

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Carrera

**Estudio y caracterización del sensor de
nivel de líquido de fibra óptica multimodo
(Study and characterization of the liquid level
sensor multimode optical fiber)**

Para acceder al Título de

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN

Autor: Jorge Fernández García

Septiembre - 2012



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Realizado por: **Jorge Fernández García**

Director del PFC: **Mauro Lomer Barboza**

Título: “Estudio y caracterización del sensor de nivel de líquido de fibra óptica multimodo.”

Title: “Study and characterization of the liquid level sensor multimode optical fiber.”

Presentado a examen el día:

para acceder al Título de

**INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN,
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS**

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): María Ángeles Quintela Incera

Secretario (Apellidos, Nombre): Mauro Lomer Barboza

Vocal (Apellidos, Nombre): Luisa de la Fuente Rodríguez

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Proyecto Fin de Carrera Nº
(a asignar por Secretaría)

Índice

Objetivos.....	5
Capítulo 1. Importancia del índice de refracción en líquidos.....	6
1.1 Introducción.....	7
1.2 Definición del índice de refracción	8
1.3 Índice de refracción en líquidos.....	10
1.4 Aplicaciones.....	12
1.5 Conclusiones.....	13
1.6 Referencias	13
Capítulo 2. Técnicas de medida del índice de refracción	14
2.1 Introducción.....	15
2.2 Técnicas convencionales	15
2.2.1 Métodos del ángulo límite.....	15
2.2.2 Métodos de desviación del haz.....	16
2.2.3 Métodos interferométricos	17
2.2.4 Métodos basados en la polarización de la luz	17
2.3 Técnicas basadas en fibras ópticas	18
2.3.1 Método basado en el campo evanescente	18
2.3.2 Método utilizando las relaciones de Fresnel en fibras ópticas	19
2.3.3 Método basado en fibras ópticas con diámetros de núcleos diferentes	20
2.3.4 Método basado en la reflexión total interna frustrada	21
2.3.5 Método utilizando redes de Bragg en fibra óptica	22
2.3.6 Método basado en la modulación de la intensidad.....	23
2.3.7 Método de medida basado en el adelgazamiento de la cubierta de la fibra óptica.....	24

2.4 Referencias	25
Capítulo 3. Medida del índice de refracción basada en pérdidas por curvatura en fibra óptica.....	26
3.1 Introducción.....	27
3.2 Propagación de la luz en fibra óptica	28
3.3 Pérdidas por curvaturas	29
3.4 Pérdidas de transición.....	30
3.5 Referencias	35
Capítulo 4. Resultados experimentales.	36
4.1 Introducción.....	37
4.2 Montaje óptico.....	38
4.3 Método de medida	40
4.4 Resultados obtenidos.....	42
4.4.1 Agua con sal	43
4.4.2 Agua con azúcar	45
4.4.3 Efecto de la temperatura.....	46
4.5 Comparación con otras técnicas de medida	49
4.5.1 Agua con sal	49
4.5.2 Agua con azúcar	50
4.5.3 Efecto de la temperatura.....	51
4.6 Referencias	53
Capítulo 5. Conclusiones y futuros trabajos.....	54
5.1 Conclusiones.....	55
5.2 Líneas futuras	56

Objetivos

Uno de los grandes avances en cuanto a dispositivos que ha traído todo el desarrollo tecnológico de estos últimos años ha sido el de los dispositivos sensores. La facilidad con la que se implementan en cualquier producto al haber reducido considerablemente su tamaño y cómo son capaces de complementar todo tipo de aplicaciones ha sido, sin duda, uno de los avances más importantes en el mundo tecnológico. Son fundamentales a la hora de poder controlar, manejar o caracterizar cualquier proceso. Hasta el dispositivo más simple seguramente use un sensor o reciba información proporcionada por uno, desde el sensor de proximidad de un teléfono de última generación que hace que se apague la pantalla cuando te acercas el teléfono al oído, hasta el que controla las palas de un generador eólico para que estén orientadas de manera correcta.

Los sensores son, en gran parte, los culpables de que cada vez la tecnología sea más precisa, más fiable, más eficiente y más comfortable.

Gran parte de estos sensores son basados en principios eléctricos, lo que hace que no sean aptos para cualquier situación, ya sea por encontrarse expuestos a radiaciones que alteren sus medidas o porque el medio no lo permite. En este apartado es donde entran los sensores basados en principios ópticos.

Uno de los principales usos de los sensores ópticos es la medición en medios líquidos donde los sensores eléctricos no pueden ser utilizados por razones obvias. Y una de las medidas que se puede realizar en líquidos, basándose en las leyes de Snell sobre la refracción y reflexión de la luz al cambiar de medio, es la medida del índice de refracción de un líquido.

Es esta última aplicación uno de los motivos principales del presente proyecto. A partir de una pieza basada en fibra óptica previamente diseñada y fabricada, se pueden caracterizar distintos líquidos o disoluciones (agua, agua y azúcar, agua y sal, cervezas, etc.) y conocer con suficiente precisión la cantidad de soluto en dicha disolución o diferenciar entre varios líquidos desconocidos con solamente conocer su índice de refracción.

A grandes rasgos, el objetivo del proyecto consiste en que, a partir de un sensor de nivel de líquido basado en fibras ópticas de plástico, el sensor sea capaz de poder proporcionar la información necesaria que permita conocer el índice de refracción de un determinado líquido. Tanto el sensor como la técnica de medida tienen que ser sencillo, transportable y de bajo coste. El sensor está basado en las pérdidas por curvatura de la fibra y el método de medida consiste en cuantificar dichas pérdidas y poder con ello caracterizar el líquido. Dicho sensor será probado en varios líquidos con el fin de comprobar su funcionamiento y de caracterizar los líquidos.

Capítulo 1

Importancia del índice de refracción en líquidos

1.1. Introducción

Cuando la luz se propaga por un medio y cambia a otro medio distinto, en la interface una parte del haz se refleja de nuevo al medio original y otra parte se refracta, propagándose ésta por el nuevo medio. La parte del haz que se propaga lo hace a con una velocidad de fase distinta a la del haz incidente y con una nueva dirección.

El efecto de la refracción es distinto para cada material. Dependiendo de la composición del material sobre el que incide el rayo, la refracción podrá ser mayor o menor, provocando esto un cambio en la dirección y en la velocidad de fase más o menos elevada.

El índice de refracción tiene un valor único para cada material, característica que lo hace indispensable a la hora de utilizarlo para caracterizar materiales. Conociendo su índice de refracción, se conoce el material.

A su vez, se debe tener en cuenta que como la luz sólo se propaga por medios transparentes y no por opacos (es lo que diferencia a un medio opaco de uno transparente), la medida de este fenómeno solo tiene sentido realizarla en medios transparentes como por ejemplo los líquidos.

Y es en los líquidos donde el índice de refracción tiene más importancia como dato característico y donde este proyecto se centra a la hora de caracterizar distintos líquidos y composiciones. Se conoce que en los líquidos los factores que influyen en el valor del índice de refracción son su composición química, su temperatura, su pureza, su viscosidad, su densidad, su radiación, su colorimetría, su concentración (en el caso de una disolución), etc.

De la cantidad de factores que influyen en el índice de refracción se deduce la importancia de conocer esta propiedad óptica de los líquidos para los campos de la física y la química. Por eso se han estado desarrollando últimamente sensores capaces de medir este dato con una alta precisión y sencillez y aún sigue siendo motivo de investigación.

1.2. Definición del índice de refracción ^[1]

El índice de refracción (**n**) es una medida que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo. Y está definido como el cociente de la velocidad de la luz en el vacío (**c**) y la velocidad (**v_p**) en dicho medio y si además consideramos a la luz como una onda se obtiene:

$$n = \frac{c}{v_p} = \sqrt{\frac{\epsilon \cdot \mu}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r} \quad (1.1)$$

- ϵ es la constante dieléctrica o permitividad.
- μ es la permitividad magnética.
- ϵ_0 es la constante dieléctrica o permitividad en el vacío.
- μ_0 es la permitividad magnética en el vacío.
- ϵ_r es la constante dieléctrica o permitividad relativa.
- μ_r es la permitividad magnética relativa.

Y además considerando que los medios son diamagnéticos ($\mu \approx \mu_0$), entonces en casi la totalidad de los materiales $\mu_r \approx 1$ en frecuencias ópticas por lo que:

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (1.2)$$

- ϵ_r es la constante dieléctrica o permitividad relativa.

Cuando la luz se transmite a través de un medio este absorbe parte de la luz produciendo lo que se conocen como *pérdidas de absorción*. Las pérdidas de absorción también forman parte del valor del índice de refracción, por lo que la definición completa y real del índice de refracción es la de un número complejo:

$$\bar{n} = n \pm jK \quad (1.3)$$

- n es el índice de refracción real visto anteriormente.
- K es el coeficiente de extinción o constante de absorción o amortiguación.

En este proyecto los líquidos a estudiar y las fibras utilizadas no introducen este tipo de pérdidas por lo que el índice de refracción será en todo momento un valor real.

En cuanto a los distintos materiales, estos se pueden clasificar en función de su comportamiento ante la luz, dependiendo de la cantidad y el rango de frecuencias que absorben.

Diferenciándose así tres tipos principales.

- **Transparentes:** Dejan pasar la luz a través de ellos sin ninguna dificultad. Absorben parte de la luz como consecuencia de la polarización electrónica y de las transiciones electrónicas a los estados electrónicos introducidos en el intervalo prohibido de las impurezas. Estos materiales aparecen coloreados según la el tramo de longitud de onda absorbido.
- **Translúcidos:** Dejan pasar la luz a través de ellos pero se transmite una imagen difusa. En su interior se producen muchas reflexiones y refracciones
- **Opacos:** No dejan pasar nada de luz. Absorben todo el rango de luz visible.

Otra forma de clasificar los materiales es debido a su estado (líquido, sólido o gaseoso), pero esto ya no influye tanto en la propiedad del índice de refracción, que también, si no en las técnicas usadas de medida. Ya que puede haber líquidos opacos (leche, vino) o transparentes (agua), sólidos opacos (metales) o transparentes (vidrios), y por tanto influye más en el diseño de un método de medida viable, resultando obvio que para los sólidos únicamente sirven métodos no intrusivos y en los líquidos y gases sí podrían ser intrusivos.

También se conoce que el valor índice de refracción no es constante y que sí depende de la longitud de onda o de la frecuencia de la luz, y a este fenómeno se le conoce como *dispersión óptica*. Un ejemplo muy utilizado es el de la dispersión de la luz blanca en un prisma óptico, donde a la salida del prisma se puede ver descompuesta la luz blanca para cada longitud de onda comprobándose así que la velocidad en un medio depende de la longitud de onda.

La temperatura es otro de los factores que influyen en la medida del índice de refracción. Haciendo que sea necesario tener la temperatura de los materiales controlada para poder caracterizarlo correctamente, además esta dependencia se hace más alta en líquidos orgánicos, por lo que esto también será uno de los estudios que nos ocuparán en este proyecto.

Así que con lo visto hasta ahora sabemos el índice de refracción es función de la composición química, de la temperatura y de la longitud de onda.

$$n = f(\text{composición química}, T, \lambda, \text{etc.}) \quad (1.4)$$

1.3. Índice de refracción en líquidos ^[2]

Como definición se establece que, el estado líquido es un estado de agregación de la materia intermedio entre el estado sólido y el gaseoso. Las moléculas de los líquidos no están tan próximas como las de los sólidos, pero están menos separadas que las de los gases. Las moléculas en el estado líquido ocupan posiciones al azar que varían con el tiempo.

Esto mismo es lo que hace a los líquidos y a los gases buenos solventes en una disolución, es decir, el hecho de tener muchos más huecos entre moléculas y más amplios hace que las moléculas de otro material se puedan introducir y rellenar esos huecos sin llegar nunca a reaccionar entre sí. Y además el hecho de que los líquidos mantengan un volumen constante (al contrario que los gases) los hace altamente útiles para realizar disoluciones y trabajar con ellas.

Las disoluciones, por definición, son mezclas homogéneas de dos sustancias en las que las propiedades químicas de las sustancias no cambian pero sus propiedades físicas sí, lo que a nivel óptico las hace distintas. Uno de los tipos de disolución más comunes por su sencillez son las disoluciones líquidas y concretamente:

- **Sólido en líquido:** El solvente es un líquido y el soluto es una sustancia sólida. Un ejemplo puede ser agua con azúcar.
- **Líquido en líquido:** Tanto el soluto como el solvente están en estado líquido.

En ambos casos es posible diferenciar en función de la cantidad de solvente tres grupos principales de concentraciones:

- **Insaturadas:** No tienen el nivel máximo posible de soluto para una temperatura y una presión determinada. Y aquí hay dos subtipos:
 - **Diluida:** La cantidad de soluto está en una proporción muy baja.
 - **Concentrada:** La proporción de soluto es considerable
- **Saturada:** Tiene el nivel máximo posible de soluto para una temperatura y una presión determinada.
- **Sobresaturada:** Hay más nivel de soluto del que el solvente puede aceptar a una temperatura y una presión determinada.

En las disoluciones las propiedades físicas del líquido varían, y para cada cantidad de soluto la disolución es distinta y las propiedades físicas son únicas de esa concentración. Siendo el índice de refracción una de las propiedades de los líquidos que se ve afectada por ese cambio en las propiedades físicas, se puede caracterizar el nivel de soluto en una concentración determinada a través de su índice de refracción.

En los líquidos el valor del índice de refracción (n) está siempre comprendido entre 1.3 y 1.55, estos valores están en su mayoría tabulados para cada líquido o disolución y se puede conocer simplemente consultando las tablas.

En la Figura 1.1 se ilustra cómo se transmite la luz, a través de distintos líquidos con distinto índice de refracción cada uno, en una mezcla heterogénea según la ley de Snell. En la Figura 1.2 se observa el cambio de dirección del haz que produce el pasar de un medio con un índice de refracción determinado a otro con un índice distinto.

En las mezclas heterogéneas de líquidos, como se ve en la Figura 1.1 se producen distintos niveles para cada líquido con el índice de refracción propio del líquido, pero en las mezclas homogéneas, donde a nivel óptico todo el conjunto es uno, sólo existe un único índice de refracción. Los índices suelen estar tabulados y conociendo el tipo de concentración del que se dispone se puede saber directamente su comportamiento frente a la luz. Pero en el caso de que no se conozca la concentración exacta, es decir, la proporción exacta en la que se encuentran el disolvente y el soluto es imposible conocer su índice consultando en tablas. Es ahí donde se hace interesante el estudio y diseño de un sensor capaz de determinar directamente el índice de refracción de un líquido cualquiera con sólo realizar una medida sobre la concentración de la que se dispone. Pudiendo así determinar el tipo de líquido y su concentración exacta.

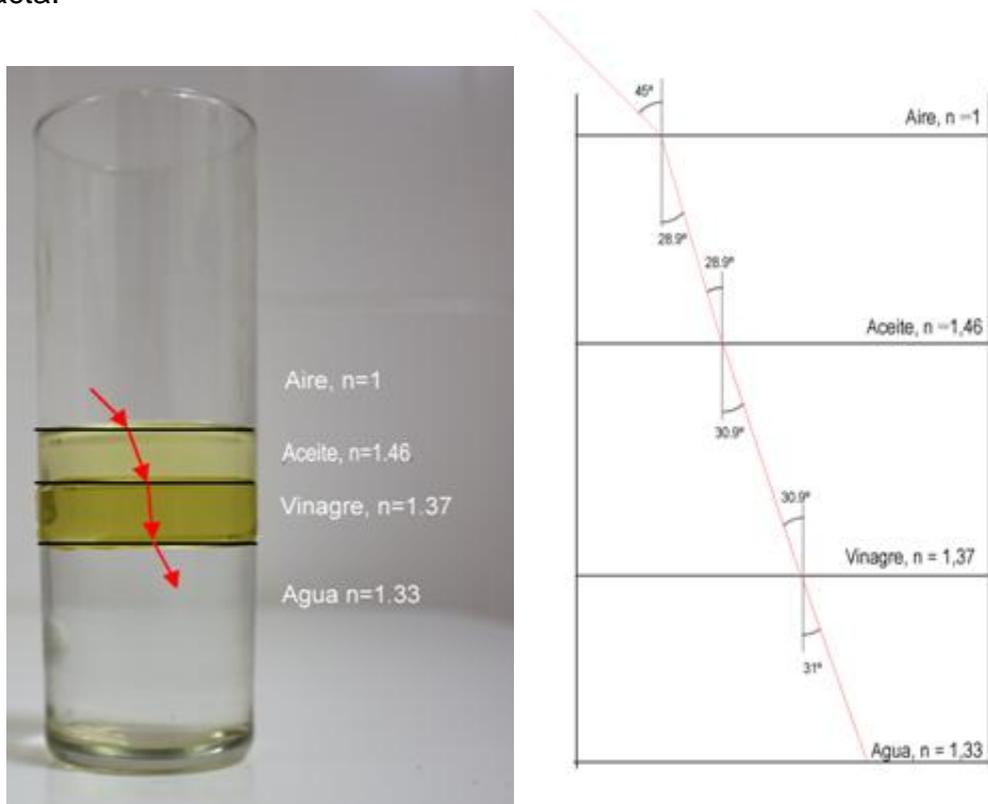


Figura 1.1. (Izda) Imagen de la refracción de la luz a través de distintos líquidos.
 Figura 1.2. (Dcha) Diagrama de la refracción de la luz a través de distintos líquidos según la Ley de Snell.

