



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es

TESIS DOCTORAL

Contribución al desarrollo de Nuevas Ayudas electroópticas en Rehabilitación Visual

Autor:

César Vega Colado

Director/Tutor:

Ricardo Vergaz Benito

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

Leganés, de de

TESIS DOCTORAL

**Contribución al desarrollo de Nuevas Ayudas electroópticas en
Rehabilitación Visual**

Autor: César Vega Colado

Director: Ricardo Vergaz Benito

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Calificación:

Leganés, de de

A mis Padres

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer el apoyo todas aquellas personas que me han rodeado durante todos estos años.

En primer lugar, a mi familia, mi padre Julián y mi madre Concepción que siempre me han animado a seguir adelante. No puedo olvidar nombrar a mi mujer, Laura y mis hermanos, Carlos y Conchi, mis cuñados Jesús y Eva y como no mis sobrinos, Sofía, Rubén y Gonzalo que siempre me hacen reír.

También debo agradecer a Ricardo Vergaz el hecho de que me brindara la oportunidad de hacer este trabajo, así como agradecerle su esfuerzo y dedicación.

Aparte de mi director de tesis, hay otras personas a las que quiero agradecer su apoyo, como José Manuel Sánchez Pena, quien ha sufrido parte de la revisión del presente trabajo o mis compañeros Jesús A., Jesús P., Agustín, Ernesto,... quienes me han apoyado y dado fuerzas con los insuperables ágapes durante todo este tiempo.

Quiero agradecer además, a todas las personas que han colaborado directamente en el presente trabajo y que sin ayuda no podría haber realizado, como Ana Viñuales, que siempre que hemos necesitado algún cristal EC nos los ha facilitado, o Rubén Cuadrado, cuyas recomendaciones y ensayos con pacientes han sido de gran ayuda.

Tampoco puedo olvidar, al resto de compañeros del grupo de investigación (GDAF) ya que el ambiente de trabajo ha sido excepcional.



INDICE

Lista de acrónimos, variables y términos usados.....	iii
Resumen.....	v
Abstract	vii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 DISCAPACIDADES VISUALES	2
1.2 FILTROS ÓPTICOS PASIVOS PARA DISCAPACIDAD VISUAL	6
1.3 AYUDAS ELECTROÓPTICAS PARA DISCAPACIDAD VISUAL	10
1.3.1 DISPOSITIVOS ELECTROCRÓMICOS.....	12
1.3.1.1 ESTRUCTURA	13
1.3.1.2 APLICACIONES.....	15
1.4 MOTIVACIÓN Y ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	20
2 DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN ELECTROÓPTICA PARA CRISTALES EC	23
2.1 PUNTO DE PARTIDA	23
2.2 DESARROLLO DEL SISTEMA.....	26
2.2.1 HARDWARE	28
2.2.1.1 SENSOR Y ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL LUMÍNICA.....	28
2.2.1.2 MEDIDA DE CORRIENTE	30
2.2.1.3 ETAPA DE SALIDA.....	32
2.2.1.4 MEDIDA DE LA TEMPERATURA.....	33
2.2.2 SOFTWARE	34
3 CARACTERIZACIÓN ELECTROÓPTICA	43
3.1 COMPOSICIÓN DE LOS CRISTALES	43
3.2 DETERMINACIÓN DE VP.....	44
3.3 CICLABILIDAD Y DETERMINACIÓN DEL ALGORITMO ÓPTIMO DE CONMUTACIÓN.....	53
3.3.1 RESULTADOS	56
3.3.1.1 RESULTADOS POR ESPESOR	58
3.3.1.2 COMPARATIVA ENTRE ALGORITMOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CONMUTACIÓN Y CONSUMOS .	69
3.3.1.3 DEPENDENCIA CON LA TEMPERATURA	72
3.4 CONCLUSIONES	76
4 DESARROLLO DE LA AYUDA TÉCNICA.....	79
4.1 PUNTO DE PARTIDA	79



4.2	HARDWARE	86
4.3	INTEGRACIÓN DEL SISTEMA COMPLETO EN LA MONTURA DE LAS GAFAS	91
4.4	SOFTWARE	99
5	RESULTADOS SOBRE LA AYUDA TÉCNICA.....	107
5.1	PROBLEMAS ÓPTICOS: CORRECCIONES POSIBLES POR SOFTWARE Y HARDWARE.....	110
5.1.1	HARDWARE	110
5.1.2	SOFTWARE	114
5.2	RESUMEN SOBRE ENSAYO CLÍNICO	119
5.3	CONCLUSIONES DEL ENSAYO CLÍNICO	128
6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	131
6.1	CONCLUSIONES	131
6.2	TRABAJOS FUTUROS.....	135
	REFERENCIAS	137
	ANEXO I.....	145
I	PROTOTIPOS EXPERIMENTALES: HARDWARE	147
I.1	SENSOR Y ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL LUMÍNICA.....	147
I.2	DRIVER DE CONTROL	149
I.3	ETAPAS DE SALIDA	152
I.4	CONECTOR DE PROGRAMACIÓN Y COMUNICACIÓN SERIE.....	153
I.5	ADAPTADOR DE COMUNICACIÓN SERIE-USB	154
I.6	PULSADORES DE CONTROL DE USUARIO	155
I.7	ALIMENTACIÓN Y CARGA	156
	ANEXO II.....	165
II	PROTOTIPOS EXPERIMENTALES: SOFTWARE	167
II.1	PROGRAMA COMPLETO: R8C3GCPR5.C	168
II.2	INICIALIZACIÓN Y CONFIGURACIÓN	170
II.3	EJECUCIÓN PRINCIPAL	172
II.4	TOMAR MUESTRAS	173
II.5	FUNCIÓN SELECCIONAR TRANSMITANCIA	174
II.6	MODIFICAR SALIDAS	179
II.7	PULSADORES	185
II.8	PROGRAMACION (PS)	186
II.9	DEBUG (PS)	187



LISTA DE ACRÓNIMOS, VARIABLES Y TÉRMINOS USADOS

ACRÓNIMO	TÉRMINO
A/D	Analógico-digital
ADC	Convertor Analógico-Digital
AV	Agudeza Visual
CEYEC	Customized Eye Care
IK4-CIDETEC	Centro de Tecnologías Electroquímicas (San Sebastián)
CIE	Clasificación Internacional de Enfermedades
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
CPF	Corning Photochromatic Filter
CV	Campo Visual
D/A	Digital-analógico
DAC	Convertor Digital-Analógico
DMAE	Degeneración Macular asociada a la edad
EC	Electrocromico
G	Ganancia
GDAF-UC3M	Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas
I	Corriente instantánea
I2C	Inter-Integrated Circuit
I_{ef}	Intensidad eficaz (Ecuación 2.5)
IOBA	Instituto de Oftalmobiología Aplicada (Universidad de Valladolid)
IR	Infrarrojo
ITO	Óxido de Indio y estaño
JST	Japan Science and Technology Agency
NIMS	National Institute for Materials Science
NVS	Night Vision System
OMS	Organización Mundial de la Salud
P_{ef}	Potencia eficaz (Ecuación 2.6)
redox	Reducción / oxidación
RGB	Red Green Blue
RP	Retinosis Pigmentaria
T	Transmitancia (Ecuación 2.1)
TAD	Tarjeta de Adquisición de Datos
t_r	Tiempo de oscurecimiento (pasar del 90% al 10% T)
t_r	Tiempo de aclarado (pasar del 10% al 90% T)
TTL	Transistor-transistor logic
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultravioleta
V	Tensión instantánea
V_p	Voltios pico
ΔT	Variación de transmitancia (Ecuación 2.2)
PID	Proporcional Integral Derivativo





RESUMEN

Aunque no haya un total acuerdo entre los profesionales de la oftalmología, algunas investigaciones han mostrado que el uso de filtros, al eliminar ciertas longitudes onda, podría ser muy beneficioso para todo tipo de personas. Desde aquellos que simplemente los quieren usar como gafas de sol de coloración variable, hasta personas con baja visión cuya patología los hace extremadamente sensibles a cambios bruscos de luz-oscuridad. Estas personas necesitan llevar siempre consigo una serie de filtros, normalmente entre dos y cuatro, con el inconveniente que esto les genera. En la actualidad sólo existe una solución comercial de funcionamiento similar, las lentes fotocromáticas, las cuales cambian de coloración al recibir radiación ultravioleta. Esto significa que cambian de color con la incidencia directa de radiación solar, pero no funcionan en lugares donde esta radiación no existe, como interiores, o donde llega filtrada, como en el interior de la mayoría de los coches. Además presentan otro inconveniente: su baja velocidad de conmutación, siendo del orden de varios minutos. Los dispositivos electrocrómicos han sido usados e incluso comercializados, en los últimos años, como ventanas inteligentes o como retrovisores en los coches. Sin embargo, su uso como filtros ópticos para la visión, aunque se ha intentado desde de los años ochenta, no ha llegado nunca a comercializarse. En esta tesis se ha desarrollado un sistema capaz de aplicar diferentes algoritmos, configurables mediante una interfaz de usuario, a un cristal electrocrómico. El sistema almacena automáticamente, la tensión aplicada, la transmitancia, la temperatura y la corriente consumida, en uno o varios ficheros compatibles con Microsoft Excel para su posterior procesado. Se describirán los resultados de distintos algoritmos aplicados a cristales electrocrómicos viológenos de diversos espesores. Se mostrarán tiempos de respuesta, variación de la transmitancia, consumo eléctrico y ciclabilidad, con el objetivo de aplicar el algoritmo óptimo en relación con su consumo/tiempo de conmutación/ciclabilidad sobre los cristales de un nuevo dispositivo de ayuda a la visión desarrollado por el autor del presente trabajo. Se mostrarán tiempos de respuesta ostensiblemente mejores que los de las lentes fotocromáticas. También se mostrará cómo es posible integrar la electrónica en una montura de gafas similar a las actuales soluciones comerciales.





ABSTRACT

In spite of the fact that there is no full agreement among eye care professionals, research has shown that using filters to remove certain wavelengths could be very beneficial for all kinds of people: from those who only want to use them in variable coloration sunglasses, to people with low vision, whose pathology makes them extremely sensitive to sudden changes in light conditions. That people always need to wear a whole series of filters, usually between two and four, with the inconvenience that this may cause them. Currently, there is only one marketed similar solution: photochromic lenses, which change its color when receive ultraviolet radiation. This means that the color change is made by means of sunlight direct contact, but do not work in places where the sunlight radiation does not exist, as indoors, or where it is filtered, such as inside most cars. Furthermore, photochromic lenses present another disadvantage: its low switching speed, spending several minutes to change its state. Electrochromic devices have been used and even marketed for the last years, both as smart windows and rear mirrors in cars. However, its use as optical filters for viewing has never been marketed, although it has been attempted since the eighties. In this thesis a new characterization system has been developed so as to apply different algorithms, which are configurable through a user interface, to electrochromic devices. Moreover, the system, automatically, stores the applied voltage, transmittance, temperature and electric current in one or more files compatible with Microsoft Excel for further processing. Thus, the results from different algorithms applied to electrochromic devices with different thicknesses will be described. Response times, transmittance variation, power consumption and cyclability will be shown, in order to apply the optimal algorithm, regarding with its consumption, switching time and cyclability, on crystals of a new technical aid device for low vision, developed by the author of this work. Not only better response time than photochromic lenses will be demonstrated, but it will be also shown how electronics can be integrated in a frame similar to current market solutions glasses.





1 INTRODUCCIÓN

Según la OMS unos 246 millones de personas padecían baja visión en 2014, esto es aproximadamente un 3,5 % de la población mundial. Uno de sus principales obstáculos son los deslumbramientos y los cambios de ambiente bruscos entre lugares muy iluminados y poco iluminados, pudiendo llevarles muchos minutos conseguir la adaptación que a una persona sana le cuesta un par de segundos. La principal motivación de esta Tesis es desarrollar un sistema electroóptico que les ayude en este caso.

Por este motivo, se hará un breve repaso por algunas de las discapacidades visuales más comunes (apartado 1.1) incidiendo en los problemas que personas con estas patologías sufren en su vida diaria.

Su problema en la actualidad es que el profesional oftalmológico les prescribe una serie de filtros ópticos (apartado 1.2), normalmente entre 2 y 4, que han de llevar con ellos para adaptar su visión a cada ambiente lumínico con el inconveniente que esto les supone. A día de hoy la única solución comercial que existe, enfocada a solventar el citado problema, son las lentes fotocromáticas. Pero como se mostrará en el presente trabajo tienen dos grandes inconvenientes: no funcionan donde no hay radiación UV (radiación solar directa) y su velocidad de conmutación es del orden de varios minutos.

Nuevos cristales electrocrómicos serán propuestos como una solución alternativa erradicando ambos problemas: funcionan en cualquier lugar y su velocidad de conmutación es del orden de varios segundos.



Aunque en el presente trabajo se explicará, de forma detallada, qué es un material electrocrómico (apartado 1.3.1) y cuál es su estructura (apartado 1.3.1.1), a grandes rasgos un **material electrocrómico** (E.C.) es aquel que tiene la capacidad de cambiar de color al aplicar una diferencia de potencial en sus extremos y en consecuencia circular una corriente eléctrica. Esta propiedad los hace francamente útiles en ciertas situaciones de la vida cotidiana como se verá en el apartado 1.3.1.2.

En consecuencia, el presente capítulo está dividido en cuatro partes bien diferenciadas: una primera parte en la que repasarán las principales discapacidades visuales, una segunda parte en que se trata la utilización de filtros en discapacidades visuales, una tercera basada en el estado del arte de las ayudas electroópticas para discapacidad visual y finalmente una cuarta que incluye la motivación y estructura del presente trabajo.

1.1 DISCAPACIDADES VISUALES

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) de acuerdo a la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-10) en su actualización y revisión de 2006, la función visual se subdivide en cuatro niveles [1]:

- ✚ visión normal.
- ✚ discapacidad visual moderada.
- ✚ discapacidad visual grave.
- ✚ cieguera.

La discapacidad visual moderada y la discapacidad visual grave se reagrupan a su vez bajo el término “baja visión”. De éste modo, la baja visión y la cieguera representan el total de casos de discapacidad visual [1].

Según la OMS, la baja visión es una disminución de las funciones visuales en personas que, después de un tratamiento médico o corrección óptica, mantienen una agudeza

visual¹ (AV) inferior al 30% y/o tienen un campo visual (CV) inferior a 20°. Cuando una persona tiene una agudeza visual inferior al 10% y/o su campo visual es inferior a 10°, legalmente se le considera ciega.

En óptica optométrica, para calcular la agudeza visual de una persona, lo que se hace es someterla a unos ‘tests’ tales como el test *Snellen* formado por filas de letras que van de tamaño más grande a más pequeño (Fig. 1.1). La persona se coloca a una cierta distancia y con uno de los ojos tapados se le pide que vaya leyendo: dependiendo de la fila que pueda llegar a leer tendrá mayor o menor agudeza visual.

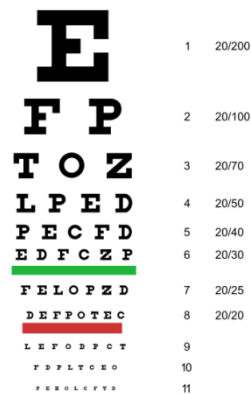


Figura 1.1. Test de snellen.

Según la Organización Mundial de la Salud, globalmente, en 2014, aproximadamente 285 millones de personas eran discapacitadas visuales, de los cuales 246 millones padecían baja visión y 39 ceguera [1].

A continuación se realiza una breve descripción de las principales patologías que pueden producir pérdidas de agudeza visual.

¹ La agudeza visual es la capacidad de percibir, detectar o identificar objetos con unas condiciones de iluminación buenas. Para una distancia al objeto constante, si el paciente ve nítidamente una letra pequeña, tiene más agudeza visual que uno que no la ve.

- *Degeneración Macular asociada a la edad*: La DMAE es una patología más frecuente en la población mayor. Causa pérdida de visión central, dificultando la lectura y la realización de tareas de cerca [2].
- *Retinopatía Diabética*: Suele afectar a personas diabéticas. Esta patología puede producir con cierta frecuencia borrosidad central generalizada aunque en muchos casos se dispone de alguna zona de visión intacta [2].
- *Miopía Magna o miopia*: Las personas afectadas de esta patología tienen problemas para enfocar bien los objetos distantes, lo que provoca dolores de cabeza, bizqueo y tensión en los ojos [3].
- *Cataratas*: Una catarata es una opacificación del cristalino que produce frecuentemente una pérdida general de la visión. Además resultan molestos los deslumbramientos [2].
- *Glaucoma*: Debido a un aumento de la presión ocular se dañan los tejidos del nervio óptico. Esta patología, puede llegar a dañar gravemente la visión periférica, llegando incluso a dejar solamente una pequeña zona de visión en la zona central denominándose "visión en túnel" [2].
- *Retinosis Pigmentaria (RP)*: Es debida a varias enfermedades de carácter degenerativo, genético y hereditario. Produce una pérdida de visión debido a la destrucción de las células fotorreceptoras de la retina, pudiendo llegar incluso a provocar la ceguera total. Se caracteriza por la "ceguera nocturna" y "visión túnel". [4-5]

En la Figura 1.2 se representan de forma aproximada la visión que tendría un paciente con cada una de las patologías descritas.

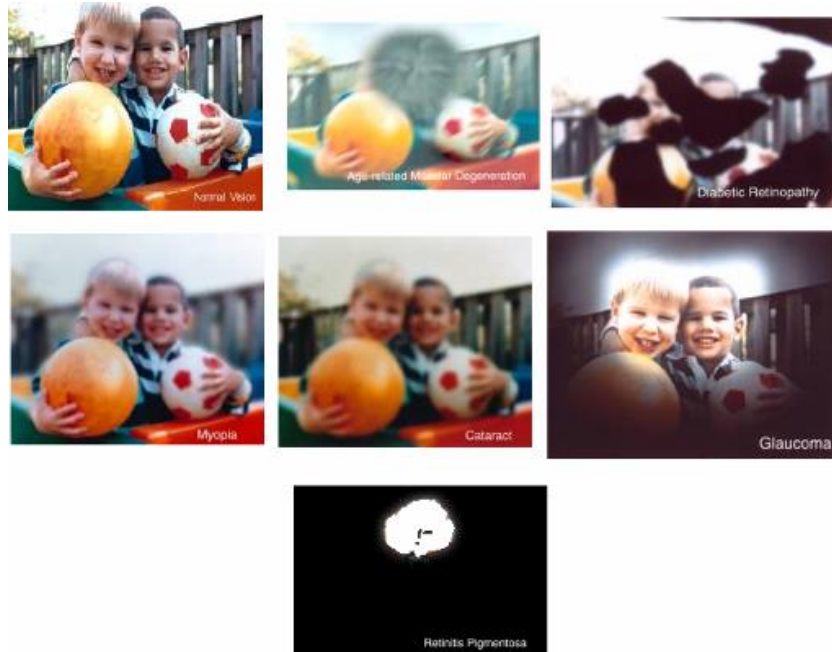


Figura 1.2. Ejemplos de visión según las diferentes patologías. [6].

A continuación se detallan los síntomas más frecuentes de algunas de estas enfermedades [4], en concreto los que podrían ser mejorados con ayudas como las que se describen en esta Tesis:

- *Ceguera nocturna*. Dificultad o imposibilidad de ver en ambientes poco iluminados, normalmente causada al pasar de un ambiente bien iluminado a otro mal iluminado. Pueden padecerla pacientes de degeneración macular [7], cataratas, miopía y RP [8].
- *Campo de visión limitado o “visión en túnel”*. Pérdida de visión desde la zona periférica del ojo. Es un síntoma típico de la RP que acostumbra a aparecer después de la ceguera nocturna [4].
- *Alteración de la percepción de los colores*. Se produce una alteración de la visión de los colores, con mucha frecuencia, en el eje azul-amarillo. Pueden padecerla pacientes de cataratas [9].
- *Fotofobia*. Es cierta intolerancia a la luz, es decir la luz les molesta.

- *Deslumbramientos*. Se suelen producir ante una excesiva luminosidad.

Son por tanto **los deslumbramientos y los cambios de ambiente luminoso brusco el principal obstáculo para ciertas personas con discapacidad visual**. Es por eso que se usan los filtros ópticos.

1.2 FILTROS ÓPTICOS PASIVOS PARA DISCAPACIDAD VISUAL

Como se ha visto, en ciertas enfermedades además de un problema de enfoque, el paciente sufre un problema relacionado con la intensidad y espectro (tipo) de luz recibida. Los filtros ópticos (Fig. 1.3) son elementos que únicamente permiten el paso a su través de luz con ciertas propiedades espectrales (radiación seleccionada en longitud de onda). De esta forma se suprime o atenúa la intensidad de ciertos intervalos espectrales de la luz a fin de controlar deslumbramientos, realzar el contraste y facilitar la adaptación a condiciones cambiantes de iluminación.

Algunos estudios han demostrado mejoras objetivas en la función visual como la agudeza visual o la sensibilidad al contraste [10-22]. También se han observado mejoras en la velocidad de lectura [23-25].



Figura 1.3. Filtros ópticos. [26]

Los filtros Ópticos se pueden clasificar en dos grandes grupos [27]:

- ✚ Atenuadores o de densidad neutra (Fig. 1.4), que reducen todas las longitudes de onda en igual magnitud dentro del espectro visible. Además suelen proteger frente a longitudes de onda por debajo de 390nm (UV).
- ✚ Selectivos o de absorción selectiva, donde se potencia la absorción en unos determinados intervalos espectrales frente a otros. Estos filtros a su vez

son subdivididos en interferenciales (paso banda) y de corte (transmiten a partir de una longitud de onda determinada).

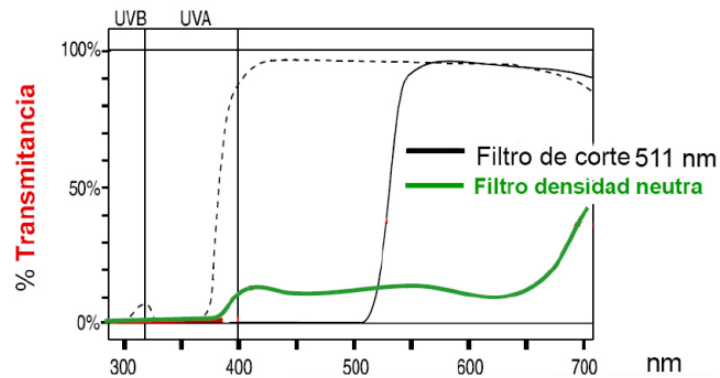


Figura 1.4. Respuesta óptica de un filtro neutro y un filtro de corte [27].

Algunos estudios como el de Nussbaum et al [28] y Walls et al [29], asocian una mejora de la función visual con el uso de filtros ópticos de corte, explicando que sus beneficios son [30]:

- ✚ Aumento de la agudeza visual.
- ✚ Reducción de los reflejos y deslumbramientos.
- ✚ Aumento de los detalles.
- ✚ Aumento del contraste.

Rosemblun et al [18], tras adaptar diferentes filtros en personas con diferentes patologías, concluye que puede haber una ganancia de la agudeza visual entre el 43% y el 11%.

También se ha demostrado que, sin existir patologías previas, el uso de filtros ópticos en seres vivos puede eliminar los efectos dañinos de la luz sobre la retina [27].

Actualmente existen filtros ópticos para diferentes patologías y/o actividades de la vida diaria. Entre estos filtros encontramos: filtros que protegen frente a la radiación ultravioleta, filtros que protegen frente a la radiación infrarroja, y filtros selectivos (eliminan a partir de ciertas longitudes de onda específicas). Dentro de éste último grupo hay distintos fabricantes pero uno de los más conocidos es Corning, que además los

desarrolla foto-cromáticos. Estos filtros tienen la capacidad de variar su transmitancia en función de la luminosidad natural del exterior. **Estas lentes se aclaran o se oscurecen en función de la radiación ultravioleta recibida**, siendo los tiempos de respuesta del orden de minutos [31]. Además, presentan el inconveniente de que si no llega radiación UV a la lente, no modifican su estado de transmitancia, cosa muy frecuente dentro de los coches, cuyas lunas suelen tener incorporado un filtro de radiación UV.

Corning posee filtros foto-cromáticos de corte diferentes, trasmitiendo cada uno de ellos por encima de la longitud de onda que representa su nomenclatura (por ejemplo el CPF 450, transmite el 80 por ciento del espectro superior a 450 nm). Un ejemplo de la respuesta en transmitancia de un filtro Corning es el mostrado en la figura 1.5.

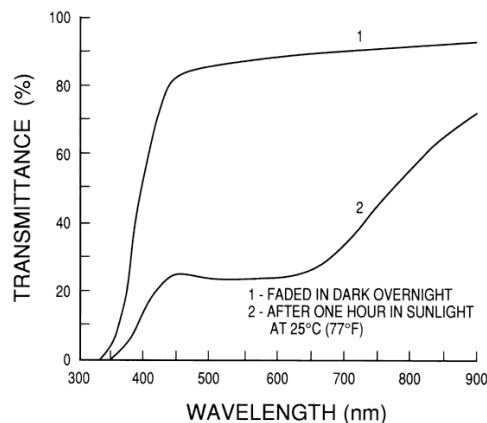


Figura 1.5. Respuesta espectral de un filtro Corning. [31]

Como se puede ver en ella, la transmitancia del filtro cuando se encuentra en estado claro está en torno al 80% (1) para longitudes de onda mayores de 450nm. Sin embargo cuando se encuentra en estado coloreado (tras 1 hora a la luz solar y a una temperatura de 25°C) la transmitancia está en torno al 20 % (2), al menos en la mayor parte del espectro visible (hasta 700 nm).

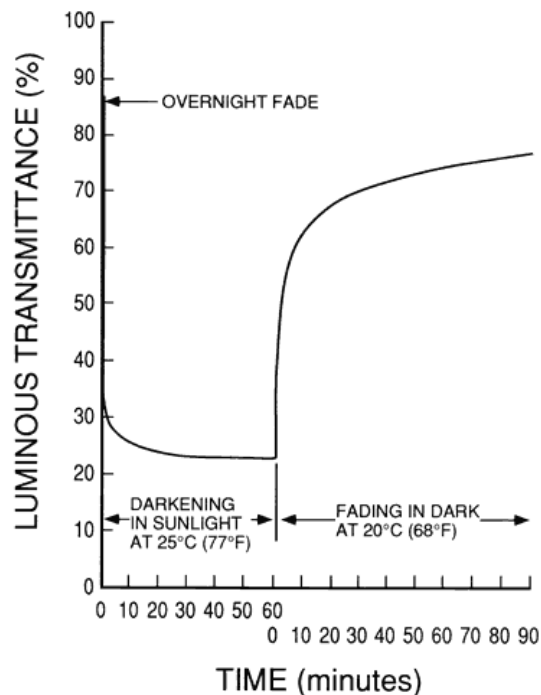


Figura 1.6. Respuesta temporal de un filtro Corning. [31]

En cuanto al tiempo de respuesta (Fig. 1.6), se puede ver que tarda en volver del estado oscuro unos 10 minutos para alcanzar el 65 % de transmitancia y unos 40 minutos para alcanzar el 75%.

Como se ha visto, varios estudios asocian una mejora de la función visual con el uso de filtros ópticos, pero las soluciones actuales presentan inconvenientes de cara al usuario final:

- ✚ El tener que llevar varios filtros diferentes y utilizar uno u otro en función de la intensidad lumínica.
- ✚ Su baja velocidad de conmutación (minutos) sumado a que no funcionan en cualquier ambiente luminoso (lentes fotocromáticas).

Una nueva ayuda electroóptica para discapacidad visual será propuesta erradicando ambos problemas.

1.3 AYUDAS ELECTROÓPTICAS PARA DISCAPACIDAD VISUAL

En la actualidad la mayoría de las ayudas electroópticas para discapacidad visual se centran en dispositivos HMD (*Head Mounted Displays*) (Fig. 1.7). Se tratan de sistemas normalmente compuestos por una o dos micropantallas justo delante de uno o los dos ojos, y cuyo aspecto final suele ser en forma de casco o gafas. Este sistema, provoca en el usuario una sensación visual de estar viendo una pantalla de entre 20 y 100 pulgadas a una distancia de un metro [32].

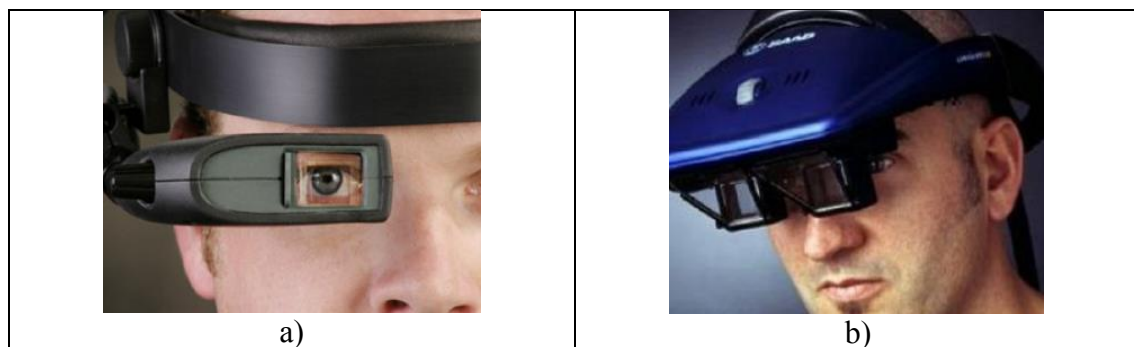


Figura 1.7.HMDs: a) Monocular de Life-eye Systems (LE500). b)Binocular (Advisor 150, virtual realities) [32]

Mediante una o varias cámaras situadas en el dispositivo y algoritmos de reconocimiento y procesado de imágenes se pueden producir realces de contrastes, zoom, etc. (Fig. 1.8).

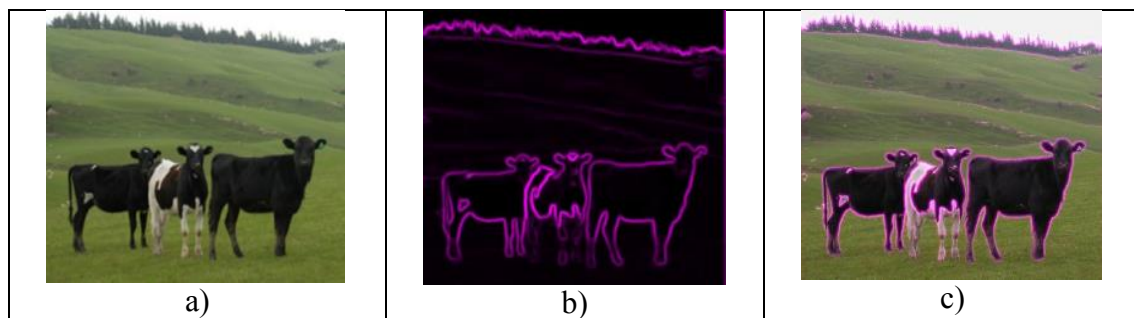


Figura 1.8. a) Imagen natural. b) Mapa de bordes. c) Imágenes superpuestas. (Atabany & Degenaar, 2008) [32]

En estos dispositivos, como se ve en la Figura 1.7, interesa a efectos de esta Tesis el mostrar que el peso de la electrónica necesaria provoca la aparición de elementos de sujeción a la cabeza, gorras, o incluso separación de gran parte de la electrónica a elementos situados fuera del dispositivo portable, a llevar en una mochila o, en el mejor de los casos, en un bolsillo. Por otro lado, se han realizado otros intentos de “gafas electrónicas” como el desarrollado por la empresa PixelOptics (Fig. 1.9), que basándose

en un cristal líquido (LCD) son capaces de variar su régimen de funcionamiento permitiendo conmutar entre “visión de cerca” y “visión de lejos”. Aquí se aplica el cambio del índice de refracción de manera espacialmente selectiva que provoca la conmutación de la posición de las moléculas de cristal líquido al aplicar una tensión.

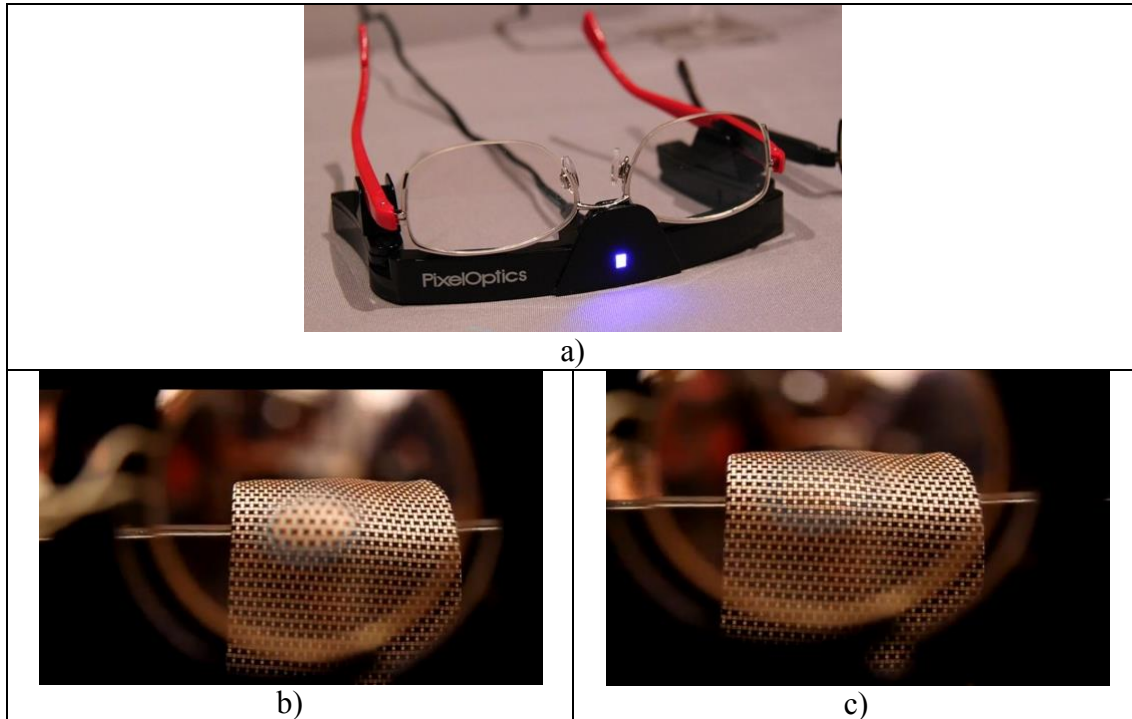


Figura 1.9. Respuesta temporal de un filtro Corning. [33]

En la figura 1.9 se puede ver el aspecto de las gafas (a), junto con el cristal líquido funcionando en modo visión de lejos (b) y en modo visión de cerca (c). Cabe destacar que pese a la idea, la baja personalización que se podía conseguir, algunos problemas técnicos y el elevado precio han acabado llevando a la bancarrota a PixelOptics recientemente [34].

También se han realizado algunos intentos de gafas electrocrómicas, como se verá en el apartado 1.3.1.2, pero enfocados a una solución más para estética o tradicional de protección ocular al sol que para personas con discapacidad visual, como el prototipo mostrado en la figura 1.10 desarrollado por investigadores de la Universidad de Washington en 2007 [35], en el que usando material electrocrómico en los cristales y mediante un botón se cambiaba la coloración de los mismos.

