los del alcohol carburante; respecto a la disminución de la longitud de onda con aumento de la concentración. La banda de atenuación para esta muestra se localiza entre 1554 nm y 1560 nm. Gráfica 2.



Gráfica 2. Concentración porcentual de Alcohol Carburante (96% pureza) en mezcla con Gasolina

En la siguiente gráfica se muestra la sensibilidad del dispositivo frente a las concentraciones de alcohol carburante y etanol, que solo difieren en 0.3% de pureza al ser destilado. Para el etanol la longitud de onda central es mayor frente al alcohol carburante en la misma concentración de volumen en la mezcla. Gráfica 3.



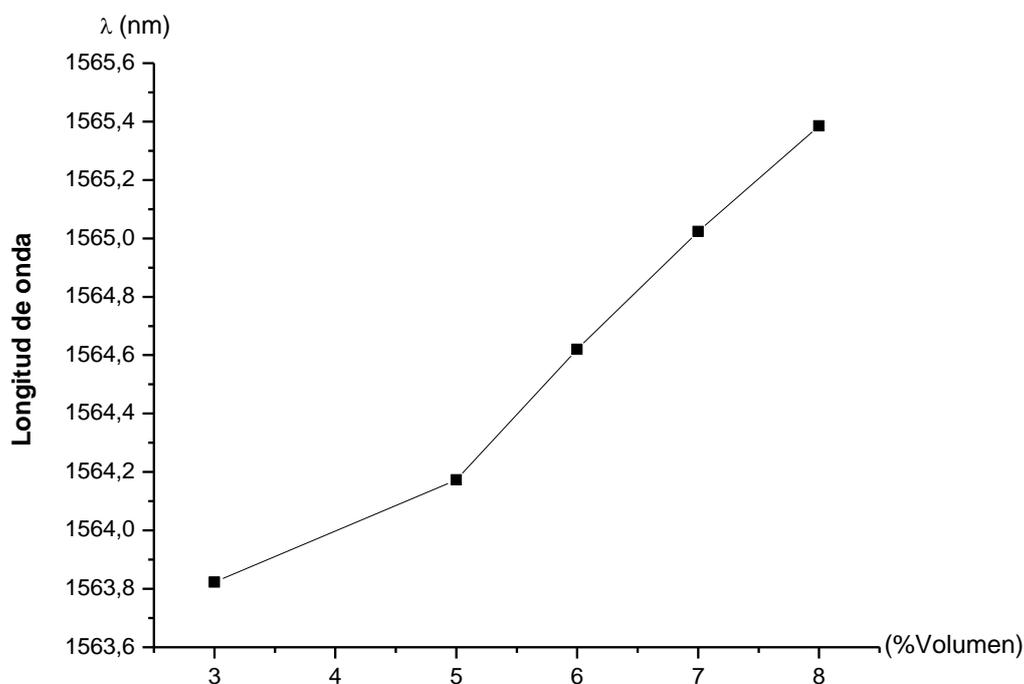
Gráfica 3. Concentración porcentual de Alcohol Carburante en mezcla con Gasolina

En el análisis de los datos obtenidos a partir de mezclas con aditivos comerciales; tiner y varsol, la respuesta espectral es modificada teniendo en cuenta que la concentración de alcohol carburante en la mezcla corresponde a un pequeño porcentaje con respecto a las mediciones mostradas anteriormente. La adulteración de la mezcla corresponde a la mitad de la concentración del alcohol carburante empleado en las muestras, entre un 8 y 3% en la mezcla.