1.4. Aplicaciones

La posibilidad de conocer determinadas características de una sustancia a partir de medir su índice de refracción tiene su utilidad comercial, se le conoce como refractometría y en el mercado ya existen varios tipos de refractómetros.

En el campo de la industria, la principal utilidad de este proceso sería la automatización en la realización de mezclas y la clasificación inmediata de líquidos. Pudiendo, por ejemplo, dejar de añadir soluto cuando el sensor indique que ya es suficiente o seleccionando bebidas según su graduación alcohólica.

A continuación se indican las principales industrias de bebidas que se verían beneficiadas por incluir procesos como este:

- **Industria del Vino** ^[3]: El vino es una bebida que se produce mediante la fermentación del mosto o zumo al transformar azúcares en alcohol. Por lo tanto un preciso conocimiento de la cantidad de azúcar el mosto previo a la fermentación facilitaría la fabricación de un vino mejor y más controlado. Así como la selección por grado de alcohol, ya que lo que se transforma en alcohol es el azúcar, al conocer la concentración de azúcar sería posible determinar el grado de alcohol del vino.
- **Industria de la Cerveza** ^[4]: La cerveza es una bebida alcohólica que se obtiene de la cebada, levaduras u otros cereales que contienen azúcares y se fermentan. Por lo tanto la posibilidad de controlar la concentración de azúcar permitiría determinar el grado de alcohol de una cerveza y su tipo (rubia, negra, etc.). Así como controlar el estado de la mezcla en sus distintos procesos como la maceración, fermentación, etc. y ser capaces de corregir un posible error de fabricación sin tener que esperar al final de la producción.
- **Industria de los refrescos** ^[5]: En los aditivos edulcorantes de una bebida refrescante se incluyen una gran cantidad de azúcares (sobre un 45% del total de la mezcla) y automatizando el proceso de añadido sabiendo en cada momento la cantidad real de azúcar que existe facilitaría y produciría una mezcla más exacta y mejor.
- **Industria de los zumos**: Al igual que en los vinos (donde este proviene del zumo de uva), este proceso ayudaría a mejorar la calidad de los productos y a hacerlos más exactos teniendo un sabor más uniforme para diferentes tandas de fabricación.

En definitiva, sería útil para la industria de fabricación de bebidas alcohólicas que provienen de la fermentación de azúcares, como la sidra, ron, etc. o para cualquier industria cuya finalidad es la fabricación de productos provenientes de realizar mezclas de distintos líquidos o necesitan un control continuo de una determinada disolución.

1.5. Conclusiones

Parece que el estudio y la medición del índice de refracción es una rama interesante a la hora de investigar y con la suficiente proyección industrial. Es por eso que este proyecto se centra en la calibración de una pieza sencilla y portable, que hace las veces de sensor, que al sumergirla en un líquido presente unas pérdidas de potencia determinadas. Las pérdidas guardan relación directa con el líquido utilizado, de manera que así sea posible discriminar y caracterizar distintos líquidos en función de las pérdidas que provocan en la fibra, o lo que es lo mismo, en función de su índice de refracción. Además se intentará determinar que pieza es más correcta para dicha medición.

Con dicha pieza se podría conocer la cantidad de azúcar en agua, la cantidad de sal en agua, la variación que el agua con azúcar tiene en función de la temperatura, y una gran cantidad de medidas.

1.6. Referencias

- [1] E. Hecht. *Optics (4th Edition)*. Ed. Addison-Wesley, USA. 2001.
- [2] S. Burdano de Ercilla, E. Burdano García C. Gracia Muñoz. *Física General*. Ed. Tébar, ES. 2003
- [3] J. Robinson. *The Oxford Companion to Wine*. Ed. Oxford University Press, UK. 1994
- [4] G. Oliver. *The Oxford Companion to Beer*. Ed. Oxford University Press, UK. 2011
- [5] Wikipedia ES. *Gaseosa*. Última vez editado: 12 jul 2012, a las 13:59. (<http://es.wikipedia.org/wiki/Gaseosa>)

Capítulo 2

Técnicas de medida del índice de refracción

2.1. Introducción

Debido a la importancia que se ha demostrado que tiene conocer el índice de refracción y a la cantidad de materiales que existen se consigue explicar el espectacular desarrollo que ha tenido este campo a lo largo del tiempo. Existen en la actualidad una gran cantidad de técnicas de medida y una gran cantidad de instrumentos para realizar dicha medida.

Al ser el índice de refracción una propiedad óptica de los materiales que afecte a la velocidad de fase de la luz, resulta evidente que todas las técnicas existentes son derivadas de la luz y sus propiedades. Principalmente basándose en la teoría ondulatoria de ésta, con la que se pueden explicar los fenómenos de refracción y reflexión. La mayoría de estas técnicas están fundamentadas según las ecuaciones de Fresnel-Snell.

En los últimos años, con el desarrollo de las fibras ópticas y sus ventajas en cuanto a flexibilidad, ligereza, etc. y el control sobre la luz, las técnicas de medida del índice de refracción se han empezado a basar en las fibras ópticas y más concretamente en las de plástico.

2.2. Técnicas convencionales

A lo largo de la historia han existido distintas maneras de medir el índice de refracción y distintos tipos de refractómetros en el mercado, que se pueden diferenciar por dos motivos fundamentales: el fundamento óptico utilizado para obtener los resultados o la magnitud en la que se obtienen el resultado, pudiendo ser en este último caso el número de Abbe, el índice de refracción, el índice Brix, etc.

2.2.1. Métodos del ángulo límite

El método del ángulo límite para la reflexión total es el que se usa comúnmente y basa su fundamento en el estudio geométrico del comportamiento de la luz. Para este método existen tres instrumentos diferenciables:

- a) **Refractómetro de Abbe** ^[1]: Está pensado para realizar la operación con comodidad y rapidez. Se pone una cantidad pequeña de líquido entre dos prismas que se cierran a presión, teniendo así una fina película de líquido intermedia que producirá la refracción con un ángulo determinado. Se puede leer el resultado tanto en índice de refracción (RI) como en Brix.
- b) **Refractómetro de Pulfrich** ^[2]: Es útil para muestras sólidas y líquidas. El componente central de este instrumento es un bloque de vidrio con dos superficies planas formando ángulo recto, una en el plano horizontal y otra en el vertical. La luz es incidente sobre la superficie horizontal. Los rayos que inciden casi paralelos a la superficie horizontal, se refractan en el bloque Pulfrich con el ángulo límite, lo cual depende del índice de refracción del bloque y del líquido.

- c) **Refractómetro de inmersión** ^[2]: Su principio es el mismo que el de los aparatos de Pulfrich y Abbe. Su nombre proviene de que el prisma de refracción está sujeto rígidamente al objetivo del anteojo y se sumerge en el líquido cuyo índice de refracción se mide.

2.2.2. Métodos de desviación del haz

Se fundamentan en la ley de Snell y les hay más complejos o más sencillos pero todo se basan en determinar la desviación de un rayo de luz al pasar por el medio a determinar. El esquema más básico es el de la Figura 2.1.

- a) **Refractómetro por desplazamiento de imagen:** Se construye un prisma con la muestra y el índice se calcula en base al desplazamiento angular de la luz al pasar por la muestra. Si la muestra es líquida se coloca en un recipiente en forma de prisma. No hay límite en la determinación de índices de refracción y se puede trabajar en un mayor número de longitudes de onda.
- b) **Espectrómetro:** Consiste esencialmente en una red de difracción y una lente colimadora para que la luz entre en un plano con la red y un anteojo para mirar la imagen de la red. En el método más común, el de la desviación mínima, se usa primero el espectrómetro para medir el ángulo entre dos superficies del prisma y después para medir la desviación del haz de luz colimado producido al pasar por el prisma.
- c) **Prisma diferencial:** Tiene particular interés para hacer gran número de mediciones de rutina o para el control continuo de un proceso. Un par de prismas huecos (celdas), de ángulos conocidos, se colocan de modo que un haz colimado pase por uno y luego por el otro y se enfoque sobre una escala o un papel registrador. Uno de los prismas se llena con un líquido patrón del que se conozca su índice de refracción y en la otra celda se introduce la muestra. Se calcula por la medición de la desviación angular producida por el par de prismas con líquido.

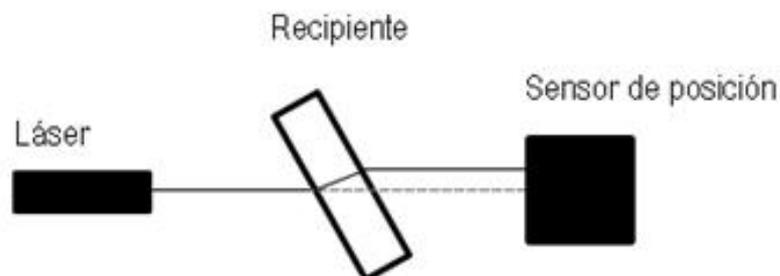


Figura 2.1. Esquema básico sobre la técnica de medida de índice de refracción a partir de la desviación del haz de luz.

- d) **Bloque V:** Una variación del método de prisma diferencial, en el cual la luz pasa por tres prismas, el primero y el tercero de vidrio de índice de

refracción y ángulos conocidos, y el segundo es el prisma desconocido, que puede ser sólido o líquido.

- e) **Celdas de prisma con líquido:** Mide la desviación de un rayo de luz al pasar por una celda de vidrio prismática que contiene el líquido cuyo índice va a determinarse. Se mira a través de la celda a la escala formada por una línea continua y mira a un lado de la celda a la misma escala con línea de trazos. Conociendo la distancia de la celda a la escala y el ángulo del prisma se calcula fácilmente el índice de refracción por lectura del desplazamiento de la imagen producida en la escala por el prisma.

2.2.3. Métodos interferométricos

En las mediciones interferométricas del índice de refracción, se divide un haz de luz en dos partes, una de las cuales sigue una trayectoria de índice de refracción conocida y la otra pasa por la sustancia cuyo índice de refracción quiere medirse. Los dos haces se recombinan en tal forma que se formen franjas de interferencia. El desplazamiento de las franjas, debido al medio de índice de refracción desconocido, es una medida de este índice. Aunque es posible usar métodos interferométricos para sólidos y líquidos, por el momento su uso mayor es para gases.

2.2.4. Métodos basados en la polarización de la luz

- a) **Medida del ángulo de Brewster** ^[3]: El ángulo de Brewster es el ángulo de incidencia de la luz en la interfaces de dos medios que hace que la componente de polarización paralela al plano de incidencia sea nula. Esto se produce cuando el ángulo que forman el haz refractado con el haz reflejado hacen 90°. Por lo que despejando en la Ley de Snell:

$$\theta_B = \tan^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.1)$$

Así, iluminando la muestra con luz polarizada y determinando la mínima reflexión se halla el ángulo de Brewster que aplicando en la ecuación 2.1 se obtiene el índice n_2 , suponiendo que el índice del medio n_1 es conocido.

- b) **Método elipsométrico** ^[4]: Cuando un haz de luz polarizada cambia de medio, el haz reflejado sufre un cambio en su polarización. Dicho cambio se puede interpretar en función de las propiedades físicas de los medios involucrados midiendo dos ángulos elipsométricos en el haz reflejado. Es uno de los métodos más importantes y con mayor precisión, llegando a dar el resultado en grados, minutos y segundos, que traducido a valor de índice de refracción son hasta cinco decimales de precisión.

2.3. Técnicas basadas en fibras ópticas

A medida que la fibra óptica se ha ido desarrollando hasta el punto de conseguir una alta comercialización y una serie de ventajas, como puede ser la mayor precisión de la medida, ha ido tomando importancia como material con el que fabricar sensores y así es como en la actualidad existen diferentes técnicas usando fibras ópticas que sirven para medir el índice de refracción de un líquido. Existen técnicas intrusivas y técnicas no intrusivas, técnicas que se basan en las pérdidas por curvatura y técnicas que se basan en la atenuación sobre un tramo recto.

A continuación se indican una serie de técnicas que ya han sido puestas en prácticas en otras investigaciones:

2.3.1. Método basado en el campo evanescente, P. Polynkin et al., [5]

Se tiene una fibra óptica monomodo con un tramo de sección cónica introducida en un polímero transparente, como por ejemplo silicona. En la silicona se construye un canal para el líquido de tal manera que el canal quede casi en contacto con la sección cónica consiguiendo que la diferencia entre el índice de refracción del líquido y el del polímero tenga relación directa con las pérdidas que se producen en la zona cónica.

Es un método no intrusivo puesto que no necesita de un contacto directo con el líquido a medir, sino que es el campo conocido como '*campo evanescente*' el que provoca la atenuación en la transmisión de la luz.

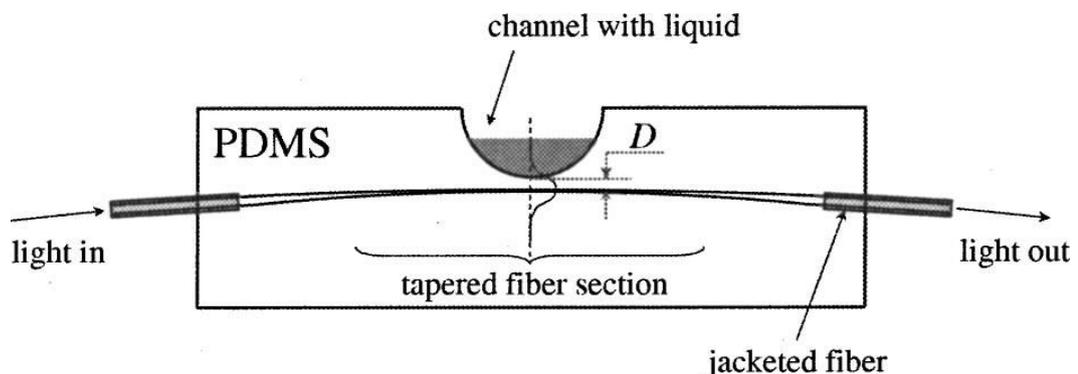


Figura 2.2. Esquema de la vista lateral del montaje para la técnica del punto 2.3.1.

2.3.2. Método utilizando las relaciones de Fresnel en fibras ópticas, C.B. Kim et al., [6]

A partir de una técnica basada en las reflexiones de Fresnel en la punta de una fibra óptica se consigue medir el índice de refracción de distintos líquidos para longitudes de onda de 1310 nm y 1551 nm. Para ello se mide la reflexión que se produce en la interfaz líquido-fibra y se compara con la reflexión que se produce en la interfaz aire-fibra. De la relación resultante se puede deducir el índice de refracción del líquido.

Con las dos señales, una de la fibra en el líquido y la de referencia con la fibra al aire, se acoplan y se mandan a un detector que conseguirá hacer la medida más independiente de posibles errores que pueda introducir el generador de pulsos, etc. y de ahí se envía a un ordenador que realizará los cálculos correspondientes para obtener finalmente el valor del índice de refracción del líquido. Es un sistema intrusivo y además requiere de un montaje demasiado complejo.

