

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

Estudio de la fabricación de recubrimientos  
parciales y su influencia en la respuesta óptica  
de dispositivos LPG



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Juan Gordillo Valencia

Javier Goicoechea Fernández

Pamplona, junio de 2016



## Índice

1	Objetivos .....	5
2	Introducción.....	6
2.1	Sensores de fibra óptica.....	6
2.2	Recubrimientos .....	8
2.3	LPGs .....	9
2.3.1	Principio de funcionamiento.....	9
2.3.2	Sensores Basados en LPG .....	11
3	Métodos experimentales .....	13
3.1	Introducción.....	13
3.2	Componentes.....	13
3.2.1	LPG .....	13
3.2.2	Holder .....	14
3.2.3	Recubrimiento Layer by layer (LbL).....	15
3.2.4	Listado y preparación de instrumental y equipamiento.....	16
3.2.5	Limpieza .....	16
3.2.6	Preparación disoluciones.....	17
3.3	Equipamiento y materiales .....	17
3.3.1	Preparación fibra .....	18
3.3.2	Construcción Holder .....	19
3.3.3	Recubrimiento.....	19
3.4	Procedimientos experimentales .....	22
3.4.1	Construcción recubrimiento .....	22
3.4.2	Retirada Parcial .....	23
3.4.3	Pruebas en cámara climática .....	24
4	Resultados .....	25
4.1	Breve reseña.....	25
4.2	Pruebas.....	26
4.2.1	LPG 0 - Prueba 0.....	26
4.2.2	LPG1 - Prueba 1 .....	35
4.2.3	LPG1 - Prueba 2.....	37
4.2.4	LPG1 - Prueba 3.....	44
4.2.5	LPG1 - Prueba 4.....	52

4.2.6	LPG1 - Prueba 5.....	60
4.2.7	LPG1 - Prueba 6.....	67
4.2.8	LPG1 - Prueba 7.....	71
4.2.9	LPG1 - Prueba 8.....	74
4.2.10	LPG1 - Prueba 10 .....	76
4.2.11	LPG2 - Prueba 1 .....	79
4.2.12	LPG2 - Prueba 2 .....	81
4.2.13	LPG2 - Prueba 3 .....	84
4.2.14	LPG2 - Prueba 4 .....	89
4.2.15	LPG 3 Prueba 1.....	92
5	Conclusiones generales.....	96
5.1	LPG 0.....	96
5.2	LPG 1.....	96
5.3	LPG 2.....	99
5.4	LPG 3.....	101
5.5	Conclusión General.....	101
6	Limitaciones .....	103
7	Anexos .....	104
7.1.4	Algoritmos Matlab .....	104
8	Bibliografía .....	129

## 1 Objetivos

En los últimos tiempos se ha observado un aumento de las aplicaciones relacionadas o basadas en fibra óptica. Este crecimiento se debe a la popularización del uso de este material en muchos ámbitos de la vida cotidiana promovido por la explosión tecnológica actual. Este proyecto persigue varios objetivos que a pesar de estar íntimamente ligados se pueden diferenciar claramente. En primer lugar, buscamos comprobar la viabilidad de un sensor dual temperatura/humedad relativa, este sensor estará construido sobre dos componentes esenciales, una fibra óptica sometida a un tratamiento que comúnmente se conoce como Long-period fiber grating y un recubrimiento polimérico. Las sumas de las propiedades físicas de estos dos componentes configuran la posible respuesta del sensor que buscamos, para comprobar que esta respuesta física es correlativa a los resultados que estamos buscando existe la necesidad de generar una serie de algoritmos de análisis matemáticos para dicha comprobación, esta necesidad configura el segundo objetivo de este proyecto

## 2 Introducción

Como paso inicial a nuestro proyecto se revisará de manera general los componentes y la teoría en la que se sustenta este trabajo.

Por tanto, se reseñará conceptos tales como el funcionamiento de una fibra óptica, sus características principales y sus posibles aplicaciones para posteriormente avanzar en apartados más específicos, como el lugar que ocupan los sensores basados en fibra óptica en la actualidad. De esta manera se tendrá el conocimiento necesario para incidir de manera especial en los fundamentos físicos y características teóricas que hacen posible el diseño del sensor dual temperatura/Humedad relativa que se está buscando.

### 2.1 Sensores de fibra óptica

En la actualidad existen una gran cantidad de sensores que se usan para medir temperaturas y magnitudes físicas entre los que cabe destacar tres tipos: ópticos, electromagnéticos y electromecánicos.

Una de las grandes ventajas de los sensores de fibra óptica es su reducido tamaño lo que facilita su integración en multitud de materiales y aplicaciones. Estos sensores son susceptibles de ser situados sobre una estructura cualquiera sin que se vea repercutidas sus propiedades mecánicas, pero no son recomendados para su integración en sistemas en los que hagan aparición temperaturas mayores a 120°C o superiores debido a que dichas temperaturas tan elevadas pueden dañar el polímero que recubre la fibra óptica en el caso de los sensores de film polimérico. A continuación, se analiza en detalle los sensores ópticos que es la base fundamental en la que se sustenta el sensor que se está proyectando.

Las fibras ópticas están formadas por un filamento de materiales dieléctricos como el vidrio o los polímeros acrílicos, capaz de conducir y transmitir impulsos luminosos de uno a otro de sus extremos que actúa como núcleo. Dicho núcleo tiene un diámetro de 10 y 100  $\mu\text{m}$ , posteriormente aparece una corteza de vidrio óptico de hasta 125  $\mu\text{m}$  y uno o dos revestimientos de hasta 250  $\mu\text{m}$  de plásticos (acrílicos y poliamidas) y metales como el cobre o el oro, dependiendo de donde y la temperatura presente en donde desean ser integrados, **figura 1**.

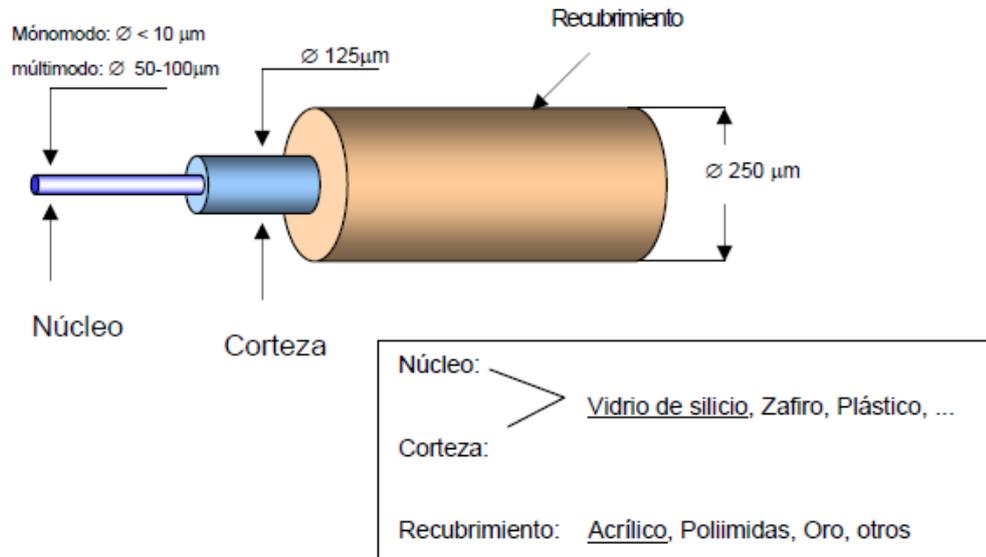


Figura 1. Estructura de una fibra óptica

Una fibra óptica se comporta de la siguiente manera, el núcleo de fibra óptica transporta un impulso óptico generado por una fuente externa, que puede ser un fotodiodo o un láser. Este impulso es reflejado en el interior de la fibra entre las zonas comprendidas entre el núcleo y el cladding, y no puede salir del núcleo como se deduce de la ley de Snell, **figura 2**.

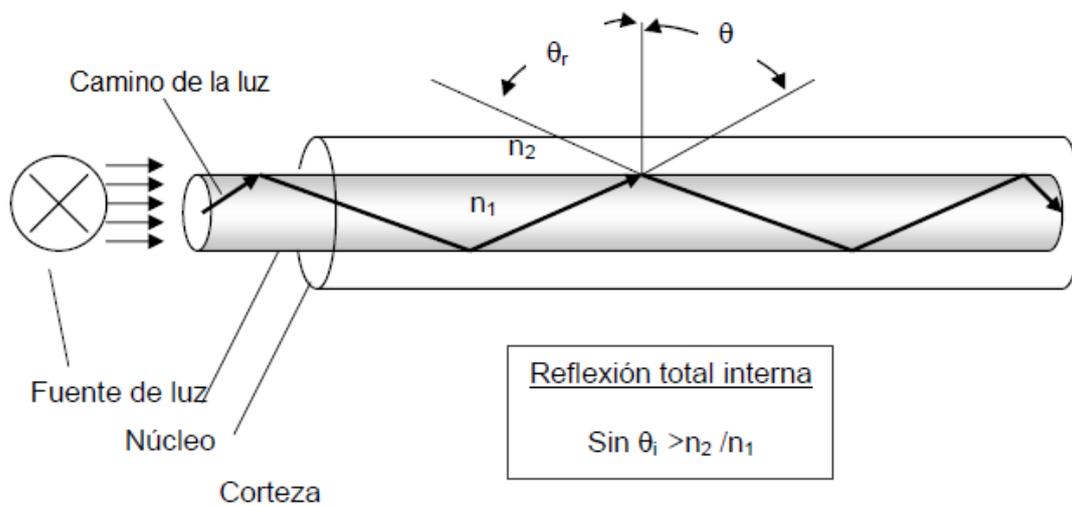


Figura 2. Ley de Snell.  $n_1 = \text{Índice de refracción del núcleo}$ ,  $n_2 = \text{Índice de refracción de la corteza}$ .

La utilización de sensores de fibra óptica se ve beneficiada por que esta presenta una serie de características exclusivas que hacen aconsejable su uso. Sus principales puntos fuertes son:

- Detectan distintas magnitudes (vibraciones, deformaciones, temperatura, etc...).
- Bajo peso y volumen
- Larga vida
- Alta sensibilidad y ancho de banda
- Sirven como sensores y como guía de señales
- No se ven afectados por radiaciones eléctricas o magnéticas en condiciones de trabajo
- Buena resistencia a la corrosión y fatiga.
- Posibilidad de integración en una misma fibra óptica de múltiples sensores.

A pesar de presentar gran cantidad de ventajas, no está libre de inconvenientes. Sus principales problemas son:

- Fragilidad de la fibra
- Necesidad de un sistema optoelectrónico de análisis del sistema.

## 2.2 Recubrimientos

Como definición general de recubrimiento se hace referencia a un material que es depositado sobre la superficie de un objeto, por lo general denominado sustrato. En muchos casos los recubrimientos son realizados para mejorar algunas propiedades o cualidades de la superficie del sustrato, tales como aspecto, adhesión, características a situaciones de humedad, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste o simplemente a las ralladuras entre muchas otras. En otras ocasiones, y particularmente en procesos de fabricación de dispositivos semiconductores, el recubrimiento es una parte esencial para la funcionalidad del producto terminado.

En el caso de recubrimientos para fibras ópticas en la gran mayoría de casos tiene como fin la modificación de ciertas respuestas, estas modificaciones son controladas mediante el control en la aplicación de los recubrimientos. También es importante hacer notar que la respuesta del sistema a los recubrimientos depende tanto del tipo de fibra óptica como de la forma, composición y grosor del recubrimiento aplicado.

Para llevar a cabo estos recubrimientos existen diversos métodos mediante procesos en forma de líquidos, gases o sólidos.

En el caso que concierne a este proyecto se utilizará un proceso mediante deposición de materiales en medios acuosos, dicho proceso será tratado de manera amplia y profunda en un posterior apartado.

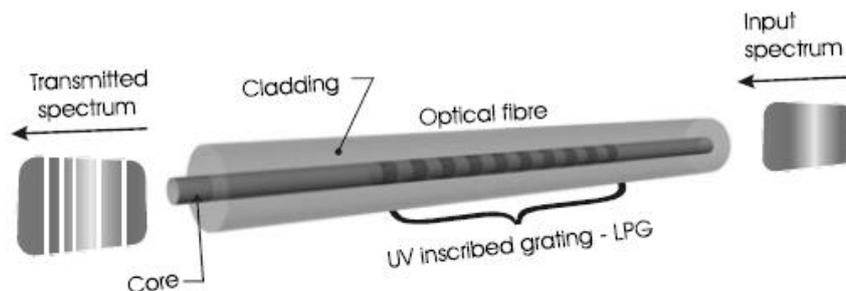
## 2.3 LPGs

Desde la aparición de las LPG (Long-period Fiber Grating), en fibra óptica han sido aplicadas en gran cantidad de áreas de investigación. Estas áreas comprenden desde filtros y compensadores de dispersión en sistemas de comunicación, hasta su aplicación en esquemas sensores como dispositivos detectores de parámetros físicos.

En este último campo la aceptación de las LPG ha sido muy amplia debido a que es formada en la fibra óptica, con lo que se adquieren las ventajas de sensores muy pequeños, ligeros, de reducido tamaño, resistentes, de alta sensibilidad y con inmunidad electromagnética.

### 2.3.1 Principio de funcionamiento

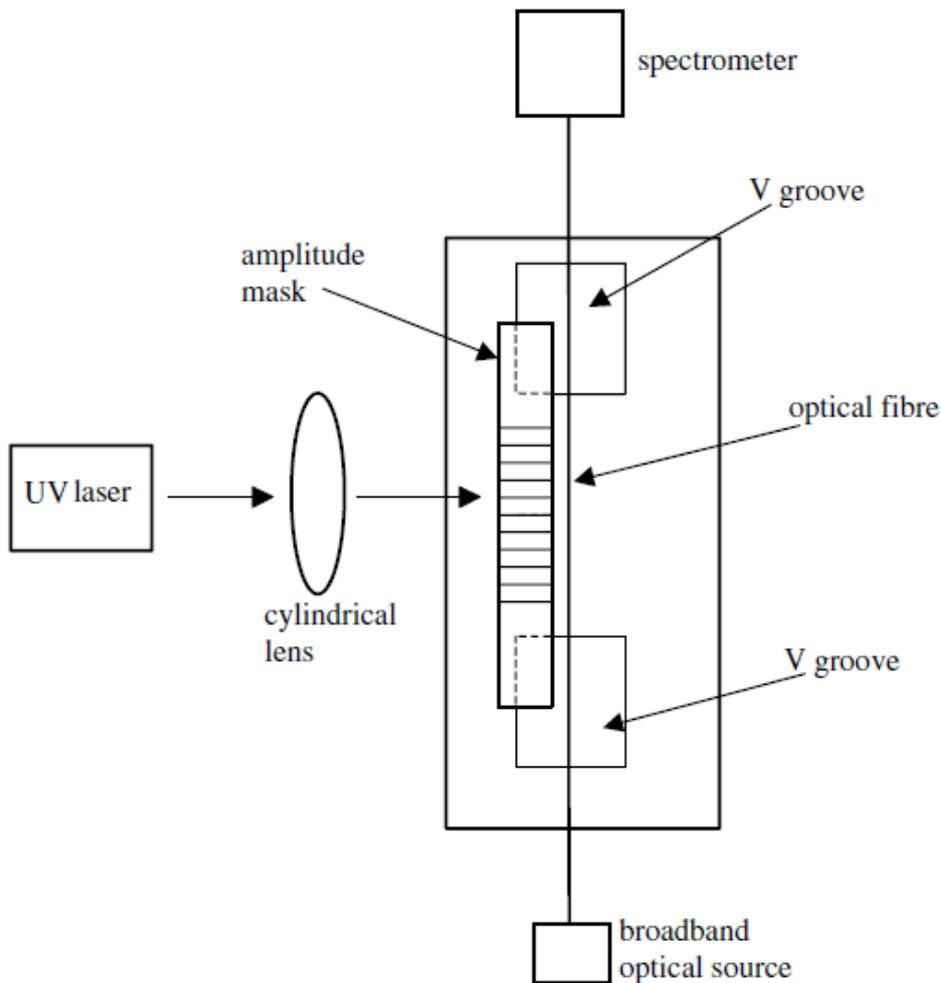
Una LPFG en una fibra óptica es una perturbación periódica del índice de refracción del núcleo a lo largo de la fibra. El método estándar de fabricación de estas rejillas hace uso de las propiedades fotosensitivas que tienen algunas fibras ópticas exponiéndolas por un tiempo determinado a radiación ultravioleta **Figura 3.**



*Figura 3. Estructura de una LPFG.[1]*

Aunque sea una técnica extendida presenta ciertos inconvenientes. Uno de los problemas que existe es que aparece un corrimiento en el pico de resonancia cuando se incrementa la fuerza de la rejilla, además de que un gran número de mascarillas de amplitud son requeridas para la fabricación de rejillas de diferente periodo. Al mismo tiempo las fibras requieren ser cargadas de hidrogeno para incrementar la sensibilidad a la radiación ultravioleta. Técnicas de grabado sin mascarillas de amplitud, conocidas como de “escritura directa” de la rejilla es otro método para producir tales dispositivos. Sin embargo, estos métodos siguen siendo muy costosos por el uso de láseres de tipo ultravioleta. Recientemente,

han hecho aparición algunas técnicas de fabricación de rejillas que no utilizan las características de fotosensibilidad de las fibras. Estas técnicas utilizan deformaciones físicas de la fibra, la difusión de dopantes en el núcleo en especial Nitrógeno o Ge, produciendo variaciones del índice de refracción por medio de láseres de CO<sub>2</sub>, láseres de CO, láseres infrarrojos pulsados, por implantación de iones, o por descargas eléctricas producidas por una máquina empalmadora de fusión, **figura 4**.



**Figura 4. Esquema de fabricación de una LPFG.**[1]

Las ecuaciones que describen la operación de las LPGs son las ecuaciones de modos acoplados para propagación co-direccional. En estos dispositivos un modo de propagación hacia adelante en el núcleo se acopla a otro (o varios modos) que se propaga en la misma dirección, pero sobre la cubierta, de esta manera se satisface la siguiente condición de acoplamiento de fase:

$$\beta_{core} - \beta_{clad}^n = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1)[2]$$

Donde,  $\beta_{core}$  es la constante de propagación del modo del núcleo y  $\beta_{clad}^n$  es la constante de propagación del n-ésimo modo de cubierta. El periodo de la rejilla

está dado por  $\Lambda$ , donde el periodo de la rejilla determina la longitud de onda de resonancia. A partir de la teoría de modos acoplados se obtiene que la transmitancia de las LPGs está dada por:

$$T = 1 - \frac{k^2}{q^2} \text{sen}^2(qz) \quad (2)[2]$$

Donde  $q^2 = k^2 + \delta^2$ ,  $k$  es el coeficiente de acoplamiento y  $\delta$  es la condición de acoplamiento de fase dado por la ecuación (1).

## 2.3.2 Sensores Basados en LPG

### 2.3.2.1 Sensores de temperatura

Como se puede intuir y ya se ha hecho referencia anteriormente, la posibilidad de desarrollar sensores en LPGs se basa en sus características físicas. La sensibilidad de este dispositivo a parámetros ambientales está influenciada por el periodo de la PLG, el orden de los modos de acoplamiento y de la composición de la fibra óptica [3]. La combinación de estos parámetros permiten que la fabricación de LPGs tenga una gran variedad de respuestas a distintas mediciones[1], esto implica que cada dispositivo tendrá una respuesta particular que poco o nada se asemejara a otras LPG, esta última idea se explorara más a fondo en el apartado de limitaciones técnicas.

Esto permite que existan LPGs que sean sensibles a la temperatura mientras que otras no presenten respuesta alguna a este tipo de cambios ambientales.

Para comprender el origen de la sensibilidad a la temperatura tenemos que partir de la ecuación:

$$\lambda^{(m)} = [n_{eff} - n_{cl}^{(m)}] \Lambda \quad (3)[4]$$

Donde  $n_{eff}$  es el índice efectivo del modo guiado, y  $n_{cl}^{(m)}$  se refiere a la simetría azimutal del modo acoplado de orden  $m$ .

Se hace uso de la regla de la cadena en la derivación, por lo que la sensibilidad a la temperatura  $T$  para un grating de longitud  $L$  se puede obtener de la ecuación (3) como.

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{d\lambda}{d(\delta n_{eff})} \left[ \frac{dn_{eff}}{dT} - \frac{dn_{cl}}{dT} \right] + \frac{d\lambda}{d\Lambda} \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda central de la banda de atenuación,  $T$  es la temperatura,  $n_{eff}$  es el índice de refracción efectivo del modo del núcleo,  $n_{cl}$  es

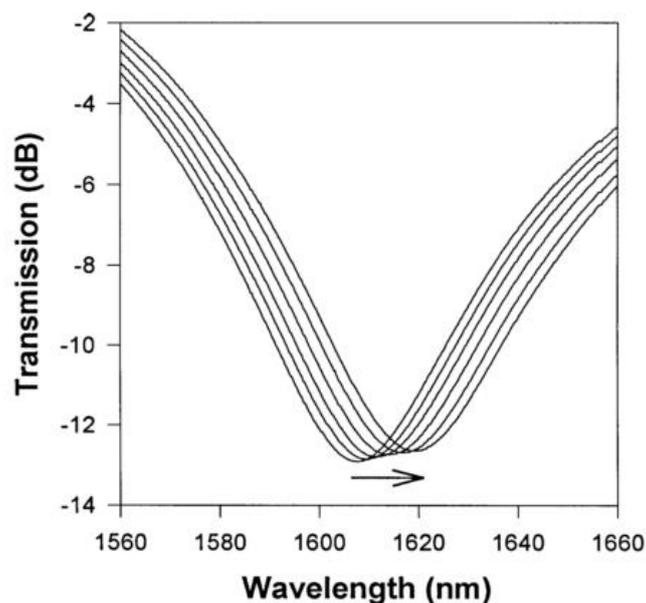
el índice de refracción efectivo del modo del cladding,  $\delta n_{eff} = (n_{eff} - n_{cl})$ ,  $L$  es la longitud de la LPG y  $\Lambda$  es el periodo de la LPG.

El primer término del lado derecho de la ecuación (3) es la contribución del material que esta relacionando con el cambio en el diferencial del índice de refracción del núcleo y del cladding surgidos del efecto termo-óptico. Dicha contribución es dependiente de la composición de la fibra y es fuertemente dependiente del orden del modo del cladding.

El segundo término es la contribución de la guía de onda como resultado de los cambios en el periodo de la LPG, la magnitud y el signo del termino depende del orden del modo del cladding.[4]

Para realizar una elección adecuada del periodo de la LPG debemos balancear estas dos contribuciones para la sensibilidad a la temperatura.

En una cámara climática, la respuesta de la longitud de onda en la banda de trabajo es lineal como se observa en la **figura 5**. [3]



**Figura 5.** Cambio en la banda de trabajo de la LPG con la temperatura. El espectro corresponde a temperaturas de 22.7°C, 49.1°C, 74.0 °C, 100.9°C, 127.3°C y 149.7°C de izquierda a derecha.[3]

### 2.3.2.2 Sensores de humedad

Básicamente los sensores de humedad explotan la sensibilidad del índice de refracción de la LPG para mostrar los posibles cambios que suceden en el entorno del sensor. Existen reportes de sensores de nivel de líquido [5]. Dicho sensor no es propiamente el que se busca en este proyecto, pero resulta valido

como guía para conocer qué respuesta podemos esperar al trabajar con LPG y humedad.

La aplicación de humedad a la LPG da como resultado un desplazamiento de la banda de atenuación. Este comportamiento resulta más evidente si observamos la **figura 6**. Por una parte, tenemos la respuesta de la LPG en la que está rodeada de aire (B), mientras que la segunda frecuencia central corresponde al mismo sensor en una inmersión parcial en líquido, este desplazamiento se debe a que el índice efectivo de refracción ha sido modificado por el líquido presente alrededor del sensor[1].

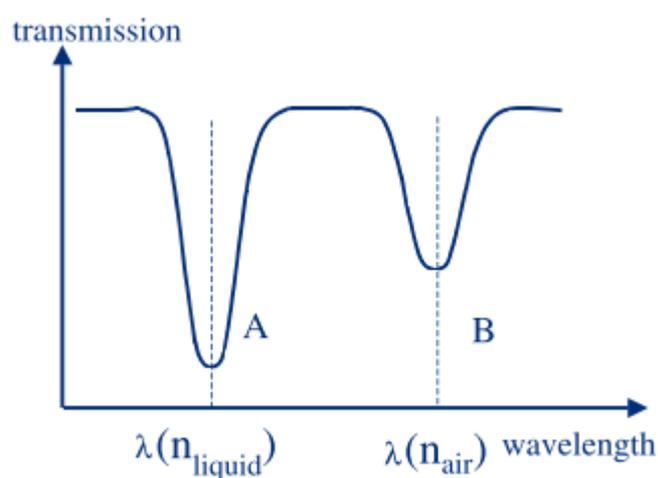


Figura 6. Esquemático del desplazamiento esperado en la banda de atenuación.[1]

### 3 Métodos experimentales

#### 3.1 Introducción

Después de haber realizado un trabajo previo de investigación acerca de todos los componentes, técnicas y aplicaciones actuales respecto al funcionamiento de las LPFG se ha procedido a realizar una serie de pruebas experimentales con el fin de lograr los objetivos propuestos que articulan este proyecto.

#### 3.2 Componentes

##### 3.2.1 LPG

El primer componente y más importante de cuantos se van a usar o diseñar no es otro que una LPFG, en este caso buscamos un dispositivo con unas características concretas. La particularidad más importante de la LPFG elegida

es un pico de atenuación pronunciado en su espectro óptico en la banda de trabajo 1500 – 1600nm.

Esta singularidad es muy importante debido a que el proceso al que será sometida la LPFG para generar el sensor incide directamente en la respuesta espectral de la fibra en esta característica, de hecho, esta característica será la guía principal tanto para el proceso de construcción como para el análisis de la respuesta del sensor a las pruebas de cámara climática.

### 3.2.2 Holder

Se conoce con el nombre de holder a cualquier estructura diseñada para contener o sostener una pieza determinada. En el caso concreto de este proyecto el holder se usa básicamente con dos objetivos, el primero de ellos es servir de soporte tanto a la LPFG como a la fibra y conectores que la acompañan. Por otro lado, sirve de nexo de unión entre el robot 3D y la fibra. Dado que tenemos que realizar un procedimiento de recubrimiento usando un robot se ha diseñado un holder a medida para poder llevar a cabo este proceso.

El holder se compone de dos partes esenciales, la primera parte está compuesta por láminas de vidrio de laboratorio dispuestas en una forma concreta, que sirven como soporte de la zona de la fibra óptica donde se ubica la zona que se ha tratado para construir la PLG. La segunda parte es una lámina de cartón cortada a medida a la que se adhiere la estructura de vidrio diseñada anteriormente, **figura 7**. Esta lámina de cartón tiene como objetivo el soporte de la fibra óptica necesaria para hacer las conexiones con los sistemas de análisis y sus conectores. Sus dimensiones vienen determinadas por el tamaño del robot3D que realiza los procedimientos de recubrimiento.



Figura 7. Estructura del holder acoplada al robot3D.

### 3.2.3 Recubrimiento Layer by layer (LbL)

Como ya se ha podido intuir tanto en la introducción como en los objetivos de este documento se construirá un recubrimiento específico en la LPG para modelar las características que se quieren potenciar en el dispositivo óptico.

En epígrafes anteriores se hace referencia a la variedad de formas de generar un recubrimiento, repasándolos rápidamente aparecen diversos métodos mediante procesos en forma de líquidos, gases o sólidos.

Después de un análisis de las posibilidades se ha optado por generar el recubrimiento la LPG mediante la técnica denominada Layer-by-layer (LbL), a continuación, se tratará en profundidad dicho procedimiento.

La fabricación de recubrimientos LbL de moléculas organizadas ha interesado a los científicos desde la década de 1930, todos los trabajos hasta los años setentas sufrían una o más restricciones, la limitación más severa era el uso de ciertas clases de moléculas concretas, además de necesitar un equipo específico que hacía que la reordenación del recubrimiento fuera impredecible.

*A finales de 1980 Decher and Hong comienzan a investigar sobre la absorción secuencial de componentes aniónicos y catiónicos en soluciones acuosas. Posteriormente esta aproximación se extendió al uso de polielectrolitos sintéticos, figura 8, proteínas o metales coloides. Por consiguiente, la construcción de recubrimientos híbridos consistentes en una gran variedad de*

materiales. Debido a este gran avance, esta técnica ha sido frecuentemente revisada en los últimos años.[6]

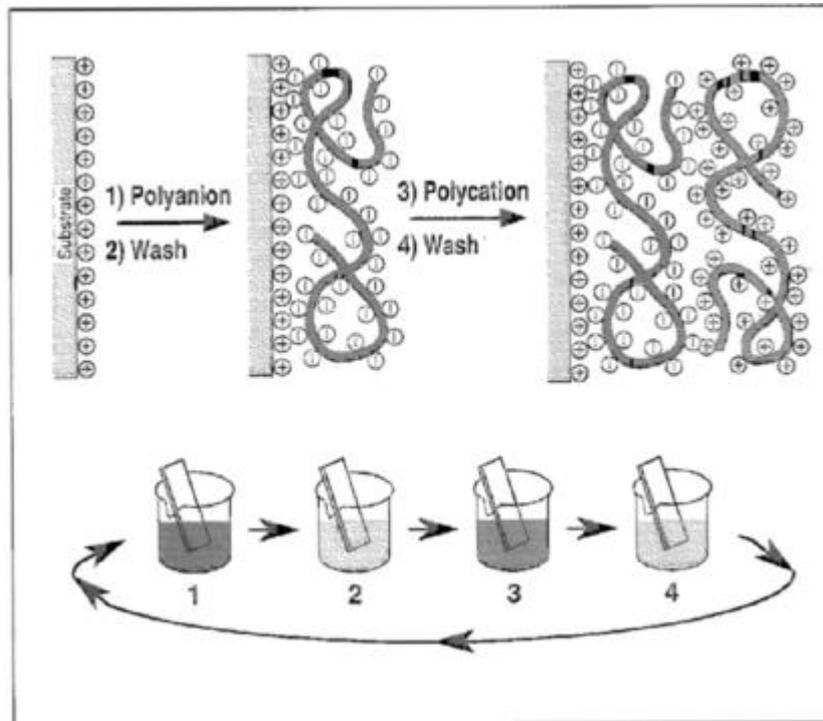


Figura 8. Esquema para la construcción de recubrimiento multicapa mediante la absorción consecutiva de polielectrolitos aniónicos y catiónicos.[6]

### 3.2.4 Listado y preparación de instrumental y equipamiento

- Vasos de laboratorio
- Montaje de la LPG para situarlo en el robot.
- Conexión OSA con ordenador.
- Conexión Robot Ordenador
- Revisar la rutina de Matlab.
- Revisar o diseñar la rutina de construcción de la bicapa.

### 3.2.5 Limpieza

En este punto se detalla el proceso que se ha seguido para la preparación y limpieza de los elementos que hacen parte del experimento.

Como resulta obvia solo se listan los pasos de limpieza que son críticos y que constituyen variables capaces de modificar la respuesta del proceso. Los

procedimientos propios de limpieza de material de laboratorio y que son de sobra conocidos se han obviado.

- a. Limpieza de la fibra LPG con agua ultrapura como primer paso, posteriormente se hace un lavado con hidróxido de sodio (NaOH) como preparación pre-cargado al proceso LbL.
- b. Durante el proceso de construcción del recubrimiento polimérico cambiar el agua ultrapura en la que se realiza el aclarado de los polímeros que constituyen el LbL cada 5 ciclos, con esto nos aseguramos que en realidad si estamos haciendo un lavado efectivo de los restos de las capas. El número de ciclos de lavado es meramente indicativo y varía dependiendo de la fuente a la que se haga referencia.

### 3.2.6 Preparación disoluciones

En este apartado se listan las disoluciones necesarias para la construcción de el recubrimiento polimérico. Posteriormente en el apartado de método experimental se realizará una revisión más concreta en cuanto a la composición y forma de hacer las disoluciones [7] que se muestran a continuación.

Disoluciones a preparar:

- KOH o piraña (Activador) (1/10 molar). Se ajusta 1 parte de KOH por 10 de agua ultrapura y se disuelve usando el agitador magnético 15 min. Como el fin de esta disolución es realizar un cargado previo al inicio de la deposición de las capas poliméricas.
- PAA – Poly acrylic acid (Anionico [Carga Negativa]): Dejar en el agitador magnético 2 horas. Ajuste de PH a 4.5. Precisión en la preparación muy importante.
- PAH - Polyallylamine hydrochloride (Catiónico [Carga Positiva]): Dejar en el agitador magnético 2 horas Ajuste de PH a 4.5. Precisión en la preparación muy importante.
- Agua Ultrapura: Obtenemos agua ultrapura de la maquina dispensadora, en el caso del agua para los lavados de LbL tenemos que ajustar el PH del agua a 4.5, dejando todos los PH iguales y así eliminando un factor de variación en la prueba.

### 3.3 Equipamiento y materiales

En este apartado se realizará un listado detallado con los equipos necesarios para llevar a cabo tanto la construcción de los diferentes componentes del experimento, como el equipamiento para llevar a cabo el análisis de los resultados de las distintas pruebas.

A continuación, se listará el equipamiento utilizando como clasificación el componente en el que ha sido utilizado, además en cada componente de la relación de equipos se añadirá una breve reseña haciendo referencia a su actuación a lo largo del proyecto ha sido utilizado.

### 3.3.1 Preparación fibra

- *Cortadora-peladora de fibra óptica*



- *Empalmadora de fibra óptica*

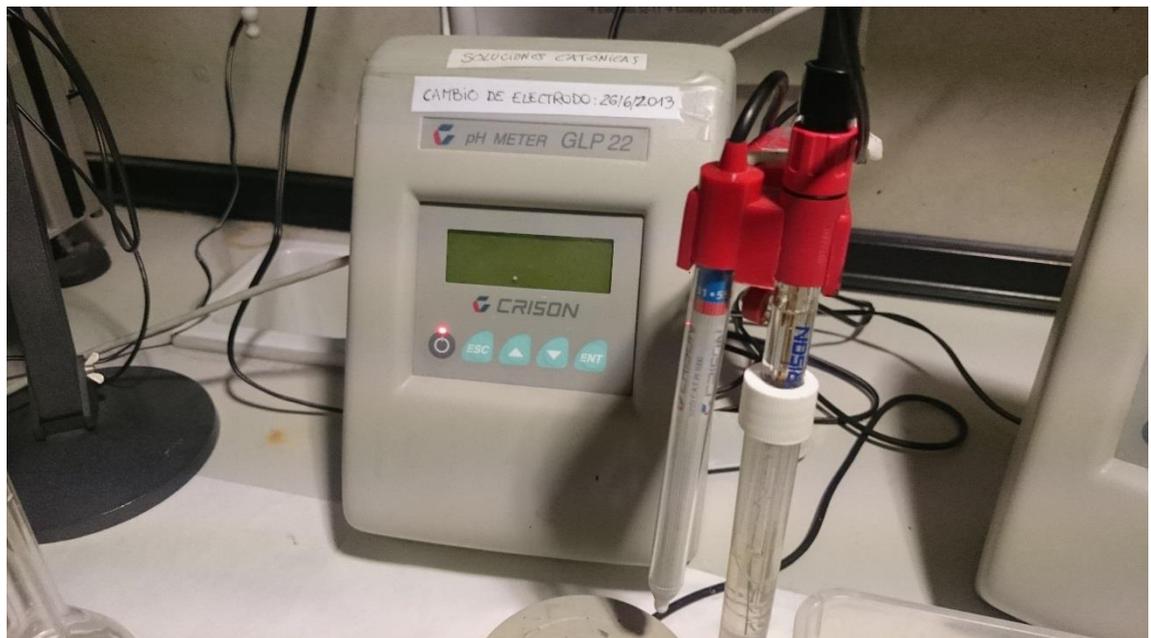


### 3.3.2 Construcción Holder

- Lámina de cartón
- Portas de cristal
- Loctite 3526 (UV)
- Cinta adhesiva
- Soporte de laboratorio
- Alambre twistband
- 

### 3.3.3 Recubrimiento

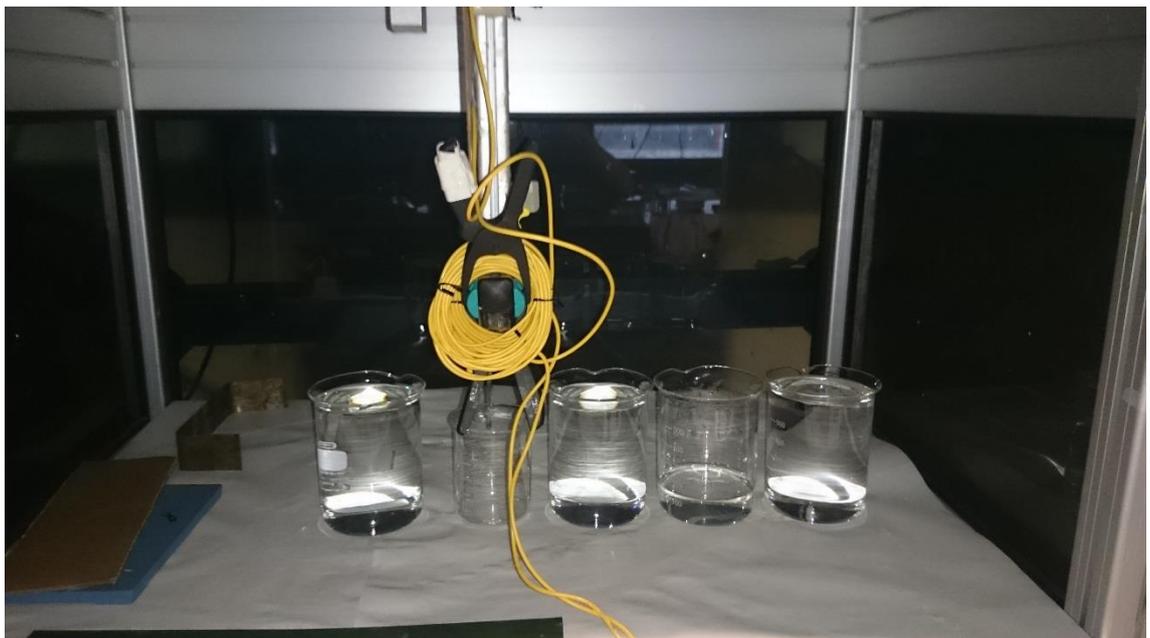
- *PH metros*



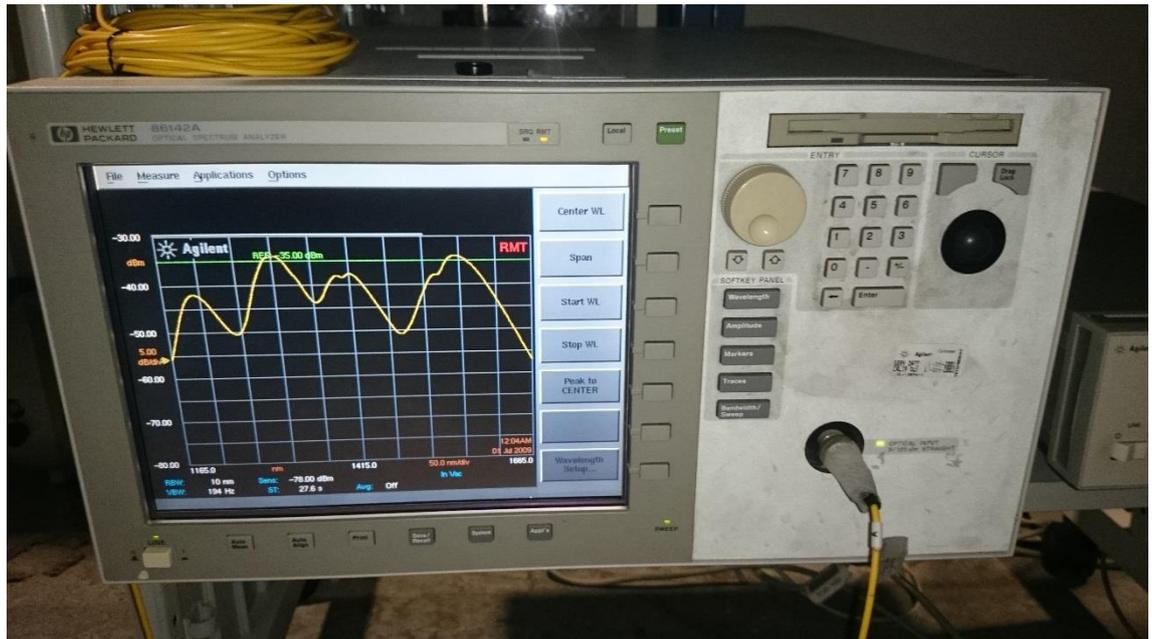
- *Balanzas de laboratorio*



- *Robot 3D*



- *Analizador de espectro óptico*



- *Fuente de luz blanca*



## 3.4 Procedimientos experimentales

### 3.4.1 Construcción recubrimiento

#### 3.4.1.1 Preparación previa

##### 3.4.1.1.1 Fibra

Se hace uso de una fibra que ha sido sometida a un proceso mediante el cual se ha generado una LPG en uno segmentos de forma que presenta un perfil espectral determinado.

##### 3.4.1.1.2 Holder

Para realizar todo el proceso de manipulación que se aplica a la fibra LPG se hace necesario construir una estructura que permita dicha manipulación manteniendo la integridad de la fibra. El principal parámetro a tener en cuenta es que dicha construcción se deba ajustar al robot 3D para que este pueda manipularlo al construir el recubrimiento.

##### 3.4.1.1.3 Disoluciones

Dado que se está generando un recubrimiento polimérico por medio de una técnica en un medio acuoso es necesario preparar una serie de disoluciones para aplicar en la fibra. Dichas disoluciones no solo son de polímeros, también se preparan soluciones para el cargado previo de la fibra o soluciones para realizar la retirada parcial del recubrimiento. A continuación, se presentan las disoluciones que se han preparado.

Polímeros: Teniendo en cuenta el procedimiento LbL que se aplicara al experimento, dicho sistema necesita de dos polímeros, uno aniónico y otro catiónico. En el caso particular de esta prueba de hará uso de PAA como compuesto aniónico y PAH como compuesto catiónico. La preparación de estos compuestos sigue la siguiente estructura:

- Calculo de las cantidades necesarias para preparar una disolución que presente un peso molar de 10 mm, este punto depende exclusivamente del volumen de polímero que se ha de utilizar en el experimento.

- Preparación de las disoluciones: En este punto existen diversos factores que son importantes a la hora de replicar este experimento. En el caso particular de este proyecto y como consecuencia de las posibilidades existentes en el laboratorio solo se ha considerado un factor como crítico y es el pH de las disoluciones, esto se debe a que el grosor de las capas poliméricas que buscamos depositar está íntimamente ligado el valor de este factor. En cuanto a los demás factores a los que se hacen referencia serán explícitamente expuestos en el apartado de limitaciones técnicas.

Deposición: Se hace una deposición de capas de carga opuesta mediante el uso de un robot 3D de forma repetitiva.

Cargado de Ag: Se aplica un cargado de partículas de plata al recubrimiento generado mediante la inmersión de la fibra en una solución de iones de plata, dichos iones se adhieren al recubrimiento que se ha generado en la deposición y mediante otra inmersión en un agente reductor generamos partículas de plata metálica.

Cargado de Ag (Directamente en polímero): Se hace el PAA con moléculas de plata ya en la disolución.

Curado: Se somete al recubrimiento a un ciclo de curado consistente en la aplicación de una temperatura cercana a las 60°C durante 12 horas.

### 3.4.2 Retirada Parcial

Debido a la búsqueda de un sensor que sea sensible tanto a humedad relativa como temperatura, y observando los apartados anteriores donde se expone el funcionamiento de sensores tanto de humedad como de temperatura ya existentes en la actualidad, se aplica una retirada parcial del recubrimiento como solución de diseño para generar un sensor dual. Lo que se logra con esta actuación es generar en el segmento donde se encuentra la LPG dos zonas diferenciadas que presentaran una respuesta espectral distinta a la aplicación de temperatura o humedad relativa.

Para llevar a cabo esta retirada parcial dado que desconocemos la posible respuesta que pueda presentar el sistema a este proceso, se usa como medio de control los cambios observables en el espectro que presenta la fibra dado que la respuesta del sensor es dependiente del recubrimiento y las partículas de plata que se han fijado a este. Con este método de control se procede a la retirada parcial del recubrimiento polimérico, dicha retirada presenta una variabilidad en cada caso debido a que se desconoce la respuesta real que presentara la fibra al realizar el procedimiento. Las principales limitaciones impuestas en este apartado son en primer lugar, la imposibilidad de que dicha retirada supere el

50% de la longitud total que comprende el segmento de la LPG. Y que la atenuación no supere el 30% de la potencia que presenta el pico inicial.

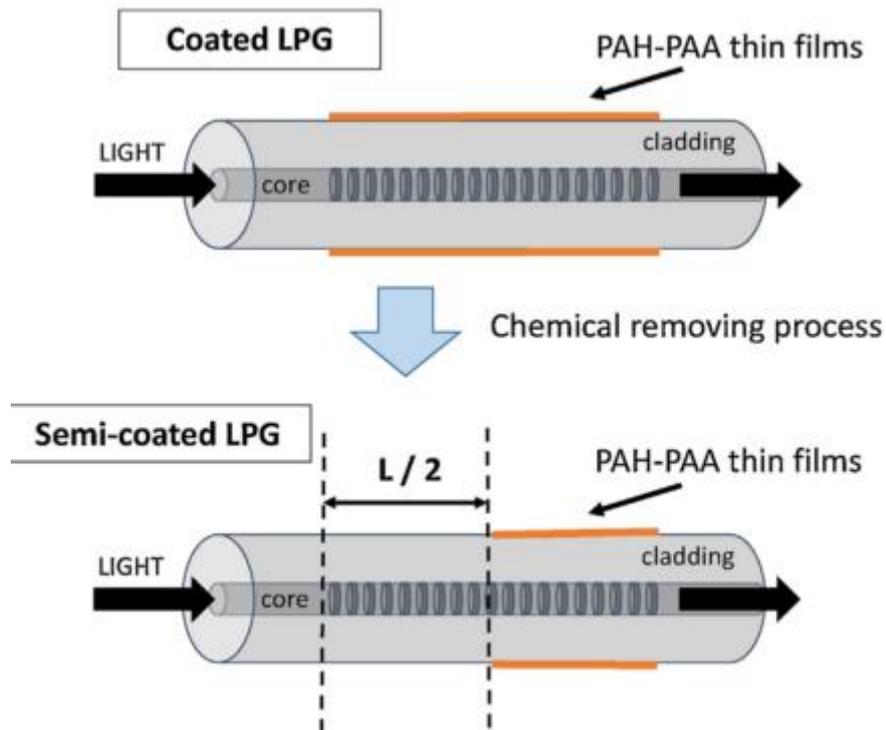


Figura 9. Esquema del proceso de retirada parcial del recubrimiento polimérico.[7]

### 3.4.3 Pruebas en cámara climática

Para comprobar el funcionamiento que presenta el sensor se realiza una batería de pruebas en la cámara climática para observar la respuesta espectral de la fibra respecto a cambios en la humedad relativa y temperatura.

#### 3.4.3.1 Humedad relativa

La prueba de humedad relativa consiste en aplicar una serie de 5 ciclos que comprende un rango de humedad relativa de entre 20% e 80%. Dichos ciclos consisten en un aumento progresivo y lineal de la humedad relativa, cuando se llega al valor máximo programado, la humedad relativa se reduce con la misma pendiente, pero en este caso de valor negativo e inverso a la que siguió el ciclo en su zona de crecimiento generando una simetría respecto al eje imaginario situado en el valor de máxima humedad relativa.

Este ciclo se repite 5 veces para primero, observar que la respuesta espectral de la fibra a este ciclo se mantiene. Y en segunda medida, para generar un mayor volumen de datos que permita realizar un análisis más preciso de dicha

respuesta. Durante todo este proceso se mantiene una temperatura constante a 20°C.

### 3.4.3.2 Temperatura

Se somete a la fibra a un ciclo simétrico de subida y de bajada para observar su respuesta espectral. El ciclo programado presenta un perfil con saltos de 5°C con un valor inicial de 20° y un final o máximo de 60°. La humedad relativa se mantiene constante en este ciclo.

### 3.4.3.3 Setup del experimento

Como colofón al apartado de procedimientos experimentales, se procede a mostrar gráficamente el setup final del experimento con el fin de crear una idea más grafica del sistema experimental del que se ha hecho uso.

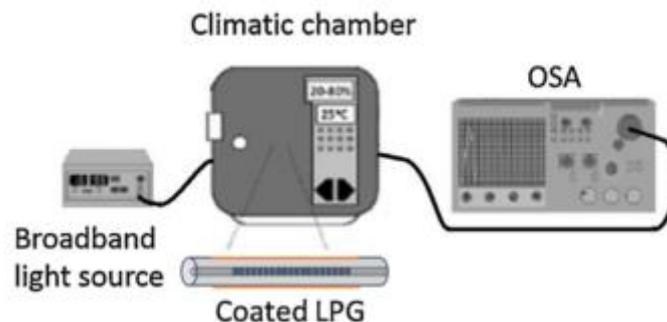


Figura 10. Esquema del setup utilizado en las pruebas de cámara climática[7]

## 4 Resultados

### 4.1 Breve reseña

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas que se han llevado a cabo y que desde el punto de vista del objetivo de este proyecto han resultado exitosas. Esto no significa que las pruebas aquí presentadas sean las únicas pruebas realizadas, pero se ha considerado que son las únicas que tienen la importancia necesaria para ser incluidas en este documento.

Las demás pruebas que no hacen aparición en este documento han servido principalmente para depurar y mejorar progresivamente el método experimental que se ha utilizado en la elaboración del sensor dual.

## 4.2 Pruebas

### 4.2.1 LPG 0 - Prueba 0

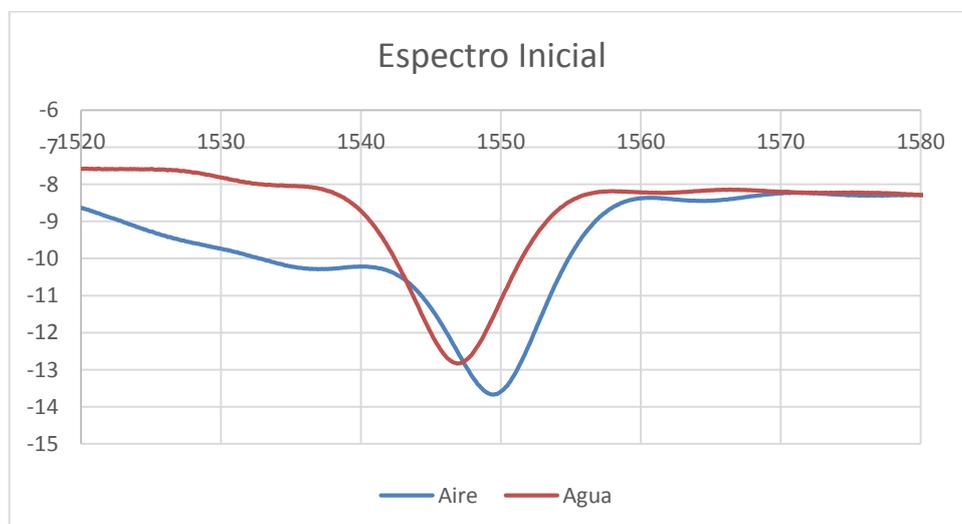
**4.2.1.1 Objetivo General:** *Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.*

**4.2.1.2 Objetivo Específico 1:** *Colaboración para el paper "Simultaneous measurement of humidity and temperature based on a partially coated optical fiber long period grating" como primer acercamiento a los distintos setups y procedimientos de construcción de recubrimientos.*

**4.2.1.3 Objetivo Específico 2:** *Comprobación del funcionamiento de los algoritmos diseñados aplicando datos obtenidos en pruebas no realizadas en este proyecto.*

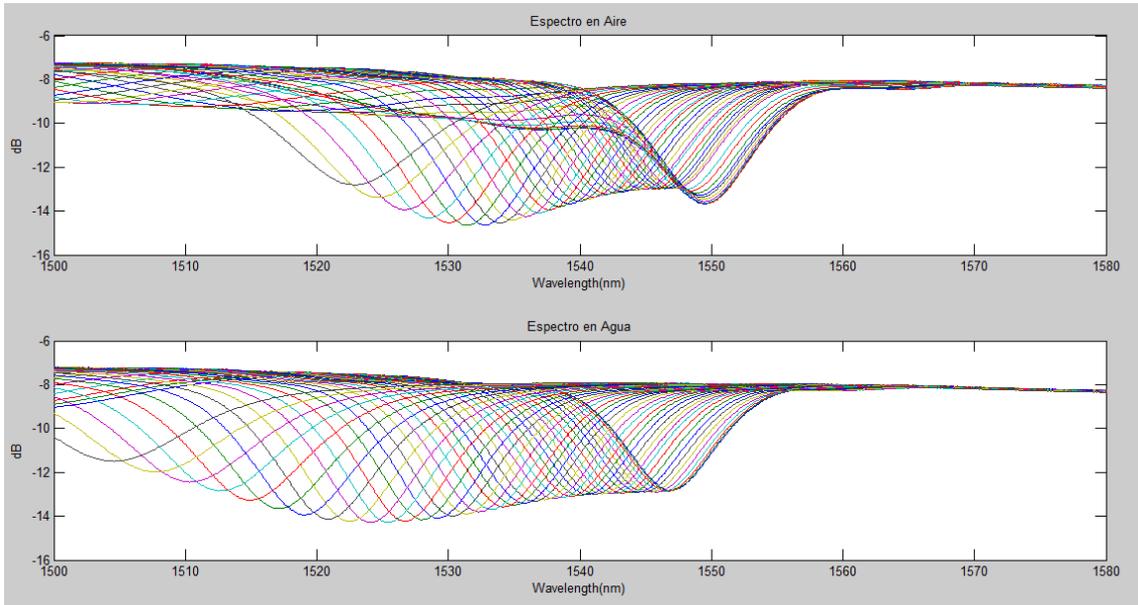
#### 4.2.1.4 Resultados

El punto de partida de este proceso de experimentación es obtener el perfil espectral de la LPG de trabajo **Figura 11**, para posteriormente realizar las pruebas y tratamientos que sean oportunos.