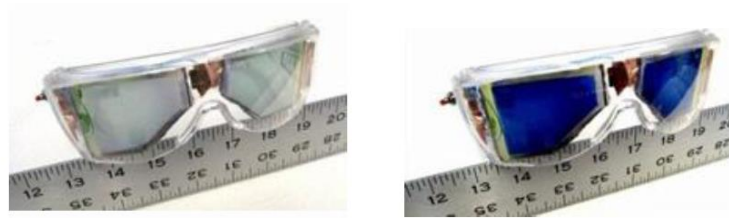


Figura 1.10. Prototipo gafas sol en estado translucido y coloreado. [35]

En todos estos prototipos, los principales problemas que los han llevado a no terminar de introducirse en el mercado han sido que eran:

- ✚ Caros
- ✚ Poco estables
- ✚ Dificiles de llevar

Será una aplicación similar a esta última (gafas electrocrómicas) la que motive el presente trabajo, como se verá más adelante. En realidad, lejos de quedarse en unas simples gafas de sol (que también lo son), la aplicación se basará en usar **filtros electrocrómicos** orientados plenamente a la discapacidad visual y que sean:

- ✚ Estables
- ✚ Baratos
- ✚ Fáciles de llevar
- ✚ Personalizables por parte de un profesional oftalmológico.

1.3.1 DISPOSITIVOS ELECTROCRÓMICOS

Un material denominado electrocrómico (EC), tiene la capacidad de cambiar de transparente a tintado (variando su transmitancia espectral), de manera reversible, mediante una reacción química (redox) provocada por el paso de corriente eléctrica [36-38]. Esta propiedad puede ser muy importante en sistemas donde es necesario filtrar ciertas longitudes de onda en determinados momentos, llevando a estos materiales a entrar en el grupo de los denominados “cromogénicos” [39].

1.3.1.1 ESTRUCTURA

Un dispositivo electrocrómico (por simplicidad, usaremos también el acrónimo EC para referirnos a él en este trabajo) suele fabricarse como un conjunto o “sándwich”, habitualmente de siete capas. Se puede ver un esquema de las diferentes capas de las que se compone el EC en la Figura 1.11. Las dos capas más exteriores están fabricadas de vidrio o plástico transparente, cuya función es dar consistencia al material. Éstas a su vez se encuentran recubiertas de una capa de material conductor, de un grosor tan sumamente pequeño que la transparencia del sustrato permanece casi inalterada [40,41]. Este conductor es típicamente ITO (óxido de indio y estaño) [42], mediante el cual se conecta a la corriente eléctrica.

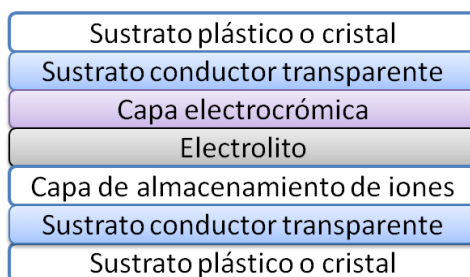


Figura 1.11. Composición habitual de un dispositivo EC.

La capa central consiste en un conductor iónico puro (electrolito polimérico) situada entre dos capas: una de material EC, y otra que intercambia cargas con la anterior, haciendo la función de contraelectrodo. El electrolito permite el intercambio de iones entre esas dos capas, de modo que cuando se aplica una corriente eléctrica se produce una reacción electroquímica por la que se insertan o extraen iones en la capa electrocrómica, produciendo un cambio de coloración de la misma [41].

Actualmente IK4-CIDETEC (Centro de Tecnologías Electroquímicas en San Sebastián, España), el cual ha colaborado en el presente trabajo, tras varios años de investigación ha logrado reducir el número de capas desde las 7 mostradas en la figura 1.11, hasta las 5 capas (Fig. 1.12). Este tipo de dispositivo es fabricado a base de una mezcla electrocrómica polimérica que se coloca entre dos láminas plásticas o de cristal recubiertas de una capa conductora, simplificando de esta manera la fabricación de los dispositivos y por tanto reduciendo el coste final. [40]

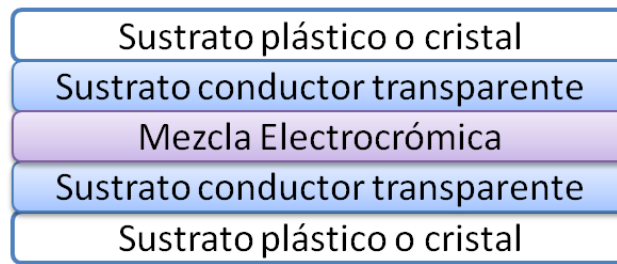


Figura 1.12. Composición del nuevo dispositivo EC.

Los dispositivos EC se pueden fabricar tanto rígidos (con materiales inorgánicos) como flexibles (con materiales orgánicos). [41,43]

Resumiendo el funcionamiento, los compuestos electrocrómicos cambian de color cuando se les aplica una corriente eléctrica (Fig. 1.13a y 1.13b). Esto significa que al recibir una diferencia de potencial de unos pocos voltios, cambian su color y en consecuencia su respuesta espectral (fig. 1.13c), pudiendo volver a su estado anterior al variar ésta diferencia de potencial.

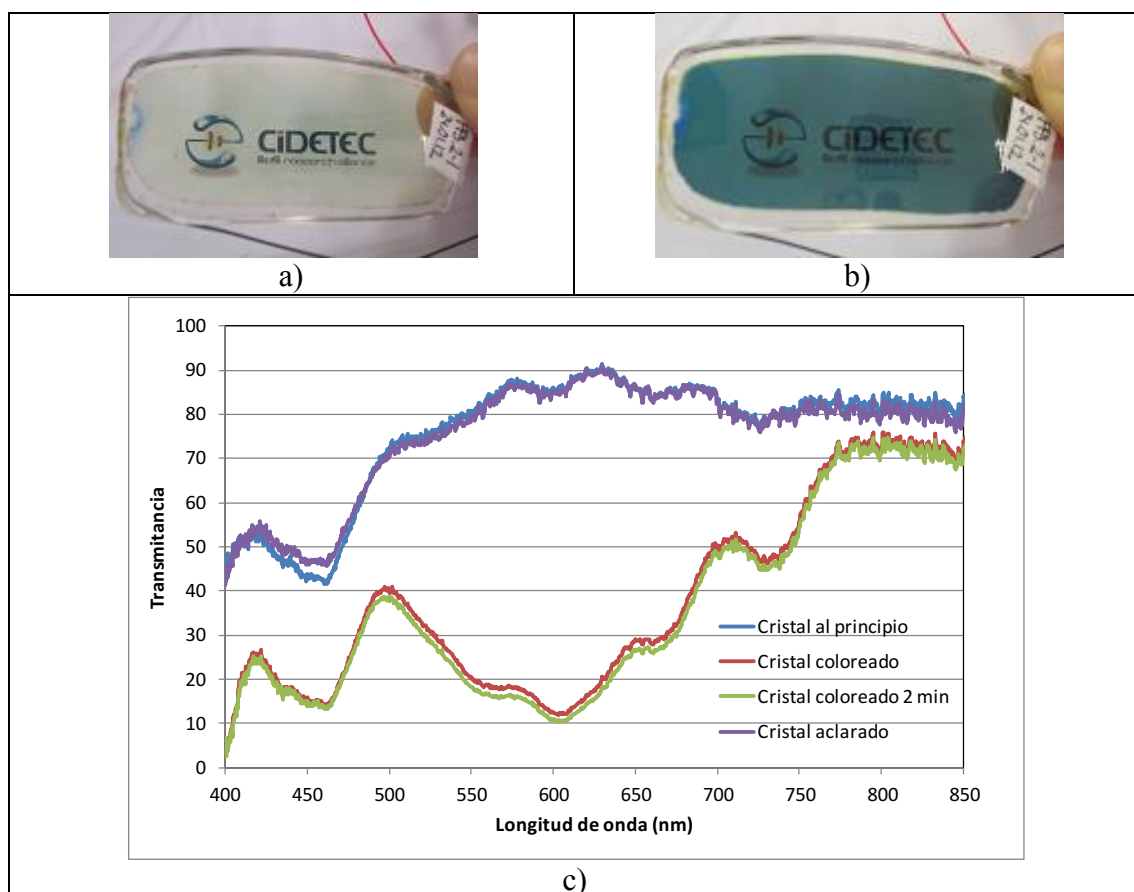


Figura 1.13. Cristales electrocrómicos fabricados por IK4-CIDETEC. a) Estado claro. b) Estado coloreado. c) Medida con un espectrómetro USB2000+ de Ocean Optics del espectro en ambos estados

La figura 1.13c muestra la transmitancia en %, a diferentes longitudes de onda, de un EC en su estado inicial, antes de aplicar ninguna señal eléctrica (azul claro), tras aplicar 1V (rojo) tras dos minutos aplicando 1V (verde) y tras dejar de aplicar tensión (morado). Se puede comprobar cómo, además de la variación global de transmitancia, cerca de los 600nm (zona roja del espectro visible) la transmitancia toma un valor en torno al 10% y llega al 20% sobre los 550nm (zona verde del espectro visible). Esto quiere decir que, para esas longitudes de onda, el cristal estaría absorbiendo en torno a un 80% de la cantidad de luz que atraviesa el mismo, adquiriendo una coloración azulada, es decir, del intervalo espectral que está dejando pasar mejor relativamente.

En bibliografías previas [44], se expone que la durabilidad o ciclabilidad es de gran importancia en los dispositivos para poder usarlos en una aplicación práctica. También se cita que las principales causas de la degradación son debidas a fenómenos físicos o químicos de los propios materiales empleados, así como a la aplicación de un excesivo voltaje o densidad de corriente eléctrica [44]. La mayoría de la bibliografía en cuanto a ciclabilidad se centra en aplicar señales cuadradas de conmutación entre $\pm V_p$ [46-49], basándose V_p en el potencial redox detectado frecuentemente mediante medidas de impedancia o voltioamperometría cíclica [45].

1.3.1.2 APLICACIONES

El efecto electrocrómico se conoce desde hace unos 45 años [50] y fue poco tiempo después cuando su interés aumentó dado que estos materiales podían ser una buena solución para fabricar ventanas de transmitancia variable en edificios “inteligentes” (Fig. 1.14). Algunos estudios estiman el ahorro de entre un 30% y 40% en refrigeración [51] y de un 6% a un 24% de energía eléctrica de iluminación [52].



Figura 1.14. Imagen del interior de una de las oficinas de prueba. (Oakland Federal Building de California, EE UU)[52]

La compañía Boing, ya ha integrado en todos sus aviones modelo 787 (Fig. 1.15) ventanas electrocrómicas. Mediante un botón permiten a los pasajeros ajustar su transparencia entre cuatro niveles distintos [53].



Figura 1.15. Imagen del interior de un Boing 787. [53]

Otra de las aplicaciones, ya muy comercializada, es su uso como retrovisores en los coches (Fig. 1.16). Gentex Corporation desarrolló el sistema *night vision system* (NVS) [54] que detecta y elimina los destellos provocados por los faros de otros coches mediante un cristal EC. En su estado claro se comporta como un espejo normal, pero si por medio de un fotodiodo se detecta un incremento de luz, el cristal se oscurece lo suficiente como para evitar el deslumbramiento, aunque sigue permitiendo la visión a través de él.



Figura 1.16. Retrovisores electrocrómicos de Gentex coporation [55]

El funcionamiento es mediante dos sensores sensibles a la luz. El primero es para detectar la cantidad de luz que llega al espejo y el segundo es para detectar si es de día, en cuyo caso se inhabilita el primero.

Otra de las aplicaciones posibles la conforman los EC como visualizadores de datos o papel electrónico. La principal ventaja es su bajo consumo, ya que algunos materiales EC tienen el llamado efecto memoria, pues tras aplicar una determinada corriente eléctrica el material EC mantendría su estado. Un ejemplo es el mostrado en la figura 1.17 donde se puede ver un display EC multicolor desarrollado por el National Institute for Materials Science (NIMS) y el Japan Science and Technology Agency (JST) [56].

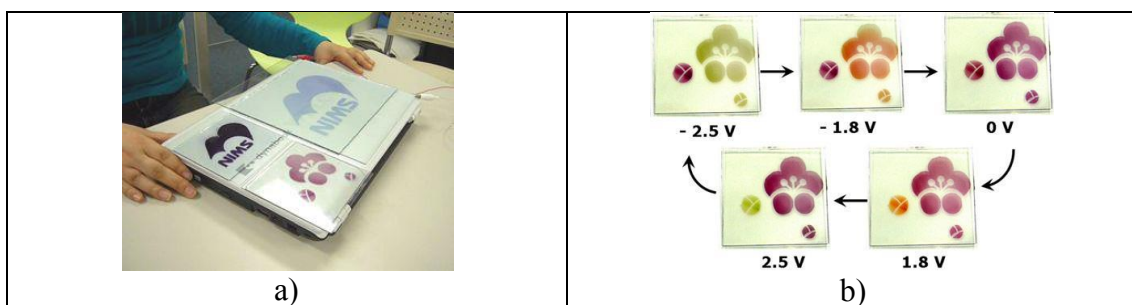


Figura 1.17. Display EC multicolor [56]

El display es además capaz de visualizar distintos patrones de colores aplicando diferentes tensiones como muestra la figura 1.17b.

Otro ejemplo es el mostrado en la figura 1.18, donde se usa una matriz de cristales electrocrómicos de manera que se pueden imprimir caracteres o gráficos [57]. Debido a

la lentitud tradicional de conmutación EC frente a los cristales líquidos, se postula habitualmente su uso en grandes paneles de información.

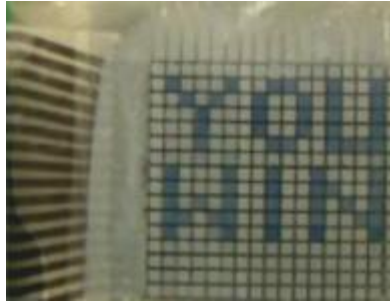


Figura 1.18. Display basado en una matriz EC [57]

Otra de las aplicaciones son los espejos conmutables, cuya principal ventaja es su capacidad tanto de transmitir como de reflejar el espectro visible e infrarrojo (IR) [58]. En otras palabras en su estado transparente dejaría pasar todas o una gran parte de las longitudes de onda, sin embargo cuando se encuentra en “modo espejo” reflejaría gran parte de éstas. Un ejemplo de espejo conmutable se muestra en la figura 1.19.



Figura 1.19. Espejo conmutable basado en EC [59]

Al reflejar y transmitir la energía IR, una de sus aplicaciones es controlar que la temperatura interna de satélites se aproxime a los 27°C [60]. Una muestra de esta propiedad es la mostrada en la figura 1.20.

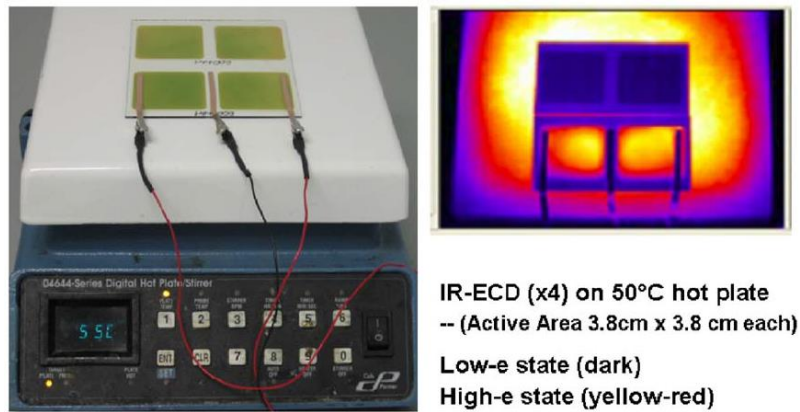


Figura 1.20. Muestra mediante cámara térmica de la eficiencia de un EC calentándose a 50°C [60]

En la figura 1.20 se puede ver como los dos EC que se encuentra conmutados (arriba a la derecha) su cara opuesta a la fuente de calor se mantiene a menor temperatura que los que se encuentran en estado transparente (abajo a la derecha).

Incluso se han utilizado nanofibras de material electrocrómico para cambiar el color de la ropa, como muestra la figura 1.21

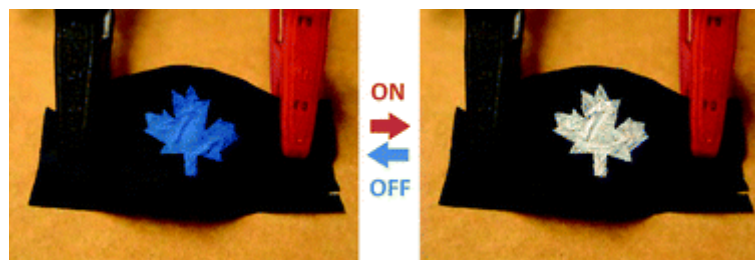


Figura 1.21. Ropa de material EC cambiando de color [61]

Otra de las aplicaciones es una solución para el sol. Bien en forma de gafas, como el prototipo que se mostró en la Figura 1.10 desarrollado por investigadores de la Universidad de Washington en 2007 [35], o bien en forma de casco de moto como el de la figura 1.22 [62] de funcionamiento similar, diseñado por la compañía Chromogenics, spin-off del grupo del Åmströmg Laboratory de la Universidad de Uppsala, Suecia.



Figura 1.22. Prototipo casco de moto en estado translucido y coloreado. [62]

Será una aplicación similar a esta última (gafas electrocrómicas), pero orientada plenamente a la discapacidad visual, la que motive el presente trabajo como se verá a continuación.

1.4 MOTIVACIÓN Y ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

El Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas, es un grupo de Investigación del Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Carlos III de Madrid formado por un conjunto de expertos en distintas áreas. La mayoría de los trabajos del grupo se centran en tres grandes líneas de investigación:

- ✚ Sistemas de comunicaciones ópticas (displays, filtros, conmutadores, multiplexores, etc.).
- ✚ Caracterización de componentes electroópticos (displays de cristal líquido, electrocrómicos, etc).
- ✚ Tecnologías asistenciales (ayudas técnicas a la movilidad, comunicación y percepción de personas discapacitadas).

Será dentro de las dos últimas líneas donde se enmarque el presente trabajo, el cual empezó en 2010 en colaboración con IK4-CIDETEC, Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Electroquímica de San Sebastián (España), el IOBA, Instituto



de Oftalmobiología Aplicada de Valladolid (España) y la Empresa INDO, dedicada a la comercialización de lentes oftálmicas y bienes de equipo para las ópticas y los oftalmólogos. El trabajo se enmarcó inicialmente en un Proyecto CENIT-E llamado CEYEC (Customized Eye Care), donde 12 empresas se unieron en un consorcio, de cara a fomentar la cooperación público-privada en investigación, con el objetivo común de “crear nuevos e innovadores productos encaminados a **personalizar** tanto el diagnóstico como el tratamiento de enfermedades oculares”.

Como se ha visto anteriormente, un cristal electrocrómico es un dispositivo capaz de cambiar de transparente a coloreado, cambiando su transmitancia para ciertas longitudes de onda, en unos pocos segundos. También se ha visto que para ciertas discapacidades visuales se usan varios pares de filtros o bien un par de ellos (foto-cromáticos) que cambian su estado, pero con el inconveniente de que necesitan de radiación UV que provoque el cambio, y además son lentos, con conmutaciones que duran del orden de varios minutos.

De aquí surgió el principal objetivo de este trabajo: **desarrollar una posible ayuda técnica para personas de baja visión utilizando materiales EC como filtros oftalmológicos**. La idea de usar filtros electrocrómicos combina la conmutación rápida (segundos) entre diferentes espectros de transmisión de los dispositivos con la capacidad de controlar la transparencia del dispositivo. Además, con el valor añadido de que el mismo usuario puede ejercer el control total sobre su dispositivo, o bien puede dejarlo en bucle cerrado (control automático) en función de las condiciones de iluminación detectadas en el entorno.

En este contexto, el presente trabajo fue desarrollado partiendo de distintos cristales electrocrómicos que fueron desarrollados por IK4-CIDETEC, siendo caracterizados electro-ópticamente por el autor del presente trabajo. El objetivo secundario del trabajo fue **desarrollar un nuevo sistema capaz de aplicar a los cristales diferentes tipos de señales eléctricas y medir y almacenar la transmitancia de los mismos a diferentes longitudes de onda, la corriente consumida y la temperatura, simultáneamente**. Este sistema permite obtener la señal eléctrica óptima a aplicar a los EC. Con las conclusiones de dicho estudio, el autor desarrolló una ayuda técnica para personas con baja visión,



siendo evaluada por el IOBA mediante un test de uso en personas con diferentes patologías. Indo proporcionó una montura en la que albergar la electrónica del dispositivo de dimensiones similares a soluciones comerciales.

En consecuencia los siguientes capítulos versarán sobre:

- ✚ El desarrollo de un sistema completo de caracterización de cristales electrocrómicos (Capítulo 2).
- ✚ Los resultados de la caracterización de varios EC, así como las conclusiones de qué tipo de señal aplicada al EC es a priori óptima (Capítulo 3).
- ✚ Cómo se ha desarrollado una nueva ayuda técnica, personalizable, para personas con baja visión (Capítulo 4).
- ✚ Los resultados obtenidos sobre la ayuda técnica incluyendo los resultados de un ensayo clínico con el prototipo desarrollado (Capítulo 5)
- ✚ Las conclusiones generales del presente trabajo así como trabajos futuros (Capítulo 6)



2 DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN ELECTROÓPTICA PARA CRISTALES EC

2.1 PUNTO DE PARTIDA

Se pretende obtener una forma de onda óptima que aplicada a un EC permita reducir los tiempos de conmutación y los costes en términos de energía. Por consiguiente, es necesario desarrollar un sistema capaz de medir el comportamiento de diferentes cristales electrocrómicos. Habida cuenta del objetivo de optimización, se necesitan definir claramente los parámetros sobre los que tendrá que centrarse la determinación del comportamiento. Así, se definirán o usarán los siguientes parámetros:

- ✚ Corriente Instantánea ($i(t)$): la corriente medida en cada instante temporal t .
- ✚ Tensión Instantánea ($v(t)$): la tensión medida en cada instante temporal.
- ✚ Transmitancia (%) para diferentes longitudes de onda λ , definida como:

$$T(\lambda) = \frac{V_{\text{fotodiodoTrasCristal}}}{V_{\text{fotodiodoDelanteCristal}}} \cdot 100 \quad (\text{E.c. 2.1})$$

- ✚ Temperatura

Para después analizar:

- ✚ Variación de la transmitancia en % (ΔT), atendiendo a los extremos alcanzados en la misma:

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} \quad (\text{E.c. 2.2})$$

- ✚ t_f o tiempo de oscurecimiento (tiempo en pasar del 90% al 10% de ΔT)

$$t_f = t(90\%) - t(10\%) = t((T_{\max} - (\Delta T \cdot 0.1))) - t((T_{\min} + (\Delta T \cdot 0.1))) \quad (\text{E.c. 2.3})$$

- ✚ t_r o tiempo de aclarado (tiempo en pasar del 10% al 90% de ΔT)

$$t_r = |t(10\%) - t(90\%)| = |t((T_{\min} + (\Delta T \cdot 0.1))) - t((T_{\max} - (\Delta T \cdot 0.1)))| \quad (\text{E.c. 2.4})$$

- ✚ Corriente eficaz (I_{ef})

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) dt} \quad (\text{E.c. 2.5})$$

- ✚ Potencia eficaz (P_{ef})

$$P_{ef} = I_{ef} \cdot V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt} \quad (\text{E.c. 2.6})$$

✚ Influencia de la temperatura en la relación t_r / t_f

A continuación, a modo de ilustración de algunas de estas definiciones, se muestra una gráfica (Fig. 2.1) donde se puede ver la evolución temporal de la transmitancia de un cristal conmutando entre el 70,48% y el 43,28%, por lo que ΔT es 27,2 %, t_f se calculará como el tiempo en pasar del 67,76% al 46% y t_r como el tiempo que tarda en pasar del 46% al 67,76%.

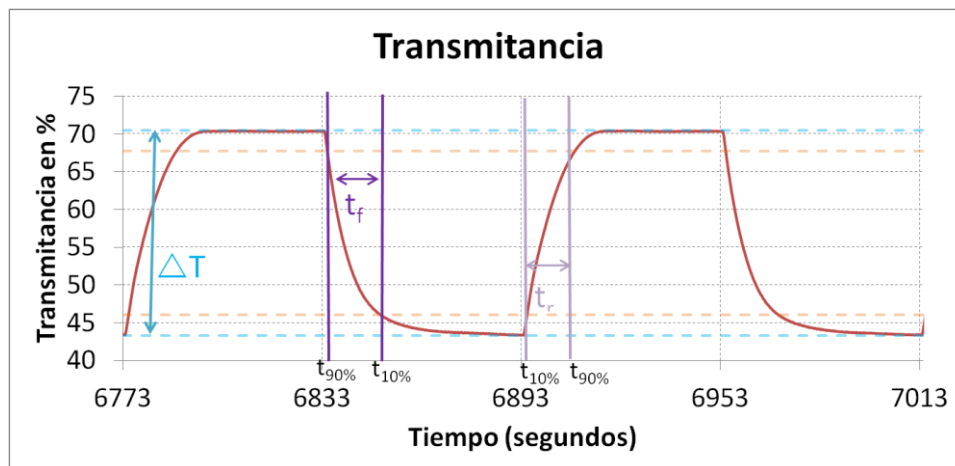


Figura 2.1. Descripción gráfica de variables.

El sistema de medida de la respuesta de cada muestra EC, a diferentes señales de excitación, se diseña usando una tarjeta de adquisición de datos, dos fotodiodos RGB (uno delante y otro tras el EC, a fin de medir la transmitancia en tiempo real en tres intervalos espectrales en el visible), una fuente luminosa, y un PC, como muestra la figura 2.2. También se usa un sensor de temperatura junto al cristal para monitorizarla en operación y encontrar relaciones de los parámetros de estudio con ella. En los apartados siguientes se describe con detalle la solución realizada.

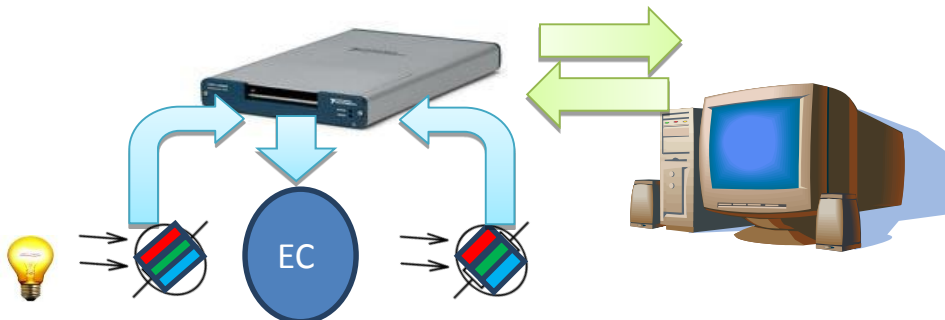


Figura 2.2. Diagrama del sistema.

2.2 DESARROLLO DEL SISTEMA

Para cumplir el objetivo se optó por desarrollar un sistema mediante una tarjeta de adquisición de datos en la que se necesitan al menos 9 entradas analógicas para medir:

- ✓ Cada una de las tres señales de cada fotodiodo RGB (6)
- ✓ La señal del sensor de temperatura (1)
- ✓ La tensión aplicada al cristal (1)
- ✓ La corriente que circula por el cristal (1)

También se requiere al menos una salida analógica para aplicar la señal de tensión de excitación al cristal. Se usa el software de desarrollo Labview por su compatibilidad, sencillez de uso y gran potencial del mismo a la hora de diseñar las formas de onda y permitir capturas simultáneas a su aplicación.

Se decidió usar la tarjeta NI 6343 (figura 2.3) por cubrir sobradamente las prestaciones anteriormente mencionadas, además de tener un ADC de 16 bits [63] dándonos una muy buena resolución en las medidas (de unos $153 \mu\text{V}$ si trabajamos entre 5 V y -5V).



Figura 2.3. Tarjeta de adquisición de datos NI6343[63]



Las principales características de sus 16 entradas analógicas son [63]:

- ✚ 16 bits de resolución
- ✚ Velocidad máxima de muestreo 500 Ksamples/s
- ✚ Tensión máxima de entrada $\pm 10V$
- ✚ Impedancia de entrada $10\text{ G}\Omega$ en paralelo con 100 pF

Las principales características de sus 4 salidas analógicas son [63]:

- ✚ 16 bits de resolución.
- ✚ Velocidad máxima de muestreo 900 Ksamples/s
- ✚ Tensión máxima de salida $\pm 10V$
- ✚ Impedancia de salida $0,2\ \Omega$
- ✚ Corriente de salida $\pm 5\text{mA}$

La tensión a aplicar para conmutar los cristales, según las recomendaciones iniciales de IK4-CIDETEC tras haber realizado experimentos de voltioamperometría cíclica, es de $1V$, por lo que estaríamos en condiciones de aplicar una tensión 10 veces superior a la recomendada.

La velocidad máxima de muestreo es muy superior a la necesaria ya que la velocidad de conmutación de un cristal electrocrómico es superior a 1 segundo [64]. Como se puede ver, en cuanto a las características de sus entradas analógicas, la tarjeta de adquisición de datos (TAD) también es muy superior a los requisitos necesarios.

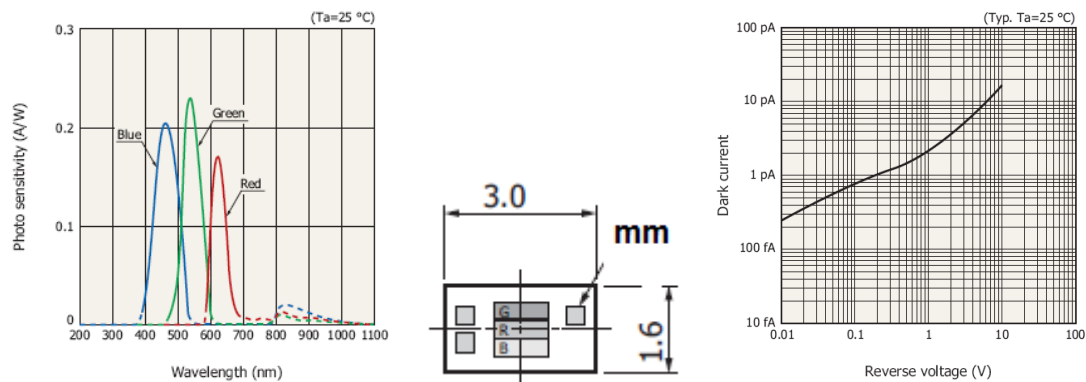
Aunque presumiblemente se espera tener que soportar unas corrientes superiores a 5mA e inferiores a 13mA [64], se implementará un buffer de salida capaz de suministrar suficiente corriente para que, aunque la corriente demandada por los cristales sea mayor que la suministrada por la tarjeta de adquisición, no haya problemas en mantener la tensión aplicada.

2.2.1 HARDWARE

2.2.1.1 SENSOR Y ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL LUMÍNICA

Se pretende utilizar una pareja de fotodiodos RGB para poder medir la intensidad de la señal lumínica delante del cristal y detrás de él, para deducir la transmitancia del mismo (Ecuación 2.1). El fotodiodo escogido fue el S10917-35GT de Hamamatsu, por su respuesta en el espectro visible y sus dimensiones reducidas: 3 mm x 1,6 mm (Fig.2.4). Las reducidas dimensiones de los cristales obligan a utilizar sensores de tamaño reducido, a fin de no viñetear el trasero con el delantero. Por otra parte, ya se escogen previendo su uso en la futura ayuda técnica a desarrollar en este trabajo, que se describe en el Capítulo 4, en la que el tamaño reducido del sensor será de gran importancia. Como se puede observar en la Figura 2.4, el fotodiodo escogido cuenta con tres superficies sensibles a la luz. Se trata de tres fotodiodos integrados en un solo encapsulado, uno de ellos sensible al intervalo espectral azul, uno al color rojo y otro al verde, entendiéndose para cada uno de estos colores en realidad el conjunto integrado en una respuesta espectral aproximadamente gaussiana centrada en las longitudes de onda de 460, 540 y 620 nm respectivamente (Fig. 2.4). El hecho de elegir un fotodiodo en el espectro visible y no infrarrojo, y en concreto un fotodiodo RGB, es que con este tipo de fotodiodo tenemos la posibilidad de identificar en un futuro no sólo la intensidad lumínica sino también el tipo de iluminante, a efectos visuales [65].

Las características específicas de la transducción y sensibilidad de este componente (S10917-35GT) vienen dadas según su hoja de características, apareciendo las más importantes en la figura 2.4. La fotosensibilidad o sensibilidad S , es la relación entre la corriente generada por el fotodiodo y la potencia de luz incidente ($S = \text{Fotocorriente [A]} / \text{Potencia de luz incidente [W]}$). Ésta Sensibilidad es dada en función de la longitud de onda de la fuente luminosa incidente (*Spectral response range*). Otro parámetro a tener en cuenta es la corriente en oscuridad I_D (Fig. 2.4), que es la corriente generada por el fotodiodo en ausencia de luz incidente.



▣ Absolute maximum ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Reverse voltage	V_R Max.	10	V
Operating temperature	T_{opr}	-25 to +85	°C
Storage temperature	T_{stg}	-40 to +85	°C

▣ Electrical and optical characteristics ($T_a=25\text{ °C}$, per element)

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Spectral response range	λ	Blue	-	390 to 530	-	nm
		Green	-	470 to 600	-	
		Red	-	590 to 680	-	
Peak sensitivity wavelength	λ_p	Blue	-	460	-	nm
		Green	-	540	-	
		Red	-	620	-	
Photo sensitivity	S	Blue ($\lambda=\lambda_p$)	0.15	0.2	0.25	A/W
		Green ($\lambda=\lambda_p$)	0.18	0.23	0.28	
		Red ($\lambda=\lambda_p$)	0.12	0.17	0.22	
Dark current	I_D	$V_R=1\text{ V}$, all elements	-	1	50	pA
Temperature coefficient of I_D	T_{CID}		-	1.12	-	times/°C
Rise time	t_r	$V_R=0\text{ V}$, $R_L=1\text{ k}\Omega$, 10 to 90 %	-	0.1	0.5	μs
Terminal capacitance	C_t	$V_R=0\text{ V}$, $f=10\text{ kHz}$	5	12	25	pF

Figura 2.4. Hamamatsu S10917-35GT [66].

A través del fotodiodo se produce la transducción de la intensidad de radiación luminosa a una medida eléctrica, de intensidad de corriente, pero es a través del acondicionamiento de la señal como se transforma la intensidad en tensión eléctrica. Esta transformación es necesaria para poder realizar la medida de la señal mediante un conversor Analógico-Digital de tensión.

Tras barajar diferentes esquemas de acondicionamiento de la señal, como usar una simple resistencia en serie con el fotodiodo polarizado en inversa y medir la diferencia de potencial en sus extremos, finalmente se optó por la robustez de un amplificador operacional ya que en su configuración de transimpedancia (Fig.2.5) presenta una baja impedancia tanto a su entrada como a su salida.

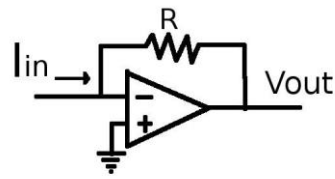


Figura 2.5. Amplificador de transimpedancia.

$$V_{out} = -R \cdot I_{in} \quad (\text{E.c. 2.7})$$

2.2.1.2 MEDIDA DE CORRIENTE

Partiendo de que nuestro sistema generará diferentes señales que se aplicarán al cristal, para medir la corriente que circula por el EC necesitamos implementar un circuito capaz de darnos este valor sin introducir variaciones en la misma. El diagrama de bloques del conjunto es el mostrado en la figura 2.6. Aunque la fuente de tensión V1 está integrada en la tarjeta de adquisición de datos (TAD), se ha dibujado externamente para resaltar que el circuito buscado está en serie con el EC. Por este motivo su impedancia debe ser lo más baja posible.