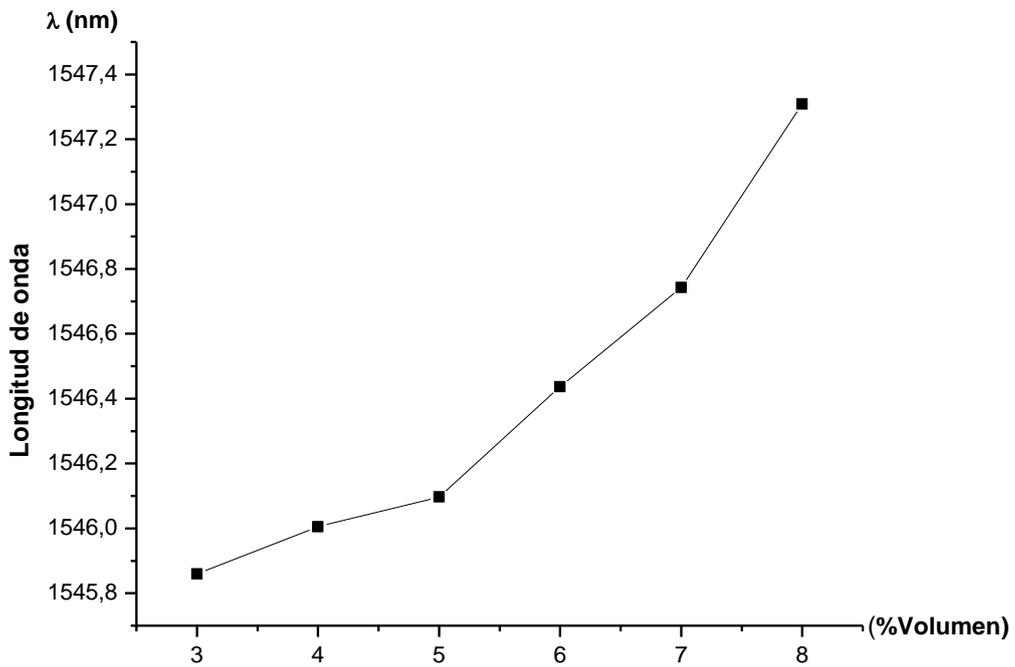
Para la mezcla de tiner en biocombustible, se muestra en la gráfica 4, el aumento de la longitud de onda central, a medida que aumenta la concentración de alcohol carburante; debido a que el índice de refracción que prevalece en la mezcla es dado por el aditivo, en este caso el tiner. La pureza del alcohol carburante y su índice de refracción se ven disminuidos por las características físicas y químicas del aditivo, como son la solubilidad, densidad y el más importante para la medición con la LPFG; el índice de refracción.

En las gráficas 5 y 6 se muestra el cambio de la longitud de onda central para la segunda y tercera banda de atenuación en las mezclas de biocombustible con aditivo varsol, ya que para estas muestras el espectro de transmisión generó varias bandas de atenuación, produciendo un cambio coherente en la variación de la concentración del aditivo en la mezcla. Al igual que sucede con el tiner, el comportamiento de la longitud de onda en las bandas de atenuación, se presenta de forma creciente, a medida que aumenta la concentración.