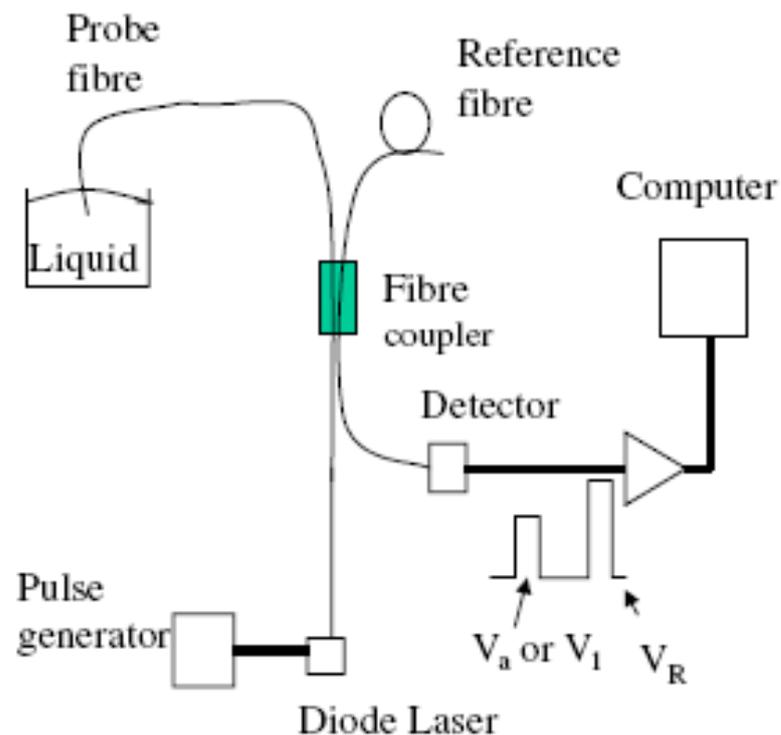


Figura 2.3. Esquema del montaje experimental para el comparador basada en fibra óptica.

2.3.3. Método basado en fibras ópticas con diámetros de núcleos diferentes, J. Villatoro et al., [7]

A una fibra multimodo se le inserta un tramo intermedio de una fibra monomodo. Al tener dos diámetros desiguales la luz es transmitida por el revestimiento provocando que el dispositivo sea sensible al índice de refracción del medio exterior. Puede operar a diversas longitudes de onda y es muy fácil de fabricar.

La zona L, de fibra monomodo, es la zona que sirve de sensor. En esa zona con el núcleo de diámetro menor la luz es guiada por el revestimiento y el índice efectivo de los modos del revestimiento dependen del índice de refracción del propio revestimiento pero también del índice de refracción del medio exterior. La transmisión nunca será nula puesto que por el núcleo de la zona monomodo se guía algo de luz, incluso cuando el índice de refracción del medio externo es mayor que el del revestimiento. Esto permite introducir más tramos de fibra monomodo en la misma fibra para tener más sensores en la misma fibra.

Una técnica intrusiva basada en las pérdidas por transmisión, pero de muy fácil fabricación con la limitación de que para índices de refracción mayores que los del revestimiento las medidas experimentales no tienen mucho sentido.

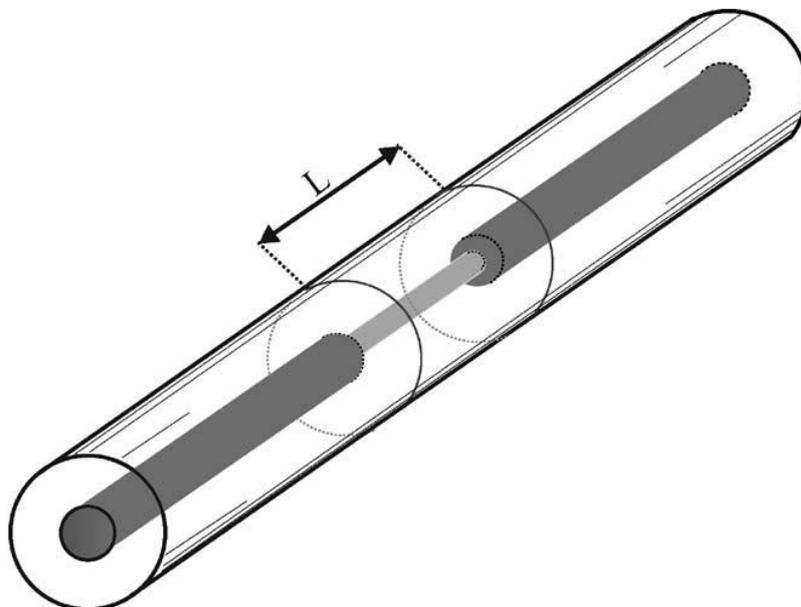


Figura 2.4. Representación esquemática del sensor. El tramo L es el trozo de fibra monomodo que se inserta en la fibra multimodo.

2.3.4. Método basado en la reflexión total interna frustrada, P. Nath et al, [8]

Fundamentado en el principio de la reflexión total interna frustrada causado por el cambio de índice de refracción del medio que rodea la punta de una fibra óptica.

Se pule un extremo de una fibra hasta para que tenga forma redondeada y se deja el otro extremo en plano por donde se introduce la luz. En la terminación redondeada algunos modos serán reflejados en sentido contrario y volverán de nuevo hacia el extremo con la terminación plana. La cantidad de modos que vuelven rebotados hacia el extremo de entrada de la fibra depende del medio en el que se encuentra la terminación redondeada. Dependiendo del índice de refracción del medio en el que se introduce la punta redondeada la cantidad de luz reflejada hacia atrás será distinta. Los modos de orden más bajo se convierten en modos de fuga que se escapan de la fibra y los de modo más alto son los que se reflejan hacia atrás. La cantidad de modos de fuga que se propagan al exterior guardan relación con el índice de refracción del medio.

A partir del esquema de la Figura 2.5 se entiende el experimento. Usando un diodo láser (LD) como fuente se dirige la luz hacia un divisor de haz (BS) para enviarla a un fotodiodo (PD) que controlara la potencia de luz disponible de la fuente y a una lente (O) que mejorará el acoplo de la luz a la fibra. En el otro extremo se encuentra la punta redondeada introducida en el medio a caracterizar. Los modos que rebotan vuelven por la fibra hasta llegar de nuevo al BS que envía el haz a otro PD. En un ordenador se reciben la potencia de la fuente y la potencia devuelta por la fibra donde se harán los cálculos necesarios para obtener el valor del índice de refracción.

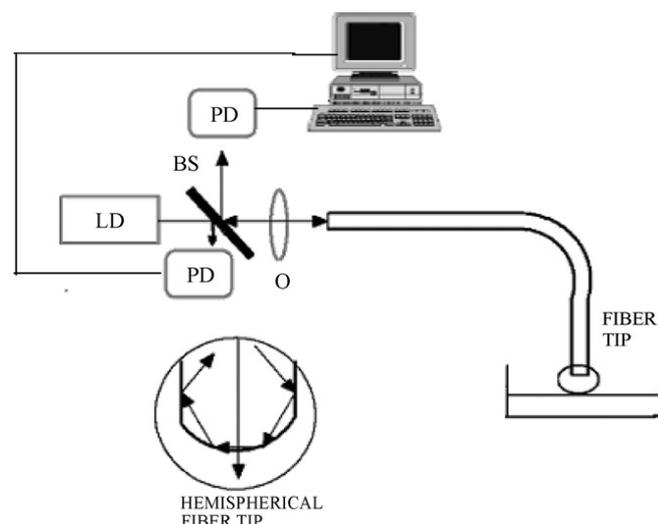


Figura 2.5. Esquema del montaje del experimento y detalle del pulido redondeado de la fibra óptica.

2.3.5. Método utilizando redes de Bragg en fibra óptica, K. Schroeder et al.,^[9]

En una red de Bragg en fibra (FBG) se pule un lado hasta remover parte del revestimiento y se expone esta parte ante el líquido a analizar mediante el campo evanescente. La longitud de onda de la FBG varía según el índice de refracción del líquido analizado.

Además de la influencia de la temperatura y de la tensión en la longitud de onda de Bragg en una FBG se ha demostrado que el índice de refracción efectivo del modo guiado en la fibra responde a cambios en el índice de refracción del material que se encuentre dentro de la región del campo evanescente.

Con motivo de independizar la medida de la temperatura de la del índice de refracción se han implementado dos redes de Bragg. Una en el centro del sensor, en la parte pulida, que dará la medida del índice de refracción y otra a una distancia del centro apartada de la región pulida que realizará la medida de la temperatura mejorando así el control y la monitorización de ambas medidas.

Los resultados obtenidos dependen de la longitud de onda y también de la polarización de la luz por lo que en el montaje es necesario incluir un controlador de polarización y una longitud de onda de referencia con la que hacer las comparaciones necesarias

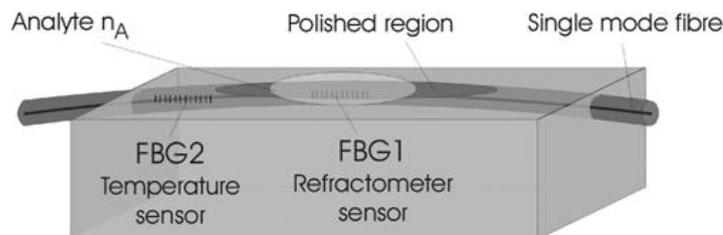


Figura 2.6. Diagrama esquemático del sensor con dos FBG. La FBG2 para compensar los efectos de la temperatura y la FBG1 pulida para medir índices.

2.3.6. Método basado en la modulación de intensidad, N. De La Granja Ríos, [10]

Se dispone de dos fibras distintas separadas una distancia conocida y puestas una frente a otra con el fin de que la luz que emite la primera fibra se acople en la segunda como se muestra en la Figura 2.7. Se introducen en el líquido y el índice de refracción de éste hará que la luz se propague con una dirección y de una forma determinada. Se consigue así que la cantidad de luz que se acopla en la fibra receptora dependa del medio en el que se sumergen las fibras. Las fibras se fijan mediante una pieza de metacrilato como se ve en el esquema del montaje de la Figura 2.7.

Es un método intrusivo que se ayuda de la atenuación que produce un líquido en el haz de luz y en cómo se propaga la luz en el medio líquido produciéndose un cono de emisión en la primera fibra del que parte conseguirá acoplarse en la segunda fibra.

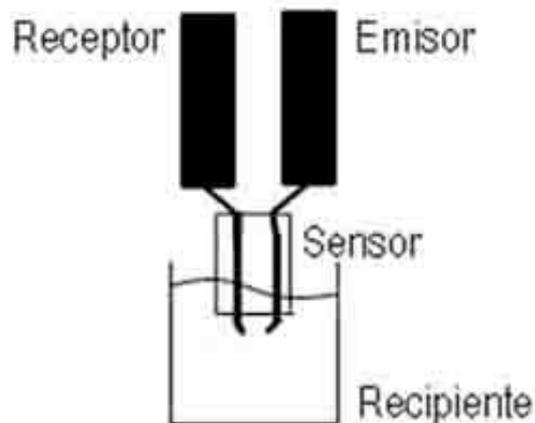


Figura 2.7. Esquema básico sobre la técnica de medida de índice de refracción basado en la modulación de la intensidad.

2.3.7. Método de medida basado en el adelgazamiento de la cubierta de la fibra óptica, A. Banerjee et al., [11]

Una fibra óptica con el revestimiento parcialmente removido es utilizada para detectar el índice de refracción del líquido en el que se sumerge. En la Figura 2.8 se muestra gráficamente el perfil de la fibra óptica.

Tiene una precisión alta y un gran rango de valores de índice de refracción. Se demuestra que la pendiente no es lineal y que la sensibilidad depende del espesor del revestimiento siendo máxima para un espesor de valor intermedio. Además es inmune a la presencia de absorción a la longitud de onda a la que se mide y a la naturaleza química de soluto.

El esquema que se ve en la Figura 2.9 consiste en un rayo láser a $633\mu\text{m}$ pasa por un chopper a 900Hz y a continuación se divide el haz de luz en un rayo de referencia y otro de muestra. El rayo de muestra pasa a través del sensor de fibra con el revestimiento pulido e inmerso en el líquido. Ambos haces de luz llegan a fotodetectores que convierten las señales a corriente y posteriormente se convierte la corriente en voltaje. Cada señal pasa por un amplificador lock-in (amplificador de señal débil) para posteriormente ser tratadas en un PC.

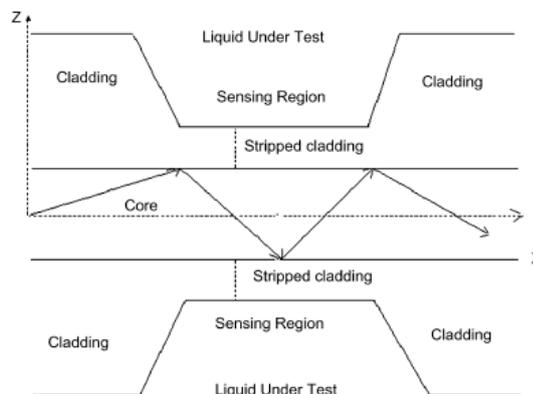


Figura 2.8. Esquema del sensor para índice de refracción de fibra óptica con el revestimiento parcialmente removido.

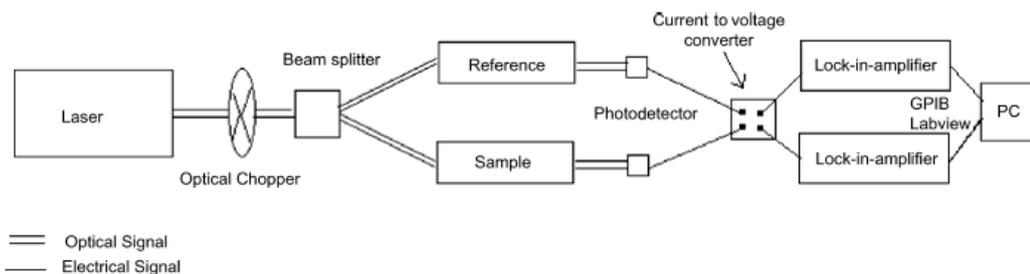


Figura 2.9. Esquema del montaje experimental.

2.4. Referencias

- [1] Bellingham + Stanley. *Refractómetro Abbe 5 Guía del Usuario*. Bellingham + Stanley Ltd, Reino Unido. 2008.
- [2] Original: E.D. Olsen. *Modern Optical Methods of Analysis*. McGraw-Hill Book Company, New York. 1975. Traducción: E. Bosch, M.T. Galcerán, M.D. Prat. *Métodos ópticos de análisis*. Ed. Reverté S.A., España. 1990
- [3] Wikipedia ES. *Ángulo de Brewster*. Última vez editado: 12 jul 2012, a las 13:59. (http://es.wikipedia.org/wiki/Ángulo_de_Brewster)
- [4] J.M. Abellán (Editor). *Láminas delgadas y recubrimientos: Preparación, propiedades y aplicaciones*. 2003.
- [5] P. Polynkin, A. Polynkin, N. Peyghambarian, M. Mansupisur. *Evanescence field-based optical fiber sensing device for measuring the refractive index of liquids in microfluid channels*. Optical Science Center, University of Arizona. 2004.
- [6] C-B. Kim, C.B. Su. *Measurement of the refractive index of liquids at 1.3 and 1.5 micron using a fibre optic Fresnel ratio meter*. Department of Electrical Engineering, Texas A&M University. 2004.
- [7] J. Villatoro, D. Monzón-Hernández. *Low-Cost Optica Fiber Refractive-Index Sensor Based on Core Diameter Mismatch*. Journal of Lightwave Technology, Vol. 24, NO. 3, March, 2006.
- [8] P. Nath, H.K. Singh, P. Datta, K.C. Sarma. *All-fiber optic sensor for measurement of liquid refractive index*. Gauhati University, India. 2008.
- [9] K. Schroeder, W. Ecke, R. Mueller, R. Willsch, A. Andreev. *A fiber Bragg grating refractometer*. Ed. Measurement Science and Technology, IOP Publishing. 2001.
- [10] N. De La Granja Ríos. *Desarrollo de un sensor para la medida del índice de refracción en líquidos, basado en fibras ópticas de plástico*. PFC de la Universidad de Cantabria. Abril, 2003.
- [11] A. Banerjee, S. Mukherjee, R.K. Verma, B. Jana, T.K. Khan, M. Chakroborty, R. Das, S. Biswas, A. Saxena, V. Singh, R. M. Hallem, R.S. Rajput, P. Tewari, S. Kumar, V. Saxena, A.K. Ghosh, J. John, P. Gupta-Bhaya. *Fiber optic sensing of liquid refractive index*. Ed. Elsevier B.V., Holanda. 2006.