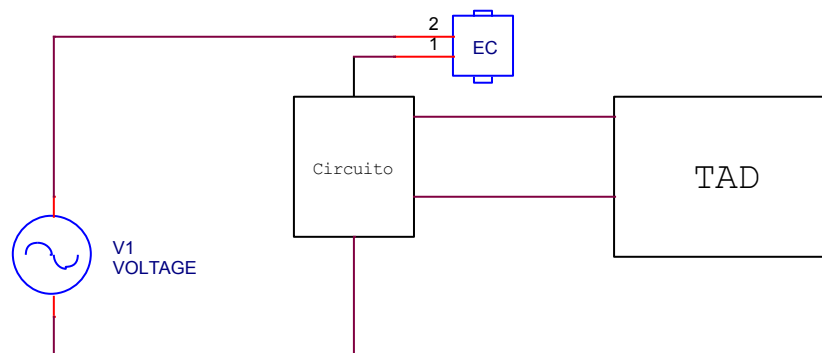


Figura 2.6. Diagrama de bloques (medida corriente)

Para saber cómo de baja debe ser esta impedancia para que no afecte al comportamiento del cristal, se propone el circuito equivalente de un cristal EC y que se corresponde con el mostrado en la figura 2.7 [64,67]

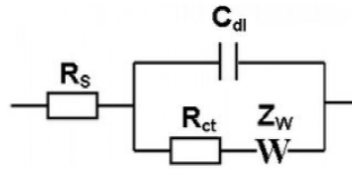


Figura 2.7. Impedancia de Warbug [64]

Siendo,

- ✚ R_s la resistencia de los contactos
- ✚ C_{dl} es la capacidad debida a las dos capas activas que forman el cristal
- ✚ R_{ct} es la resistencia a la transferencia de cargas de las capas
- ✚ W_s es la impedancia de Warburg debida a la difusión de iones

Sin entrar en profundidad en estos parámetros, la resistencia R_s es constante para cada cristal ya que es debida a la resistencia de los contactos y mayor de 100 Ohm [64,67].

Tras barajar diferentes esquemas de acondicionamiento de la señal, como por ejemplo colocar sólo una resistencia serie y mediante la ley de Ohm obtener la corriente que circula, finalmente se ha optado por un amplificador de instrumentación (el AD620 de Analog Devices) en modo diferencial (Fig. 2.8) ya que se puede usar una resistencia muy baja ($0,1 \Omega$ en este caso y al menos 1000 veces menor que las R_s habitualmente medidas en estos cristales [64]), de modo que se puede despreciar la misma en relación con la impedancia de los cristales y el resto del circuito.

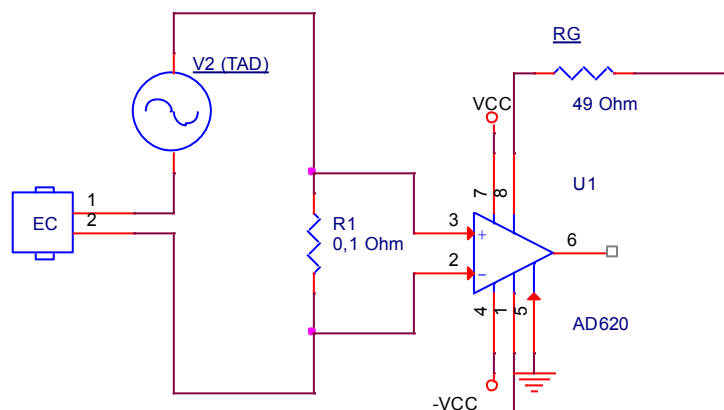


Figura 2.8. Esquema medida corriente.

Al circular una corriente por la resistencia R1, genera una diferencia de potencial en sus extremos que es multiplicada por la ganancia del amplificador y posteriormente leída por la TAD. Mediante la ley de Ohm ($I=V/R$) se conoce la corriente que circula por el EC.

Ajustando la ganancia del amplificador al valor de 1009, y dada la expresión de la hoja de características del AD620 mostrada en la ecuación 2.8 [68] se calcula el valor de la resistencia RG, dando como resultado el valor de 49 Ohm.

$$G = \frac{49,4 K\Omega}{R_G} + 1 \quad (\text{E.c. 2.8}) [68]$$

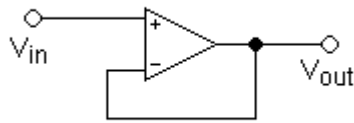
Como la resolución del ADC era de 153 μV según se vio en el apartado 2.2, y la ganancia del amplificador diferencial es de 1009, se podrán medir corrientes por encima de 1,52 μA y en pasos de 1,52 μA :

$$153 \mu\text{V}/1009=152 \text{ nV} \quad \rightarrow \quad 152\text{nV}/ 0,1 \text{ Ohm} = 1,52 \mu\text{A}$$

2.2.1.3 ETAPA DE SALIDA

Como se indicó, en las características de la tarjeta de adquisición de datos, hay una corriente máxima de salida de cada canal del DAC de $\pm 5\text{mA}$, por lo que se hace necesario incluir una etapa de salida para generar la corriente capaz de conmutar los cristales EC. La necesidad radica en suministrar una cantidad de corriente suficiente para que, aunque la corriente demandada por los cristales EC conectados a la salida sea mayor de 5mA, no haya problemas en mantener la tensión aplicada.

Para este propósito se ha optado por un amplificador (AD8546 de Analog Devices) en modo seguidor (proporciona a la salida la misma tensión que a la entrada) como muestra la figura 2.9, con una impedancia de entrada muy alta (10 $\text{G}\Omega$) y prácticamente nula a la salida, permitiendo suministrar hasta 20mA [69].



$$V_{OUT} = V_{IN} \quad (\text{E.c. 2.9})$$

Figura 2.9. Amplificador operacional seguidor de tensión.

2.2.1.4 MEDIDA DE LA TEMPERATURA

Como se comentó anteriormente, se quiere medir la temperatura ambiente al mismo tiempo que la transmitancia con el objetivo de conocer si ésta afecta al comportamiento de los EC en cuanto a tiempos de conmutación y la propia transmitancia.

Para la medida de la temperatura ambiente y así analizar su influencia en los EC, se ha optado por una de las configuraciones más sencillas (Fig. 2.10). Se trata del sensor de temperatura de precisión LM335 de Texas Instruments, el cual presenta a su salida una tensión proporcional a la temperatura ($10\text{mV}/^\circ\text{C}$) [70], conectado a una entrada analógica de la TAD.

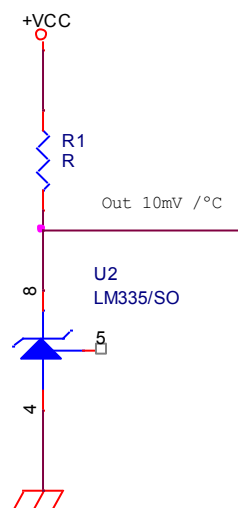


Figura 2.10. Esquema sensor temperatura

Este sensor se coloca en un lugar próximo al cristal como muestra la figura 2.19b.



2.2.2 SOFTWARE

En este apartado se presenta el software desarrollado sin entrar en detalle pues excede al propósito del presente trabajo. A grandes rasgos es un entorno gráfico donde se configura la forma de onda a aplicar al EC, los parámetros de muestreo (frecuencia de muestreo y número de muestras) de las variables presentadas en el apartado 2.1, como son la corriente, tensión, transmitancia y temperatura, para su posterior adquisición y guardado automático en uno o varios ficheros compatibles con Microsoft Excel.

El entorno de programación escogido ha sido el Labview versión 2010. Su elección es obvia por ser el entorno ofrecido por la propia marca de la tarjeta de adquisición de datos (National Instruments). Además el software permite una programación rápida pero potente en cuanto a prestaciones.

A continuación se muestra, a grandes rasgos, el autómatas programado (Fig.2.11) así como la interfaz gráfica (Fig. 2.12-2.18):

Como se aprecia en el diagrama de estados (Fig. 2.11) el autómatas comienza a ejecutarse en el estado “inicio” en el que se mantiene ejecutándose mientras no se elija la opción salir o bien la opción “login”. Si la validación del usuario es correcta, pasa al estado “idle” hasta que alguna opción sea seleccionada, momento en el que se ejecuta esa opción y se regresa al estado “idle”.

Tras la validación de usuario, si se pulsa la opción adquirir, el sistema comienza a adquirir datos según la velocidad de muestreo fijada en la opción configurar, que será detallada más adelante.



Figura 2.11. Diagrama de estados del Autómata.

En la figura 2.12 se puede ver la ventana inicial de la aplicación.

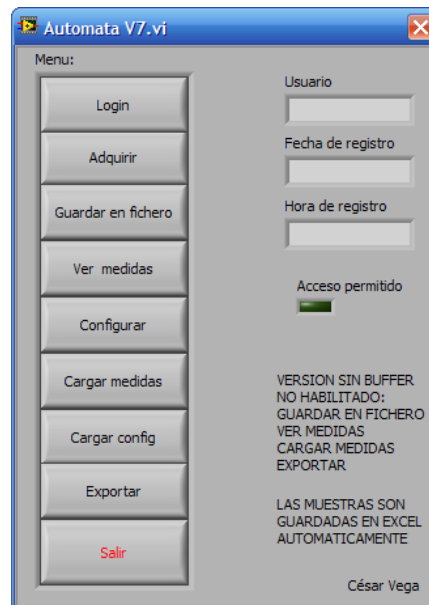


Figura 2.12. Pantalla inicial del software.

Tras introducir un usuario y una contraseña válidos se habilitan las demás funcionalidades, además se enciende de color verde el indicador “acceso permitido” junto a los datos de inicio de sesión del usuario (Fig.2.13).

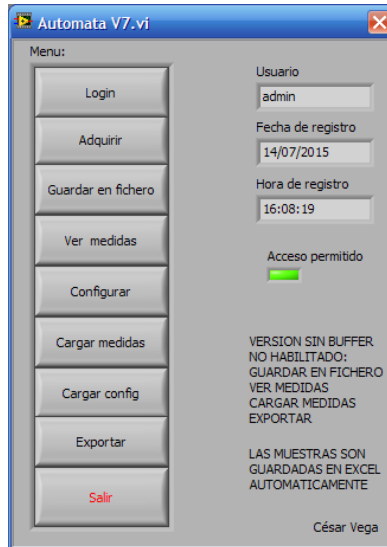


Figura 2.13. Tras introducir login y password correcto (estado idle)

En la opción Configurar, podemos configurar tanto los parámetros de adquisición como de la generación de señales (Fig.2.14) cuyos valores son almacenados en un clúster para su posterior uso en la adquisición de señales.

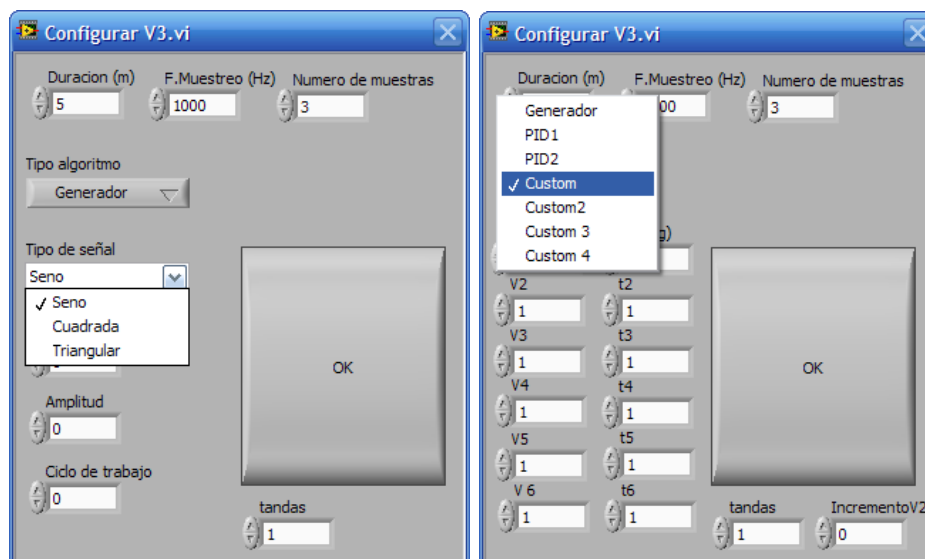


Figura 2.14. Ventana de configuración.

Algunos de estos parámetros son:

- ✚ Duración: es tiempo total de adquisición (en minutos)
- ✚ F.Muestreo: La frecuencia de muestreo (Hz)
- ✚ Número de muestras: El número de muestras a tomar cada $1/f.muestreo$.

- ✚ Tipo de algoritmo: Selección del tipo de señal a aplicar al cristal. (En función del tipo de algoritmo seleccionado nos aparecerán una serie de parámetros a configurar, como se verá)
- ✚ Tandas: Las veces que se repetirá el proceso configurado.

Como ejemplo, podemos observar figura 2.15:

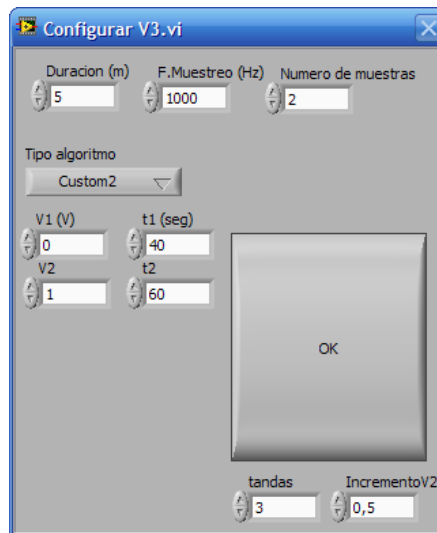


Figura 2.15. Ejemplo de configuración

Donde el comportamiento es el siguiente:

Al ser el parámetro *tandas* = 3, hay tres fases bien diferenciadas,

- Primero, durante 5 minutos (*duración*) se aplica una señal de 0V (*V1*) durante 40 segundos (*t1*), y posteriormente 1V (*V2*) los siguientes 60 segundos (*t2*) (configurada según el algoritmo 1, que se presentará), mientras toma 2 muestras (*numero de muestras*) cada 1ms ($1/F.Muestreo$).
- Seguidamente, durante otros 5 minutos se aplica una señal de 0V durante 40 segundos y 1,5V los siguientes 60 segundos, a la vez que se toman 2 muestras cada 1ms (se ha incrementado la tensión en 0,5V acorde al parámetro *incrementoV2*).
- Para finalizar, durante otros 5 minutos se aplica una señal de 0V 40 segundos y 2V los siguientes 60 segundos a la vez que se toman 2 muestras cada 1ms.

Una vez configurados los parámetros tras pulsar el botón *adquirir*, el sistema empieza a trabajar aplicando la señal ajustada mientras registra y visualiza los parámetros:

- ✚ Instante de tiempo.
- ✚ Corriente Instantánea (I) que circula por el cristal.
- ✚ Tensión Instantánea (V) aplicada al cristal.
- ✚ Tensión Instantánea (V) para cada longitud de onda de los fotodiodos.
- ✚ Transmitancia (%) para cada longitud de onda.
- ✚ Temperatura.

Se puede ver un ejemplo de estos parámetros en las figuras 2.16 y 2.17 donde se muestra una captura de pantalla del software desarrollado mientras se ejecuta la adquisición.

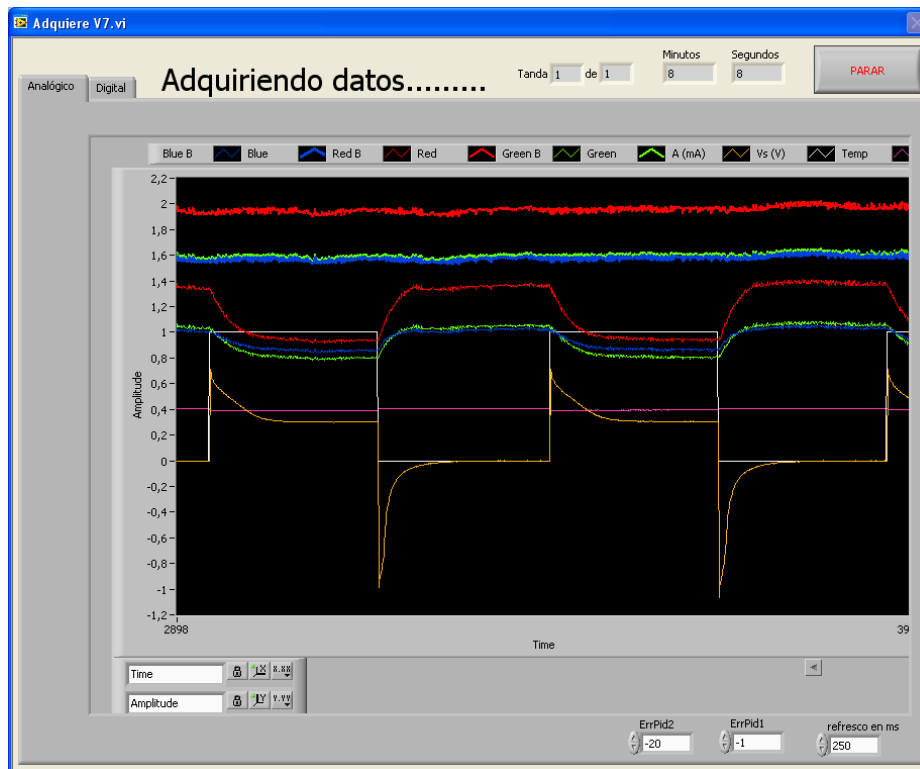


Figura 2.16. Visualización de datos en modo analógico.

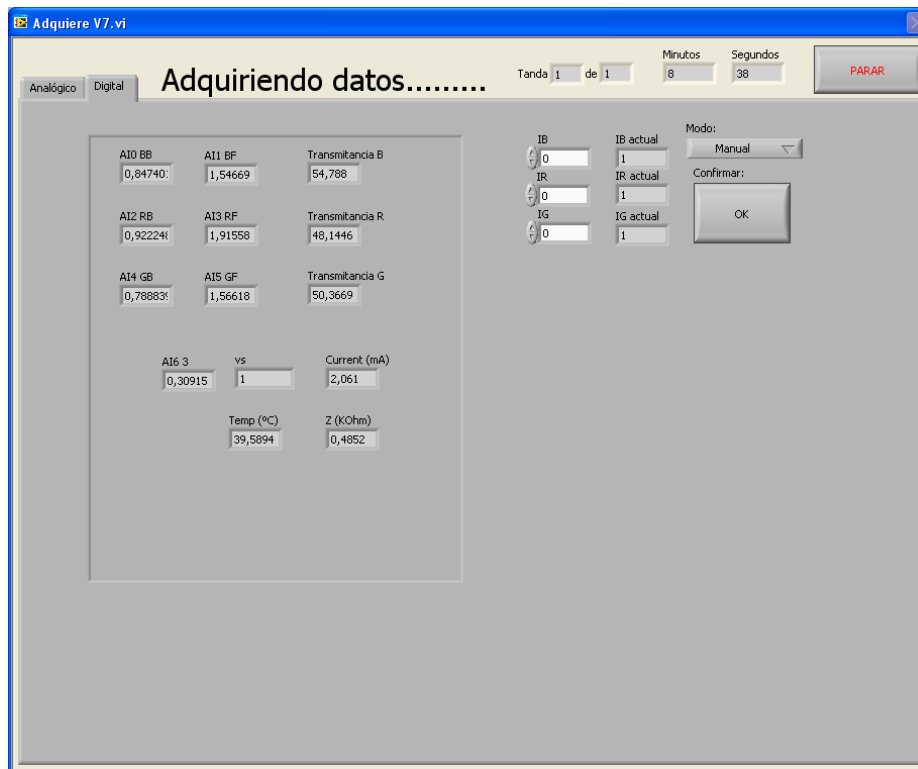


Figura 2.17. Visualización de datos en modo digital

Destacar que, a la vez que muestrea, el programa guarda los datos en uno o varios ficheros (dependiendo del volumen de datos) de formato compatible con Microsoft Excel para facilitar su posterior procesado, como muestra la figura 2.18:

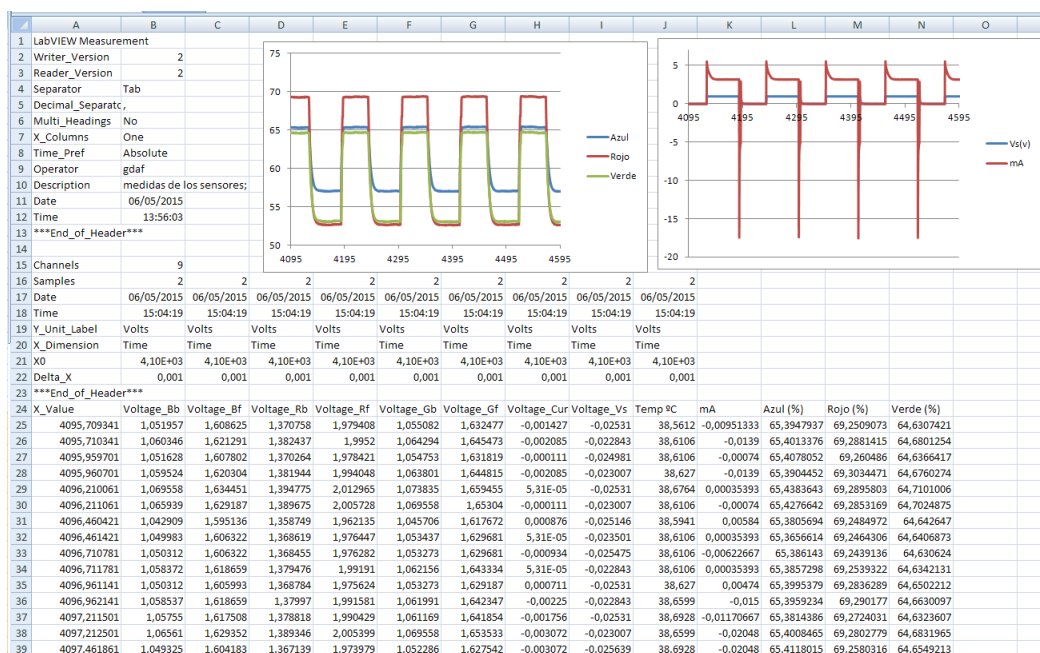


Figura 2.18. Ejemplo de fichero de muestreo.

Para hacer las medidas se coloca un iluminante a una distancia de 30 cm de la tarjeta de adquisición de datos donde se encuentra el EC y los fotodiodos conectados, de acuerdo al esquema visto en la figura 2.2 y como muestra la imagen 2.19b. Se ubica un fotodiodo delante y otro tras el EC de modo que el cociente de ambos proporciona la transmitancia del EC (Ec. 2.1), mientras se mide la tensión aplicada, corriente instantánea y temperatura ambiente.

Para hacer las medidas se ha utilizado una lámpara incandescente cuyas características espectrales son similares a las de un iluminante CIE tipo A (en la Figura 2.19 se puede ver una imagen del iluminante, y en la Figura 2.20 su espectro).

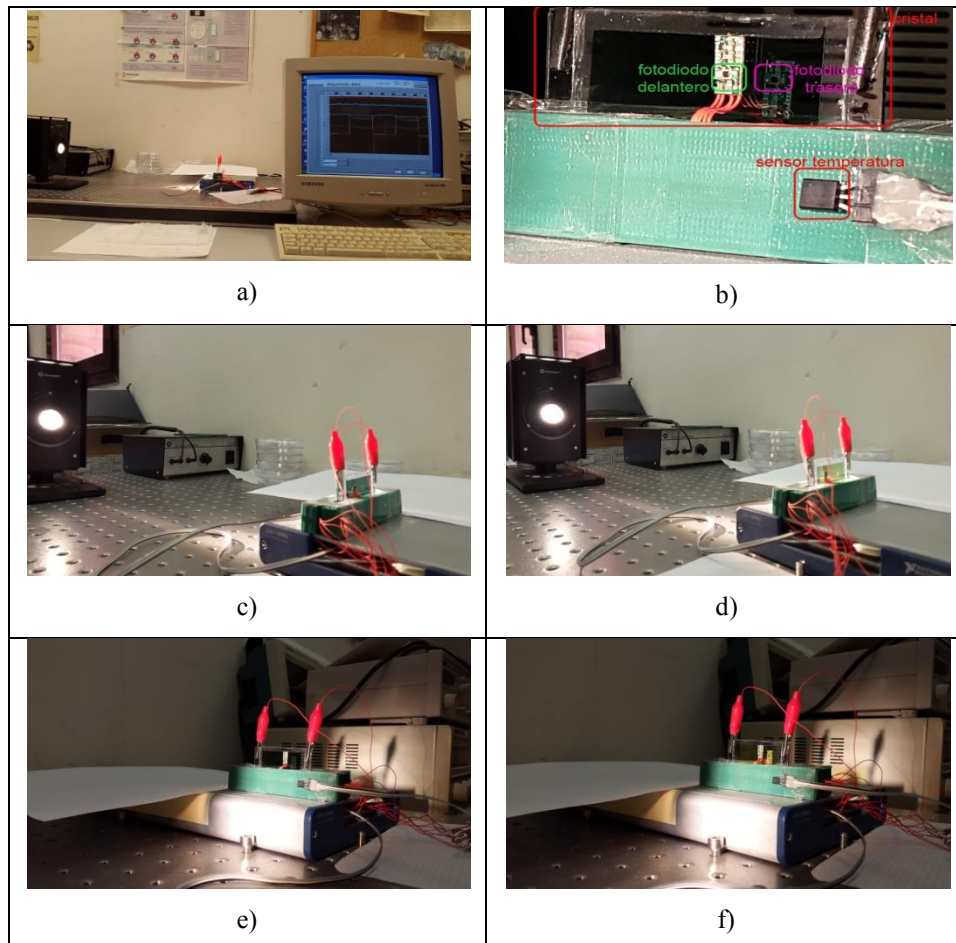


Figura 2.19. Sistema completo con lámpara

En la figura 2.19 c) y e), se puede apreciar el cristal en su estado coloreado, mientras en las figura 2.19 d) y f) en su estado de aclarado.

Como se aprecia en la figura 2.20 la lámpara halógena utilizada tiene una mayor irradiancia para longitudes de onda cercanas a los 650 nm (correspondiente al color rojo), por lo que cabe esperar medir las variaciones de transmitancia en torno a esa longitud de onda con mayor precisión que en el intervalo azul. En cualquier caso, la resolución de las medidas es suficiente como para medir una transmitancia, especialmente en el intervalo rojo del espectro ya que vamos a utilizar unidades relativas.

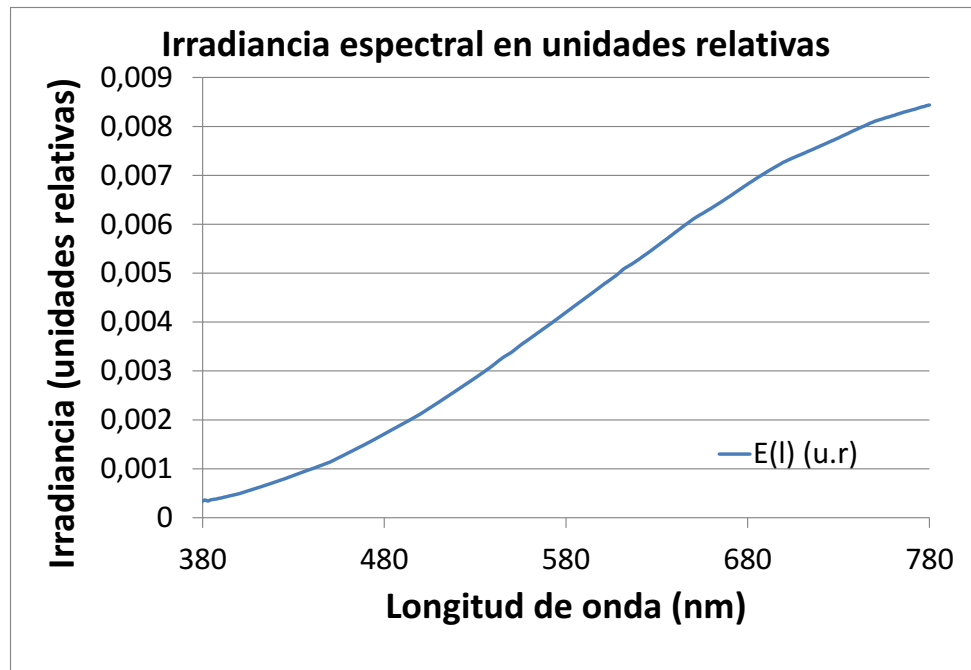


Figura 2.20. Medidas realizadas con espectrorradiómetro MINOLTA CS1000 en el CSIC.





3 CARACTERIZACIÓN ELECTROÓPTICA






El objetivo del presente capítulo es probar diferentes algoritmos de conmutación, con el sistema descrito en el capítulo 2, sobre diferentes cristales, de modo que podamos encaminarnos hacia el óptimo en términos de respuesta y consumo, así como por la ciclabilidad (estabilidad en el tiempo) que provocan.

3.1 COMPOSICIÓN DE LOS CRISTALES

Para realizar las diferentes caracterizaciones se han empleado cristales con material electrocrómico de tipo viológeno, fabricados por IK4-CIDETEC. El sustrato utilizado ha sido ITO/cristal de 30 Ohms con dimensiones de 5 x 2,5 cm. Todos los dispositivos se han rellenado con una mezcla electroquímica, detallada más adelante, por capilaridad, y se han sellado los orificios con silicona y posteriormente todo el perímetro con resina epoxi. El espaciador utilizado para los diferentes espesores fue *surlyn* de 60 y 100 micras. La mezcla EC fue preparada como sigue: primero se mezcla durante 1 hora a temperatura ambiente dibromuro de 1'-dietil-4,4'-bipiridilo (0.77 wt%), tetrafluoroborato de 1-butil-3-metilimidazol (43.87 wt%) y carbonato de propileno (54.84 wt%). Se añade a la mezcla Ferroceno (0.02 wt%) seguido de la adición de 5,10-dihidro-5,10-dimetilfenacina (0.50 wt%). La mezcla resultante fue removida durante 15 minutos.







El resultado final fueron 25 cristales, 5 dispositivos de cada espesor, de los siguientes espesores (los cuales fueron proyectados pensando en los espesores mínimo y máximo con los que se podrían fabricar las capas de material EC dentro de una estructura de lente oftálmica, de cara a la aplicación descrita en el Capítulo 4):

-  60 micras
-  100 micras.
-  160 micras.
-  200 micras.
-  260 micras.

Cuatro de los cristales se han usado para determinar la tensión óptima a aplicar (apartado 3.2), y veinte al estudio de ciclabilidad y determinación del algoritmo óptimo (apartado 3.3).

3.2 DETERMINACIÓN DE V_P

Inicialmente se intenta establecer el rango de tiempos y tensiones de conmutación en el que se encajarán los diferentes parámetros de las señales a aplicar a cuatro de los dispositivos suministrados:

-  1 EC de 260 μ m
-  1 EC de 200 μ m
-  1 EC de 160 μ m
-  1 EC de 60 μ m

Conocidos estos rangos, será fácil seleccionar los niveles y tiempos de conmutación a aplicar para las diferentes formas de onda.

IK4-CIDETEC había realizado estudios previos de voltioamperimetría cíclica sobre las mezclas viológenas usadas, arrojando un valor de tensión redox de entre 0.7 V y 0.8 V. A raíz de ello, se sugirió por su parte que la conmutación de los dispositivos fabricados finalmente se realizara sobre 1V de tensión, valor similar al que se puede encontrar en la

bibliografía para resultados de voltioamperometrias cíclicas de otros componentes electrocrómicos [67,71-76].

Para comprobar hasta qué punto se puede incrementar la tensión sobre este valor, sin perjuicio de la estabilidad de las transmitancias obtenidas (ciclabilidad) y mejorar parámetros como la velocidad de conmutación o el contraste de la misma, se realizó una primera prueba (durante 10 ciclos) con los cuatro cristales mencionados anteriormente a diferentes tensiones.

Estas tensiones de conmutación, se denotaran como V_p , siendo V_p : 0,7V, 1V, 1,3V, 1,6V y 1,9V, por lo que la señal final aplicada para determinar el tiempo de conmutación y variaciones de transmitancia posibles será: 0V \rightarrow 120 segundos y $V_p \rightarrow$ 120 segundos, tiempo que se considera a priori suficiente para lograr una conmutación estable (Fig. 3.0), ya que normalmente son menores de 60 segundos [64,77], obteniendo los resultados experimentales de la figura 3.1a y 3.1b.

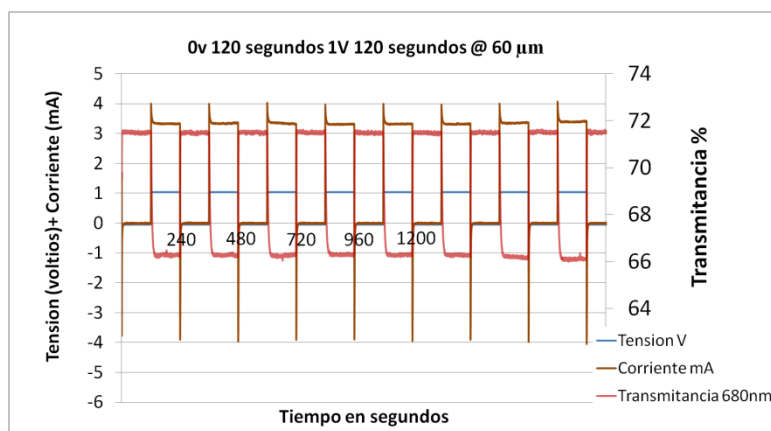


Figura 3.0. Ejemplo temporal de conmutación.

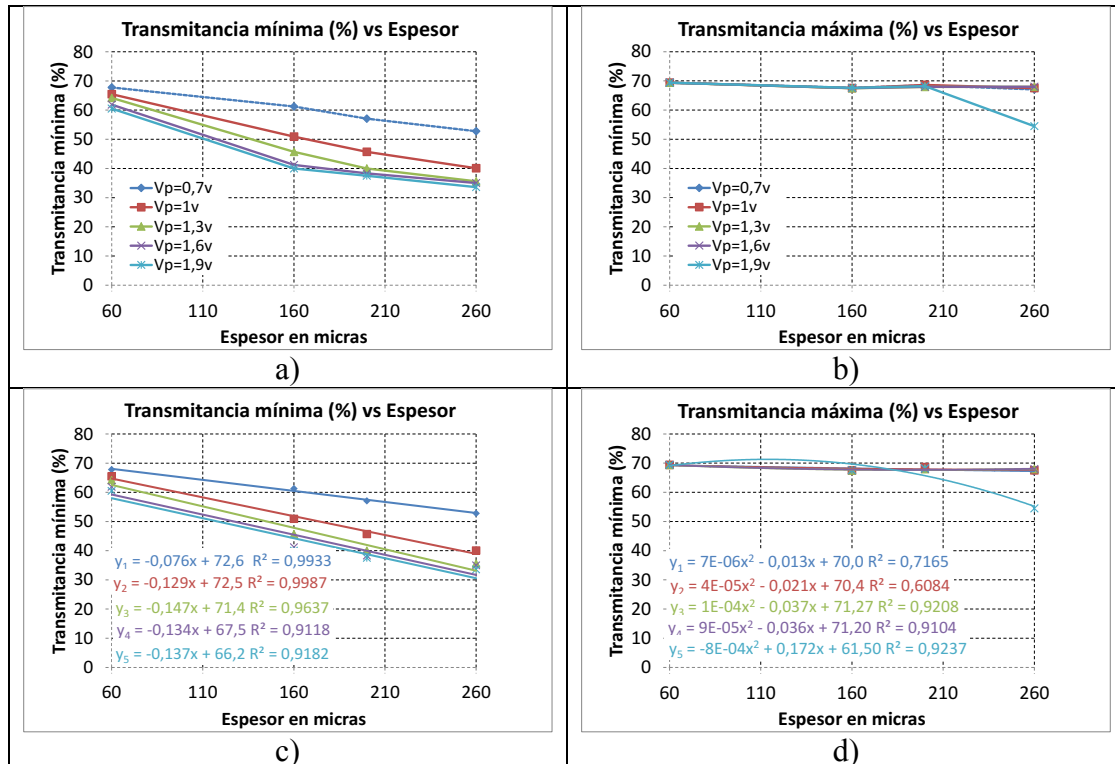


Figura 3.1. Transmitancias vs espesor. a) y b): medidas experimentales. c) y d): ajustes.