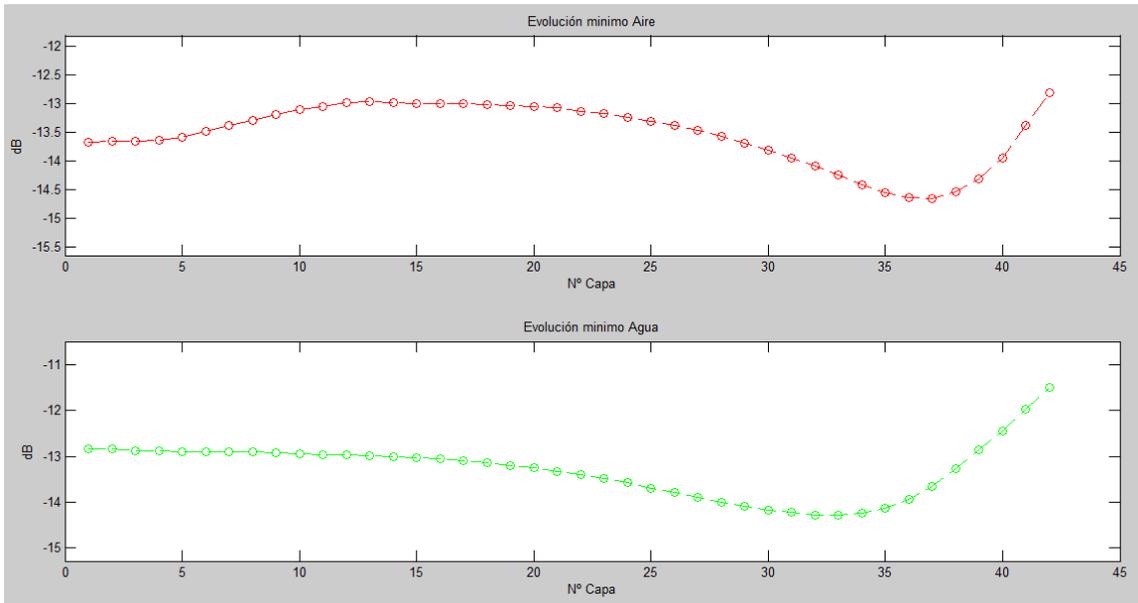


**Figura 11. Espectro Original LPG**

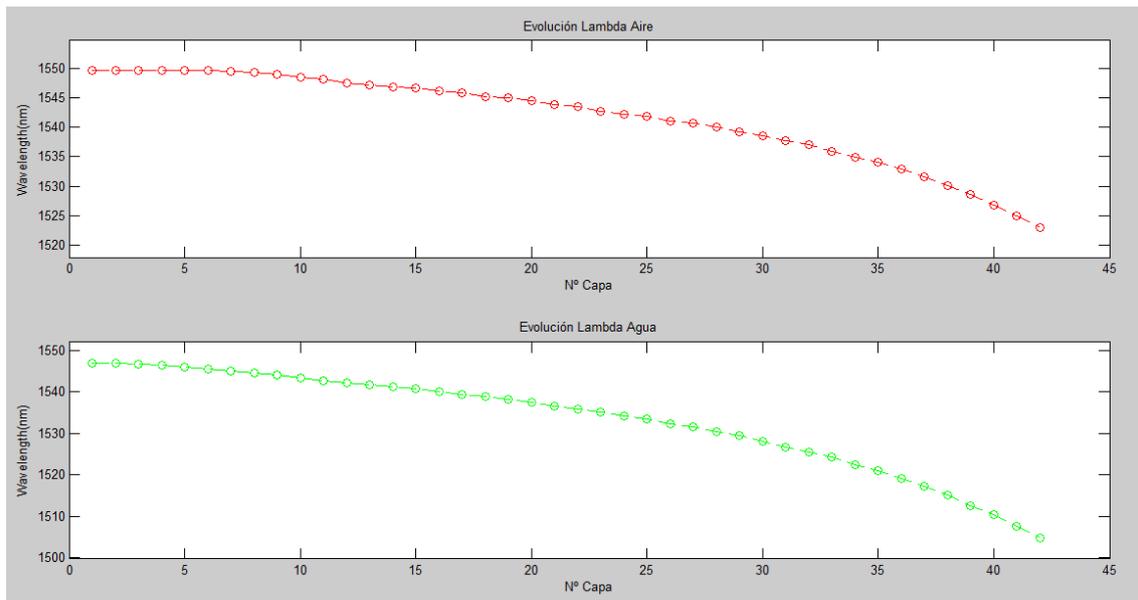
Se procede a realizar la deposición del polímero, se busca crear un recubrimiento polimérico mediante el sistema LbL con polímeros PAH-PAA. A continuación, se observa su evolución.



**Figura 12. Evolución espectro LPG-Aire, LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



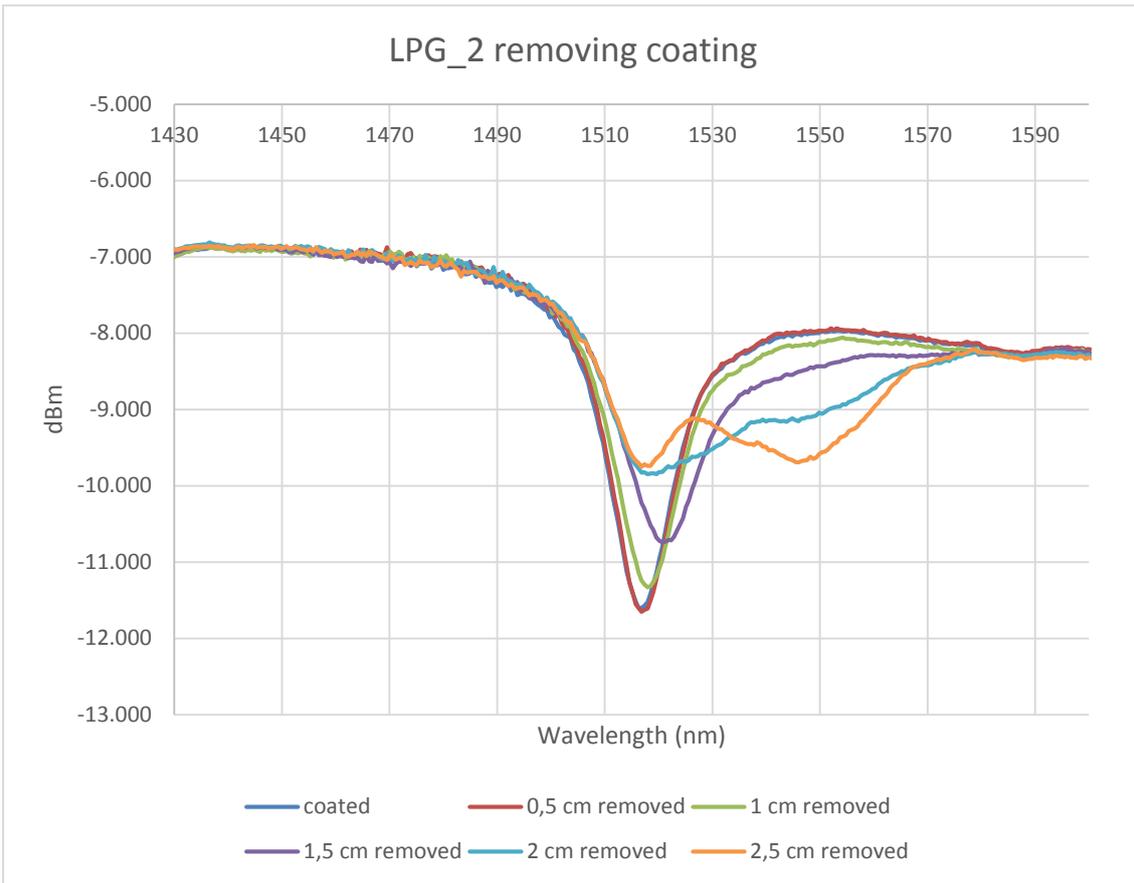
**Figura 13. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



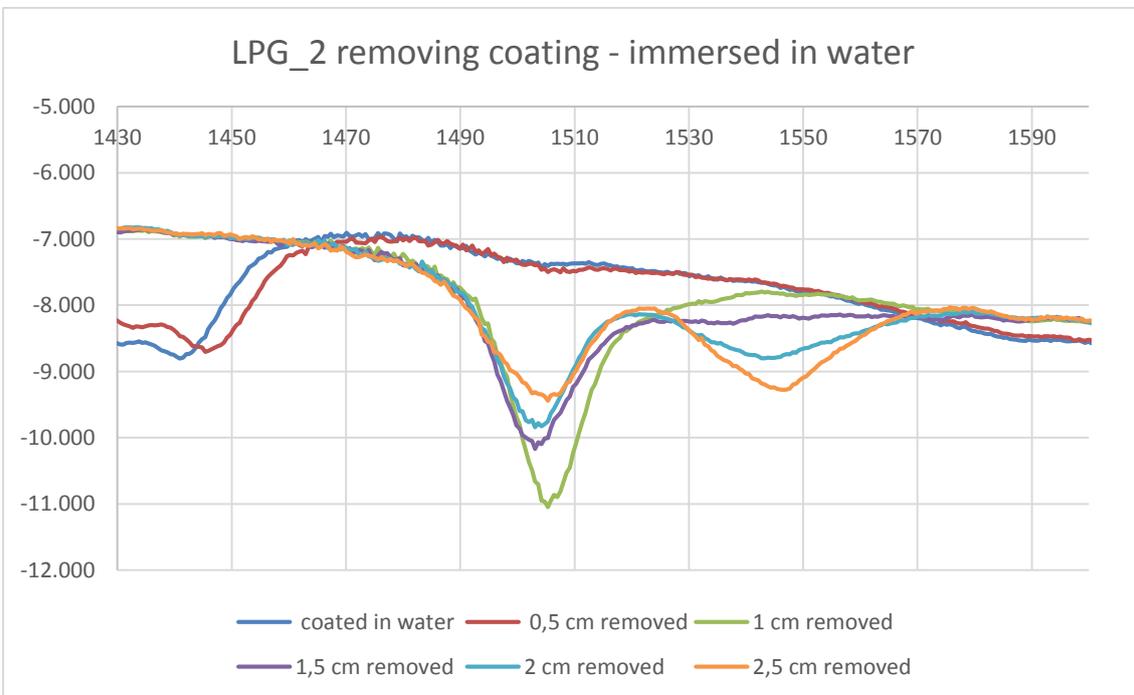
**Figura 14. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

La respuesta final de la LPG nos ofrece una evolución espectral constante y controlada, pero a diferencia de como viene sucediendo en anteriores pruebas, esta deposición presenta una excursión un poco más amplia, así, se procede a eliminar una fracción de dicho recubrimiento esperando una respuesta mejor que anteriores pruebas. el fin de este procedimiento es obtener un segundo pico espectral en la banda de trabajo que corresponde con el pico de la banda de trabajo de la LPG original.

Realizamos un seguimiento a la retirada parcial del recubrimiento para observar su evolución, dicho progreso se observa en la **figura 15**. Siguiendo con el procedimiento realizado hasta ahora, realizamos una captura de la respuesta espectral tanto en aire como en agua.



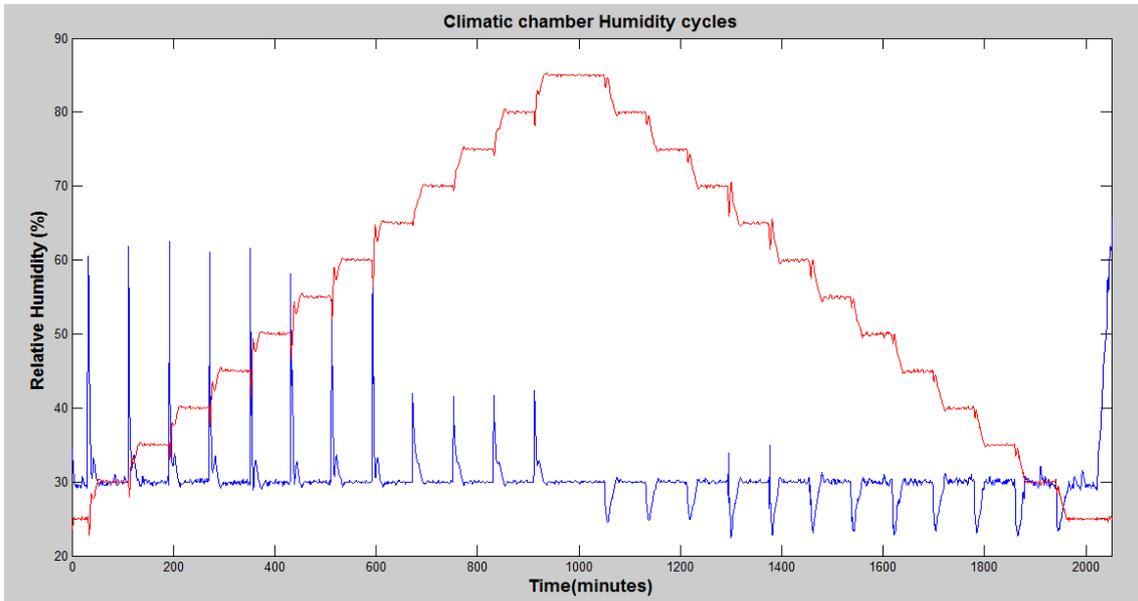
**Figura 15. Evolución espectro LPG-Aire respecto a la retirada parcial del recubrimiento**



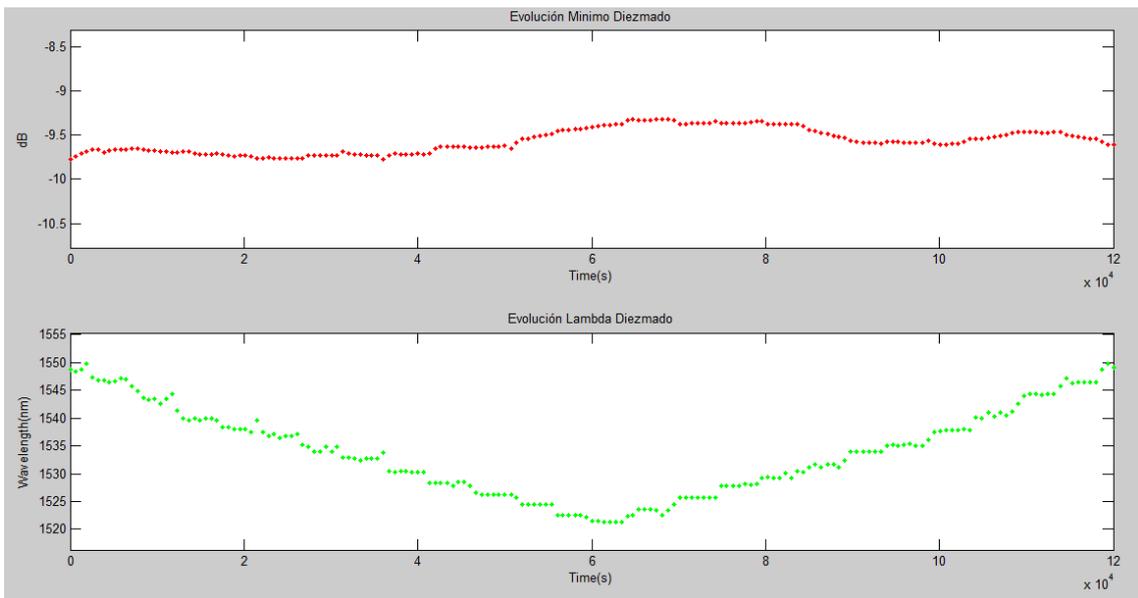
**Figura 16. Evolución espectro LPG-Agua respecto a la retirada parcial del recubrimiento**

Para finalizar y continuando con el procedimiento de anteriores pruebas se procede a realizar la batería de pruebas de cama climática para evaluar la

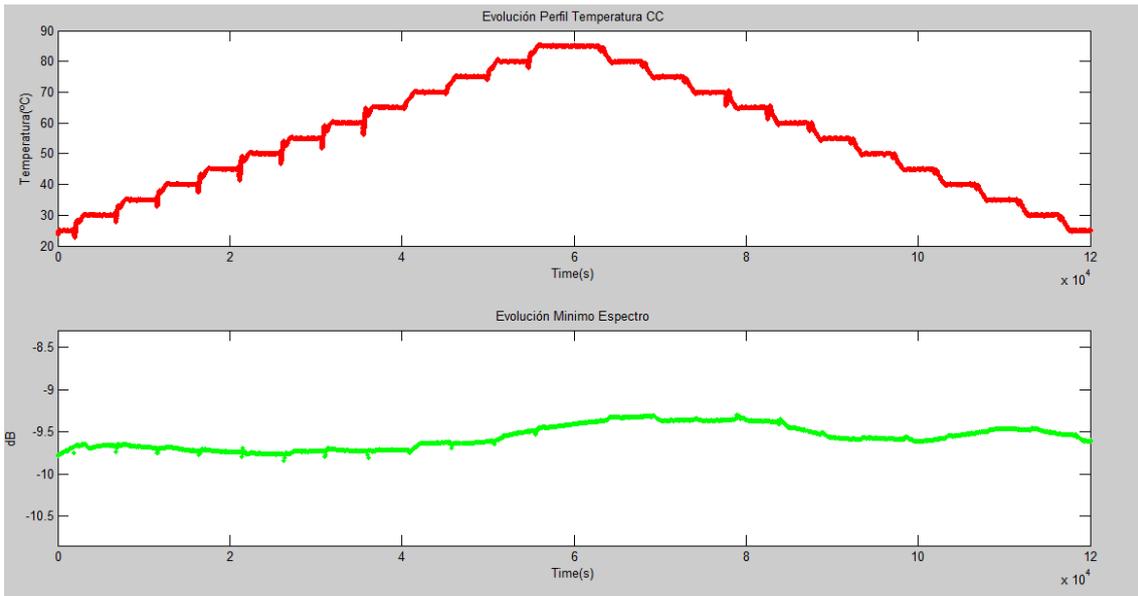
respuesta de la construcción. El comportamiento de la LPG a las pruebas se muestra en las siguientes figuras.



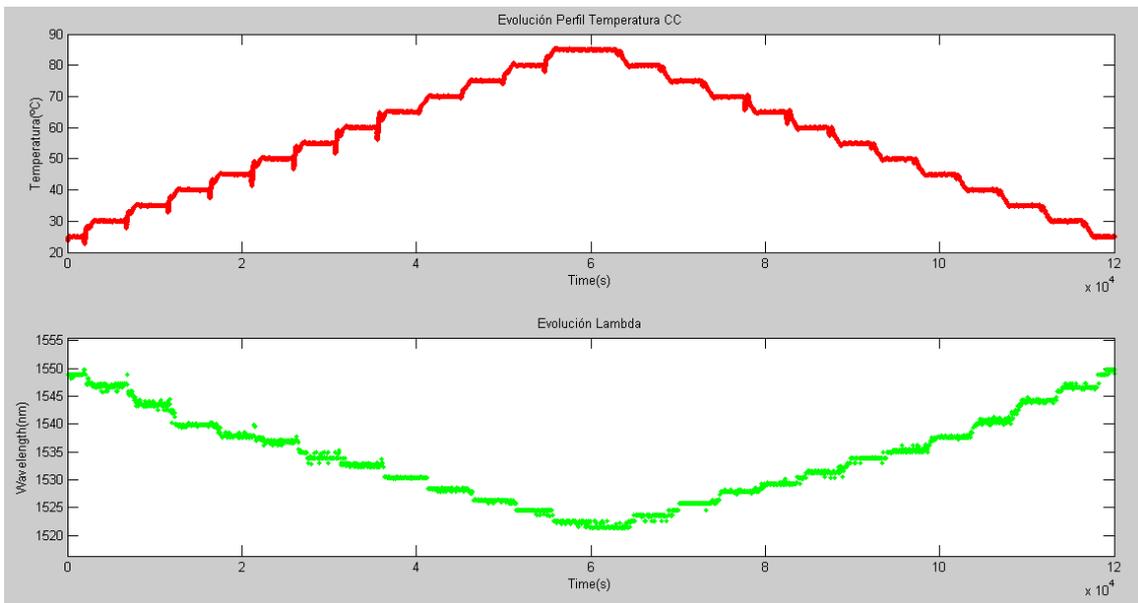
**Figura 17. Perfil del ciclo de temperatura de la cámara climática**



**Figura 18. Evolución Mínimo-Lambda LPG respecto a la temperatura**

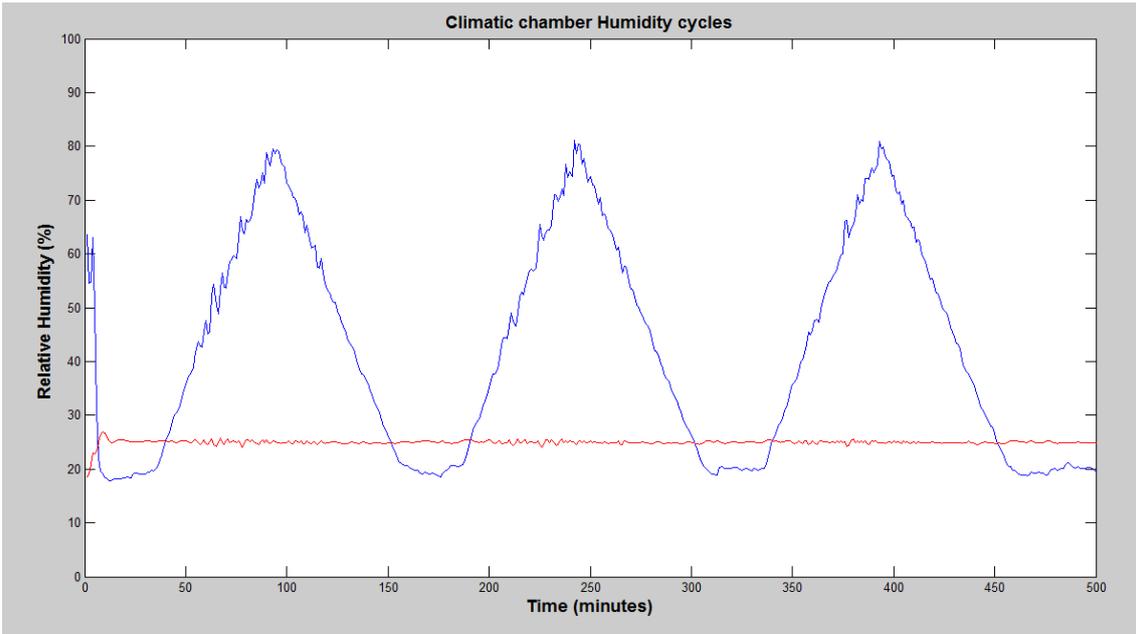


**Figura 19. Evolución Potencia LPG respecto a la temperatura**

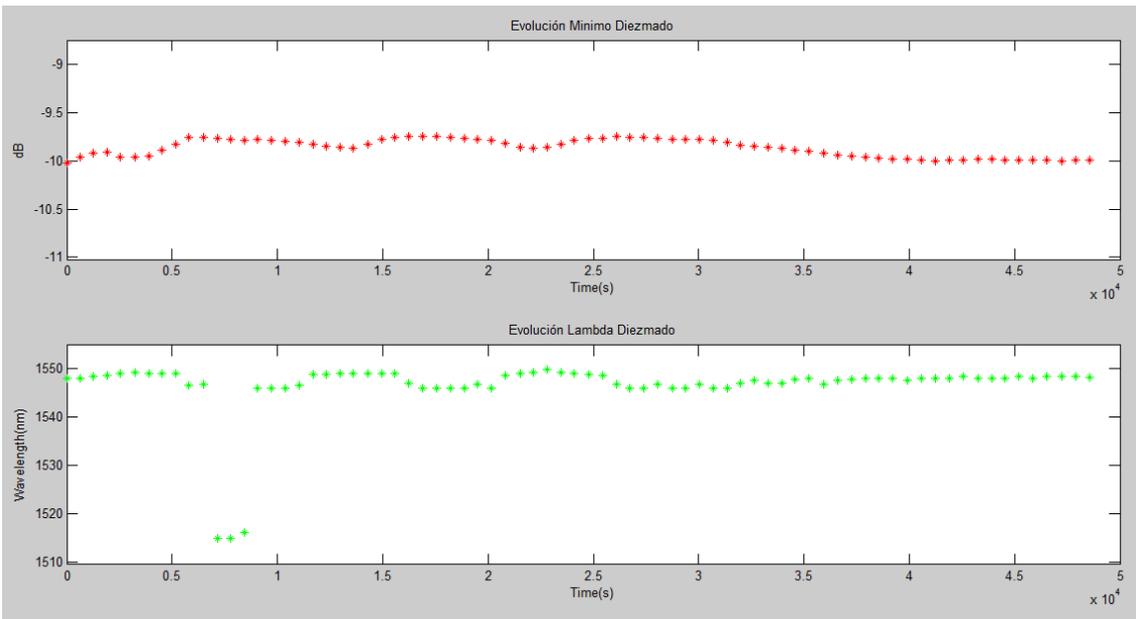


**Figura 20. Comparación de la evolución de lambda respecto al perfil de temperatura de la cámara climática.**

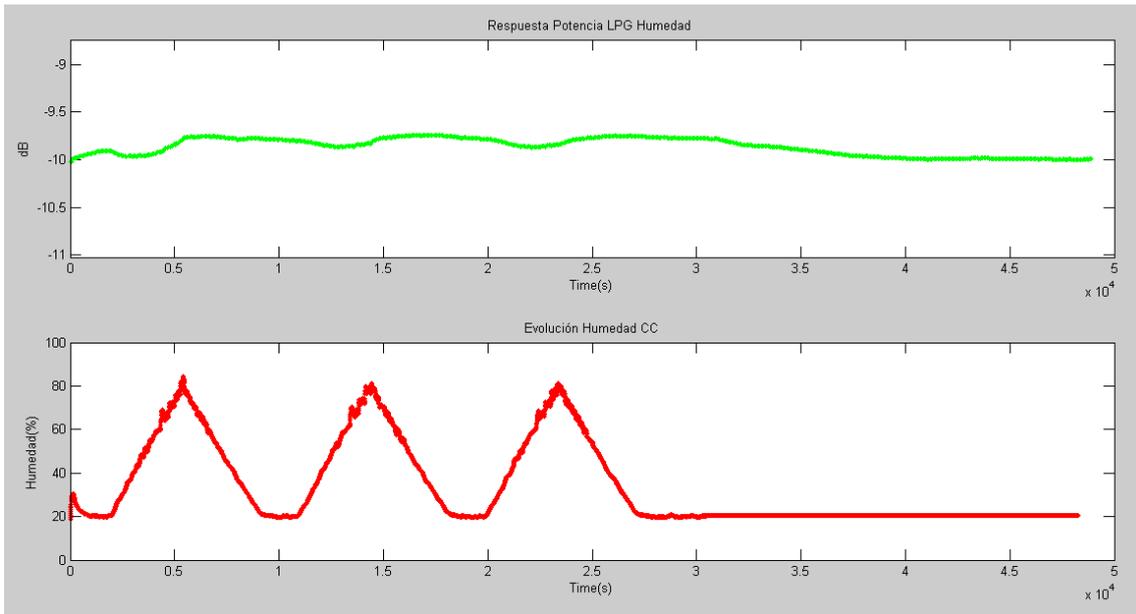
A continuación, se presentan los resultados de la segunda prueba obtenidos de someter a la LPG a una serie de 3 ciclos de cambio de humedad relativa.



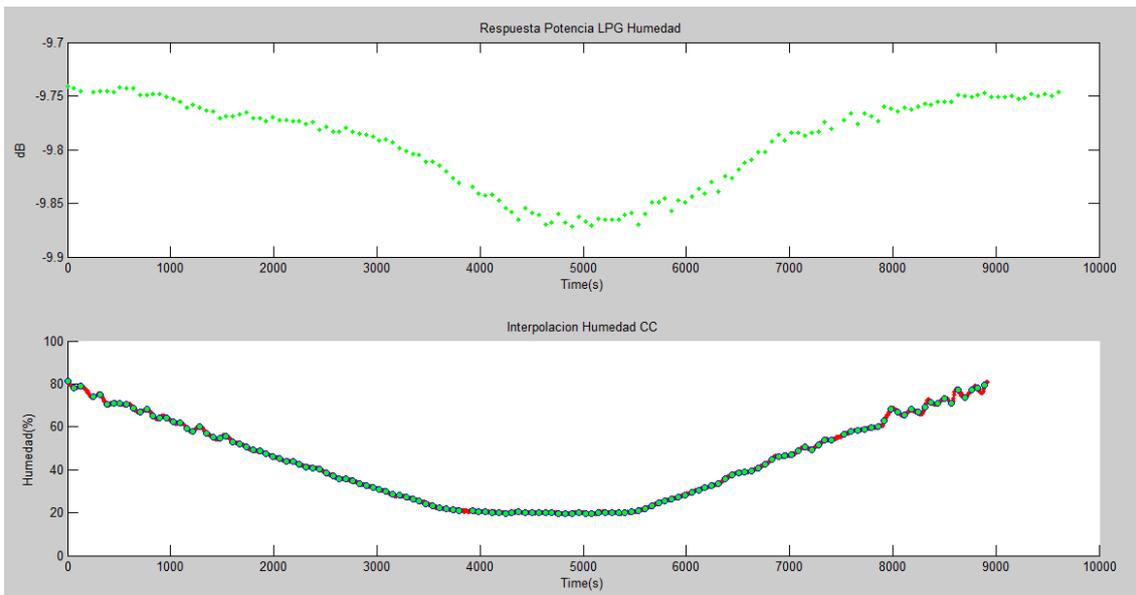
**Figura 21. Perfil del ciclo de humedad de la cámara climática**



**Figura 22. Evolución lambda LPG respecto a la Humedad**

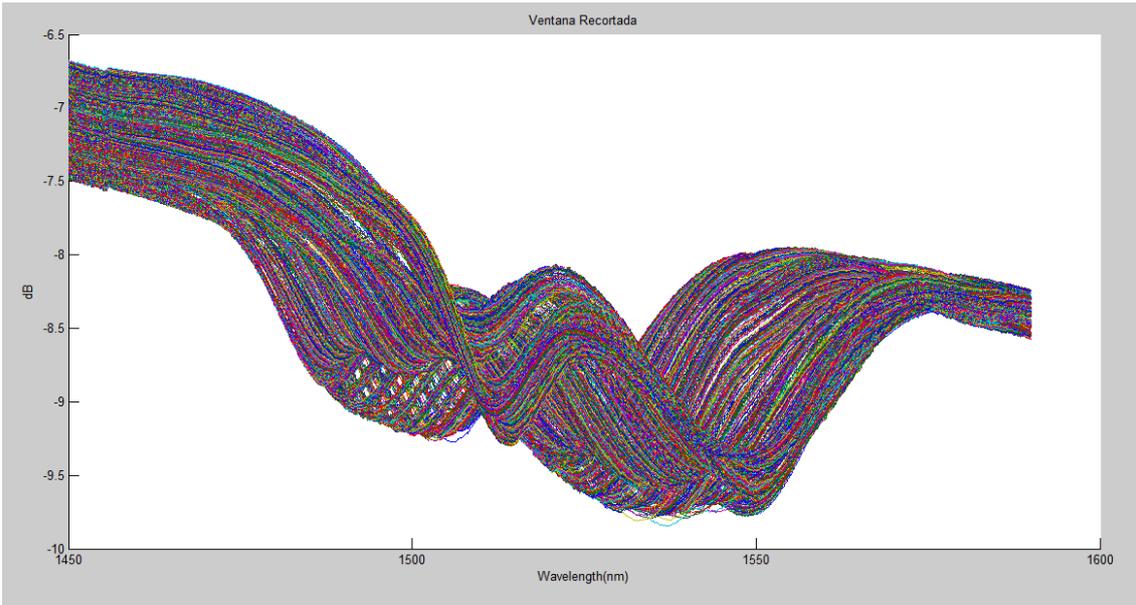


**Figura 23. Evolución Potencia LPG respecto a la Humedad**

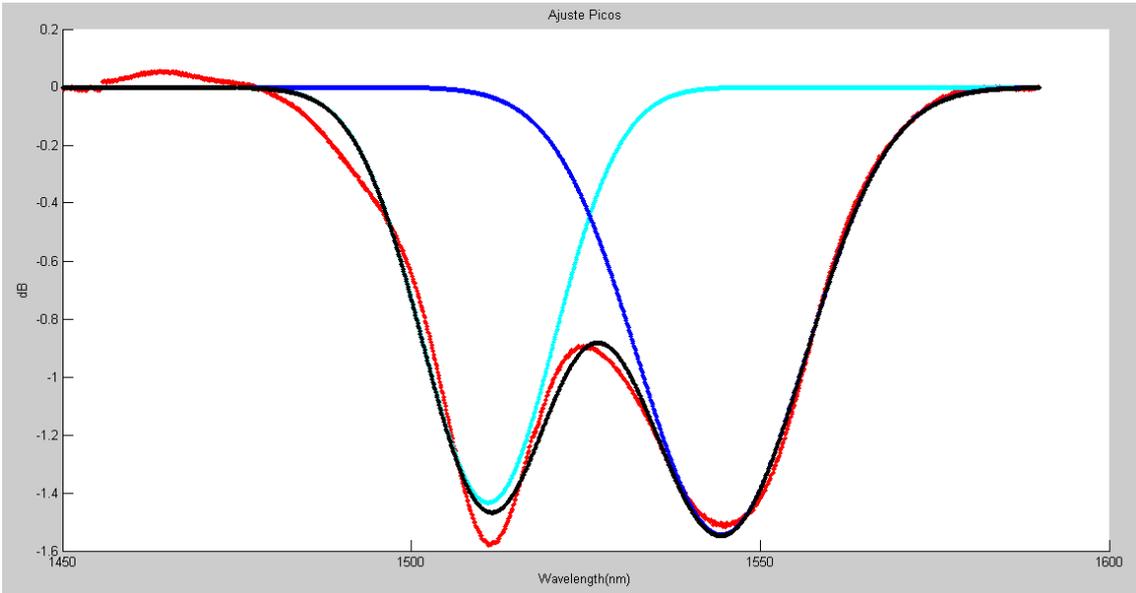


**Figura 24. Evolución lambda LPG respecto a la Humedad e interpolación lineal**

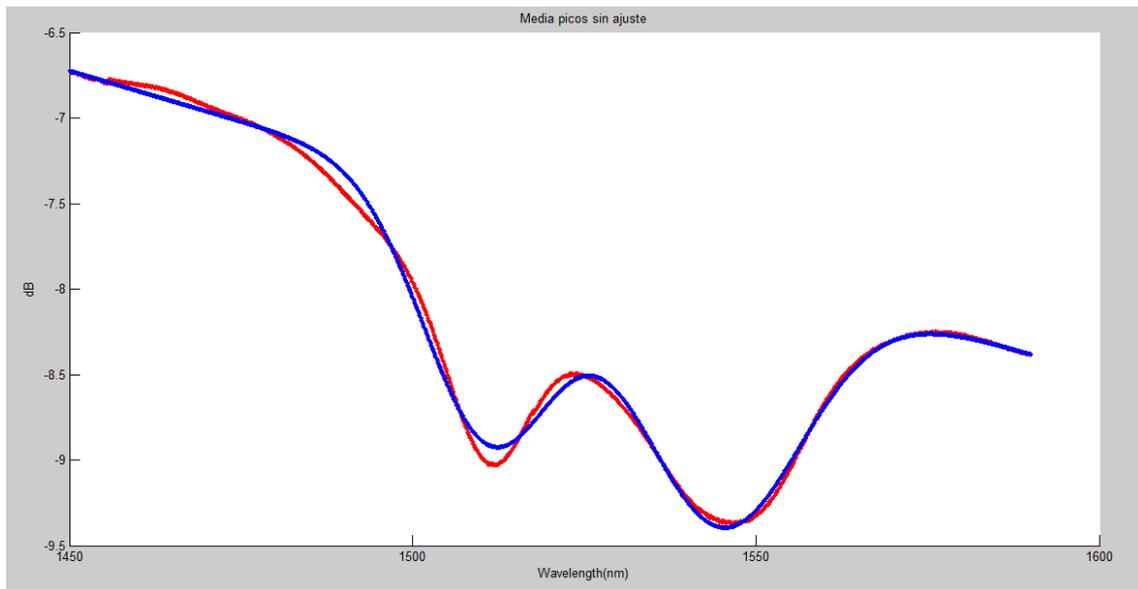
Como se ha podido observar, el pico de trabajo ha sufrido un desdoblamiento cuando se ha realizado la retirada parcial del recubrimiento. Precisamente este efecto es el que se está buscando como base para el sensor dual temperatura-Humedad relativa. Este efecto se debe a la contribución que tiene en el espectro por una parte el recubrimiento polimérico y por otro el pico original de la LPG. Para comprobar que realmente es la contribución de dos picos diferenciado aplicamos un ajuste paramétrico no lineal con ajuste gaussiano para poder diferenciar dichos picos, dicho ajuste se puede observar en las siguientes figuras.



**Figura 25. Ventana de trabajo de los espectros de la prueba**



**Figura 26. Ajuste de picos en el espectro**



**Figura 27. Media de los picos sin ajuste de recta.**

#### 4.2.2 LPG1 - Prueba 1

**4.2.2.1 Objetivo General:** *Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.*

**4.2.2.2 Objetivo Específico:** *Analizar la respuesta espectral general de una LPG a un proceso de recubrimiento mediante LbL.*

#### 4.2.2.3 Resultados

Como es bien conocido, el perfil espectral de una LPG abarca un intervalo muy amplio de longitudes de onda, en el caso que compete a este proyecto el análisis de dicho perfil se ha concentrado en una zona en particular, **Figura 28**, la cual consideramos la más prometedora para observar los cambios que esperamos detectar al aplicar los procesos tanto de recubrimiento como la batería de pruebas de cámara climática, la ventana de análisis en la que se concentra este trabajo es el intervalo 1500 – 1580 nm.

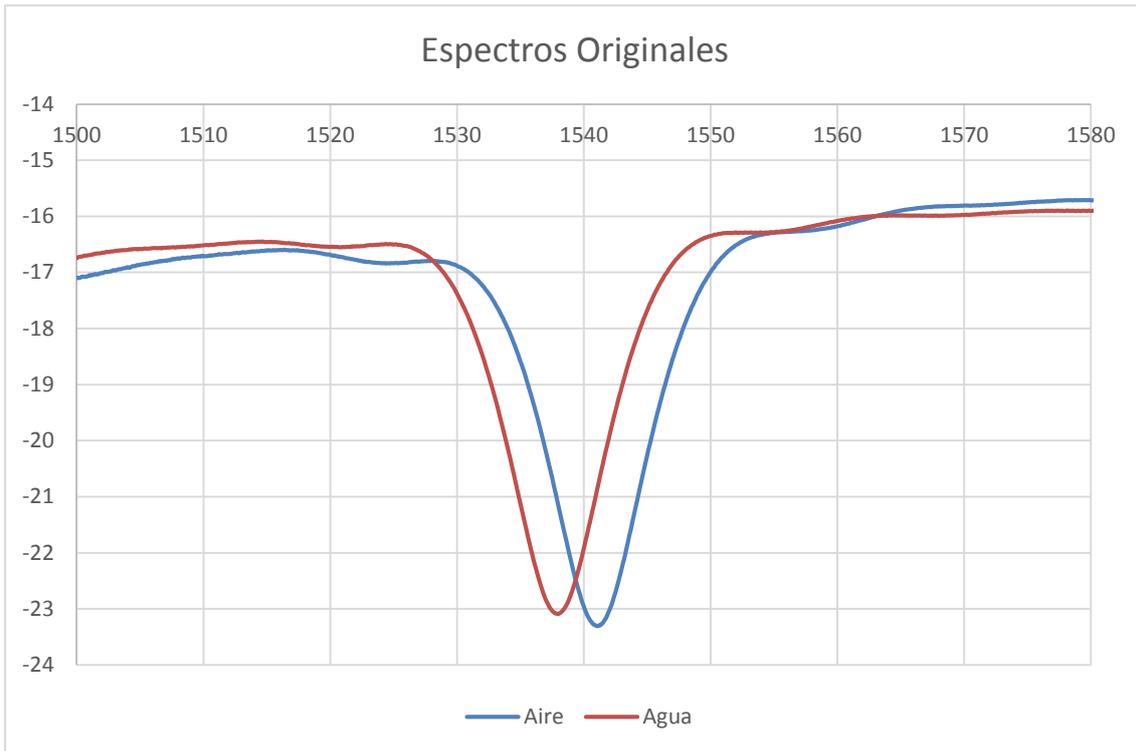


Figura 28. Comparación del perfil espectral original de la banda de trabajo tanto en aire como en agua.

El proceso al que se somete la LPG es la deposición de una serie de capas poliméricas basadas en PAA – PAH mediante la técnica LbL, en la **figura 29**, se muestra la evolución desde la capa 1 que se podría considerar como el espectro original de la LPG hasta la capa final, en este caso la numero 50.

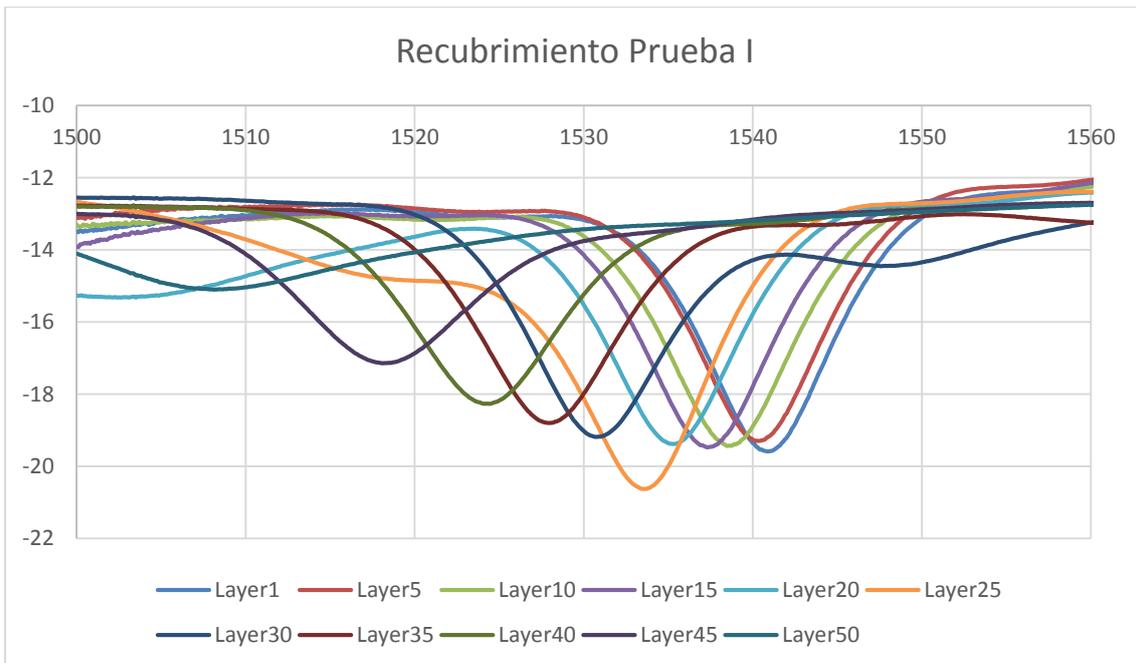


Figura 29. Evolución del perfil espectral de la LPG respecto al número de capas poliméricas generadas.

Observando la evolución del perfil podemos inferir ciertos comportamientos que nos serán de gran utilidad en el futuro. El primero de ellos y que es fácilmente deducible es que la longitud de onda central de la banda de trabajo se desplaza hacia la izquierda a medida que se acumulan las capas de recubrimiento. Este desplazamiento genera una excursión del pico que resulta muy interesante a la hora de plantear la viabilidad del sensor dual que se está buscando.

Dado que esta primera prueba se ha realizado como acercamiento previo tanto a las técnicas como a las posibles respuestas que pueda presentar la LPG a los procesos a los que se verá sometida no inferimos más una guía de comportamiento del dispositivo a estudio.

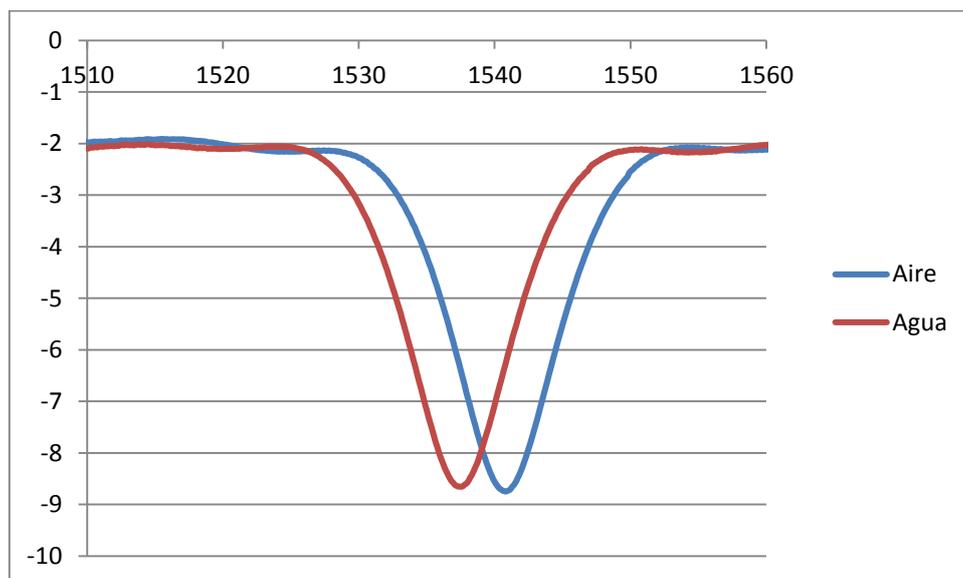
### 4.2.3 LPG1 - Prueba 2

**4.2.3.1 Objetivo General:** *Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.*

**4.2.3.2 Objetivo Específico:** *Analizar la respuesta espectral al aplicar un recubrimiento LbL con un enriquecimiento de plata 10nM.*

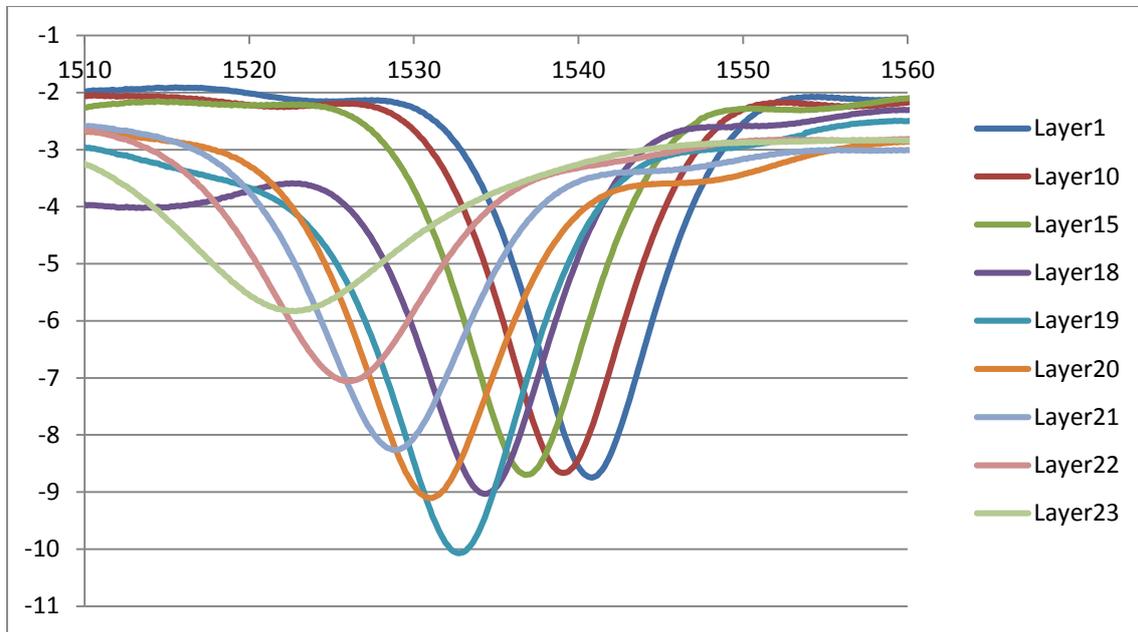
#### 4.2.3.3 Resultados

La LPG presenta un espectro inicial, **figura 30**, dicho espectro sufrirá una modificación progresiva debido a la aplicación de bicapas sobre la zona de la LPG.

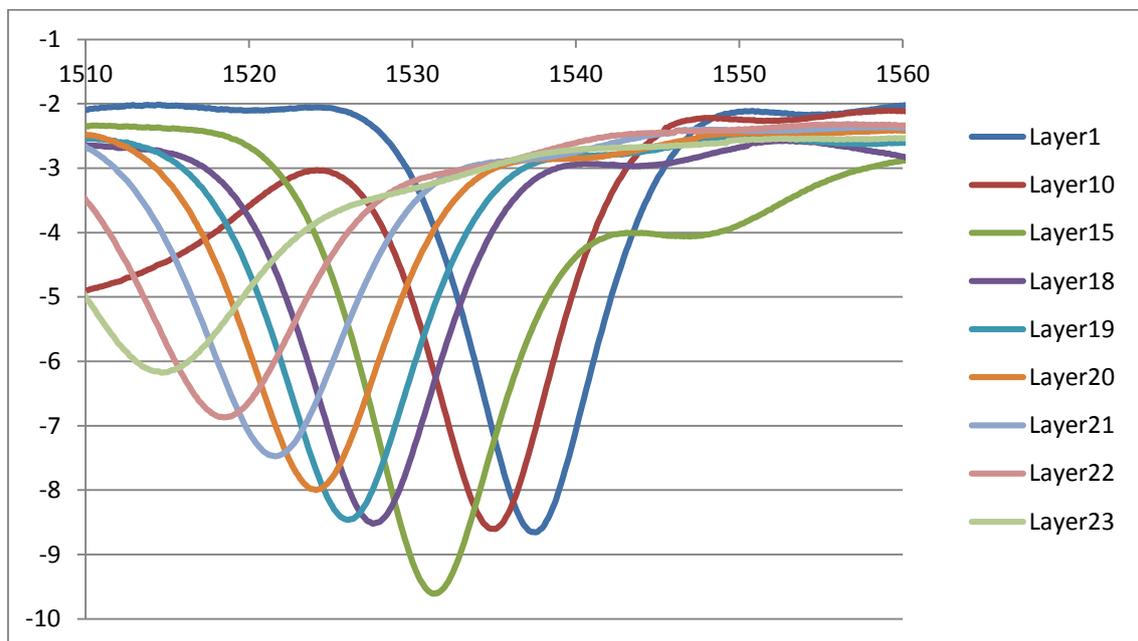


**Figura 30. Espectro Original LPG**

Debido a las necesidades específicas de la investigación se ha realizado un seguimiento del crecimiento del recubrimiento en dos condiciones diferentes, es este caso, la captura del espectro se ha realizado tanto en aire como en agua. Esta evolución se ve reflejada en las **figuras 31 y 32**.