Capítulo 3

**Medida del índice de refracción
basado en pérdidas por
curvatura en fibra óptica.**

3.1. Introducción

Con la cantidad de ventajas que tiene la fibra óptica era cuestión de tiempo que su uso se normalizase, su producción se abaratase y sus campos de aplicaciones se ampliasen. Muchas de esas ventajas son físicas, como su ligereza, flexibilidad, tamaño, resistencia a los cambios de temperatura, a la corrosión y las relacionadas con las comunicaciones como la inmunidad a perturbaciones electromagnéticas, baja atenuación independiente de la frecuencia, gran seguridad, etc. ^[1]

La inmunidad a perturbaciones electromagnéticas o a los cambios de temperatura hacen de la fibra un material ideal para fabricar sensores en donde lo primero que se busca es que la medida sea única y exclusivamente dependiente de lo que se desea medir y sin ninguna perturbación ajena que falsee la medida. Todo esto hace que la fibra óptica sea un material perfecto para los sensores y más aún cuando en este proyecto lo que se busca es un sensor de un tamaño muy reducido, portable y fácil y barato de construir.

Como la fibra transporta luz y no electricidad es más segura y útil en aplicaciones relacionadas con líquidos como es el caso de este proyecto.

A pesar de las ventajas, la fibra también tiene desventajas como por ejemplo que la presencia de muchas curvaturas a lo largo de la fibra produce pérdidas en la potencia haciendo que la luz llegue muy debilitada a su otro extremo.

Es esta desventaja uno de los principales motivos por los cuales la fibra se usa para medir índices de refracción en líquidos. La luz se transmite dentro de una fibra recta mediante reflexiones totales internas (RTI) en la interface núcleo-cubierta debido a sus índices de refracción. En el momento en que se produce una curvatura, los ángulos de incidencia en la interface pueden que ya no den lugar al fenómeno de RTI y algunos modos se vean ahora radiados al exterior. La cantidad de modos que se radian dependen del índice de refracción del núcleo, del índice de la cubierta y finalmente del índice del medio exterior.

Con el fin de mejorar el sensor se pule la fibra hasta dejar el núcleo de la fibra al descubierto, de esta manera la reflexión de los modos se producen en la interface núcleo-medio exterior provocando un efecto más importante y una mayor sensibilidad al valor de índice de refracción del medio externo. Se consigue de esta manera que la cantidad de modos radiados al exterior (y por tanto también los transmitidos por la fibra) dependan únicamente del medio exterior. Y esta pérdida de modos es posible cuantificarla en términos de pérdida de potencia en la luz transmitida.

3.2. Propagación de la luz en fibra óptica ^[1] ^[2]

En una fibra óptica la luz se propaga gracias a las reflexiones que tienen lugar en la cubierta de la fibra. La reflexión depende de los índices de refracción tanto de núcleo (n_1) como de la cubierta (n_2). Si los valores son adecuados, esto es que $n_1 > n_2$, se produce el fenómeno de reflexión total interna (RTI) y toda la luz se propaga.

Existen dos tipos de propagación fundamentales. La monomodo (SMF) donde la luz sólo tiene un camino y sólo se propaga un único modo y la multimodo (MMF) donde los haces de luz pueden circular por varios caminos transmitiendo así varios modos. En una MMF no todos los rayos llegan al mismo tiempo al destino, ya que los de más alta frecuencia rebotarán más veces que los de baja frecuencia, los cuales prácticamente transitan por el centro del núcleo.

Dependiendo el tipo de índice de refracción del núcleo, tenemos dos tipos de fibra multimodo:

- **Índice escalonado (Figura 3.1):** El núcleo tiene un índice de refracción constante en toda la sección cilíndrica, tiene alta dispersión modal.
- **Índice gradual (Figura 3.2):** El índice de refracción no es constante a lo largo de la sección cilíndrica, tiene menor dispersión modal y el núcleo está constituido de distintos materiales.

En este proyecto se utiliza un tipo de fibra, concretamente, fibra óptica de plástico (POF) multimodo y con índice escalonado o, también llamado, a salto de índice.

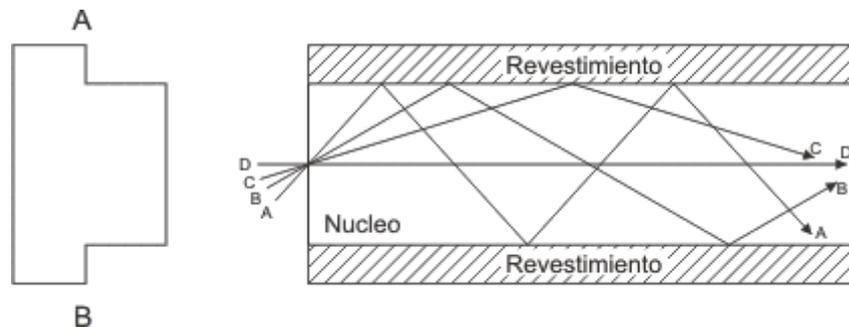


Figura 3.1. Propagación de la luz en una fibra de óptica recta a salto de índice. [3]

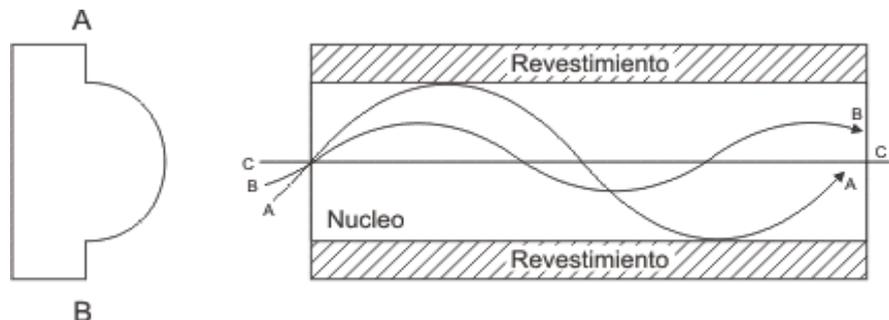


Figura 3.2. Propagación de la luz en una fibra de óptica recta a gradiente de índice. [3]

3.3. Pérdidas por curvaturas ^[4]

La propagación de luz varía su comportamiento al producirse curvaturas en la fibra. Al variar la posición de la superficie sobre la que rebotan los rayos dentro de la fibra conlleva que el ángulo de incidencia en dicha superficie cambie y que ya no produzca el fenómeno de RTI, con lo que los modos de orden más elevado se ven refractados al exterior.

De la ley de Snell que determina los ángulos con los que un haz de luz se refracta y se refleja al cambiar dicho haz de medio con índices de refracción distintos (n_1 y n_2) se deduce un ángulo crítico (θ_c) hasta el cual no se produce RTI según la ecuación 3.1:

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (3.1)$$

Siendo éste ángulo el que forman la normal a la superficie de incidencia con la dirección del propio haz incidente, se tiene que para un ángulo de incidencia menor que el ángulo crítico no se produce RTI y parte del haz de luz se refracta provocando pérdidas. Como este cambio en el ángulo respecto a la superficie de incidencia sólo se produce en las curvaturas son las conocidas como pérdidas por curvatura.

Las pérdidas por curvatura son función del radio y del tipo de fibra (monomodo o multimodo a salto de índice o a gradiente de índice). Por lo general, las pérdidas en una curvatura se pueden dividir en dos tipos de pérdidas: las pérdidas puras de una curvatura y las pérdidas por transición.

- Las **pérdidas por transición** son las más importantes y se deben a que en una zona específica de la fibra, llamada zona de transición y situada al principio de la curva, parte de la potencia de los modos guiados se acopla a los modos radiados.
- Las **pérdidas puras** son constantes a lo largo de toda la curva y son debidas al material y a la estructura de guiado.

3.4. Pérdidas de transición ^{[4] [5] [6]}

Las pérdidas de transición se producen en el inicio de la curvatura, y para el caso de las fibras ópticas de plástico (POF), que contienen gran cantidad de modos propagados, su estudio se puede aproximar con la teoría de rayos y hacer un estudio geométrico como el de la Figura 3.3.

Además, al usar en este proyecto radios de curvatura inferiores a los que permiten otro tipo de aproximaciones sólo es posible realizar el estudio de la propagación de la luz en la zona de transición mediante una solución geométrica que relacione los parámetros de la fibra con los cambios de dirección en los distintos modos de propagación

En la Figura 3.3 se observa como el Ray 1, que en condiciones normales (fibra recta) se propagaría perfectamente gracias al RTI, ha visto que en la curvatura el ángulo (siempre tomando como referencia del ángulo la normal a la superficie de incidencia) con el que incide en el punto B ha disminuido hasta Φ provocando que sea menor que el ángulo crítico (θ_c de la ecuación 3.1.) que produce RTI, siendo en este caso el rayo refractado al exterior. De esta manera todos los modos que incidan en la interface núcleo-cubierta con un ángulo menor al crítico serán refractados. El ángulo crítico varía con los valores del índice de refracción del núcleo (n_1) y del índice de refracción de la cubierta (n_2) como se indica en la ecuación 3.1.

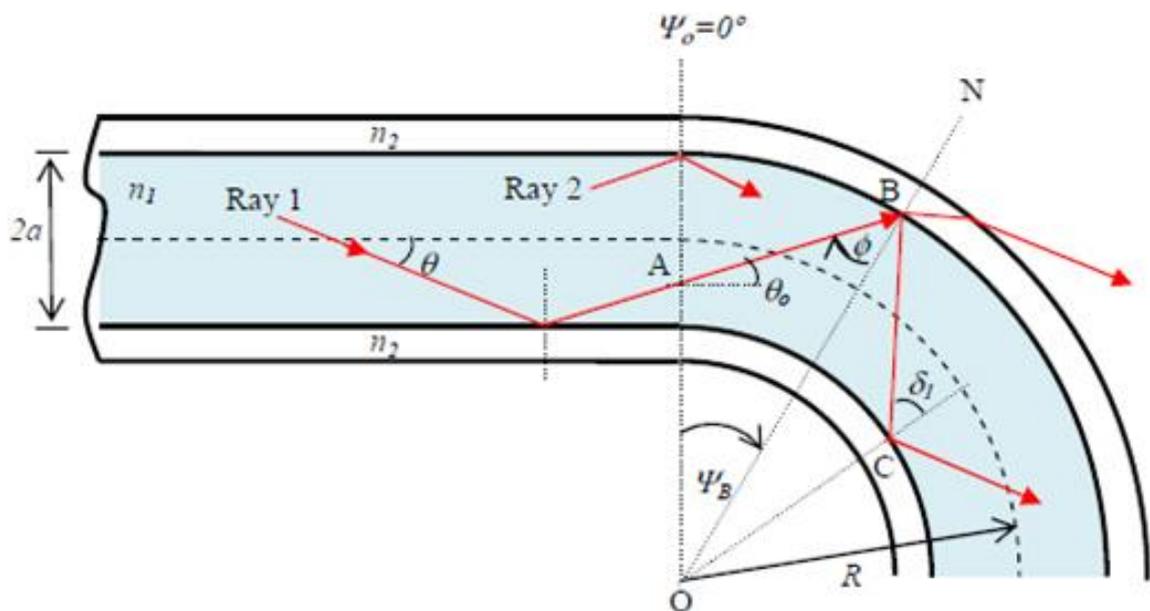


Figura 3.3. Esquema de la propagación de los rayos en una fibra curvada en forma de U con un radio R.

Para un esquema como el de la Figura 3.3 se distinguen dos tipos de rayos, los rayos oblicuos (Ray 2) que no pasan el eje de la fibra, siguen una trayectoria helicoidal alrededor de dicho eje y por tanto en una curvatura presentan rebotes tanto en la interfaz interna como en la externa y se corresponden con los modos de órdenes superiores, y los rayos meridionales o galería (Ray 1) que pasan por el eje de la fibra y en una curvatura sólo tienen contacto con la interfaz externa que se corresponden con los modos de órdenes inferiores.

El estudio geométrico para relacionar el ángulo de incidencia de cada tipo de rayo en la interface núcleo-cubierta con los parámetros de la fibra óptica determina dos ángulos: Φ_1 para los rayos oblicuos y Φ_2 para los rayos galería:

$$\phi_1 = \sin^{-1} \left[\frac{R \pm h}{R + a} \cdot \frac{n_2}{n_1} \right] \quad (3.2)$$

$$\phi_2 = \sin^{-1} \left[\frac{R \pm h}{R + a} \right] \quad (3.3)$$

- R es el radio de curvatura de la fibra.
- a es el radio del núcleo de la fibra.
- h es la altura de la entrada de los rayos medida desde el eje.
- n_1 es el índice de refracción del núcleo.
- n_2 es el índice de refracción de la cubierta.

Y los parámetros de la fibra usada en este proyecto son los que se indican en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1. Parámetros correspondientes a la fibra óptica de plástico utilizada en este proyecto y ángulos de incidencia de los rayos para cada radio de curvatura de los que se dispone con valores de h de ejemplo al resolver las ecuaciones 3.2 y 3.3.

Parámetros de fibra óptica de plástico						
$n_1 = 1.492$		$n_2 = 1.402$		$a = 0.49 \text{ mm}$		
Radios de curvatura de la fibra y ángulo de incidencia de los rayos						
$R = 2.5 \text{ mm}$		$R = 5 \text{ mm}$		$R = 8 \text{ mm}$		
$h \text{ (mm)}$	Φ_1	Φ_2	Φ_1	Φ_2	Φ_1	Φ_2
-0,49	39.17°	42.24°	50.53°	55.23°	56.22°	62.20°
0	51.78°	56.73°	58.85°	65.61°	62.31°	70.44°
+0,49	70°	90°	70°	90°	70°	90°

Cabe destacar que también se podría calcular los ángulos de incidencia de rayos los con la interfaz interna (δ_1) pero su influencia no es lo suficiente determinante como para que haya necesidad de tenerlos en cuenta.

De las ecuaciones 3.2 y 3.3 y de la Tabla 3.1 se tiene directamente que a medida que R disminuye el ángulo de incidencia es cada vez menor, produciendo esto que cada vez menos rayos sean guiados y provocando más

pérdidas por reflexión. De aquí se concluye que, cuando menor sea el radio de curvatura R más pérdidas tendrá el sensor y por lo tanto, será más sensible.

A continuación, con motivo de mejorar aún más la sensibilidad de la pieza con el medio exterior se realizó un lijado oblicuo de parte de la pieza y del revestimiento de la fibra, tomando como origen el inicio de la región curvada y con un ángulo β igual al complemento del ángulo crítico de la fibra recta α , dejando así una superficie elíptica del núcleo en contacto directo con el medio exterior (Figura 3.6). El ángulo crítico para el caso de este proyecto según la ecuación 3.1 es $\alpha = 70^\circ$ por lo que el pulido se realizó a $\beta = 20^\circ$.

La relación del espesor que se debe pulir con los parámetros de la fibra viene dada por la ecuación 3.4:

$$\varepsilon = R + a - \sqrt{(R + a)^2 - y^2} \quad (3.4)$$

El valor 'y' se puede conocer a partir de la Figura 3.6. Para ello se parte del triángulo isósceles como el de la Figura 3.4 formado por el ángulo ψ y los dos ángulos iguales α . Los dos lados iguales tienen una longitud de $R + a$ y el lado desigual equivale a $2y$. Por trigonometría se obtiene un valor de y para cada valor de R a partir de la ecuación 3.5 y de ahí un valor de espesor determinado.

$$y = (R + a) \cdot \cos(70^\circ) \quad (3.5)$$

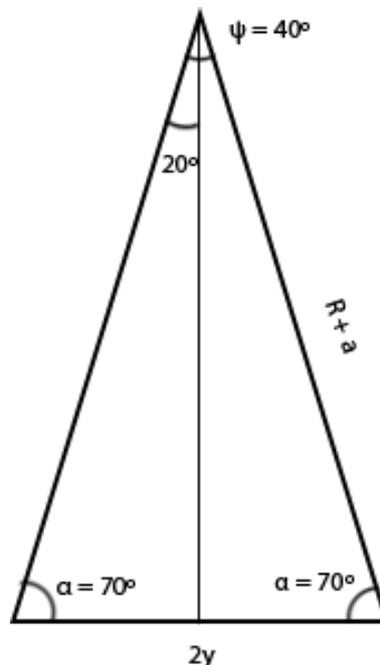


Figura 3.4. Triángulo que se forma en la curvatura de la fibra desde el centro de la curvatura hasta el lado pulido y que determina la distancia longitudinal de la parte al descubierto

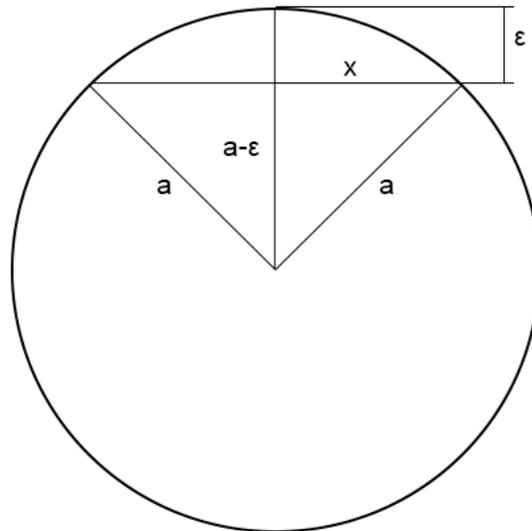


Figura 3.5. Estudio geométrico sobre el perfil de la fibra óptica para el cálculo de x .