En cuanto a **transmitancias**, se puede apreciar que la transmitancia mínima disminuye linealmente con la tensión aplicada (Fig. 3.1a y c), siendo mayor para menores espesores, mientras que la máxima transmitancia se mantiene casi constante excepto para la tensión más alta a 260 micras (Fig.3.1b y d) ajustándose a una tendencia polinómica de orden 2 pero con un factor cuadrático muy bajo. Como se reforzará más adelante, se postula que a tensiones y espesores altos el cristal puede acelerar su degradación (efecto observado en la figura 3.1d a la tensión de 1,9V). Es reseñable comentar la alta linealidad de la dependencia de la transmitancia mínima con el espesor, especialmente llamativa para el caso de aplicar una tensión de 1 V, con un coeficiente de regresión lineal de 0,998. Los dos hechos, unidos, empiezan a orientar al uso de dicha tensión para optimizar la respuesta en el cristal, ya que la linealiza en función del espesor (Fig. 3.1c y d) y está suficientemente lejos de tensiones que aceleran la degradación.

Respecto a los **tiempos de conmutación** (Fig. 3.2) se presentan los siguientes resultados:

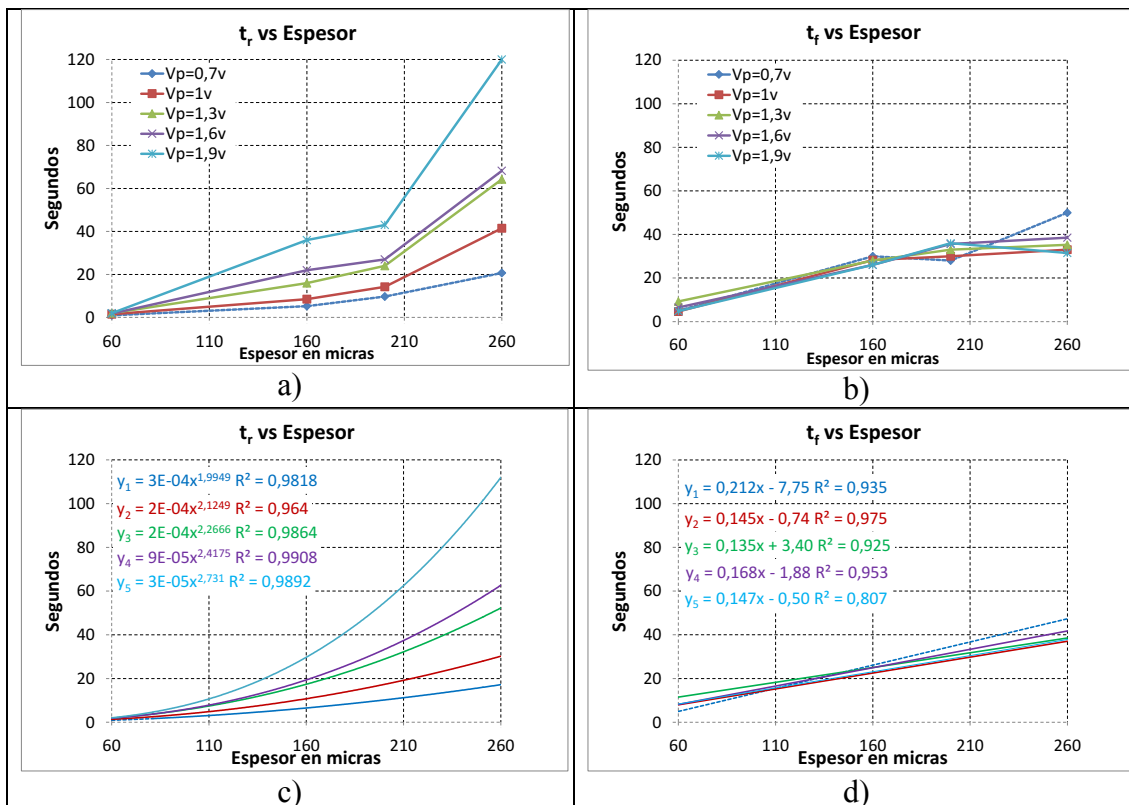


Figura 3.2. t_r y t_f vs espesor. a) y b): medidas experimentales. c) y d): ajustes.

El t_f es bastante lineal con el espesor (Fig. 3.2b), especialmente de nuevo para la tensión de 1V, con un coeficiente de regresión lineal de 0,975, siendo no obstante una dependencia similar (entre 0,14 y 0,2 segundos/μm) en todos los casos (Fig.3.2b y 3.2d). El espesor no parece pues influir en el tiempo de oscurecimiento, por lo que puede deducirse que éste es directamente dependiente de la dinámica de la reacción redox que se está provocando; como se verá en breve, la corriente demandada por el EC será aquella que necesite, dependiente de la naturaleza de esta reacción y de la cantidad de material a reaccionar, inyectándose más o menos según la misma. El que el tiempo de oscurecimiento no dependa de la tensión aplicada implica que siempre estamos por encima de la tensión de reacción redox. En efecto, IK4-CIDETEC indicó el valor inicial de 1 V porque está suficientemente por encima de esa tensión de reacción como para que se produzca con rapidez pero no tanto como para hacer una conmutación profunda que degrade el material [78]. t_r aumenta en una tendencia aparentemente exponencial con el espesor, aumentando a su vez si la tensión aplicada es mayor (Fig.3.2a y 3.2c) ajustando a valores menores de 30 segundos en todos los espesores para las tensiones de 0,7 V y 1V. En efecto, estos datos podrían confirmar el circuito equivalente mostrado en el capítulo 2 (Fig. 2.7) donde se puede apreciar que el EC tiene un componente capacitivo

en serie con un resistivo, de manera que al dejar de aplicar tensión el comportamiento del mismo se podría asimilar a la descarga de un condensador con una resistencia en serie.

Se presentan ahora los resultados por separado de ΔT ($T_{\max} - T_{\min}$), para el fotodiodo rojo porque es el que ofrece más contraste, en función de t_r y t_f y para cada espesor:

Para el cristal de 60 micras (Fig. 3.3) se obtiene que si se busca un compromiso entre la tensión aplicada, el tiempo de conmutación y la variación conseguida en la transmitancia (ΔT), la mejor tensión sería 1,9 en términos de ΔT , si bien es la más baja en comparación con otros espesores, no existiendo diferencias muy significativas en tiempos de conmutación, estando todos los t_r por debajo de 5 segundos y los t_f de 10 segundos.

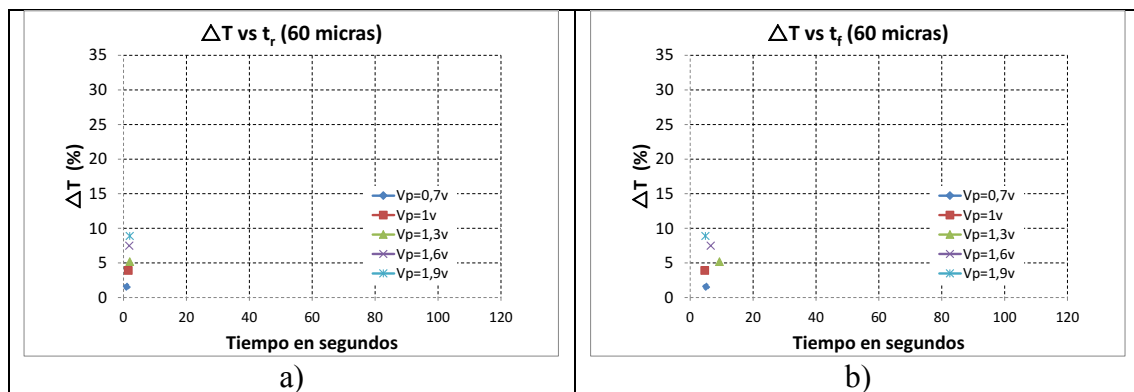


Figura 3.3. ΔT vs t_r y t_f (60 micras)

Para 160 micras (Fig. 3.4) teniendo en cuenta un compromiso entre tiempo de conmutación / variación de transmitancia, sería ventajosa la tensión de 1V ó 1,3V: aunque el t_f es similar para todas las tensiones (en torno a 28 segundos) como muestra la figura 3.4b, el t_r es mucho menor para la tensión de 1V (8 segundos) seguido de 1,3V (16 segundos) y 1,6V (22 segundos). Aquí comienza a apreciarse más claramente una dependencia interesante en t_r en función de ΔT (Fig. 3.4a), pues parece un crecimiento ligeramente exponencial con tendencia a un máximo. Es decir, se puede conseguir disminuir la transmitancia hasta un máximo valor, a costa de incrementar el tiempo de conmutación, quizá incluso en exceso para aplicaciones visuales, y la tensión aplicada. En tanto, t_f sigue siendo bastante independiente de ΔT (Fig. 3.4b). Éste tiempo no depende, prácticamente, de la tensión aplicada, reforzando el hecho mencionado

anteriormente: la reacción se produce independientemente de ésta por encima de un valor determinado.

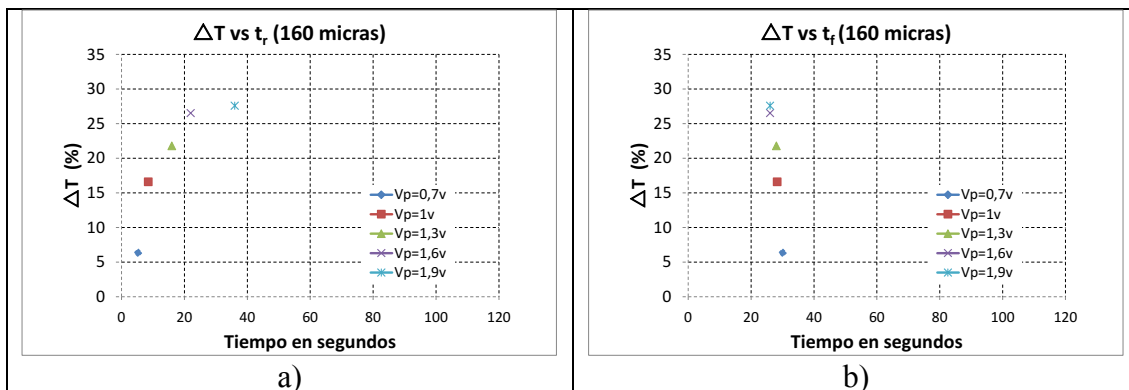


Figura 3.4. ΔT vs t_r y t_r (160 micras)

Para 200 micras (Fig. 3.5) teniendo en cuenta un compromiso entre tiempo de conmutación / variación de transmitancia, resulta ventajosa la tensión de 1V ó 1,3V, algo mejor 1V por su bajo t_r (14 segundos) como se puede ver en la figura 3.5a, siendo bastante similar el t_f (en torno a 30 segundos) para todas las tensiones. Para 200 micras ΔT parece tener también un cierto crecimiento exponencial con tendencia a un máximo (en torno al 30% en este caso). Mientras, t_f continúa bastante independiente de ΔT (Fig. 3.5b), volviendo a confirmar el hecho que la reacción se produce en un tiempo similar independientemente de la tensión (siempre y cuando esté por encima de la tensión redox).

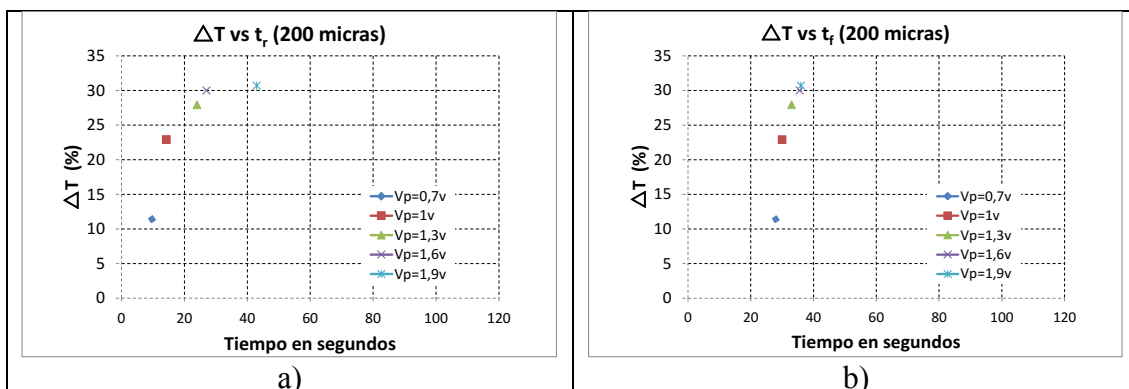


Figura 3.5. ΔT vs t_r y t_r (200 micras)

Para 260 micras (Fig. 3.6) teniendo en cuenta un compromiso entre tiempo de conmutación / variación de transmitancia, saldría ganando, sin lugar a dudas, la tensión

de 1V, y aun así se podría considerar un poco alto el t_r (40 segundos) como muestra la Figura 3.6a. Se aprecia que para este espesor también han ocurrido dos sucesos extremos: la dependencia con t_r ha pasado de tener una apariencia exponencial con tendencia a un máximo a asimilarse más a una función polinómica de orden 2. Se encuentra de hecho un coeficiente de correlación de 0,99 (Fig. 3.7). Pero además el punto a 1.9V no sólo se ha salido de esa tendencia exponencial de espesores inferiores sino que ha hecho caer bruscamente ΔT , denotando que esta tensión no es nada conveniente para el dispositivo en términos de contraste y podría indicar un degradado en el EC.

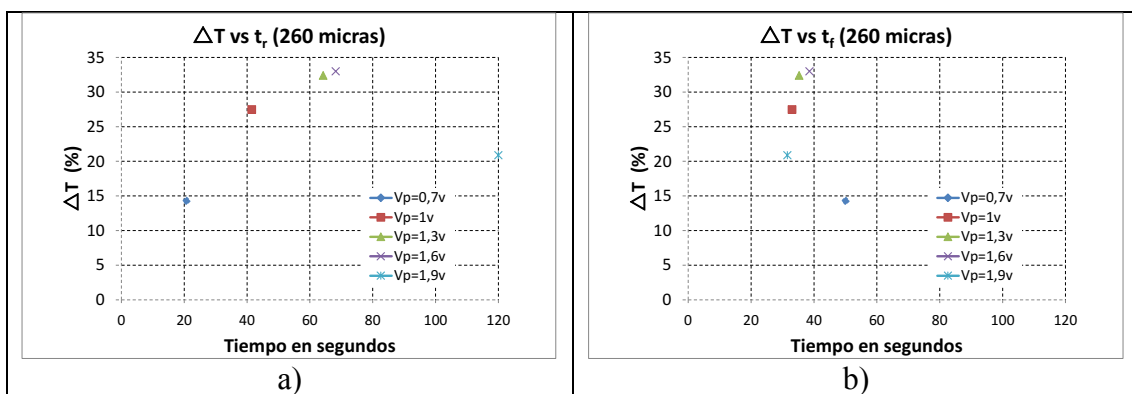


Figura 3.6. ΔT vs t_r y t_r (260 micras)

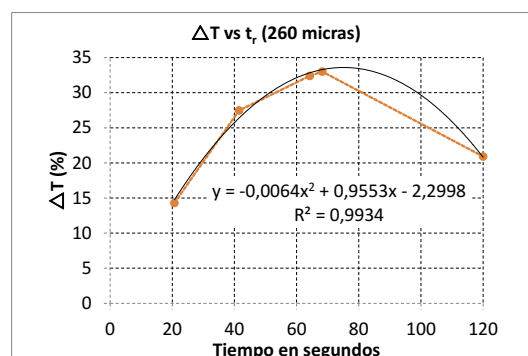


Figura 3.7. ΔT vs t_r @260 micras (ajuste)

Así mismo, el tiempo de oscurecimiento en 0,7V empieza a ser claramente mayor (casi el doble) que el de otras tensiones (Fig. 3.5b), denotando que esa tensión, aun estando por encima de la redox, no es suficiente como para inyectar la corriente necesaria en el dispositivo para conmutarlo por completo con rapidez, apreciándose un comportamiento dinámico más lento, y un contraste finalmente obtenido mucho menor. Dado que este valor de tiempo se aproxima al semiperiodo de la señal introducida, se deduce que simplemente no se llega a establecer una conmutación completa del dispositivo.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se puede apreciar cómo el tiempo de aclarado (t_r) es mayor para tensiones superiores a 1V, sobre todo al aumentar el espesor (figuras 3.4-3.6) situándose para la tensión de 1V en 8 segundos @160 μm , 14 segundos @200 μm y 41 segundos @260 μm . Mientras el tiempo de oscurecimiento (t_f) es similar para todas las tensiones en un mismo espesor (siempre y cuando se supere un cierto valor) por lo que la tensión de 1V es la que obtiene los mejores resultados, siendo aun razonablemente bueno el contraste para espesores mayores de 60 μm ($\Delta T = 17$ @ 160 μm , $\Delta T = 30$ @ 200 μm , $\Delta T = 33$ @ 260 μm).

Además, según las recomendaciones de IK4-CIDETEC y las conclusiones de las gráficas anteriores, cuanto mayor es la tensión, más rápido es el degradado. Esta conclusión se puede reforzar con las figuras 3.8-3.11, que corresponden con el ciclado del cristal de 260 micras a las tensiones de 1,3 V, 1,6 V, y 1,9 V, donde al aplicar 0V tras haber aplicado 1,9V (segundo 2640) se aprecia:

- ✚ Una disminución de la transmitancia en los siguientes ciclos (Fig. 3.8)
- ✚ Una disminución de la transmitancia (momentánea) justo al aplicar 0V (Fig.3.10)
- ✚ Un aumento de la corriente (figuras 3.9 y 3.11)

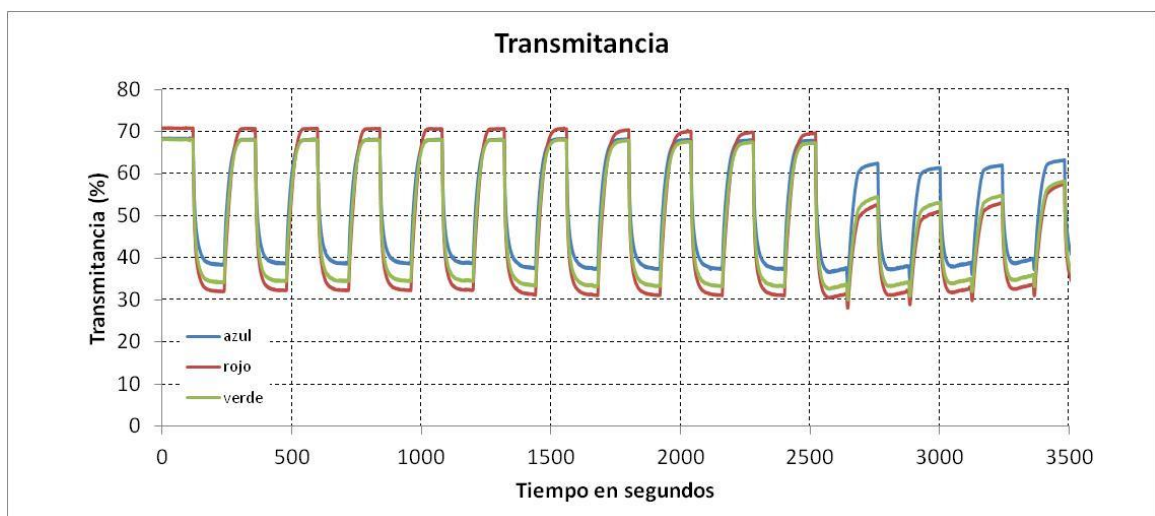


Figura 3.8. Transmitancia cristal 260 micras a tensiones 1,3V, 1,6V y 1,9V

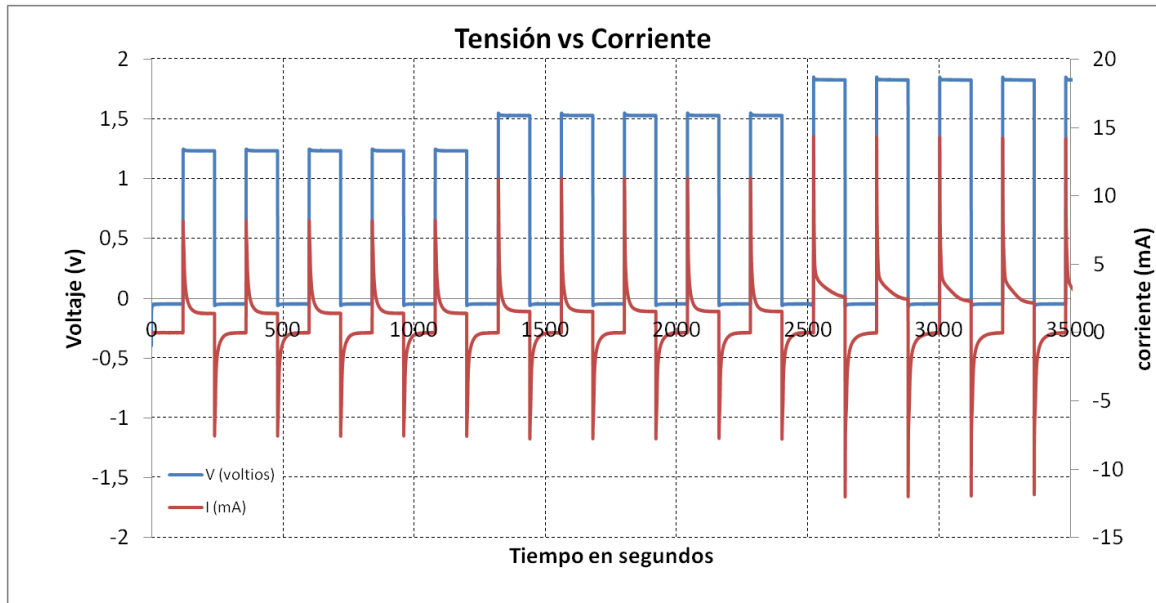


Figura 3.9. Tensión vs Corriente cristal 260 micras a tensiones 1,3V, 1,6V y 1,9V

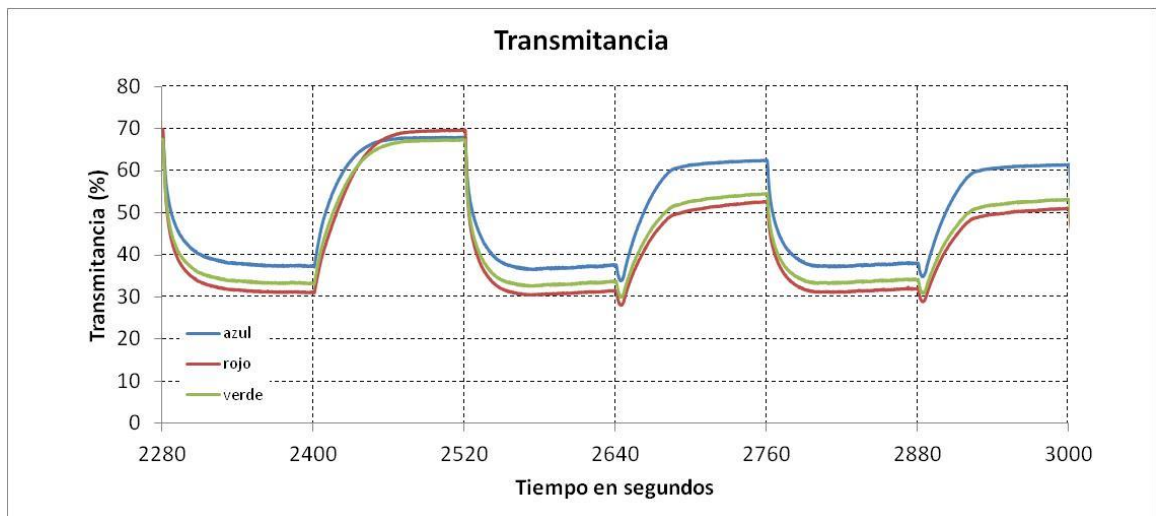


Figura 3.10. Transmitancia cristal 260 micras a tensiones 1,6V y 1,9V

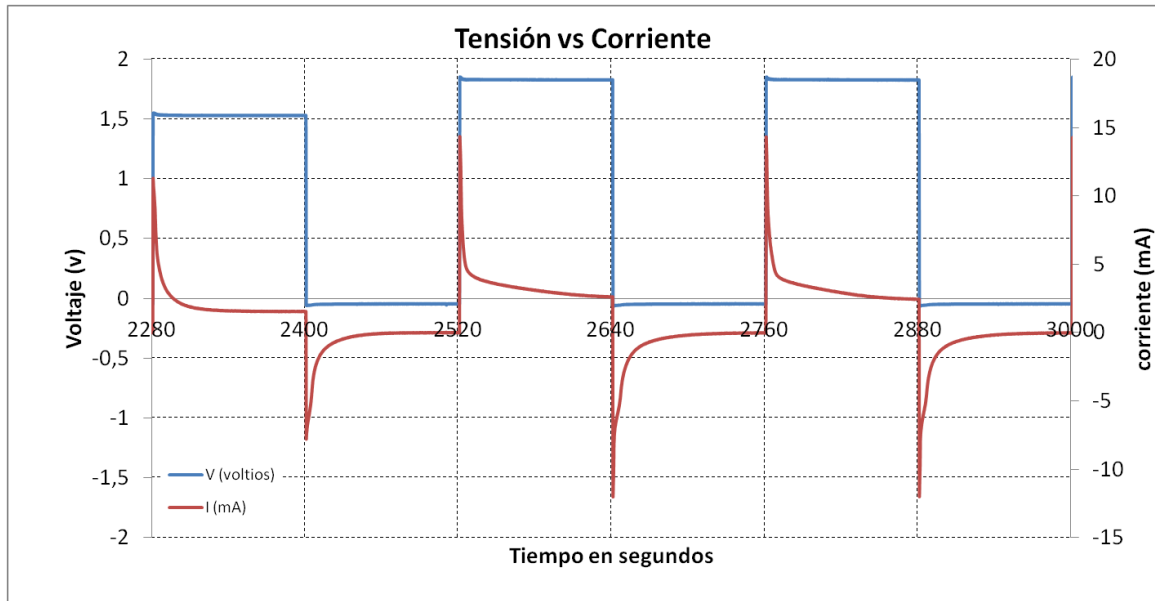


Figura 3.11. Tensión vs Corriente cristal 260 micras a tensiones 1,6V y 1,9V

Tras este ciclado el cristal se quedó de un color marrón oscuro como se puede apreciar en la figura 3.12.



Figura 3.12. Cristal deteriorado tras aplicar 1,9V

3.3 CICLABILIDAD Y DETERMINACIÓN DEL ALGORITMO ÓPTIMO DE CONMUTACIÓN

Por todo lo anterior, para llevar a cabo el objetivo planteado relativo a encontrar la forma de onda óptima, se utilizó el sistema descrito en el capítulo anterior con **una tensión de pico V_p de 1V** en 20 dispositivos, distribuidos de la siguiente forma según espesores:

- ✚ 4 cristales de 260 micras
- ✚ 4 cristales de 200 micras

- ✚ 4 cristales de 160 micras
- ✚ 4 cristales de 100 micras
- ✚ 4 cristales de 60 micras

Se estudió la ciclabilidad de todos estos dispositivos y se buscó la forma de onda óptima para conmutarlos. Para ello, con cada espesor, se probó cada uno de los 4 algoritmos que se detallan continuación, que básicamente tratan de conmutar el cristal entre 1V y 0V y entre 1V y -1V para comprobar si al invertir la tensión conservando su amplitud, el EC tiene una mayor ciclabilidad o un menor tiempo de conmutación. Para ello se han empleado 7 días completos de ciclado para cada uno de los cristales en prueba, tomando dos muestras de cada uno de los 6 parámetros vistos en el capítulo anterior (V, I, Temperatura, T_{rojo} , T_{verde} , T_{azul}) cada 250ms, lo que supondrá un total de 580.608.000 muestras, como se verá más adelante.

A continuación se presenta un ejemplo de cada uno de los algoritmos a aplicar, basados en las conmutaciones naturales esperadas por la bibliografía [44-49] y en innovaciones relativas al trabajo previo del autor con los dispositivos [32,65,79]. Se ofrece una gráfica ilustrativa de cada algoritmo, donde para un cristal se ha medido la corriente y la transmitancia durante la aplicación del mismo.

Algoritmo 1: 1V 60 segundos, 0 Voltios 60 segundos (Fig. 3.13)

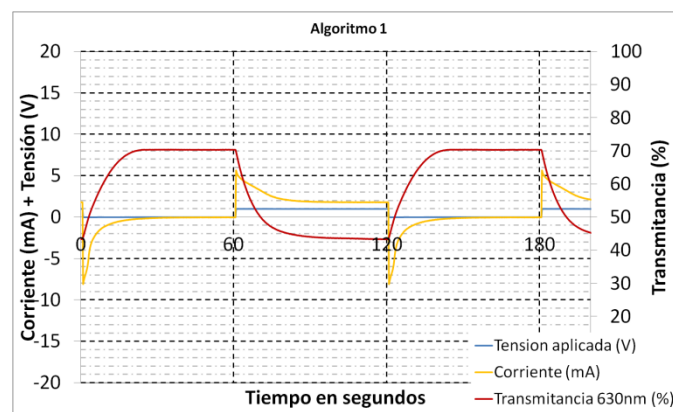


Figura 3.13. Ejemplo Algoritmo1

Algoritmo 2: 1V 60 segundos, -1V 60 segundos (Fig. 3.14)

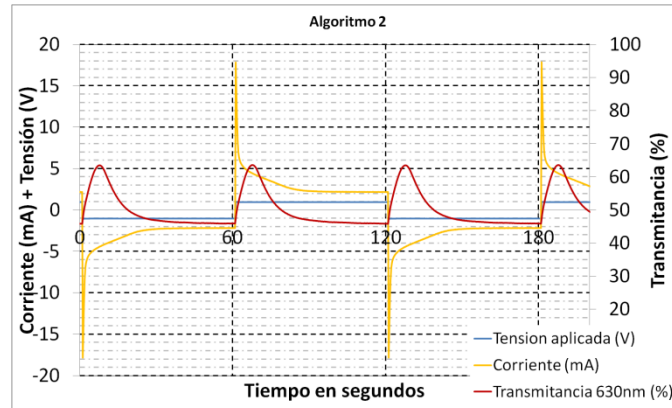


Figura 3.14. Ejemplo Algoritmo2

Algoritmo 3: 1V 60 segundos \rightarrow -1V X segundos \rightarrow 0V (60-X) segundos (Fig. 3.15). Siendo X extraído del t_f del algoritmo2, puesto que nos asegurará que pasado un cierto tiempo de aplicación de la tensión invertida, el cristal no se vuelve a oscurecer. Como ejemplo de este problema, se puede apreciar en la figura 3.16 que se produce esa inversión de tendencia en la transmitancia si se usan tiempos X superiores al t_f del algoritmo2.

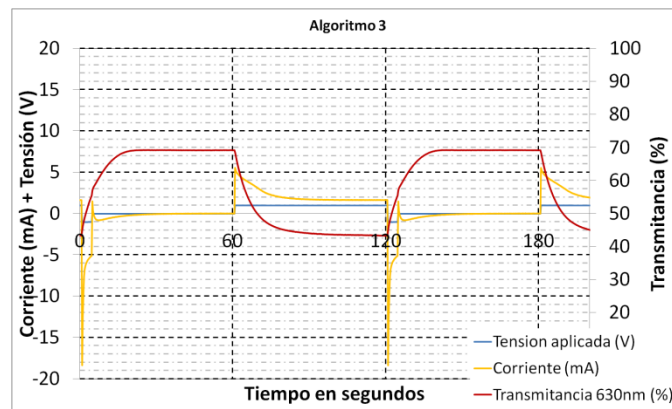


Figura 3.15. Ejemplo Algoritmo3

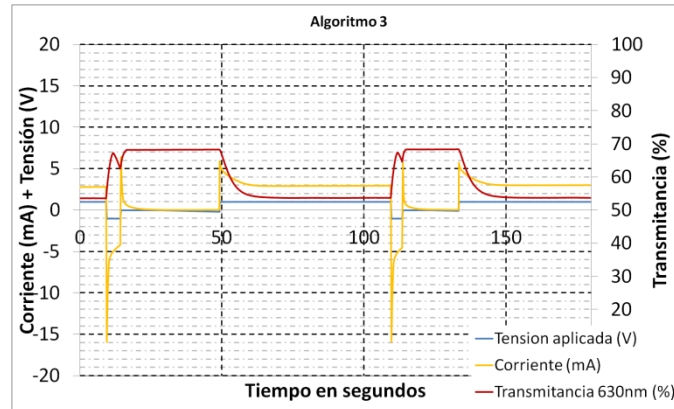


Figura 3.16. Ejemplo Algoritmo3 con tiempos de inversión de tensión $> t_f$ algoritmo2

Algoritmo 4: 1V 60 segundos \rightarrow -1V X segundos \rightarrow 0V (60-X) segundos \rightarrow -1V 60 segundos \rightarrow 1V X segundos \rightarrow 0V (60-X) segundos (Fig. 3.17). Siendo X el t_f del algoritmo2 como se explicó anteriormente.

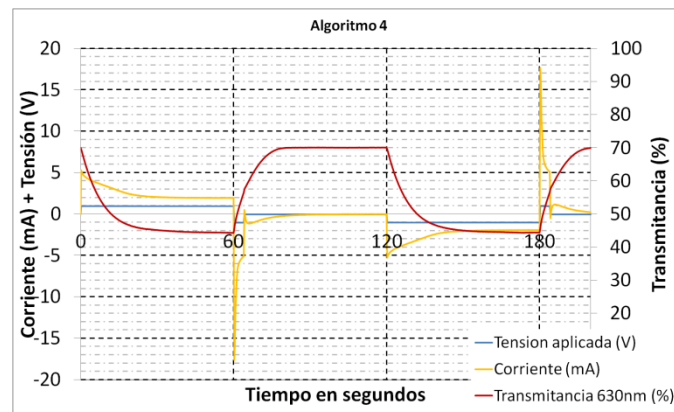


Figura 3.17. Ejemplo Algoritmo4

De las gráficas anteriores ya se puede adelantar que los algoritmos que más corriente de pico van a demandar son aquellos en los que se produce una inversión de tensión.

3.3.1 RESULTADOS

Para cada espesor se compararon cada uno de los cuatro algoritmos explicados anteriormente, tomando 2 muestras de cada uno de los 6 parámetros (transmitancia en los fotodiodos rojo, verde y azul; tensión, corriente y temperatura) cada 250ms, durante 5000 ciclos, siendo esta frecuencia suficiente para determinar los tiempos de conmutación (con un error de 250 ms) ya que como vimos en el capítulo 2, éste es del orden de segundos, y



es una frecuencia que no hace excesivo el volumen de datos almacenados ya que se tiene por cada semana de test se obtendrán 29.030.400 muestras.