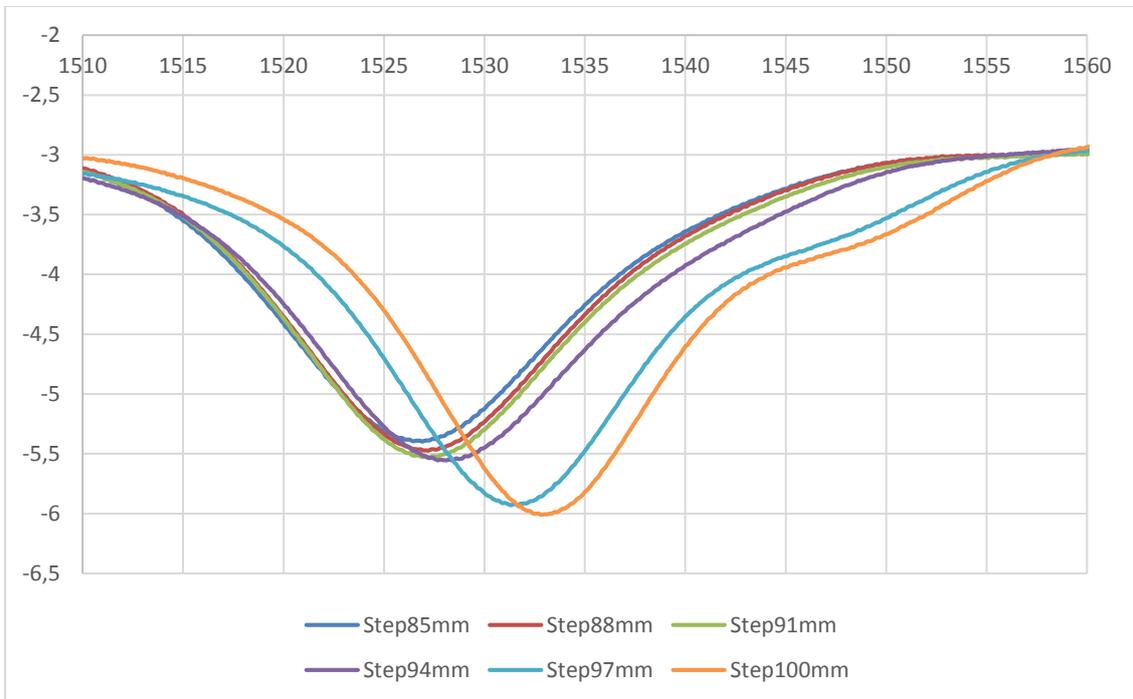
**Figura 31. Evolución espectro LPG-Aire respecto a las capas de recubrimiento**



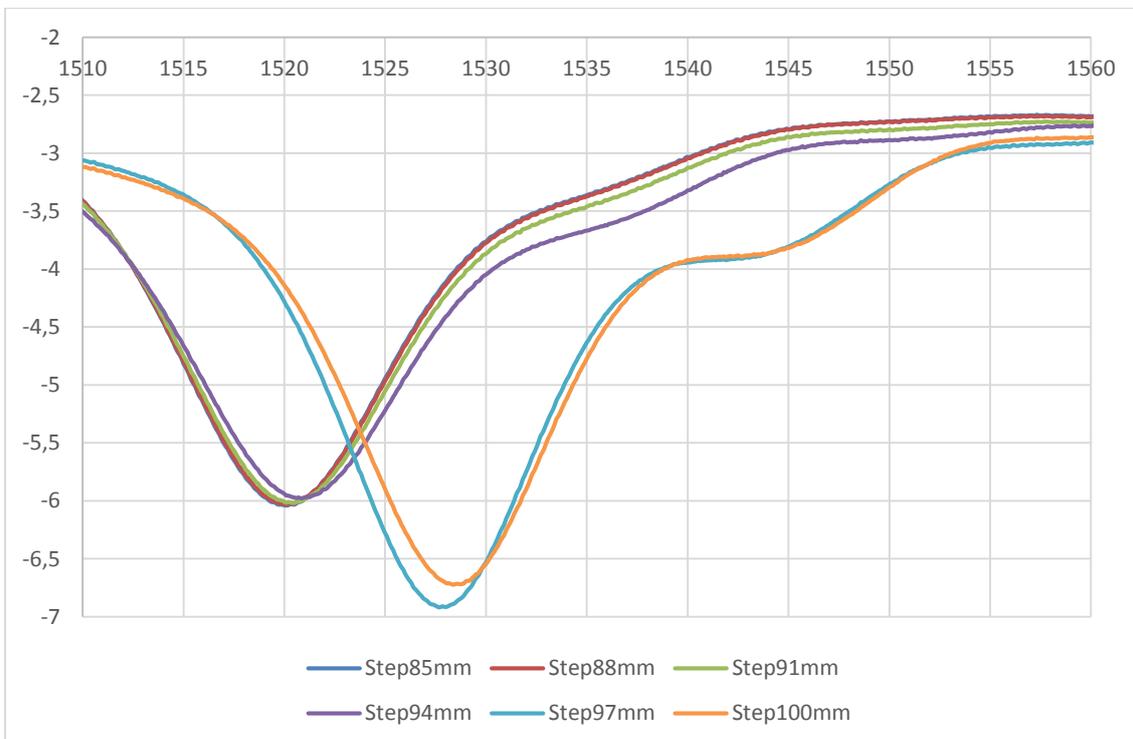
**Figura 32. Evolución espectro LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

Observando la respuesta final de la LPG se procede a eliminar una fracción de dicho recubrimiento, el fin de este procedimiento es obtener un segundo pico espectral en la banda de trabajo que corresponde con el pico de la banda de trabajo de la LPG original.

Realizamos un seguimiento a la retirada parcial del recubrimiento para observar su evolución, dicho progreso se observa en la **figura 33 y 34**. Siguiendo con el procedimiento realizado hasta ahora, realizamos una captura de la respuesta espectral tanto en aire como en agua.

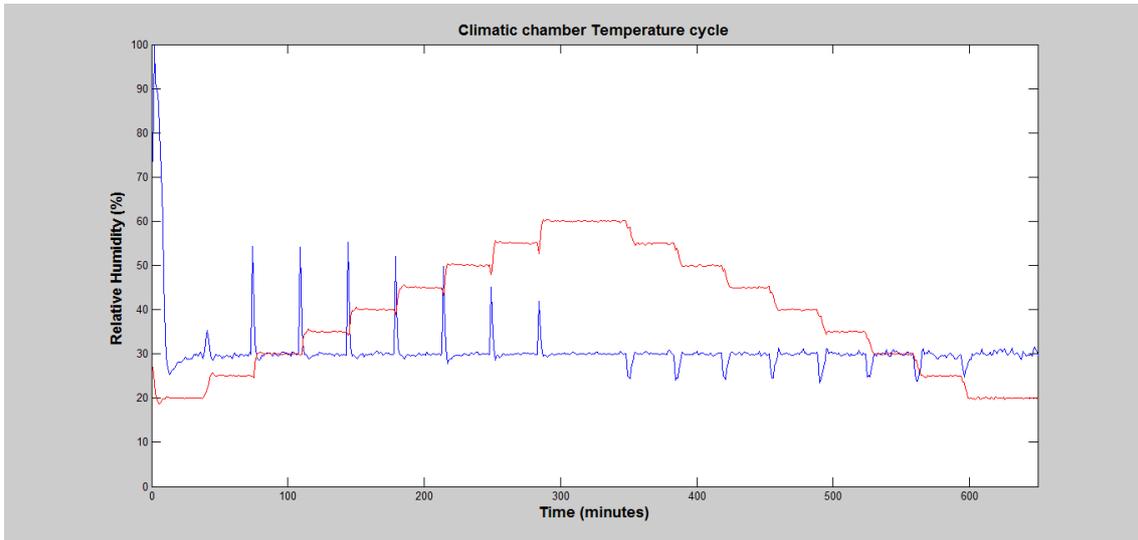


**Figura 33. Evolución espectro LPG-Aire respecto a la retirada parcial del recubrimiento**

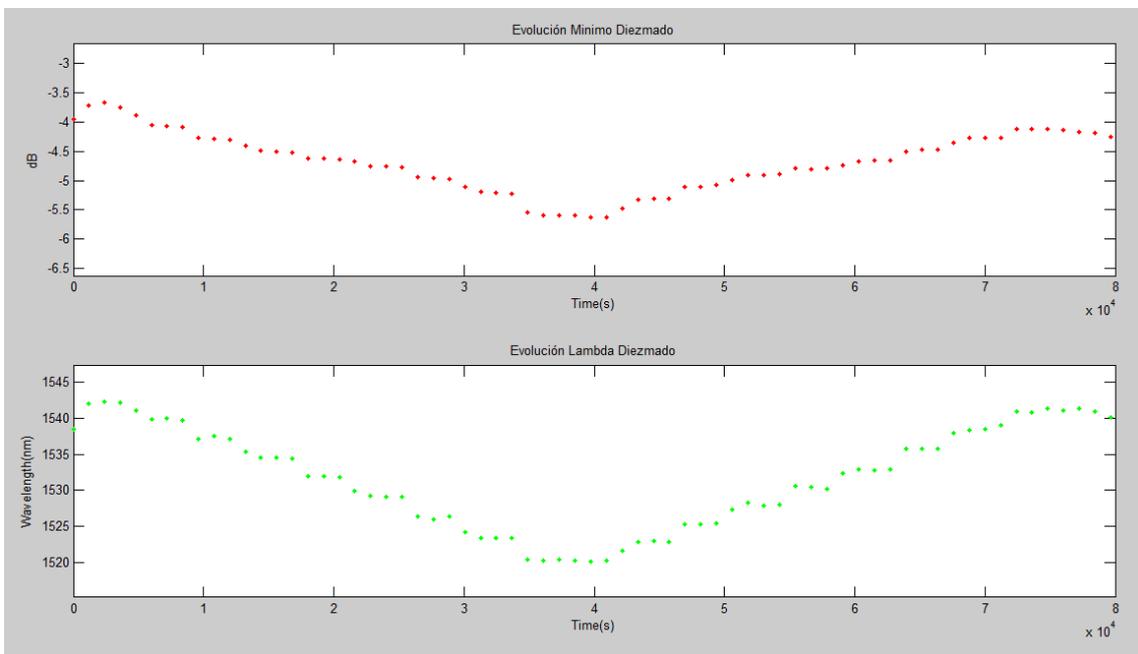


**Figura 34. Evolución espectro LPG-Agua respecto a la retirada parcial del recubrimiento**

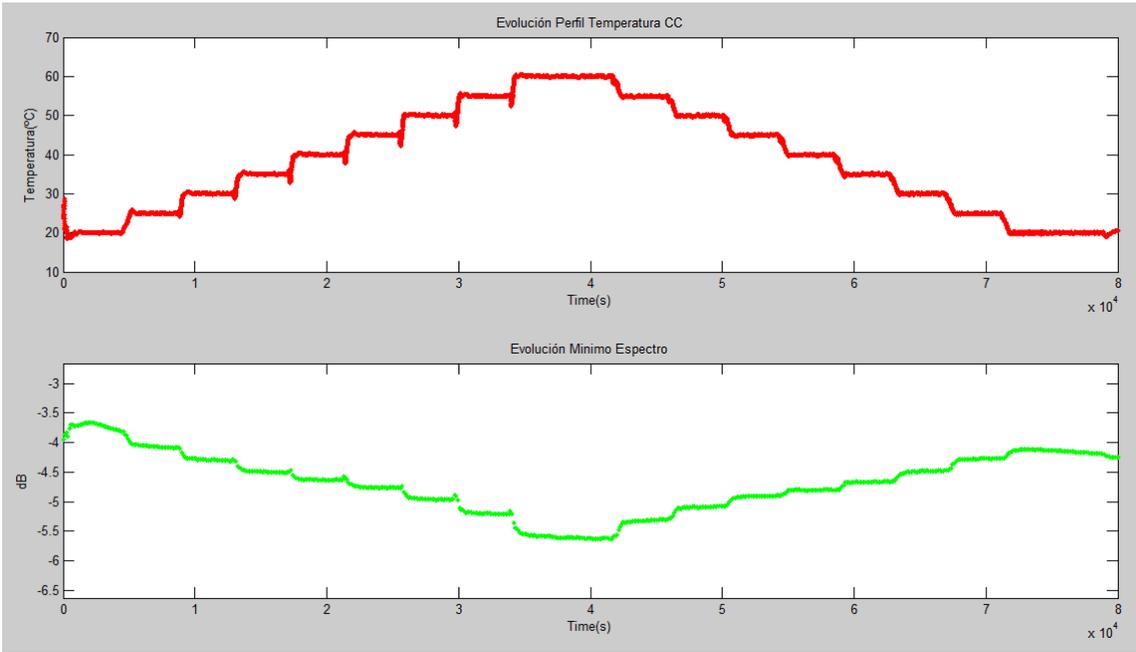
Con los resultados obtenidos, como último paso de la prueba se somete a la LPG a dos pruebas para analizar sus respectivas respuestas en la banda de trabajo. Por una parte, se someterá a la fibra a una serie de cinco ciclos de cambios de humedad en los que observaremos la sensibilidad de la LPG a cambios de humedad. En segundo lugar, se someterá a un ciclo de temperatura. Se observa la respuesta espectral a un ciclo de temperatura con un perfil específico. La respuesta de la LPG se observa en las siguientes figuras.



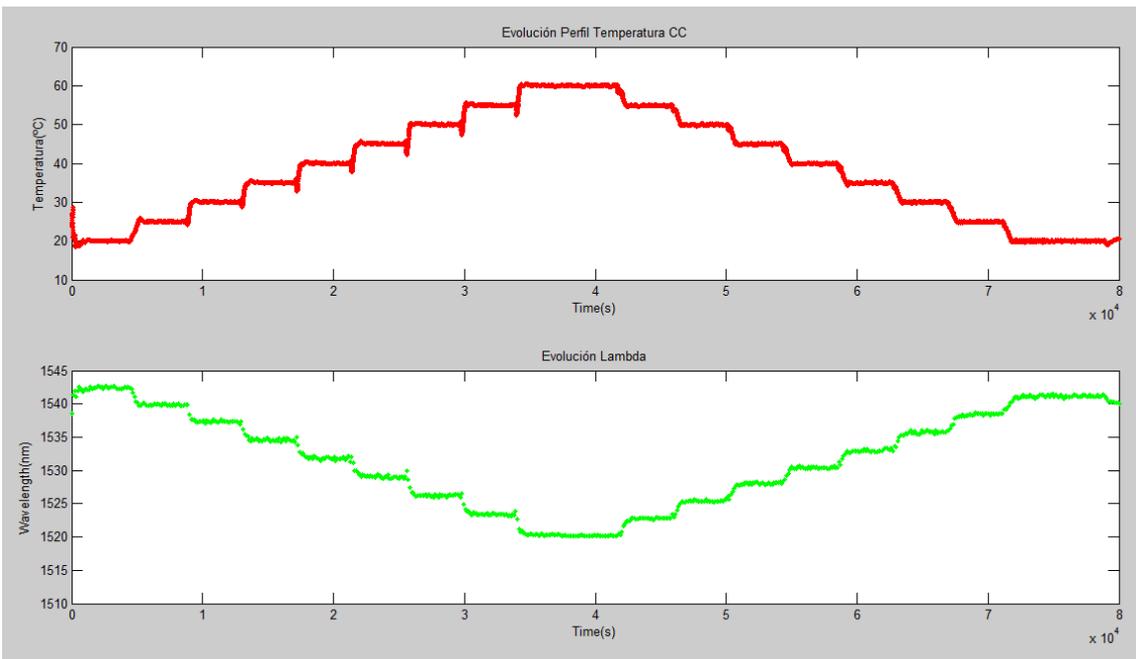
**Figura 35. Perfil del ciclo de temperatura de la cámara climática**



**Figura 36. Evolución Mínimo-Lambda LPG respecto a la temperatura**

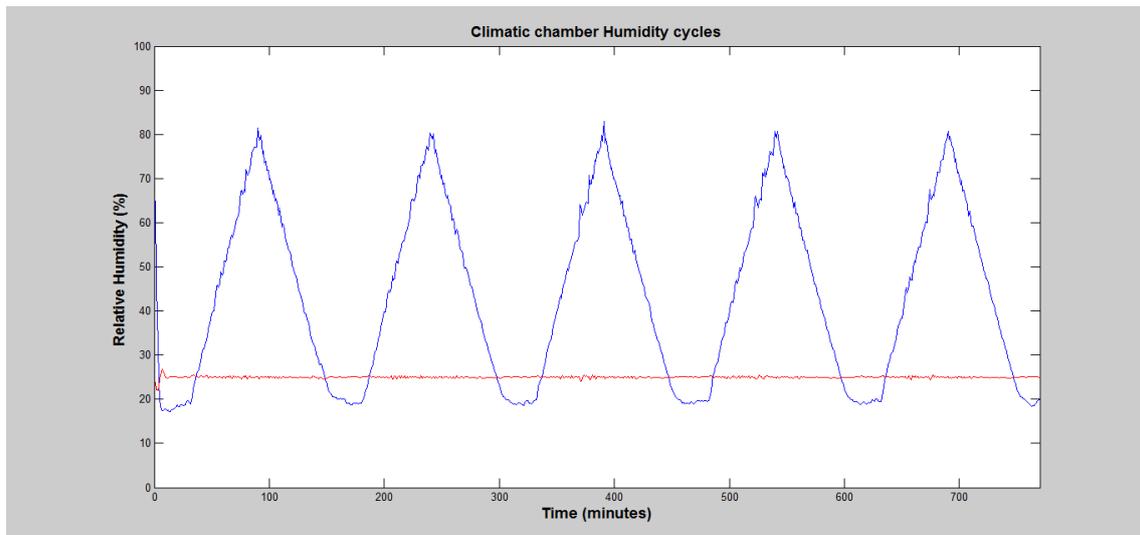


**Figura 37. Evolución Potencia LPG respecto a la temperatura**

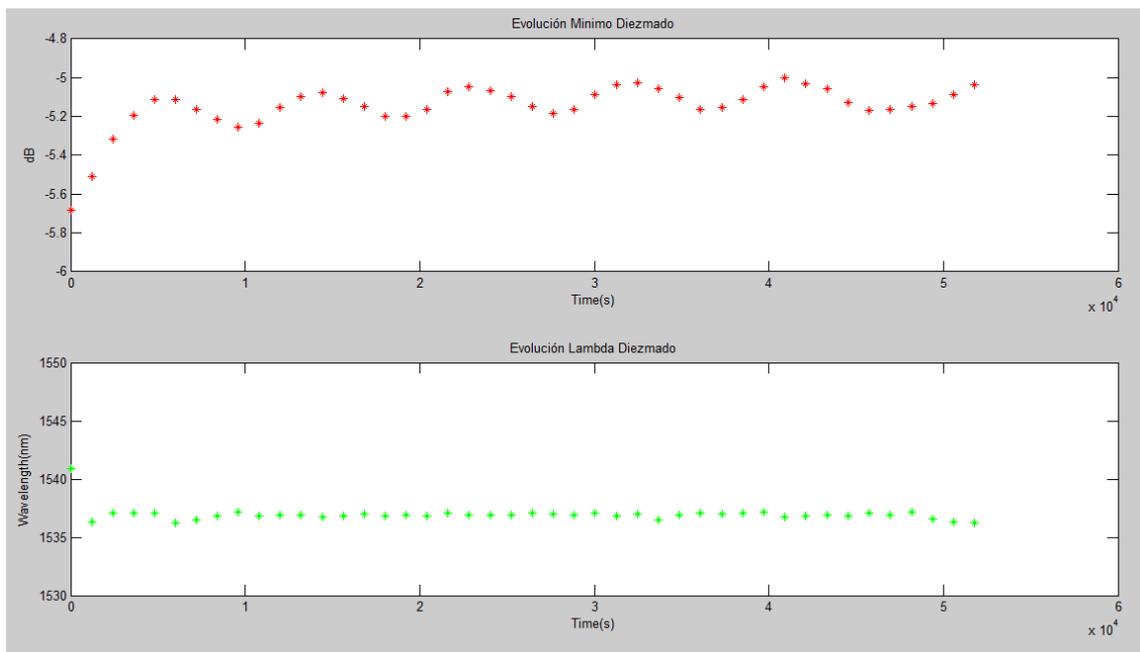


**Figura 38. Evolución Lambda LPG respecto a la temperatura**

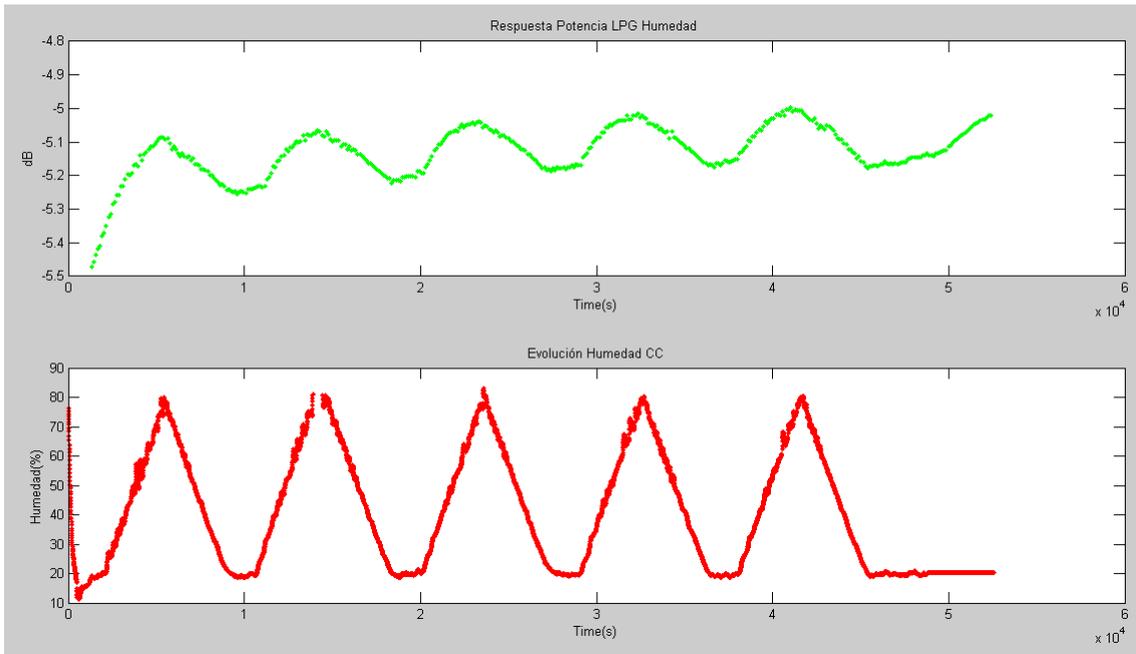
A continuación, se presentan los resultados de la segunda prueba obtenidos de someter a la LPG a una serie de 5 ciclos de cambio de humedad relativa.



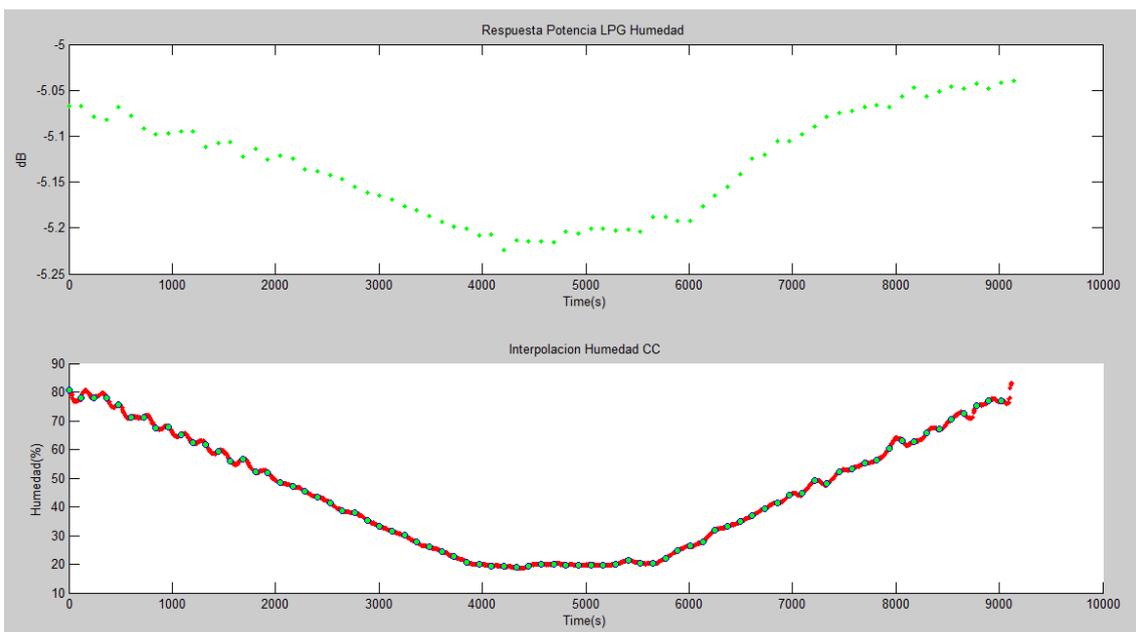
**Figura 39. Perfil del ciclo de humedad de la cámara climática**



**Figura 40. Evolución lambda LPG respecto a la Humedad**



**Figura 41. Evolución Potencia LPG respecto a la Humedad**



**Figura 42. Evolución lambda LPG respecto a la Humedad e interpolación lineal**

Como se puede observar en la última figura se ha realizado un algoritmo para generar una interpolación lineal que permita saber con exactitud el valor correspondiente de desplazamiento de la longitud de onda respecto a la humedad relativa existente en dicho momento.

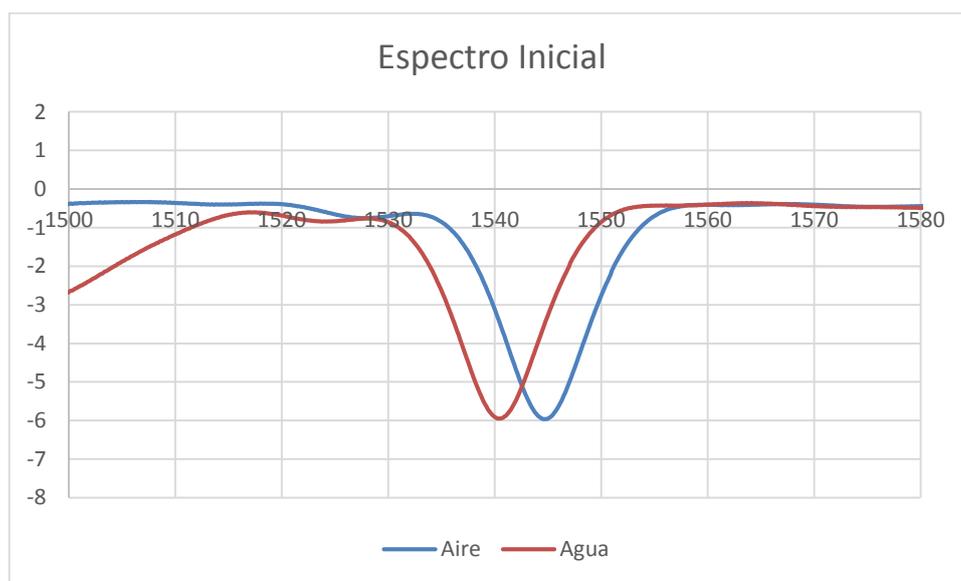
#### 4.2.4 LPG1 - Prueba 3

**4.2.4.1 Objetivo General:** *Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.*

**4.2.4.2 Objetivo Específico:** *Analizar la respuesta espectral al aplicar un recubrimiento LbL con un enriquecimiento de plata 10mM.*

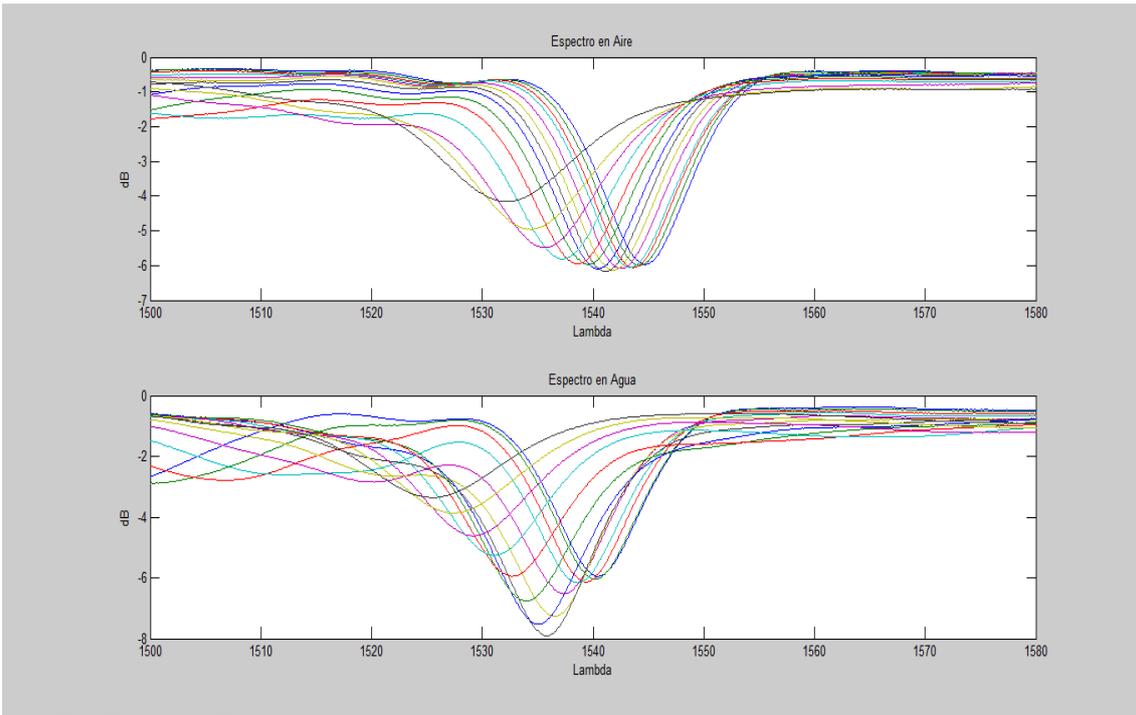
#### 4.2.4.3 Resultados

La LPG presenta un espectro inicial **figura 43**, dicho espectro sufrirá una modificación progresiva debido a la aplicación de bicapas sobre la zona de la LPG.

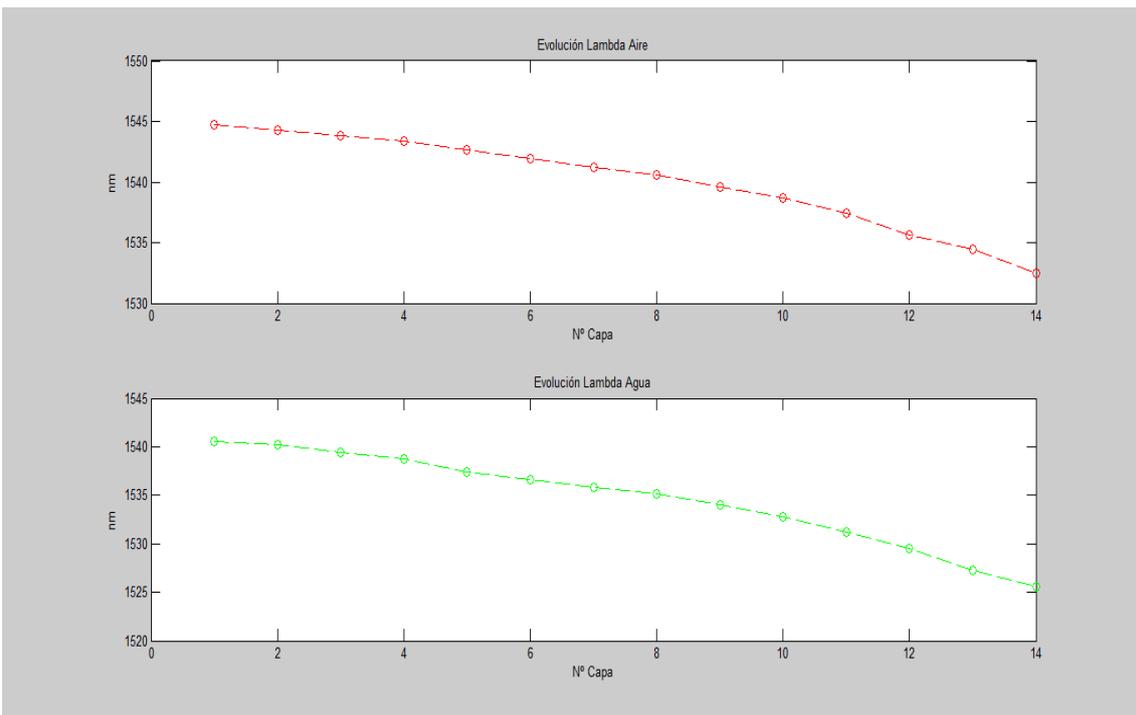


**Figura 43. Espectro Original LPG**

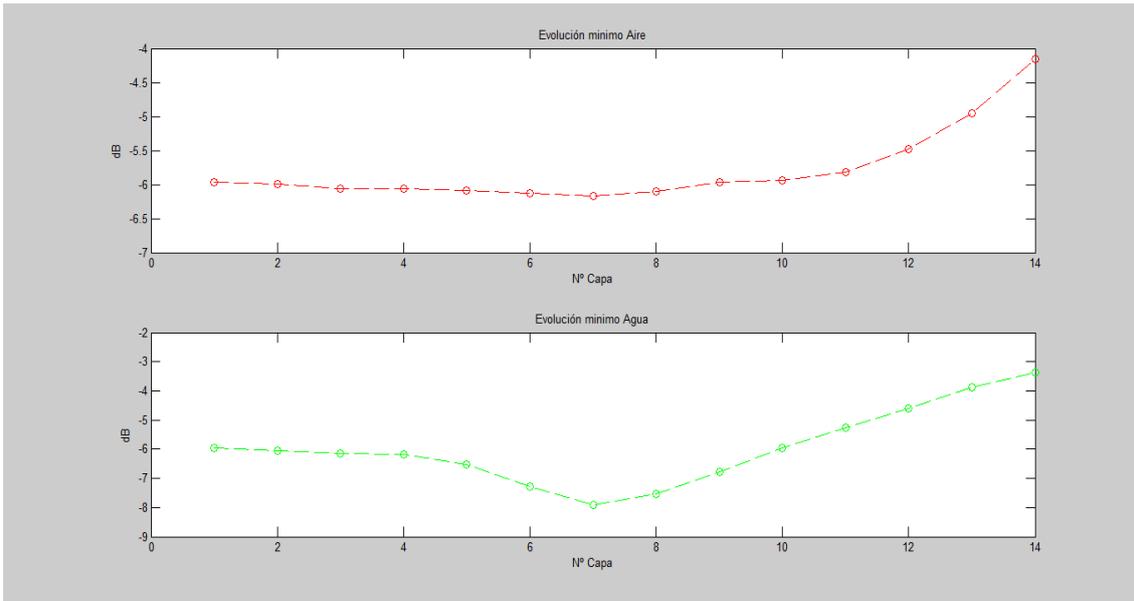
Como podemos observar en el espectro inicial, la diferencia entre el espectro en aire y en agua es muy pequeña, esto ofrece una idea de la respuesta que tendrá la LPG al tratamiento al que la vamos a someter y cuyos resultados se aprecian en la **figura 44**.



**Figura 44. Evolución espectro LPG-Aire, LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



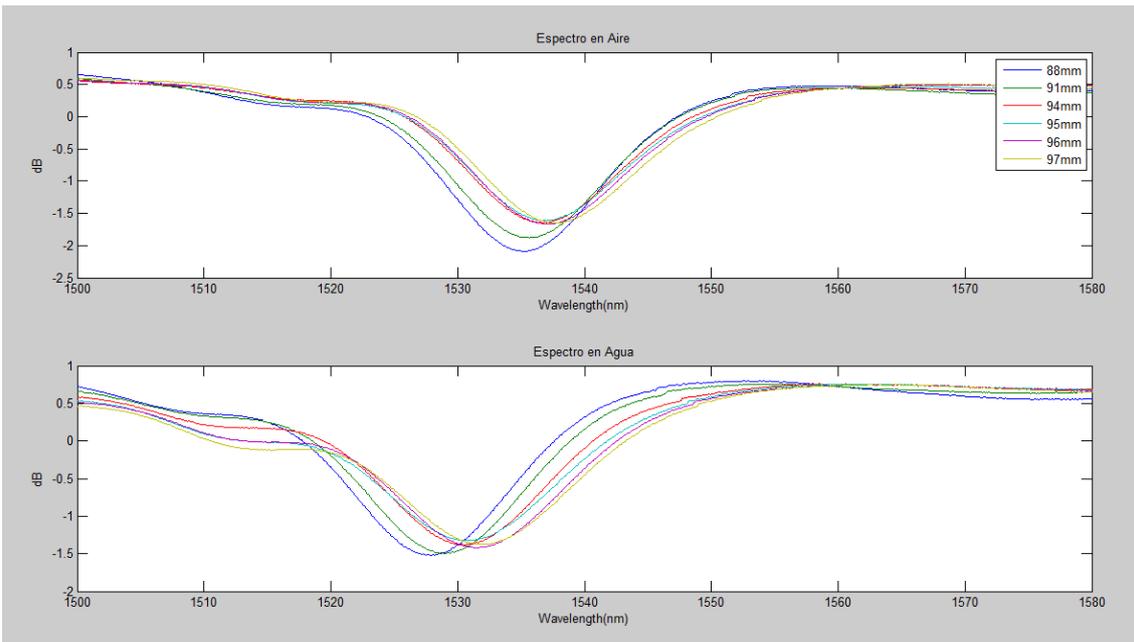
**Figura 45. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 46. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

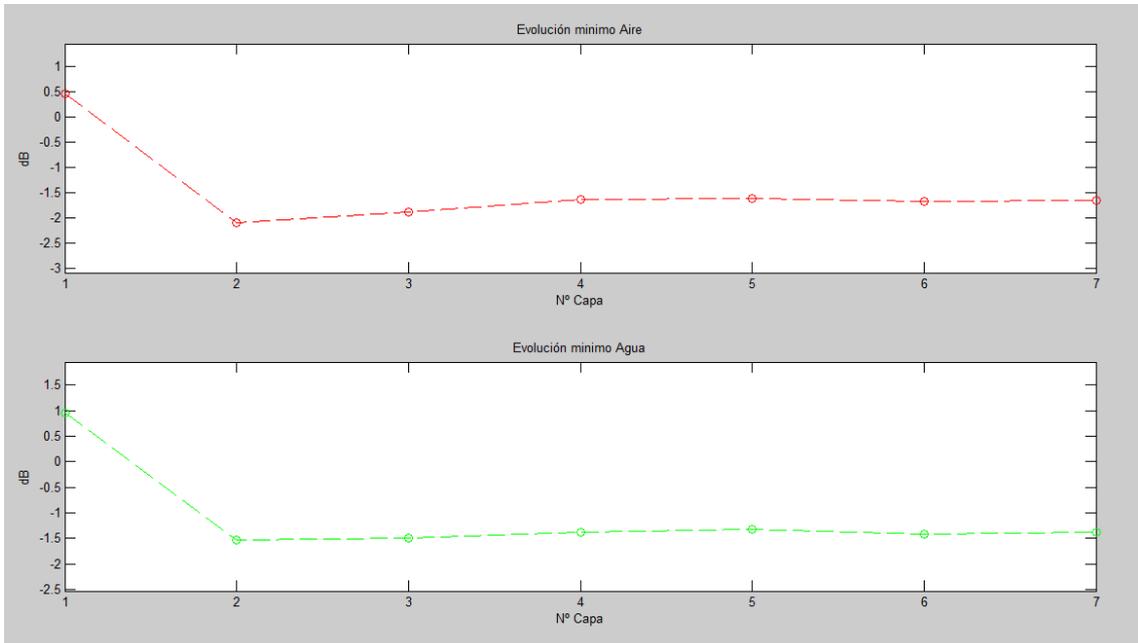
La respuesta final de la LPG nos ofrece una evolución espectral constante y controlada, pero de poca excursión entre su punto inicial y su punto final, aun así, se procede a eliminar una fracción de dicho recubrimiento, el fin de este procedimiento es obtener un segundo pico espectral en la banda de trabajo que corresponde con el pico de la banda de trabajo de la LPG original.

Realizamos un seguimiento a la retirada parcial del recubrimiento para observar su evolución, dicho progreso se observa en la **figura 47**. Siguiendo con el procedimiento realizado hasta ahora, realizamos una captura de la respuesta espectral tanto en aire como en agua.

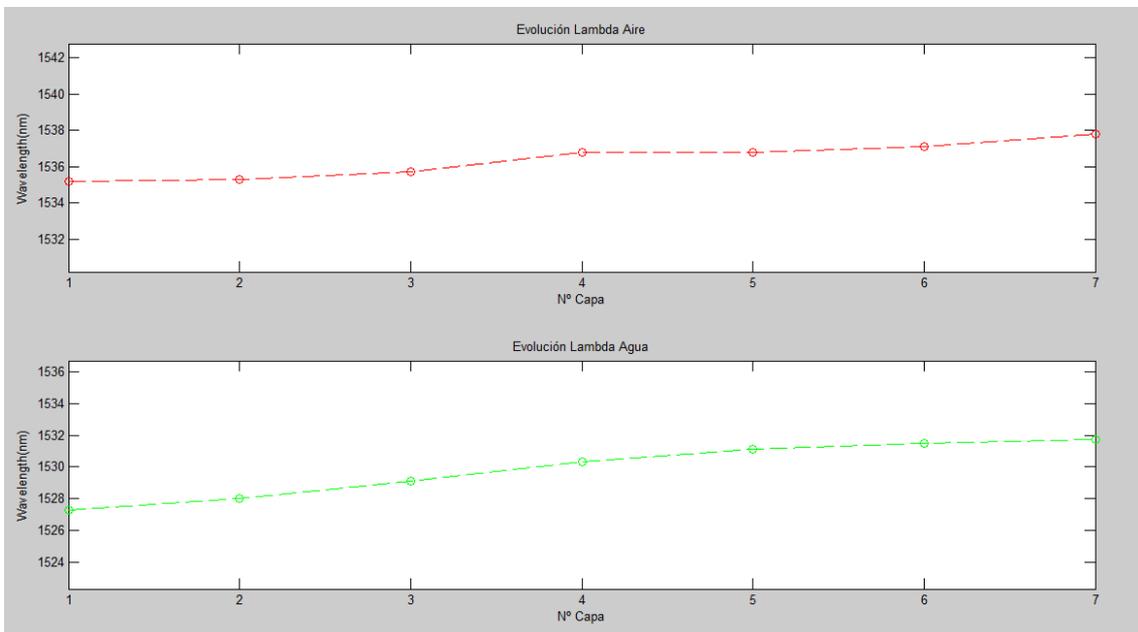


**Figura 47. Evolución espectro LPG-Aire y Agua respecto a la retirada parcial del recubrimiento**

A partir de los datos obtenidos y con el fin de tener de una forma clara la evolución que han tenido los diferentes parámetros que estamos analizando se realizan las **figuras 48 y 49** que muestran la evolución tanto de la potencia como de lambda en respuesta a la retirada parcial del recubrimiento.

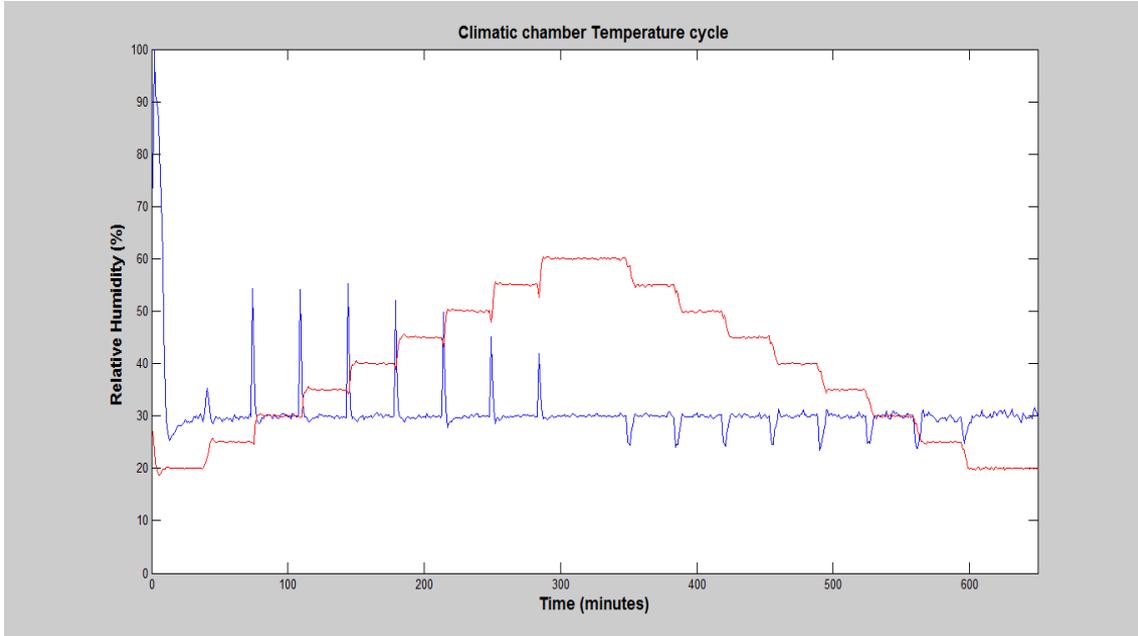


**Figura 48. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a la retirada parcial del recubrimiento**

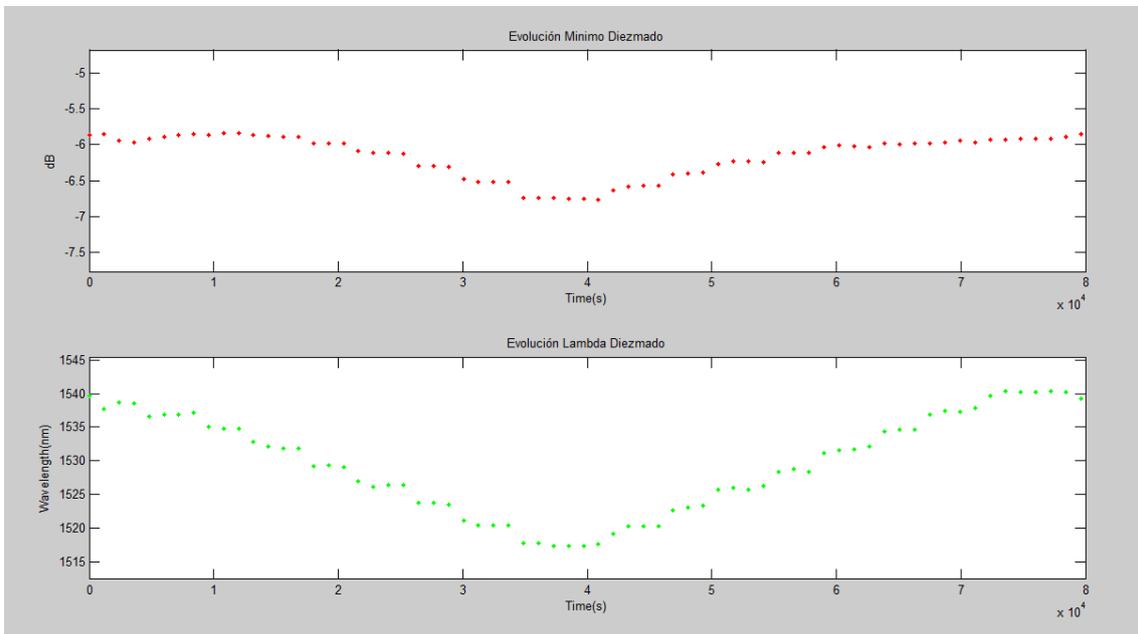


**Figura 49. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a la retirada parcial de recubrimiento**

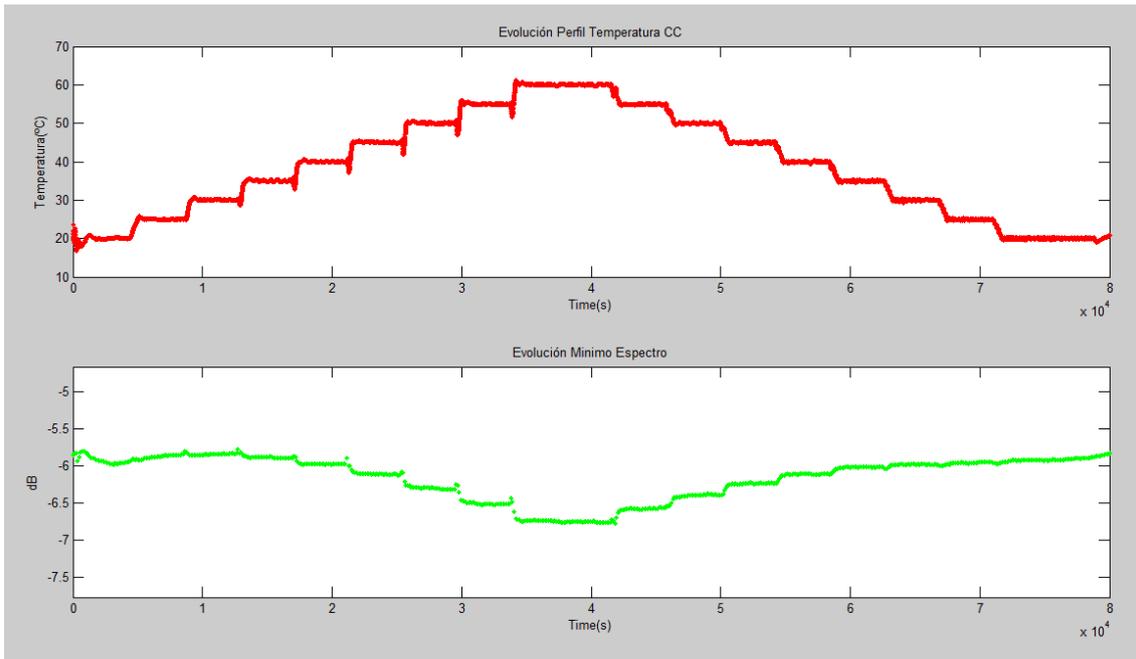
Para finalizar y continuando con el procedimiento de anteriores pruebas se procede a realizar la batería de pruebas de cámara climática para evaluar la respuesta de la construcción. El comportamiento de la LPG a las pruebas se muestra en las siguientes figuras.