El perfil de la fibra mostrado en la Figura 3.5 permite calcular, conociendo el radio de la fibra (a) y el espesor pulido (ϵ) el valor de ' x ' para poder conocer cuanta superficie del núcleo de la fibra se encuentra en contacto con el medio exterior.

Aplicando el teorema de Pitágoras en el triángulo de la Figura 3.5 se obtiene directamente el valor de ' x ' según la ecuación 3.6.

$$x = \sqrt{a^2 - (a - \epsilon)^2} \quad (3.6)$$

Tabla 3.2. Valor del largo (y), ancho (x) y superficie (S) de la elipse, obtenidos mediante las ecuaciones 3.5 y 3.6, y del espesor a pulir (ϵ), obtenido al sustituir valores en la ecuación 3.4, para cada radio de curvatura de la fibra.

Valor del largo (y) y ancho (x) y superficie (S) de la elipse y del espesor (ϵ) de la zona pulida para cada sensor			
R (mm)	2.5	5	8
y (mm)	1.023	1.878	2.904
ϵ (μm)	180.45	331.2	512.1
x (mm)	0.379	0.463	0.489
S (mm^2)	1.218	2.731	4.461

Se observa que a medida que el radio de curvatura aumenta hay que retirar más material, el espesor es mayor y la superficie de la elipse también, esto provoca que una mayor parte del núcleo esté al descubierto, por lo que cabría suponer que al ser la zona al descubierto mayor las pérdidas también van a ser mayores, pero posteriormente esto se comprueba que no es cierto, ya que lo más influyente en las pérdidas en este caso viene dado por el ángulo de incidencia vistos en la Tabla 3.1.

Con todo ello en la Figura 3.6 se ve que tras el pulido el ángulo crítico ya no es función del índice de la cubierta (n_2) sino que ahora es función del índice del medio exterior (n_0). Para índices n_0 menores que el de la cubierta (n_2), el ángulo crítico necesario para que se produzca RTI y la luz pueda propagarse también es menor permitiendo que una mayor cantidad de rayos sea reflejada de nuevo al núcleo. De la misma manera para índices n_0 superiores a n_2 , el ángulo crítico será mayor y más rayos serán refractados al exterior. De nuevo las reflexiones en la interfaz interna se pueden no tener en cuenta.

En el presente proyecto las tres piezas utilizadas se encontraban previamente fabricadas en investigaciones anteriores con los radios indicados en la Tabla 3.1 de 2.5 mm, 5 mm y 8 mm.

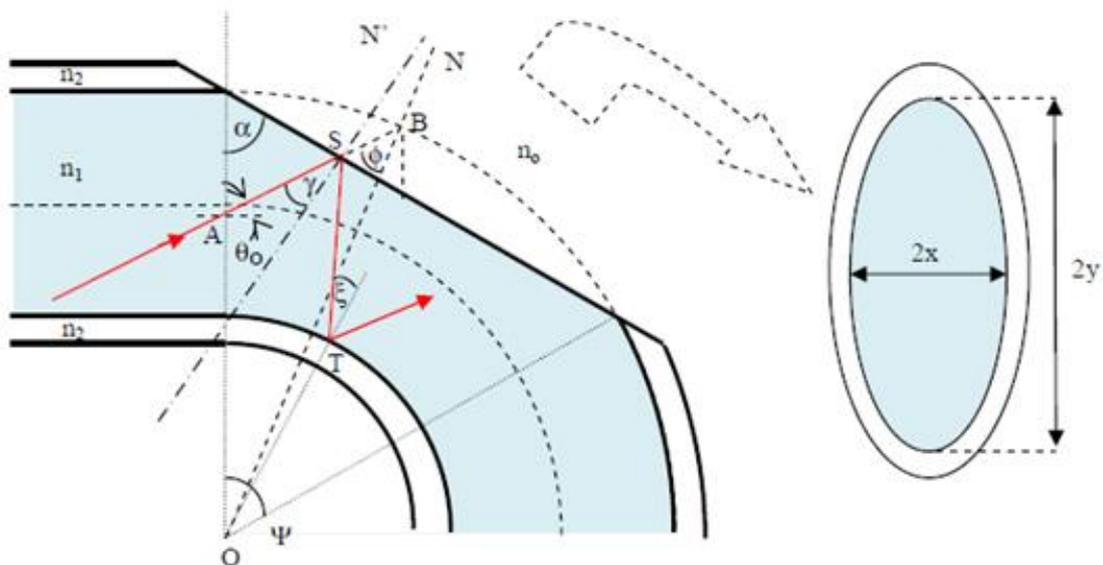


Figura 3.6. Esquema de la propagación de los rayos en una fibra curva en forma de U con un radio R y un pulido lateral oblicuo al comienzo de la curva.

3.5. Referencia

- [1] Wikipedia. *Fibras ópticas*. Última vez editado el 14 jul 2012, a las 00:33. 2012. (http://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_óptica)
- [2] L.I.E Maya, A.G. Román. Propagación de la luz en la fibra óptica. Ed. Entérate, Universidad Nacional Autónoma de México. Año 4, Número 42, Septiembre de 2005.
- [3] TextosCientíficos.com. *Propiedades de la fibra óptica*. 2006. <http://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/propiedades>
- [4] M. Lomer, D. Blanco, J. Zubía, C. Jauregui, J. M. López-Higuera. *Sensor de nivel de líquido multipunto basada en pérdidas de curvatura basada en FOP*. 2005.
- [5] M.S. García. *Estudio y realización de un sensor de humedad con fibras ópticas. Capítulo II: Estudio teórico del guiado en fibras ópticas multimodo*. PFC presentado en la Universidad de Cantabria, España. Junio 2006.
- [6] I.A. Balbín. *Diseño y realización de un refractómetro basado en fibras ópticas para aplicaciones en líquidos*. PFC presentado en la Universidad de Cantabria, España. Septiembre 2011.

Capítulo 4

Resultados experimentales

4.1. Introducción

Hasta ahora se ha detallado todo el estudio teórico y los fundamentos del proyecto, pero el eje fundamental de este proyecto es la parte experimental, la tarea principal consiste en estudiar la variación del índice de refracción y calibrar el sensor de la medida para distintos líquidos en función de su concentración y de su temperatura. El comportamiento real del dispositivo es el que nos permite conocer su utilidad, su precisión, sus restricciones. Nos da una idea de dónde es más adecuado su uso y permite sacar conclusiones para posteriores mejoras. Por ello el análisis experimental es un paso fundamental en el diseño de cualquier dispositivo y esa es la razón principal del presente proyecto.

En el proyecto se ha dispuesto de tres piezas con una configuración como la indicada en el esquema de la Figura 3.5, éstas previamente fabricadas sobre metacrilato en proyectos anteriores y cada una tiene un radio de curvatura diferente, concretamente 2.5 mm, 5 mm y 8 mm.

El estudio se ha centrado principalmente en las concentraciones de agua con sal y de agua con azúcar y como la cantidad de agua o sal diluida en agua modifica las propiedades físicas de la mezcla y concretamente el valor del índice de refracción. Además también se estudia cómo estas concentraciones varían con la temperatura.

Para realizar las concentraciones se han tenido en cuenta la cantidad de soluto que saturaba dicha concentración, pero también el material del que se disponía ha limitado las medidas, por ejemplo, en el caso del azúcar tanto el volumen del recipiente, como el tiempo que tardaba en disolverse todo y la disponibilidad de paquetes de azúcar han hecho que fuese imposible llegar hasta tener la disolución saturada.

En el caso de la medida para el efecto de la temperatura esta se ha visto limitada por los distintos materiales que no soportaban temperaturas excesivamente altas e incluso por el hervidor eléctrico utilizado para calentar el agua.

El proceso mecanizado y los pasos a seguir se explicarán más detenidamente en el apartado correspondiente a cada medida.

Con las diferentes medidas realizadas se procederá a construir unas gráficas que aporten más valor a los resultados obtenidos y se obtendrán valores útiles para conocer cuál de los tres sensores es más válido.

4.2. Montaje óptico

El modelo (Figura 3.5) de las piezas se fabricó en piezas de metacrilato, al que se le hicieron unos surcos con una curva de 180° y con un radio de curvatura determinado en el que se alojan las fibras para finalmente asegurar la fibra al metacrilato por medio de pegamento. Posteriormente la pieza fue pulida con una lija muy fina hasta conseguir que el núcleo estuviese al aire libre con un espesor adecuado quedando una pieza como la de la Figura 4.1.

Los tres sensores diferentes utilizados en este proyecto tienen tres radios de curvatura distintos (2.5 mm, 5 mm y 8 mm) como se ve en la Figura 4.2, que nos aportaran tres medidas distintas y a partir de los resultados obtenidos se puede decidir cuál de los tres es el más apropiado a la hora de funcionar como sensor.



Figura 4.1. Sensor de fibra óptica basado en pérdidas por curvatura fabricado sobre metacrilato.

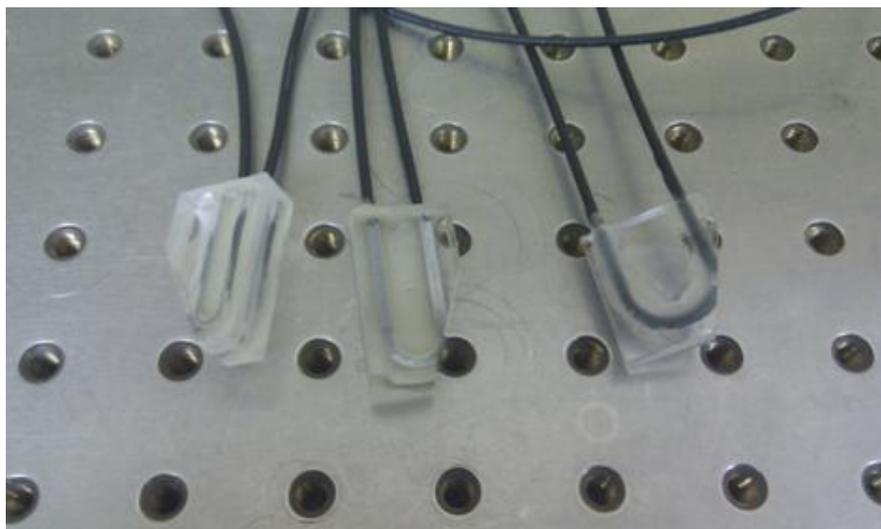


Figura 4.2. Piezas usadas en el proyecto con distintos radios. De izquierda a derecha $R = 2.5$ mm, $R = 5$ mm y $R = 8$ mm.

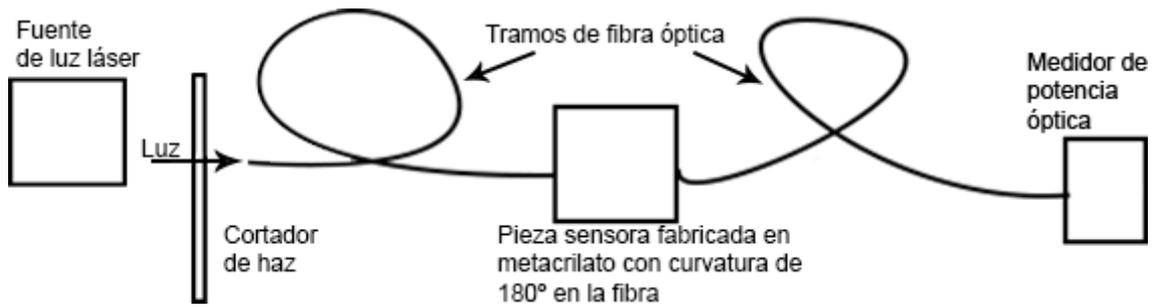


Figura 4.3. Esquema básico del montaje óptico realizado en el laboratorio.

En el laboratorio se ha realizado un montaje como el mostrado en el esquema de la Figura 4.3.

La fuente de luz láser de helio-neón (HeNe) de 633nm de longitud de onda. El cortador de haz se controla mediante una fuente para modular la luz a 270Hz con el fin de que la señal esté por encima del ruido de fondo del receptor y que la luz ambiente no influya en la medida. El medidor es un medidor de potencia óptica Anritsu que trabaja tanto en vatios como en dBm y que consta de un modo de funcionamiento que permite conocer la diferencia de una medida respecto de otra medida referencia.

El montaje final en el laboratorio con los dispositivos reales se muestra más completo en la Figura 4.4 y Figura 4.5.

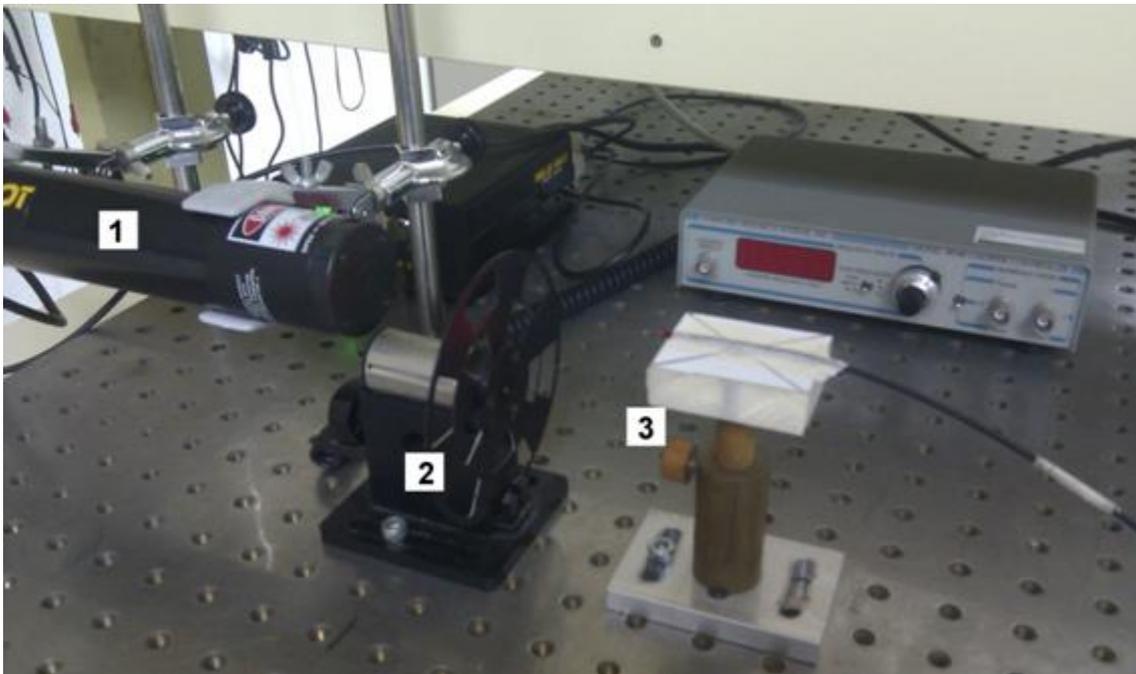


Figura 4.4. Montaje final en el laboratorio. Parte 1. (1) Fuente de luz láser de helio-neón (HeNE) de 633nm. (2) Cortador de haz de luz. (3) Pieza de sujeción que estabiliza la fibra y mejora el acoplo de luz.