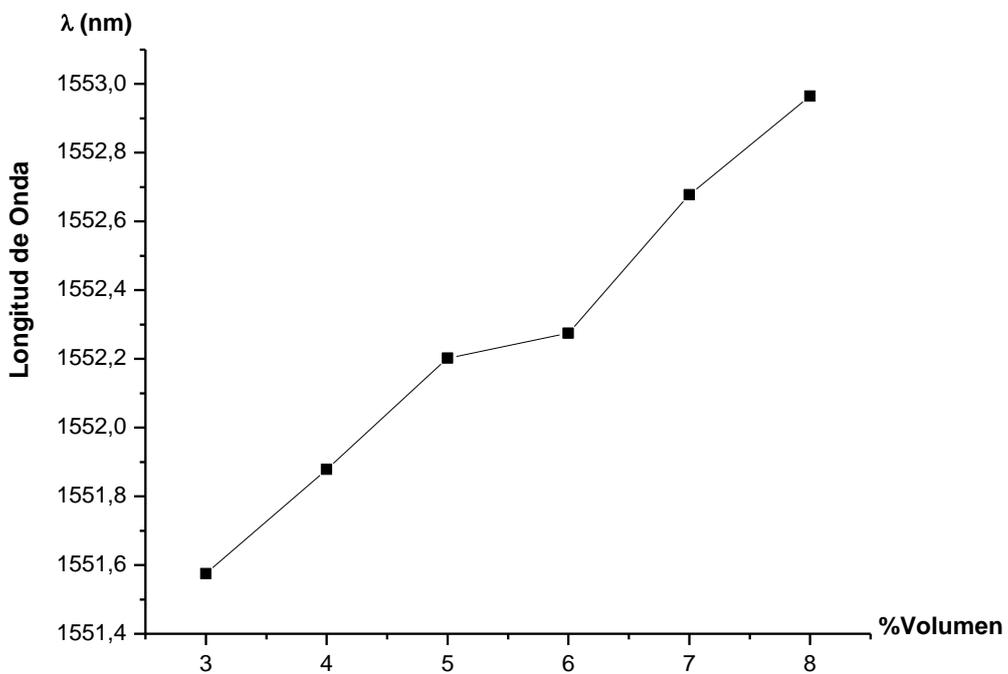
En la gráfica 7 se muestran los análisis de datos de mezclas realizadas con alcohol carburante y las realizadas con aditivo varsol, en las dos bandas de atenuación que se genera en respuesta a la concentración. Por último en la gráfica 8 se presenta el comportamiento espectral para las 32 muestras realizadas para la demostración de la sensibilidad del dispositivo frente a pequeños cambios de hidrocarburos.



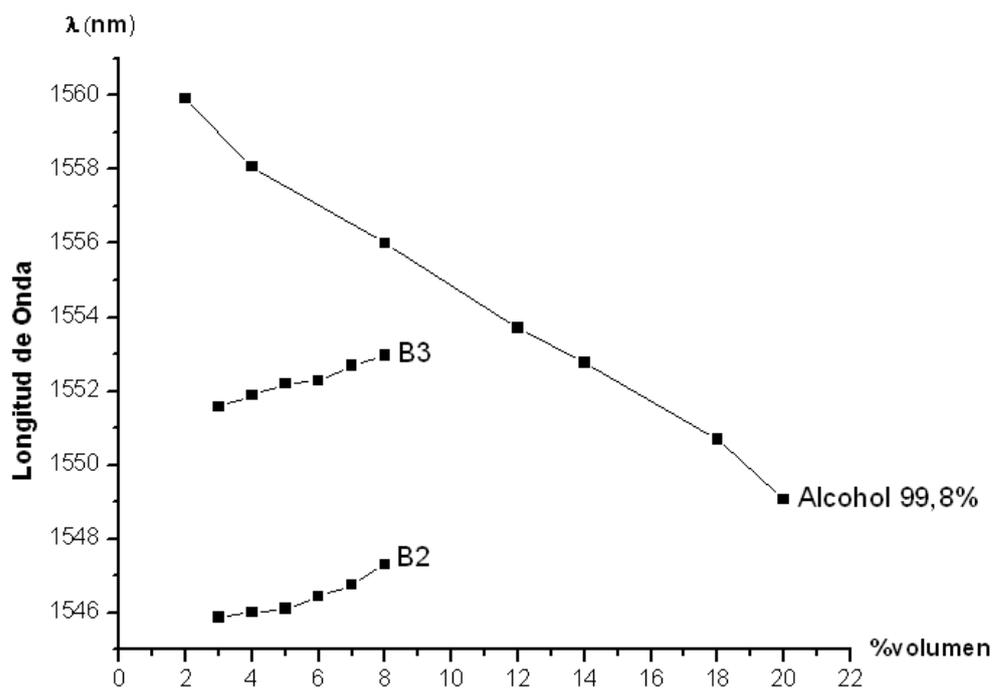
Gráfica 4. Concentración porcentual de Alcohol Carburante en mezcla con Gasolina y Tiner