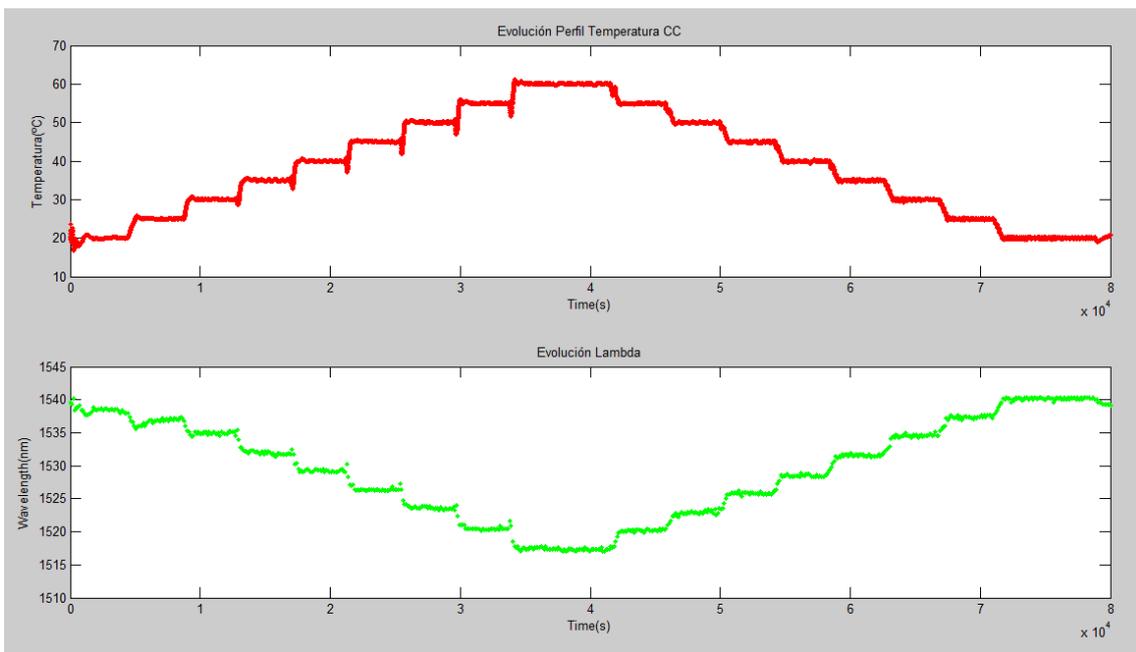
**Figura 50. Perfil del ciclo de temperatura de la cámara climática**



**Figura 51. Evolución Mínimo-Lambda LPG respecto a la temperatura**

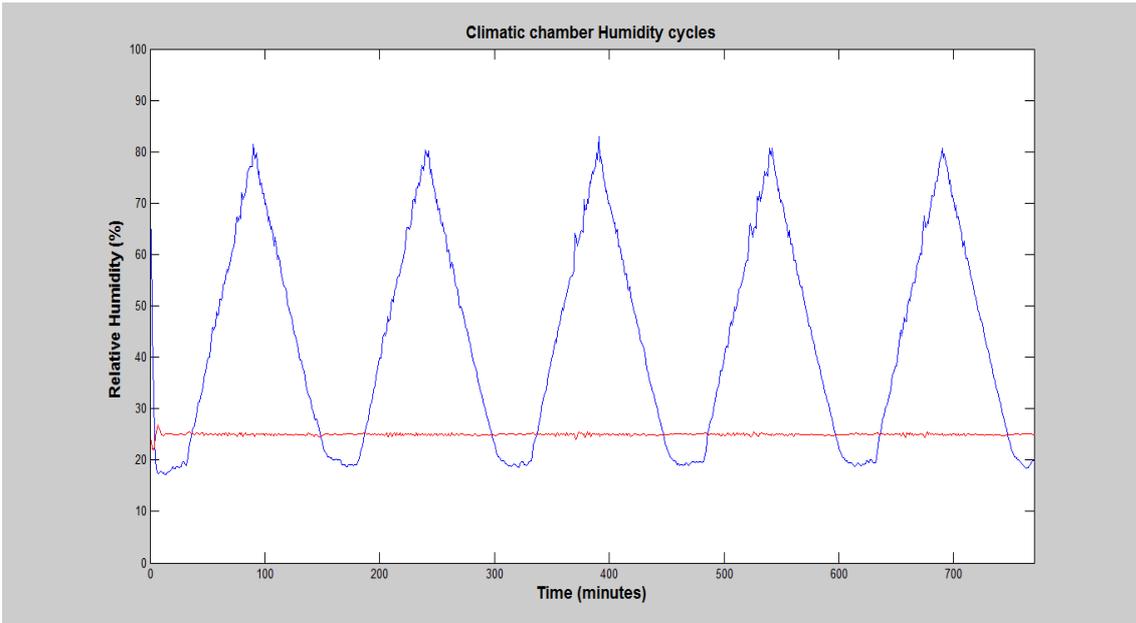


**Figura 52. Evolución Potencia LPG respecto a la temperatura**

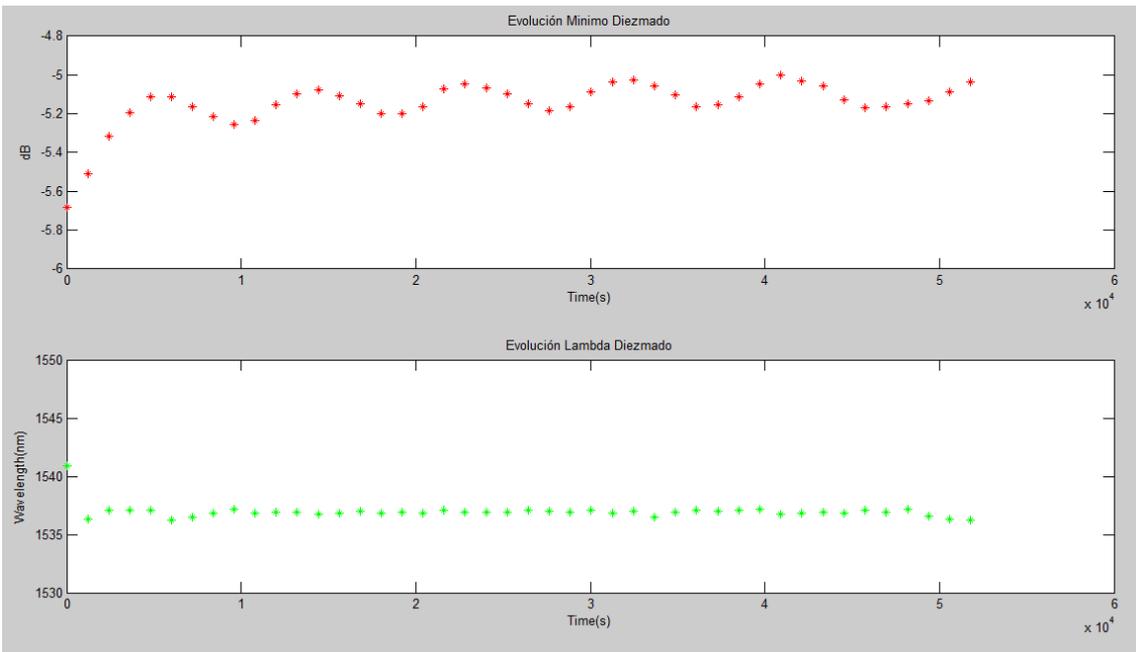


**Figura 53. Comparación de la evolución de lambda respecto al perfil de temperatura de la cámara climática.**

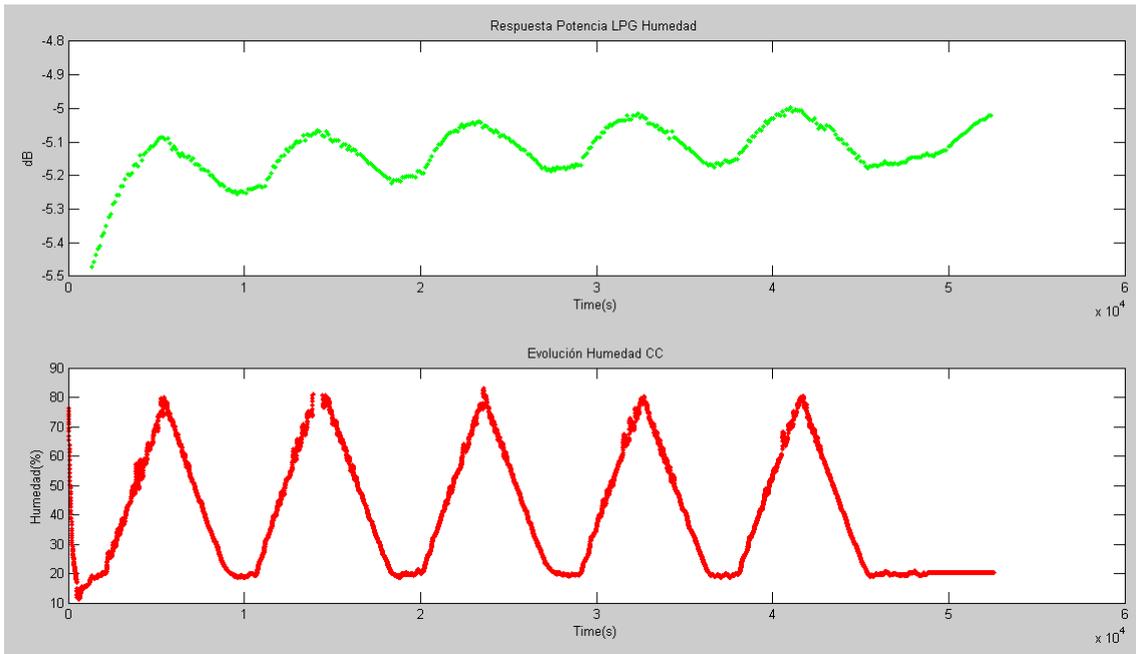
A continuación, se presentan los resultados de la segunda prueba obtenidos de someter a la LPG a una serie de 5 ciclos de cambio de humedad relativa.



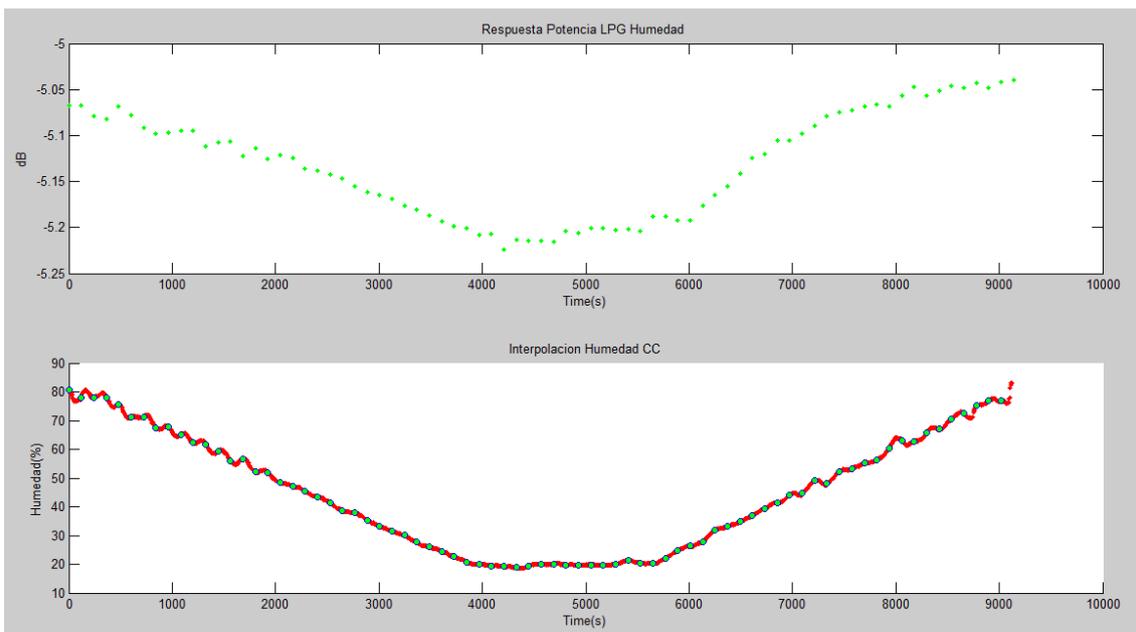
**Figura 54. Perfil del ciclo de humedad de la cámara climática**



**Figura 55. Evolución lambda LPG respecto a la Humedad**



**Figura 56. Evolución Potencia LPG respecto a la Humedad**



**Figura 57. Evolución lambda LPG respecto a la Humedad e interpolación lineal**

Como conclusión de esta prueba se concluye que la LPG responde ante situación de temperatura y humedad, en el caso de la temperatura este cambio de hace patente en la evolución de la longitud de onda central de la banda de trabajo durante la batería de prueba, también es importante añadir que la temperatura presenta una contribución en cuanto a la variación de la potencia que presenta el pico de trabajo, pero no muestra una relación extremadamente clara entre los factores.

En cuanto a la batería de pruebas en humedad, por el contrario, la variación en potencia está íntimamente relacionada con los ciclos de humedad a los que ha

sido sometido, para poder relacionar la potencia que presenta el pico en determinado momento con la humedad relativa aplicada en dicho instante se ha realizado una interpolación lineal permitiendo de esta manera salvar el problema del asincronismo entre los datos obtenidos en la cámara climática y los que ofrece el OSA.

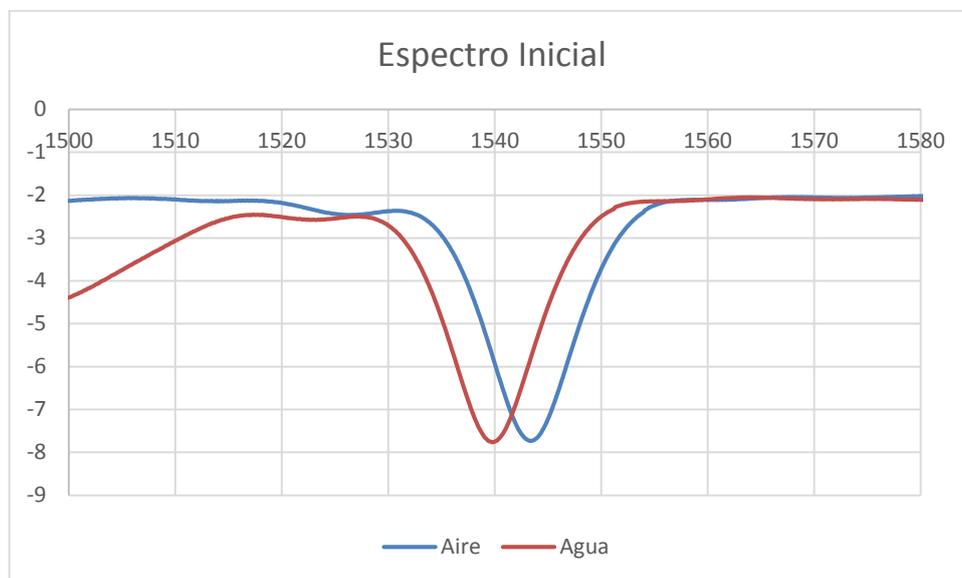
#### 4.2.5 LPG1 - Prueba 4

**4.2.5.1 Objetivo General:** *Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.*

**4.2.5.2 Objetivo Específico:** *Analizar la respuesta espectral al aplicar un recubrimiento LbL con un enriquecimiento de plata 5mM en disolución.*

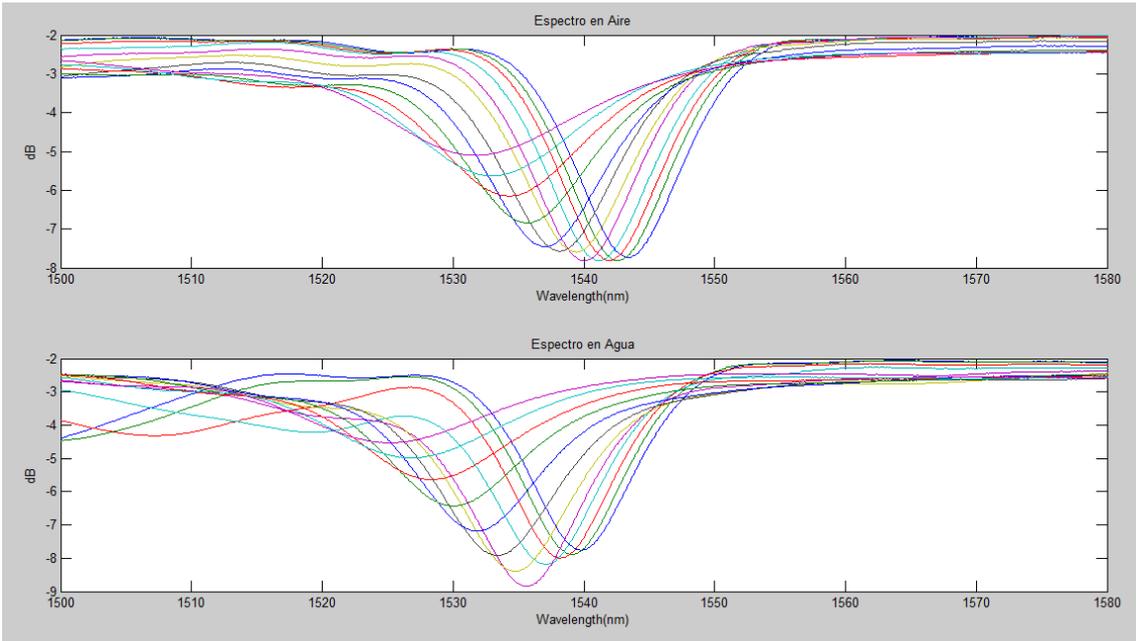
#### 4.2.5.3 Resultados

Como partimos de la misma LPG, la gráfica de sus espectros iniciales está en la siguiente figura.

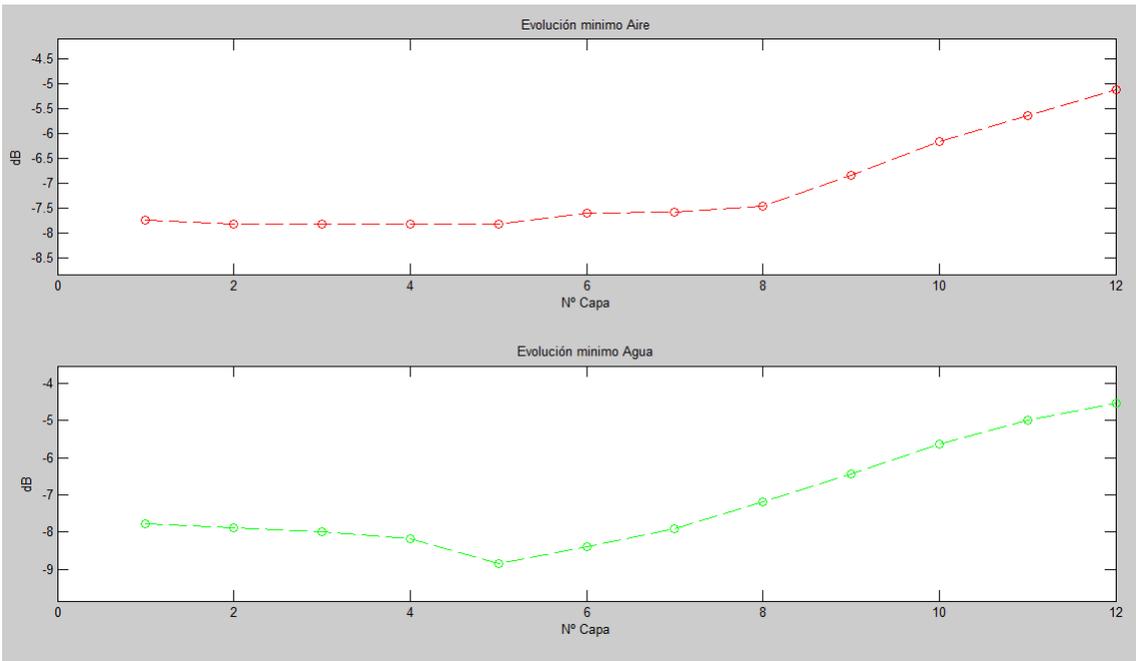


**Figura 58.** Comparación del perfil espectral original de la banda de trabajo tanto en aire como en agua.

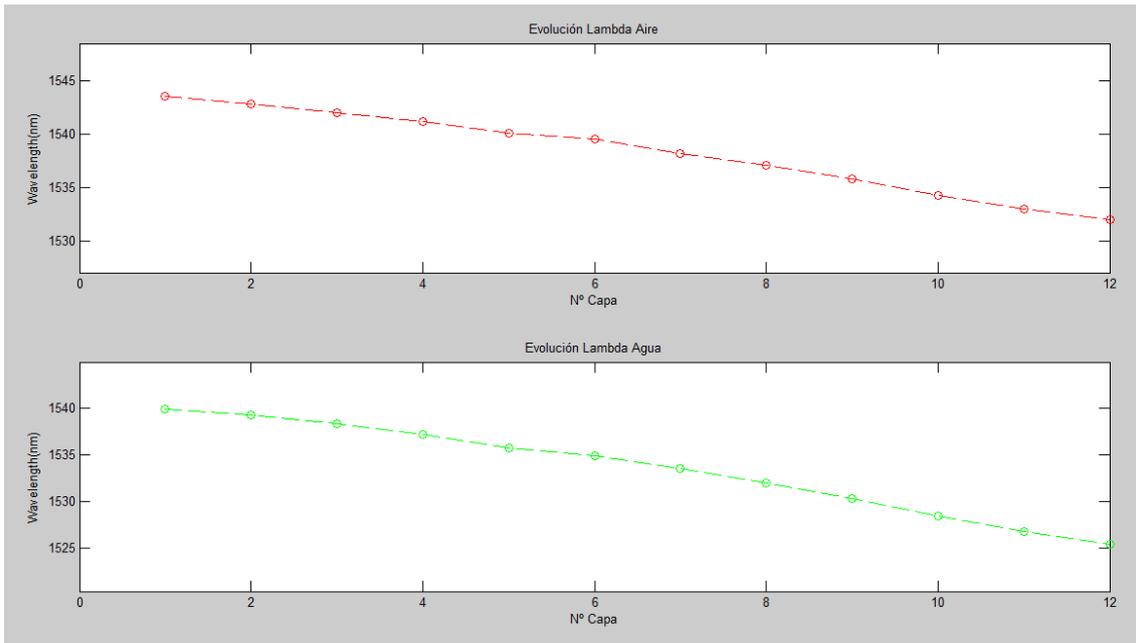
Procedemos a realizar la deposición del polímero como se ha hecho en anteriores pruebas, a pesar que el procedimiento es el mismo en este caso estamos trabajando con partículas de plata disueltas directamente en el compuesto PAA, en este caso resulta crucial mantener un pH 8 tanto en el compuesto como en los demás componentes de la deposición para así evitar un precipitado de las partículas de plata disueltas en la solución. En las siguientes figuras se observa la evolución.



**Figura 59. Evolución espectro LPG-Aire, LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



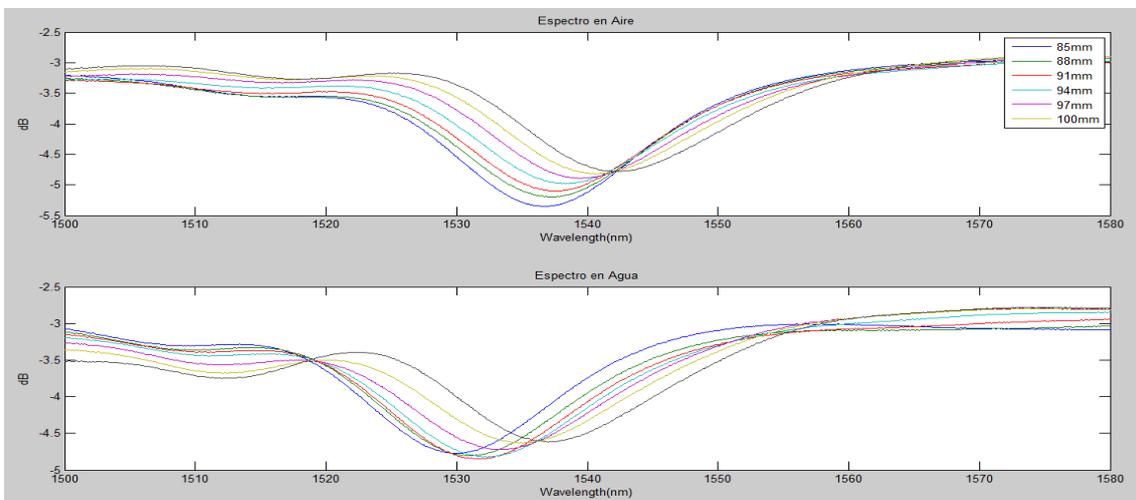
**Figura 60. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 61. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

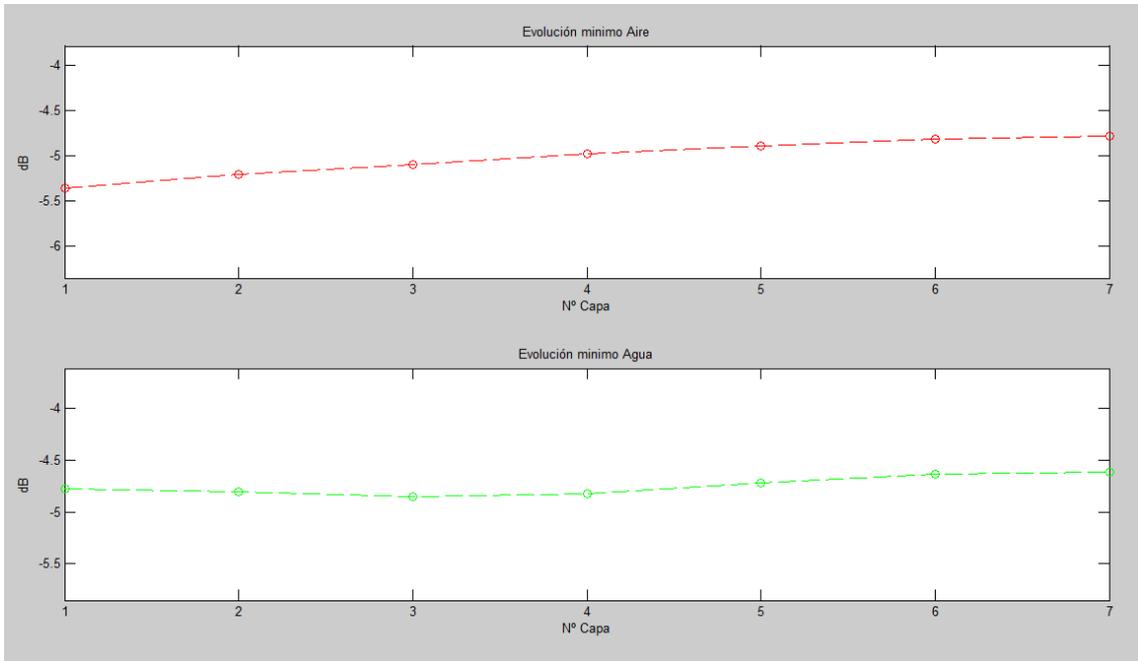
La respuesta final de la LPG nos ofrece una evolución espectral constante y controlada, pero a diferencia de como viene sucediendo en anteriores pruebas, esta deposición presenta una excursión un poco más amplia, así, se procede a eliminar una fracción de dicho recubrimiento esperando una respuesta mejor que anteriores pruebas. el fin de este procedimiento es obtener un segundo pico espectral en la banda de trabajo que corresponde con el pico de la banda de trabajo de la LPG original.

Realizamos un seguimiento a la retirada parcial del recubrimiento para observar su evolución, dicho progreso se observa en la **figura 62**. Siguiendo con el procedimiento realizado hasta ahora, realizamos una captura de la respuesta espectral tanto en aire como en agua.

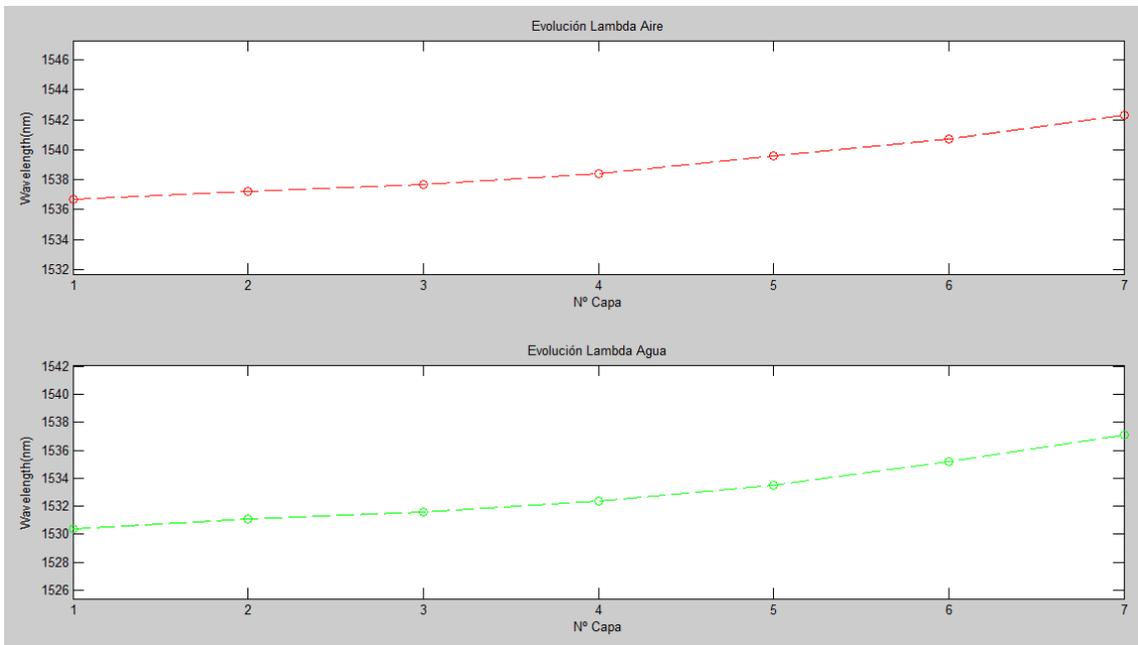


**Figura 62. Evolución espectro LPG-Aire y Agua respecto a la retirada parcial del recubrimiento**

A partir de los datos obtenidos y con el fin de tener de una forma clara la evolución que han tenido los diferentes parámetros que estamos analizando se realizan las **figuras 63 y 64** que muestran la evolución tanto de la potencia como de lambda en respuesta a la retirada parcial del recubrimiento.

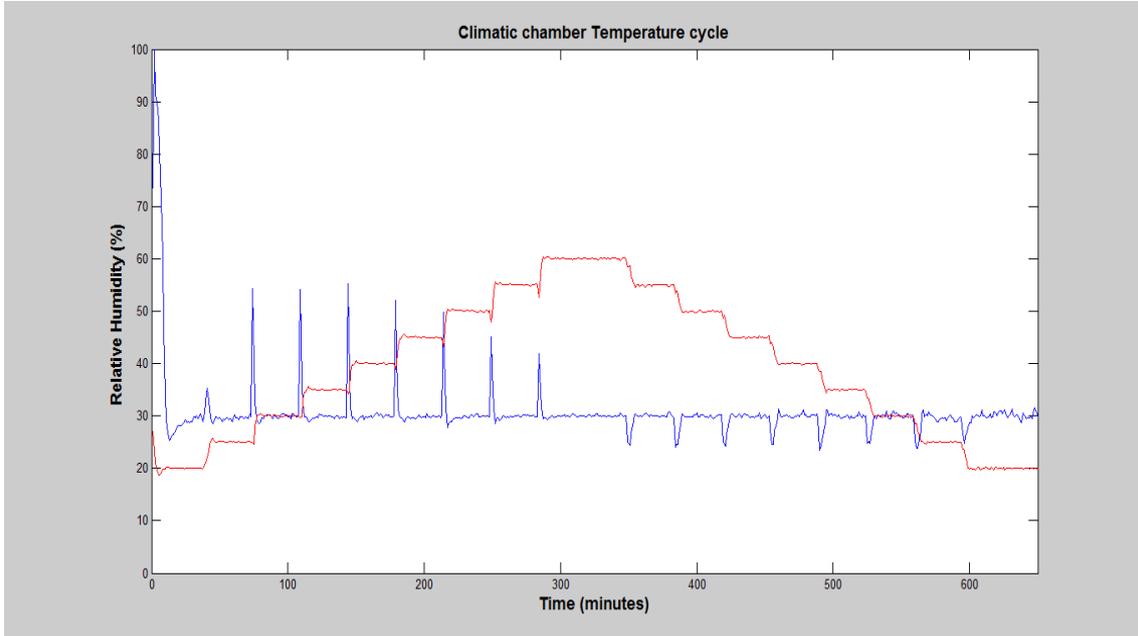


**Figura 63. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a la retirada parcial del recubrimiento**

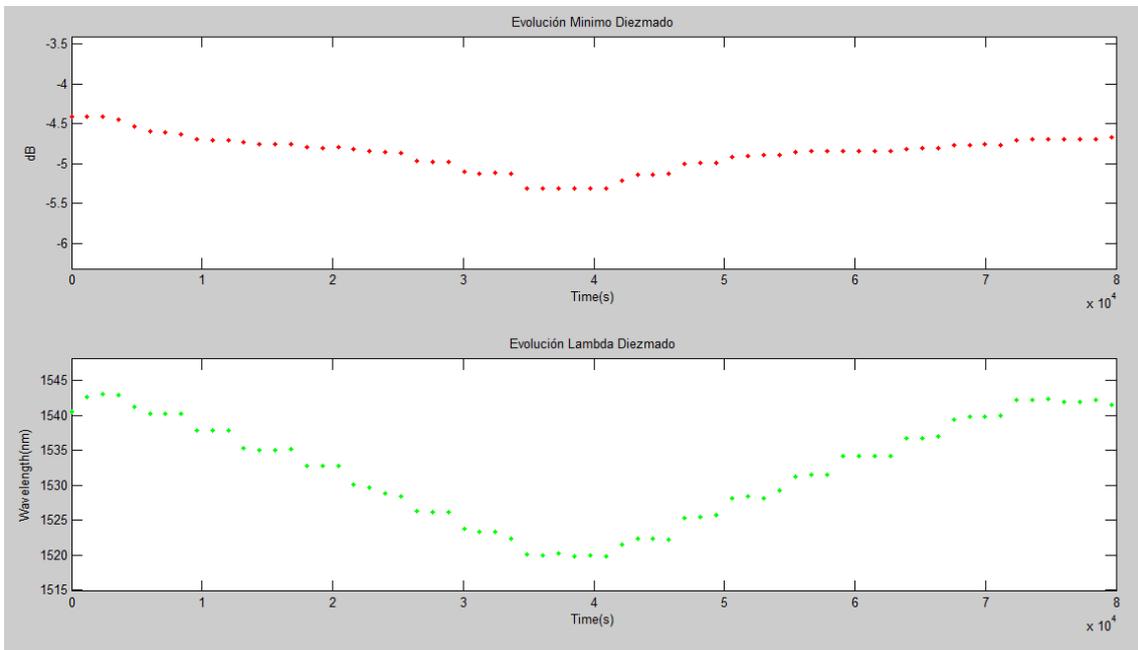


**Figura 64. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a la retirada parcial de recubrimiento**

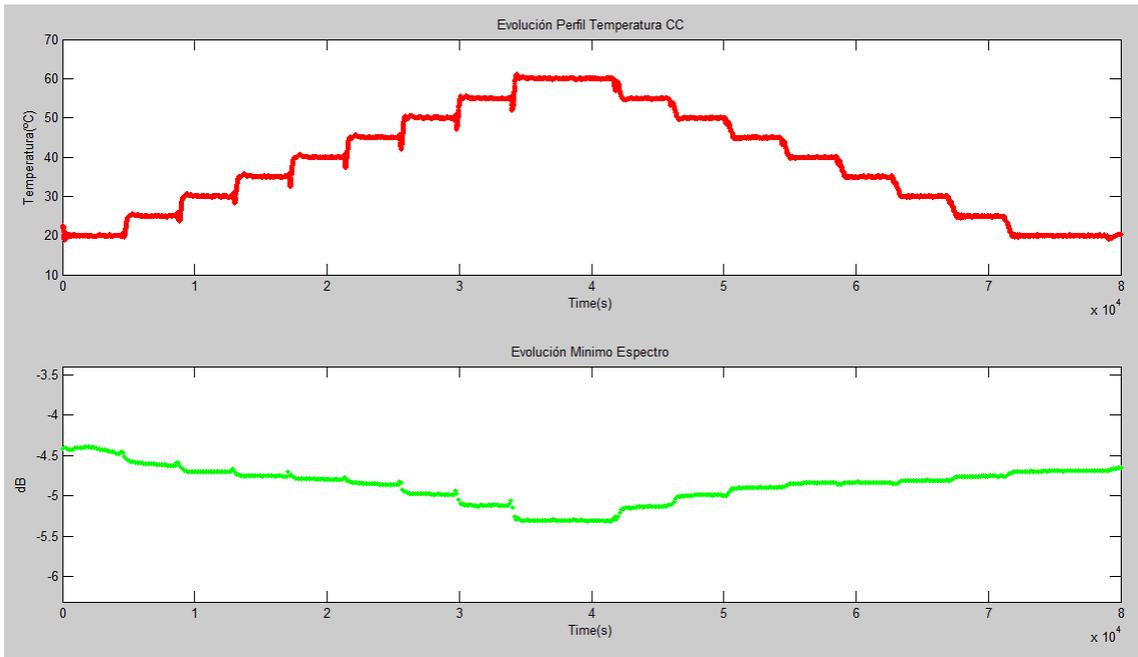
Para finalizar y continuando con el procedimiento de anteriores pruebas se procede a realizar la batería de pruebas de cámara climática para evaluar la respuesta de la construcción. El comportamiento de la LPG a las pruebas se muestra en las siguientes figuras.



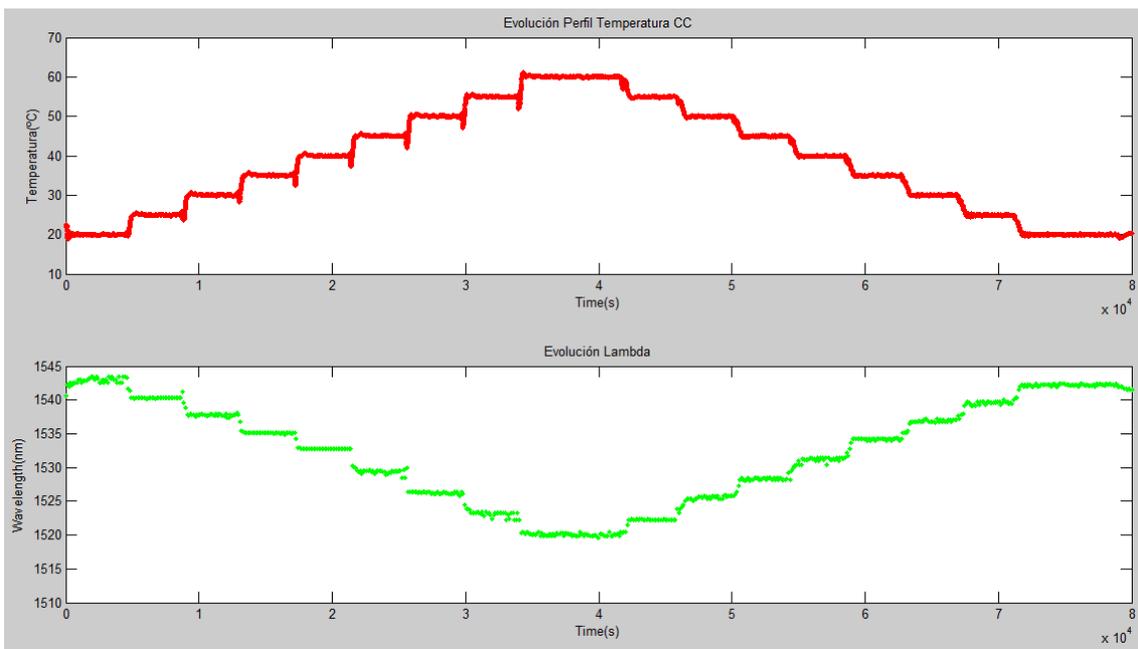
**Figura 65. Perfil del ciclo de temperatura de la cámara climática**



**Figura 66. Evolución Mínimo-Lambda LPG respecto a la temperatura**

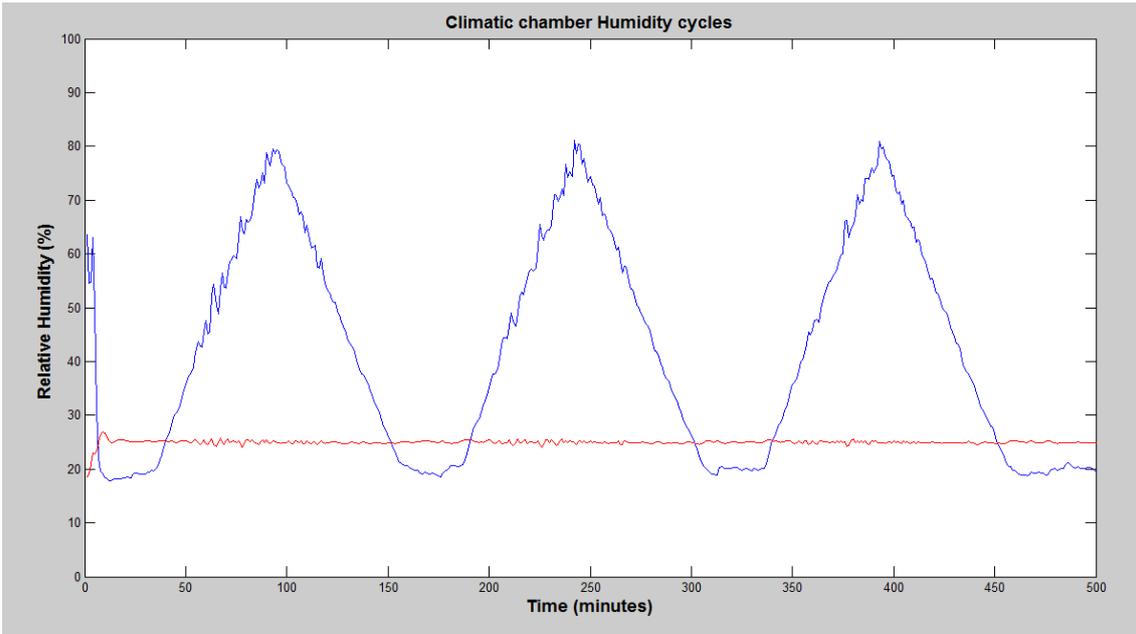


**Figura 67. Evolución Potencia LPG respecto a la temperatura**

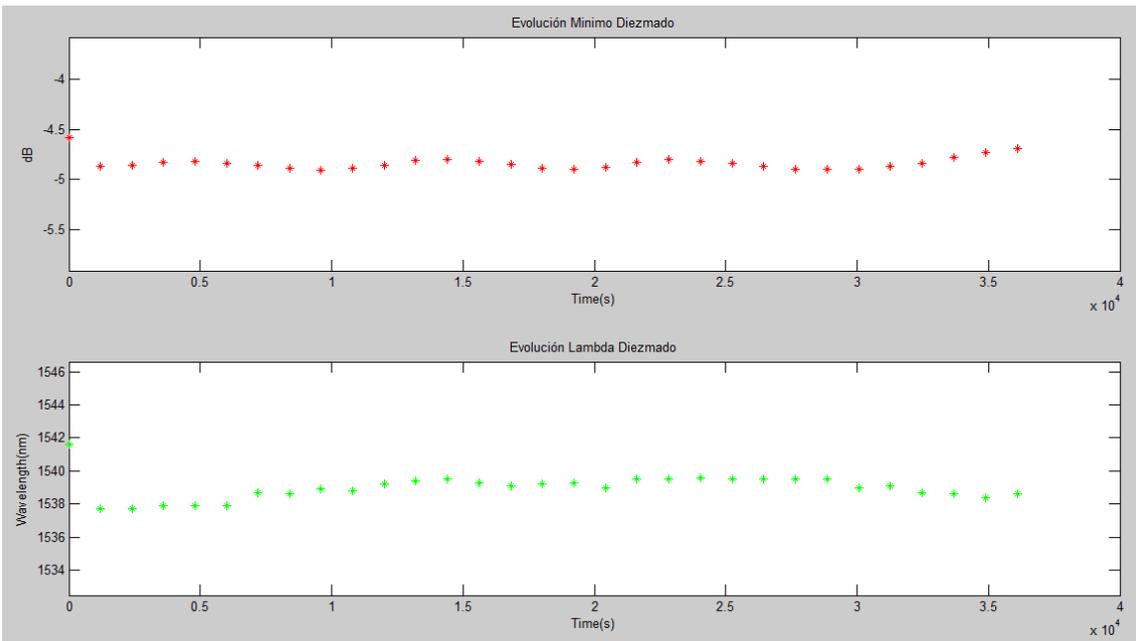


**Figura 68. Comparación de la evolución de lambda respecto al perfil de temperatura de la cámara climática.**

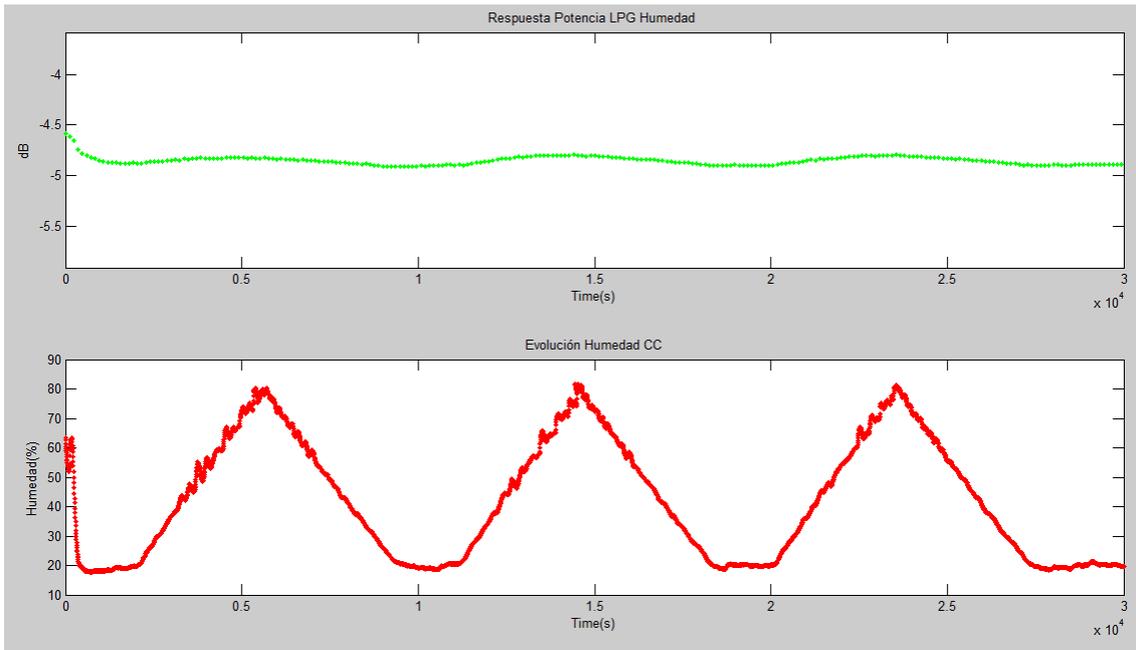
A continuación, se presentan los resultados de la segunda prueba obtenidos de someter a la LPG a una serie de 5 ciclos de cambio de humedad relativa.



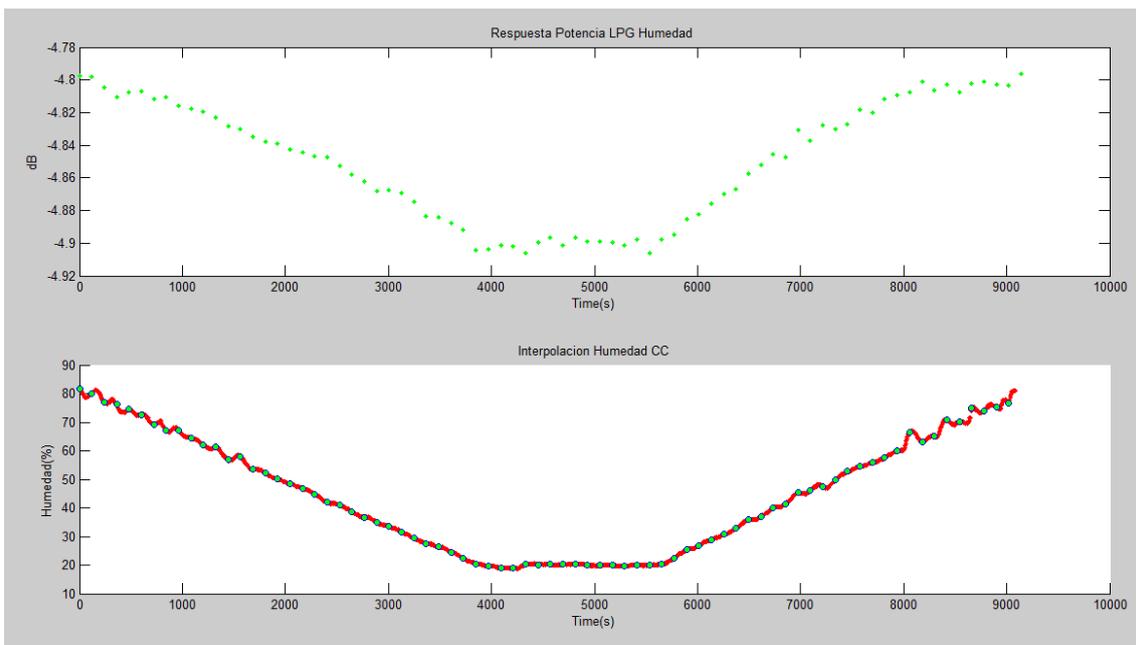
**Figura 69. Perfil del ciclo de humedad de la cámara climática**



**Figura 70. Evolución lambda LPG respecto a la Humedad**



**Figura 71. Evolución Potencia LPG respecto a la Humedad**



**Figura 72. Evolución lambda LPG respecto a la Humedad e interpolación lineal**

Como se ha podido observar esta prueba tiene varias particularidades. La primera de ellas es que empezamos a trabajar con plata directamente disuelta en PAA, esto se hace con el fin de mejorar la dispersión de partículas de plata en el polímero y que su deposición sea más uniforme en todo el polímero. En segundo lugar, observamos que, a diferencia de las anteriores pruebas, el perfil de humedad presenta solo 3 ciclos, esto se debe meramente a una cuestión de

tiempo y disponibilidad de equipos siendo 3 ciclos de humedad lo mínimo aceptable para generar algún tipo de conclusión fiable en la prueba.

Como conclusión principal de la prueba observamos una ausencia casi total de respuesta de la LPG a la prueba de humedad, no así a la de temperatura que sigue dentro de los parámetros mostrados en anteriores experimentos. Así se puede concluir que hemos conseguido una LPG únicamente sensible a la temperatura, objetivo distante al que se ha propuesto como fin de este proyecto.

#### 4.2.6 LPG1 - Prueba 5

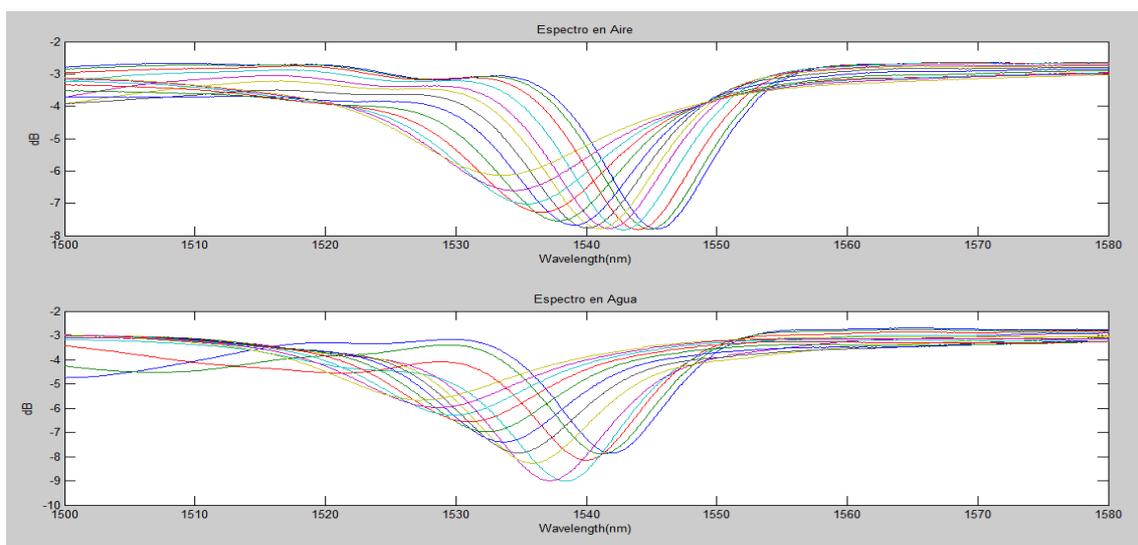
**4.2.6.1 Objetivo General: Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.**

**4.2.6.2 Objetivo Específico: Analizar la respuesta espectral al aplicar un recubrimiento LbL con un enriquecimiento de plata 5mM en disolución.**

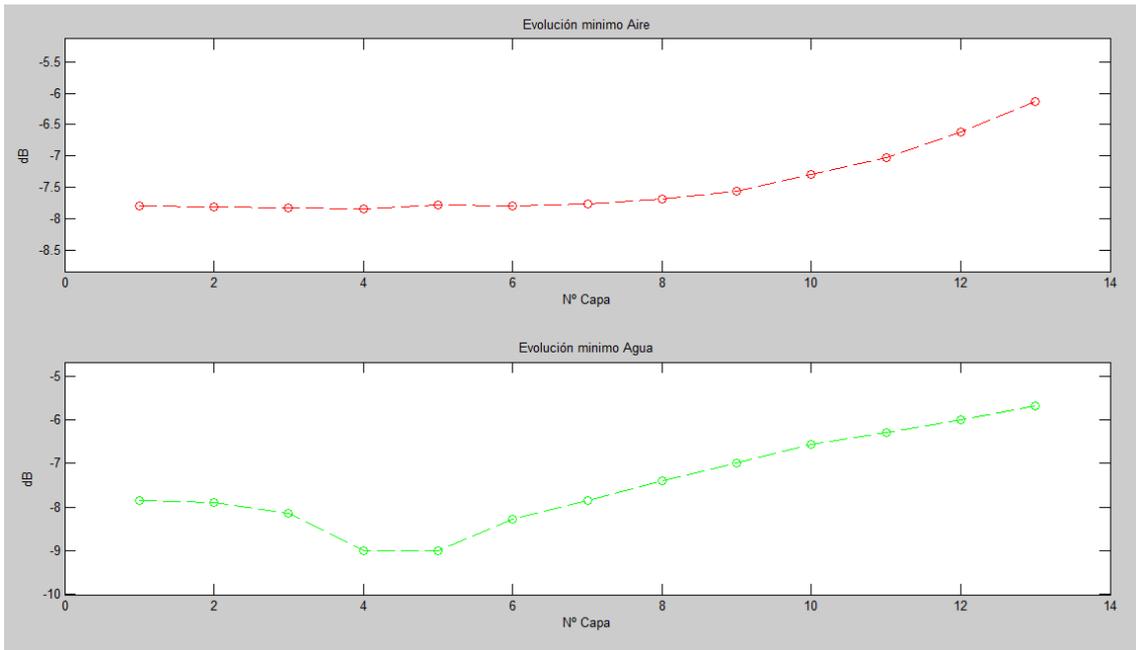
#### 4.2.6.3 Resultados

Como partimos de la misma LPG se ha obviado la gráfica de sus espectros iniciales puesto que se supone que después de la limpieza del recubrimiento con solución piraña esta vuelve a su estado inicial.