2 muestras x 6 parámetros = 12 muestras / 250ms → 48 muestras / segundo;

7 días → 604800 segundos;

604.800 segundos x 48 muestras / segundo = 29.030.400 muestras / cristal;

Como en total se trata de 20 cristales (5 espesores x 4 algoritmos) implica que se tienen **580.608.000** muestras en total (29.030.400 x 20 cristales).

Al tratarse de un gran volumen de datos para mostrar gráficamente, éstos se procesan de modo que se puedan presentar:

- ✚ Los valores extremos de cada variable cada 25 minutos, así como el valor medio del t_r y t_f de los ciclos contenidos en esos 25 minutos.
- ✚ La intensidad eficaz. (Ec. 2.5)
- ✚ La potencia eficaz. (Ec. 2.6)

Se mostrarán a continuación los resultados globales de todo el proceso de ciclabilidad mediante gráficas y en el siguiente orden:

- ✚ Gráficas de Máximos-Mínimos por espesor (transmitancia en cada fotodiodeo, t_r , t_f , I_{max} , I_{min} y Temperatura²) respecto al tiempo (*objetivo: comprobar ciclabilidad*). Aunque resulta poco ortodoxo, se ha comprobado que la mejor forma de representar todas estas magnitudes para que resulte sencillo compararlas en una sola gráfica ha sido utilizar la misma escala para todas ellas. Si bien se mezclan segundos, mA y °C, realmente el orden de magnitud de los resultados permite, como se verá, una fácil visualización de los mismos de manera agregada.

² Para el espesor de 260 micras, por un fallo en el sistema de medida, no estaba disponible la medida de la temperatura.

- ✚ Gráficas de contraste por espesor (*objetivo: diferenciar entre algoritmos para encontrar el óptimo para un espesor*).
- ✚ Influencia de la temperatura (*objetivo: comprobar su influencia en los tiempos de conmutación*).

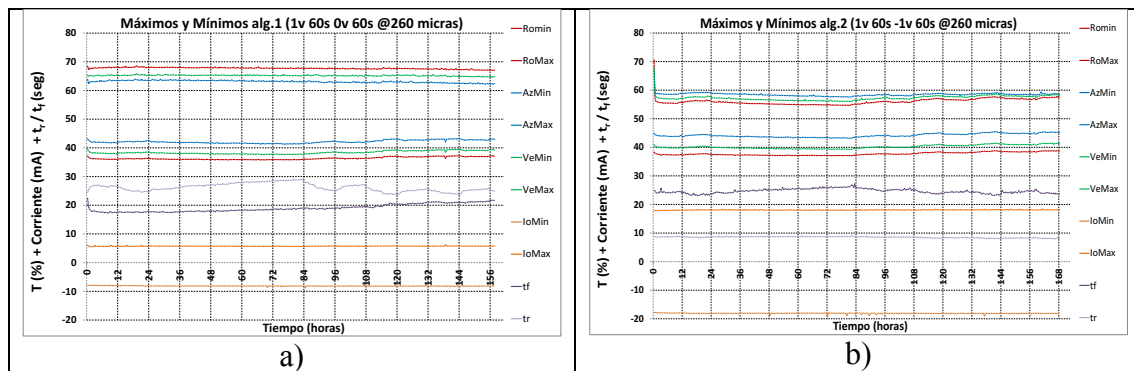
Para finalizar se mostrará una comparativa entre los distintos algoritmos.

- ✚ Gráficas de contraste por algoritmos. (*obtención del mejor espesor para cada algoritmo*)
- ✚ Gráficas en términos de consumo, por algoritmos y por espesores.
- ✚ Influencia de la temperatura.

3.3.1.1 RESULTADOS POR ESPESOR

260 Micras:

En primer lugar se muestra la evolución de los máximos y mínimos de los diferentes parámetros medidos a lo largo del periodo ciclado. Se recuerda que cada gráfica mostrará los valores máximos y mínimos cuya selección fue anteriormente descrita para cada fotodiodo, así como los de las corrientes, y los tiempos de conmutación. En cuanto ciclabilidad los tres primeros dispositivos se comportaron con bastante regularidad como se puede apreciar en las figuras Fig. 3.18a, 3.18b y 3.18c y se estudiará a continuación.



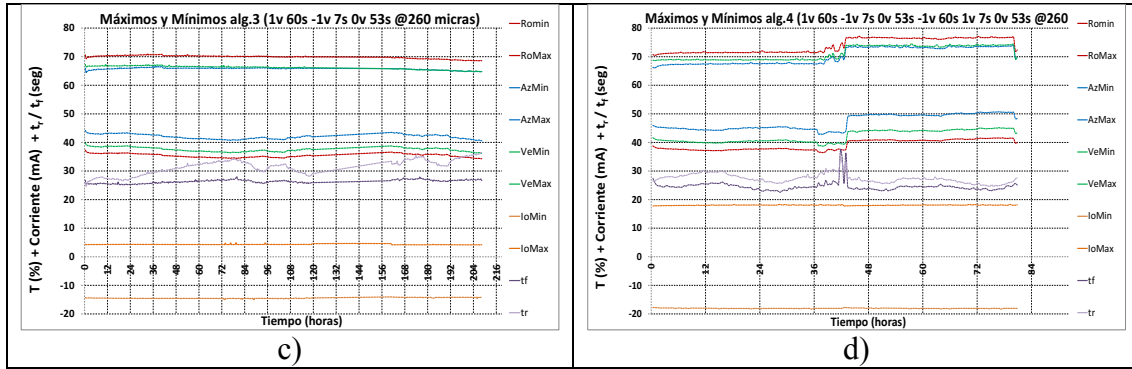


Figura 3.18. Máximos y mínimos (260 micras)

En el algoritmo 1, se puede apreciar una pequeña degradación con el tiempo (Fig. 3.19a) siendo la pendiente de la transmitancia máxima negativa y la de la transmitancia mínima positiva, aunque ambas muy próximas a cero, haciendo que la variación de ΔT después de 156 horas sea menor del 1% (el hecho de que la pendiente sea tan cercana a cero puede hacer que el coeficiente de regresión lineal no sea cercano a 1). Sin embargo en el algoritmo 3 (Fig. 3.19c) parece mantenerse casi constante la variación de ΔT puesto que ambas pendientes son de igual signo (y próximas a cero), lo que podría hacer sospechar que la inversión de polaridad durante largos periodos podría mejorar algo la ciclabilidad. En el caso del algoritmo 2 ambas pendientes son similares y positivas.

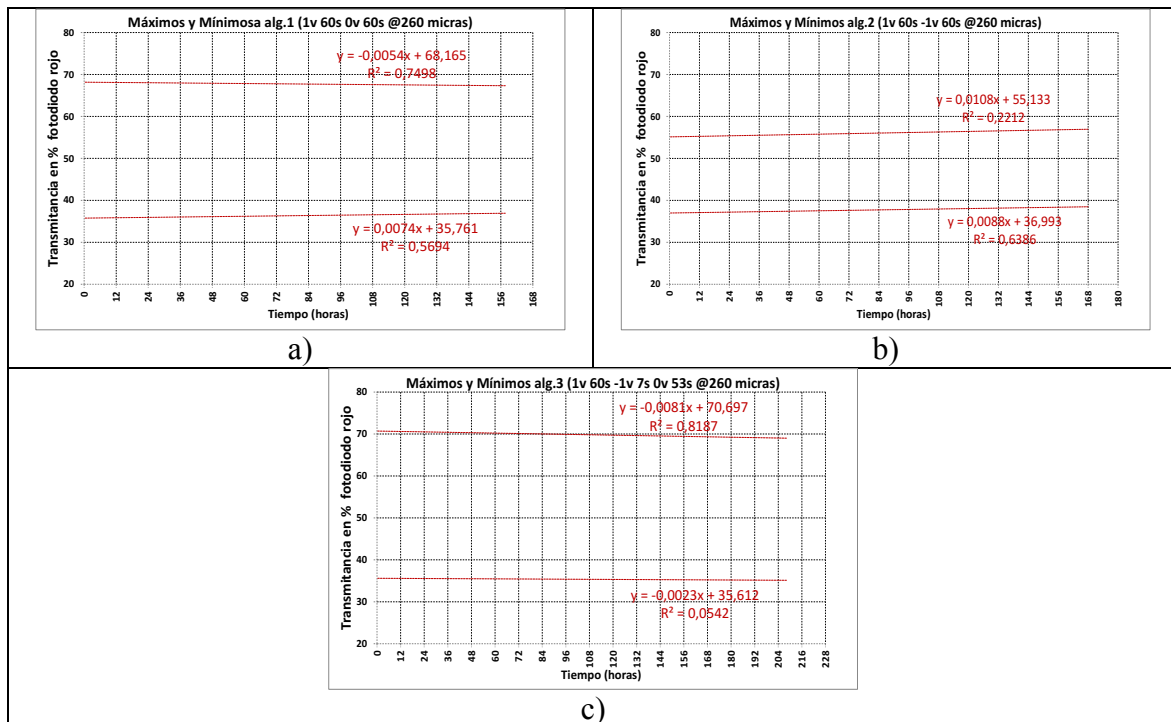


Figura 3.19. Linealidad de máximos y mínimos fotodiodo rojo (260 micras)

Por otro lado, los datos de la figura 3.18d, podrían ser erróneos debido a que se la lámpara usada como iluminante, mencionada en el capítulo 2 (Fig. 2.19 y 2.20), se fundió sobre la hora 80, y previamente a ese momento pudieron haberse producido fluctuaciones en la respuesta tanto espectral como de intensidad en la misma.

También se aprecian pequeñas variaciones en el t_f y t_r en los algoritmos 1, 2 y 3 (figuras 3.18a, 3.18b y 3.18c). Aunque no se dispone de la medida de la temperatura para este espesor, como se ha comentado anteriormente, parecen coincidir con los ciclos de calefacción del edificio durante las semanas en que se realizaron estas pruebas.

Así mismo, se aprecia que invertir la tensión hace que la corriente mínima aumente (figuras 3.18b, 3.18c y 3.18d) respecto a la registrada en el algoritmo1 (Fig. 3.18a) siendo mayor el valor, y muy similar entre sí, en los algoritmos 2 y 4.

A la vista de los resultados, y para poder comparar realmente los diferentes algoritmos, se presentan las siguientes gráficas de contraste ΔT ($T_{\max}-T_{\min}$), escogidas para el fotodiodo rojo porque es el que ofrece más contraste (Fig. 2.20), en función de t_f y t_r .

Se usan estas gráficas porque es fácil deducir la calidad de un algoritmo con ellas: cuanto más arriba y a la izquierda esté una nube de puntos, implica que el algoritmo es mejor, ya que la variación de la transmitancia es mayor y el tiempo es menor.

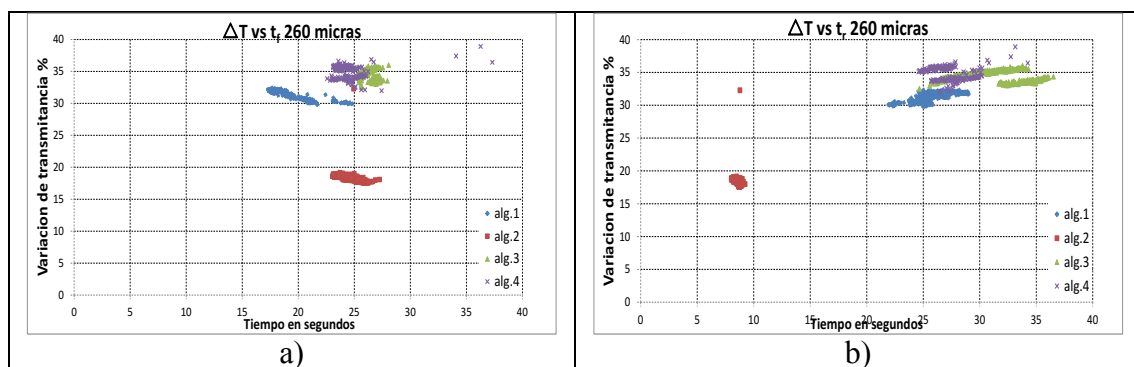


Figura 3.20. ΔT vs t_f y t_r (260 micras)

En la figura 3.20a, se puede deducir que el algoritmo 4 se ha comportado mejor que el 3 puesto que están más o menos a la misma altura, pero la nube de puntos del 4 se agrupa más a la izquierda. También se puede apreciar que las nubes de puntos “se estiran”

mostrando un cierto comportamiento lineal en el t_r (Fig. 3.20.b) que indica a priori que cuanto mayor es ΔT mayor es t_r para un cierto algoritmo.

Sin embargo si asumimos un compromiso entre todos los parámetros: t_r , t_f y variación de transmitancia (ΔT), el algoritmo 1 saldría ganando ya que el t_r es mucho mejor (del orden de 5 segundos) como se puede ver en la figura 3.20a.

200 micras:

Como se puede apreciar en la figura 3.21, en cuanto a ciclabilidad los cuatro dispositivos se comportaron bastante bien. Tan sólo el tercero (Fig.3.21c) tuvo algún problema en el oscurecimiento entre la hora 60 y 96.

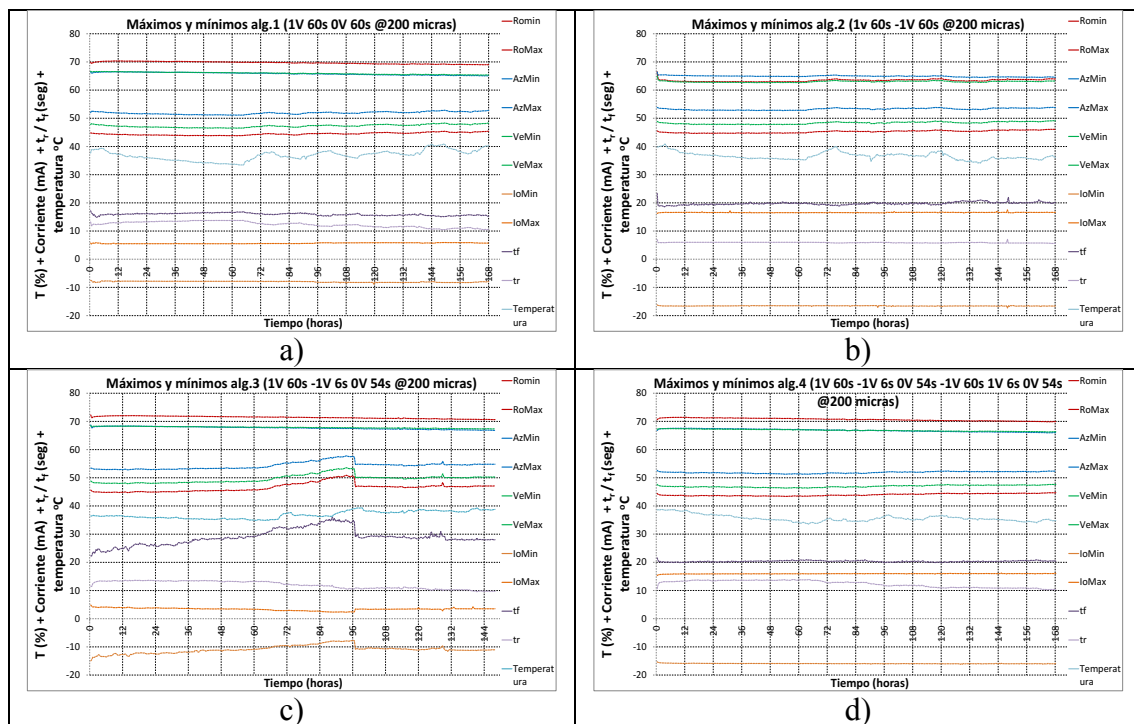


Figura 3.21. Máximos y mínimos (200 micras)

En los algoritmos 1 y 4, se puede apreciar una pequeña degradación con el tiempo (Fig. 3.22a y 3.22c) siendo la pendiente de la transmitancia máxima negativa y la de la transmitancia mínima positiva, aunque ambas muy próximas a cero, haciendo que la variación de ΔT después de 168 horas sea menor de un 2%. Éste dato hace pensar que el simple hecho de invertir la tensión no provoca grandes diferencias en cuanto a ciclabilidad. Sin embargo en el algoritmo 2 (Fig. 3.22b) parece mantenerse casi constante

la variación de la transmitancia ΔT puesto que ambas pendientes son de igual signo (y próximas a cero), como ocurría en el caso anterior (260 micras), lo que podría hacer sospechar que es debido a que este algoritmo, por su forma de onda, no termina de provocar la transmitancia máxima posible del cristal.

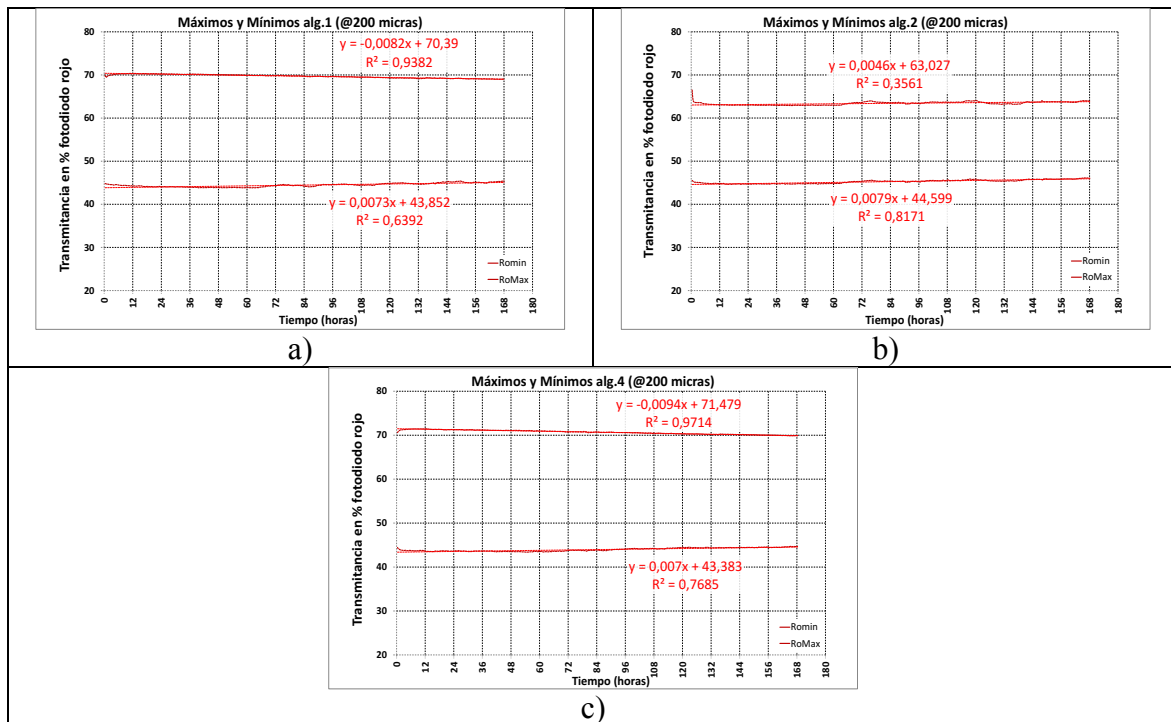


Figura 3.22. Linealidad de máximos y mínimos fotodiodo rojo (200 micras)

En este caso en cuanto al tiempo de conmutación el algoritmo 1 saldría ganador puesto que el t_f es menor (del orden de unos 5 segundos frente al algoritmo 4) aunque el t_r en algunos casos en los algoritmos 3 y 4 es del orden de 1 segundo menor (Fig. 3.23).

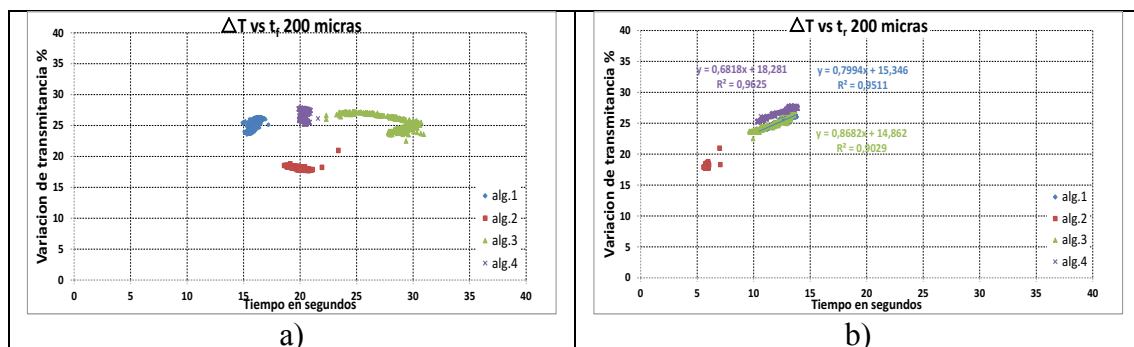


Figura 3.23. ΔT vs t_f y t_r (200 micras)

Respecto a la relación entre ΔT vs t_r parece volver a haber una relación lineal pero más marcada que en caso anterior (260 micras), en torno a un segundo por cada 0,8 ΔT en los algoritmos 1, 3 y 4 (Fig. 3.23b).

Mientras, t_r continúa bastante independiente de ΔT (Fig. 3.23a), volviendo a confirmar el hecho que la reacción se produce en un tiempo similar independientemente de ΔT para un cierto algoritmo (siempre y cuando se esté por encima de la tensión redox) excepto en el caso del algoritmo 3 en que como vimos hubo algún problema entre la hora 60 y 96. El hecho de no invertir la tensión (algoritmo 1) parece proporcionar mejores tiempos de oscurecimiento (t_r) como muestra la figura 3.23a.

160 micras:

Se puede apreciar a simple vista que, en cuanto ciclabilidad, los cuatro dispositivos de 160 micras se comportaron bastante bien (Fig.3.24).

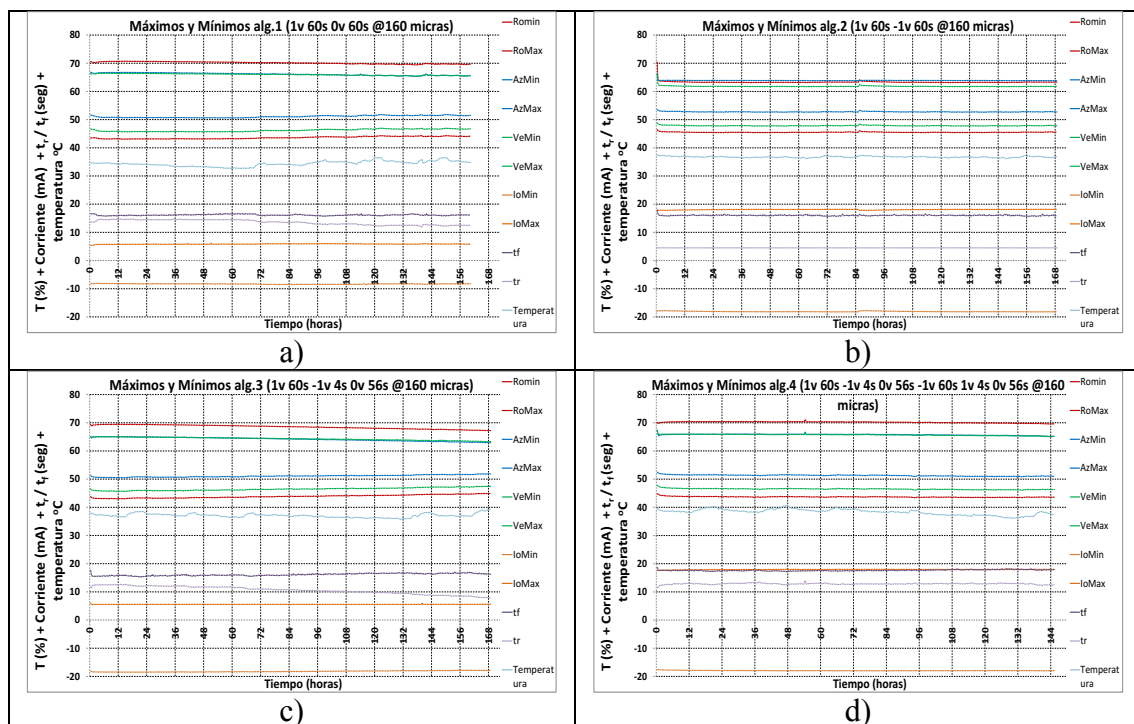


Figura 3.24. Máximos y mínimos (160 micras)

Se puede destacar que el algoritmo 2 se ha mantenido completamente constante (Fig.3.25b). En los algoritmos 1 y 3, se puede apreciar una pequeña degradación con el tiempo (Fig. 3.25a y 3.25c) siendo la pendiente de la transmitancia máxima negativa y la

de la transmitancia mínima positiva, aunque ambas muy próximas a cero como en los casos anteriores. Parece que para este espesor el algoritmo 4 se ha comportado algo mejor en cuanto a ciclabilidad, bien es cierto que el ciclado se mantuvo durante unas 20 horas menos que en el caso del algoritmo 3.

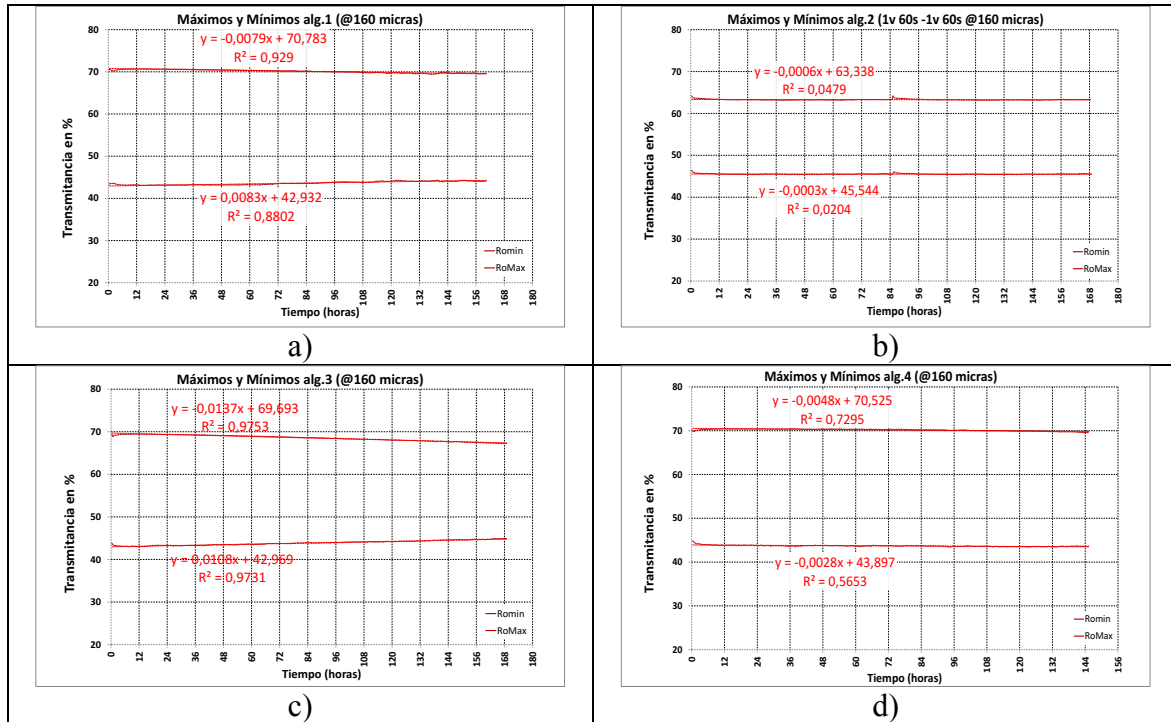


Figura 3.25. Linealidad de máximos y mínimos fotodiodo rojo (160 micras)

En cuanto al tiempo de conmutación, en este caso, los algoritmos 1, 3 y 4 tienen un comportamiento muy similar, pero el algoritmo 1 saldría ganador puesto que la nube de puntos asociada al t_f se aprecia más arriba y a la izquierda (Fig. 3.26a). Aunque el t_r en el caso del algoritmo 3 es mejor, la variación de la transmitancia es menor (Fig. 3.26b).

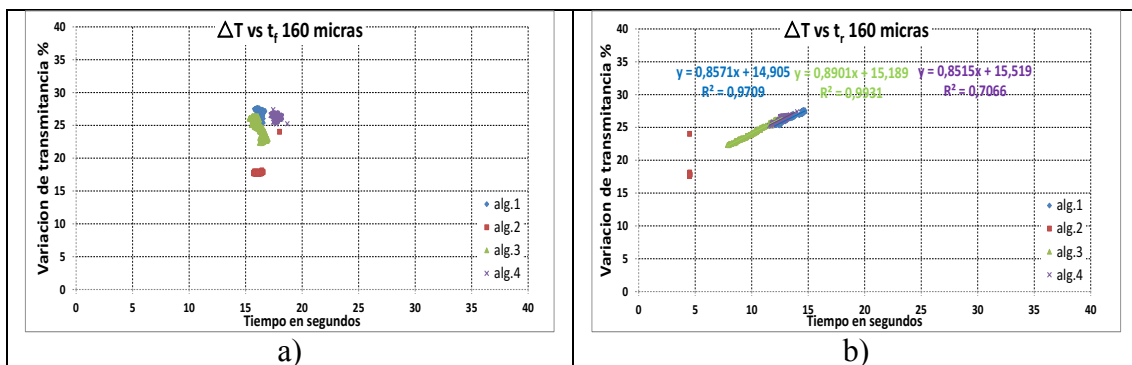


Figura 3.26. ΔT vs t_f y t_r (160 micras)

Respecto a la relación entre ΔT vs t_r parece volver a haber una relación lineal como en el caso anterior (200 micras): en torno a un segundo por cada 0,85 ΔT en los algoritmos 1, 3 y 4 (Fig. 3.26b).

t_r continúa siendo bastante independiente de ΔT (Fig. 3.26a), volviendo a confirmar el hecho que la reacción se produce en un tiempo similar independientemente de ΔT , para un cierto algoritmo (siempre y cuando se esté por encima de la tensión redox como es el caso). Una vez más, el hecho de no invertir la tensión (algoritmo 1) parece proporcionar mejores tiempos de oscurecimiento (t_r) como muestra la figura 3.26a, aunque de manera algo menos marcada que en el caso anterior (200 micras).

100 micras:

Como se puede apreciar en cuanto ciclabilidad los cuatro dispositivos de 100 micras se comportaron bastante bien (Fig. 3.27).

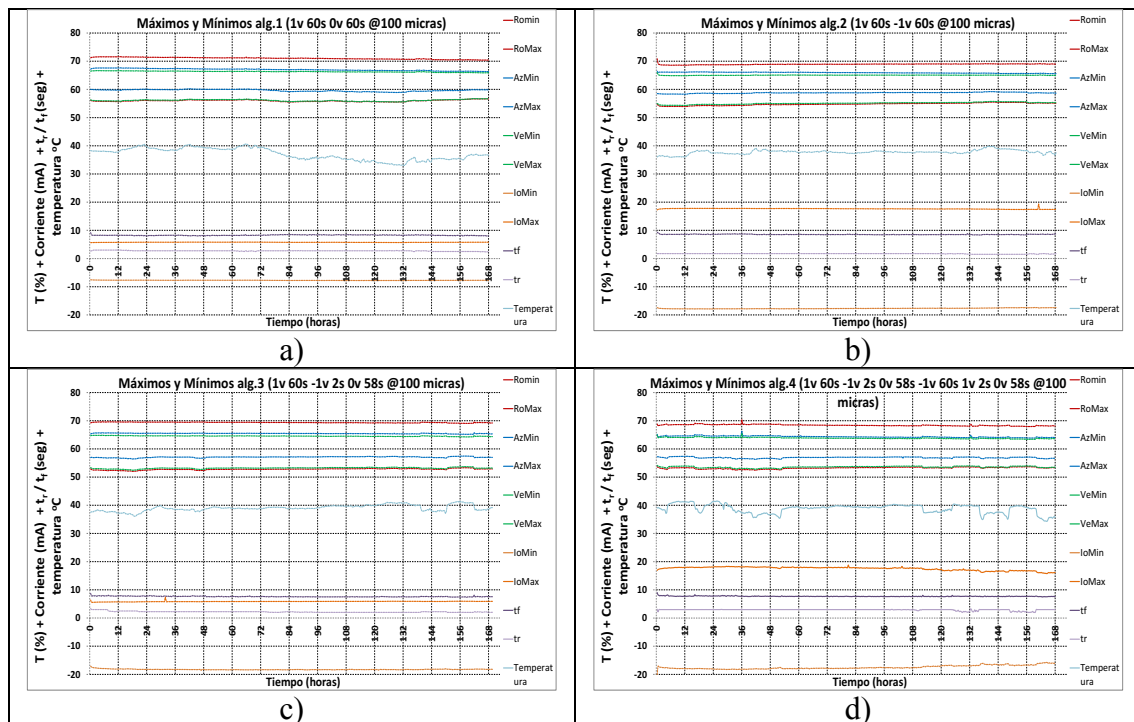


Figura 3.27. Máximos y mínimos (100 micras)

En los algoritmos 1, 3 y 4, se puede apreciar una pequeña degradación con el tiempo (Fig. 3.28a y 3.28c y 3.28d) siendo la pendiente de la transmitancia máxima negativa y la de la transmitancia mínima positiva, aunque ambas muy próximas a cero como en los casos

anteriores. En este caso el algoritmo 2 (Fig. 3.28b) parece haberse producido una leve degradación en la variación de la transmitancia (ΔT) puesto que aunque ambas pendientes son de igual signo (y próximas a cero) la transmitancia mínima parece tener una pendiente ligeramente mayor.

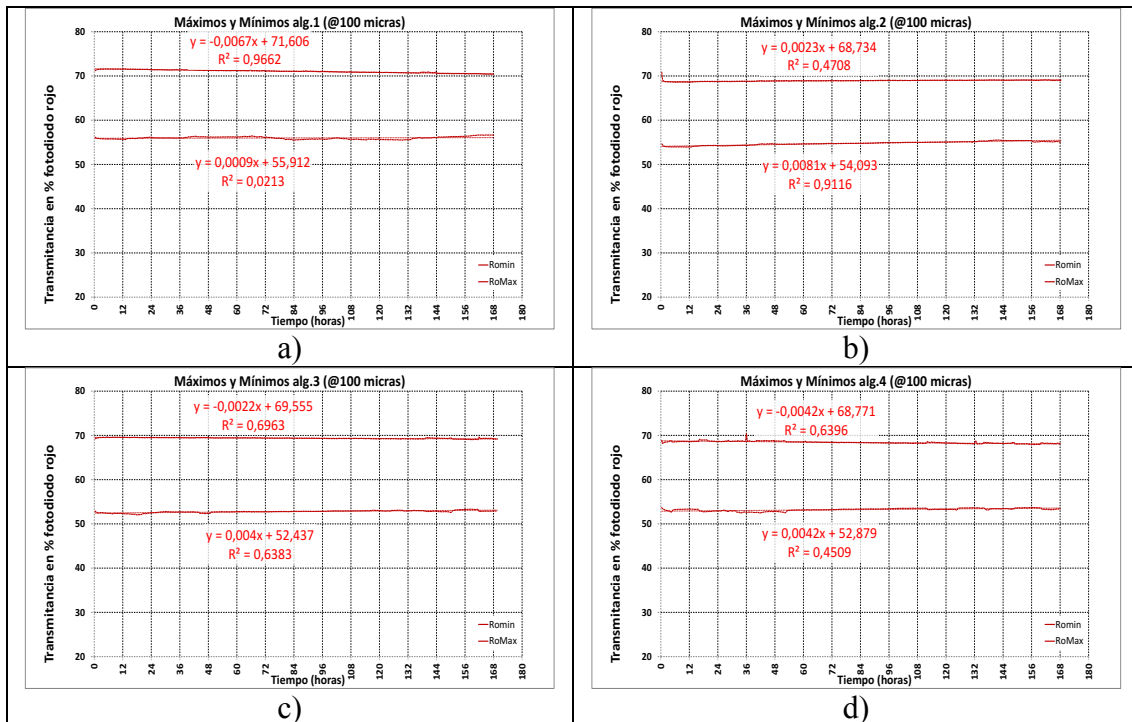


Figura 3.28. Linealidad de máximos y mínimos fotodiodo rojo (100 micras)

En cuanto al tiempo de conmutación, en este caso, los algoritmos 1, 3 y 4 tienen un comportamiento muy similar (Fig. 3.29), estando el t_r por debajo de 9 segundos y el t_f por debajo de 3 segundos, si bien las variaciones de la transmitancia son menores que en casos anteriores no superando en ningún caso el 20%. En este caso el algoritmo ganador, en cuanto a tiempo de conmutación, parece ser el número 3 puesto que sus nubes de puntos se encuentran más arriba y a la izquierda en ambas gráficas (Fig.3.29) sin haber mucha diferencia con respecto a los otros algoritmos.