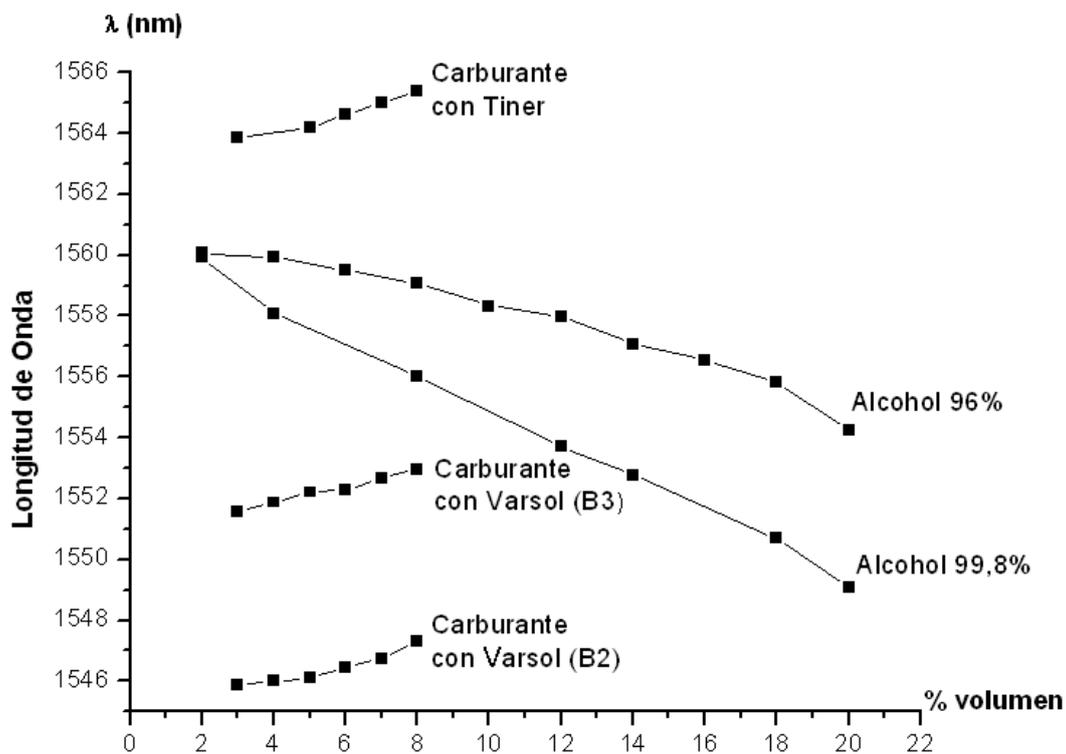
Gráfica 5. Concentración porcentual de Alcohol Carburante en mezcla con Gasolina y Varsol en la segunda banda de atenuación (B2)



Gráfica 6. Concentración porcentual de Alcohol Carburante en mezcla con Gasolina y Varsol en la tercera banda de atenuación (B3)



Gráfica 7. Concentración porcentual de Alcohol Carburante en mezcla con Gasolina vs en mezcla con Gasolina y Varsol (B2 y B3)



Gráfica 8. Concentración de Alcohol Carburante en mezcla con Gasolina y aditivos

7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El desarrollo de un sistema de fabricación de redes de periodo largo mediante las dos técnicas empleadas (por fusión y efecto magneto – mecánico) demostró y permitió ser muy práctico para el diseño de las redes según los requerimientos del sensor para la medición del biocombustible como son la cantidad de puntos y el periodo de la red.

En la fabricación de LPFGs con descarga de arco eléctrico, se demostró que en las redes de más de 40 puntos presentan un espectro de transmisión distorsionado (Gráfica pagina 37), como una disminución de la amplitud y aumento de la atenuación en el ancho de banda. Este efecto es causado por el reacoplamiento del modo del revestimiento hacia el modo del núcleo. Al identificar este comportamiento con la cantidad de puntos en la red de período largo, permitió la caracterización de las redes a emplear como sensor para el biocombustible diseñadas por descarga de arco eléctrico con 10 a 20 puntos y periodicidad de 625 μm para una la fuente de luz (LED) con $\lambda = 1550 \text{ nm}$.