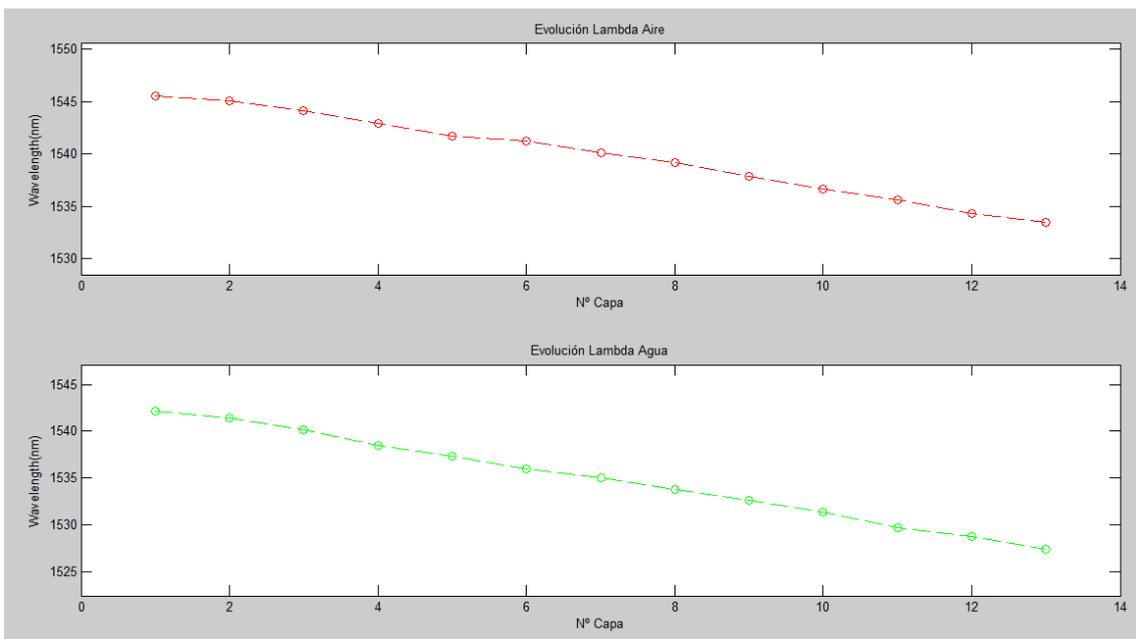
Procedemos a realizar la deposición del polímero como se ha hecho en anteriores pruebas, a pesar que el procedimiento es el mismo en este caso estamos trabajando con partículas de plata disueltas directamente en el compuesto PAA, en este caso resulta crucial mantener un pH 8 tanto en el compuesto como en los demás componentes de la deposición para así evitar un precipitado de las partículas de plata disueltas en la solución. En las siguientes figuras se observa la evolución.



**Figura 73. Evolución espectro LPG-Aire, LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



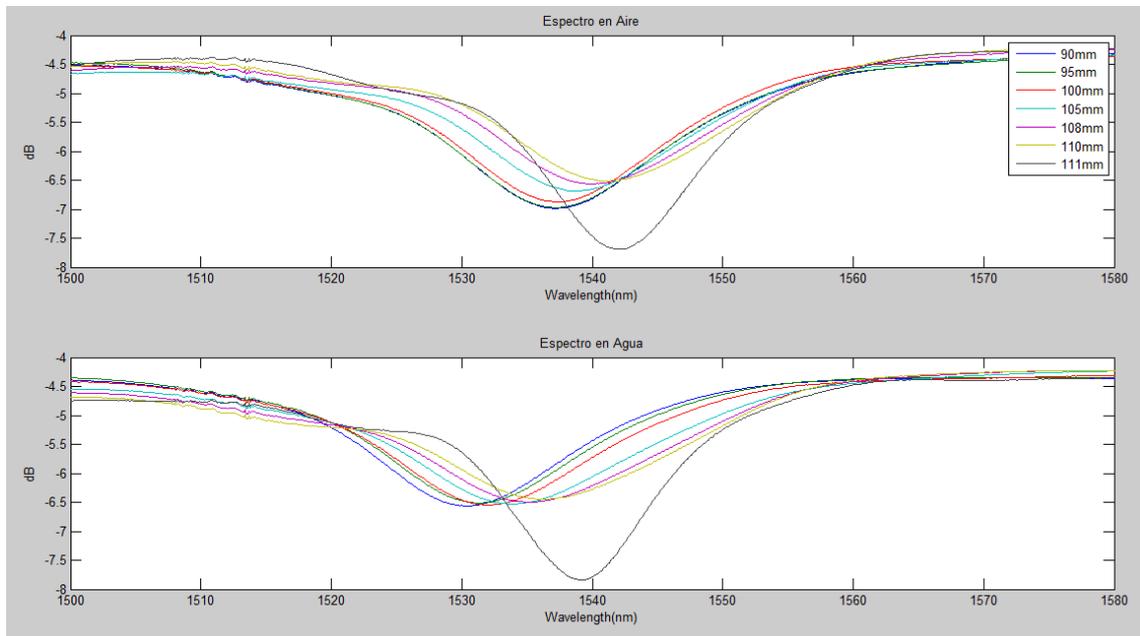
**Figura 74. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 75. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

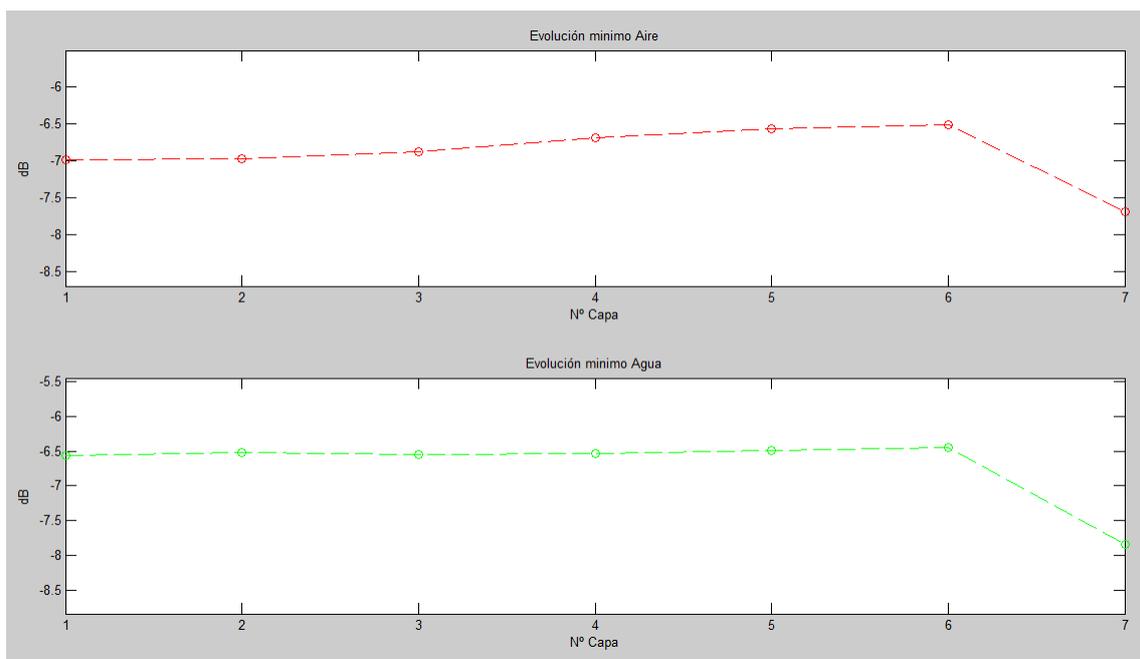
La respuesta final de la LPG nos ofrece una evolución espectral constante y controlada, pero como viene sucediendo en anteriores pruebas, la LPG presenta muy poca excursión entre su punto inicial y su punto final, aun así, se procede a eliminar una fracción de dicho recubrimiento, el fin de este procedimiento es obtener un segundo pico espectral en la banda de trabajo que corresponde con el pico de la banda de trabajo de la LPG original.

Realizamos un seguimiento a la retirada parcial del recubrimiento para observar su evolución, dicho progreso se observa en la **figura 76**. Siguiendo con el procedimiento realizado hasta ahora, realizamos una captura de la respuesta espectral tanto en aire como en agua.

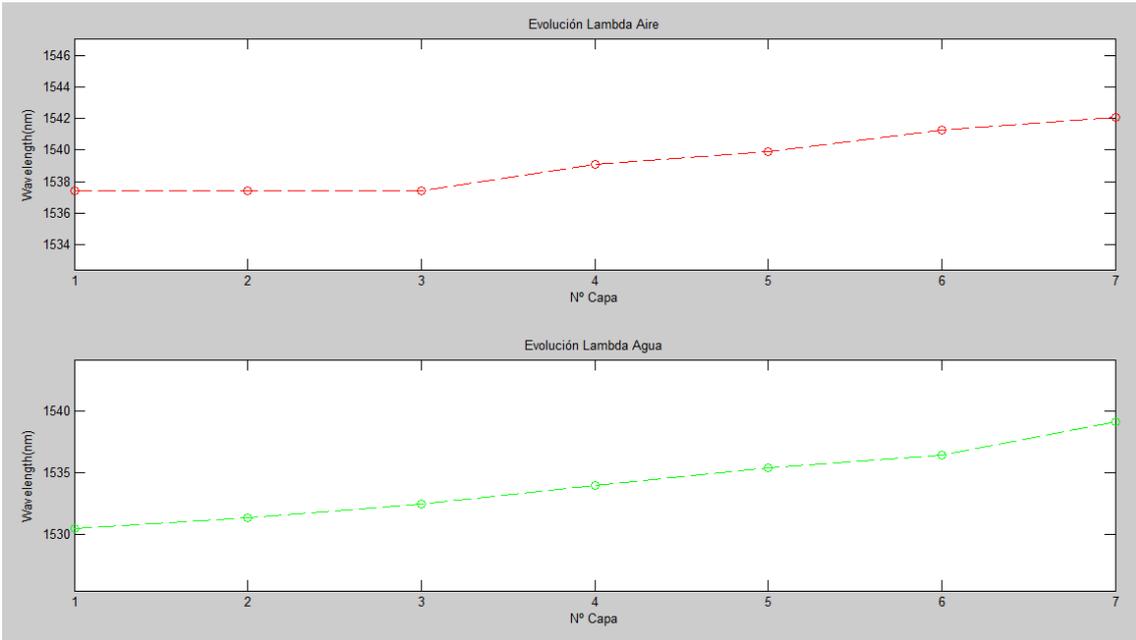


**Figura 76. Evolución espectro LPG-Aire y Agua respecto a la retirada parcial del recubrimiento**

A partir de los datos obtenidos y con el fin de tener de una forma clara la evolución que han tenido los diferentes parámetros que estamos analizando se realizan las **figuras 77 y 78** que muestran la evolución tanto de la potencia como de lambda en respuesta a la retirada parcial del recubrimiento.

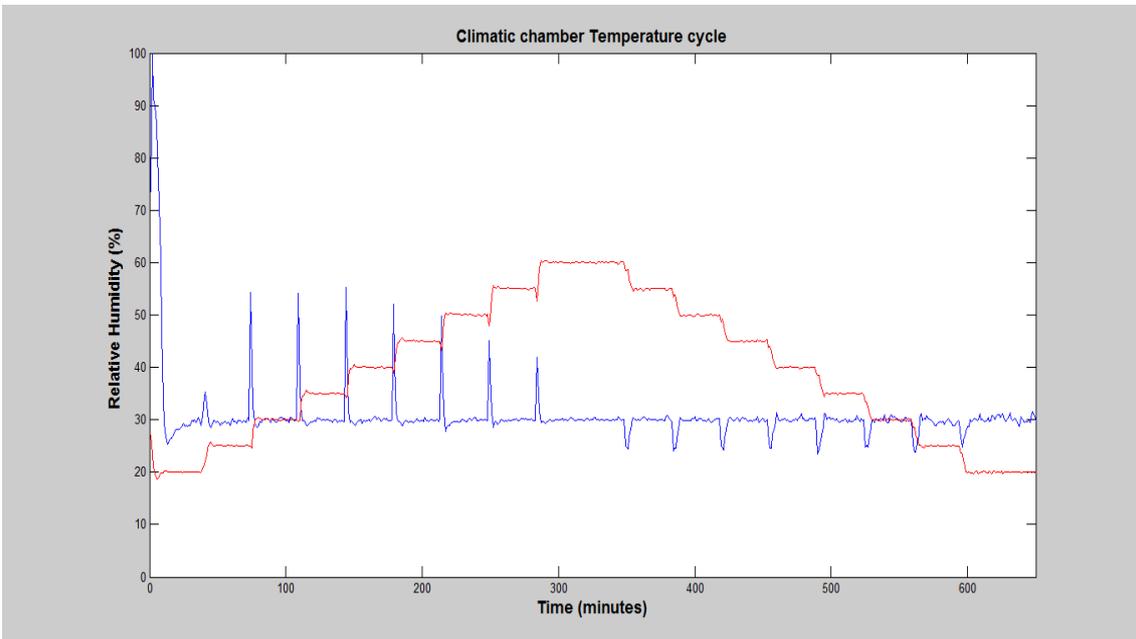


**Figura 77. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a la retirada parcial del recubrimiento**

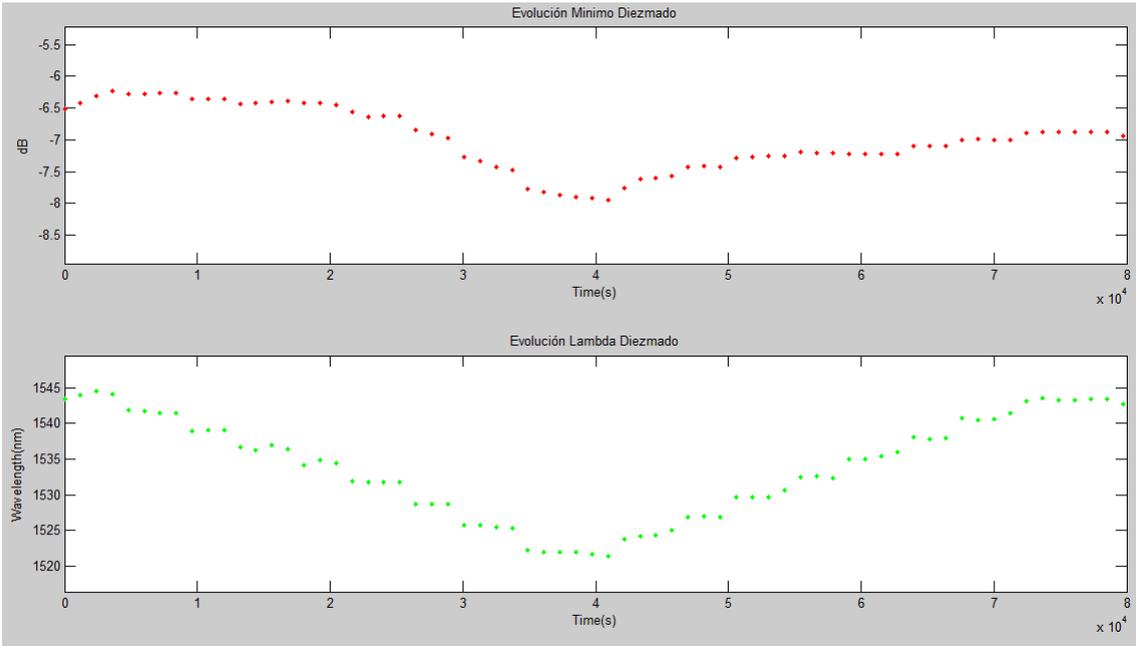


**Figura 78. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a la retirada parcial de recubrimiento**

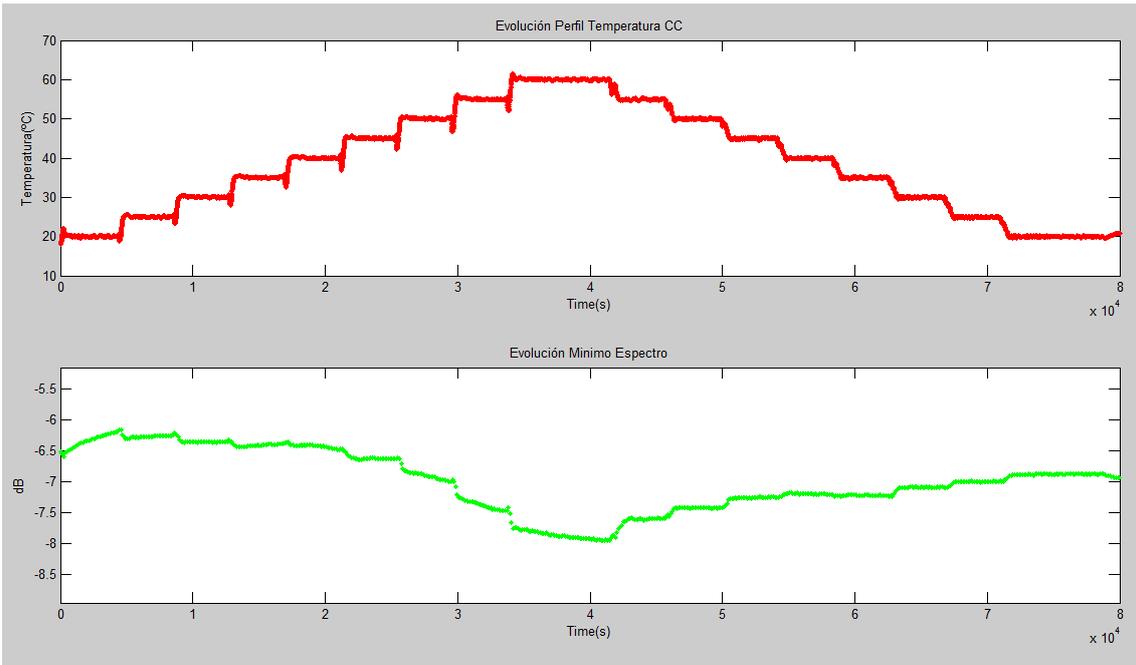
Para finalizar y continuando con el procedimiento de anteriores pruebas se procede a realizar la batería de pruebas de cama climática para evaluar la respuesta de la construcción. El comportamiento de la LPG a las pruebas se muestra en las siguientes figuras.



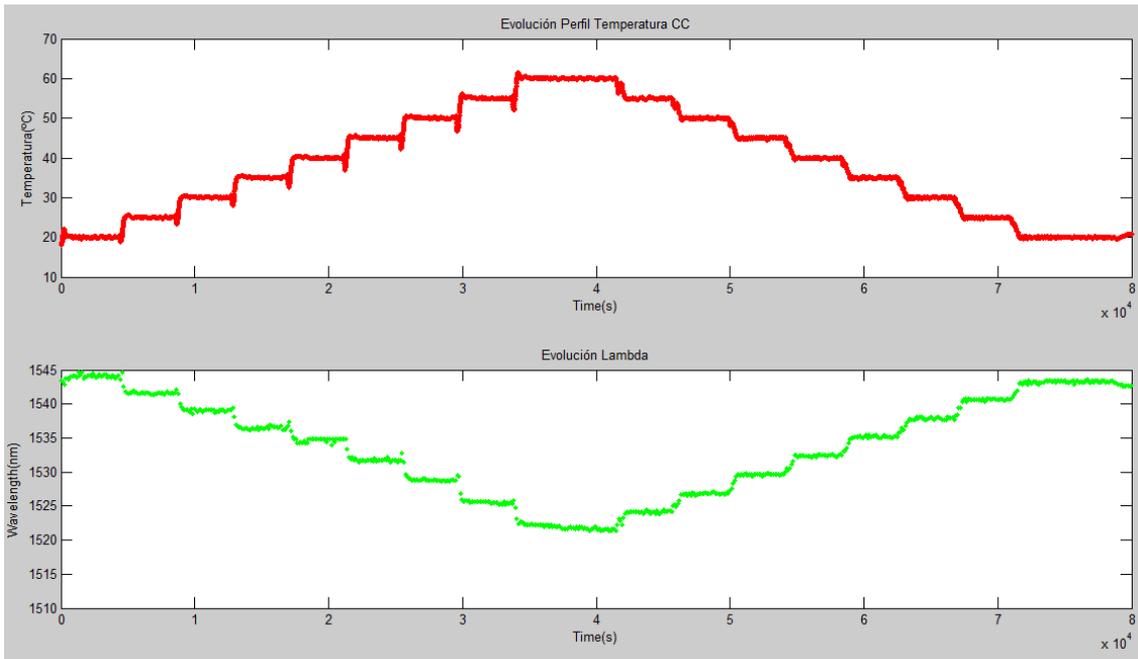
**Figura 79. Perfil del ciclo de temperatura de la cámara climática**



**Figura 80. Evolución Mínimo-Lambda LPG respecto a la temperatura**

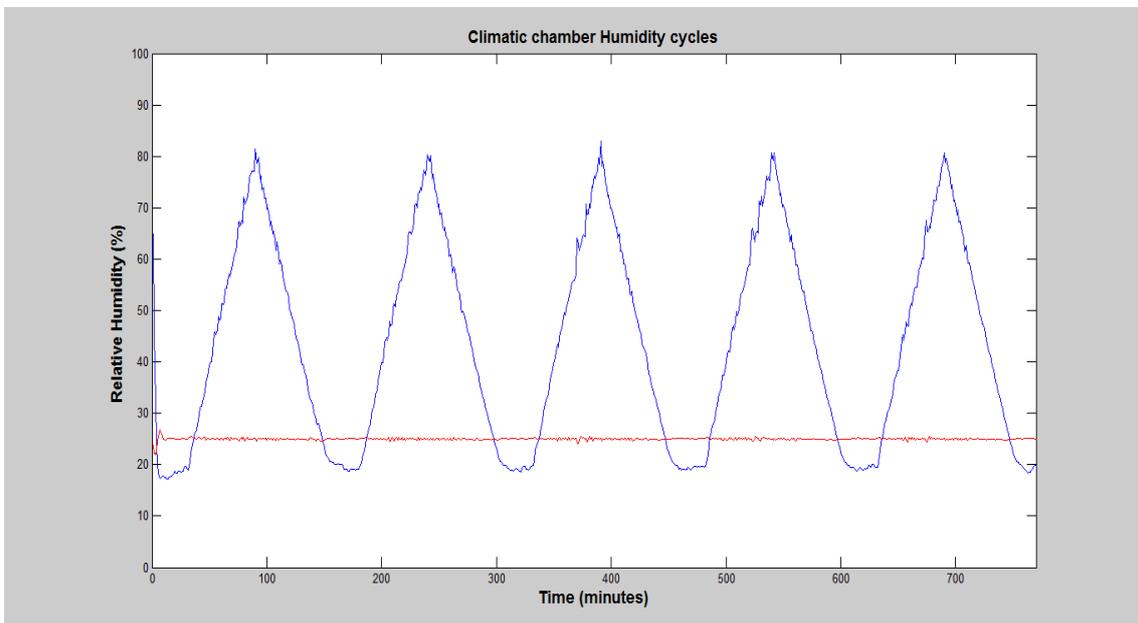


**Figura 81. Evolución Potencia LPG respecto a la temperatura**

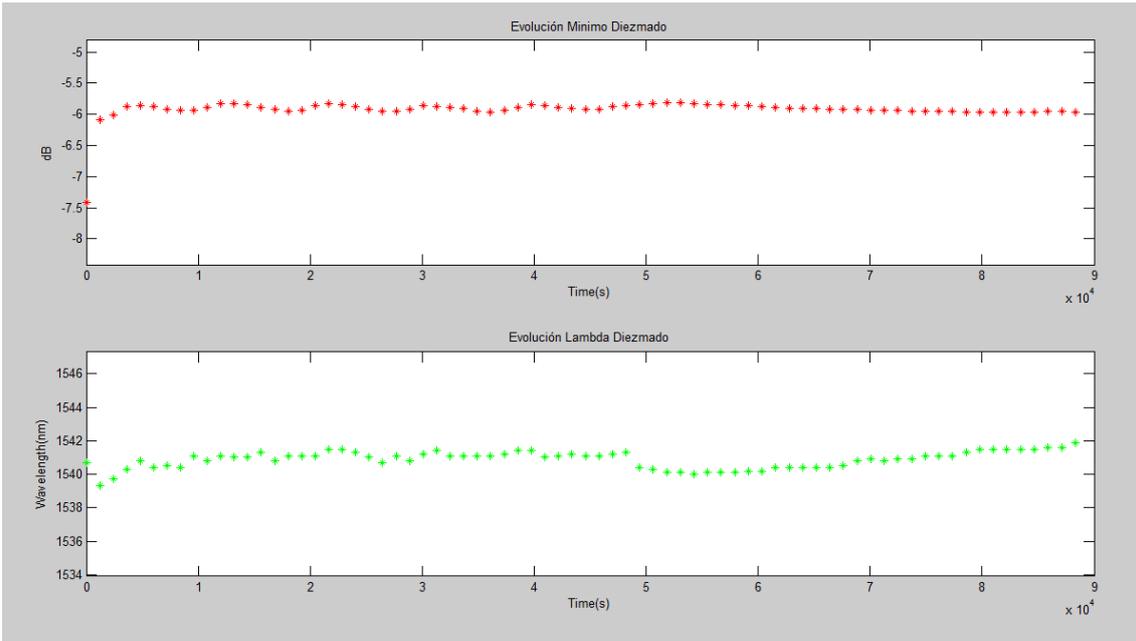


**Figura 82. Comparación de la evolución de lambda respecto al perfil de temperatura de la cámara climática.**

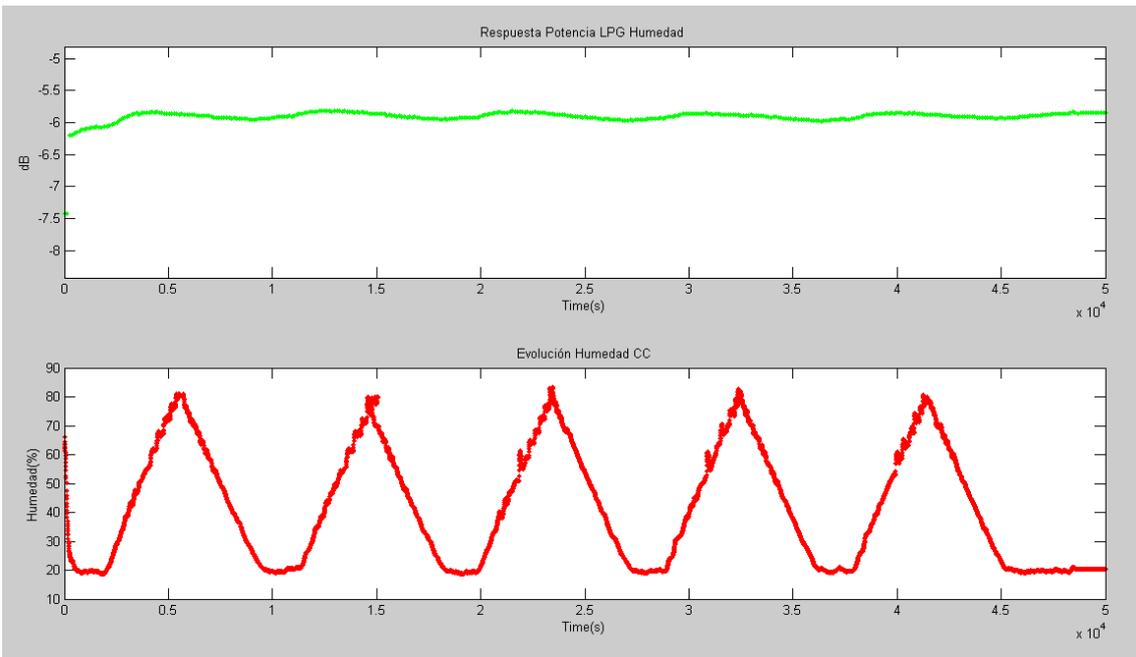
A continuación, se presentan los resultados de la segunda prueba obtenidos de someter a la LPG a una serie de 5 ciclos de cambio de humedad relativa.



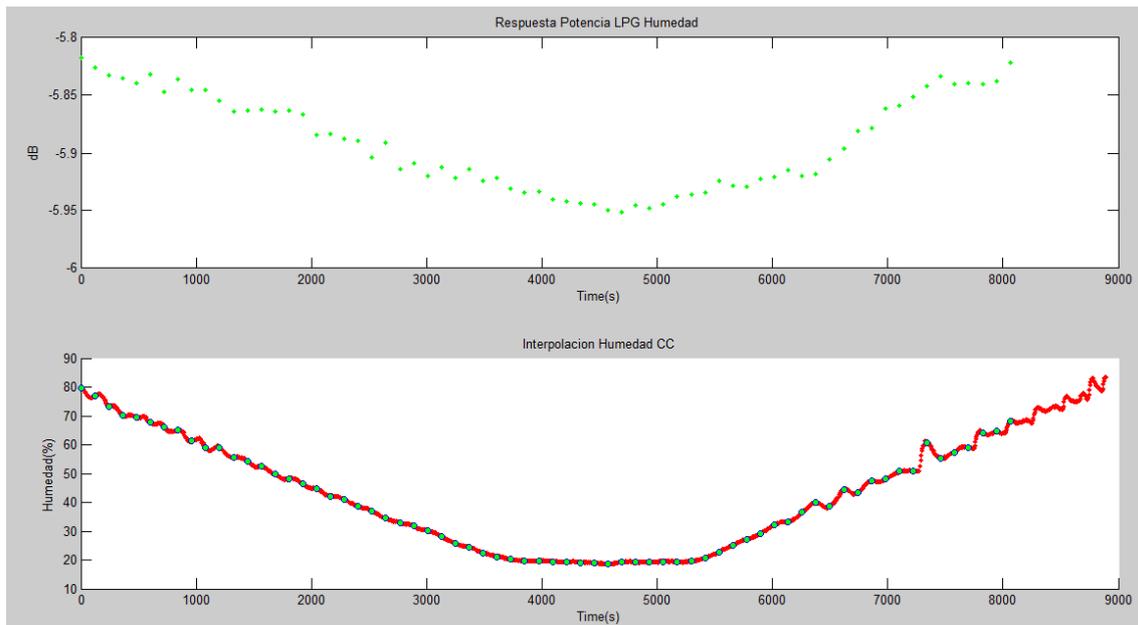
**Figura 83. Perfil del ciclo de humedad de la cámara climática**



**Figura 84. Evolución lambda LPG respecto a la Humedad**



**Figura 85. Evolución Potencia LPG respecto a la Humedad**



**Figura 86. Evolución lambda LPG respecto a la Humedad e interpolación lineal**

Dado que como se ha podido observar en las figuras anteriores esta prueba no nos deja muchas conclusiones debido a que, si bien es verdad que la LPG responde de una manera más clara a los ciclos de temperatura, no ha respondido a su vez en los ciclos de humedad por lo que hablamos de una LPG sensible a la temperatura, pero no a la humedad, caso que no es el objeto de nuestra investigación, por lo que se concluye que esta prueba ha sido fallida.

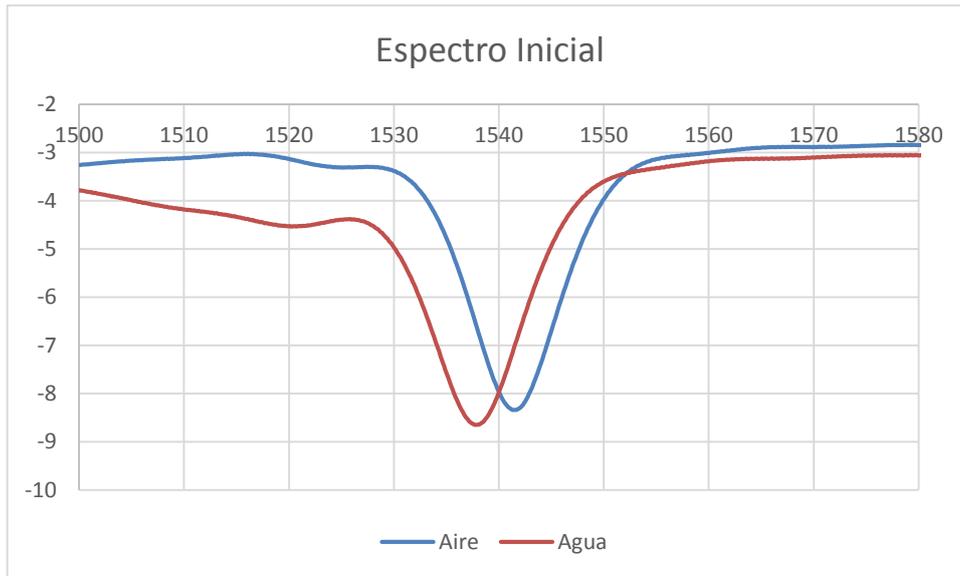
#### 4.2.7 LPG1 - Prueba 6

**4.2.7.1 Objetivo General: Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.**

**4.2.7.2 Objetivo Específico: Analizar la respuesta espectral al aplicar un recubrimiento LbL con un enriquecimiento de plata 1mM en disolución.**

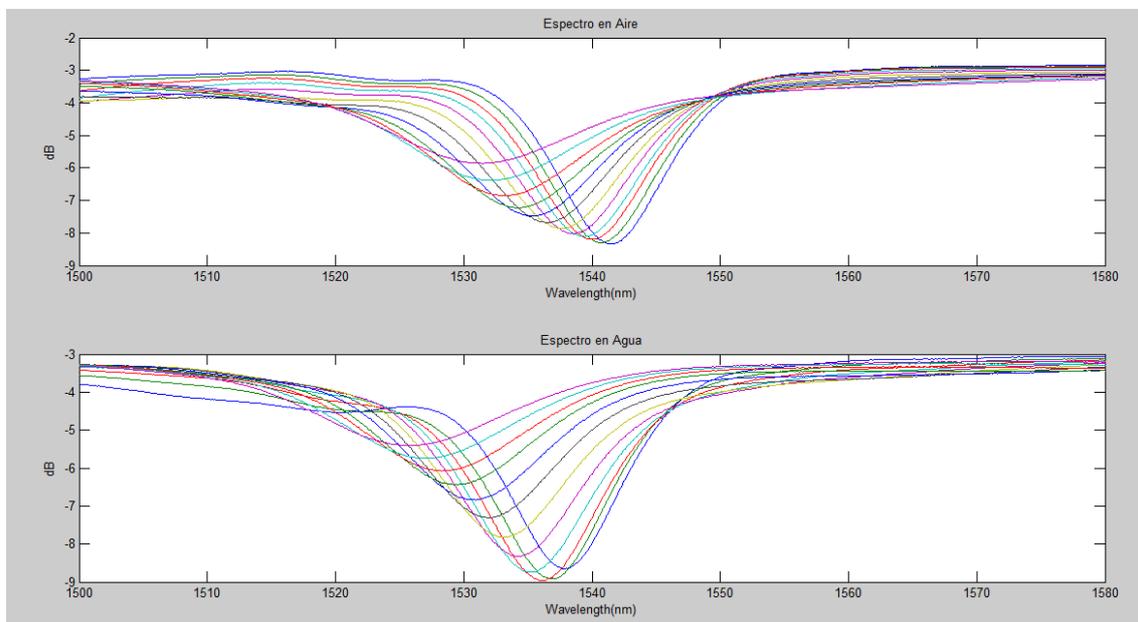
#### 4.2.7.3 Resultados

Como punto de partida se tiene el espectro inicial de la **figura 87**. Aplicando el mismo procedimiento que se ha estado utilizando en las pruebas anteriores se llega a las siguientes respuestas y posteriores conclusiones.

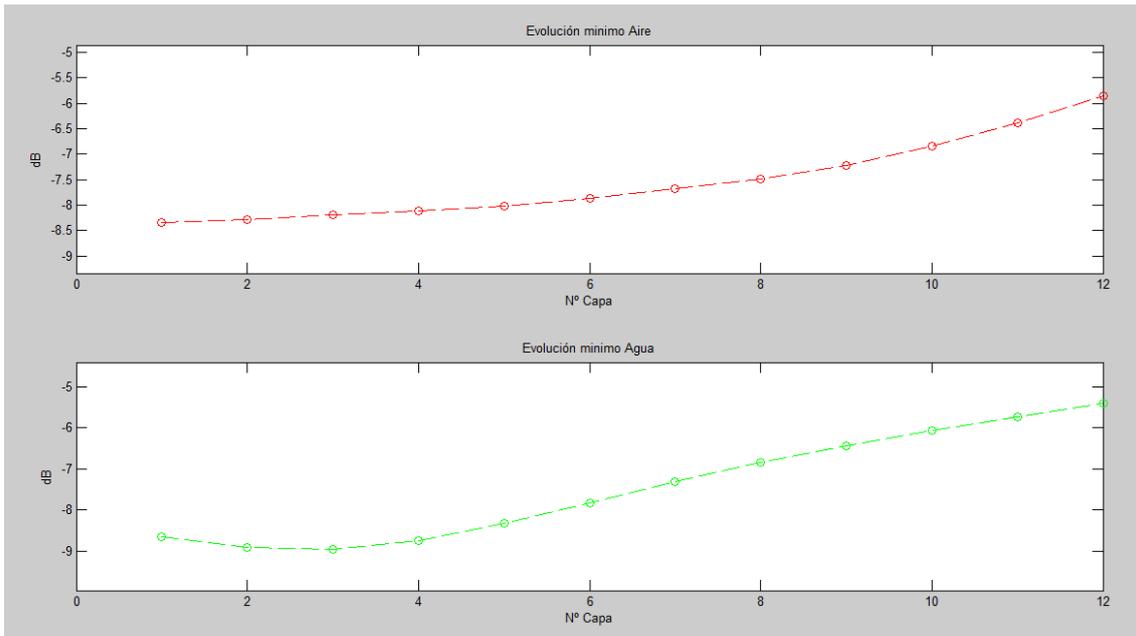


**Figura 87. Espectro Original LPG**

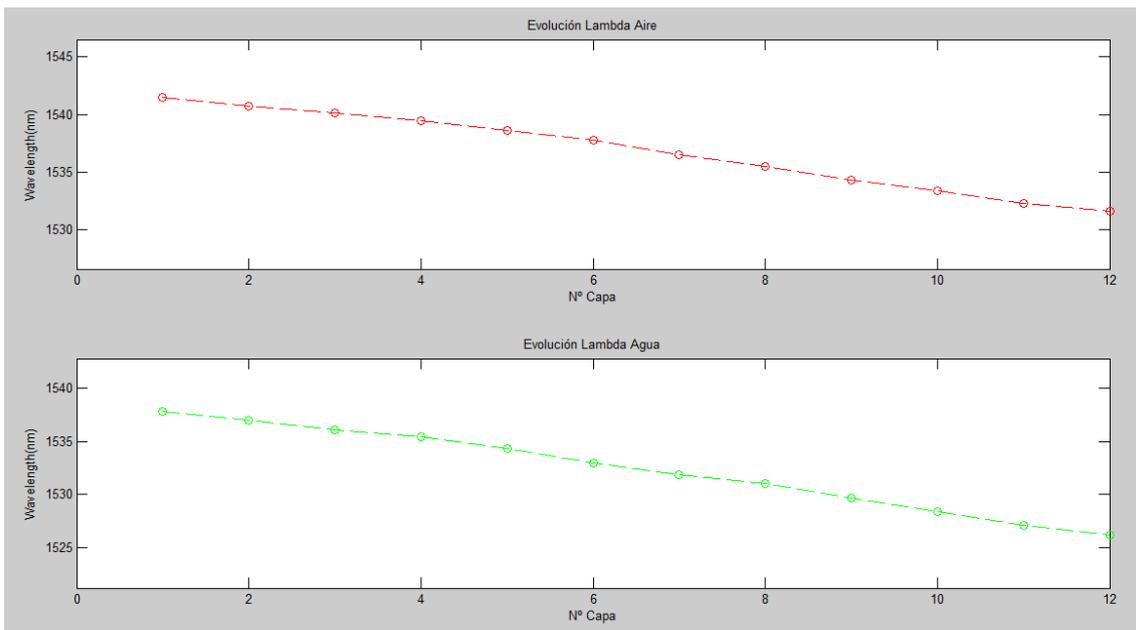
Procedemos a realizar la deposición del polímero como se ha hecho en anteriores pruebas, a pesar que el procedimiento es el mismo en este caso estamos trabajando con partículas de plata disueltas directamente en el compuesto PAA, en este caso resulta crucial mantener un pH 8 tanto en el compuesto como en los demás componentes de la deposición para así evitar un precipitado de las partículas de plata disueltas en la solución. En las siguientes figuras se observa la evolución.



**Figura 88. Evolución espectro LPG-Aire, LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 89. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



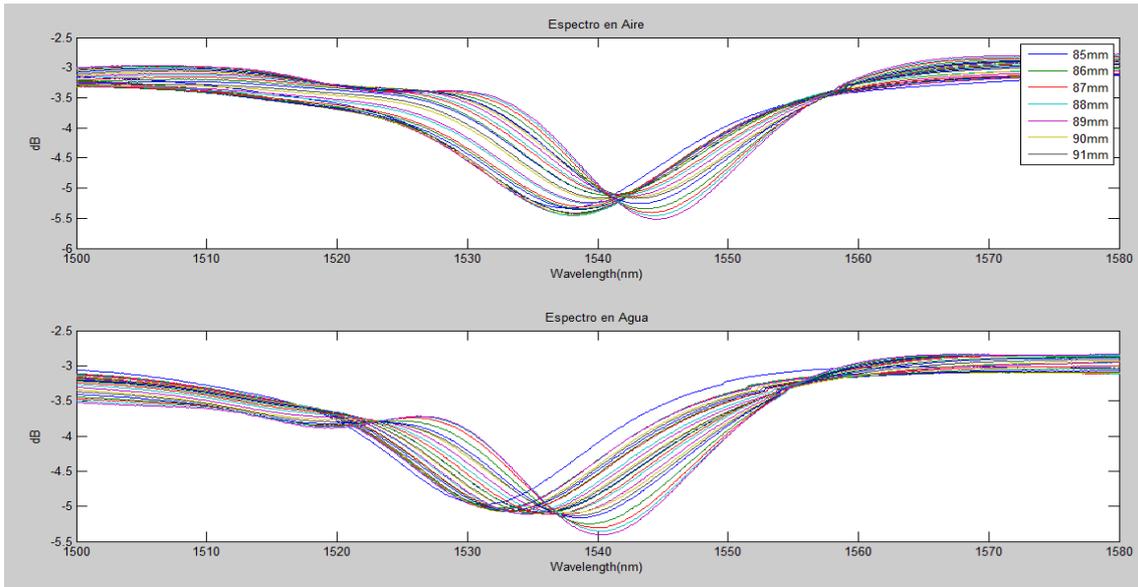
**Figura 90. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

Teniendo en cuenta la respuesta de la LPG a la deposición podemos inferir que la respuesta de la longitud de onda durante el proceso es bastante lineal, la respuesta de la potencia no es tan lineal, pero sigue el mismo patrón que en las anteriores pruebas.

Como ha sucedido en anteriores pruebas la excursión del pico inicial respecto al final resulta muy pequeña y por tanto insuficiente dado que debido a la ausencia de separación será imposible discernir las contribuciones de los picos buscados.

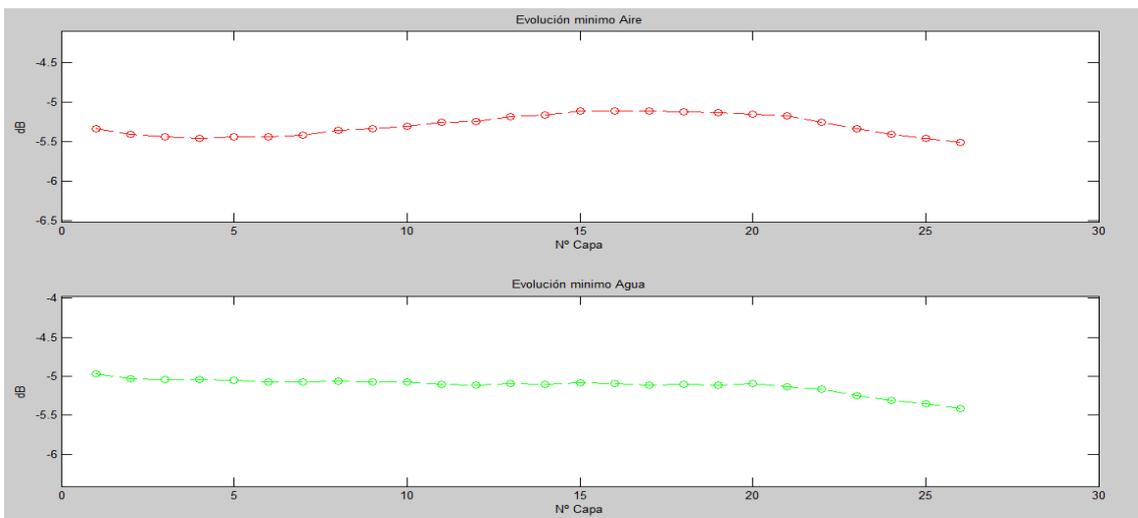
Aun así, procedemos a realizar la retirada parcial del recubrimiento dado que, aunque no es la situación ideal puede ser válido como conocimiento acerca del dispositivo.

Realizamos un seguimiento a la retirada parcial del recubrimiento para observar su evolución, dicho progreso se observa en la **figura 91**. Siguiendo con el procedimiento realizado hasta ahora, realizamos una captura de la respuesta espectral tanto en aire como en agua.

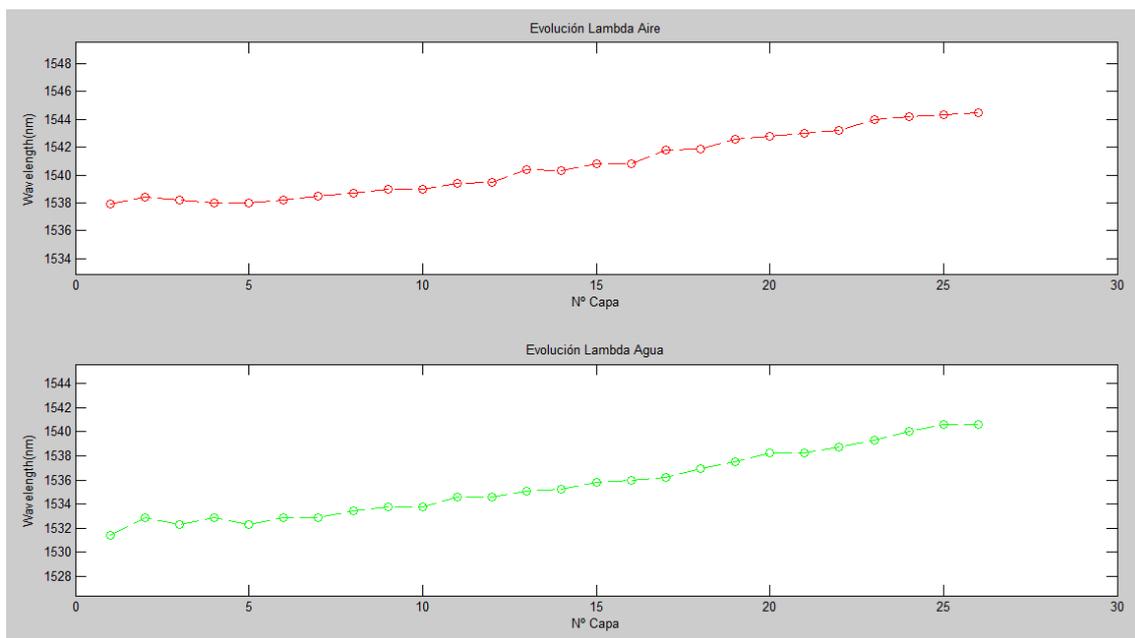


**Figura 91. Evolución espectro LPG-Aire y Agua respecto a la retirada parcial del recubrimiento**

A partir de los datos obtenidos y con el fin de tener de una forma clara la evolución que han tenido los diferentes parámetros que estamos analizando se realizan las **figuras 92 y 93** que muestran la evolución tanto de la potencia como de lambda en respuesta a la retirada parcial del recubrimiento.



**Figura 92. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a la retirada parcial del recubrimiento**



**Figura 93. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a la retirada parcial de recubrimiento.**

Durante esta prueba se ha observado un comportamiento anómalo en la retirada del recubrimiento, se ha realizado en pasos de 1mm cada vez y sin superar la mitad de la longitud del recubrimiento no hace aparición el desdoblamiento de picos, de hecho, el pico ha vuelto a su punto inicial con la consiguiente excursión nula. Dados estos resultados resulta inútil realizar la batería de pruebas de la cámara climática.