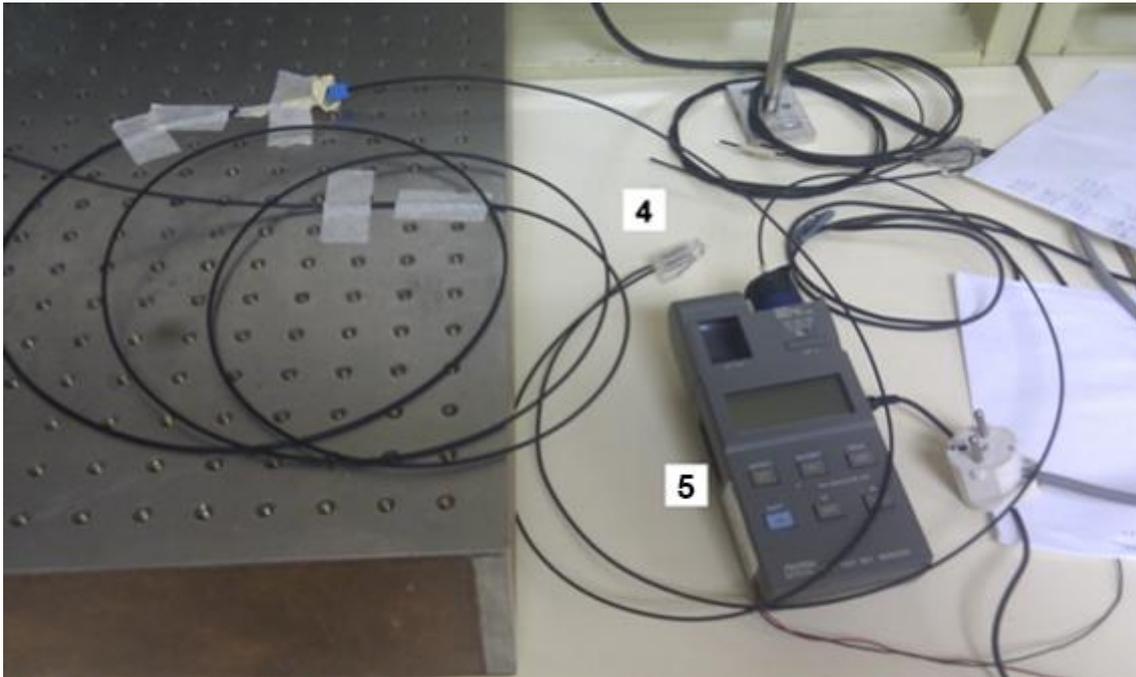


Figura 4.5. Montaje final en el laboratorio. Parte 2. (4) Pieza sensora de metacrilato con una curvatura en la fibra de 180°. (5) Medidor de potencia óptica Anritsu.

4.3. Método de medida

Haciendo uso del montaje detallado en el punto anterior se han seguido unas pautas para hacer las medidas lo más independientes y seguras posible.

Para ello se disponen de 11 recipientes con capacidad para unos 25 ml cada uno donde irán las 11 muestras que se van a medir de las concentraciones (tanto de agua con sal como de agua con azúcar). Cada muestra tendrá una cantidad de soluto distinta desde 0 % hasta un máximo de soluto, lo que da como resultado 11 medidas desde el 0 % de soluto hasta el 100 % del soluto en el caso de la sal o al 50 % en el caso del azúcar. Cabe destacar que cuando se indica que el 100 % no quiere decir que el 100 % de la disolución sea soluto, sino que se corresponde con la cantidad máxima de soluto que acepta el líquido disolvente sin que la disolución se sature. El porcentaje de la concentración no es ninguno de los porcentajes típicos de las concentraciones como pueden ser el %m/m, %m/V o %V/V, es simplemente un porcentaje para representar proporciones entre la falta de soluto 0 % y el máximo de soluto aceptado por el disolvente 100 %.

Como se tienen tres piezas distintas se tendrán que realizar tres medidas para cada recipiente, para mantener la coherencia y no introducir error en la medida, se han seguido unos pasos determinados con el fin de provocar las menores modificaciones en el montaje, para ello lo que se ha hecho ha sido realizar las 11 medidas seguidas con la misma pieza, secando y limpiando la

pieza con cada medida, al acabar cambiar a la siguiente pieza, realizar las 11 medidas con esta pieza y repetir lo mismo para la última pieza.

Para determinar la cantidad exacta de soluto se disponía de una báscula electrónica con un decimal de exactitud. La cantidad de soluto se añade al recipiente correspondiente a su porcentaje que se encuentra lleno con 20 ml de agua de grifo. La mezcla se disuelve agitándola con la ayuda de una varilla hasta que el soluto se hace indistinguible a la vista.

En el caso del efecto de la temperatura el procedimiento consiste en: a partir del líquido a temperatura ambiente, unos 15° en el laboratorio, se le va mezclando con otra cantidad del mismo tipo líquido previamente calentado hasta 70° C. A medida que va aumentando la temperatura de la mezcla se comprueba el resultado obtenido en el medidor óptico, obteniendo medidas para cada 5° C para hacer un total de 12 medidas. A continuación, tras haber llegado a la temperatura máxima de 70° C se le deja descender sin ninguna ayuda hasta llegar de nuevo a la temperatura ambiente mientras se vuelven a tomar medidas cada vez que desciende 5° C. Para esta medida sólo se mide con la pieza de radio de curvatura 2.5 mm al haber comprobado tras varias medidas que es la pieza más útil para la técnica de medida utilizada al presentar una sensibilidad mucho mayor que el resto y una mayor exactitud. El control continuo de la temperatura se ha llevado con un polímetro digital.

Las cantidades exactas que se han usado para las dos concentraciones se han determinado teniendo en cuenta la solubilidad de cada soluto y la viabilidad de realizar dicha mezcla. Con el inconveniente de que la báscula sólo tenía un decimal de precisión ha sido obligatorio redondear el valor teórico a uno real que se pudiese cuantificar correctamente.

Agua (H₂O) + sal (NaCl): La solubilidad de la sal en agua se conoce y es de 36gr/100ml, y los recipientes tienen 20 ml de agua, luego, 7.2 gr de sal saturan la cantidad de agua del recipiente. A partir de ese dato se obtienen las proporciones correspondientes para cada recipiente siendo al final los indicados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Cantidades de soluto utilizadas hasta saturar la disolución de agua con sal.

%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
teoría(gr.)	0.00	0.72	1.44	2.16	2.88	3.60	4.32	5.04	5.76	6.48	7.20
real(gr.)	0.0	0.7	1.4	2.1	2.9	3.6	4.3	5.0	5.8	6.5	7.2

Agua (H₂O) + azúcar/sacarosa (C₁₂H₂₂O₁₁): La solubilidad del azúcar en agua se conoce y es de 203.9gr/100ml, y los recipientes tiene 20 ml de agua, luego 40.78 gr de azúcar saturan la cantidad de agua del recipiente. En este caso esa cantidad no es posible utilizarla debido al volumen que ocuparía, a la disponibilidad de azúcar que hay en el laboratorio y al tiempo que conlleva realizar esa mezcla sin los materiales adecuados, para resolver el problema se toma como límite al 50% de la cantidad de azúcar que satura el agua, esto es con 20.39 gr de azúcar en vez de 40.78 gr. No es lo máximo posible pero sí es suficiente para obtener la tendencia y sacar conclusiones.

Tabla 4.2. Cantidades de soluto utilizadas hasta saturar la disolución de agua con azúcar.

%	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
teoría(gr.)	0.0	2.039	4.078	6.117	8.156	10.195	12.234	14.273	16.312	18.351	20.39
real(gr.)	0.0	2.0	4.1	6.1	8.1	10.2	12.2	14.3	16.3	18.3	20.4

4.4. Resultados obtenidos

Con el montaje del punto 4.2 y siguiendo el método descrito en el punto 4.3 se procede definitivamente a realizar las medidas correspondientes. Lo que se representa en las gráficas corresponde a las pérdidas en dB que introduce el nuevo medio respecto de la potencia con el sensor al aire, es decir, se establece la medida de la potencia óptica con el sensor al aire como referencia y se introduce posteriormente el sensor en el líquido provocando así unas pérdidas determinadas distintas a las provocadas con el sensor al aire. Se podría medir la potencia en dBm con el sensor al aire y con el sensor en el líquido y de ahí calcular la diferencia, pero este proyecto se aprovecha de la posibilidad que ofrece el medidor óptico de dar medidas en dB relativas a una referencia, que como ya se ha dicho será la potencia en contacto con el aire. El procedimiento consiste en: con el montaje completo y teniendo el sensor con el aire como medio exterior medir la potencia óptica y establecer ese valor como la referencia, posteriormente introducir el sensor en el líquido y apuntar el valor en dB que proporciona el medidor. Ese valor apuntado es el valor útil que representa la diferencia entre la potencia óptica al final de la fibra cuando el sensor se sumerge en el líquido con la potencia óptica al final de la fibra cuando el sensor se encuentra únicamente en contacto con en el aire o lo que es lo mismo, las pérdidas que provoca el líquido en el sensor.

Se repitieron las mismas medidas todas las veces que fue posible teniendo en cuenta el tiempo y el material del que se disponía para construir así gráficas que permitan tener más controlado el posible error introducido.

Para que los resultados tengan más valor se agrupan todos en una misma gráfica. Se representa la línea de tendencia de la media de todas las medidas para cada sensor y de la misma manera se obtiene el valor R² de esa recta. Además para cada medida y para cada sensor se obtiene el valor R² entre los valores medidos y los valores promedios dándonos información sobre

cuán bien se acercan los valores al valor promedio y que sensor presenta una mejor estimación. Esta información es determinante a la hora de distinguir que sensor tiene más sensibilidad y por tanto es más adecuado a la hora de utilizarlo.

Los líquidos caracterizados han sido: agua, disolución de agua con sal y de agua con azúcar. En los tres casos se ha estudiado el efecto de la temperatura. En el caso del agua no se ha utilizado ningún proceso de medida específico sino que directamente es la medida correspondiente al 0 % de soluto para cada caso.

Como complemento se tuvieron en cuenta otros líquidos como aceites, cervezas o polímeros, pero no se consiguió aportar información suficiente como para incluirlo en el estudio.

4.4.1. Agua con sal

Se realizan hasta 5 medidas distintas y se representan los resultados en la Figura 4.6 y la Tabla 4.3, de las cuales se sacan las siguientes conclusiones:

- Las pérdidas crecen con la cantidad de sal en agua. Ocurre siempre, y traducido a variaciones en el índice de refracción quiere decir que también crece cuanto más sal haya en el agua. El índice de refracción aumenta con la cantidad de sal en agua.
- En todos los casos la curva de $R = 2.5$ mm es la que mayores pérdidas y mayor pendiente presenta de las tres y por tanto es la que mayor sensibilidad tiene a la hora de hacer medidas y la que mejores resultados dará. Por idéntica razón la pieza de $R = 5$ mm es mejor que la de $R = 8$ mm. La conclusión es que, como se había deducido teóricamente, cuanto menor sea el radio de curvatura mejor será el sensor implementado. No influye tanto la cantidad de superficie del núcleo en contacto con el medio exterior como el radio de curvatura y el cambio en los ángulos de incidencia de los rayos.
- Para las tres piezas el valor de R^2 es muy elevado, lo que se traduce en una muy buena estimación de la tendencia. Y se observa que en la curva para $R = 2.5$ mm el valor es un poco mejor, por lo que incluso en este sentido el sensor también sería mejor.

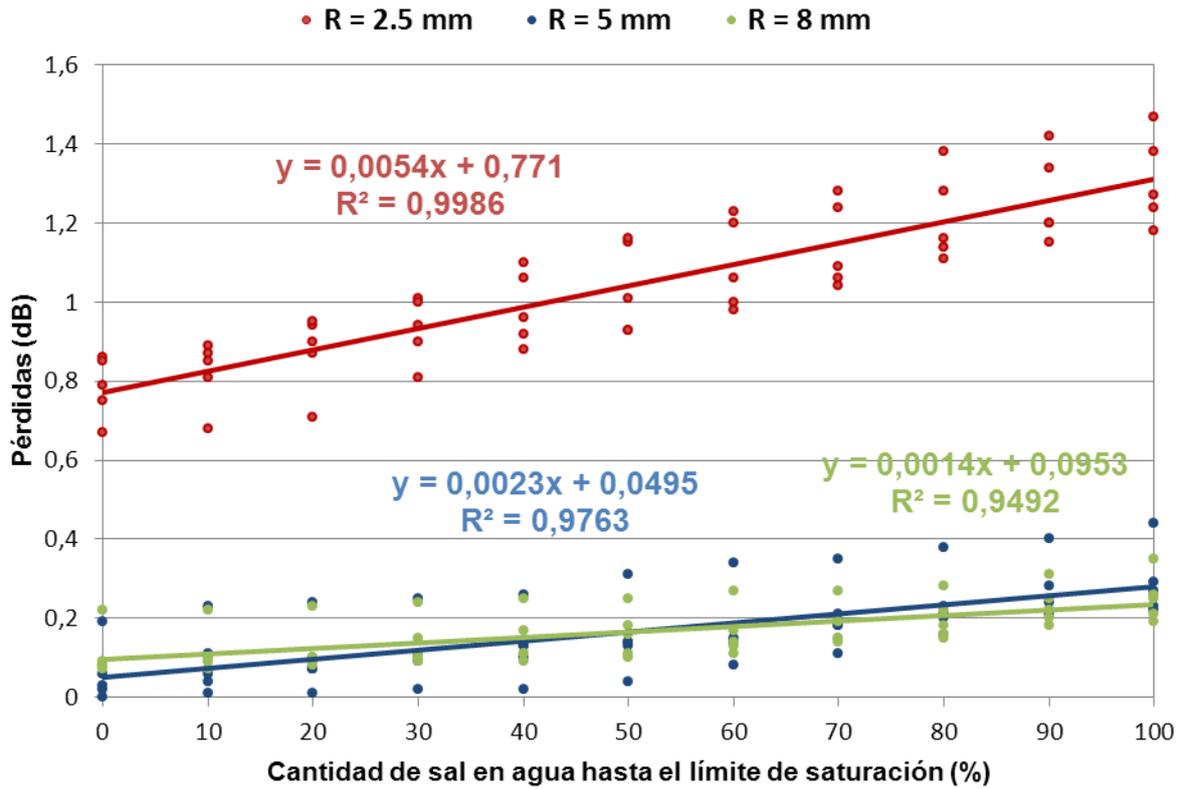


Figura 4.6. Pérdidas en función de la cantidad de sal en agua.

Tabla 4.3. Valor R^2 de cada medida con respecto a los puntos promedios en cada pieza para una disolución de agua con sal.

		Valor R2 para cada medida con respecto a la línea de tendencia.				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5
Radio (mm)	2,5	0,9824	0,9962	0,9831	0,9799	0,9939
	5	0,9959	0,9563	0,9534	0,976	0,9800
	8	0,9381	0,9619	0,8393	0,9610	0,9570

4.4.2. Agua con azúcar

Se realizan ahora hasta 7 medidas distintas y se representan los resultados en la Figura 4.7 y la Tabla 4.4, de las cuales se sacan las siguientes conclusiones:

- Las pérdidas, al igual que en el caso anterior, crecen con la cantidad de azúcar en agua. También ocurre siempre, así que el índice de refracción crece a medida que aumenta la cantidad de azúcar en agua.
- En todos los casos la curva de $R = 2.5$ mm es la que mayores pérdidas y mayor pendiente presenta de las tres y por tanto es la que mayor sensibilidad tiene a la hora de hacer medidas y la que mejores resultados dará. De la misma manera la pieza de $R = 5$ mm es mejor que la de $R = 8$ mm. De nuevo se comprueba que, como ya se había deducido teóricamente, cuanto menor sea el radio de curvatura mejor será el sensor implementado y que no influye tanto el que un sensor tenga mayor superficie del núcleo en contacto directo con el medio exterior.
- A diferencia del caso de la sal, para el azúcar las pérdidas y las pendientes de las líneas de tendencia son mucho más elevadas, lo que nos lleva a la conclusión de que este método de medida es mucho más útil para concentraciones con azúcar que concentraciones con sal, puesto que la sensibilidad que presenta es mucho más alta.
- De nuevo en las tres piezas el valor de R^2 es muy elevado, lo que se traduce en una muy buena estimación de la tendencia. Y se observa que en la curva para $R = 2.5$ mm, por lo general el valor es un poco mejor, por lo que incluso en este sentido el sensor también sería mejor.