El montaje realizado con la precisión necesaria, junto al programa desarrollado en Labview permitió controlar la periodicidad del la red y la cantidad de puntos a realizar, lo cual es una gran ventaja para utilizar este diseño en la fabricación de otro tipo de redes para diferentes longitudes de onda, por ejemplo en caso de cambiar la fuente de luz, es necesario ajustar el periodo.

También se demostró la sensibilidad que presentan estas fibras frente al cambio de temperatura y deformaciones mecánicas (axial y longitudinal) en el momento de fabricación y de medición del biocombustible. Fueron obtenidos desplazamientos de 0.11864 nm para cambios de temperatura entre 15 a 59 °C. En la fabricación de las redes por efecto magneto – mecánico se demostró la variación de las bandas de

atenuación al incrementarse la tensión longitudinal y axial mediante la deformación mecánica causada por el aumento del campo magnético, comportamiento similar al aumentar la corriente y el tiempo de exposición en la fabricación por técnica por descarga de arco eléctrico.

Para reducir la incertidumbre en las medidas se posprocesaron los datos, este ajuste corresponde a la calibración del sensor, como se explica detalladamente en la interrogación de las redes de periodo largo en el capítulo 5.2 (página 33)

Referente a las perspectivas del proyecto, el prototipo de sensor desarrollado valido los diversos porcentajes de concentración en las muestras, lo que indica ser una base óptima para el diseño de un sensor de biocombustibles portátil, con un bajo porcentaje de error en respuesta a modificaciones del combustible comercial, que puede ofrecer además nuevas oportunidades en diversas industrias del país.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Udd. Eric, Editor, “Fiber Optic Sensors”, pp. 14, 81, Proceedings of a conference held 8-11 September 1992 Boston, Massachusetts, Spie Optical Engineering Press.
- [2] http://www.rp-photonics.com/encyclopedia_f.html, Fiber Gratings, Fiber Optics Sensors
- [3] V. Bhatia and A. M. Vengsarkar, “Optical fiber long-period grating sensors,” *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 692–694, May 1996.
- [4] V. Bhatia, T. D’Alberto, K. A. Murphy, and R. O. Claus, “Optical fiber long-period grating sensors,” in *Proc. Eleventh Int. Conf. Optic. FiberSensors, OFS-11*, May 1996, pp. 360–363.
- [5] H. J. Patrick, A. D. Kersey, F. Bucholtz, K. J. Ewing, J. B. Judkins, and A. M. Vengsarkar, “Chemical sensor based on long-period fiber grating response to index of refraction,” in *Proc. Conf. Lasers Electro-Opt.*, vol. 11, 1997 OSA Technical Digest Series, Optical Society of America, Washington, DC, 1997, pp. 420–421.
- [6] V. Bhatia, “Properties and sensing applications of long-period gratings,” Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Nov. 1996.
- [7] V. Bhatia, M. K. Burford, N. Zabaronick, K. A. Murphy, and R. O. Claus, “Strain and refractive index sensors using temperature-insensitive long-period gratings,” in *Proc. Eleventh Int. Conf. Optic. Fiber Sensors, OFS-11*, post-deadline paper Fr 3-1, May 1996.
- [8] H J. Patrick, *member, OSA*, Alan d. Kersey, and Frank Bucholtz, “Analysis Of The Response Of Long Period Fiber Gratings To External Index Of Refraction”, *Journal Of Lightwave Technology*, Vol. 16, No. 9, September 1998.
- [9] Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick, Michel Leblanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, And E. Joseph Friebele, “Fiber Grating Sensors”, *Journal Of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, August 1997
- [10] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, P. J. Lemaire, N. S. Bergano, and C. R. Davidson, “Long-period fiber-grating-based gain equalizers,” *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 336–338, 1996.
- [11] D. B. Stegall and T. Erdogan, “Dispersion control with use of long-period fiber gratings,” *J. Opt. Soc. Amer. A*, vol. 17, pp. 304–312, 2000.
- [12] K. S. Lee and T. Erdogan, “Transmissive tilted gratings for LP₀₁ -to-LP₁₁ mode coupling,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 1286–1288, Oct. 1999.