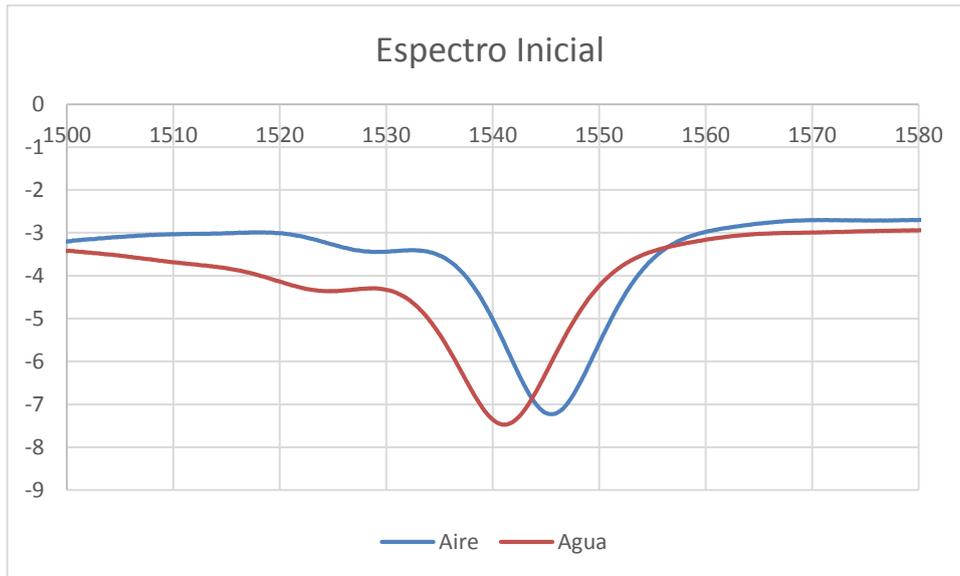
#### 4.2.8 LPG1 - Prueba 7

**4.2.8.1 Objetivo General: Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.**

**4.2.8.2 Objetivo Específico: Analizar la respuesta espectral al aplicar un recubrimiento LbL con polímeros PAA-PAH.**

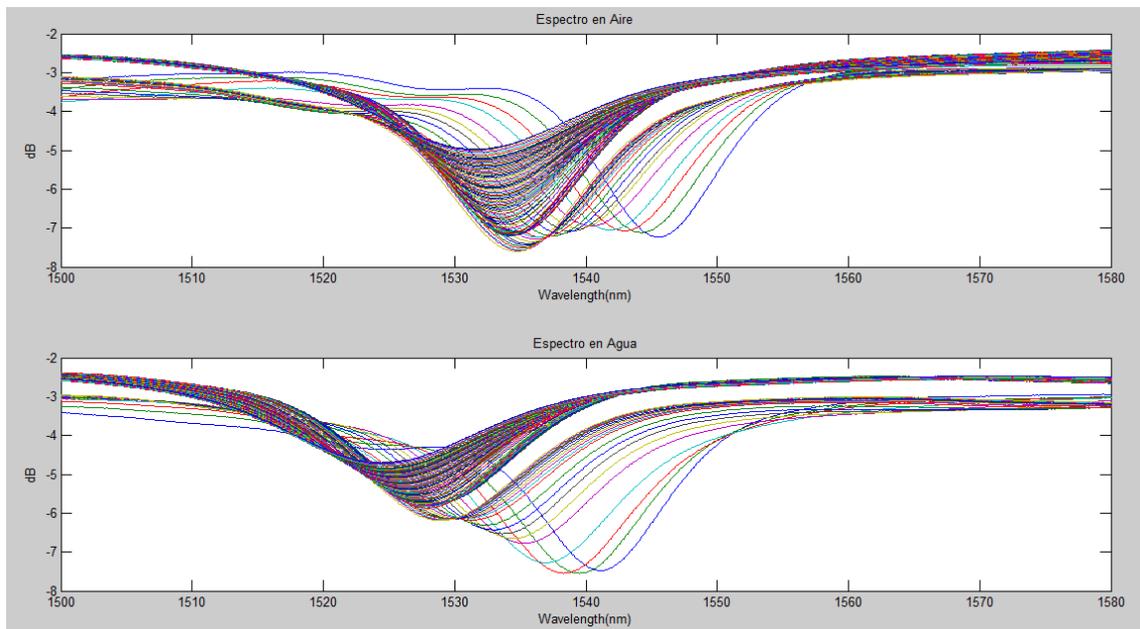
#### 4.2.8.3 Resultados

Como punto de partida se tiene el espectro inicial de la **figura 94**. Aplicando el mismo procedimiento que se ha estado utilizando en las pruebas anteriores se llega a las siguientes respuestas y posteriores conclusiones.

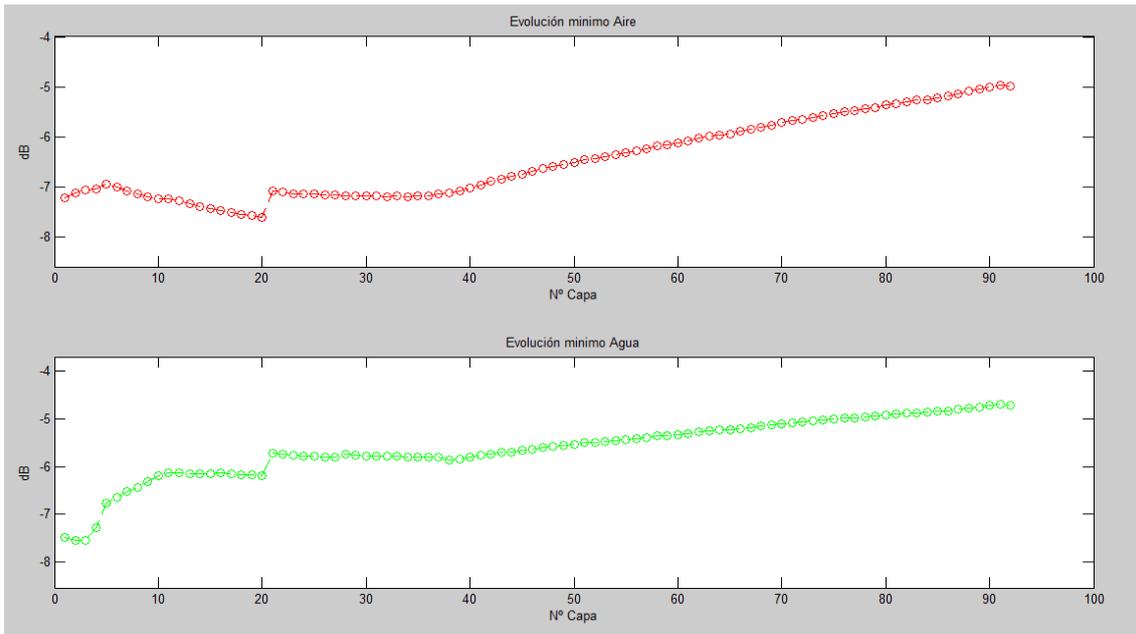


**Figura 94. Espectro Original LPG**

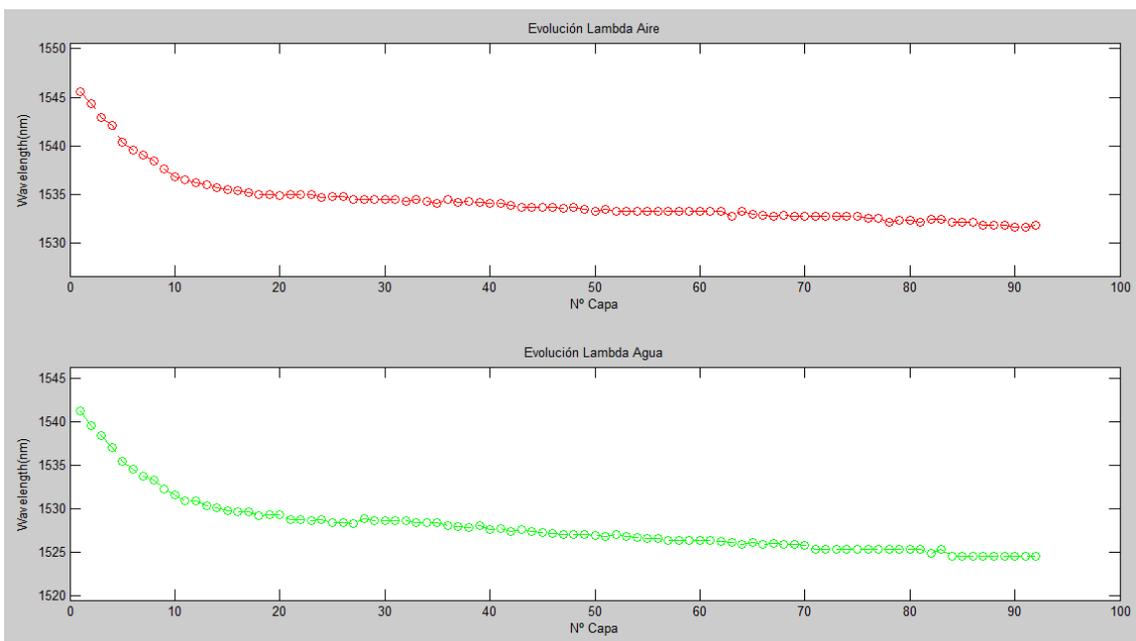
Procedemos a realizar la deposición del polímero como se ha hecho en anteriores pruebas, en este caso y vista la falta de éxito en las anteriores pruebas se ha decidido dar un paso atrás en el proyecto para comprobar si tenemos errores de base en la construcción del sensor. En las siguientes figuras se observa la evolución.



**Figura 95. Evolución espectro LPG-Aire, LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 96. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 97. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

Vistos los resultados obtenidos del recubrimiento se ha observado varios problemas en la construcción. Por una parte, tenemos una excursión entre el pico inicial y final es ínfima, para compensar este efecto se ha intentado depositar más capas de lo normal sin efecto alguno. Así pues, se llega a la conclusión que la evolución de la longitud de onda ha sufrido un estancamiento y por tanto no resulta interesante continuar con los demás pasos del protocolo de pruebas.

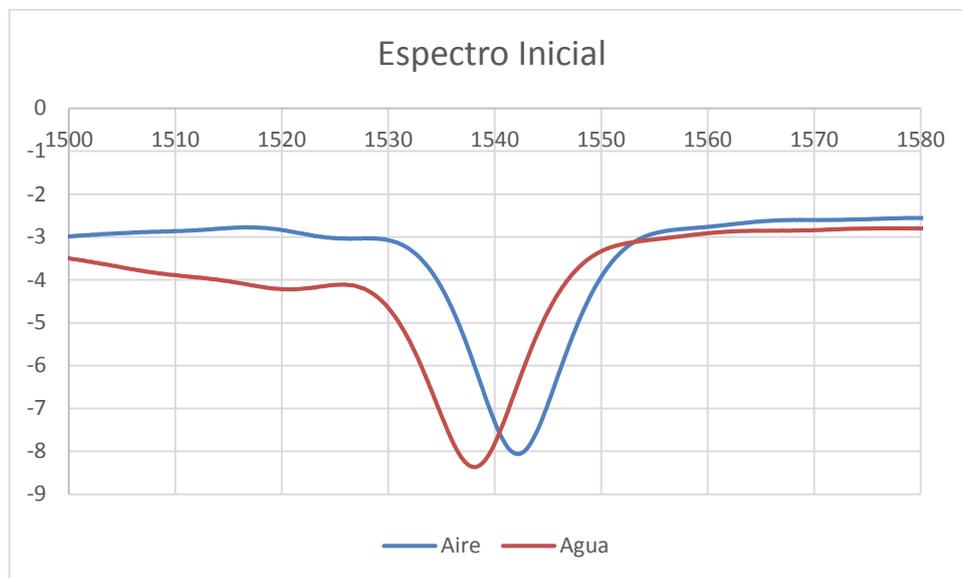
#### 4.2.9 LPG1 - Prueba 8

**4.2.9.1 Objetivo General:** *Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.*

**4.2.9.2 Objetivo Específico:** *Analizar la respuesta espectral al aplicar un recubrimiento LbL con polímeros PAA-PAH.*

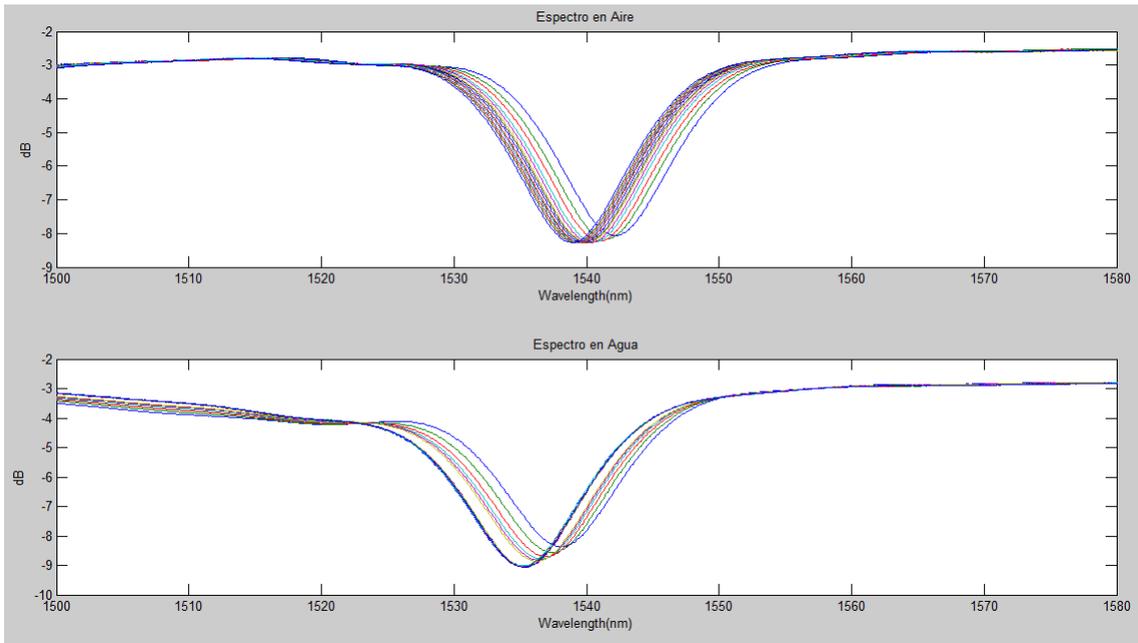
#### 4.2.9.3 Resultados

Como punto de partida se tiene el espectro inicial de la **figura 98**. Aplicando el mismo procedimiento que se ha estado utilizando en las pruebas anteriores se llega a las siguientes respuestas y posteriores conclusiones.

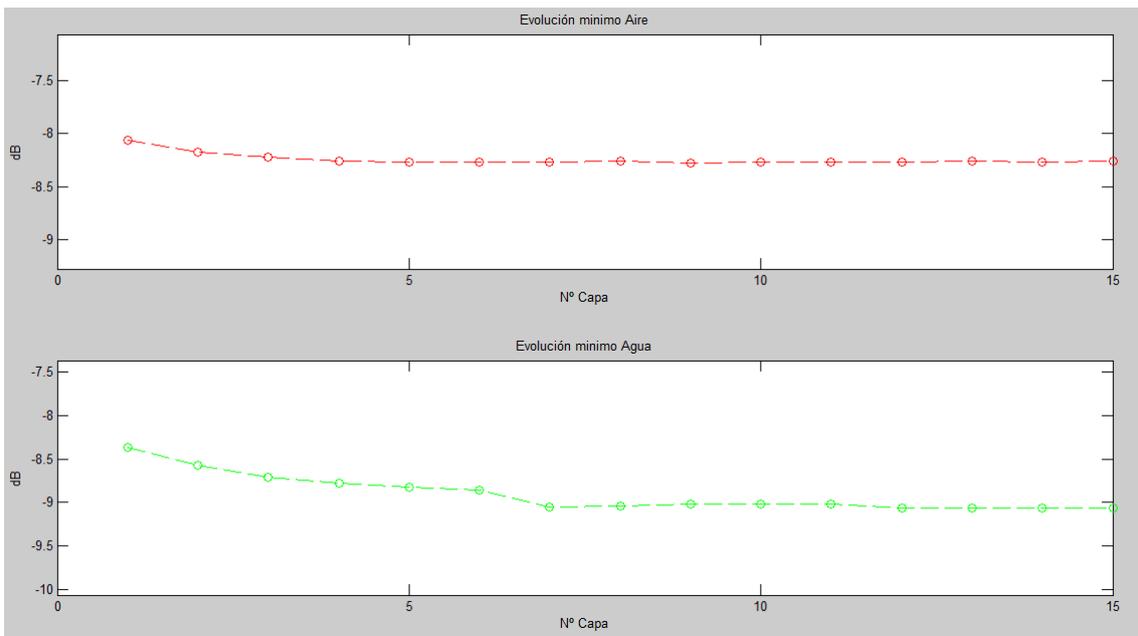


**Figura 98. Espectro Original LPG**

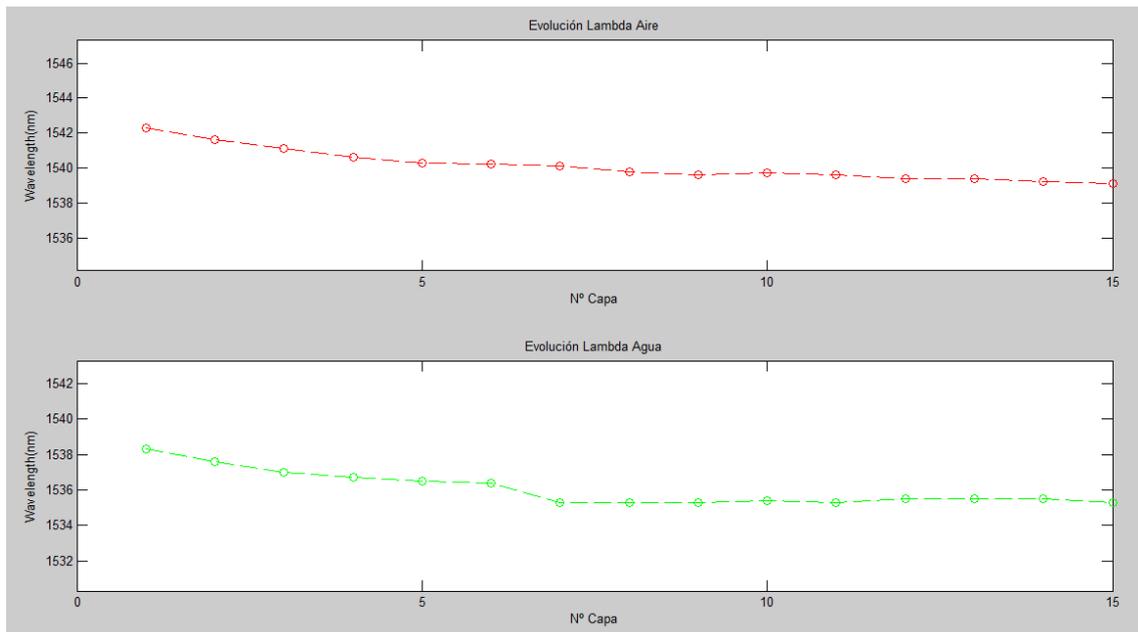
Procedemos a realizar la deposición del polímero como se ha hecho en anteriores pruebas, a pesar que el procedimiento es el mismo en este caso estamos trabajando con partículas de plata disueltas directamente en el compuesto PAA, en este caso resulta crucial mantener un pH 8 tanto en el compuesto como en los demás componentes de la deposición para así evitar un precipitado de las partículas de plata disueltas en la solución. En las siguientes figuras se observa la evolución.



**Figura 99. Evolución espectro LPG-Aire, LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 100. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 101. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

Al igual que en la prueba anterior el crecimiento ha sufrido un estancamiento que hasta las últimas pruebas no había sucedido. Dado que es el segundo caso consecutivo de este problema se ha empezado a considerar que el problema no depende de las variables que se manejan en la construcción si no que es dependiente de variables que son independientes a la construcción, se ha empezado a intuir que el proceso y las sucesivas pruebas han mellado la LPG y por ende es problema de esta. Dicha hipótesis se intentará comprobar en la siguiente prueba.

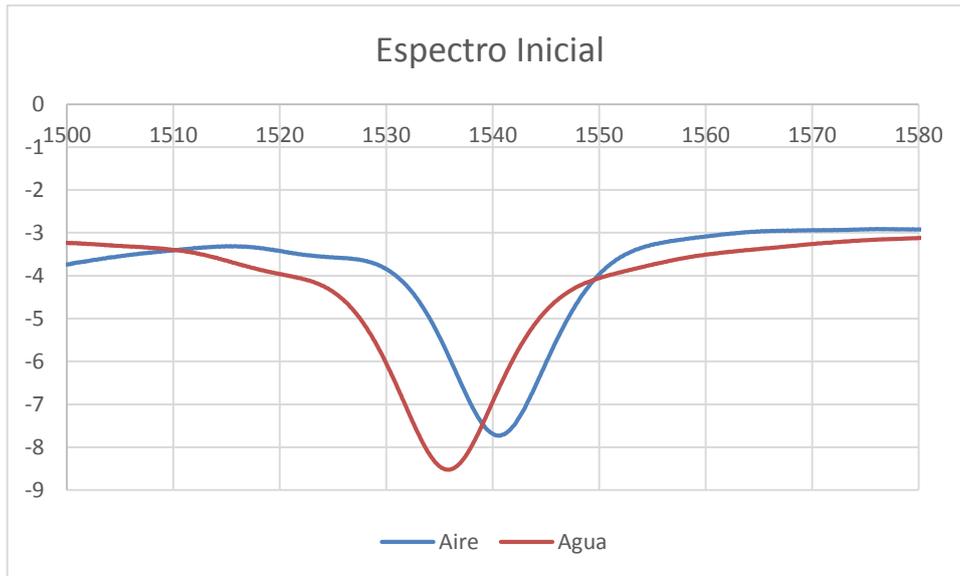
#### 4.2.10 LPG1 - Prueba 10

**4.2.10.1 Objetivo General: Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.**

**4.2.10.2 Objetivo Específico: Analizar las variables controladas e inferir su contribución como limitante en el protocolo de pruebas.**

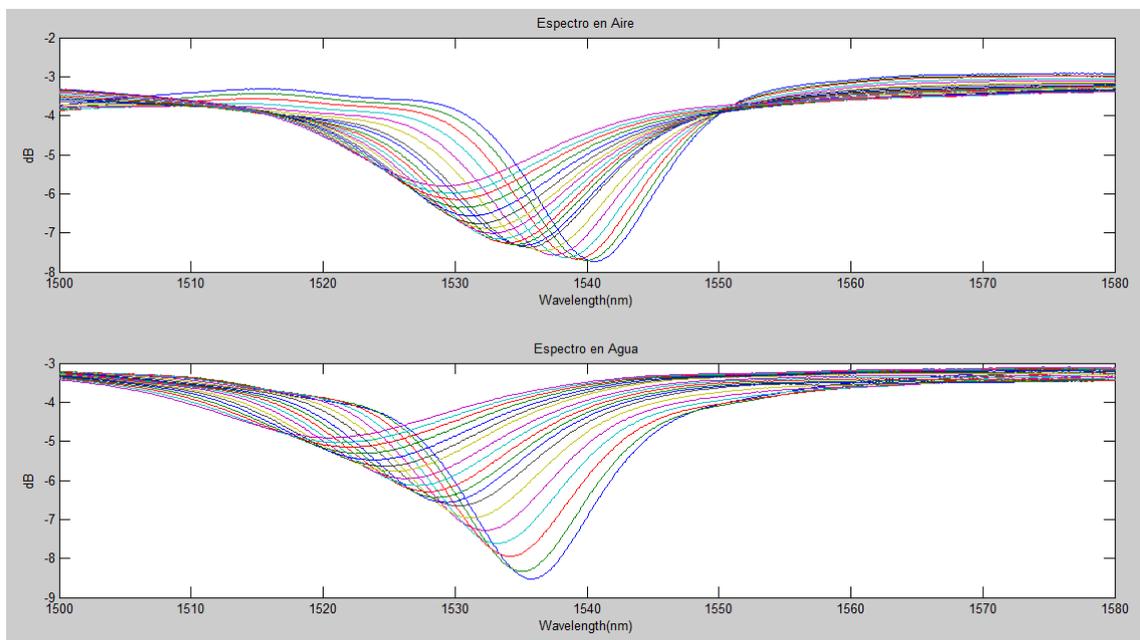
#### 4.2.10.3 Resultados

Como punto de partida se tiene el espectro inicial de la **figura 102**. Aplicando el mismo procedimiento que se ha estado utilizando en las pruebas anteriores se llega a las siguientes respuestas y posteriores conclusiones.

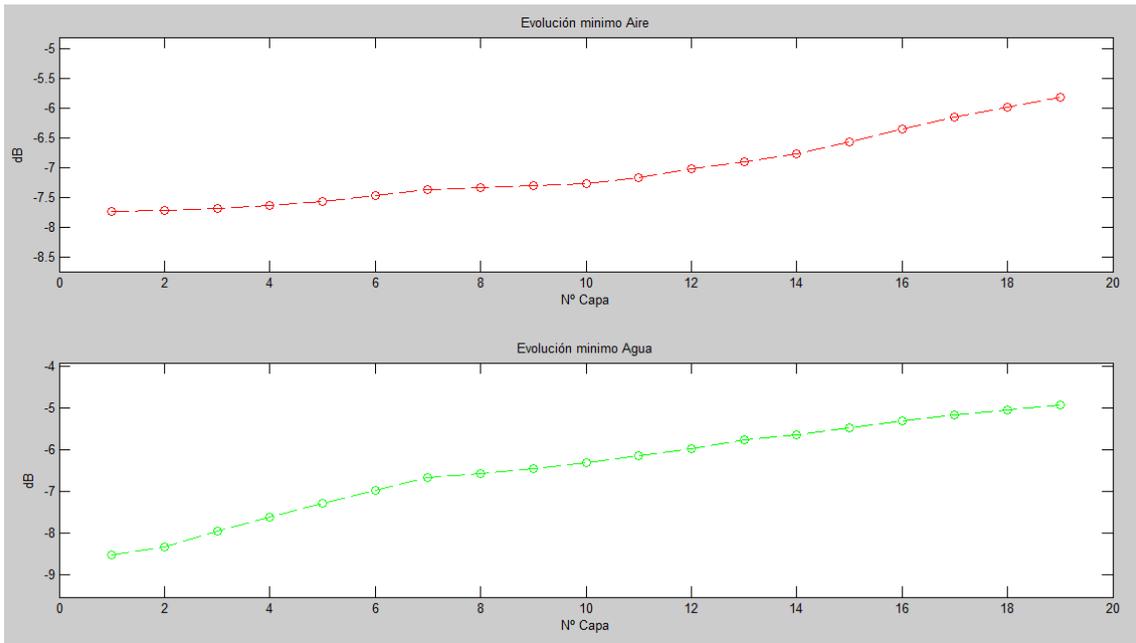


**Figura 102. Espectro Original LPG**

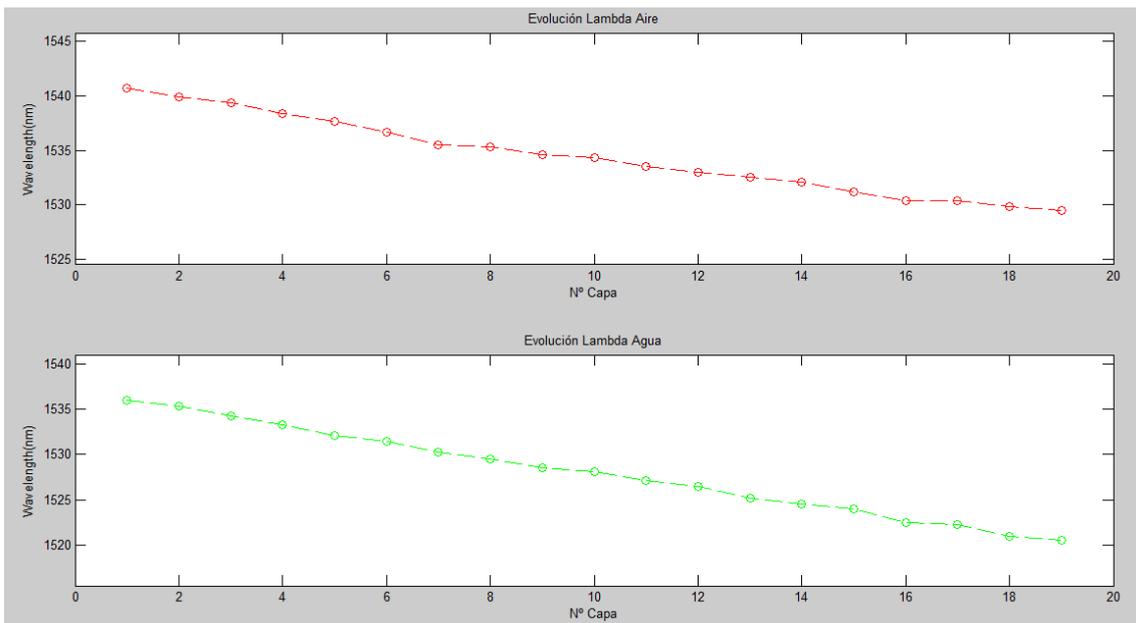
Procedemos a realizar la deposición del polímero como se ha hecho en anteriores pruebas, a pesar que el procedimiento es el mismo en este caso estamos trabajando con partículas de plata disueltas directamente en el compuesto PAA, en este caso resulta crucial mantener un pH 8 tanto en el compuesto como en los demás componentes de la deposición para así evitar un precipitado de las partículas de plata disueltas en la solución. En las siguientes figuras se observa la evolución.



**Figura 103. Evolución espectro LPG-Aire, LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 104. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 105. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

Como se había perfilado en la conclusión de la anterior prueba, esta prueba se ha propuesto como búsqueda de problemas en las variables controladas en el proceso y en las que no son controladas, se observa que la evolución del crecimiento resulta bastante buena en cuanto a desplazamiento capa a capa, resulta un crecimiento casi lineal pero aun así la excursión sigue siendo insuficiente. Dado este hecho y que los problemas de este tipo se han ido acrecentando a medida que se han realizado pruebas en la LPG podemos concluir que el proceso experimental y en especial el proceso de limpieza afecta

sensiblemente a la respuesta de la LPG, aunque no es el único factor que contribuye a este comportamiento. Todas estas variables serán revisadas de forma más amplia en el apartado de limitaciones.

Como conclusión más importante se puede afirmar que la LPG con la que se ha estado trabajando ya no es útil para las pruebas por lo que el siguiente paso en el proyecto será buscar una segunda fibra que cumpla con los parámetros que son necesarios y que permita renovar esta LPG.

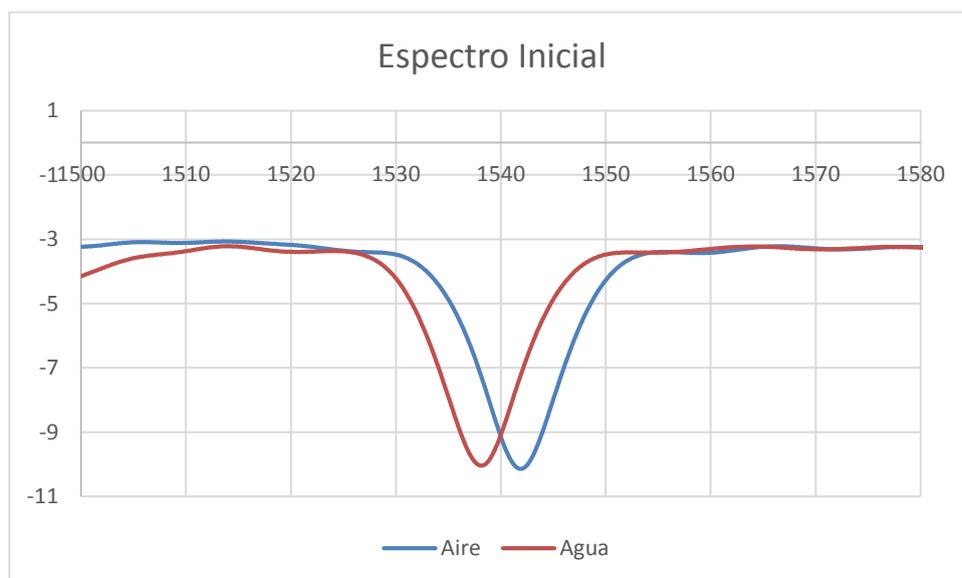
#### 4.2.11 LPG2 - Prueba 1

**4.2.11.1 Objetivo General:** *Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.*

**4.2.11.2 Objetivo Específico:** *Analizar la respuesta espectral al aplicar un recubrimiento LbL con polímeros PAA-PAH.*

#### 4.2.11.3 Resultados

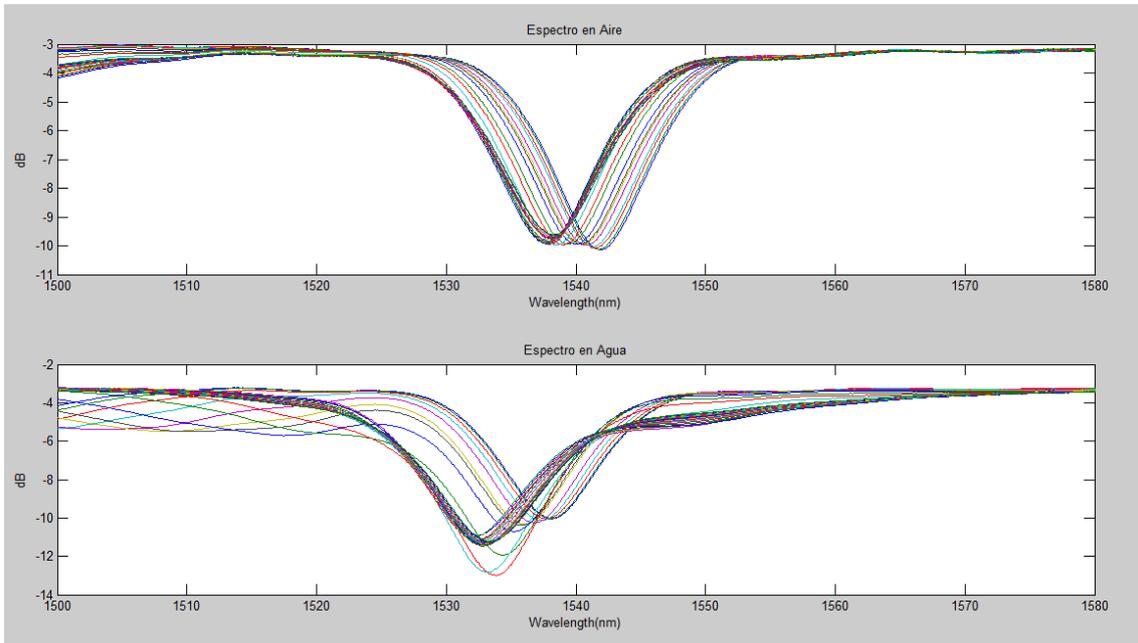
Como punto de partida se tiene el espectro inicial de la **figura 106**. Dada la conclusión de la anterior prueba y siendo necesaria la renovación de la LPG para continuar las pruebas, se ha empezado a usar una nueva LPG. Aplicando el mismo procedimiento que se ha estado utilizando en las pruebas anteriores se llega a las siguientes respuestas y posteriores conclusiones.



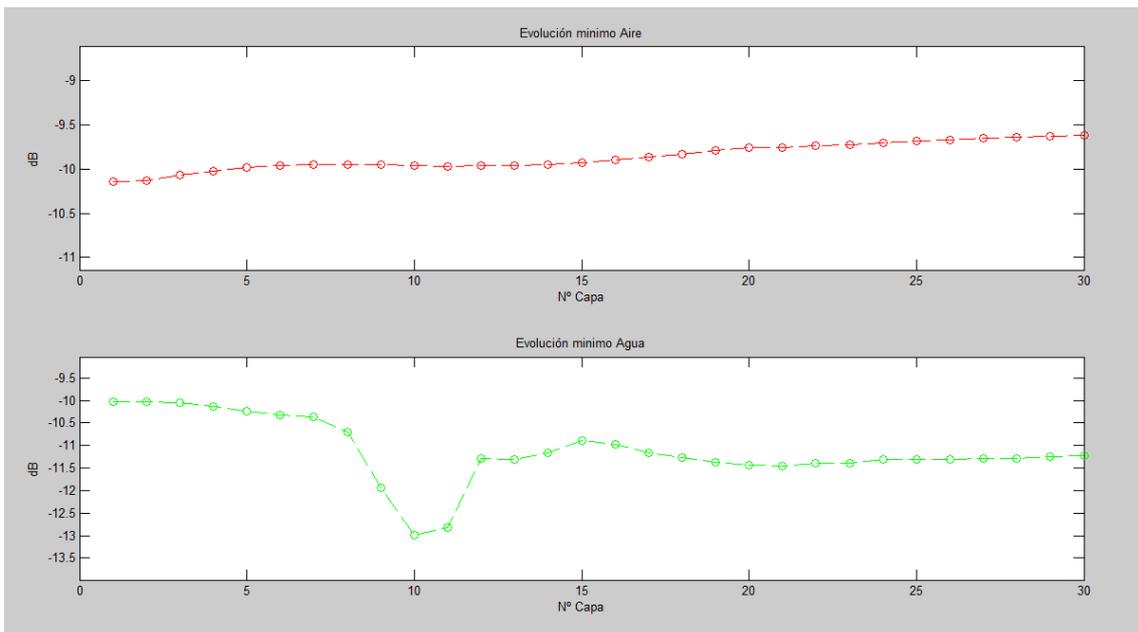
**Figura 106. Espectro Original LPG**

Procedemos a realizar la deposición del polímero como se ha hecho en anteriores pruebas, dado que desconocemos la respuesta de la nueva LPG

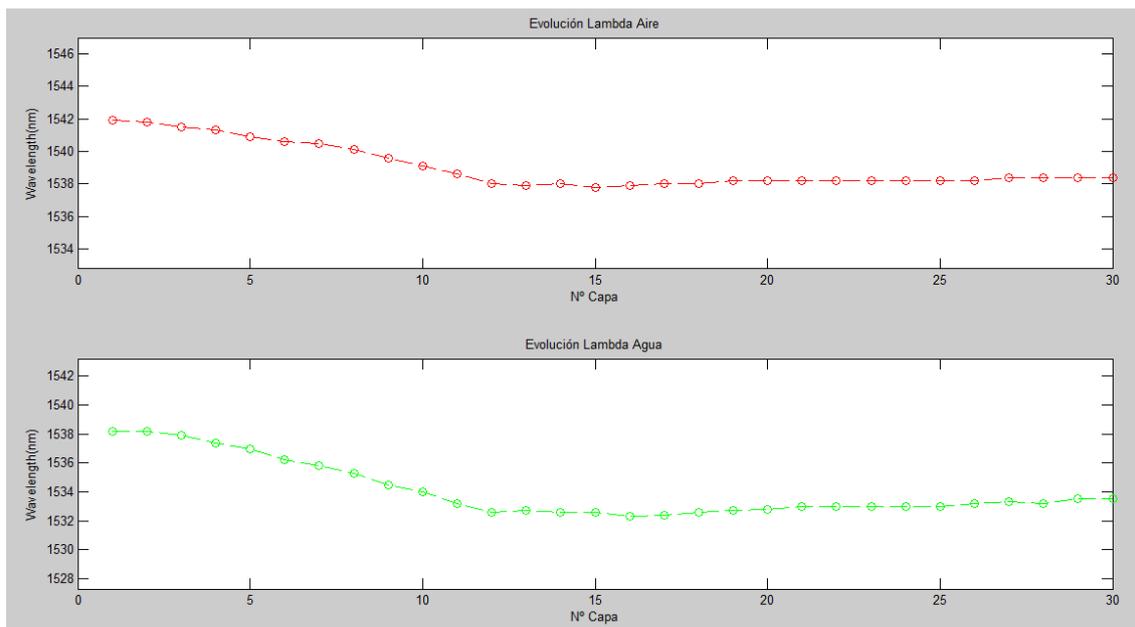
procedemos con el protocolo básico de pruebas. En las siguientes figuras se observa la evolución.



**Figura 107. Evolución espectro LPG-Aire, LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 108. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 109. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

Como se ha podido observar en las figuras anteriores, el resultado de la prueba es un crecimiento muy lento y con poco desplazamiento en lambda. La contribución a la potencia es casi nula por lo que podemos concluir que la construcción no ha resultado exitosa.

Al observar que la construcción ha resultado defectuosa no tiene ningún sentido realizar la retirada parcial del recubrimiento ni las pruebas en cámara climática por lo que se procede a eliminar el recubrimiento generado para realizar una nueva prueba.

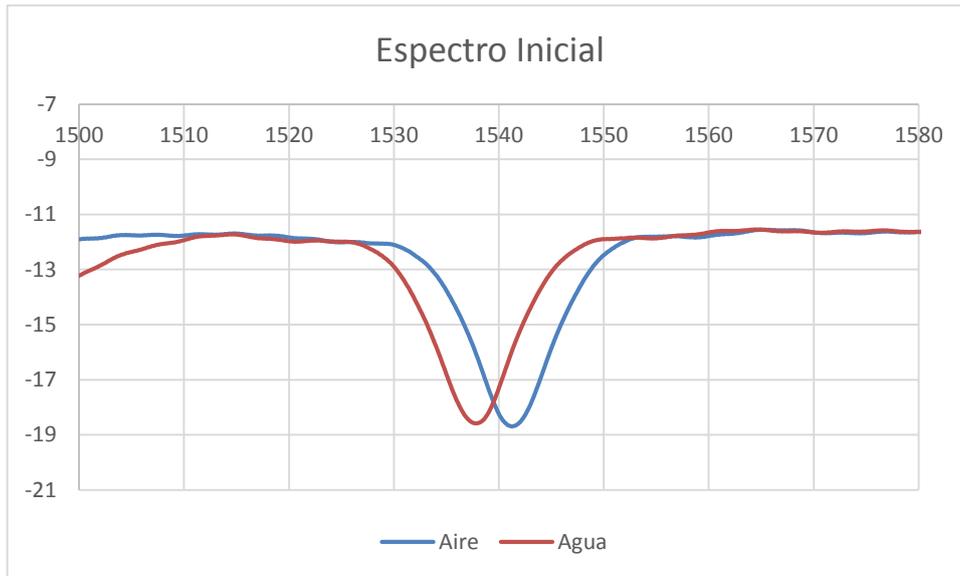
#### 4.2.12 LPG2 - Prueba 2

**4.2.12.1 Objetivo General: Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.**

**4.2.12.2 Objetivo Específico: Analizar la respuesta espectral al aplicar un recubrimiento LbL con polímeros PAA-PAH.**

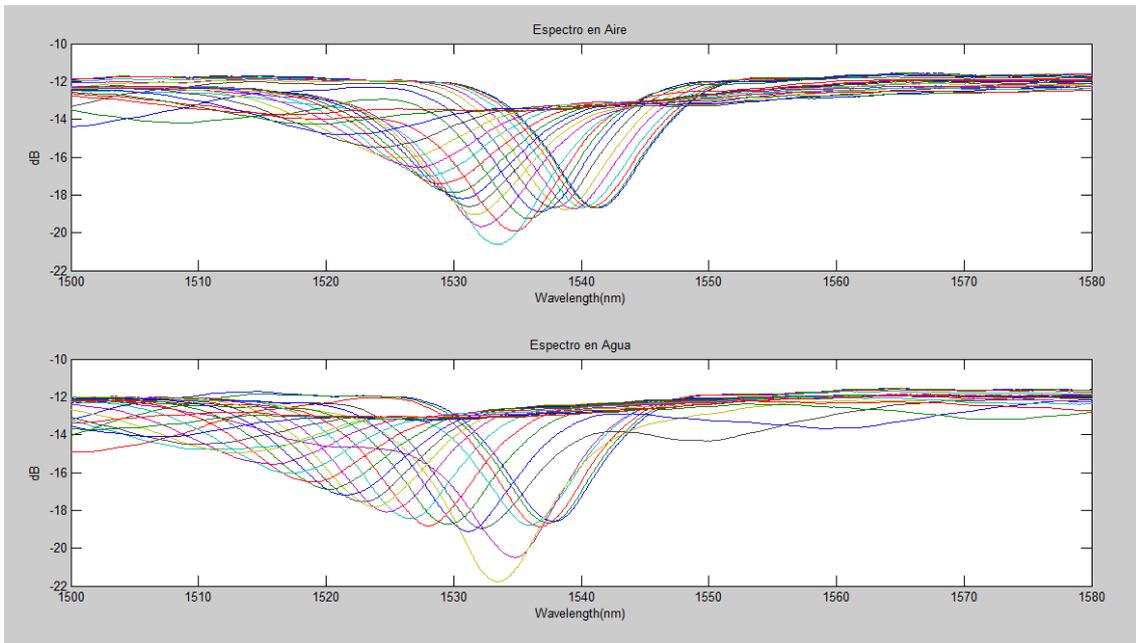
#### 4.2.12.3 Resultados

Como punto de partida se tiene el espectro inicial de la **figura 110**. Aplicando el mismo procedimiento que se ha estado utilizando en las pruebas anteriores se llega a las siguientes respuestas y posteriores conclusiones.

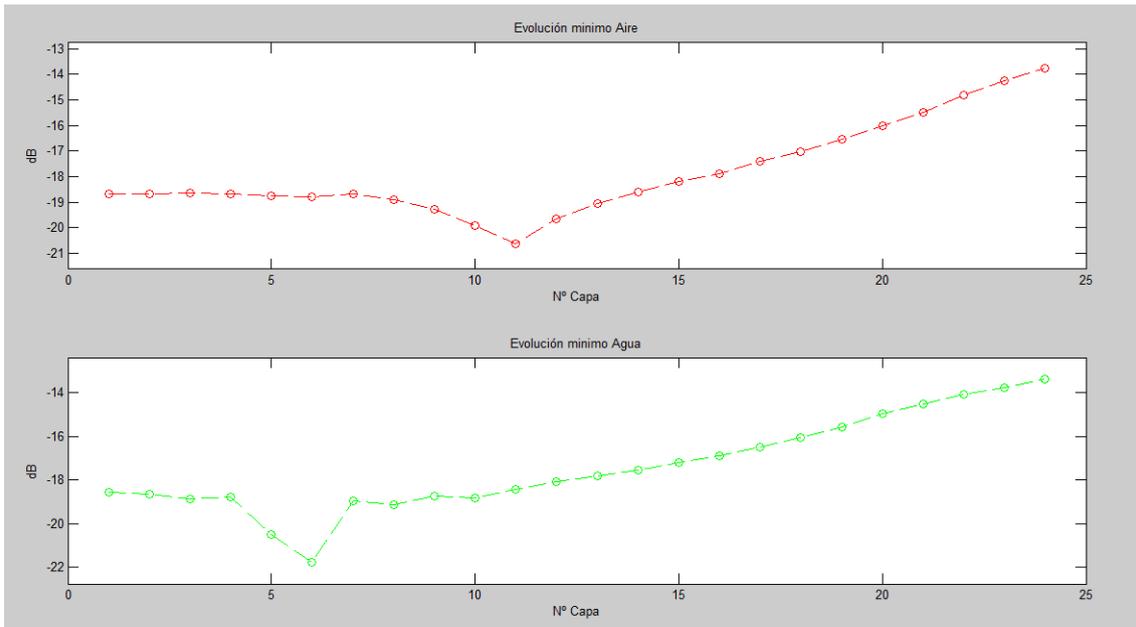


**Figura 110. Espectro Original LPG**

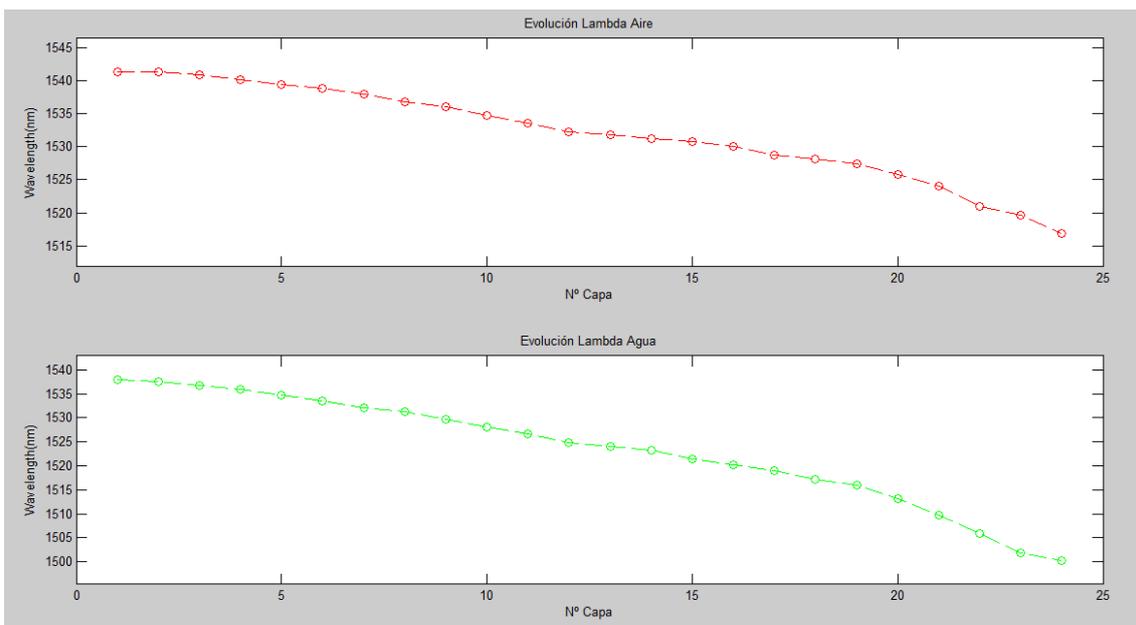
Procedemos a realizar la deposición del polímero como se ha hecho en anteriores pruebas, dado que desconocemos la respuesta de la nueva LPG procedemos con el protocolo básico de pruebas. En las siguientes figuras se observa la evolución.



**Figura 111. Evolución espectro LPG-Aire, LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 112. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 113. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

De la misma manera que en la prueba anterior, se ha intentado replicar el protocolo de pruebas en busca de una gran excursión mediante la deposición de capas poliméricas para posteriormente retirar y encontrar el desdoblamiento de pico que es la señal inequívoca que se ha conseguido el objetivo.

Se obtiene un crecimiento controlado y que se ajusta a las expectativas, después de 24 capas tenemos una excursión de 1541 a 1517 (24nm).

El comportamiento de potencia del pico también es bueno, a pesar de esto, dado que buscamos maximizar la excursión entre el pico original y el pico final el resultado es que se realizan demasiadas capas con la consiguiente pérdida de potencia en el pico de trabajo por un salto en la atenuación coincidente con las últimas capas de la construcción, situación que resulta normal observando anteriores construcciones.

Como conclusión positiva observamos que esta LPG puede tener una distancia entre picos bastante interesante a la hora de pensar en el desdoblamiento, pero debemos tener cuidado a la hora de manejar la potencia mínima que necesitamos para lograr nuestro objetivo.

Debido a este último inconveniente esta construcción queda invalidada para la siguiente batería de pruebas. Se realiza una limpieza con piraña y se deja lista la fibra para la próxima prueba.

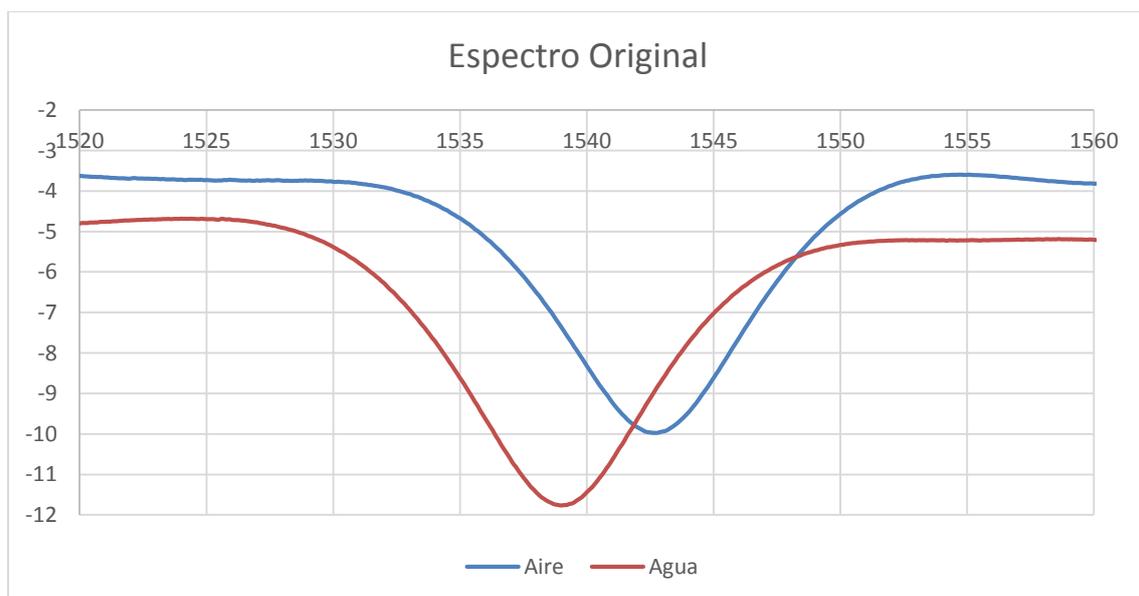
### 4.2.13 LPG2 - Prueba 3

**4.2.13.1 Objetivo General: Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.**

**4.2.13.2 Objetivo Específico: Analizar la respuesta espectral al aplicar un recubrimiento LbL con polímeros PAA-PAH.**

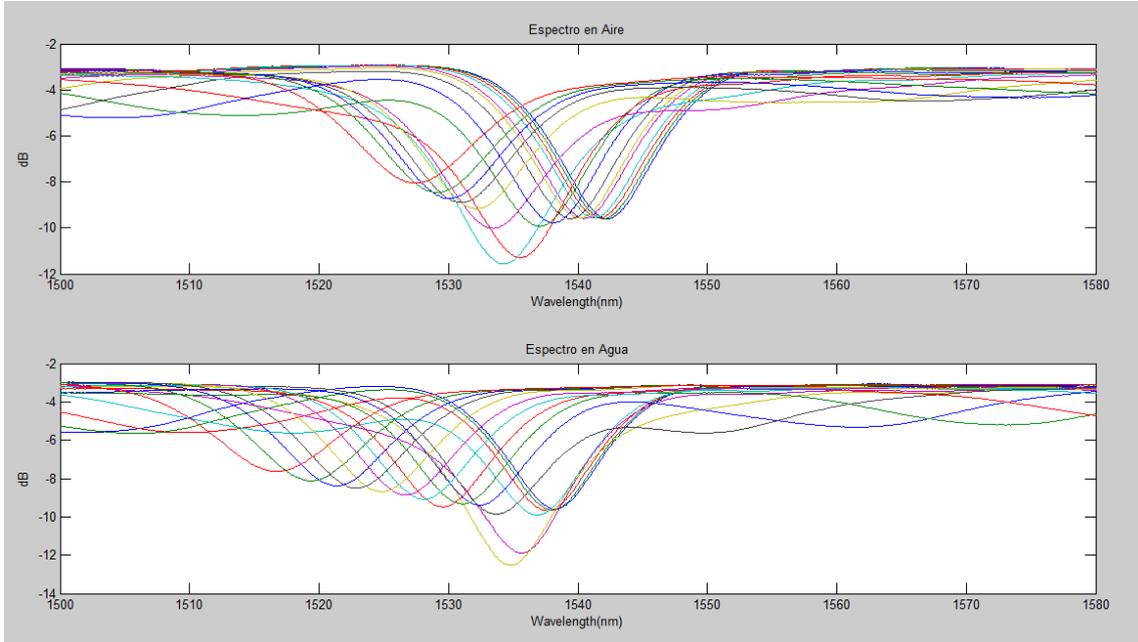
### 4.2.13.3 Resultados

Como punto de partida se tiene el espectro inicial de la **figura 114**. Aplicando el mismo procedimiento que se ha estado utilizando en las pruebas anteriores se llega a las siguientes respuestas y posteriores conclusiones.