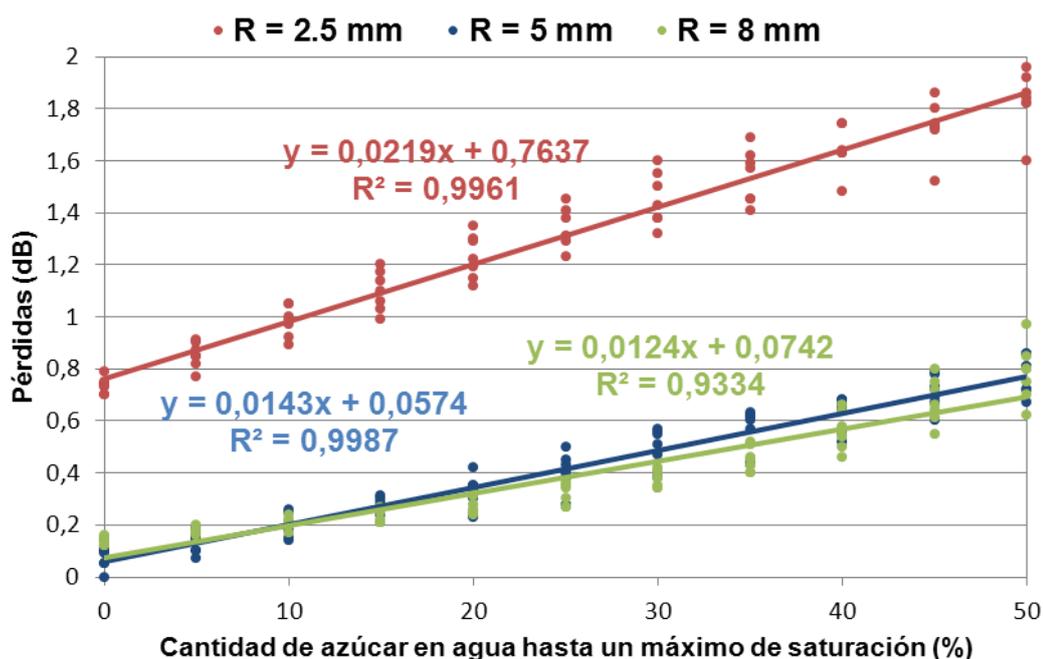


Figura 4.7. Pérdidas por curvatura de fibra óptica en función de la cantidad de azúcar en agua.

Tabla 4.4. Valor R^2 de cada medida con respecto a los puntos promedios en cada pieza para una disolución de agua con azúcar.

		Valor R2 para cada medida con respecto a la línea de tendencia						
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7
Radio (mm)	2.5	0,9701	0,9900	0,9959	0,9833	0,9964	0,9980	0,9944
	5	0,9935	0,9627	0,9939	0,9596	0,9935	0,9965	0,9878
	8	0,9910	0,9862	0,9952	0,9751	0,9946	0,9973	0,9865

4.4.3. Efecto de la temperatura

Se procede a continuación a estudiar la influencia que tiene la temperatura en las concentraciones que se han tenido en cuenta. Para ello el procedimiento consiste en realizar dos series de medidas completas, una cuando se va elevando el valor de la temperatura (puntos azules) y otro cuando se le deja descender hasta llegar de nuevo a la temperatura ambiente (puntos rojos). Sólo se usa un único sensor, el de radio 2.5 mm ya que se ha visto que es el más adecuado para obtener resultados experimentales. Las concentraciones tienen el nivel máximo posible de soluto (el 100 % del límite de saturación en sal y el 50 % del límite de saturación en azúcar). El rango de temperaturas va desde la temperatura ambiente de 15° C hasta los 70° C a partir de los cuales los materiales utilizados en el montaje empiezan a ver modificadas sus propiedades y a introducir error en la medida. Además el procedimiento del método de medida también se complica.

- **Agua**

El primer líquido a tener en cuenta es el agua de grifo sin ningún añadido, aunque con todas sus impurezas. Se observa en la gráfica cómo la curva siempre tiene una tendencia descendente y cómo a partir de los 45°C la tendencia aumenta y la variación se hace más brusca. Esto se traduce en una disminución del valor del índice de refracción a medida que desciende la temperatura.

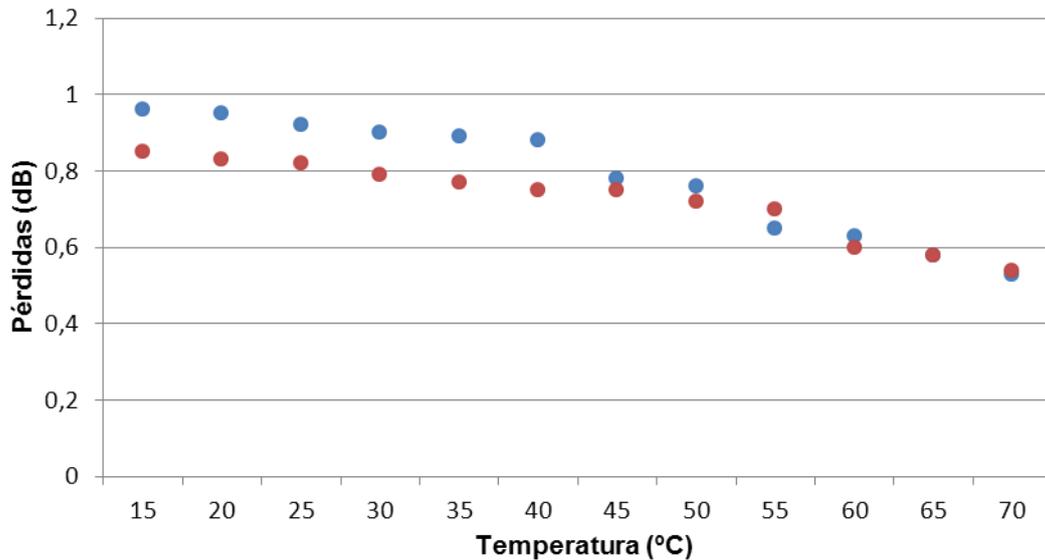


Figura 4.8. Variación de las pérdidas en agua en función de la temperatura.

- **Agua con azúcar**

Se dispone ahora de agua con un 50% del máximo de soluto de azúcar. Siguiendo el mismo procedimiento se obtienen dos curvas en las que se puede observar como las pérdidas se mantienen más o menos constantes hasta los 55°C a los que se produce un cambio brusco en el que se reducen las pérdidas casi a la mitad. Por lo tanto se ve que de nuevo las pérdidas, y con ello el índice de refracción, se reduce a medida que aumenta la temperatura. Y el cambio, como en el caso anterior, se hace más brusco a temperaturas altas.

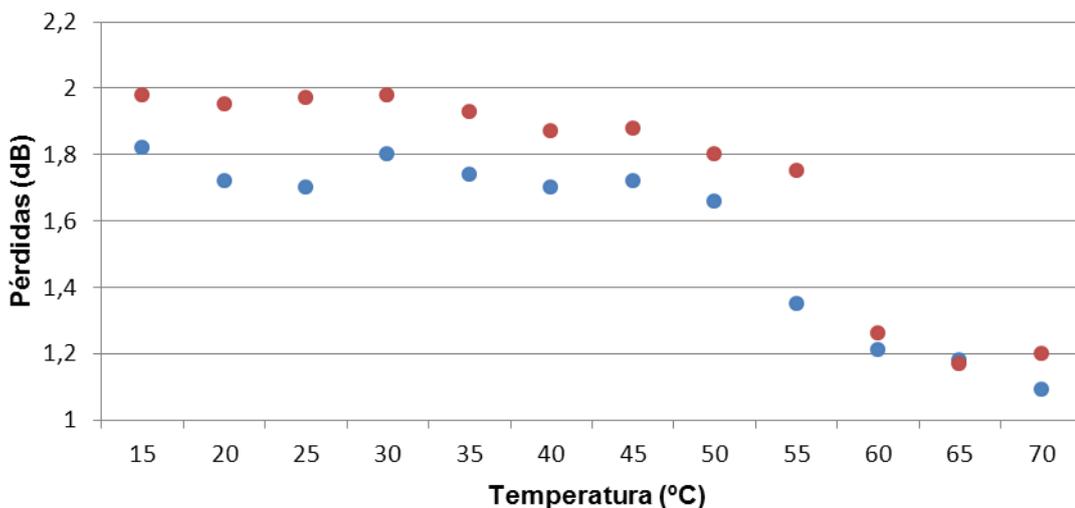


Figura 4.9. Variación de las pérdidas en agua con azúcar en función de la temperatura.

- **Agua con sal**

Es el turno ahora de la disolución de agua con sal al 100 % de lo que acepta sin saturarse. En este caso se realiza el primer análisis elevando la temperatura y los resultados obtenidos son muy aleatorios y no guardan ninguna coherencia, por lo que viendo que no se va a llegar a ningún resultado útil se deshecha realizar el segundo análisis con la temperatura descendiendo. La conclusión que se saca de este resultado es que como en este procedimiento el control de la temperatura se lleva con un polímetro y su cabeza sensora es metálica, el efecto corrosivo de la sal provoca fallos en las medidas que hace que el dato obtenido en la pantalla del polímetro no sea la temperatura correcta y que por tanto el control de la temperatura sea inútil, dando lugar a que las pérdidas de potencia sean imposibles de representar correctamente respecto al eje de temperaturas.

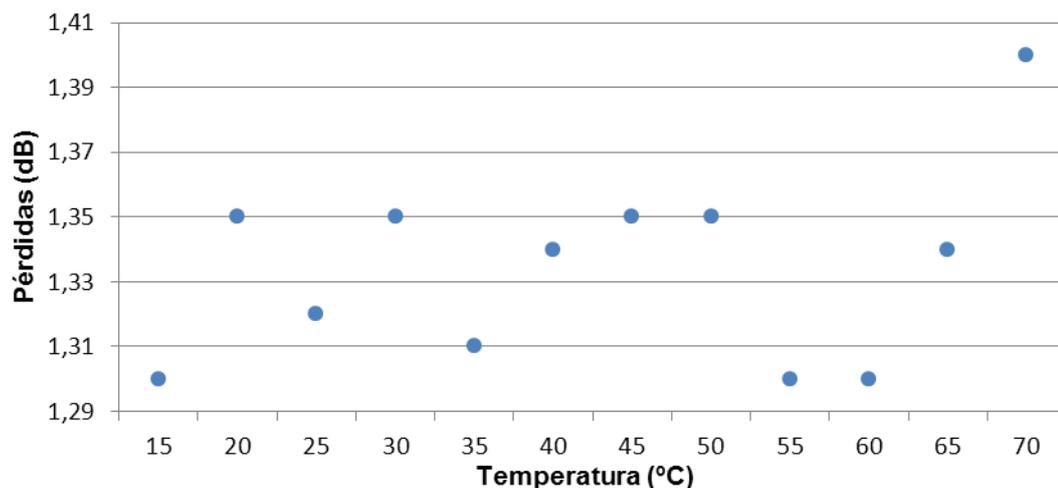


Figura 4.10. Variación de las pérdidas en agua con sal en función de la temperatura.

Los tres estudios sobre el efecto de la temperatura tienen coherencia con el principio teórico de que al aumentar la temperatura de un material éste se dilata, sus moléculas absorben calor y su energía cinética aumenta. Al vibrar las moléculas se crean huecos más amplios entre ellas y el volumen aumenta. Todo esto hace que se oponga menos resistencia al paso de otras partículas como pueden ser los fotones de la luz, consiguiendo en ese caso que la velocidad de la luz no se vea reducida tanto como si el material estuviese a una temperatura inferior. Por lo tanto los resultados obtenidos respetan teorías ya existentes.

Se puede deducir que, conociendo el efecto de la dilatación con la temperatura en un medio y lo que esto provoca en el comportamiento de un haz de luz que lo atraviesa, en los líquidos el índice de refracción siempre se reduce a medida que aumenta la temperatura a la que se encuentra dicho líquido. El cambio de índice de refracción de un medio determinado en función de la temperatura será más abrupto cuanto mayor sea el efecto de la dilatación térmica en dicho medio.

4.5. Comparación con otras técnicas de medida ^[1]

Los resultados obtenidos pueden ser comparados con los de otros estudios anteriores para poder comprobar si lo concluido en este proyecto tiene coherencia con lo que se ha medido en otros estudios y usando técnicas distintas como las indicadas en el punto 2.3.

4.5.1. Agua con sal

En el estudio de la referencia [1], utilizando la técnica indicada en el punto 2.3.6, para el caso de concentraciones de agua con sal, y teniendo en cuenta que utiliza porcentajes de concentración e indica el resultado en valores de índice de refracción, se observa como la tendencia es a aumentar a medida que aumenta el porcentaje de sal en agua. También se observa como los valores medidos se alejan bastante de los teóricos, hecho que no se produce en el caso del azúcar y que nos corrobora que las concentraciones sacarosas son más adecuadas para este tipo de técnicas que se basan en pérdidas de potencia óptica utilizando fibras ópticas.

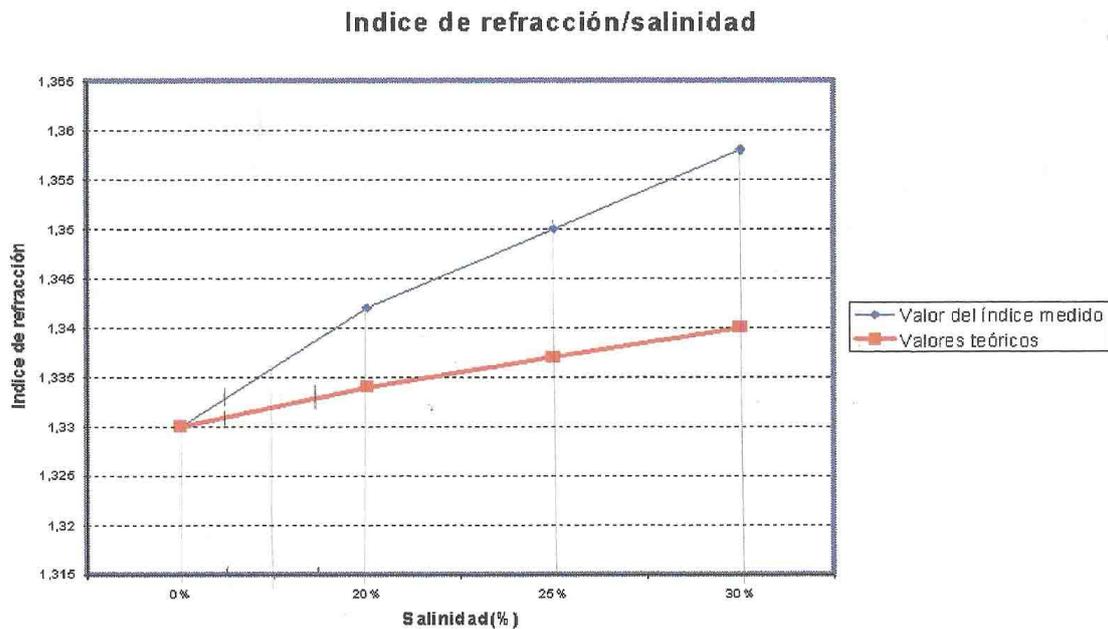


Figura 4.11. Variación del índice de refracción frente a la cantidad de sal en una disolución, [1].

4.5.2. Agua con azúcar

De nuevo en el estudio de la referencia [1], por medio de la técnica indicada en el punto 2.3.6, teniendo en cuenta que utiliza porcentajes de concentración y que presenta el resultado en valor de índice de refracción, llega a la conclusión de que éste crece a medida que aumenta la cantidad de azúcar en agua. Además se observa que, al igual que ocurre en el presente proyecto, la pendiente de curva de índice de refracción frente a porcentaje de concentración es más elevada que en el caso de la sal. También en este caso los resultados experimentales son más exactos y cercanos a los teóricos, demostrando de nuevo que las disoluciones con azúcar son más adecuadas para realizar este tipo de técnicas de medida proporcionando una mayor sensibilidad y una mayor exactitud.