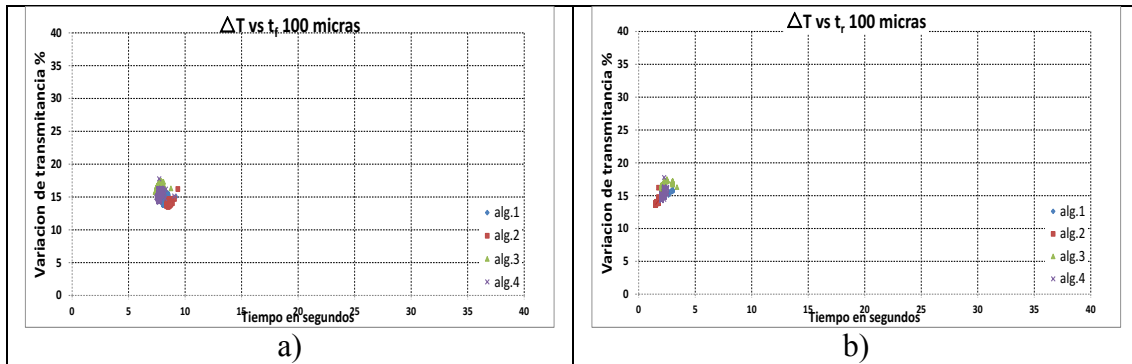


Figura 3.29. ΔT vs t_r y t_r (100 micras)

60 micras:

Como se puede apreciar en cuanto a ciclabilidad, los cuatro dispositivos de 60 micras se comportaron bastante bien (Fig. 3.30) aunque para este espesor en todos los algoritmos se puede apreciar una pequeña degradación con el tiempo (Fig. 3.31) siendo la pendiente de la transmitancia máxima negativa y la de la transmitancia mínima positiva, si bien, ambas muy próximas a cero como en los casos anteriores.

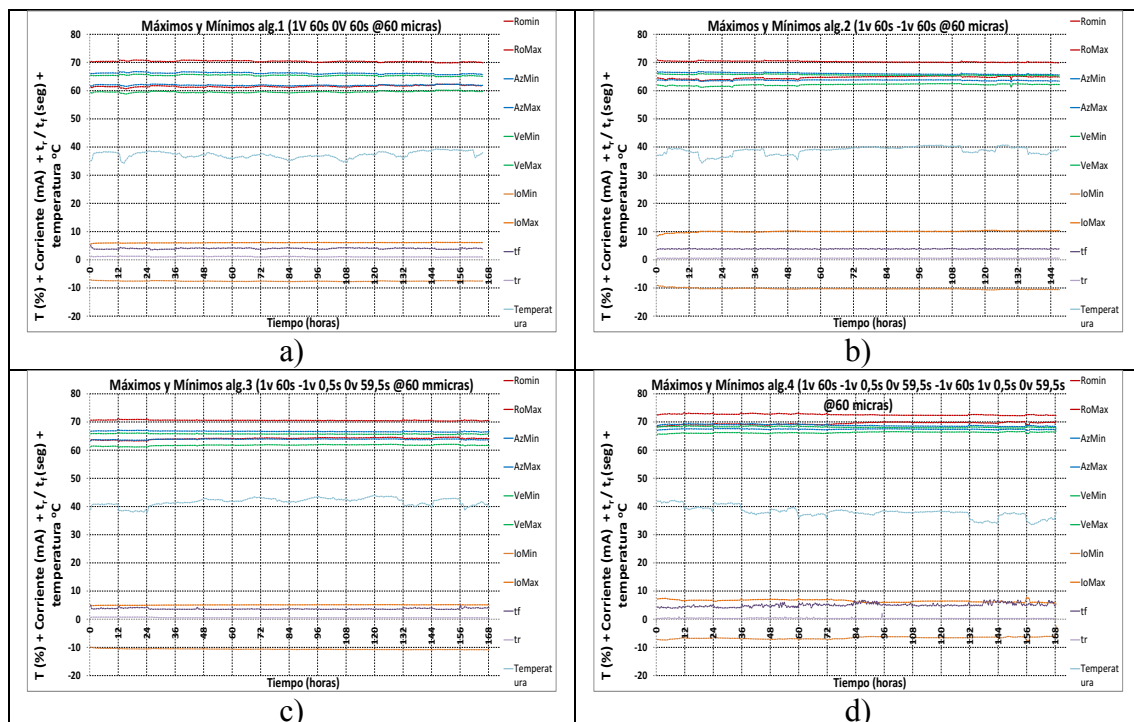


Figura 3.30. Máximos y mínimos (60 micras)

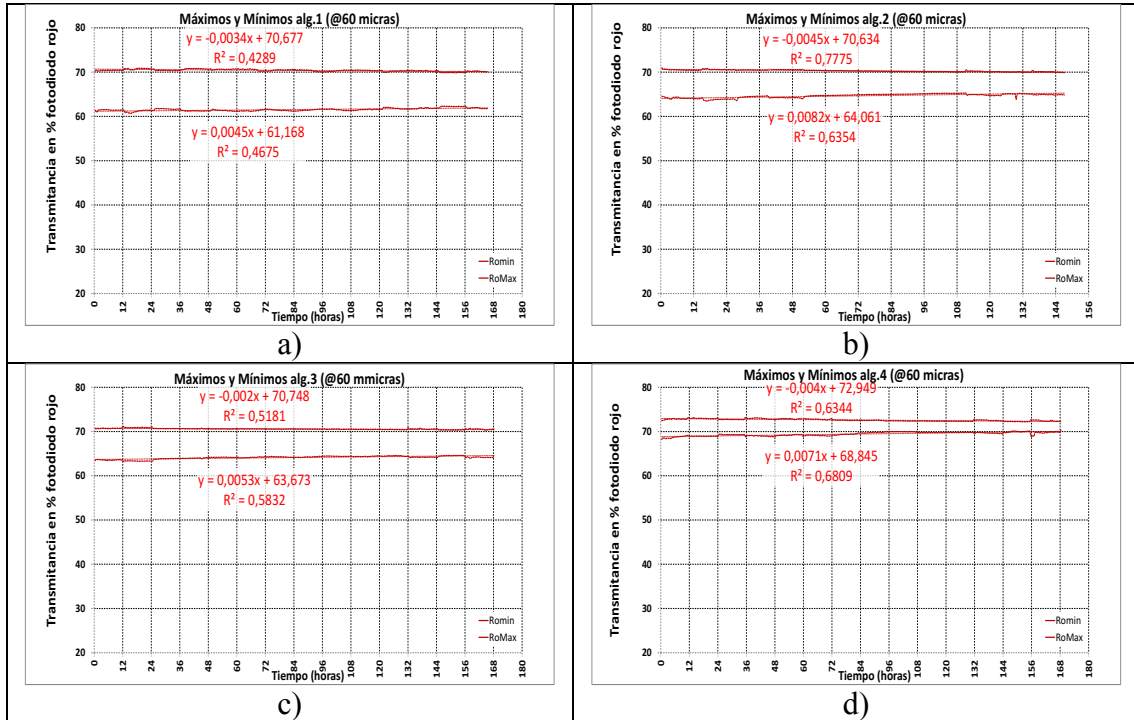


Figura 3.31. Linealidad de máximos y mínimos fotodiodo rojo (60 micras)

También se puede apreciar a simple vista cómo ΔT es mayor para el algoritmo 1, como se puede ver en las figuras 3.31 y 3.32., y menor que para espesores mayores, no superando el 10% (Fig. 3.32). Como se mostrará más adelante en una comparativa por algoritmos y espesores este espesor tiene los tiempos de conmutación y la variación de la transmitancia menores.

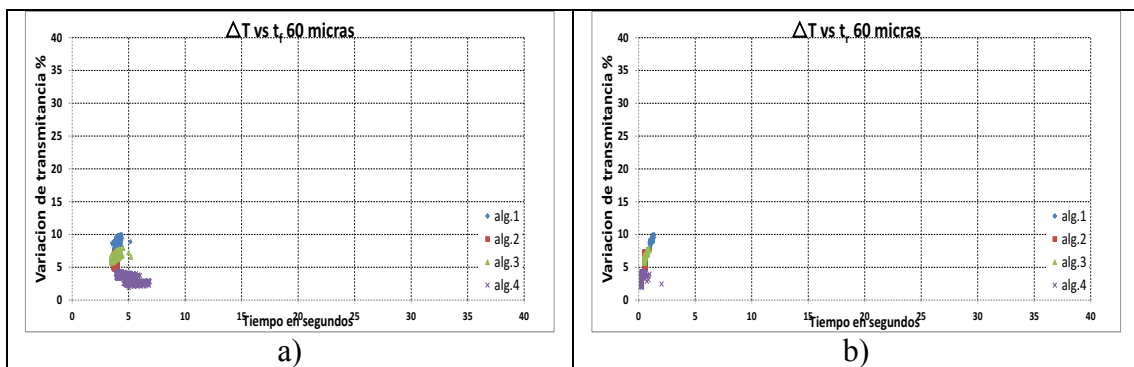


Figura 3.32. ΔT vs t_r y t_c (60 micras)

3.3.1.2 COMPARATIVA ENTRE ALGORITMOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CONMUTACIÓN Y CONSUMOS

Para ver, sin embargo, qué algoritmo es el óptimo independientemente del espesor de los cristales, se hace necesario comparar los resultados de cada uno para diferentes espesores. En este caso, se hace una representación de las nubes de puntos de los resultados anteriores para ΔT en función de t_r y t_f , para cada algoritmo.

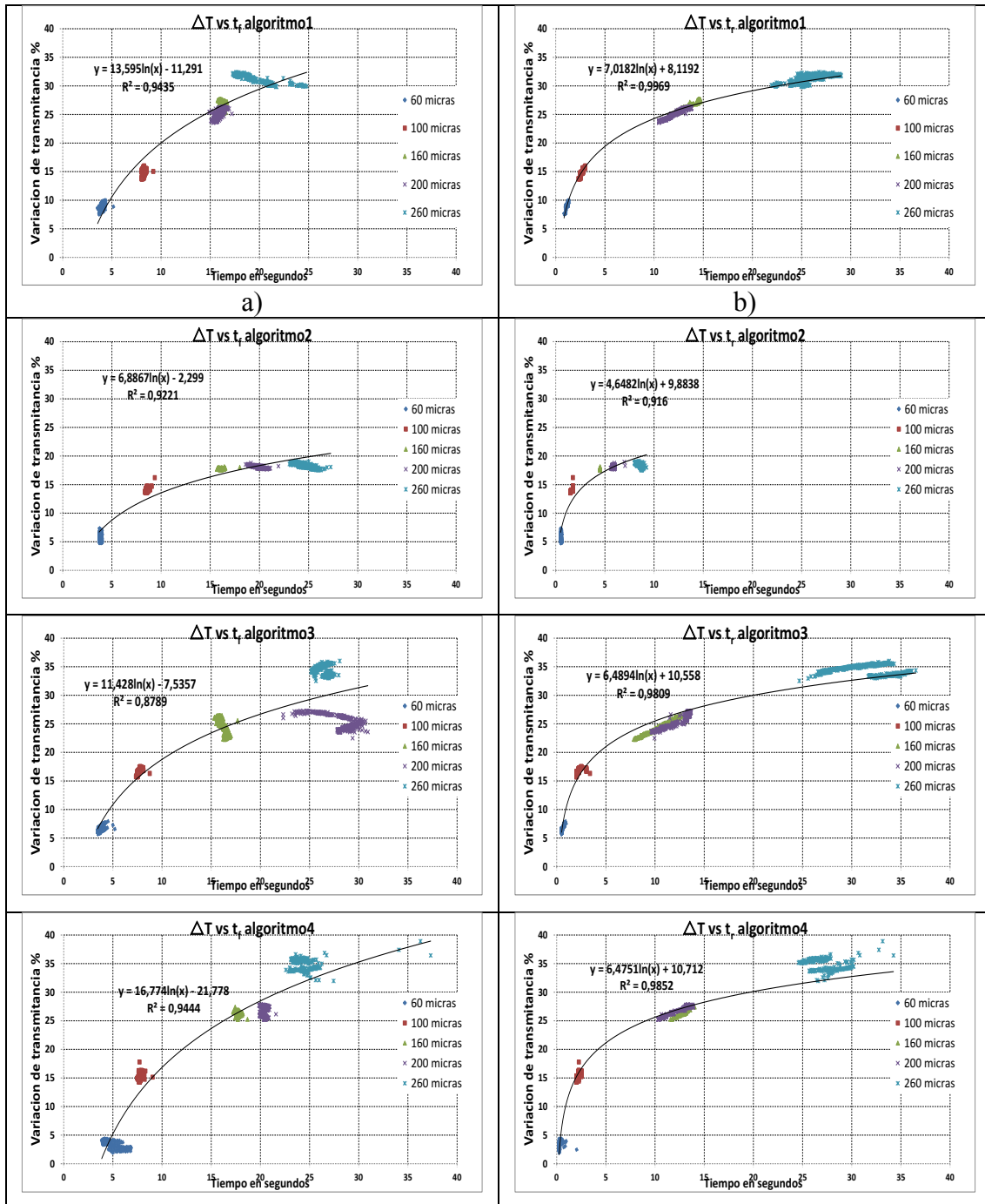


Figura 3.33. ΔT vs t_r y t_f (por algoritmos)

En la figura 3.33 se puede apreciar cómo es posible ajustar los diferentes resultados obtenidos en cada algoritmo y para cada espesor a una función logarítmica, de modo que es posible predecir a priori el espesor necesario para un ΔT y t_f/t_r dados. Así, si se necesitan variaciones de ΔT mayores del 25% utilizando el algoritmo 1, se tendría que usar un espesor de al menos 160 micras.

Otra cosa que se puede deducir es: qué espesor es óptimo para un algoritmo dado. En la figura 3.33 (a y b), se puede ver como el algoritmo 1 sería óptimo para algún punto entre los espesores de 100 y 160 micras en torno a $\Delta T = 21\%$ (por ser el punto más arriba e izquierda), si bien los resultados de los cristales de 160 y 200 micras son también aceptables en este ámbito.

En términos generales y para comparar los resultados en pro de encontrar el algoritmo óptimo, se superponen en la figura 3.34 sólo las curvas ajustadas para cada algoritmo, de modo que la curva que se encuentre más arriba será la óptima en términos de conmutación para todos los espesores: conmuta más en el mismo tiempo.

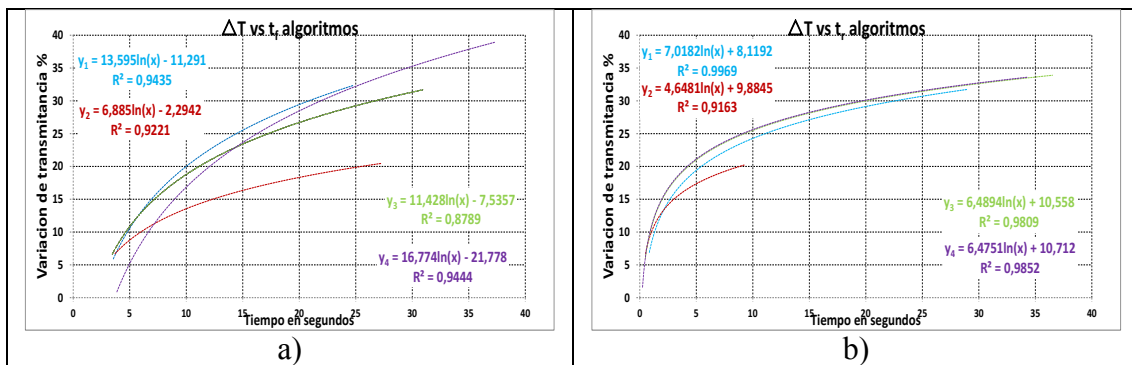


Figura 3.34 ΔT vs t_f y t_r (superposición de algoritmos)

Se puede ver cómo los algoritmos 3 y 4 tienen un tiempo de aclarado muy similar para todos los espesores (Fig. 3.34b) y mejorarían el mismo en torno a medio segundo para $\Delta T = 20\%$ frente al algoritmo 1, pero a costa de empeorar el tiempo de oscurecimiento, en torno a 1 segundo el alg.3 y 2 segundos el alg.4 (Fig. 3.34a) dependiendo estos tiempos del espesor del cristal. Además, como se puede apreciar en la Figura 3.35, donde se han representado la corriente eficaz (Ec.2.5), potencia eficaz (Ec.2.6), intensidad máxima e intensidad pico-pico para cada algoritmo en función del espesor de los dispositivos, los algoritmos 3 y 4 suponen un mayor coste en términos de consumo para espesores mayores de 60 micras. Por lo que ya podemos avanzar que, **el mejor de los cuatro algoritmos en**

términos generales y manteniendo el compromiso de tiempo conmutación / variación de la transmitancia / consumo **es el algoritmo1** (variaciones entre V_p y $0V$). Matizando, para espesores menores de 100 micras podría llegar a contemplarse el algoritmo 3, si el tiempo de aclarado es muy importante, ya que como vimos mejoraría su t_r en torno a medio segundo manteniendo el mismo t_r sin incrementar mucho la potencia eficaz (incluso la mejora para el caso de 60 micras), si bien hay que tener en cuenta que el driver que alimente el cristal debe poder proporcionar corrientes de pico mayores, en torno a 10mA de Pico para el caso de 100 micras (Fig. 3.35c), o en torno a 20mA de Pico-Pico (Fig. 3.35d).

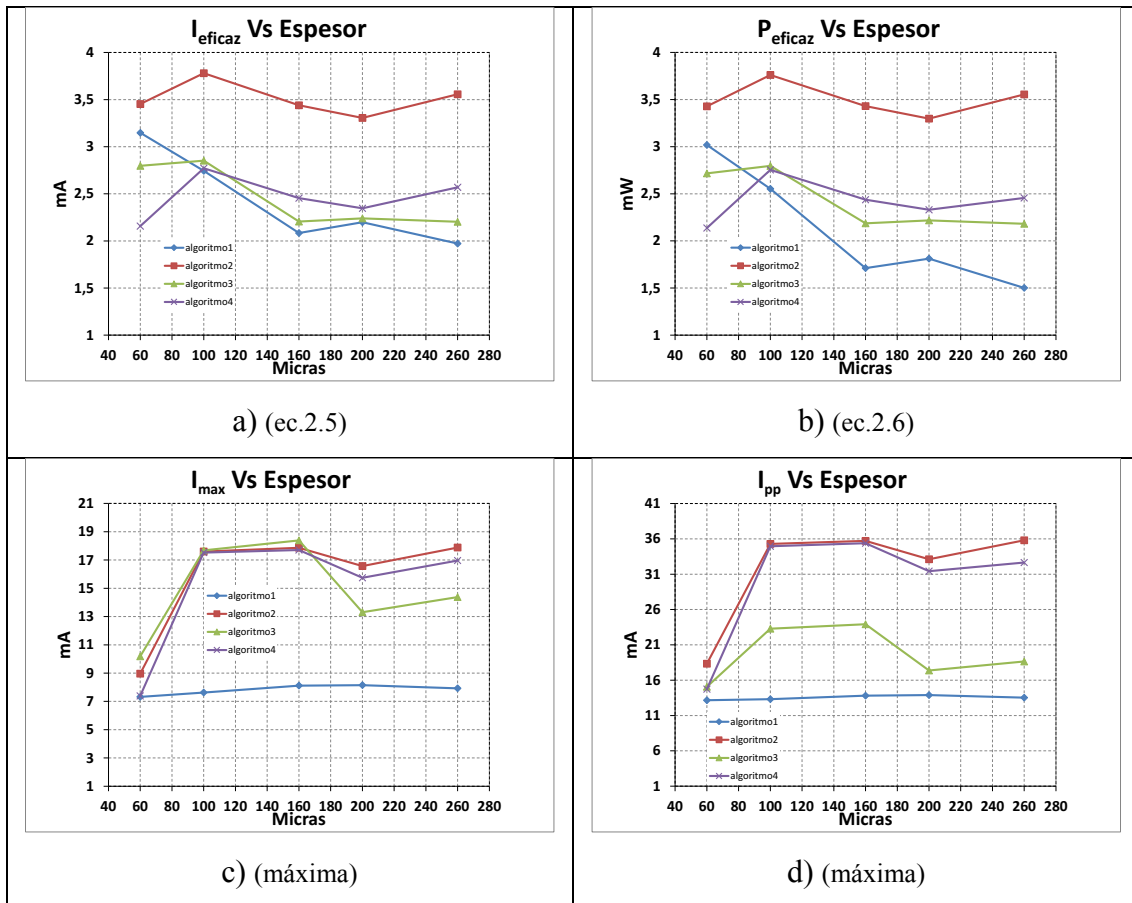


Figura 3.35. Corrientes vs espesor (por algoritmos)

En la figura 3.35c, se puede apreciar cómo el sistema electrónico que esté conectado a un cristal de entre 100 y 160 micras, debe ser capaz de proporcionar corrientes de pico de hasta 19 mA para algoritmos distintos del 1. Éste resulta ser un algoritmo muy eficaz en cuanto a corrientes máximas, ya que parecen ser independientes del espesor usado, lo que permite un margen de seguridad mayor a la hora de diseñar un driver que sea

independiente del espesor del EC usado. Por ejemplo, un driver válido para una serie de dispositivos con un conjunto muy amplio de características de curvatura y espesor, tales como los que se usarán en el Capítulo 4.

3.3.1.3 DEPENDENCIA CON LA TEMPERATURA

En lo que respecta a variaciones en la transmitancia en función de la temperatura, no se observa ninguna relación para ningún espesor de los analizados, como se puede apreciar en la figura 3.36.

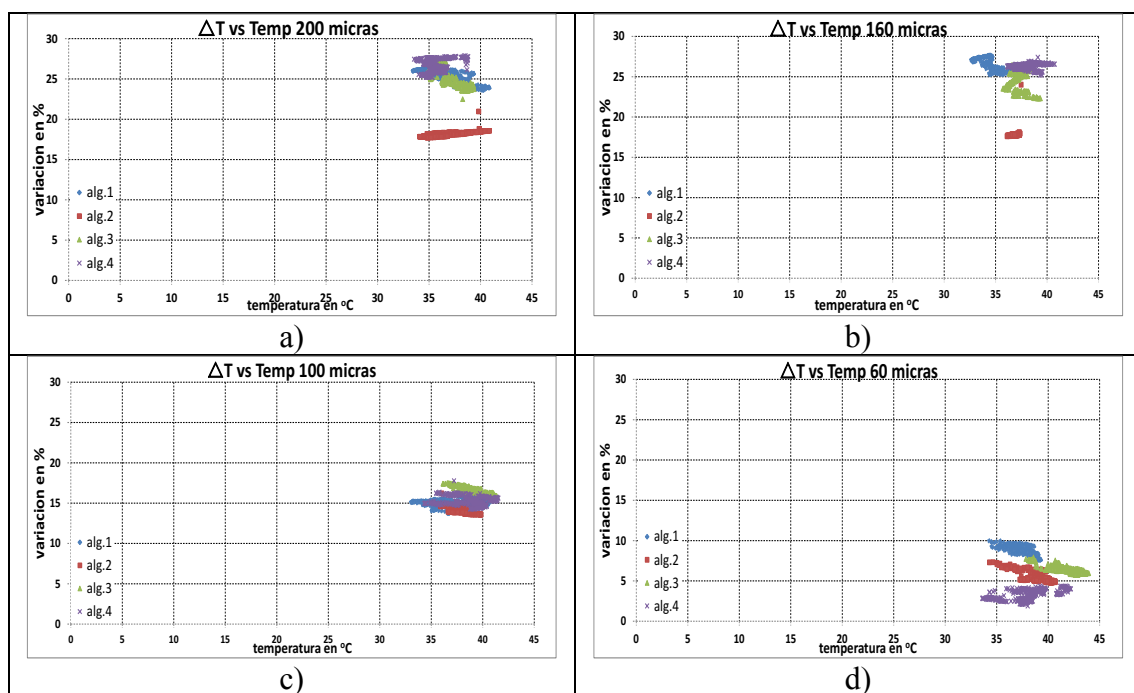


Figura 3.36. Variación de la transmitancia vs temperatura

Se presenta a continuación una serie de gráficas (figura 3.37) con el objetivo de discernir si hay relación entre la temperatura y el tiempo de conmutación.

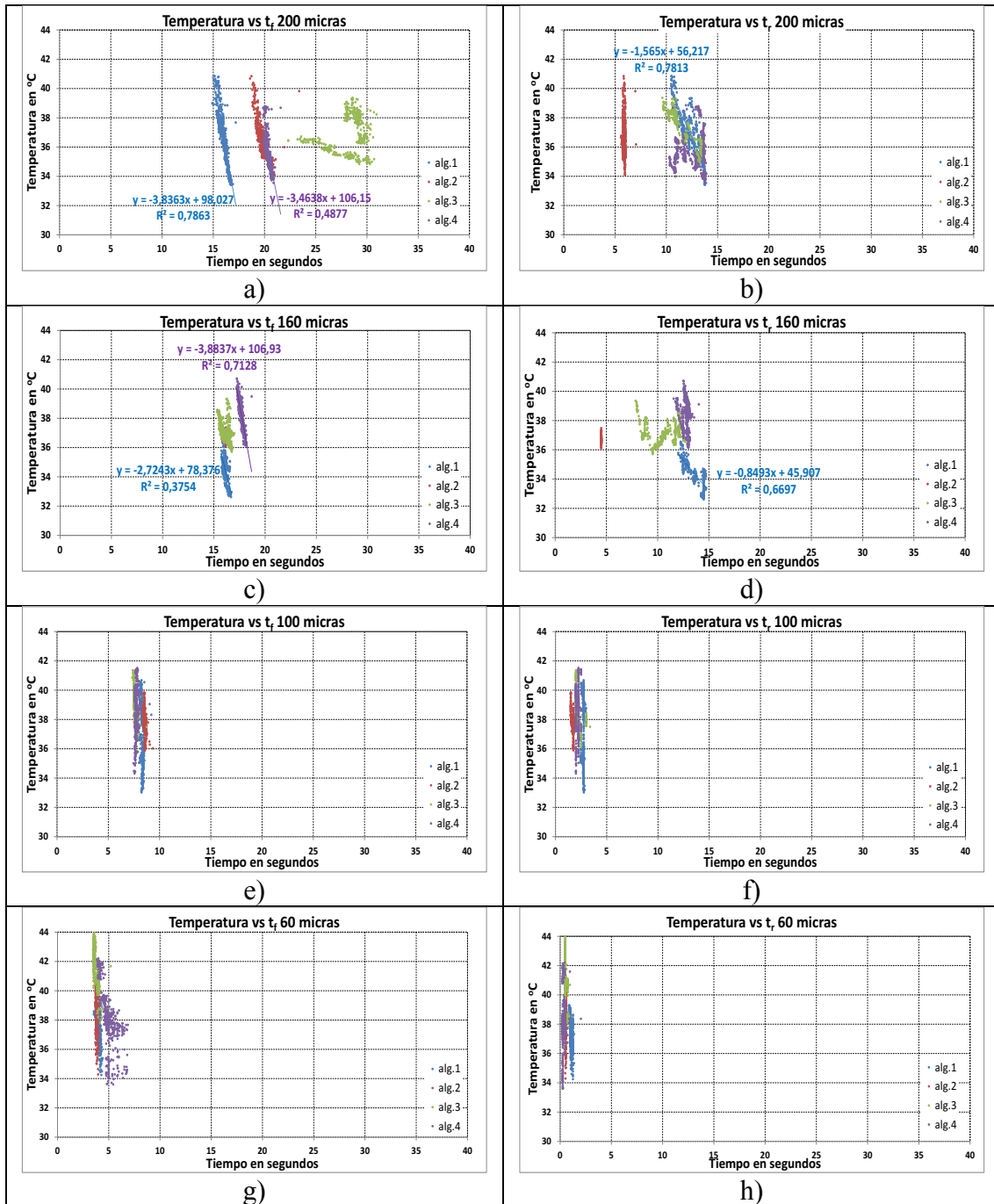


Figura 3.37. Temperaturas vs t_r y t_r (por espesores)

De la figura anterior, se puede decir que parece haber una pequeña dependencia lineal respecto al tiempo de conmutación (t_r) a partir de un cierto espesor (160 micras) Figura 3.37 (a, y c), quizás debida a que cuando el espesor es muy alto, con mayor cantidad de centros de color, una muy pequeña dependencia del tiempo de conmutación con la temperatura podría notarse más (efecto suma). Igual ocurre con el tiempo de aclarado (t_r) para el algoritmo 1 (figuras 3.37 b y d).

Se analiza la influencia de la temperatura en ΔT y en función del espesor en la figura 3.38.

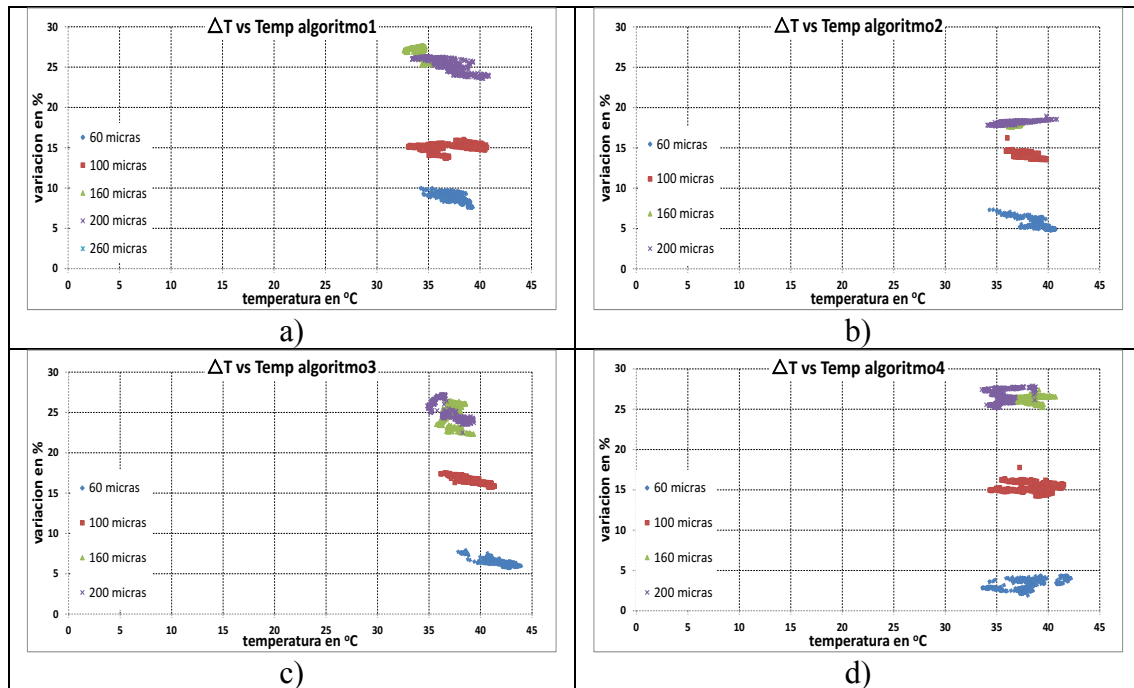


Figura 3.38. Variación de la transmitancia vs temperatura

Vemos que no se observa ninguna relación de ΔT para ningún espesor de los analizados (Figura 3.38), si bien se puede observar alguna pequeña variación esta puede ser debida a la coincidencia de cambios en la temperatura con la leve degradación del cristal.

Sin embargo en los resultados gráficos de la posible influencia de la temperatura en los tiempos de conmutación por algoritmos (Fig. 3.39) parece haber una pequeña dependencia o influencia respecto al tiempo de conmutación a partir de un cierto espesor (160 micras), como muestra la Figura 3.39 y que en algunos casos se asemeja a una relación lineal (a,b,c y g) y en otros casos no. Quizás la relación con t_r es más lineal en los casos donde se conmuta a tensión constante, mientras que en función de t_r se muestran cambios en la tensión durante el aclarado para algoritmos distintos del 1, por eso parece tener más de una componente (figura 3.39f y 3.39h) que pudiera ser debida a la leve degradación de los cristales.

En el caso de la figura 3.39e y 3.39f destacar que, como vimos en la figura 3.21, sobre la hora 60 hubo algún problema en la medida del cristal de 200 micras por lo que los datos obtenidos podrían no ser del todo válidos a la hora de extrapolar los resultados.