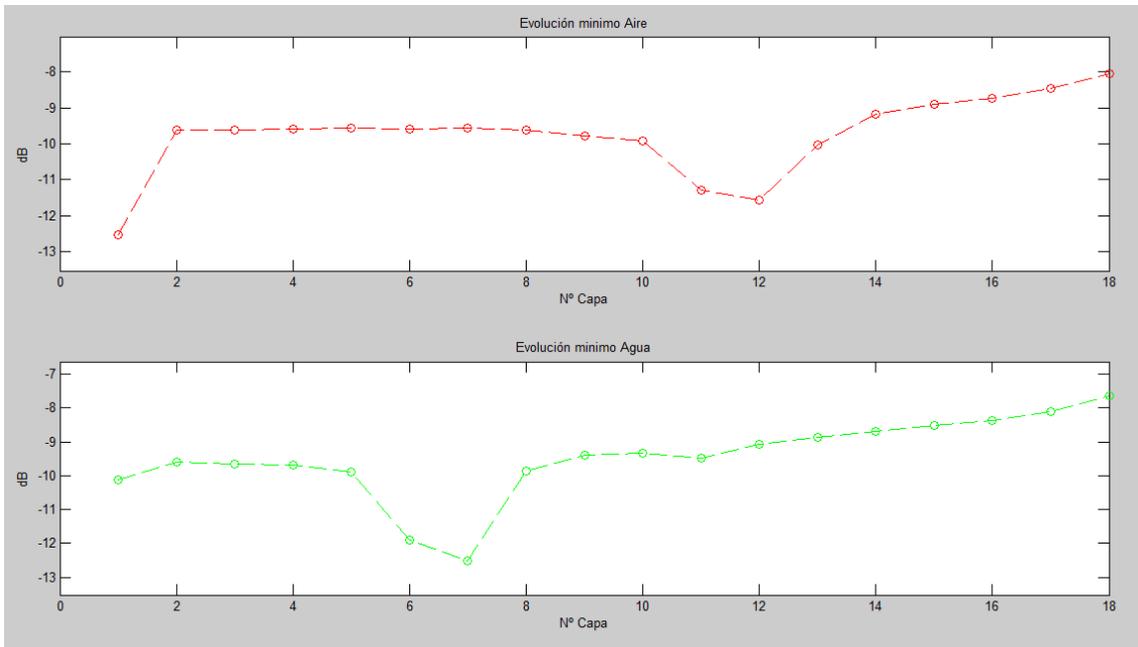


**Figura 114. Espectro Original LPG**

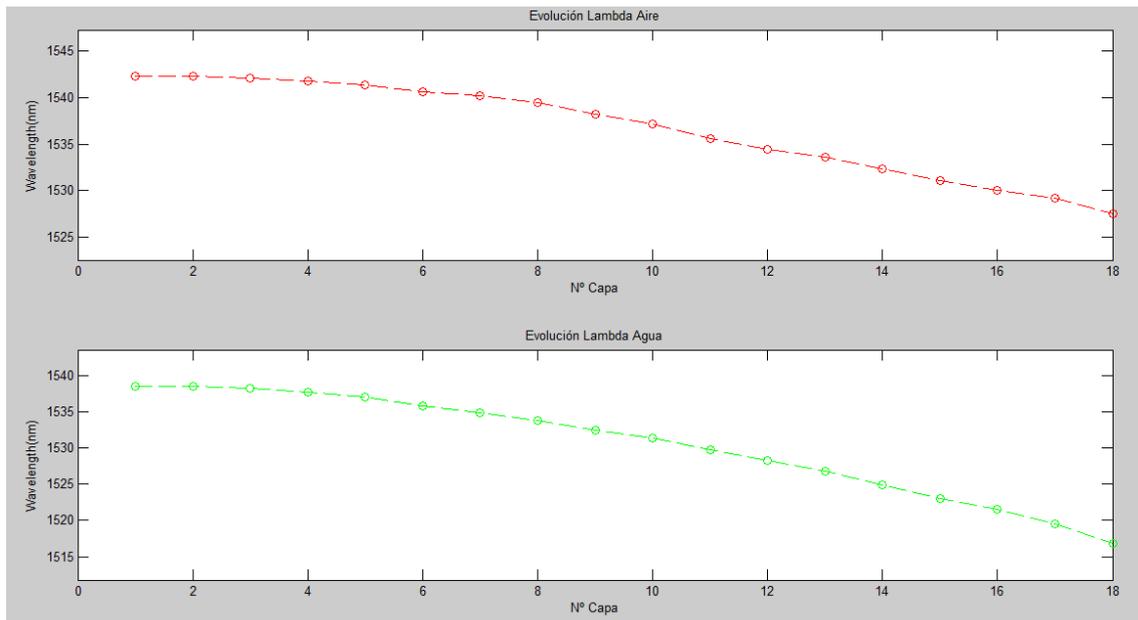
Procedemos a realizar la deposición del polímero como se ha hecho en anteriores pruebas, dado que desconocemos la respuesta de la nueva LPG procedemos con el protocolo básico de pruebas. En las siguientes figuras se observa la evolución.



**Figura 115. Evolución espectro LPG-Aire, LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 116. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

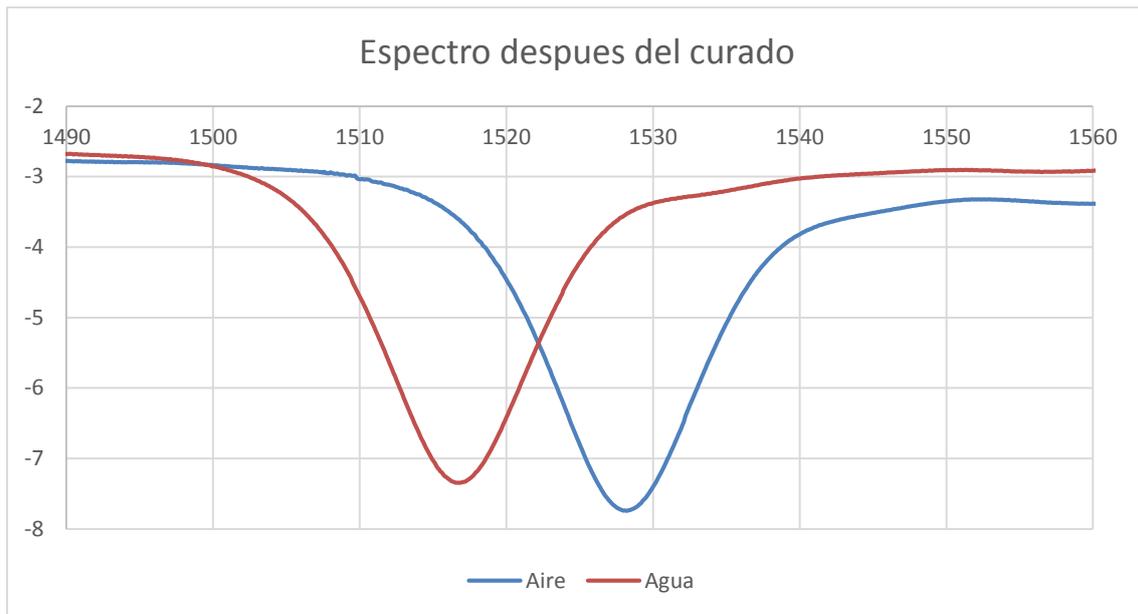


**Figura 117. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

Observado la construcción se ha obtenido una excursión sensiblemente más pequeña que en la anterior prueba, pero hemos controlado en mayor medida la potencia. Se ha optado por mantener la potencia necesaria en el crecimiento para poder realizar la retirada del recubrimiento y posteriormente realizar pruebas en la cámara climática.

Los perfiles de crecimiento, evolución de potencia y de lambda siguen parámetros normales.

Antes de realizar la retirada y como medida para realizar un control más efectivo de la retirada del recubrimiento se le aplica un curado a la fibra para compactar el recubrimiento polimérico y en la medida de lo posible evitar pérdidas de polímeros debido al efecto de capilaridad en la retirada.

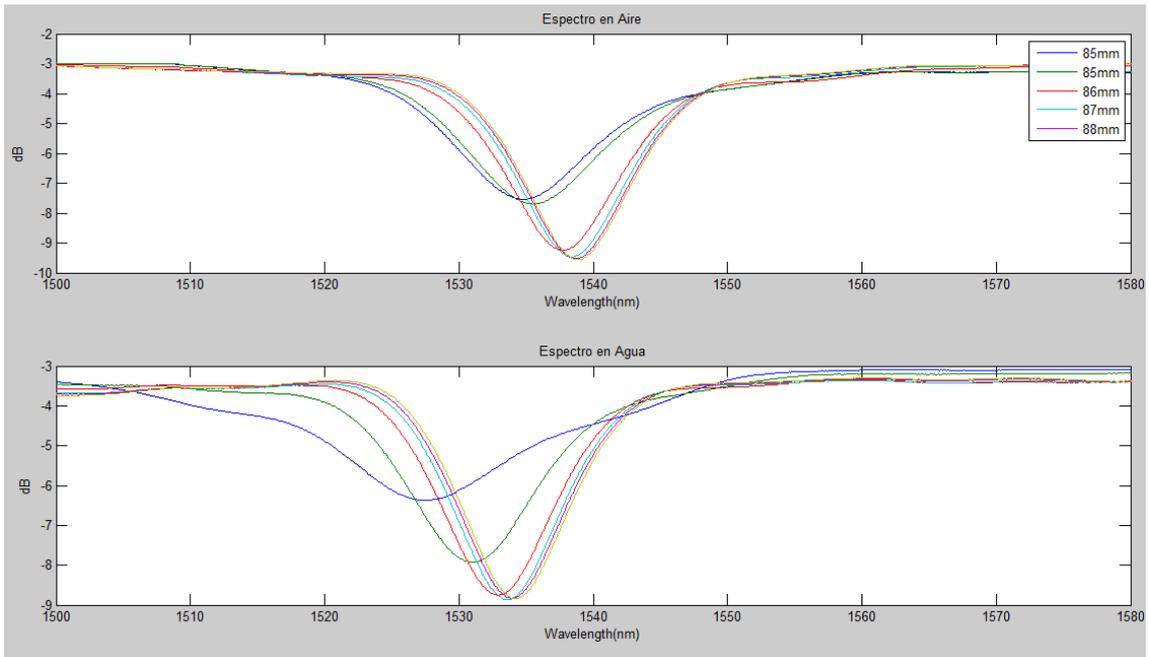


**Figura 118. Espectro Recubrimiento LPG-Aire y Agua después de la aplicación de ciclos de curado.**

como se observa en el espectro resultante después del proceso de curado, la longitud de onda central se ha desplazado cerca de 10nm hacia la izquierda. Este efecto es debido a la deshidratación del polímero del recubrimiento, lo que incide directamente en su índice de refracción y por tanto en la respuesta espectral total.

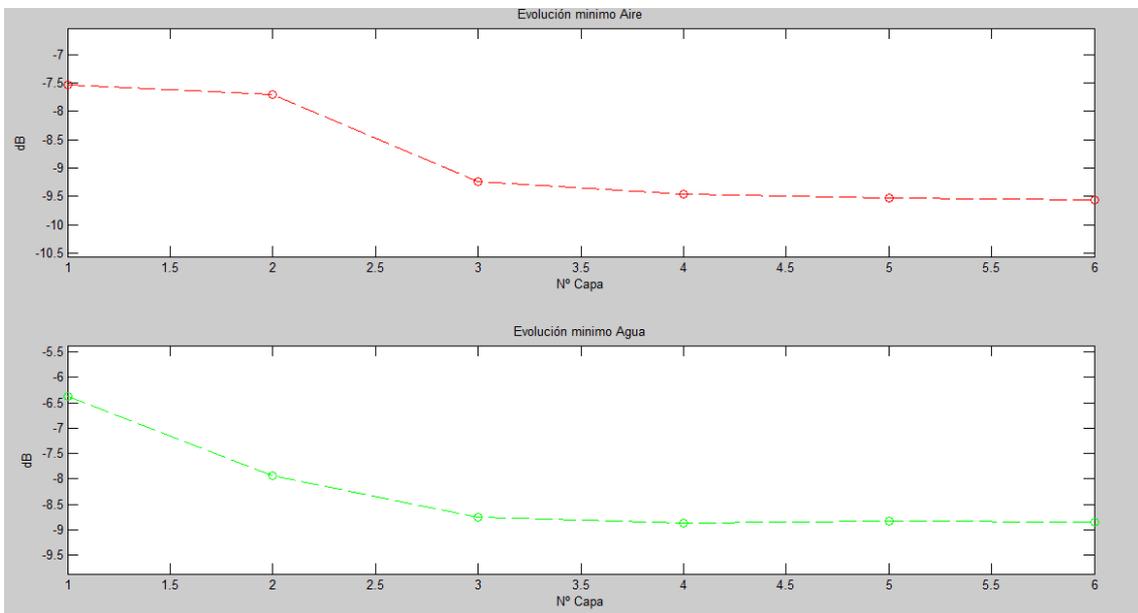
Se ha procedido a realizar la retirada parcial del recubrimiento dado que, aunque no es la situación ideal puede resultar valido.

Realizamos un seguimiento a la retirada parcial del recubrimiento para observar su evolución, dicho progreso se observa en la **figura 119**. Siguiendo con el procedimiento realizado hasta ahora, realizamos una captura de la respuesta espectral tanto en aire como en agua.

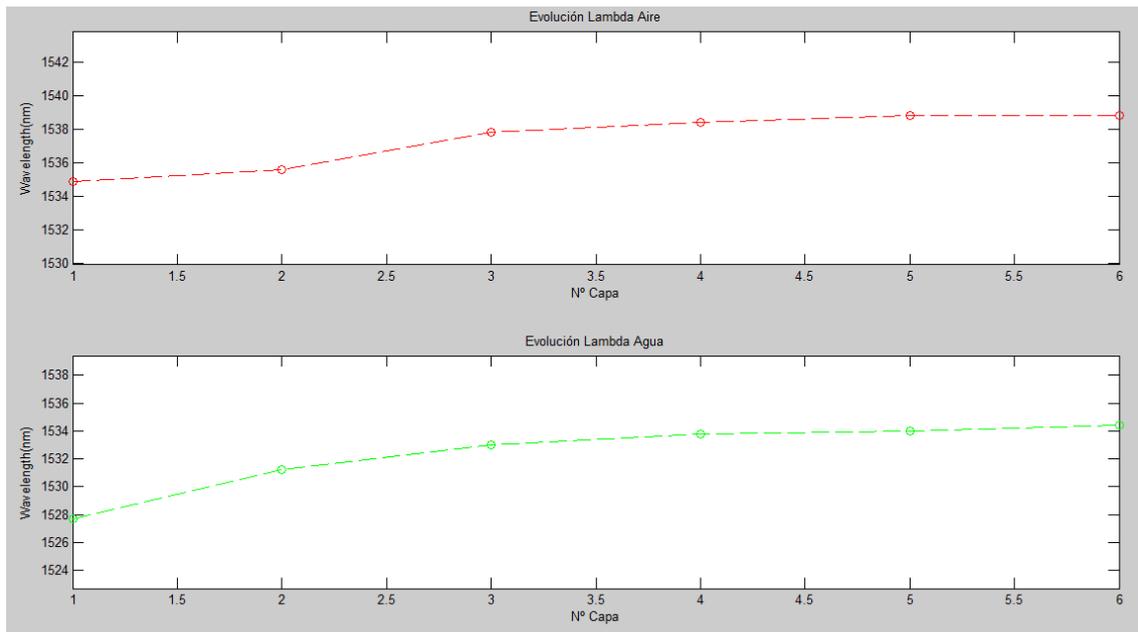


**Figura 119. Evolución espectro LPG-Aire y Agua respecto a la retirada parcial del recubrimiento**

A partir de los datos obtenidos y con el fin de tener de una forma clara la evolución que han tenido los diferentes parámetros que estamos analizando se realizan las **figuras 120 y 121** que muestran la evolución tanto de la potencia como de lambda en respuesta a la retirada parcial del recubrimiento.



**Figura 120. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a la retirada parcial del recubrimiento**



**Figura 121. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a la retirada parcial de recubrimiento.**

Como se ha observado en el proceso retirada, el pico de trabajo se ha ido desplazando progresivamente hacia la derecha debido a la retirada parcial del recubrimiento polimérico de la LPG, en ningún momento del proceso el espectro ha sufrido un ensanchamiento en el que se puedan intuir la unión de las contribuciones del pico original de la LPG como el generado por medio del recubrimiento, en esta situación el espectro simplemente ha sufrido un desplazamiento constante hasta volver a situarse cercano a la longitud de onda central original de la LPG, esto nos indica que la contribución del recubrimiento ha desaparecido sin que el desdoblamiento de picos se haya producido.

En conclusión, la prueba no ha sido exitosa en cuanto a la aparición del desdoblamiento de picos que indica la sensibilidad tanto a temperatura y humedad relativa.

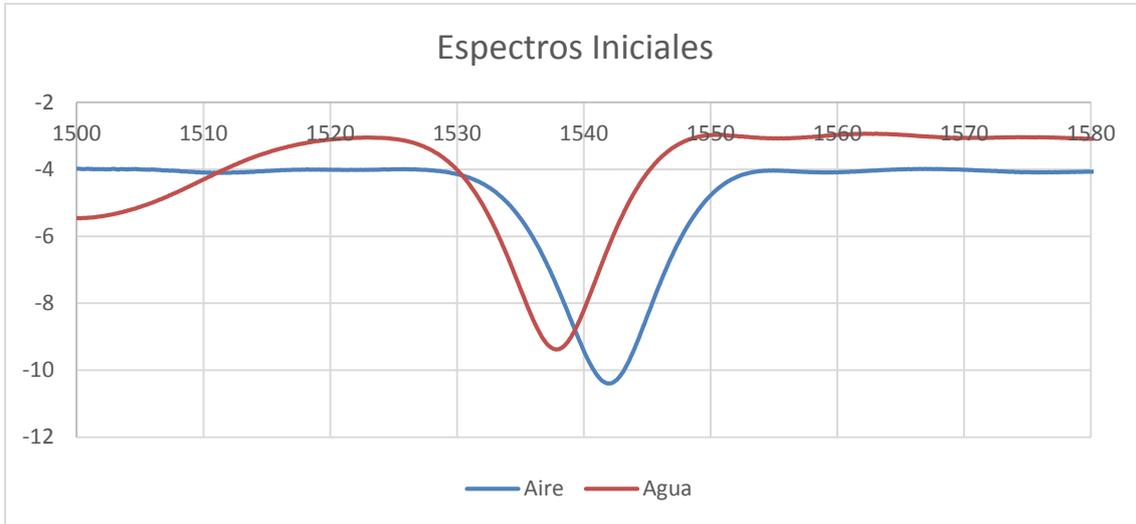
#### 4.2.14 LPG2 - Prueba 4

**4.2.14.1 Objetivo General: Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.**

**4.2.14.2 Objetivo Específico: Analizar la respuesta espectral al aplicar un recubrimiento LbL con polímeros PAA-PAH.**

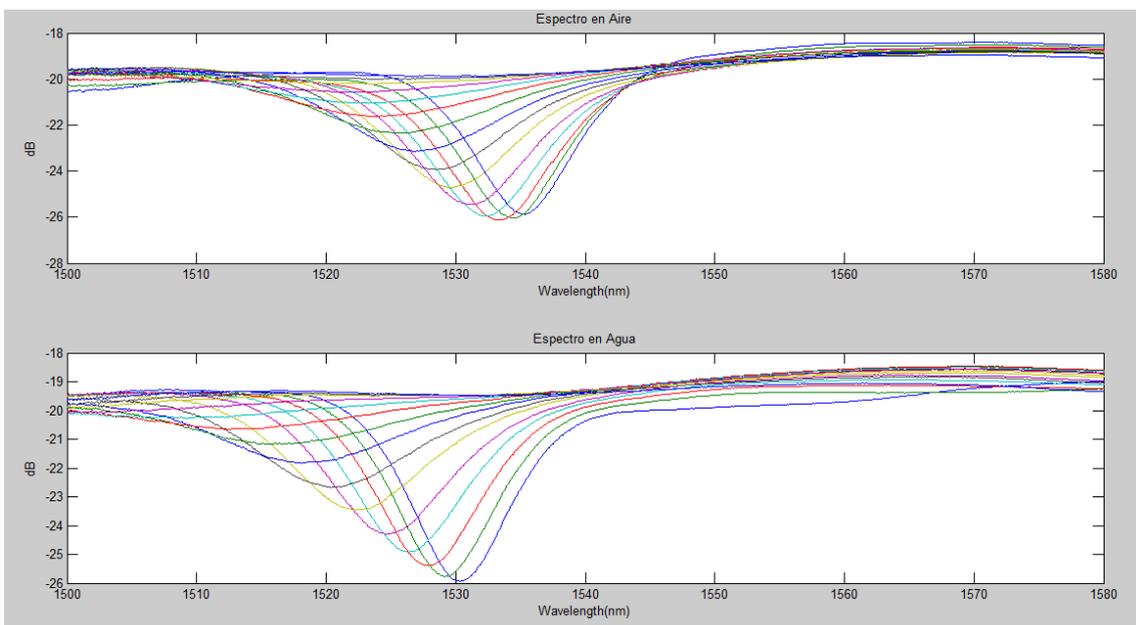
#### 4.2.14.3 Resultados

Como punto de partida se tiene el espectro inicial de la **figura 122**. Aplicando el mismo procedimiento que se ha estado utilizando en las pruebas anteriores se llega a las siguientes respuestas y posteriores conclusiones.

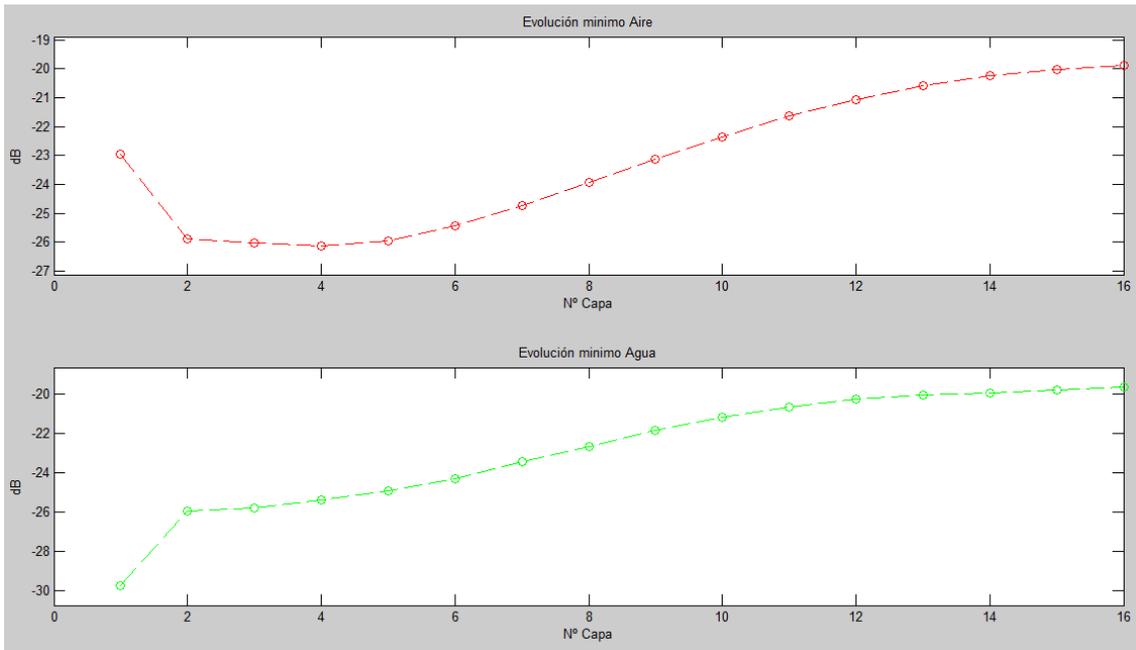


**Figura 1122. Espectro Original LPG**

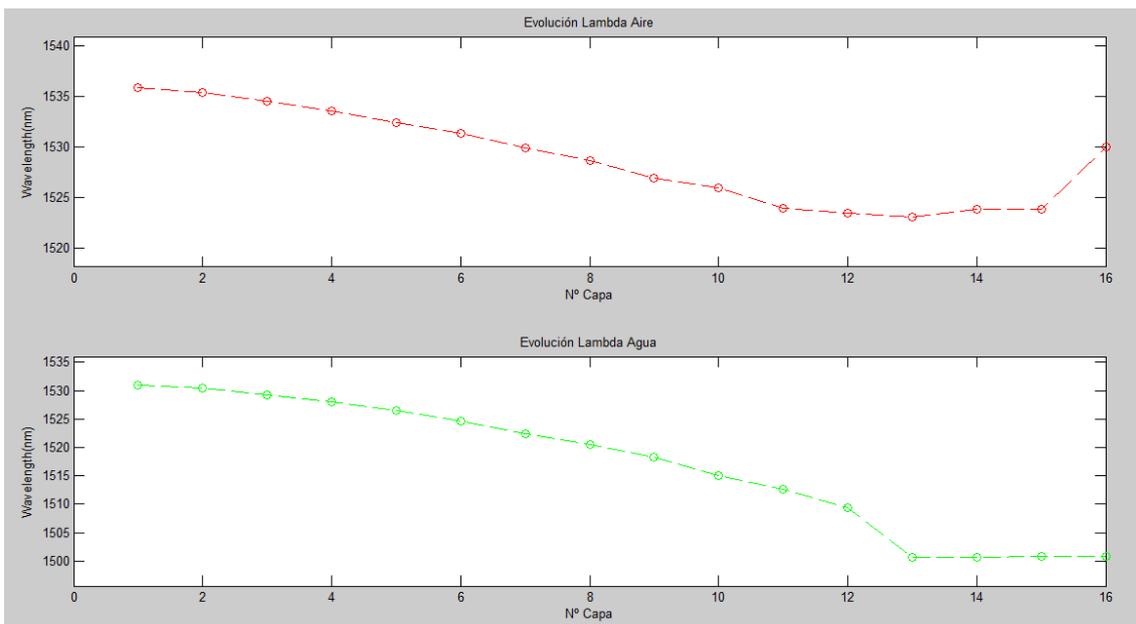
Procedemos a realizar la deposición del polímero como se ha hecho en anteriores pruebas, dado que desconocemos la respuesta de la nueva LPG procedemos con el protocolo básico de pruebas. En las siguientes figuras se observa la evolución.



**Figura 123. Evolución espectro LPG-Aire, LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 124. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



**Figura 125. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

Como se puede observar, por una parte, existe un desplazamiento con respecto al espectro original. Como se ha comentado en el anterior apartado esto se debe al proceso de curado que le ha aplicado a la fibra.

Independientemente de esto se hace patente varios problemas en esta construcción. En primer lugar, tenemos una excursión entre el pico original y el pico final demasiado pequeña, para compensar esto se han depositado más capas a costa de perder potencia con el fin de lograr algo más de

desplazamiento, esto ha hecho que la pérdida de potencia sea crítica sin que se obtuviera un desplazamiento mayor, por tanto, se considera que esta construcción carece de interés.

#### 4.2.15 LPG3 - Prueba 1

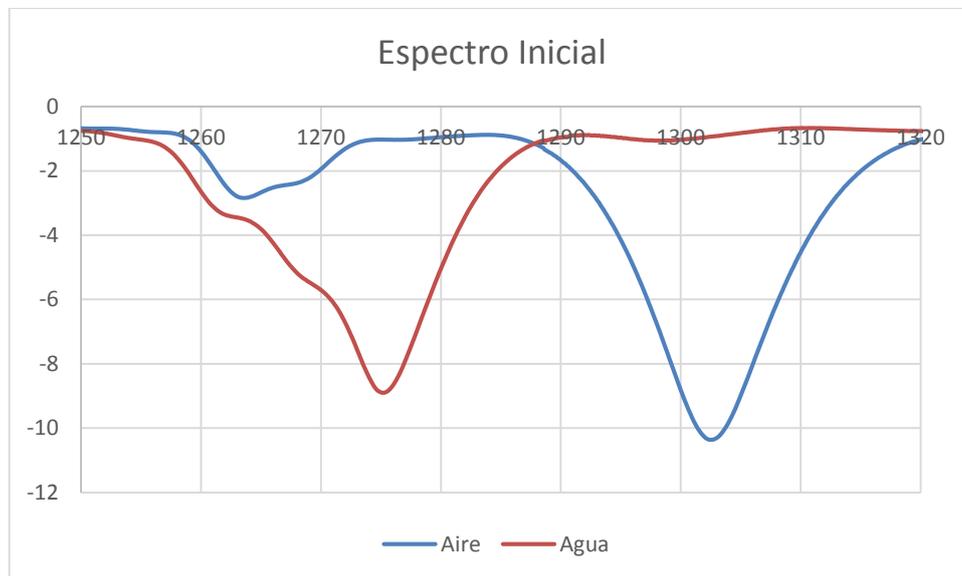
**4.2.15.1 Objetivo General:** *Modificar la respuesta óptica espectral de una LPG mediante el tratamiento de su recubrimiento.*

**4.2.15.2 Objetivo Específico 1:** *Analizar la respuesta espectral al aplicar un recubrimiento LbL con polímeros PAA-PAH.*

**4.2.15.3 Objetivo Específico 2:** *Observar el comportamiento de la LPG en otra ventana de trabajo diferente a la habitual.*

#### 4.2.15.4 Resultados

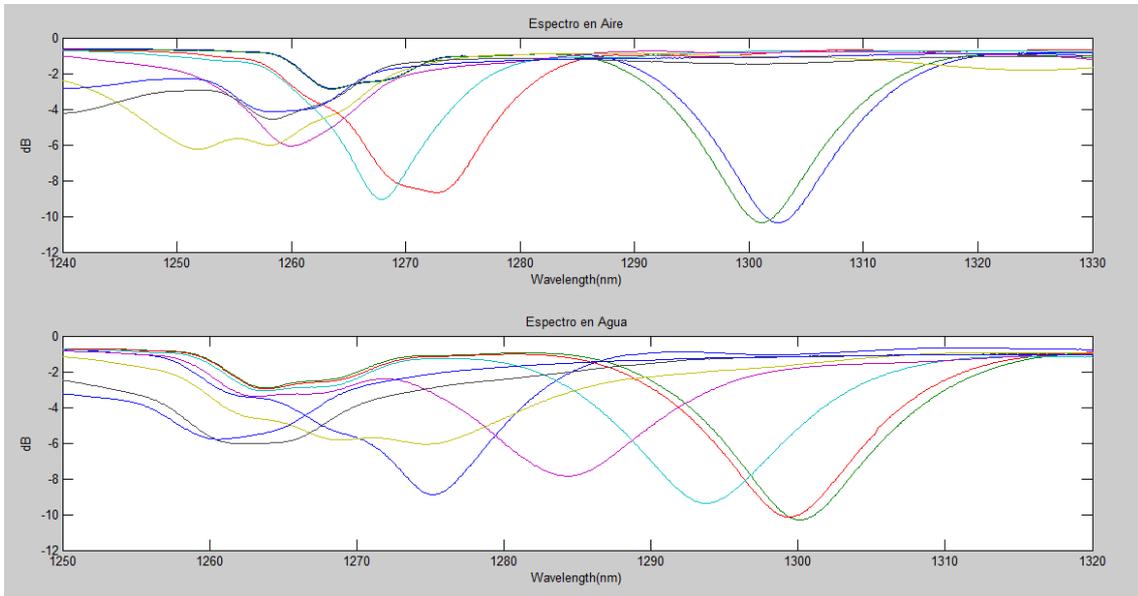
El punto de partida de este proceso de experimentación es obtener el perfil espectral de la LPG de trabajo **Figura 126**, para posteriormente realizar las pruebas y tratamientos que sean oportunos.



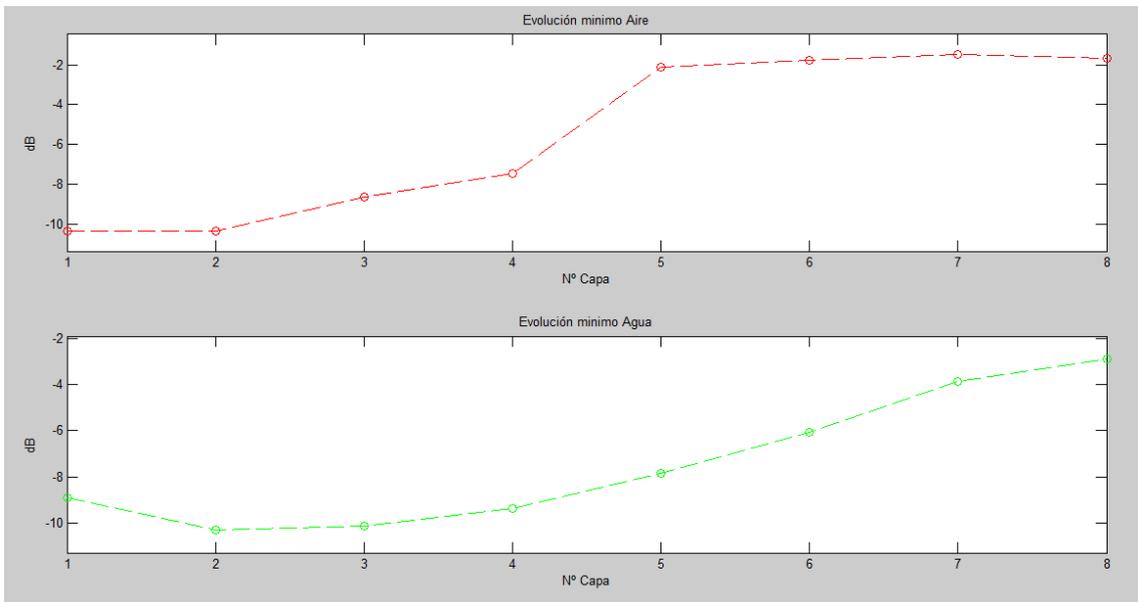
**Figura 126. Espectro Original LPG**

Como se puede observar en la figura anterior, tenemos una contribución no deseada en la banda [1260 1270] que afecte a nuestra construcción, dependiendo de la respuesta al proceso de construcción tendremos que intentar eliminarla de alguna manera.

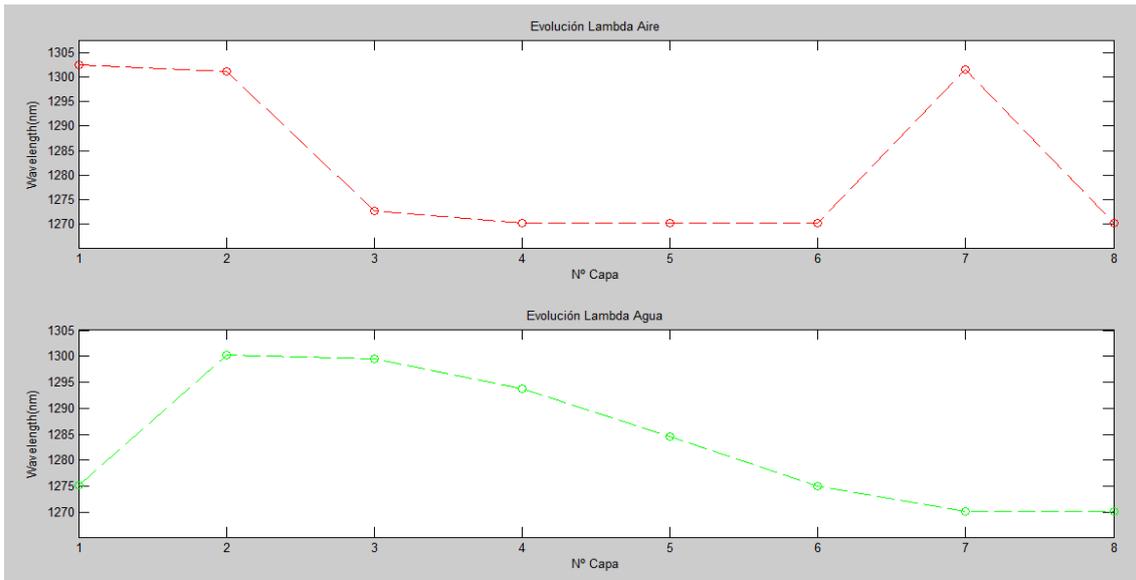
Se procede a realizar la deposición del polímero, se busca crear un recubrimiento polimérico mediante el sistema LbL con polímeros PAH-PAA con un PH 4.5. En este caso la construcción resulta bastante rápida y con solo 7 capas se empieza a desvanecer el pico. A continuación, se observa su evolución.



**Figura 127. Evolución espectro LPG-Aire, LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



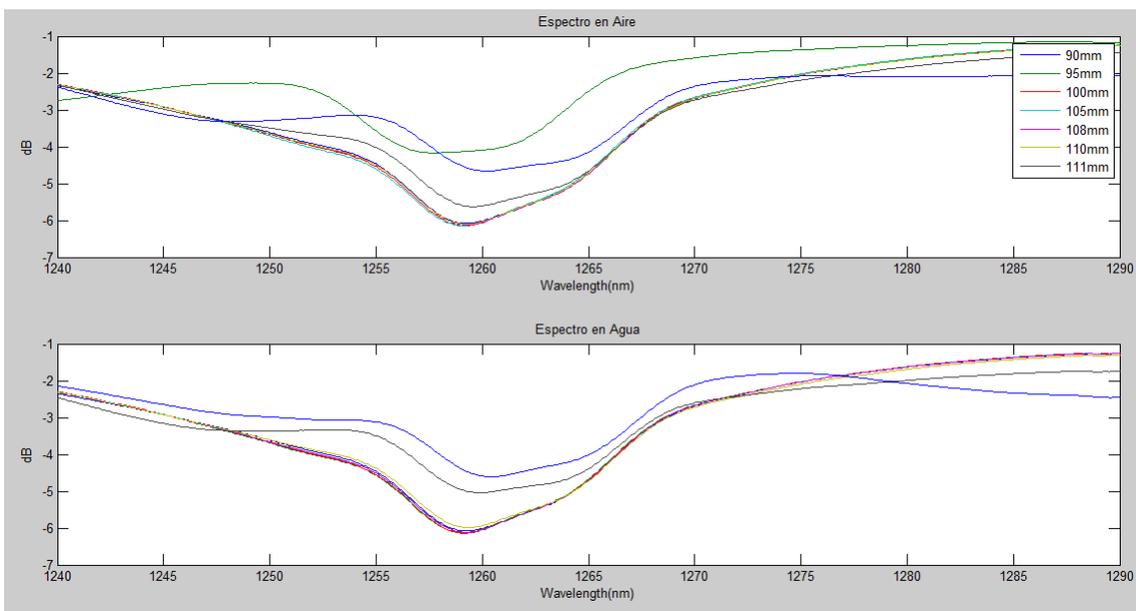
**Figura 128. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**



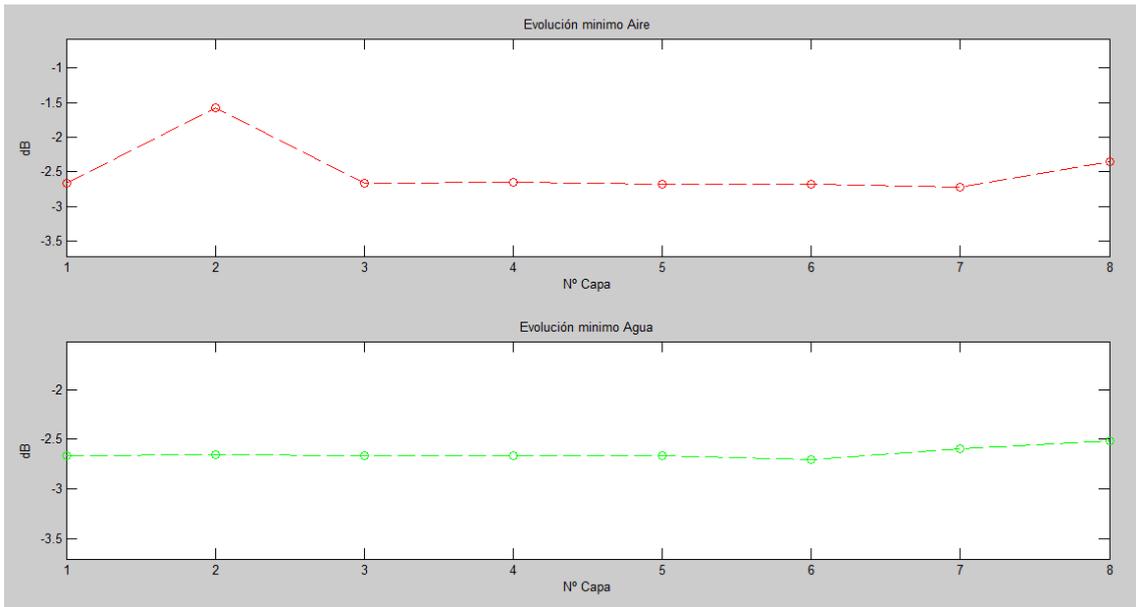
**Figura 29. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a las capas de recubrimiento**

Después de este primer paso se observa que la contribución no deseada que aparece en la banda de trabajo no se mueve con la construcción, con lo que podremos eliminarla mediante una interpolación en el rango 1260-1275nm en el primer espectro para aplicarlo a los espectros posteriores.

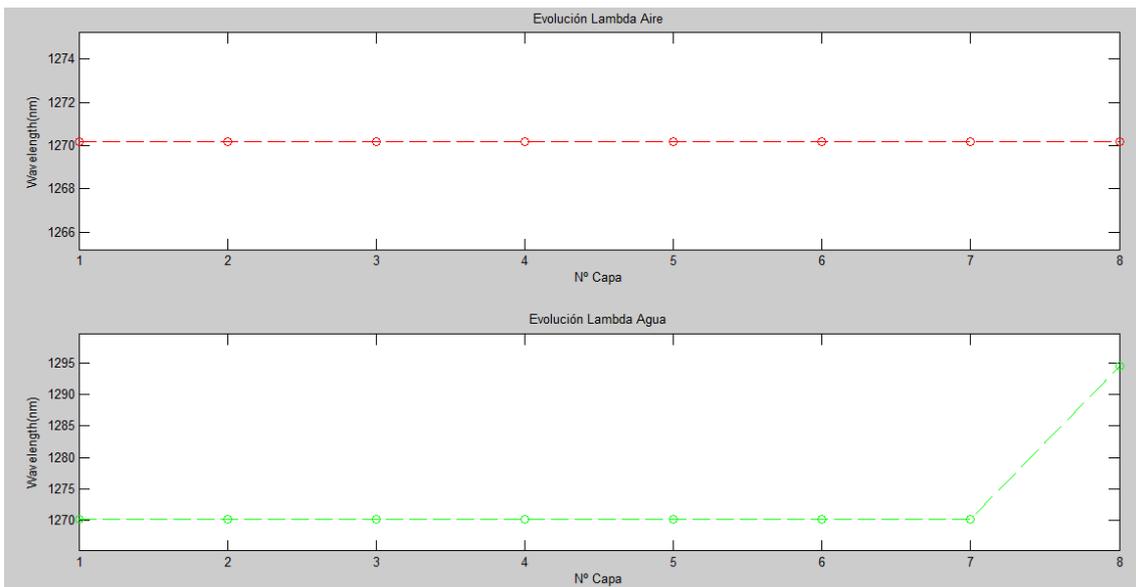
Realizamos un seguimiento a la retirada parcial del recubrimiento para observar su evolución, a diferencia del método usado en las anteriores pruebas, en este caso se realiza a mano para intentar controlar la agresividad de la solución piraña con el recubrimiento polimérico. Dicho progreso se observa en la **figura 129**. Siguiendo con el procedimiento realizado hasta ahora, realizamos una captura de la respuesta espectral tanto en aire como en agua.



**Figura 129. Evolución espectro LPG-Aire/Agua respecto a la retirada parcial del recubrimiento**



**Figura 130. Evolución Potencia del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a la retirada parcial del recubrimiento**



**Figura 131. Evolución Lambda del mínimo LPG-Aire y LPG-Agua respecto a la retirada parcial de recubrimiento.**

Como se puede observar en la evolución de los espectros en la retirada se hace obvio que hace aparición un ensanchamiento significativo en el pico de trabajo donde se pueden atisbar la contribución de los dos picos que estamos buscando, de hecho, podemos considerar que se trata de un desdoblamiento de picos.

Dado que esta prueba se ha realizado durante la última semana del proyecto, se ha procedido a realizar la batería de pruebas de cámara climática, pero al ser pruebas con una duración bastante considerables no ha sido posible obtener los resultados antes del cierre de esta memoria.

## 5 Conclusiones generales

Antes de construir una serie de conclusiones generales, se debe abordar una serie de conclusiones basadas en que LPG ha sido utilizada en las pruebas. Dicho esto, tenemos 4 bloques diferenciados que a continuación procederemos a analizar.

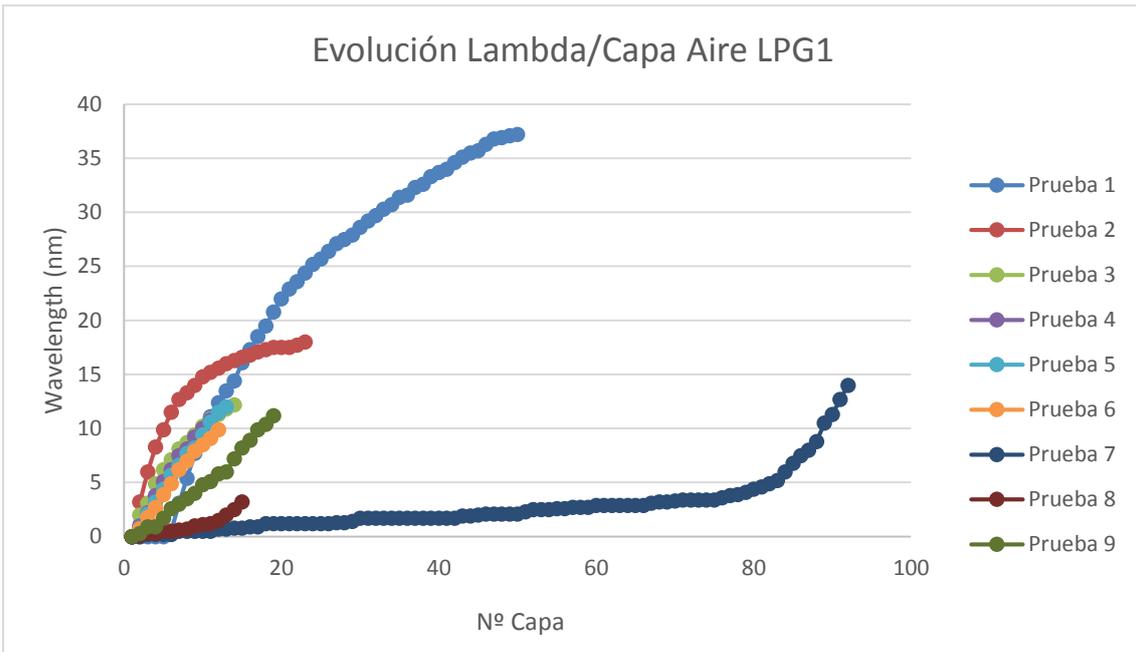
### 5.1 LPG 0

La principal conclusión de esta LPG es que con esta se ha producido un desdoblamiento de picos que ha permitido realizar un análisis y una serie de pruebas que han permitido la realización de una publicación. Dado que simplemente ha sido una colaboración como acercamiento a los procesos necesarios para el proyecto se han usado los datos, aunque no son propios y generados en el proyecto como prueba de funcionamiento de los algoritmos que se han generado a lo largo de las pruebas realizadas con unos resultados bastante óptimos. Salvo pequeños ajustes que siempre son necesarios la respuesta de dichos scripts ha resultado satisfactoria.

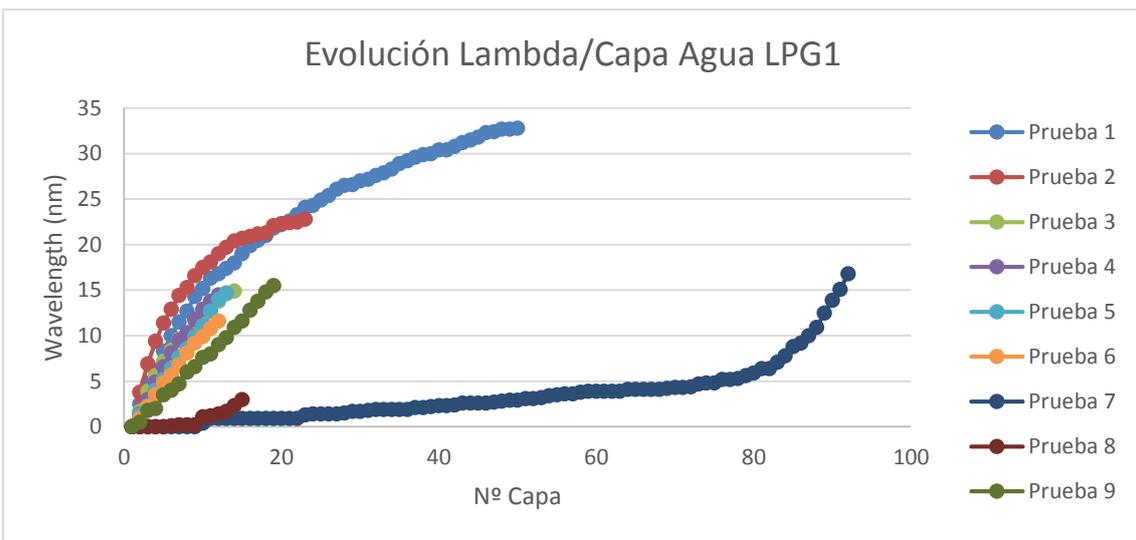
No se han realizado más pruebas con esta LPG debido a que resultó dañada al intentar replicar los resultados de la prueba anterior lo que la hizo inviable para seguir trabajando sobre ella.