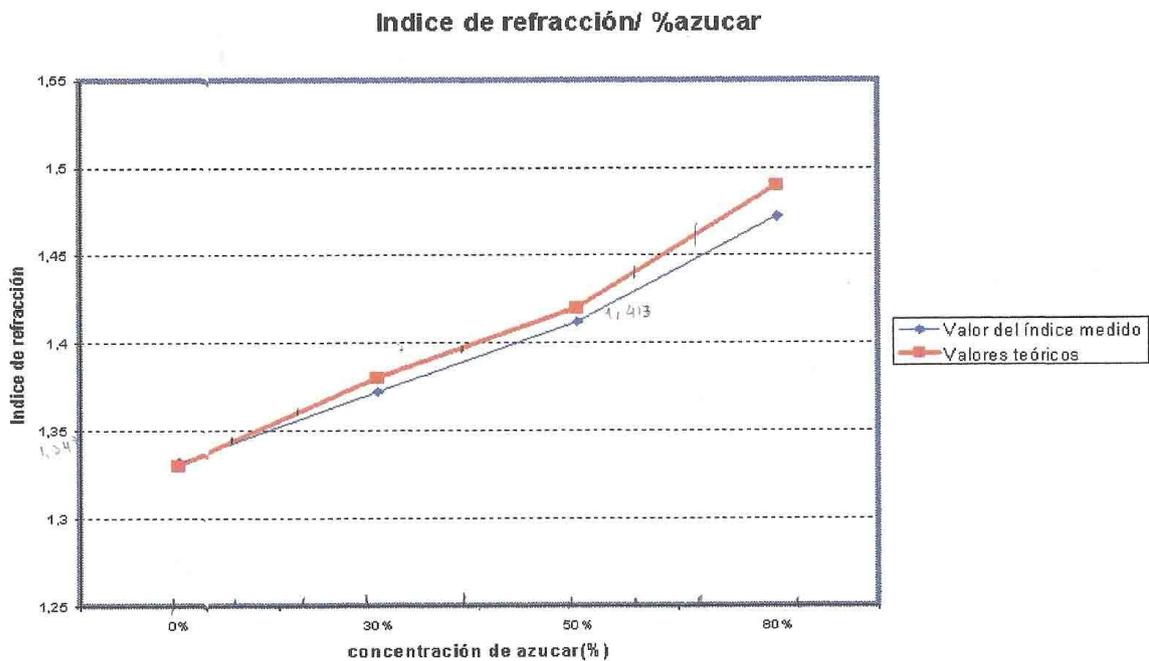


Figura 4.12. Variación del índice de refracción frente a la cantidad de azúcar en una disolución, [1].

4.5.3. Efecto de la temperatura

El estudio del efecto de la temperatura en el índice de refracción es un campo más amplio y del que ya existen una amplia variedad de investigaciones. Eso por ello que se ha dispuesto de más bibliografía a la hora de contrastar resultados.

Haciendo uso de nuevo del estudio de la referencia [1] también se comprueba en la Figura 4.13 que, aunque teniendo en cuenta un rango muy pequeño de temperaturas (20°C – 30°C), el índice de refracción del agua tiende a disminuir con el aumento de la temperatura. Partiendo del valor típico del índice de refracción del agua de 1.33 a 20 °C éste se ve reducido a medida que aumenta la temperatura

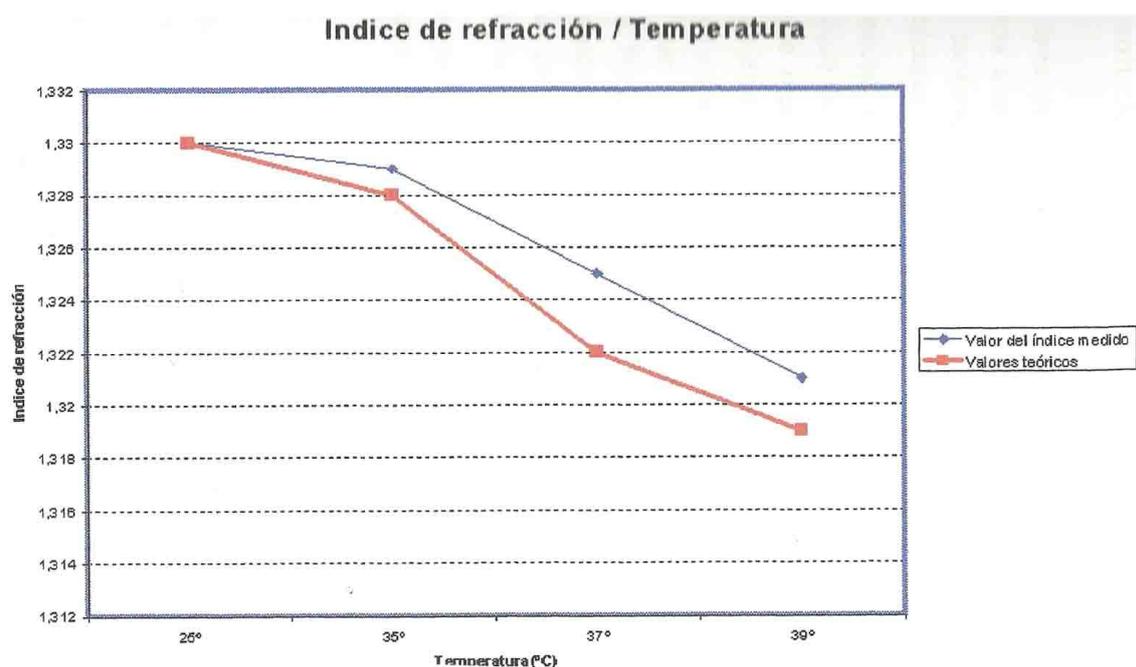


Figura 4.13. Variación del índice de refracción frente a la cantidad de sal en una disolución, [1].

Del mismo modo, en el estudio de la referencia [2], que hace uso de la técnica indicada en el punto 2.3.2., también se comprueba en la Figura 4.14 que, en un rango pequeño de temperaturas y siendo agua destilada, el índice de refracción tiende a disminuir con el aumento de la temperatura. Se observan diferencias en cuanto al valor del índice, es menor que el del agua normal

En un estudio de la referencia [3] sobre el índice de refracción del agua en función de la temperatura se incluye una tabla para una longitud de onda de 632.8 nm en la que se indica como varía el índice de refracción del agua en función de su temperatura. Disponiendo de esos datos (azul) en la Figura 4.15 y comparándolos con los obtenidos en este proyecto (rojo y verde) se observa como el índice de refracción desciende con la temperatura con una tendencia

similar y se podría obtener la relación directa entre valor de índice de refracción y pérdidas en dB dando por válido que a 20 °C para una longitud de onda de 632.8 nm el índice de refracción es de 1.332 y las pérdidas se encuentran entre 0.96 y 0.85 dB.

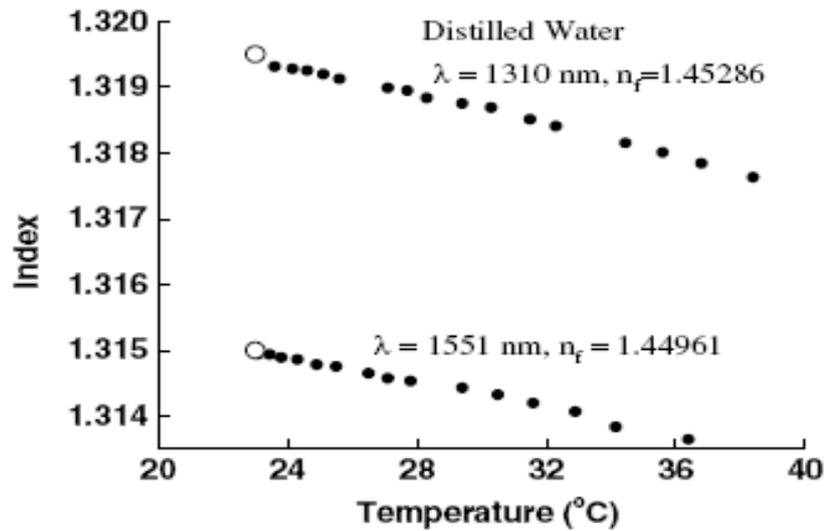


Figura 4.14. Variación del índice de refracción frente según la temperatura, [2].

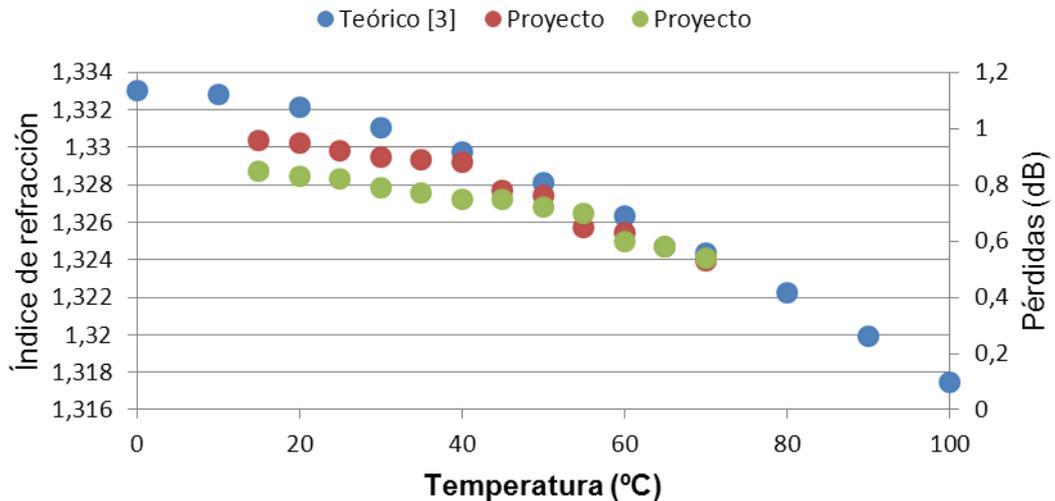


Figura 4.15. Izqda. Índice de refracción del agua en función de su temperatura para una longitud de onda de 632.8 nm., [3]. Dcha. Pérdidas por curvatura de fibra óptica sumergida en agua en función de la temperatura. Punto 4.4.3.

La conclusión a la que se llega es idéntica en todos los casos. Se comprueba que la tendencia del índice de refracción en todos los casos es la misma. En los casos de variación de la concentración en disoluciones el índice de refracción siempre aumenta a medida que aumenta con el soluto y el cambio es más notable en el caso del azúcar.

En el efecto de la temperatura el índice de refracción siempre desciende a medida que aumenta la temperatura, tanto en estudios teóricos como en estudios experimentales.

Los diferentes estudios llevados en este proyecto tienen gran coherencia con otros estudios diferentes, realizados con otros métodos de medida, sobre otros líquidos y basándose en fundamentos distintos.

4.6. Referencias

- [1] N. De La Granja Ríos. *Desarrollo de un sensor para la medida del índice de refracción en líquidos, basado en fibras ópticas de plástico*. PFC de la U. Cantabria presentado en Abril de 2003.
- [2] C-B. Kim, C.B. Su. *Measurment of the refractive index of liquids at 1.3 and 1.5 micron using a fibre optic Fresnel ratio meter*. Department of Electrical Engineering, Texas A&M University. 2004.
- [3] A.N. Bashkatov, E.A. Genina. *Water refractive index in dependence of temperature and wavelength: a simple approximation*. Optics Department Saratov State University, Saratov, Russia. Ed. Proceedings of SPIE Vol. 5068. Pg. 393. 2003.

Capítulo 5

Conclusiones y futuros trabajos

5.1. Conclusiones

El objetivo principal consistía en construir un sensor de índice de refracción en líquidos, por medio de un modelo sencillo, de bajo coste y de fácil manejo, sin perder precisión en la medida.

Se pretendía ampliar rangos de medida, estudiar los límites a los que podría llegar dicho sensor, en qué aplicaciones es más viable y sacar una conclusión para cada caso. Aclarando las ventajas y las desventajas de usar éste tipo de técnica y éste tipo de sensor en distintas sustancias.

Al final se ha conseguido un sensor muy robusto y con una alta independencia de factores externos en la medida, la gran cantidad de las pérdidas vienen provocadas por el medio que se quiere cuantificar y no por pérdidas de otra naturaleza. La ecuación que determina la cantidad de modos que se ven radiados al exterior o reflejados de nuevo al núcleo es función directa del índice de refracción del medio exterior n_0 .

Es un método intrusivo, pero la alta inmunidad de la fibra óptica de plástico y la naturaleza óptica de la técnica hacen de ella un método realmente útil en aplicaciones con líquidos. No se ve afectado por la corrosión ni por supuesto ningún problema de conductividad eléctrica. Únicamente en el caso de alcoholes puros y de materiales altamente corrosivos como la acetona o el amoníaco el sensor presentaría problemas, tanto porque afecta a la fibra como al metacrilato y estropearía la estructura. Así, en un alto porcentaje de disoluciones sería posible realizar medidas continuadas en el tiempo con este sensor. No sería necesario, como ocurre en otras técnicas de medida, tener que coger una muestra del medio y realizar la medida aparte.

Con los sensores ha sido posible caracterizar las pérdidas que producen distintas disoluciones al variar su concentración, así como las pérdidas que produce el efecto de la temperatura en dichas concentraciones. Construyendo finalmente unas gráficas en las que queda constancia para posteriores consultas. Siendo posible ahora conocer la concentración de una disolución o la temperatura a la que se encuentra con sólo medir las pérdidas. De la misma manera, con sólo conocer la relación directa que existe entre la cantidad de pérdidas que se producen con el valor del índice de refracción de esa medida el cálculo de un dato tan característico de los líquidos como es el propio índice sería instantáneo.

Otro detalle importante que se observa en las gráficas es que la concentración sacarosa produce mayores pérdidas y con una mayor pendiente que las producidas en la concentración de sal. Es el principal motivo por el cual ésta técnica y en concreto éste sensor es mucho más adecuado para utilizarlo en disoluciones de sacarosa que en disoluciones de sal. Los resultados son más exactos y existe una mayor diferencia entre un porcentaje de concentración y su contiguo haciendo más sencillo determinar el índice de refracción. Se explica así en la industria esté más desarrollado la medida del índice de refracción de productos derivados del azúcar como refrescos, cervezas, zumos, etc. Aunque se ha avanzado lo suficiente como para llegar a

utilizarse en una gran cantidad de aplicaciones, como puede ser incluso en la industria del petróleo y sus derivados. Conocer el valor del índice de refracción de un material siempre va ligado a posibilidad de fabricar un producto de mayor calidad y mayor pureza. Por eso es uno de los campos que está teniendo un desarrollo continuado y de actualidad, ofrecer un producto de mayor calidad es fundamental para el devenir de la empresa.

El proyecto también ha servido para comprobar experimentalmente, con una técnica concreta y distinta a otras utilizadas, conclusiones sacadas de estudios teóricos como puede ser el caso del estudio de la geometría de la propagación de los rayos, donde teniendo una curvatura en una fibra óptica de 180° ésta debería producir mayores pérdidas cuando más pequeño es el radio de curvatura y así ha resultado ocurrir en la realidad. De la misma manera se negó que una mayor superficie del núcleo sin recubrimiento no tiene por qué suponer una mayor cantidad de modos radiados al exterior.

Al final ha sido posible construir un sensor lo suficiente sensible como para caracterizar líquidos en función de las pérdidas por curvatura y que sea fácil de construir y muy barato. Aun así, la investigación se puede ampliar mucho más, siendo este proyecto sólo un paso más en la puesta a punto de un sensor basado en fibras ópticas útil y verdaderamente comercializable.

5.2. Líneas futuras

Como punto final de este proyecto se indican una serie de mejoras o ideas que se podrían tener en cuenta a la hora de continuar con proyectos e investigaciones en este mismo campo:

- Diseñar un sensor con el radio de curvatura exactamente igual al ángulo crítico, haciéndolo así lo más sensible posible.
- Traducir los resultados experimentales obtenidos en pérdidas en dB a valor de índice de refracción (n) o a índice Brix en los casos de azúcar.
- Completar este proyecto con los estudios en los que este proyecto se ha visto limitado. Como puede ser llegar a conseguir que la concentración de azúcar sea vea saturada y no sólo al 50%.
- Diseñar y fabricar una carcasa que hiciese a la pieza más confortable, estándar, portable e incluso comercializable para medir índices de refracción como ya ocurre con algunos refractómetros.
- Completar el rango de temperaturas llegando hasta los 0°C y los 100°C .
- Caracterizar más líquidos y disoluciones. Como por ejemplo diferenciar entre tipos de aceite, entre graduaciones de alcohol en cervezas, etc.
- Estudiar si el índice de refracción es influido por otros factores como la humedad del ambiente, la viscosidad del líquido, etc.