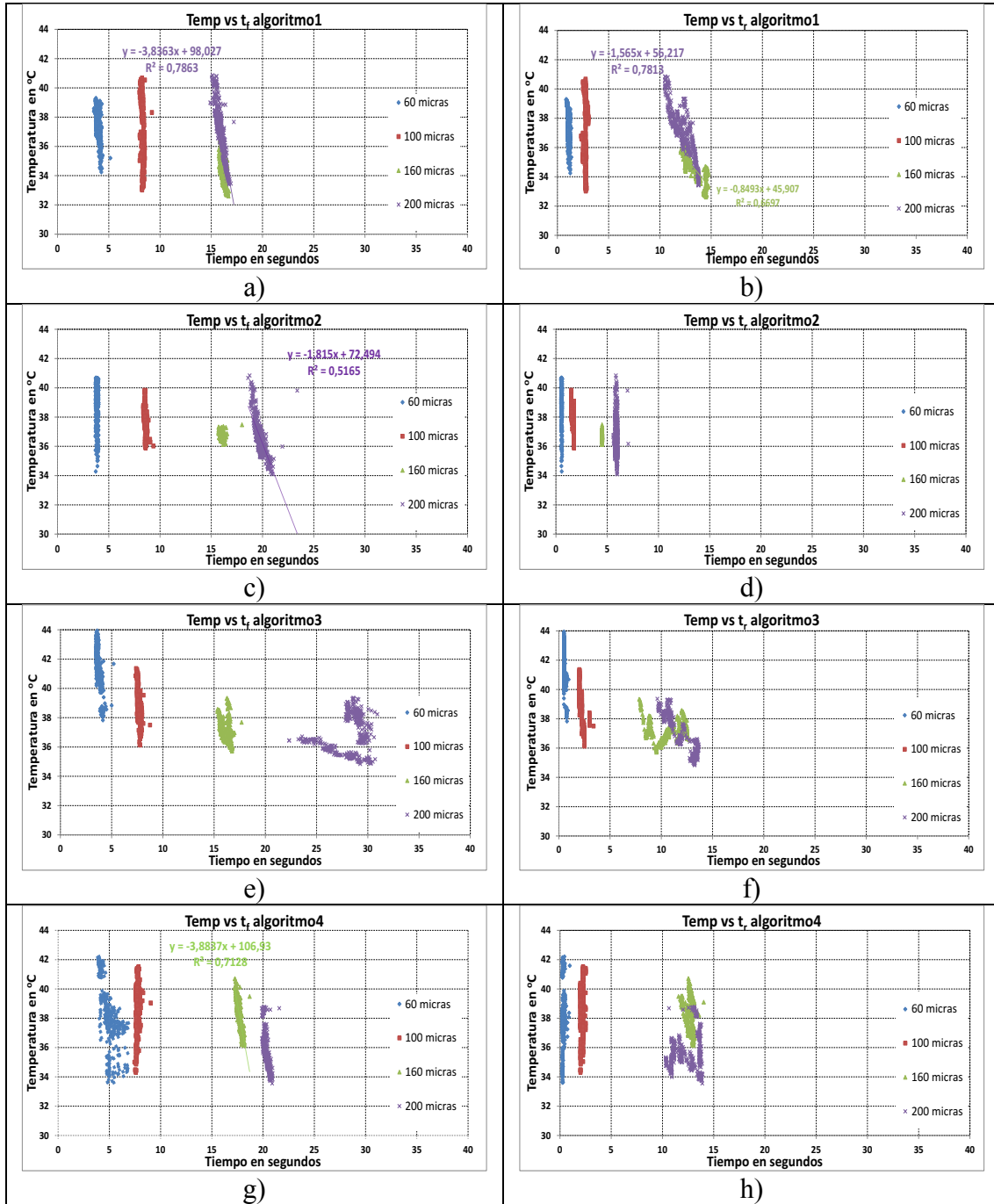


Figura 3.39. Temperaturas vs t_f y t_r (por algoritmos)

3.4 CONCLUSIONES

Se ha diseñado un sistema de medida en el que se puede configurar el tipo de señal a aplicar a un EC mediante una interfaz gráfica. El sistema se basa en una tarjeta de adquisición de datos, dos fotodiodos triples (RGB) y el sensor de temperatura LM335, de modo que el sistema permite medir en tiempo real la transmitancia de los cristales electrocrómicos, la temperatura, la tensión aplicada y la corriente que circula por los mismos, así como su almacenamiento en uno o varios ficheros compatibles con Microsoft Excel para su posterior procesado.

Se ha utilizado dicho sistema para analizar la respuesta de una serie de dispositivos electrocrómicos viológenos con vistas a optimizar su conmutación al usarles en filtros para discapacidad visual. De los resultados obtenidos y comentados anteriormente se puede deducir que:

- ✚ **ΔT aumenta con la tensión** hasta cierto valor de tensión en el que se produce una degradación repentina del E.C. (Figuras 3.6a y 3.8)
- ✚ La **transmitancia (mínima) disminuye linealmente con el espesor** (Fig. 3.1c) siendo del orden de $0,1 \% / \mu\text{m}$.
- ✚ El **tiempo de oscurecimiento (t_f) permanece casi constante** para un espesor dado **a diferentes tensiones** (Fig. 3.2b) y **aumenta linealmente con el espesor** (Fig. 3.2d).
- ✚ El tiempo de aclarado (t_r) sin embargo es **mayor si aumentamos la tensión** para un espesor dado (Fig. 3.2a) y **aumenta exponencialmente con el espesor** (Fig. 3.2c)
- ✚ El **tiempo de oscurecimiento** se sitúa entre los 3 segundos, para el espesor de 60 micras (Fig.3.32a), y los 20 segundos, para el de 260 micras (Fig.3.20a) **mejorando ligeramente el tiempo de lentes foto-cromáticas** como el caso de las PhotoFusion® de ZEISS, que varía entre 15 y 30 segundos [80].

- ✚ El **tiempo de aclarado** se sitúa entre 1 segundo para el espesor de 60 micras (Fig. 3.32b) y los 27 segundos para el de 260 micras (Fig. 3.20b) **mejorando sustancialmente** el tiempo de lentes foto-cromáticas como el caso de las PhotoFusion® de ZEISS que varía entre 5 y 10 minutos en lugares cerrados [80].
- ✚ Todos los cristales sometidos a estudio se comportaron bastante estables en cuanto a **ciclabilidad, perdiendo en torno al 2% de ΔT tras 5000 ciclos**. No se ha demostrado que la inversión de polaridad (algoritmos 3 y 4) provoque una gran mejora, en la ciclabilidad, frente a la no inversión (algoritmo 1) como se puede ver en las figuras 3.19, 3.22, 3.25, 3.28 y 3.31. Estos resultados están incluso mejorando la ciclabilidad de nuevas mezclas basadas en Titanio (Ti) cuyos resultados son mostrados en un estudio reciente de R-T. Wen et al [81] y con variaciones del 20% de ΔT tras 80 ciclos.
- ✚ El hecho de **invertir la polaridad parece mejorar el t_r en torno a $\frac{1}{2}$ segundo** (Fig. 3.34b) **pero empeora el tiempo de oscurecimiento** para espesores mayores de 160 μm , siendo éste dependiente del espesor (Fig. 3.34a) pero mayor de 1 segundo.
- ✚ El hecho de **no invertir la polaridad hace que la corriente máxima (o de pico) sea casi lineal y en ningún caso superior a 9 mA** (Fig. 3.35c) en los espesores analizados. Sin embargo si se invierte la polaridad, ésta corriente se dispara produciéndose picos de hasta 19mA para el espesor de 160micras (Fig. 3.35c). Además **el algoritmo 1 es el menos consumo tiene, en términos de P_{ef}** , para espesores mayores de 60 micras llegando a consumir entre un 9% y un 40% menos que el algoritmo 4 (Fig. 3.35b)
- ✚ **No se aprecia influencia de la temperatura en la variación de la transmitancia**, para las temperaturas registradas (Fig. 3.38)
- ✚ **No se ha apreciado una fuerte dependencia entre la temperatura y el tiempo de conmutación**, si bien parece haber una cierta influencia lineal para espesores mayores de 160 micras (Fig. 3.37) siendo ésta influencia algo más lineal para el algoritmo 1 (Fig. 3.39). No obstante, las variaciones de temperatura no fueron



excesivas (entre 30°C y 45°C) pudiendo estar los datos obtenidos influenciados por la ciclabilidad de los cristales.

Por todo lo anterior **el mejor de los cuatro algoritmos** en términos generales y manteniendo el compromiso de ciclabilidad / tiempo conmutación / variación de la transmitancia / consumo, **es el algoritmo1** (variaciones entre V_p y 0 V) si bien para espesores menores de 100 micras podría llegar a contemplarse el algoritmo 3, si el tiempo de aclarado es muy importante, ya que como vimos mejoraría su t_r en torno a medio segundo (Fig. 3.34b) manteniendo el mismo t_f (Fig. 3.33 y 3.34a) sin incrementar mucho la potencia eficaz, en torno al 9%, (Fig. 3.35b). En ese caso, el driver que alimente el cristal debe poder proporcionar corrientes de pico mayores: por ejemplo, en torno a 17mA de pico, para el caso de 100 micras (Fig. 3.35c).



4 DESARROLLO DE LA AYUDA TÉCNICA

El objetivo es desarrollar un nuevo prototipo de gafas en el marco de trabajo del GDAF-UC3M, para una ayuda electroóptica destinada a personas con baja visión (especialmente para pacientes con la enfermedad de Retinosis Pigmentaria), que se llamará de ahora en adelante **R8C-3GC**.

En este capítulo se realizará la justificación de las soluciones implementadas en el nuevo dispositivo, habida cuenta de que **debe ser funcional, compacto y buscando la eficiencia y la ergonomía en el diseño, y al mismo tiempo asegurando la usabilidad para estas personas con discapacidad.**

El presente documento explicará detalladamente el estudio del esquema electrónico, el estudio realizado de cara a una nueva línea de investigación del sistema de control de las gafas y la descripción final del Prototipo.

4.1 PUNTO DE PARTIDA

El punto de partida es crear un dispositivo capaz de adaptarse a situaciones de luz cambiantes ofreciendo una respuesta inteligente y automática, compatible con un control manual por parte del usuario que le permita ajustar el dispositivo a su propia elección. La respuesta se produce en forma del voltaje que, aplicado a los cristales EC, produce una

adaptación óptima de la transmitancia de los mismos a las necesidades visuales del usuario, de modo que no será necesario disponer de varios filtros adaptables a una montura o varios pares de gafas para adaptar la cantidad de luz que llega al ojo en situaciones donde la intensidad lumínica sea cambiante. Todo ello integrado dentro de una montura de gafas y con una estética lo más parecida posible a cualquier par de gafas comerciales.

A continuación se dará una descripción técnica detallada del funcionamiento de cada una de las partes y la elección de cada uno de los componentes de cada bloque del sistema.

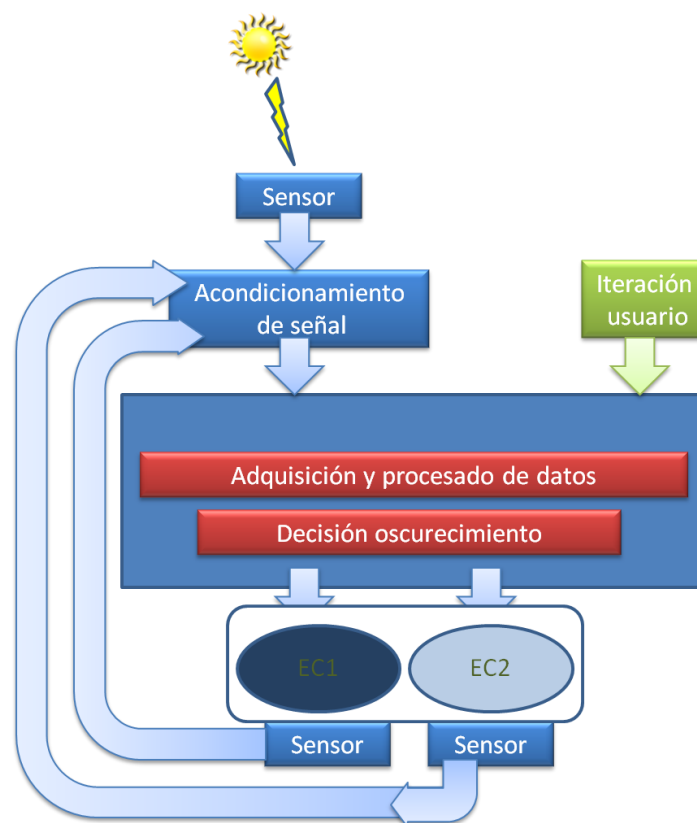


Figura 4.0. Diagrama de bloques funcional del dispositivo

El diagrama de bloques funcional del sistema es el mostrado en la figura 4.0. La ayuda técnica proporciona dos modos de funcionamiento: uno automático y otro manual (iteración usuario).

El modo automático utiliza dos sensores RGB situados tras los cristales de las gafas, que darán tres respuestas independientes en forma de corriente, rojo (R), verde (G) y azul (B),



en función de la luminancia o intensidad de luz que incida sobre ellos. Las tres respuestas provenientes de cada sensor son en realidad las respuestas de los tres fotodiodos que componen el sensor. La tensión generada tras el acondicionamiento en cada fotodiodo será proporcional a la intensidad luminosa recibida. En este modo, por defecto, se ajustan tres niveles seleccionables mediante dos pulsadores (uno para aumentar de nivel y otro para disminuir) que se corresponden con 2000, 4000 y 6000 luxes, de manera que el prototipo ajustará automáticamente la transparencia de los filtros para que en todo momento la intensidad luminosa que llega al ojo (detrás de los filtros) se corresponda con el nivel seleccionado.

En modo manual la operación se realiza con tres sensores en lugar de dos. En este modo se ajustan cuatro niveles de transmitancia seleccionables mediante dos pulsadores, por defecto: a 80%, 60%, 50% y 40% de transmitancia. Mediante un sensor situado en el puente de las gafas, se puede medir la intensidad luminosa que llega al dispositivo y con dos sensores idénticos tras los dos filtros EC, se va midiendo en tiempo real la transmisión de los mismos y en adelante transmitancia, por medio de la relación entre la medida de cada fotodiodo tras los filtros y la del fotodiodo exterior (Ec 4.1).

$$T = \frac{I_{trasEC}}{I_{ext}} \quad (Ec.4.1)$$

Además el dispositivo cuenta con un test de comprobación de funcionamiento de los cristales (mediante la pulsación simultánea de ambos pulsadores durante 5 segundos o más). En este test se oscurecen al máximo los cristales durante 15 segundos para luego volver al modo de funcionamiento en el que se encontraba el dispositivo.

Por consiguiente, tras cada sensor las tres señales de intensidad se transforman en tensión mediante un bloque de acondicionamiento de la señal, que transforma la señal recibida en una señal adecuada para su procesado. Se trata fundamentalmente de unas resistencias.

Tras esta etapa acondicionadora, las señales son leídas de manera secuencial por parte del microcontrolador. El bloque de control analizará la intensidad del iluminante mediante el almacenamiento de muestras. En función de estos datos junto con el porcentaje de transmitancia que debe ser aplicado a los cristales (en modo manual) o los luxes (en modo



automático) el bloque de control decidirá la tensión a aplicar a los filtros EC, que irá variando hasta conseguir una intensidad adecuada medida en los fotodiodos.

La adquisición de datos y el procesado digital de los mismos es una tarea llevada a cabo por el microcontrolador. Se realiza un almacenamiento temporal de las muestras tomadas por el sensor, teniendo en cuenta las características escogidas para el acondicionamiento de la señal. Cuando el microcontrolador dispone de la información de todos los sensores, la procesa y puede tomar una decisión.

El microcontrolador se encuentra en todo momento midiendo los tres sensores, por lo que es posible saber el nivel de transmitancia alcanzado en cada momento y tomar la decisión de oscurecer o aclarar los cristales cada 250 ms.

De manera simultánea al procesado automático y manual, el usuario puede interactuar con el sistema, por ejemplo, por no sentirse del todo cómodo con el nivel seleccionado en el dispositivo. De esta forma, mediante dos pulsadores electromecánicos, es posible el aumento o disminución del citado nivel entre los disponibles. Por tanto, el dispositivo está constantemente tomando una decisión en función de lo que se ha detectado y el nivel elegido por parte del usuario.

En la figura 4.1 se muestra un diagrama de funcionamiento.

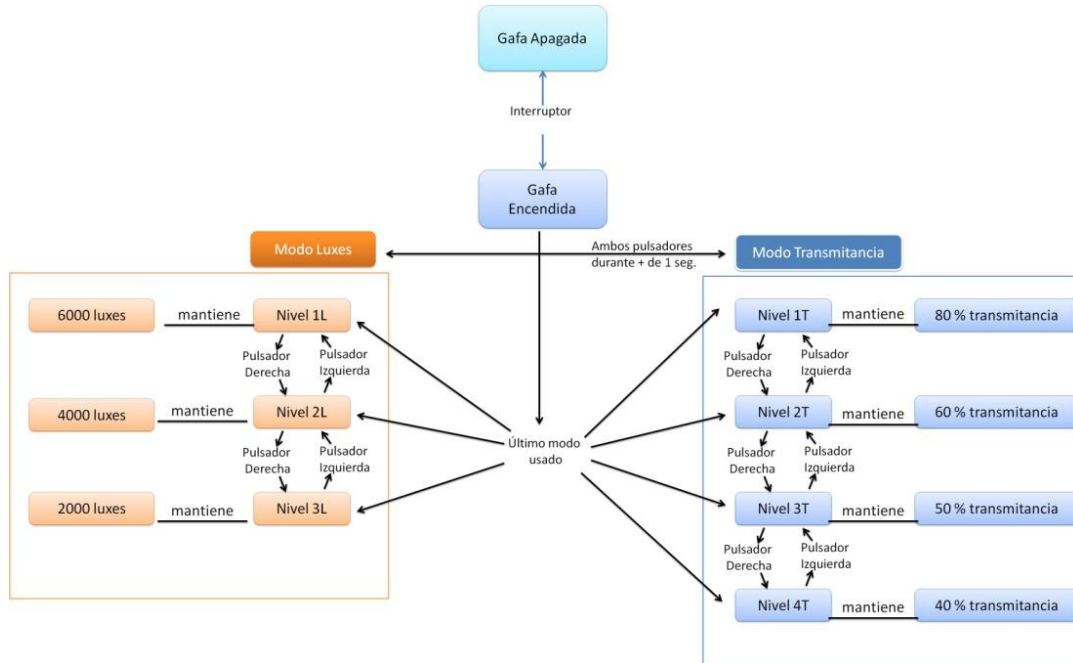


Figura 4.1. Diagrama de funcionamiento

Además, se pretende que mediante un PC los niveles seleccionables por parte del usuario sean completamente configurables por parte del profesional oftalmológico.

Bajo estas premisas se busca desarrollar un prototipo, **R8C-3GC**, que tratará de cubrir las necesidades mencionadas y conforme al siguiente diagrama de bloques de alto nivel (Fig. 4.2).

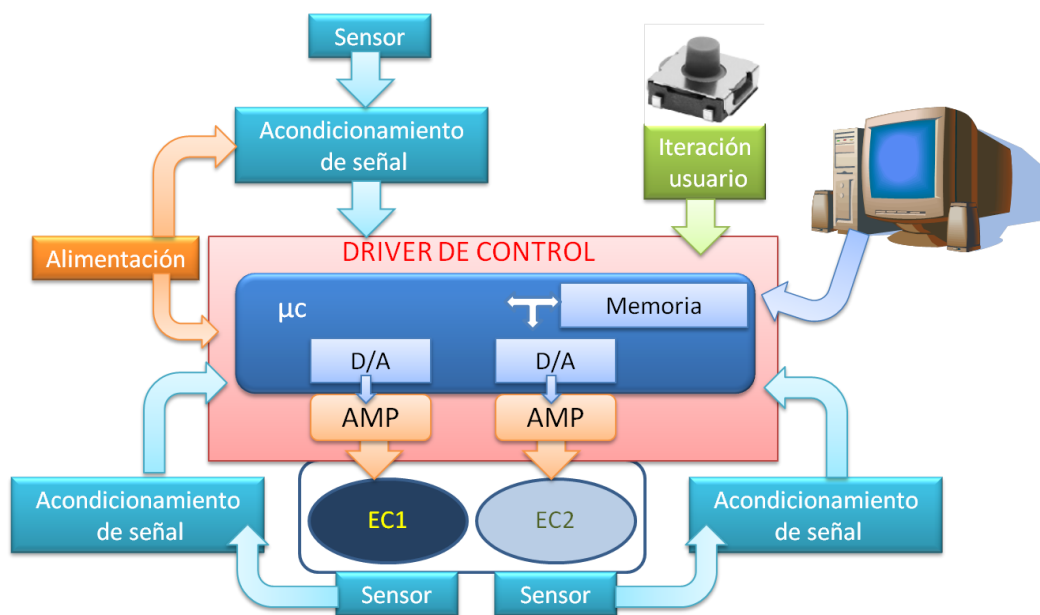


Figura 4.2. Diagrama de bloques funcional del prototipo R8C-3GC



A continuación se detalla la descripción de los objetivos que se propone alcanzar en este prototipo:

- Sensor y acondicionamiento de la señal lumínica.
 - Miniaturizar el sensor RGB.
 - Explorar opciones de acondicionamiento de la señal. Lograr reducir el esquema electrónico de acondicionamiento (miniaturización).

- Driver de control.
 - Monitorizar en tiempo real el estado de transmitancia de los dispositivos EC.
 - Optimizar el consumo para que éste sea lo más bajo posible, a fin de conseguir un rendimiento máximo de las baterías.
 - Amplio rango de funcionamiento de la etapa de salida a fin de mejorar adaptabilidad a posibles nuevos cristales EC así como a distintos algoritmos. La etapa de salida debe estar preparada para futuras necesidades de los cristales EC, ofreciendo un rango variable de tensión y corriente suficiente.
 - Alta precisión en los posibles niveles de voltaje de salida.
 - Establecer una etapa de salida con tensiones asimétricas y bipolares, debido a la asimetría en las posibles señales de excitación de los cristales EC, como se ha visto en el capítulo anterior. Si bien se ha encontrado óptimo un algoritmo en que no hay bipolaridad (algoritmo 1), en algún caso de pequeño espesor (menor de 160 micras) en el que el tiempo de aclarado sea muy importante, se ha visto cómo el algoritmo 3 podría mejorarlo a costa de un aumento de la potencia eficaz.



- Ajuste de transmitancia independiente en cada cristal EC, pues por el proceso de fabricación de estos dispositivos pueden usarse dos filtros que necesiten diferentes tensiones para alcanzar el mismo grado de transmitancia. Ello se debe a la dispersión en las características eléctricas tras la fabricación de los mismos.
 - Reducción máxima del número de componentes, y por tanto miniaturización.
 - Establecer un sistema de comunicación entre el sistema y cada uno de los pulsadores independientes.
 - Comunicación con el sensor lumínico. Optimizar un sistema de muestreo que acorde con la teoría de Nyquist permita tomar suficientes muestras significativas para el sensado de los niveles de luz.
 - Estudio de posibles algoritmos de control para tomar la decisión a priori óptima.
 - Comunicación con PC.
- Interfaz de control de usuario.
- Empleo de pulsadores mecánicos para la conmutación manual de los niveles de transmitancia de los cristales EC.
 - Fabricación y ensamblaje en montura.
- Alimentación.
- Empleo de baterías recargables de mínimo tamaño y máxima duración.
 - Implementar sistema de carga de baterías en el propio prototipo, dentro de la montura de las gafas.



- Integración del sistema completo en la montura de las gafas.
 - Miniaturización general del sistema.
 - Desarrollo del Layout.
 - Fabricación y ensamblaje en montura.

4.2 HARDWARE

En el presente apartado se hará una breve descripción del hardware, pero se puede consultar el mismo con detalle en el Anexo I.

Con el fin de cumplir los objetivos presentados previamente, se decidió usar el fotodiodo utilizado en el Capítulo 2 (Hamamatsu S10917-35GT), polarizado en inversa, donde ya se justificó su elección por su respuesta espectral. Pero además sus reducidas dimensiones, apenas 5mm^2 , concuerdan con la especificación de miniaturización buscada, convirtiéndolo en ideal en el momento de realizar el presente trabajo, ya que tras realizar una búsqueda exhaustiva por los principales fabricantes, no existía otro de menores dimensiones y similares características.

Las características específicas de la transducción y sensibilidad de este componente (S10917-35GT) se mostraron en la figura 2.4.

La corriente generada por cada fotodiodo, proporcional a la intensidad de la luz recibida, atraviesa una resistencia conectada al mismo, y así se obtiene una diferencia de potencial en bornes de la resistencia proporcional a la corriente creada, por la ley de Ohm, y por consiguiente proporcional a la intensidad de radiación recibida.

Para poder medir las señales provenientes de los sensores RGB, tomar una decisión en función de la intensidad lumínica y aplicar una salida independiente a los EC se hace necesario conseguir un microcontrolador sin olvidar el reducido tamaño y bajo consumo.



Tras la búsqueda, y teniendo en cuenta las condiciones de partida del apartado 4.1, finalmente se decidió utilizar el microcontrolador R8C-3GC de Renesas por sus reducidas dimensiones y amplias características (además de su bajo coste: de apenas 1,5 euros). Si bien no cumple completamente todas las necesidades, es el que más se aproxima a las mismas de entre todos los hallados en el momento en que se hizo la búsqueda.

Algunas de las principales características del R8C-3GC son [83]:

- ✚ 8 conversores A/D de 10 bits. → Resolución ($V_{cc}=3,3V$) 3,2mV
- ✚ Oscilador “On-chip” (20 MHz).
- ✚ 2 conversores D/A de 8 bits. → Resolución ($V_{cc}=3,3V$) 12,9mV
- ✚ Unas dimensiones de 4x4mm.
- ✚ 7 entradas para interrupciones externas.
- ✚ Memoria Flash Datos (4kbytes)
- ✚ Circuito de detección de voltaje de alimentación bajo.
- ✚ 2 interfaces serie (UART).
- ✚ Voltaje de funcionamiento de 1,8V hasta 5,5V.

Para este prototipo se ha utilizado el oscilador interno rápido (*High-speed on-chip oscillator clock*), con una frecuencia de 20MHz. Como su nombre indica es interno, y no necesita de ningún componente externo, lo que supone una ventaja a la hora de la miniaturización.

Uno de los problemas de todos los microcontroladores encontrados es la limitación que tienen en cuanto la corriente de salida suministrada por el conversor D/A integrado, siendo en todos los casos inferior a 5mA, por lo que se hace necesario incluir una etapa de salida para suministrar 20 mA. Siendo cantidad de corriente suficiente para que, aunque la corriente demandada por los cristales EC sea mayor de la suministrada por el micro, no haya problemas en mantener la tensión aplicada. En nuestro caso se ha optado por un buffer y un multiplexor analógico proporcionándonos la posibilidad de invertir las señales.

Las dos funciones básicas de las etapas de salida están implementadas por el Buffer LMH6718, de reducidas dimensiones (5x6 mm), y el multiplexor analógico ADG794.



El Buffer LMH6718 mantiene la tensión del convertor digital-analógico del micro y consigue ofrecer hasta 200mA a su salida [84], realizando a la vez la función de aislar las etapas anteriores.

El multiplexor analógico ADG794 [85], proporciona la funcionalidad de inversión de la tensión de salida (lo que permite implementar algoritmos de inversión de polaridad como los vistos en el Capítulo 2).

Ambos chips obtienen la alimentación de un regulador de tensión tps73233 de 3,3V y de reducidas dimensiones, apenas 3x3 mm (encapsulado SOT23). Este regulador tiene la importante característica de ofrecer a su salida hasta 250mA [88] de corriente, lo que cubre las necesidades del dispositivo para nuestro propósito.

En cuanto a las baterías empleadas, se ha optado por dos de Litio-Polímero modelo AE401438P8H suministradas por la empresa Tempel. La elección se hizo bajo dos premisas: obtener unas baterías que ofreciesen la mayor capacidad posible y la máxima corriente de descarga continua posible, para soportar picos de corriente en caso de usar algoritmos con inversión de polaridad o cristales que aun funcionando con el algoritmo 1 (sin inversión de polaridad) demandaran más corriente de la medida en el capítulo anterior, pero teniendo en cuenta su integración en la montura de las gafas. Sus dimensiones de 38mm x 14mm x 4mm y 4g de peso hacen viable su colocación en las patillas de las gafas, y su capacidad (160mAh) junto con su corriente máxima de descarga continua (320mA) hacen de esta batería un buen candidato. Además cuentan con un circuito de protección contra cortocircuitos y sobrecarga.

El cargador de baterías se ha integrado dentro del prototipo, mediante el controlador de carga MCP73832T-2ACI/OT de apenas 3x3 mm [89], lo que hará que se puedan cargar mediante cualquier cable microUSB conectado a una fuente de alimentación, como puede ser un puerto USB del PC.

El proceso de carga, bien con PC o con un cargador de red ofrece resultados idénticos, ya que la carga se controla mediante el chip MCP73832T-2ACI/OT, obteniéndose el valor de 2 horas y 10 minutos.

Para comprobar el correcto funcionamiento de las baterías en la futura operación del dispositivo, se programaron diferentes comportamientos temporales basados en la conmutación usando el algoritmo1 (visto en el capítulo 3). Se tiene en cuenta que los mayores consumos de corriente se producen durante la conmutación del dispositivo, tal como se comprobó en el apartado 3.1.2 (Fig. 3.13-3.17). Por tanto, se programaron a modo de funcionamiento continuo dos comportamientos de conmutación, uno a razón de una vez cada 5 minutos, y otro aún más rápido, a dos veces por minuto. Al aplicarlos en el sistema final y medir la tensión en las baterías, se puede conocer el consumo real del dispositivo completo en operación.

Algoritmo 1 conmutando en torno a una vez cada 5 minutos

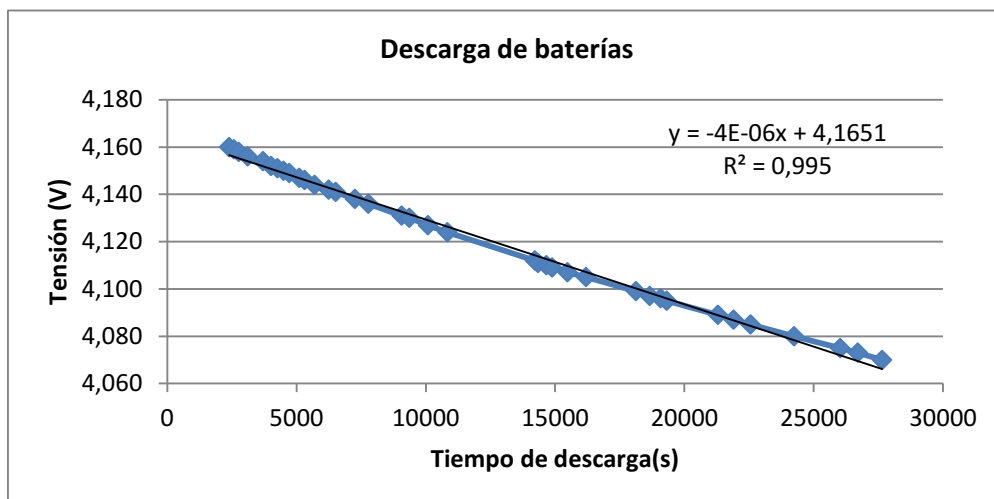


Figura 4.3. Representación de la evolución de la tensión de las baterías (test 1)

Como se puede ver en la figura 4.3, la batería se descarga casi linealmente. Extrapolando los resultados anteriores se alcanzaría una tensión de 3V transcurridos 291.275 segundos o lo que es igual **80,9** horas. Esto significa que a un ritmo lento de conmutaciones, durante 8 horas al día, podríamos estar hablando de **unos de 10 días sin necesidad real de recarga**.

Algoritmo 1 conmutando unas 2 veces por minuto

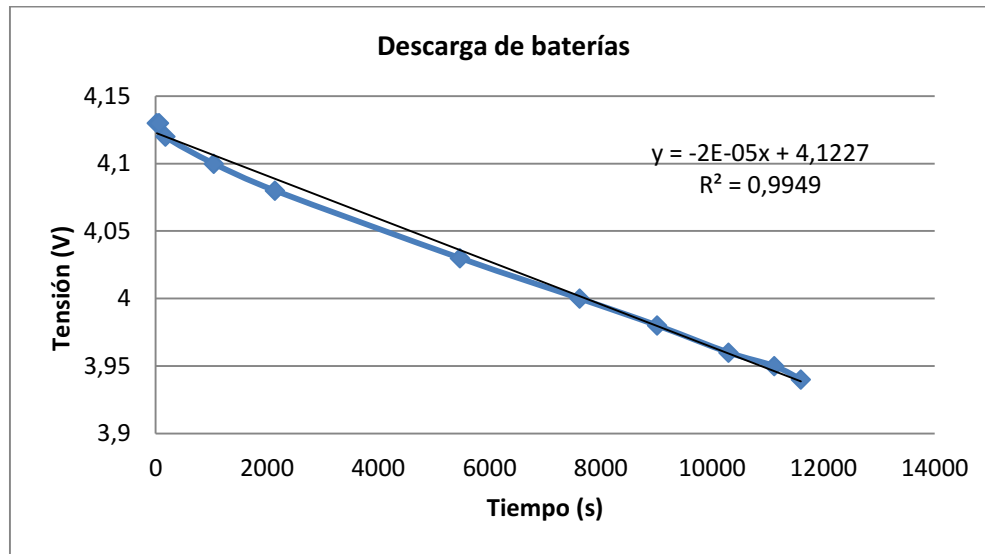


Figura 4.4. Representación de la evolución de la tensión de las baterías (test 2)

Extrapolando los resultados del segundo test (Fig. 4.4) se alcanzaría una tensión de 3V transcurridos 56.135 segundos o lo que es igual **15,6 horas**. Esto significa que a un ritmo intenso de conmutaciones (donde mayor es el consumo de corriente) durante 8 horas al día, podríamos estar hablando de **más de 2 días sin necesidad real de recarga**.

La funcionalidad de encendido y apagado se lleva a cabo mediante la conexión y desconexión de las baterías con un micro interruptor de reducidas dimensiones (8,6 mm x 3,5 mm)

Se han utilizado dos sencillos pulsadores electromecánicos para dotar de una interfaz de control por parte del usuario al dispositivo. El modelo utilizado es el B3SL-1022P (6x6mm)

Los pulsadores se encuentran conectados a unos pines del microcontrolador que permiten recibir interrupciones externas.

4.3 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA COMPLETO EN LA MONTURA DE LAS GAFAS

Inicialmente el prototipo se pretendía implementar sobre la patilla de una montura proporcionada por Indo de dimensiones mostradas en la figura 4.5:

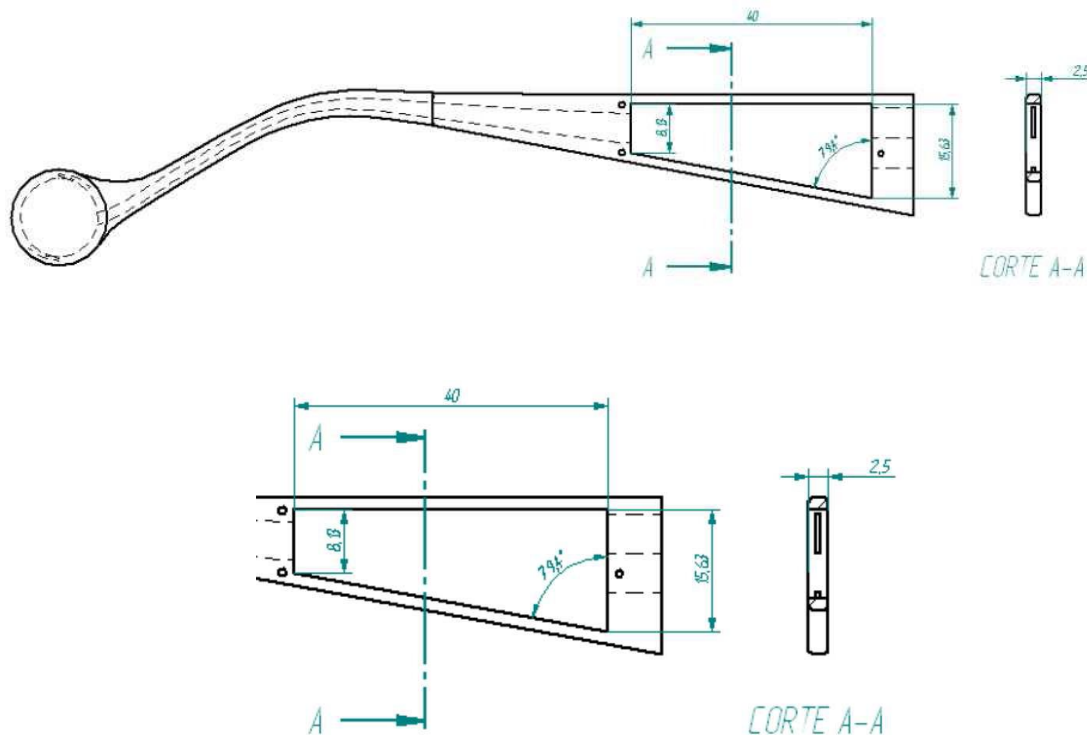


Figura 4.5. Primera propuesta de ubicación de la electrónica por parte de INDO. El cableado irá interiormente por la montura, tanto patilla como frontal.