- [13] E. M. Dianov, V. I. Karpov, M. V. Grekov, K. M. Golant, and R. R. Khrapko, "Ultra-thermostable long-period gratings induced in nitrogendoped silica fiber," in *ECOC'97 Tech. Dig.*, paper 2-56.
- [14] V. Grubsky and J. Feinberg, "Long-period fiber gratings with variable coupling for real-time sensing applications," *Opt. Lett.*, vol. 25, pp.203–205, 2000.
- [15] G. Rego, O. Okhotnikov, E. Dianov, *Member, OSA*, and V. Sulimov, "High-Temperature Stability of Long-Period Fiber Gratings Produced Using an Electric Arc", *Journal Of Lightwave Technology*, Vol. 19, No. 10, October 2001.
- [16] Ashish M. Vengsarkar, Paul J. Lemaire, Justin B. Judkins, Vikram Bhatia, Turan Erdogan, and John E. Sipe, "Long-Period Fiber Gratings as Band_Rejection Filters", *Journal Of Lightwave Technology*, Vol. 14, No. 1, January 1996.
- [17] K. S. Chiang, Y. Liu, M. N. Ng, and X. Dong, "Analysis of etched long period fibre grating and its response to external refractive index", *Electronics Letters*, vol. 36, no. 11, pp. 966-967, May 2000.
- [18] M. Miyagi, and S. Nishida, "An approximate formula for describing dispersion properties of optical dielectric slab and fiber waveguides", *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 69, pp. 291-293, 1979
- [19] Rosane Falate, Ricardo C. Kamikawachi, José L. Fabris, Márcia Müller, Hypólito J. Kalinowski, Felipe A. S. Ferri, and Lucas K. Czelusniak "Petroleum Hydrocarbon Detection with Long Period Gratings", *Proceedings of the 2003/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2003 (Fóz do Iguaçu, Brazil)*
- [20] R. Falate, H. J. Kalinowski, J. L. Fabris, and M. Müller, "Long period grating application for fuel quality control", in *Proc. Of Sixth International Conference on Optoelectronics, Fiber Optics and Photonics*, Mumbai, 2002, pp. 351.
- [21] Myoungwon Kim, Dongwook Lee, Bum Il Hong and Haeyang Chung, "Performance Characteristics of Long-Period Fiber-Gratings Made from Periodic Tapers Induced by Electric-arc Discharge", School of Electronics and Information and Institute of Natural Sciences, Kyung Hee University, Yongin 449-701 *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 40, No. 2, February 2002, pp. 369_373
- [22] P. Niay, M. Douay, P. Bernage, W. X. Xie, B. Leconte, D. Ramecourt, E. Delevaque, J. F. Bayon, H. Poignant, and B. Poumellec, "Does photosensitivity pave the way toward the fabrication of miniature coherent light sources in inorganic glass waveguides?," *Opt. Mater.*, vol. 11, pp.115–129, 1999.
- [23] B. Poumellec and F. Kherbouche, "The photorefractive Bragg gratings in the fibers for telecommunications," *J. Phys. III France*, vol. 6, pp.1595–1624, 1996.
- [24] G. Brambilha, V. Pruneri, L. Reekie, and D. N. Payne, "Enhanced photosensitivity in germanosilicate fibers exposed to CO₂ laser radiation," *Opt. Lett.*, vol. 24, pp. 1023–1025, 1999.