### 5.2 LPG 1

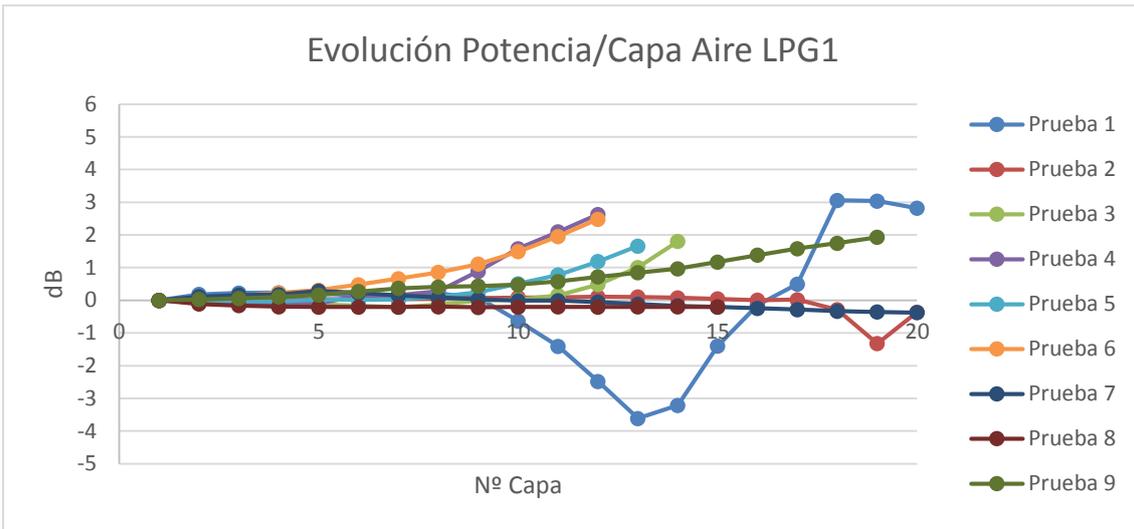
Este bloque ya incluye propiamente los datos generados por las pruebas experimentales programadas para el proyecto, a continuación, se muestra en las siguientes figuras la evolución de las diferentes construcciones en cuanto a el desplazamiento en frecuencia y la afectación que tiene la deposición de capas en la potencia resultante en el mínimo de la banda de trabajo.



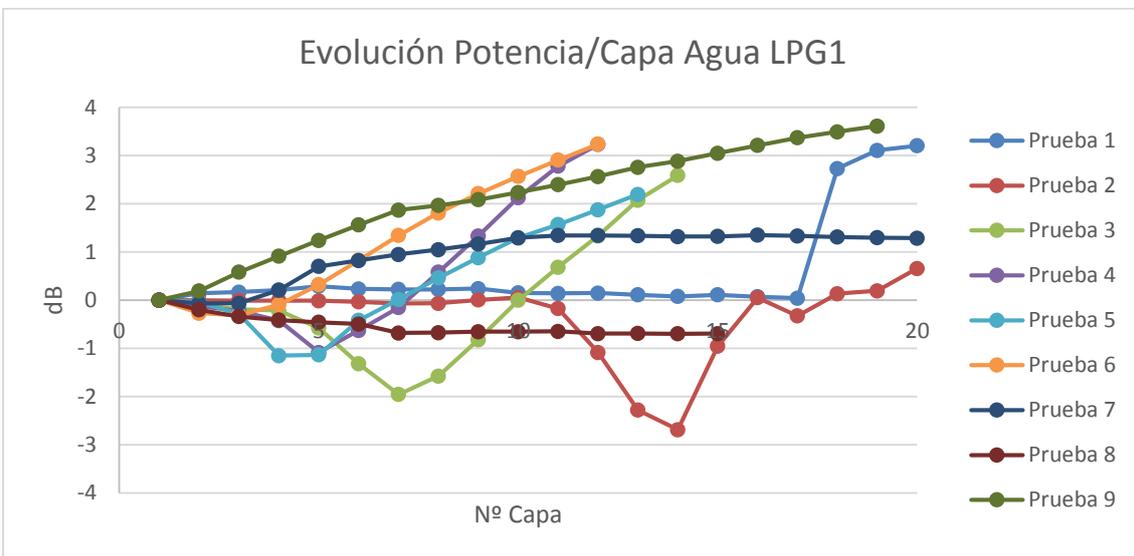
**Figura 132. Evolución Lambda/Capa en aire de la LPG1**



**Figura 133. Evolución Lambda/Capa en agua de la LPG1**



**Figura 134. Evolución Potencia/Capa en aire de la LPG1**



**Figura 135. Evolución Potencia/Capa en agua de la LPG1**

Una vez analizadas las gráficas anteriores podemos concluir que en cuanto a la evolución en  $\lambda$  respecto a las capas sigue una progresión bastante similar en la mayoría de construcciones a pesar de la diferencia en el número de capas depositadas, esto se debe a la imposibilidad de control total sobre este tipo de construcciones, dicha problemática esta explicada de manera más amplia en el apartado de limitaciones.

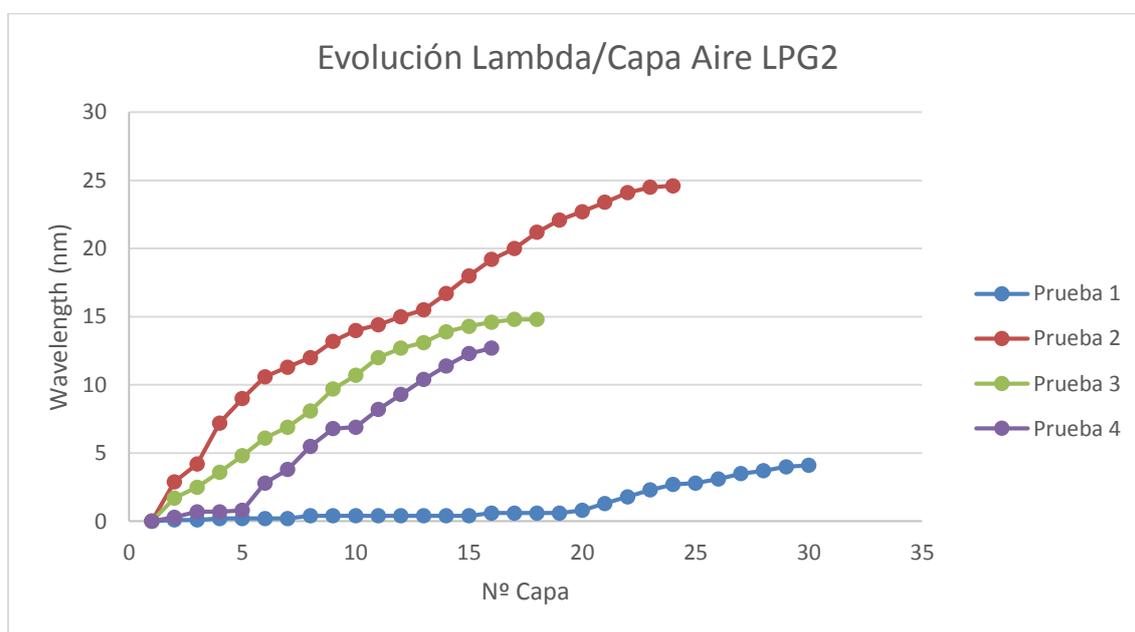
No se aprecian diferencias en el desplazamiento en valores absolutos entre la LPG en agua y en aire, situación esperada dado que la variación resultante del cambio de índice de refracción del agua con la fibra óptica.

En cuanto a los valores de potencia se observa que este es un parámetro más indefinido y que no sigue una progresión esperada, lo que nos indica que es un factor casi aleatorio y que varía en cada prueba.

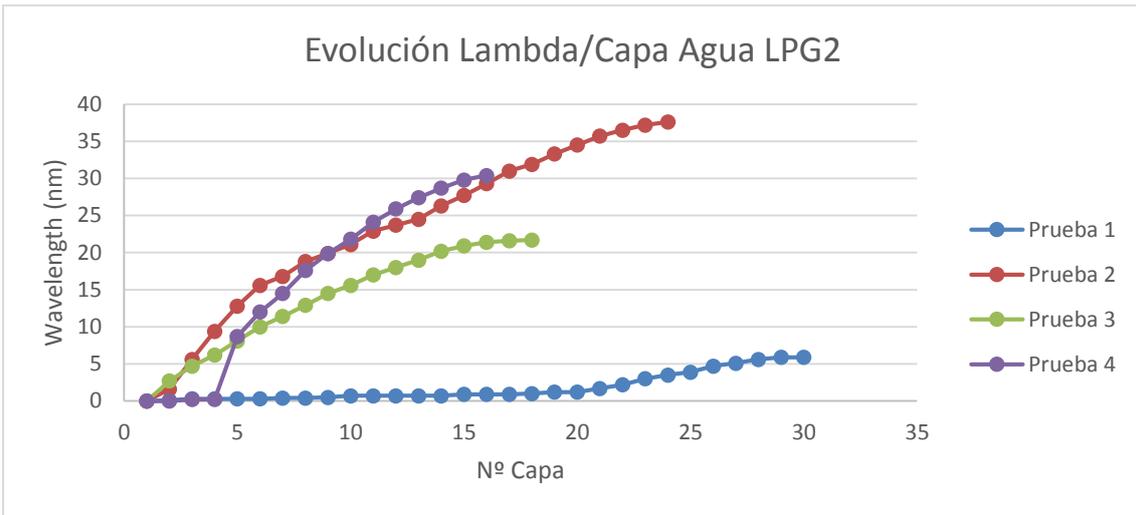
Como conclusión general de este bloque podemos inferir en cuanto al crecimiento podemos esperar una progresión ciertamente determinada, pero en cuanto a la potencia no tenemos una respuesta concreta. A pesar que estos resultados son positivos dado que sabemos cuál debe ser el comportamiento de la LPG en pruebas siguientes, el objetivo principal de lograr un desdoblamiento de los picos que componen el sistema no se ha conseguido. Visto los resultados de las diferentes pruebas podemos afirmar que el proceso de repetición de las pruebas afecta a la respuesta de la LPG, cada vez tiende a ser peor por lo que llegado a un punto las LPG de trabajo resultaran inviables para producir resultados concretos. Dada esta imposibilidad se ha decidido cambiar la LPG para continuar con las pruebas.

### 5.3 LPG 2

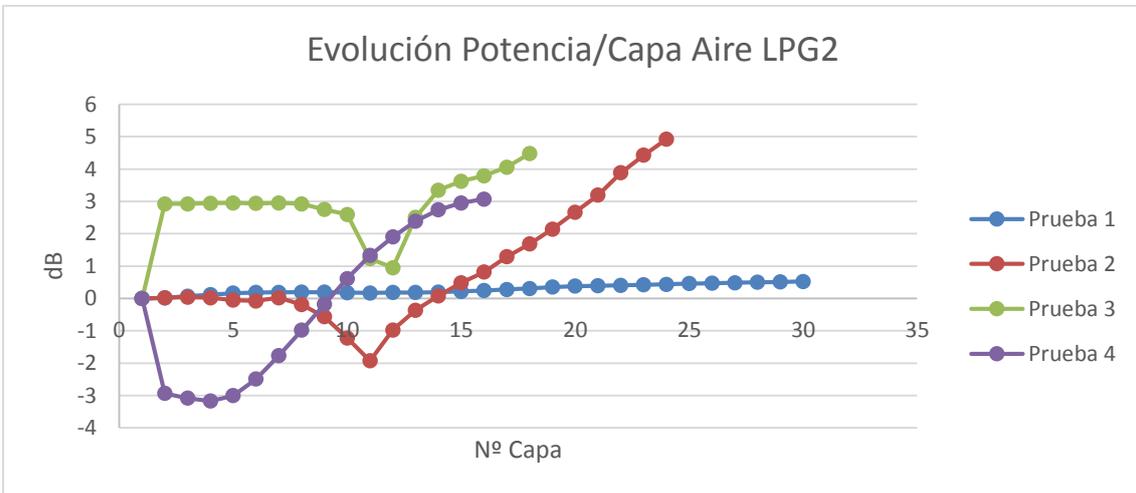
Continuando con el análisis de los resultados de las pruebas, obtenemos las siguientes figuras comparativas entre las diferentes pruebas que se han realizado.



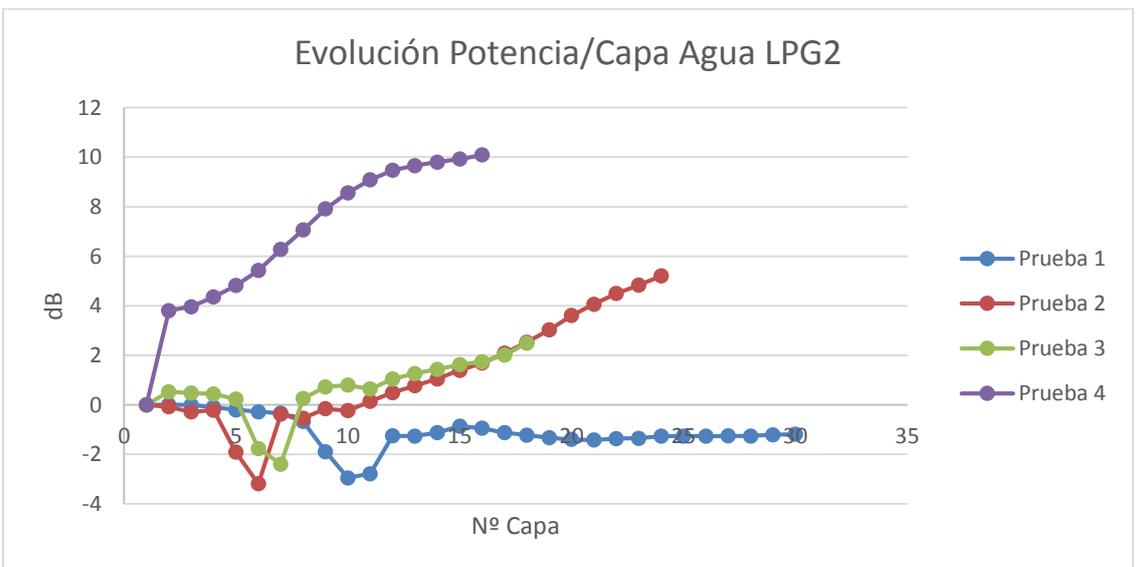
**Figura 136. Evolución Lambda/Capa en aire de la LPG1**



**Figura 137. Evolución Lambda/Capa en agua de la LPG1**



**Figura 138. Evolución Potencia/Capa en aire de la LPG1**



**Figura 139. Evolución Potencia/Capa en agua de la LPG1**

Como se puede observar en las figuras anteriores, las respuestas en cuanto al desplazamiento en  $\lambda$  mejoran sensiblemente respecto a la anterior LPG, lo que nos sirve de comprobación de cuanto afecta el proceso de repetición de las pruebas en la LPG, este es un factor más a tener en cuenta además de las propias singularidades de las LPG.

En cuanto a la evolución de la potencia las pruebas muestran una evolución de las pérdidas totalmente variable como era de esperar.

En las pruebas realizadas con esta LPG no se ha logrado realizar el desdoblamiento de picos a pesar de realizar un proceso constante durante todas las pruebas anteriores, tanto de la LPG1 como de la LPG2, de evolución y solución de posibles problemas que hayan podido afectar a las pruebas, pero aun así el desdoblamiento de picos sigue sin hacer su aparición.

A pesar de ser una LPG2 muy prometedora durante su manipulación para realizar una nueva prueba resulto rota la fibra por lo que se tuvo que desechar y buscar otra con la problemática que ello conlleva.

#### **5.4 LPG 3**

Como hemos podido observar, hemos conseguido obtener un desdoblamiento de picos, pero con ciertas características especiales. Por un parte se ha obtenido el desdoblamiento en una ventana de trabajo diferente a la habitual en la que se ha venido trabajando, esto se debe a la singularidad de la LPG. En este caso hablamos de la ventana [1230 1310] nm. Además de esta singularidad, hace aparición una contribución no deseada donde se ha logrado el desdoblamiento que debe ser eliminada mediante una interpolación. Este paso adicional implica un tratamiento de datos que hasta ahora no habíamos tenido que aplicar y por lo tanto ha generado que tengamos un análisis incompleto de la prueba.

Aun así, el hecho de la aparición de un desdoblamiento es la conclusión más importante y positiva que puede surgir de esta única prueba ya que a partir de este resultado se puede trabajar para encontrar un sensor temperatura-humedad relativa funcional.

#### **5.5 Conclusión General**

Se han podido obtener varias conclusiones del trabajo realizado durante este proyecto, no solo del objetivo principal del mismo, también de los procesos de trabajo en el laboratorio, las rutinas utilizadas para el tratamiento de los datos generados y otros datos que no son posibles de obtener sin una gran batería de pruebas.

La primera de ellas es que a pesar de lograr en la última prueba un desdoblamiento de pico, este ha aparecido en una banda que no ha sido la banda de trabajo habitual en la gran mayoría de pruebas, esto lo único que hace es demostrar que aún tenemos un gran desconocimiento sobre el comportamiento real de las LPG, a pesar que teóricamente dicho dispositivo debe comportarse de una manera concreta, los métodos de construcción, su composición y demás criterios físicos y químicos presentes en su construcción afectan en gran medida su respuesta, por lo que es ahora mismo imposible encontrar LPG con el misma respuesta espectral a pesar de tener las mismas directrices de construcción.

Si a esta conclusión inicial, le añadimos la incertidumbre generada por variables aleatorias que aparecen en el proceso casi parece una cuestión de azar obtener los resultados deseados y planteados en un principio como objetivos del proyecto.

A pesar de todos los contratiempos que han aparecido se ha demostrado que efectivamente el comportamiento que se ha buscado a lo largo de todas las pruebas y que es base del diseño del sensor temperatura-humedad relativa se puede conseguir por lo que no resulta una línea muerta. Aun así, cabe añadir el matiz que si bien se puede conseguir en estos momentos con los sistemas de construcción de LPG actuales y con los métodos de construcción polimérica y equipos disponibles en el laboratorio de trabajo resulta complicado tanto la aparición de estos resultados como la réplica de los ya aparecidos.

Por otra parte, se han cumplido otro tipo de objetivos como demostrar el óptimo funcionamiento de los algoritmos diseñados, que han permitido un análisis más ágil y eficaz de las diferentes pruebas, lo que redundará en la automatización y reducción de tiempos necesarios para realizar nuevos experimentos.

Además, debido al gran número de pruebas y a los constantes contratiempos se ha logrado concretas que tipo de procesos tales como la retirada parcial del recubrimiento resultan más eficaces a la hora de realizar este tipo de pruebas.

Como punto final, a pesar de no obtener un sensor dual temperatura-humedad relativa perfecto, puesto que aún falta trabajo y tiempo para lograr afinar este diseño. Sí que se han logrado LPG sensibles a la temperatura o a la humedad y esto ya de por sí constituyen un gran logro y un gran paso en esa dirección.

## 6 Limitaciones

Se conoce como limitación a la circunstancia o condición de algo o de alguien que limita, impide o dificulta su desarrollo. De este concepto y de su aparición en este proyecto se trata este apartado.

Se da el caso que durante la ejecución del presente proyecto se ha tenido que hacer frente a numerosas dificultades de las cuales se ha de dejar constancia pues son una variable más del desarrollo científico.

Las primeras limitaciones que han aparecido a la hora de desarrollar este sensor son las básicas barreras de limitación de equipos, en el caso que corresponde a este proyecto la necesidad de uso de equipos tales como el analizador de espectros óptico, el robot 3D o la cámara climática han supuesto un reto debido a la limitada disponibilidad que presenta la necesidad de hacer uso de todos ellos de manera simultánea. Esto ha generado que esto sea un cuello de botella importante que a pesar de no ser definitivo limita en gran medida la realización de pruebas que son la base final sobre las que se ha de construir el resultado final sea cual sea el objetivo.

Independientemente de estas limitaciones técnicas, hacen aparición otro tipo de limitaciones más relacionadas con el proceso, componentes y métodos, que son los pilares del proyecto sobre los que se construye el objetivo de encontrar un sensor dual temperatura-humedad relativa.

El primero de ellos y se podría decir sin error alguno es la limitación que genera la falta de mercado de las LPG, estas ahora mismo se limitan a ser herramientas de trabajos científicos, aún no es un dispositivo importante como para que exista una oferta comercial de estos lo que hace que no se puedan conseguir con facilidad. En el caso particular de este proyecto las LPG se han conseguido mediante un convenio existente con la Universidad de Valencia que permite tener algunas a disposición de la investigación puesto que la UPNA no tiene posibilidad de fabricarlas.

La fabricación de estas fibras es otra limitación dado que a pesar que se han fabricado varias LPG's con los mismos parámetros de longitud de onda y periodicidad, el resultado es que en la comparación de los espectros de todas resultan en perfiles espectrales similares, pero no iguales. Esto es una limitación enorme cuando estas basando todo el trabajo en la correlación de la respuesta de la LPG a ciertos factores externos que generan una respuesta particular, por tanto, solo podremos aproximar las respuestas de una LPG a otra teniendo en cuenta que cada una es única.

Las contribuciones que se ven reflejadas en los perfiles espectrales no solo son consecuencia del diseño físico de la LPG. Esto es un parámetro que debemos

tener muy en cuenta y no hace más que añadir variables que en cierta medida no se pueden controlar. Cuando hablamos de estas contribuciones podemos hablar de pérdidas en los conectores, tensiones o dobleces [8] que afecten a la respuesta de la LPG o la misma disposición de la fibra en su holder afectan en mayor o menor medida en su respuesta.

Si a estas contribuciones físicas propiamente dichas de la LPG, añadimos variables que no se pueden controlar en el proceso a la que será sometido el dispositivo obtenemos muchas variables que no son controlables.

Estas variables del proceso son incontrolables debido a las limitaciones técnicas que presentan el entorno de trabajo, tales como la imposibilidad de monitorizar ni mantener una temperatura constante que influye en procesos como el LbL. La temperatura ambiente es otro factor que no es controlable en el caso de este proyecto y que afectan en gran medida a la construcción de las capas poliméricas que conforman el recubrimiento.

Por último como limitante en el protocolo de pruebas que se ha usado para realizar la totalidad de los experimentos ha sido la falta de control a la hora de retirar el recubrimiento mediante solución piraña, el efecto de capilaridad no es absoluto despreciable y a pesar de realizar un tratamiento de curado para asegurar la integridad del recubrimiento polimérico ha sido imposible tener una certeza total en que el segmento que se ha propuesto retirar es el que en realidad se ha retirado.

La conclusión general de este apartado no debe ser una suma múltiple de limitaciones en el desarrollo de este proyecto, si no la capacidad que ha sido necesaria para ir poco a poco superando todos estos pequeños obstáculos que no son otra cosa que peldaños que se han de escalar en el pos del desarrollo científico. Teniendo en cuenta que este es el fin último del trabajo científico y en general todos los proyectos de investigación. Peldaños que no han hecho más que retar a la creatividad, paciencia y trabajo para lograr su solución.

## **7 Anexos**

### **7.1.4 Algoritmos Matlab**

Debido a que durante las pruebas experimentales que se han realizado se ha generado una cantidad ingente de datos. Esto hace patente la necesidad de configurar un objetivo secundario al proyecto, este objetivo no es otro que generar las herramientas necesarias para hacer un análisis más eficiente de dichos datos.

Con este objetivo de partida se ha hecho uso de la plataforma de análisis números Matlab para desarrollar una serie de scripts y algoritmos que permitan este análisis eficiente de los datos.

Se han desarrollado principalmente 4 algoritmos que abarcan todo el proceso experimental que va desde el recubrimiento polimérico, la retirada parcial de dicho recubrimiento y las pruebas de humedad y temperatura posteriores a esta retirada.

A continuación, se muestra el código que se ha programado en Matlab:

**Algoritmo construcción del recubrimiento:** Mediante este algoritmo analizamos los espectros obtenidos durante el proceso de deposición del recubrimiento polimérico, se ha capturado por cada capa un espectro en aire y otro en agua. En los datos generados no existe diferenciación entre agua o aire, ni la ventana de trabajo ni otro tipo de variables a tener en cuenta a la hora de analizar por lo que es el primer paso. Posteriormente todos estos datos se convierten en los espectros en la ventana de trabajo, y las comparaciones de desplazamiento  $\lambda$  y potencia tanto en agua como en aire que se muestran en los análisis realizados.

```
close all;
clear all;
load('Building_X_0.mat'); %Cargamos el archivo
generado por el OSA

for i=1:(numero_espectros + 1)
    spectrum_OSA(:,i)=SPECTRA(1,:,i)-REF;
end

j=1;
for i=1:2:(numero_espectros + 1)
    spectrum_OSA_Aire(:,j)=spectrum_OSA(:,i);
    spectrum_OSA_Agua(:,j)=spectrum_OSA(:,i+1);
    j=j+1;
end

% -----
% -----

% Deteccion Potencia Minimos

winX1 = find(ejeX==1500);
winX2 = find(ejeX==1580);

winAir = spectrum_OSA_Aire(winX1:winX2,:);
winAgua = spectrum_OSA_Agua(winX1:winX2,:);
```

```

k1 = size(winAir);
k2 = size(winAgua);
y1 = k1(1,2);
y2 = k2(1,2);
MinimoAire = ones(y1,1);
LambdaAire = ones(y1,1);
MinimoAgua = ones(y2,1);
LambdaAgua = ones(y2,1);

n1 = 1;
while n1 <= y1
    aux1 = min(winAir(:,n1));
    k1 = find(winAir(:,n1)==aux1);
    LambdaAire(n1,1) = ejeX(1,k1+winX1);
    MinimoAire(n1,1) = aux1;
    n1 = n1 + 1;
end;

n2 = 1;
while n2 <= y2
    aux2 = min(winAgua(:,n2));
    k2 = find(winAgua(:,n2)==aux2);
    LambdaAgua(n2,1) = ejeX(1,k2+winX1);
    MinimoAgua(n2,1) = aux2;
    n2 = n2 + 1;
end;

%-----
%-----
%Ajuste automatico de los limites x e y para las
graficas.

aux3 = min(MinimoAire(:,1)) - 1;
aux4 = max(MinimoAire(:,1)) + 1;
aux5 = min(MinimoAgua(:,1)) - 1;
aux6 = max(MinimoAgua(:,1)) + 1;
aux7 = min(LambdaAire(:,1)) - 5;
aux8 = max(LambdaAire(:,1)) + 5;
aux9 = min(LambdaAgua(:,1)) - 5;
aux10 = max(LambdaAgua(:,1)) + 5;

% Grafica Espectros

figure
subplot(2,1,1);
plot(ejeX,spectrum_OSA_Aire);

```

```

xlim([1500 1580]);
title('Espectro en Aire');
xlabel('Wavelength(nm)');
ylabel('dB');

subplot(2,1,2);
plot(ejeX,spectrum_OSA_Agua);
xlim([1500 1580]);
title('Espectro en Agua');
xlabel('Wavelength(nm)');
ylabel('dB');

% Grafica dB/Capa

figure
subplot(2,1,1);
plot(MinimoAire,'r--o');
ylim([aux3 aux4]);
title('Evolución minimo Aire');
xlabel('N° Capa');
ylabel('dB');

subplot(2,1,2);
plot(MinimoAgua,'g--o');
ylim([aux5 aux6]);
title('Evolución minimo Agua');
xlabel('N° Capa');
ylabel('dB');

% Grafica Lambda/Capa

figure
subplot(2,1,1);
plot(LambdaAire,'r--o');
ylim([aux7 aux8]);
title('Evolución Lambda Aire');
xlabel('N° Capa');
ylabel('Wavelength(nm)');

subplot(2,1,2);
plot(LambdaAgua,'g--o');
ylim([aux9 aux10]);
title('Evolución Lambda Agua');
xlabel('N° Capa');
ylabel('Wavelength(nm)');

```

```
% -----  
-----
```

**Algoritmo para la retirada parcial del recubrimiento:** este algoritmo sigue la misma dinámica que el anterior, salvo que la diferencia en este aparece en que cada espectro se corresponde con un paso en la retirada parcial. Hay que diferenciar que espectros pertenecen a que paso para luego obtener las variables que nos muestran el impacto del proceso en el espectro óptico.

```
close all;  
clear all;  
load('RetiradaBuildingV_0.mat'); %Cargamos los  
datos generado por el OSA  
  
for i=1:(numero_espectros + 1)  
    spectrum_OSA(:,i)=SPECTRA(1,:,i)-REF;  
end  
  
j=1;  
for i=1:2:(numero_espectros + 1)  
    spectrum_OSA_Aire(:,j)=spectrum_OSA(:,i);  
    spectrum_OSA_Agua(:,j)=spectrum_OSA(:,i+1);  
    j=j+1;  
end  
  
% -----  
-----  
  
% Deteccion Potencia Minimos  
  
winX1 = find(ejeX==1500);  
winX2 = find(ejeX==1580);  
  
winAir = spectrum_OSA_Aire(winX1:winX2,:);  
winAgua = spectrum_OSA_Agua(winX1:winX2,:);  
  
k1 = size(winAir);  
k2 = size(winAgua);  
y1 = k1(1,2);  
y2 = k2(1,2);  
MinimoAire = ones(y1,1);  
LambdaAire = ones(y1,1);  
MinimoAgua = ones(y2,1);
```

```

LambdaAgua = ones(y2,1);

n1 = 1;
while n1 <= y1
    aux1 = min(winAir(:,n1));
    k1 = find(winAir(:,n1)==aux1);
    LambdaAire(n1,1) = ejeX(1,k1+winX1);
    MinimoAire(n1,1) = aux1;
    n1 = n1 + 1;
end;

n2 = 1;
while n2 <= y2
    aux2 = min(winAgua(:,n2));
    k2 = find(winAgua(:,n2)==aux2);
    LambdaAgua(n2,1) = ejeX(1,k2+winX1);
    MinimoAgua(n2,1) = aux2;
    n2 = n2 + 1;
end;

%Ajuste automatico de ejes x e y para graficas

aux3 = min(MinimoAire(:,1)) - 1;
aux4 = max(MinimoAire(:,1)) + 1;
aux5 = min(MinimoAgua(:,1)) - 1;
aux6 = max(MinimoAgua(:,1)) + 1;
aux7 = min(LambdaAire(:,1)) - 5;
aux8 = max(LambdaAire(:,1)) + 5;
aux9 = min(LambdaAgua(:,1)) - 5;
aux10 = max(LambdaAgua(:,1)) + 5;

% Grafica Espectros/pasos de retirada

figure
subplot(2,1,1);
plot(ejeX,spectrum_OSA_Aire);
xlim([1500 1580]);
title('Espectro en Aire');
xlabel('Wavelength (nm)');
ylabel('dB');
legend('90mm', '95mm', '100mm', '105mm', '108mm', '110
mm', '111mm');

subplot(2,1,2);
plot(ejeX,spectrum_OSA_Agua);
xlim([1500 1580]);
title('Espectro en Agua');

```

```

xlabel('Wavelength(nm)');
ylabel('dB');

% Grafica dB/Capa

figure
subplot(2,1,1);
plot(MinimoAire,'r--o');
ylim([aux3 aux4]);
title('Evolución minimo Aire');
xlabel('N° Capa');
ylabel('dB');

subplot(2,1,2);
plot(MinimoAgua,'g--o');
ylim([aux5 aux6]);
title('Evolución minimo Agua');
xlabel('N° Capa');
ylabel('dB');

% Grafica Lambda/Capa

figure
subplot(2,1,1);
plot(LambdaAire,'r--o');
ylim([aux7 aux8]);
title('Evolución Lambda Aire');
xlabel('N° Capa');
ylabel('Wavelength(nm)');

subplot(2,1,2);
plot(LambdaAgua,'g--o');
ylim([aux9 aux10]);
title('Evolución Lambda Agua');
xlabel('N° Capa');
ylabel('Wavelength(nm)');

% -----
-----

```



```

for i=1:10:num_spectros
    spectrum_OSA_Diez(:,n)=SPECTRA(1,:,i)-REF;
    n = n + 1;
end

%-----
-----

% Comparaciones entre Datos CC y OSA

% Marcas de Tiempo CC

n = 1;
TimeCC = ones(length(Col_t),1);
day = 0;
hour = 0;
minute = 0;
seg = 0;
for i=1:length(Col_t);
    x = Col_t(n,1);
    var1 = floor(x/10000000000);
    var2 = floor(x/100000000);
    var3 = floor(x/1000000);
    y = mod(x,1000000);
    var4 = floor(y/10000);
    var5 = fix(y/100);
    var6 = floor(y/1);
    YY = var1;
    MM = var2 - (YY *100);
    DD = var3 - (YY*10000)-(MM*100);
    hh = var4;
    mm = var5 - (hh*100);
    ss = var6 - (hh*10000) - (mm*100);
    var7 = [YY MM DD hh mm ss];
    if n == 1;
        Time = [YY MM DD hh mm ss];
        TimeCC(n,1) = 0;
        n = n + 1;
    else
        Time = vertcat(Time, var7);
        if Time(n,3)~= Time(n-1,3)
            day = day + 1;
        end
        if Time(n,4)~= Time(n-1,4)
            hour = hour + 1;
        end
        if Time(n,5)~= Time(n-1,5)

```

```

        minute = minute + 1;
    end
    offseg = Time(1,6);
    seg = Time(n,6);

    TimeCC(n,1) = (minute*60) + (seg-
offseg);

    n = n + 1;
end
end

% Marcas de tiempos del OSA

n = 1;
t_OSA = transpose(RELOJ);
TimeOSA = ones(length(RELOJ),1);
dayOSA = 0;
hourOSA = 0;
minuteOSA = 0;
segOSA = 0;
for i=1:length(RELOJ);
    if i == 1;
        TimeOSA(n,1) = 0;
    else
        if t_OSA(i,3) ~= t_OSA(i-1,3)
            dayOSA = dayOSA + 1;
        end
        if t_OSA(i,4) ~= t_OSA(i-1,4)
            hourOSA = hourOSA + 1;
        end
        if t_OSA(i,5) ~= t_OSA(i-1,5)
            if t_OSA(i,5) < t_OSA(i-1,5)
                minuteOSA = minuteOSA + 2;
            else
                diff = t_OSA(i,5) - t_OSA(i-1,5);
                minuteOSA = minuteOSA + diff;
            end
        end
        offsegOSA = t_OSA(1,6);
        segOSA = t_OSA(i,6);

        TimeOSA(i,1) = (minuteOSA*60) +
(segOSA-offsegOSA);
    end
end
end

```

```

% Diezmado del vector de tiempos
for i=1:10:length(TimeOSA)
    TimeOSA_Diez(n,1)= TimeOSA(i,1);
    n = n + 1;
end

% figure
% plot(Temp_cc_minutos)
% figure
% plot(HR_cc_minutos)

winX1 = find(ejeX==1500);
winX2 = find(ejeX==1580);

win = spectrum_OSA(winX1:winX2,:);
winDiez = spectrum_OSA_Diez(winX1:winX2,:);

k1 = size(win);
k2 = size(winDiez);
y1 = k1(1,2);
y2 = k2(1,2);
MinimoAire = ones(y1,1);
LambdaAire = ones(y1,1);
MinimoDiez = ones(y2,1);
LambdaDiez = ones(y2,1);
n1 = 1;

while n1 <= y1
    aux1 = min(win(:,n1));
    k1 = find(win(:,n1)==aux1);
    LambdaAire(n1,1) = ejeX(1,k1+winX1);
    MinimoAire(n1,1) = aux1;
    n1 = n1 + 1;
end;
n2 = 1;
while n2 <= y2
    aux2 = min(winDiez(:,n2));
    k2 = find(winDiez(:,n2)==aux2);
    LambdaDiez(n2,1) = ejeX(1,k2+winX1);
    MinimoDiez(n2,1) = aux2;
    n2 = n2 + 1;
end;

%Ajuste automatico de ejes x e y para graficas

aux3 = min(MinimoAire(:,1)) - 1;
aux4 = max(MinimoAire(:,1)) + 1;

```

```

aux5 = min(MinimoDiez(:,1)) - 1;
aux6 = max(MinimoDiez(:,1)) + 1;
aux7 = min(LambdaAire(:,1)) - 5;
aux8 = max(LambdaAire(:,1)) + 5;
aux9 = min(LambdaDiez(:,1)) - 5;
aux10 = max(LambdaDiez(:,1)) + 5;

% Grafica dB/Espectro

figure
% subplot(2,1,1);
% plot(TimeOSA(1:num_spectros),MinimoAire,'r .');
% ylim([aux3 aux4]);
% title('Evolución Minimo Espectro');
% xlabel('Time(s)');
% ylabel('dB');

subplot(2,1,1);
plot(TimeOSA_Diez,MinimoDiez,'r. ');
ylim([aux5 aux6]);
xlim([0 80000]);
title('Evolución Minimo Diezmado');
xlabel('Time(s)');
ylabel('dB');

subplot(2,1,2);
plot(TimeOSA_Diez,LambdaDiez,'g. ');
ylim([aux9 aux10]);
xlim([0 80000]);
title('Evolución Lambda Diezmado');
xlabel('Time(s)');
ylabel('Wavelength(nm)');

% Grafica Lambda/Espectro

% figure
% subplot(2,1,1);
% plot(TimeOSA(1:num_spectros),LambdaAire,'r .');
% ylim([aux7 aux8]);
% title('Evolución Lambda Espectro');
% xlabel('Time(s)');
% ylabel('Wavelength(nm)');
%
% subplot(2,1,2);
% plot(TimeOSA_Diez,LambdaDiez,'g. ');
% ylim([aux9 aux10]);
% title('Evolución Lambda Diezmado');

```

```

% xlabel('Time(s)');
% ylabel('Wavelength(nm)');

% Grafica Minimo Espectro/Temperatura

figure
subplot(2,1,1);
plot(TimeCC,Col_T_real,'r .');
% ylim([1530 1550]);
xlim([0 80000]);
title('Evolución Perfil Temperatura CC');
xlabel('Time(s)');
ylabel('Temperatura(°C)');

subplot(2,1,2);
plot(TimeOSA(1:num_spectros),MinimoAire,'g. ');
ylim([aux3 aux4]);
xlim([0 80000]);
title('Evolución Minimo Espectro');
xlabel('Time(s)');
ylabel('dB');

% Grafica Desplazamiento Lambda/Temperatura

figure
subplot(2,1,1);
plot(TimeCC,Col_T_real,'r .');
% ylim([1530 1550]);
xlim([0 80000]);
title('Evolución Perfil Temperatura CC');
xlabel('Time(s)');
ylabel('Temperatura(°C)');

subplot(2,1,2);
plot(TimeOSA(1:num_spectros),LambdaAire,'g. ');
ylim([1510 1545]);
xlim([0 80000]);
title('Evolución Lambda');
xlabel('Time(s)');
ylabel('Wavelength(nm)');

```



```

n=1;
for i=1:10:num_spectros
    spectrum_OSA_Diez(:,n)=SPECTRA(1, :, i)-REF;
    n = n + 1;
end

%-----
%-----

% Comparaciones entre Datos CC y OSA

% Marcas de Tiempo CC

n = 1;
TimeCC = ones(length(Col_t),1);
day = 0;
hour = 0;
minute = 0;
seg = 0;
for i=1:length(Col_t);
    x = Col_t(n,1);
    var1 = floor(x/10000000000);
    var2 = floor(x/100000000);
    var3 = floor(x/1000000);
    y = mod(x,1000000);
    var4 = floor(y/10000);
    var5 = floor(y/100);
    var6 = floor(y/1);
    YY = var1;
    MM = var2 - (YY *100);
    DD = var3 - (YY*10000)-(MM*100);
    hh = var4;
    mm = var5 - (hh*100);
    ss = var6 - (hh*10000) - (mm*100);
    var7 = [YY MM DD hh mm ss];
    if n == 1;
        Time = [YY MM DD hh mm ss];
        TimeCC(n,1) = 0;
        n = n + 1;
    else
        Time = vertcat(Time, var7);
        if Time(n,3)~= Time(n-1,3)
            day = day + 1;
        end
        if Time(n,4)~= Time(n-1,4)
            hour = hour + 1;
        end
    end
end

```

```

        end
        if Time(n,5)~= Time(n-1,5)
            minute = minute + 1;
        end
        offseg = Time(1,6);
        seg = Time(n,6);

        TimeCC(n,1)      =(minute*60)+      (seg-
offseg);

        n = n + 1;
    end
end

% Marcas de tiempos del OSA

n = 1;
t_OSA = transpose(RELOJ);
TimeOSA = ones(length(RELOJ),1);
dayOSA = 0;
hourOSA = 0;
minuteOSA = 0;
segOSA = 0;
for i=1:length(RELOJ);
    if i == 1;
        TimeOSA(n,1) = 0;
    else
        if t_OSA(i,3)~= t_OSA(i-1,3)
            dayOSA = dayOSA + 1;
        end
        if t_OSA(i,4)~= t_OSA(i-1,4)
            hourOSA = hourOSA + 1;
        end
        if t_OSA(i,5)~= t_OSA(i-1,5)
            if t_OSA(i,5) < t_OSA(i-1,5)
                minuteOSA = minuteOSA + 2;
            else
                diff = t_OSA(i,5)- t_OSA(i-1,5);
                minuteOSA = minuteOSA + diff;
            end
        end
        offsegOSA = t_OSA(1,6);
        segOSA = t_OSA(i,6);

        TimeOSA(i,1)      =(minuteOSA*60)+
(segOSA-offsegOSA);
    end
end

```

```

end

for i=1:10:length(TimeOSA)
    TimeOSA_Diez(n,1)= TimeOSA(i,1);
    n = n + 1;
end

% Obtencion de valores minimos de potencia y
desplazamiento lambda

winX1 = find(ejeX==1500);
winX2 = find(ejeX==1580);

win = spectrum_OSA(winX1:winX2,:);
winDiez = spectrum_OSA_Diez(winX1:winX2,:);

k1 = size(win);
k2 = size(winDiez);
y1 = k1(1,2);
y2 = k2(1,2);
MinimoAire = ones(y1,1);
LambdaAire = ones(y1,1);
MinimoAireDiez = ones(y2,1);
LambdaAireDiez = ones(y2,1);
n1 = 1;

while n1 <= y1
    aux1 = min(win(:,n1));
    k1 = find(win(:,n1)==aux1);
    LambdaAire(n1,1) = ejeX(1,k1+winX1);
    MinimoAire(n1,1) = aux1;
    n1 = n1 + 1;
end;
n2 = 1;

while n2 <= y2
    aux2 = min(winDiez(:,n2));
    k2 = find(winDiez(:,n2)==aux2);
    LambdaAireDiez(n2,1) = ejeX(1,k2+winX1);
    MinimoAireDiez(n2,1) = aux2;
    n2 = n2 + 1;
end;

% Detecccion de Picos

% Picos Humedad Relativa

```

```

Col_HR_reall = smooth(Col_HR_real);
[peak_value1,          peak_location1]          =
findpeaks(Col_HR_reall, 'minpeakheight', 78, 'minpea
kdistance', 1000);

% Picos Potencia Minima
[peak_value2,          peak_location2]          =
findpeaks(MinimoAire, 'minpeakheight', -
5.9, 'minpeakdistance', 50);
Offset = ones(length(peak_value1)-1, 2);

y3=length(peak_value1)-1;

for n3=1:y3
    PeakCC1 = TimeCC(peak_location1(n3,1), 1);
    PeakCC2
    =
TimeCC(peak_location1(n3+1,1), 1);
    PeakCC = PeakCC2 - PeakCC1;
    Offset(n3,1) = PeakCC;
    PeakOSA1
    =
TimeOSA(peak_location2(n3,1), 1);
    PeakOSA2
    =
TimeOSA(peak_location2(n3+1,1), 1);
    PeakOSA = PeakOSA2 - PeakOSA1;
    Offset(n3,2) = PeakOSA;
end;

%Ratio vectores de tiempos OSA/CC

TimeCC_Adj = TimeCC;
Ratio = ones(length(Offset), 1);
for i=1:length(Offset)
    Ratio(i,1) = Offset(i,2)/Offset(i/1);
    for l=peak_location1(1):peak_location1(2);
        TimeCC_Adj(l,1) = TimeCC(l,1)*Ratio(i,1);
    end
end

%Ajuste Segmentos

winIntCC1 = peak_location1(2,1);
winIntCC2 = peak_location1(3,1);
% winIntCC3 = find(TimeCC==peak_location1(4,1));

winIntOSA1 = peak_location2(2,1);
winIntOSA2 = peak_location2(3,1);

```

```

%                               winIntOSA3                               =
find(TimeOSA==peak_location2(4,1));

Offset(2,1) = PeakCC;
winIntCC1 = winIntCC1+1;

winIntCC = Col_HR_real(winIntCC1:winIntCC2,1);
winIntCC_Time = (TimeCC(winIntCC1:winIntCC2,1) -
TimeCC(winIntCC1));
winIntOSA = MinimoAire(winIntOSA1:winIntOSA2,1);
winIntOSA_Time =
(TimeOSA(winIntOSA1:winIntOSA2,1) -
TimeOSA(winIntOSA1));

x= winIntCC_Time;
y= winIntCC;
xx= winIntOSA_Time ;
yy=interp1(winIntCC_Time,winIntCC,xx,'linear');

%Ajuste automatico de ejes x e y para graficas

aux3 = min(MinimoAire(:,1)) - 1;
aux4 = max(MinimoAire(:,1)) + 1;
aux5 = min(MinimoAireDiez(:,1)) - 1;
aux6 = max(MinimoAireDiez(:,1)) + 1;
aux7 = min(LambdaAire(:,1)) - 5;
aux8 = max(LambdaAire(:,1)) + 5;

% Grafica dB/Espectro

% figure
% subplot(2,1,1);
% plot(TimeOSA,MinimoAire,'r .');
% ylim([-6 -4.8]);
% title('Evolución Minimo Espectro');
% xlabel('Time(s)');
% ylabel('dB');
%
% subplot(2,1,2);
% plot(TimeOSA_Diez,MinimoAireDiez,'g*');
% ylim([-6 -4.8]);
% title('Evolución Minimo Diezmado');
% xlabel('Time(s)');
% ylabel('dB');

% Grafica Lambda/Espectro

```

```

% figure
% subplot(2,1,1);
% plot(TimeOSA,LambdaAire,'r .');
% ylim([1530 1550]);
% title('Evolución Lambda Espectro');
% xlabel('Time(s)');
% ylabel('Wavelength(nm)');

subplot(2,1,1);
plot(TimeOSA_Diez,MinimoAireDiez,'r*');
ylim([aux5 aux6]);
title('Evolución Minimo Diezmado');
xlabel('Time(s)');
ylabel('dB');

subplot(2,1,2);
plot(TimeOSA_Diez,LambdaAireDiez,'g*');
ylim([aux7 aux8]);
title('Evolución Lambda Diezmado');
xlabel('Time(s)');
ylabel('Wavelength(nm)');

% Grafica Ajuste CC/OSA

figure
subplot(2,1,1);
plot(TimeOSA,MinimoAire,'g .');
ylim([aux3 aux4]);
xlim([0 50000]);
title('Respuesta Potencia LPG Humedad ');
xlabel('Time(s)');
ylabel('dB');

subplot(2,1,2);
plot(TimeCC_Adj,Col_HR_real,'r .');
% ylim([-6 -4.8]);
xlim([0 50000]);
title('Evolución Humedad CC');
xlabel('Time(s)');
ylabel('Humedad(%)');

% Interpolacion lineal

figure
subplot(2,1,1);
plot(winIntOSA_Time,winIntOSA,'g .');

```

```

% ylim([-5.5 -4.8]);
title('Respuesta Potencia LPG Humedad ');
xlabel('Time(s)');
ylabel('dB');

subplot(2,1,2);
hold on
plot(winIntCC_Time,winIntCC,'r .');
plot(xx,yy,'o','markersize',5,'markerfacecolor','
g')
% ylim([-6 -4.8]);
title('Interpolacion Humedad CC');
xlabel('Time(s)');
ylabel('Humedad(%)');

% figure
% hold on
%                                     plot(x,y,'-
o','markersize',4,'markerfacecolor','r')
%
plot(xx,yy,'o','markersize',5,'markerfacecolor','
g')
% xlabel('x')
% ylabel('y')
% title('Interpolación lineal');
% hold off

```

**Algoritmo de detección de picos:** Dado que lo que buscamos es un desdoble de picos, resulta apropiado tener un algoritmo que detecte este desdoble de picos y que ajuste las diferentes contribuciones en dicho desdoblamiento. Estos desdoblamientos no tienen por qué ser claros a simple vista por lo que resulta útil realizar ajuste por mínimos cuadrados de dos picos gaussianos con corrección de la línea de base para comprobar el resultado de la construcción.

```

% _____
% _____
% _____
% _____
%
%     Esta función calcula el ajuste por mínimos
cuadrados de dos picos
%     Gaussianos con corrección de la línea de base.
%
%     Requiere de las funciones:

```



```

win1=position(lmin,l)
win2=position(lmax,l)
lw=l(position(lmin,l):position(lmax,l));
tw=spectrum_OSA_1(position(lmin,l):position(lmax,
l),:);

%ahora cortamos una ventana que no nos interesa
introducir en el cálculo.

win1=position(1475,lw)
win2=position(1475,lw)
size(tw)
lw(win1:win2)=[];
tw(win1:win2,:)=[];
size(tw)
l=lw;

%Graficamos todos los espectros en la zona de la
ventana recortada

figure; hold on; plot(lw,tw);
title('Ventana Recortada');
xlabel('Wavelength (nm) ');
ylabel('dB');

%ahora vamos en bucle por todos los espectros para
hacer el ajuste
figure; hold on;
s=size(t);
start=[1525 10 1545 20];          %initial guess for
the LPG minima
options = optimset('TolX',0.01); % Determines how
close the model must fit the data

for i=1:s(2)
    t=tw(:,i);
    %este script entiende que los datos están los
vectores l, t devuelve los datos del ajuste en a,
b, parameter primero sustrae la linea de base
    a=(t(length(t))-t(1))/(l(length(l))-l(1))
    b=t(1)-a*l(1)
    baseline=a.*l+b;
    size(baseline);
    %plot(l,baseline,'r');
    t2=t'-baseline;
    %plot(l,t2,'k');

```

```

% Perform an iterative fit using the FMINSEARCH
function

%%Función de minimización del error
[parameter
fval]=fminsearch(@(lambda) (fitgauss2b(lambda,l,t2
)),start);
toc

bl=c(1);
Measured1=[c(2) parameter(1) parameter(2)]; %
Peak height 1 is returned in the global variable
c(1).
Measured2=[c(3) parameter(3) parameter(4)]; %
Peak height 2 is returned in the global variable
c(2).

% Compute a model and plot it (blue line) along
with
% the original data (red points)

peak1=c(2).*gaussian(l,parameter(1),parameter(2))
;
peak2=c(3).*gaussian(l,parameter(3),parameter(4))
;
%peak3=c(4).*gaussian(l,parameter(5),parameter(5)
);

model=baseline+bl+peak1+peak2; %+peak3;
residuo(i,:)=t2-model+baseline;
plot(i,parameter(1),'b*');
plot(i,parameter(3),'r*');

start=[parameter];
i
end

% Grafica del error que aparece en el ajuste
parametrico.

figure; plot(l,residuo)
title('Error en el ajuste');

% Grafica donde aparecen las dos contribuciones
que generan en desdoblamiento

```

```

% de picos, el espectro generado por estas
contribuciones ajustadas y el
% espectro original medio con la correccion de la
linea de base.

figure; hold on;
plot(l,t2,'r.')
plot(l,peak1,'c.')
plot(l,peak2,'b.')
%plot(l,peak3,'g')
plot(l,b1+peak1+peak2,'k.')
title('Ajuste Picos');
xlabel('Wavelength(nm)');
ylabel('dB');

start=parameter;

% Grafica del ajuste parametrico de los picos sin
correccion de linea de base.

figure; hold on;
plot(l,t,'r.',l,model,'b.')
title('Media picos sin ajuste');
xlabel('Wavelength(nm)');
ylabel('dB');

```

## 8 Bibliografía

- [1] S. W. James and R. P. Tatam, "Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 5, pp. R49–R61, 2003.
- [2] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1277–1294, 1997.
- [3] V. Bhatia, "Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing.," *Opt. Express*, vol. 4, no. 11, pp. 457–466, 1999.
- [4] V. Bhatia, "Temperature-insensitive and strain-insensitive long-period grating sensors for smart structures," *Opt. Eng.*, vol. 36, no. 7, p. 1872, 1997.
- [5] S. Khaliq, S. W. James, and R. P. Tatam, "Fiber-optic liquid-level sensor using a long-period grating," vol. 26, no. 16, pp. 2000–2002, 2001.
- [6] G. Decher, M. Eckle, J. Schmitt, and B. Struth, "Layer-by-layer assembled multicomposite films," *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 32–39, 1998.
- [7] A. Urrutia, J. Goicoechea, A. L. Ricchiuti, D. Barrera, S. Sales, and F. J. Arregui, "Simultaneous measurement of humidity and temperature based on a partially coated optical fiber long period grating," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 227, pp. 135–141, 2016.
- [8] H. Tsuda and K. Urabe, "Characterization of long-period grating refractive index sensors and their applications," *Sensors (Switzerland)*, vol. 9, no. 6, pp. 4559–4571, 2009.