- [25] A. L. Tomashuk, E. M. Dianov, K. M. Golant, and A. O. Rybaltovskii, “ γ -radiation-induced absorption in pure-silica-core fibers in the visible spectral region: The effect of H⁻-loading,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol.45, pp. 1576–1579, June 1998.
- [26] H. Patrick, S. L. Gilbert, A. Lidgard, and M. D. Gallager, “Annealing of Bragg gratings in hydrogen-loaded optical fiber,” *J. Appl. Phys.*, vol.78, pp. 2940–2945, 1995.
- [27] I. Riant and B. Poumellec, “Thermal decay of gratings written in hydrogen-loaded germanosilicate fibers,” *Electron. Lett.*, vol. 34, pp.1603–1604, Aug. 6, 1998.
- [28] C. Narayanan, H. M. Presby, and A. M. Vengsarkar, “Band-rejection fiber filter using periodic core deformation,” *Electron. Lett.*, vol. 33, pp.280–281, Feb. 13, 1997.
- [29] V. I. Karpov, M. V. Grekov, E. M. Dianov, K. M. Golant, S. A. Vasiliev, O. I. Medvedkov, and R. R. Khrapko, “Mode-field converters and long-period gratings fabricated by thermodiffusion in nitrogen-doped-silica-core fibers,” in *Proc. Mater. Res. Soc. Symp.*, vol.531, 1998, pp. 391–396.
- [30] D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis, S. G. Kosinski, S. C. Mettler, and A. M. Vengsarkar, “Long-period fiber grating fabrication with focused CO₂ laser pulses,” *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 302–303, Feb. 5, 1998.
- [31] D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis, and S. C. Mettler, “CO₂ laser-induced long-period fiber gratings: Spectral characteristics, cladding modes and polarization independence,” *Electron. Lett.*, vol.34, pp. 1416–1417, July 9, 1998.
- [32] Y. Kondo, K. Nouchi, T. Mitsuyu, M. Watanabe, P. G. Kazansky, and K. Hirao, “Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses,” *Opt. Lett.*, vol. 24, pp. 646–648, 1999.
- [33] M. Fujimaki, Y. Ohki, J. L. Brebner, and S. Roorda, “Fabrication of long-period optical fiber gratings by use of ion implantation,” *Opt. Lett.*, vol. 25, pp. 88–89, 2000.
- [34] S. G. Kosinski and A. M. Vengsarkar, “Splice-based long-period fiber gratings,” in *OFC’98 Tech. Dig.*, paper ThG3, pp. 278–279.
- [35] S. G. Kosinski, G.A. Ten Eyck, and A. M. Vengsarkar, “Method for making long-period fiber gratings,” European patent EP0840146, 1998-05-06
- [36] N. Godbout, X. Daxhelet, A. Maurier, and S. Lacroix, “Long-period fiber grating by electrical discharge,” in *Proc. ECOC’98*, pp. 397–398.
- [37] I. K. Hwang, S. H. Yun, and B. Y. Kim, “Long-period fiber gratings based on periodic microbends,” *Opt. Lett.*, vol. 24, pp. 1263–1265, 1999.

- [38] D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis, and S. C. Mettler, "Veryhigh-temperature stable CO₂-laser-induced long-period fiber gratings," *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 740–742, Apr. 29, 1999.
- [39] B. J. Eggleton, P. S. Westbrook, E. S. Windeler, S. Spalter, and T. A. Strasser, "Grating resonances in air–silica microstructured optical fibers," *Opt. Lett.*, vol. 24, pp. 1460–1462, 1999.
- [40] A. Othonos, and K. Kalli, *Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing*, Ed. Artech House: Norwood, 1999.
- [41] R. Falate, R.C. Kamikawachi, M. Muller, H.J. Kalinowski, J.L. "Fabris Fiber Optic Sensors For Hydrocarbon Detection", *Centro Federal de Educaçao Tecnologica do Paraná, Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba –PR, CEP 80230-901, Brazil*
- [42] S. Savin, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino, and H. J. Shaw, "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings" *OPTICS LETTERS* / Vol. 25, No. 10 / May 15, 2000