La principal dificultad era conseguir empaquetar, rutar y montar toda la electrónica en el espacio que INDO ofrecía en sus monturas. La Figura 4.5 muestra una cavidad prevista trapezoidal, con longitud de 40 mm, y anchura de 8,6 a 15,63 mm con un espesor de unos 2,5 mm. Obviamente, miniaturizar la electrónica en este espacio no era tarea fácil, pero se consiguió, como muestra la figura 4.6.

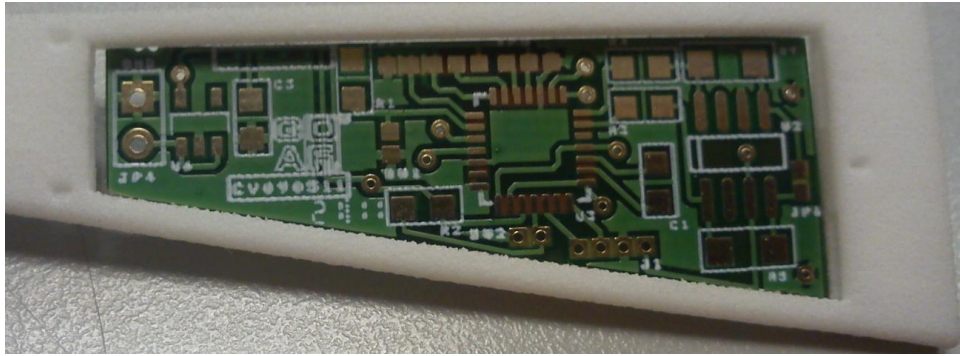


Figura 4.6. Primera prueba de integración en montura

Pero el principal problema que se presentó fue pasar todas las conexiones de la patilla al resto de la gafa sin el peligro de partirlas al abrir y cerrar las patillas, como se puede ver en el diagrama de conexiones global (figura 4.7) donde 12 pistas de conexión deben de pasar de la patilla hasta el frontal, así como tener suficiente espacio para las baterías.

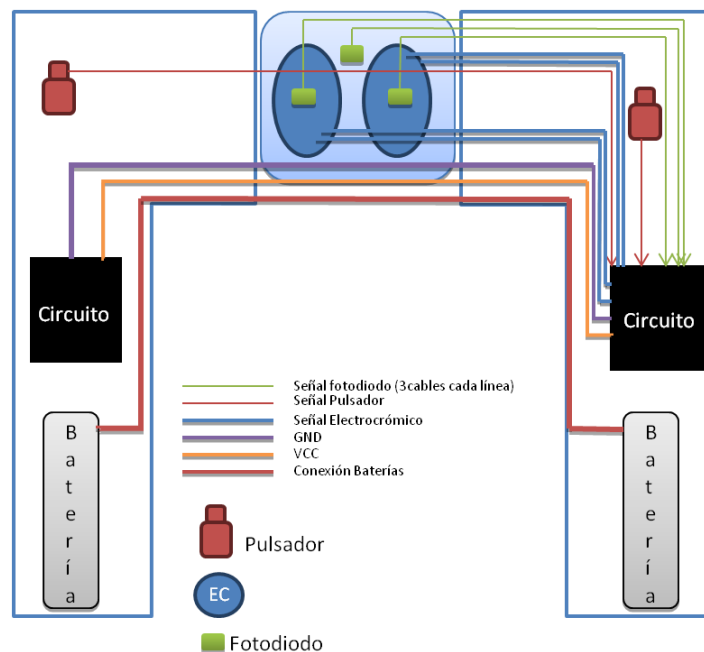


Figura 4.7. Diagrama de conexiones y elementos a integrar.

Tras barajar varias posibilidades, se contempló diseñar el circuito sobre el frontal de las gafas, como se había hecho con un prototipo anterior al trabajo de esta Tesis, prototipo V10 [79] (figura 4.8), de modo que la mayor parte del espacio de la patilla se destinara a las baterías y sólo hubiese que pasar un par de cables de la patilla al frente.



Figura 4.8. Prototipo6V10. [79]

Para mantener esta idea, había que adaptarse en esta ocasión a la exigencia de un frontal más comercial, de forma curva. Se recurre por ello a un circuito flexible, de manera que el resultado ergonómicamente hablando fuera satisfactorio, de modo que la PCB pudiera insertarse en la montura proporcionada por INDO, que envió un diseño para trabajar sobre él como el de la Figura 4.9.

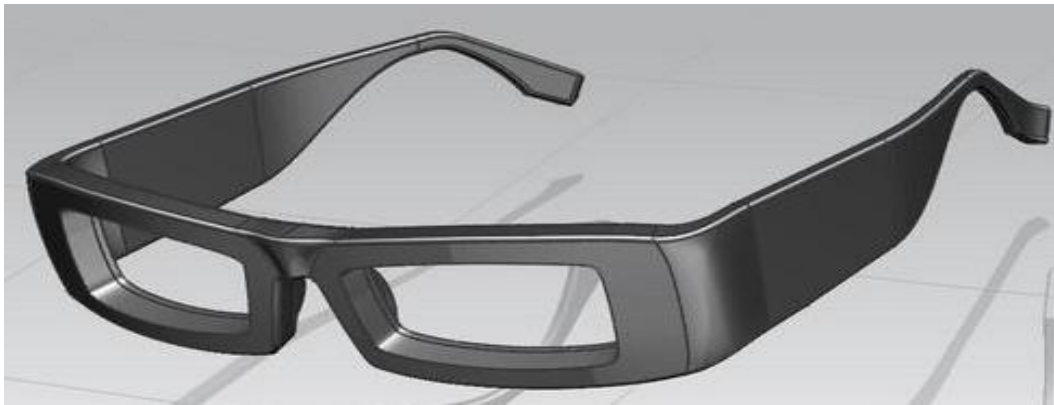


Figura 4.9. Montura proporcionada por INDO.



Figura 4.10. Espacios a utilizar.

En la Figura 4.10 se muestra la distribución de espacio que se consideró a partir de ese momento. Ahora, como se puede observar el principal problema es el paso de pistas por la zona superior del frontal (Fig. 4.11), como en principio sería lo deseado.

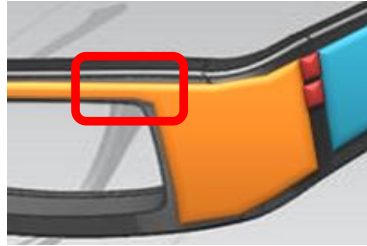


Figura 4.11. Detalle de espacios

Las dimensiones ahora disponibles son las mostradas en la figura 4.12:

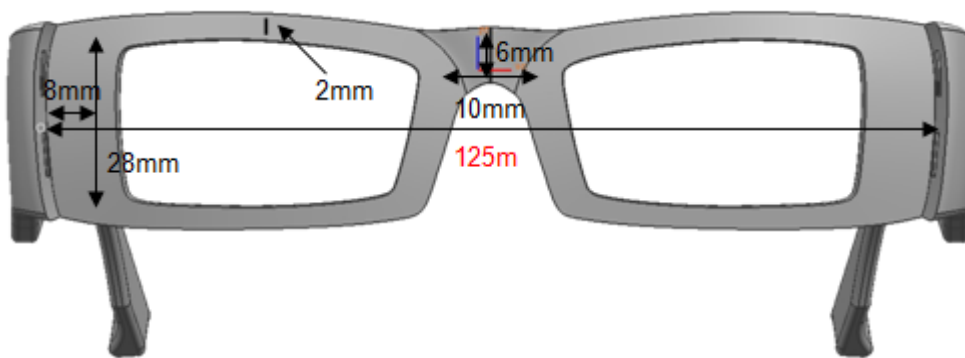


Figura 4.12. Dimensiones disponibles para el circuito impreso

Además el circuito debe ser flexible para adaptarse a la forma de la montura.

Tras calcular la corriente necesaria por las pistas de cobre que llevarán las diferentes señales en el circuito, obtenemos los siguientes resultados:

- Pistas de señal: 15 mA.
- Alimentación: 50 mA.
- Pistas a los cristales EC: 25 mA.
- Pistas de batería: 160 mA.

Partiendo de estas premisas, y suponiendo que trabajaremos con capas internas y un espesor de cobre de $35 \mu\text{m}$, y según la norma internacional para desarrollar circuitos

impresos IPC2221 [90], que permite el cálculo según los amperajes establecidos y el espesor de las capas de cobre, obtenemos los siguientes anchos de pista:

- Pistas de señal: $\geq 0,09$ mils. (0,002mm)
- Pistas a los cristales EC: $\geq 0,19$ mils (0,004 mm)
- Alimentación: $\geq 0,49$ mils (0,0125 mm)
- Pistas de batería: 2,456 mils (0,062)

(Según la norma IPC2221, para capas externas el ancho de pista puede ser menor)

Sin embargo, si atendemos a las posibilidades de fabricación, tenemos la restricción de ancho de pista mínimo de 0,15mm y de separación entre pistas 0,15mm [91].

Con los datos anteriores, las reglas de diseño según los fabricantes de circuitos impresos y la tipología del circuito, se procede a calcular el espacio necesario para trazar las pistas.

A la vista de las citadas dimensiones (figura 4.12) y sólo disponer de 2 mm por la parte superior, se hace imposible el trazar todas las pistas de los sensores puesto que necesitamos 0,15 x 9 pistas separadas $0,15 = 2,55$ mm $+ 1^3 = 3,55$ mm. Si lo separamos en capas tenemos que en cada capa podemos pasar un máximo de 4 pistas de 0,15 separadas $0,15 = 1,05 + 1 = 2,05$ mm. Como tenemos 9 pistas necesitamos al menos dos capas para las señales de los fotodiodos quedando sólo dos capas para el resto de señales, haciendo imposible el rutado con las actuales dimensiones y un circuito de 4 capas.

Se podría aumentar el número de capas para solventar el problema pero cada capa que se añade al circuito hace más rígido el mismo.

Finalmente, y una vez consensuado con Indo, se decide sacrificar temporalmente la funcionalidad completa del Fotodiodo RGB central, en lugar de agrandar las dimensiones de la montura, utilizando únicamente la señal correspondiente al color verde (longitud de onda de pico a 540nm) ya que es la longitud de onda que corresponde a la máxima sensibilidad del ojo humano, e implementarlo mediante un circuito de 4 capas. La

³ Debido a las reglas de diseño del fabricante del circuito impreso: distancia del cobre al borde de placa (0,5mm)

distribución de las señales a pasar por el frente (figura 4.13), es decir, de las pistas, en dicho circuito, se conforma como sigue:

- ✓ TOP: 3 señales (una de cada fotodiodo) + una de un pulsador
(4 pistas de 0,15 separadas $0,15=1,05 + 3^1 = 2,05\text{mm}$)
- ✓ INNER1: Plano de Masa.
- ✓ INNER2: Plano V_{CC} + 1 pista para conectar las baterías.
(1 pista de $0,15=0,15 + 0,3$ separación al plano = $0,45 + 1^4 = 1,45\text{mm}$)
- ✓ BOTTOM: 3 señales de alimentación de los cristales
(3 pistas de 0,19 separadas $0,15=0,87 + 1^4 = 1,87\text{mm}$)

Al no sobrepasar ninguna de las 4 capas de los 2mm de ancho disponibles (Fig. 4.12) se está en condiciones de fabricar el circuito impreso.

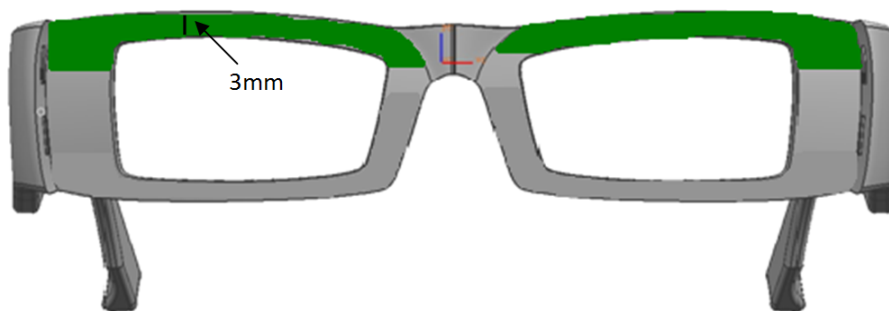


Figura 4.13. Espesor necesario en la montura.

En cuanto al Espesor se necesitan 3mm, ya que el grosor final del circuito impreso estará en torno a 1mm (circuito impreso) + 2mm (altura de los componentes).

Tras esta reconfiguración de señales el diagrama global de conexiones que se vio en la figura 4.7 pasaría a ser el mostrado en la figura 4.14 reduciendo el número de conexiones para los fotodiodos de 9 (que se contemplaban inicialmente) a 3.

⁴ Debido a las reglas de diseño del fabricante del circuito impreso: distancia del cobre al borde de placa (0,5mm)

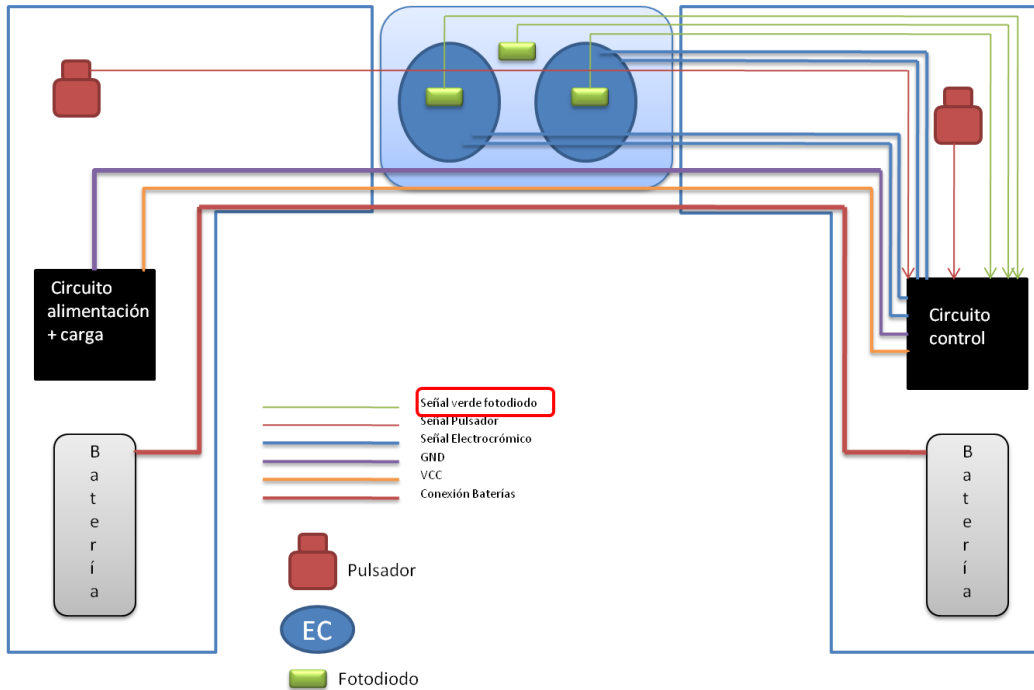


Figura 4.14. Diagrama de bloques y conexiones final.

La tecnología a utilizar es [4F] (4 CAPAS FLEXIBLES), de entre las comercializadas por la empresa Würth Elektronik, referente en la fabricación de circuitos flexibles.

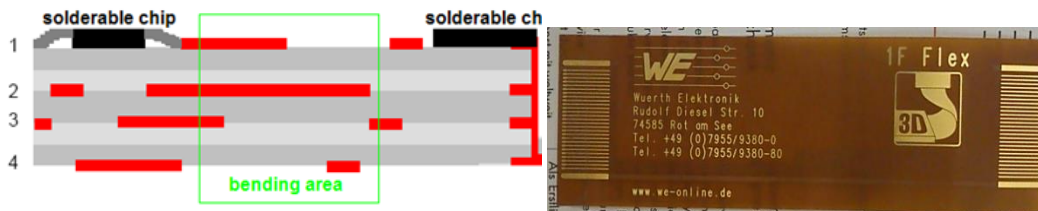


Figura 4.15. Ejemplo de circuito 4 capas flexibles.

El circuito con 4 capas flexibles (figura 4.15) produce una zona de conexión entre subcircuitos totalmente flexible, con la limitación de que sólo puede curvarse con un radio de curvatura mínimo de 5mm un número no superior a 100 veces, pero que en nuestro caso es más que suficiente (sólo necesitamos curvarla una, en el proceso de inserción en la montura).

En la Figura 4.16 se puede ver la versión del circuito flexible una vez terminado el montaje de componentes por su cara TOP.

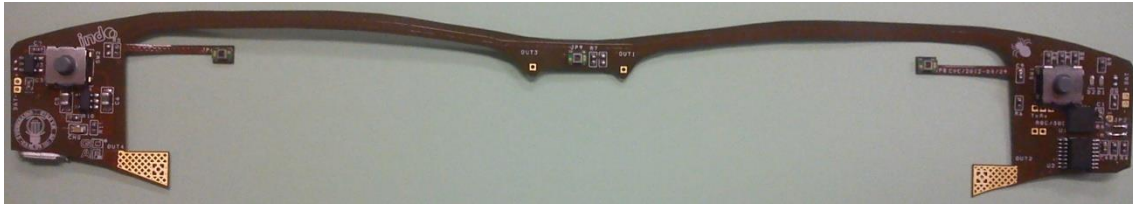


Figura 4.16: PCB con componentes soldados

Esta PCB mantiene el tamaño de las especificaciones, cumpliendo así las necesidades de tamaño impuestas por las monturas escogidas.

En la Figura 4.17 se puede apreciar la conmutación de una lente con el software del siguiente epígrafe programado en el prototipo antes de ensamblar en la montura.



Figura 4.17. Verificación previa a ensambaldo de conmutación de un cristal.

Finalmente, se colocan el circuito, interruptor y baterías en la montura. Dando como resultado la versión del Prototipo integrado completamente sobre la montura de las gafas (Fig. 4.18).

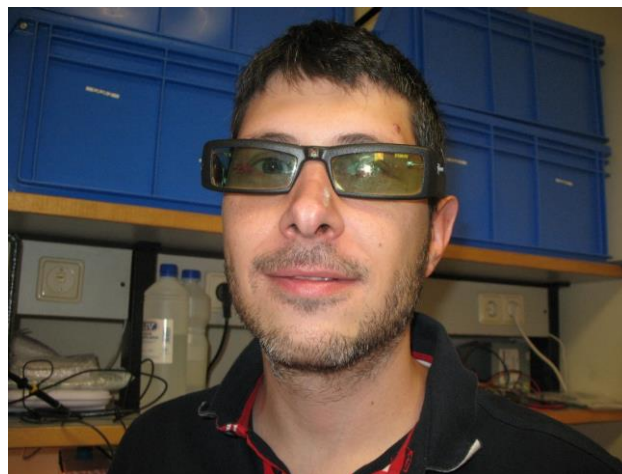


Figura 4.18: Prototipo completamente integrado

4.4 SOFTWARE

En el presente apartado se hará una breve descripción del software programado, pero se puede consultar el mismo con detalle en el Anexo II.

Para que los cristales EC realicen la función prevista en las gafas descritas en el apartado anterior, se ha desarrollado un software interno mediante el entorno de desarrollo *High-performance Embedded Workshop* (HEW) de Renesas Electronics Corporation, versión 4.09.01.007. Su elección fue obvia por ser el entorno ofrecido por la propia marca del microcontrolador.

Para la comprensión de la ejecución de este programa se debe tener en cuenta que, a la vez que se ejecuta el programa principal, existen procesos paralelos en ejecución o en espera.

Por tanto se divide el programa completo en *código principal* y *procesos paralelos*. Estos procesos paralelos se conocen como interrupciones (a la derecha en la Figura 4.19).

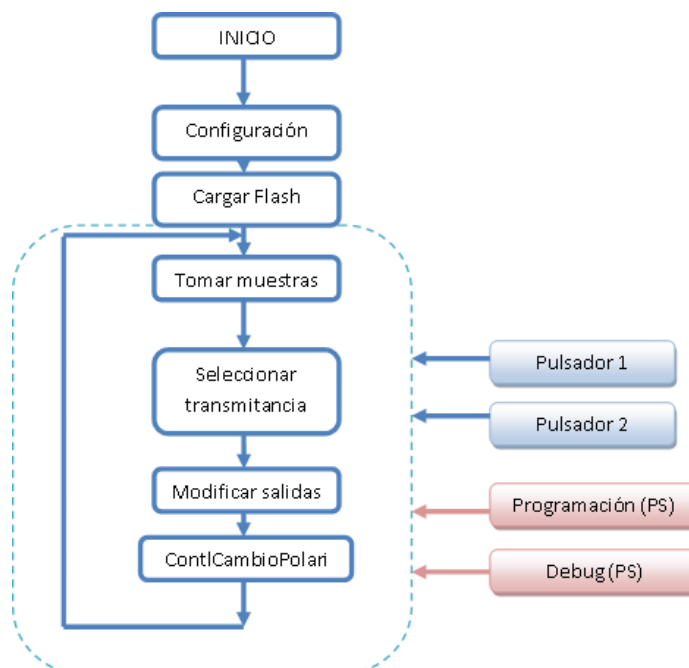


Figura 4.19. Diagrama de bloques del programa completo.



El código programado, comienza con una inicialización de todas las constantes y variables comunes a toda la ejecución del código, y la definición de todos los métodos empleados.

Inmediatamente después de la inicialización, comienza la función *main*, que se puede distinguir nuevamente en tres partes: *configuración*, *cargar flash* y *ejecución principal*.

Como su nombre indica, la configuración se encarga de ajustar los registros y flags adecuados para el funcionamiento de todos los periféricos necesarios y precargar los procesos paralelos, o interrupciones.

La carga de flash verifica si se ha realizado una configuración manualmente mediante el puerto serie, y si ese es el caso sustituye los parámetros por defecto por los hallados en la memoria flash.

La ejecución principal se trata de un bucle infinito en el que se mantiene la gafa desde su encendido hasta su apagado. Esta parte del código es el núcleo del funcionamiento del mismo: mediante diferentes métodos y algoritmos se obtiene el nivel de tensión que le corresponde colocar a la salida al driver electrónico. Será la comparación entre la información obtenida del sensor lumínico central y/o la información obtenida de los sensores situados detrás de cada cristal lo que proporcione el nivel de transmitancia.

Existen 4 interrupciones o procesos paralelos.

Las dos primeras interrupciones son *Pulsador1* y *Pulsador2*:

- ✓ Se encargan de indicar al proceso principal que el usuario desea aumentar/disminuir respectivamente un nivel respecto del que actualmente posee la gafa: son las interrupciones externas provocadas por la activación de los pulsadores por parte del usuario.
- ✓ Alternar entre los modos de funcionamiento Manual y Automático.



- ✓ Entrar en modo comprobación (oscurecimiento continuo durante 15 segundos).

A ambas se entra automáticamente cuando se produce la pulsación de cada uno de los pulsadores.

Las dos segundas corresponden con la reprogramación del micro (programación PS) o visualización de parámetros (Debug PS) ambas mediante el puerto serie del micro y para la personalización del prototipo por parte del profesional oftalmológico.

Debido a las posibles señales a medir por el sensor, entre ellas luz fluorescente pulsando a una frecuencia típica de 100Hz, se han tenido una serie de cuidados a la hora de realizar el muestreo. Se desea tomar las muestras de manera que se pueda obviar el uso de un filtro paso bajo hardware a la frecuencia indicada, pues aumentaría el tamaño del circuito a desarrollar y uno de los objetivos es la miniaturización.

Utilizando la teoría del muestreo y el teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia de la señal (200Hz en este caso) por lo que en el prototipo se ha configurado al valor de 234 Hz (ANEXO II).

Una vez tomadas las muestras, se produce un procesado. Primero se comprueba el modo de funcionamiento en el que se encuentra el dispositivo (manual o automático) y en función de éste y del nivel seleccionado mediante los pulsadores, se selecciona el parámetro objetivo: bien *Luxes ajustados en los fotodiodos traseros* (modo automático) o bien *tanto por ciento de transmitancia* (modo manual), siempre que, en el modo manual, el sensor central detecte una cantidad de luxes mayor o igual que el definido para el usuario (en la programación del dispositivo mediante el cable USB). En caso contrario se aplican unas tensiones fijas para cada nivel, mediante una tabla predefinida (también configurable mediante el cable de programación USB).

Esta tabla es debida a la imposibilidad de mantener unos niveles de transmitancia en determinadas circunstancias como son las condiciones de baja luminosidad, y cuya generación se explica a continuación.

Si se observa detenidamente la figura 4.20 (extraída de las hojas de características del fotodiodo), se encuentra la particularidad de que la curva no acaba en el punto (0,0) como cabe esperar. Este punto sería el que, a una iluminancia dada, genera una tensión nula. No es así. No se puede tener una tensión nula nunca, por dos motivos: uno es que el fotodiodo tiene una sensibilidad mínima para que empiece a conducir, a generar una corriente. No se podrá operar por debajo de una cierta cantidad de luxes porque el fotodiodo simplemente no reacciona. Aunque esta cantidad puede ser muy pequeña, en la figura 4.20 se observa que existe una corriente de oscuridad en función de la tensión de polarización del fotodiodo. Esta corriente existe se haga lo que se haga, y deriva, naturalmente, en una tensión mínima medida. Como se aprecia en la figura 4.20, esta corriente es mayor cuanto mayor sea la tensión de polarización del fotodiodo. Sin embargo, aunque sea la menor posible, se genera una corriente que, multiplicada por la resistencia de acondicionamiento, da lugar a una tensión mínima de offset.

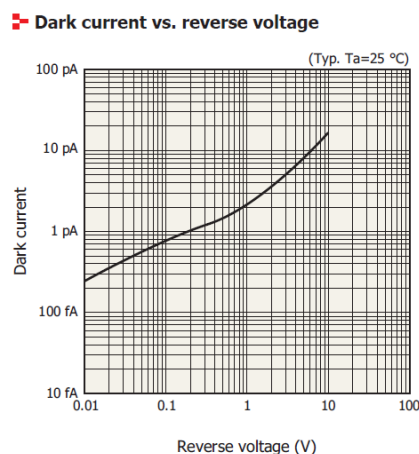


Figura 4.20. Curva del fotodiodo [63]

Se ha medido experimentalmente el mínimo mensurable de iluminación incidente en el fotodiodo en luxes, reproduciendo el montaje que ha dado lugar a la calibración de la figura 4.20, encontrando un valor aproximado de 300. Por lo tanto el nivel mínimo de iluminancia mensurable es de 300 Luxes.

Este valor conlleva que se tendrán problemas adicionales en diferentes niveles. Para percibirlos correctamente, se presenta una tabla (Figura 4.21) de doble entrada: horizontalmente se muestran los luxes que llegan al fotodiodo central, de 2400 a 300 luxes. Verticalmente se muestran las transmitancias que pudieran ser programadas desde

el 100 % al 12,5 % (suponiendo que será un valor límite inferior, se consensuó con los profesionales de IOBA que por debajo de esta transmitancia no es operativa la funcionalidad del ojo humano en un entorno), dando lugar en cada celda de la tabla al valor en luxes que recibiría un ojo ubicado tras un dispositivo que tuviera la correspondiente transmitancia.

luxes PD central	transmitancia (%)									
	12,5	20	30	40	50	60	70	80	90	100
2400	300	480	720	960	1200	1440	1680	1920	2160	2400
2300	287,5	460	690	920	1150	1380	1610	1840	2070	2300
2200	275	440	660	880	1100	1320	1540	1760	1980	2200
2100	262,5	420	630	840	1050	1260	1470	1680	1890	2100
2000	250	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
1900	237,5	380	570	760	950	1140	1330	1520	1710	1900
1800	225	360	540	720	900	1080	1260	1440	1620	1800
1700	212,5	340	510	680	850	1020	1190	1360	1530	1700
1600	200	320	480	640	800	960	1120	1280	1440	1600
1500	187,5	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500
1400	175	280	420	560	700	840	980	1120	1260	1400
1300	162,5	260	390	520	650	780	910	1040	1170	1300
1200	150	240	360	480	600	720	840	960	1080	1200
1100	137,5	220	330	440	550	660	770	880	990	1100
1000	125	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
900	112,5	180	270	360	450	540	630	720	810	900
800	100	160	240	320	400	480	560	640	720	800
700	87,5	140	210	280	350	420	490	560	630	700
600	75	120	180	240	300	360	420	480	540	600
500	62,5	100	150	200	250	300	350	400	450	500
400	50	80	120	160	200	240	280	320	360	400
300	37,5	60	90	120	150	180	210	240	270	300

Figura 4.21. Luxes fotodiodo central vs transmitancia

Como se puede ver, el problema sólo surge a partir de tener menos de 2400 luxes recibidos en el fotodiodo central. Además, se puede acotar el problema a tres zonas de influencia:

- De 2400 a 1500 luxes en el fotodiodo central, el problema se limita a si el usuario quiere colocar una transmitancia del 12,5 % (es decir, la más baja) porque ésta sería indetectable por los fotodiodos traseros.
- De 1500 a 1000 luxes en el fotodiodo central, el problema se limita a transmitancias hasta del 20 %.
- Progresivamente, bajando de 1000 luxes en el fotodiodo central, el problema surge en transmitancias mayores. Es de esperar, en cualquier caso, que por debajo de estas condiciones el usuario no quiera tener oscurecidas las gafas. Por ejemplo, se recomiendan 500 luxes para leer cómodamente. En ese caso, sólo tendríamos

problemas por no conocer el estado del cristal si el usuario quiere mantener una transmitancia por debajo del 50 %, caso improbable en general.

Estos problemas se detectaron en el desarrollo del hardware, y siguiendo las directrices del Diseño para Todos, fueron puestos en común con los profesionales oftalmológicos (IOBA) y la empresa Indo, que llegaron a la conclusión de que era más operativo de cara al usuario establecer internamente una LUT (*look up table*), mediante la cual se aplican unas tensiones constantes que hacen comportarse a los cristales de acuerdo a lo siguientes categorías (según la norma UNE-EN 1836:2006):

- ✚ **Nivel 1:** Lentes muy oscuras. Categoría de filtro 3. Apto para la conducción diurna.
- ✚ **Nivel 2:** Lentes oscuras. Categoría de filtro 2. Apto para la conducción diurna.
- ✚ **Nivel 3:** Lentes ligeramente oscuras: Categoría de filtro 1. Apto para la conducción diurna.
- ✚ **Nivel 4:** Lentes lo más claras que permite la gafa. Categoría de filtro 0. Apto para la conducción diurna y nocturna.

De este modo, el prototipo está configurado por defecto para que si se detectan menos de 2400 luxes en el fotodiodo central, el sistema entre en un “modo a ciegas” en el cual se aplican unas tensiones predefinidas a cada cristal (pero modificables por parte del profesional oftalmológico) para mantener los cristales con una coloración de acuerdo a las categorías definidas en la norma UNE-EN 1836:2006.

Tras visualizar este problema podría surgir la cuestión de qué pasaría si se saturase alguno de los fotodiodos (entornos muy luminosos). Como se puede ver en la figura 4.22, los fotodiodos están saturados por encima de 6000 luxes, a una tensión de 3,29 V.

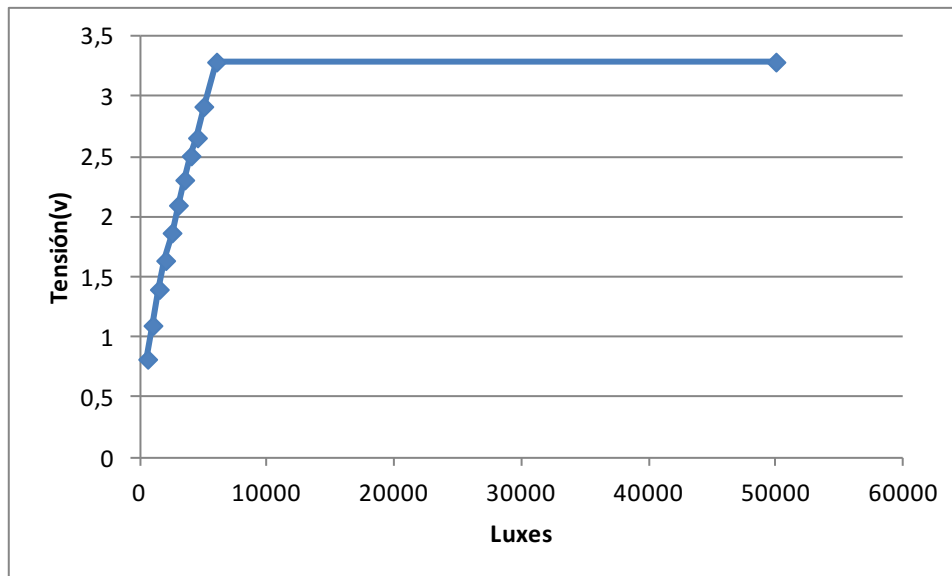


Figura 4.22. Tensión medida vs luxes

Este valor podría haberse cambiado por otro variando el valor la resistencia de acondicionamiento, pero en ese caso cambiaríamos el rango dinámico. Es decir, la capacidad de discernir entre niveles de iluminancia cambiaría, por ejemplo, a discernir entre 3000 y 16000 luxes, perdiendo información por debajo de 3000 luxes. Según los profesionales oftalmológicos, estos niveles son más importantes puesto que a partir de 6000 luxes el filtro debería tener su máxima coloración, por lo que no se hicieron más variaciones.

Una vez detectado el nivel de iluminación se hace necesario ajustar las tensiones aplicadas a cada uno de los cristales.

Como se vio en el Capítulo 3, al aplicar un 1V a los cristales, se obtiene la mínima transmitancia transcurrido un periodo de tiempo. Además, como se vio en el apartado 3.1.2 “determinación de V_p ”, menores diferencias de potencial provocaban una variación de la transmitancia menor. Esto significa que una vez alcanzado un nivel y para mantenerle, se podrían aplicar menores diferencias de potencial. Con este fin, se ha implementado un PID⁵ que junto con los resultados obtenidos en el capítulo 3 (apartado

⁵ Mecanismo de control por realimentación (PID = proporcional-integral-derivativo) que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste la salida.



3.1.3 “ciclabilidad y determinación del algoritmo óptimo) provocará variaciones de tensión entre 0 voltios y 1 voltio.

Básicamente el PID devuelve la cantidad de voltios a aplicar a la salida, que será proporcional a distancia de entre el valor objetivo y el valor medido.

Partiendo de que se conocen el valor de transmitancia o luxes objetivo (*setPoint*) y el valor actual (*processValue*) medido por los fotodiodos, se restan uno de otro y se obtiene el error actual del dispositivo. Posteriormente:

1. Se multiplica ese error por el factor proporcional (kp) dándonos el término proporcional p_term para lograr que el error en estado estacionario se aproxime a cero.
2. Se multiplica ese error por el factor integral (ki) y le sumamos el error integral acumulado, dándonos el término integrativo i_term para después sumarlo al i_term acumulado.
3. Se calcula la diferencia entre el anterior valor medido y el actual y se multiplica por el factor derivativo (kd), dándonos el término derivativo d_term .

Para terminar se suman todos y se divide por un factor de escalado. Este valor será la variación de tensión a aplicar a la salida, como se vio previamente.

La forma de obtener los factores kp , ki y kd es mediante el método de Ziegler-Nichols [92-94], basado en tres parámetros y que se puede consultar con detalle en el ANEXO II.



5 RESULTADOS SOBRE LA AYUDA TÉCNICA

Una vez montado el dispositivo prototipo, se comprueba el funcionamiento correcto de los niveles de conmutación de acuerdo al diagrama de funcionamiento de la figura 5.0, tanto en el estado automático, como en el manual, dando “a priori” resultados satisfactorios. Si bien surgirán ciertos problemas ópticos como se mostrará más adelante.

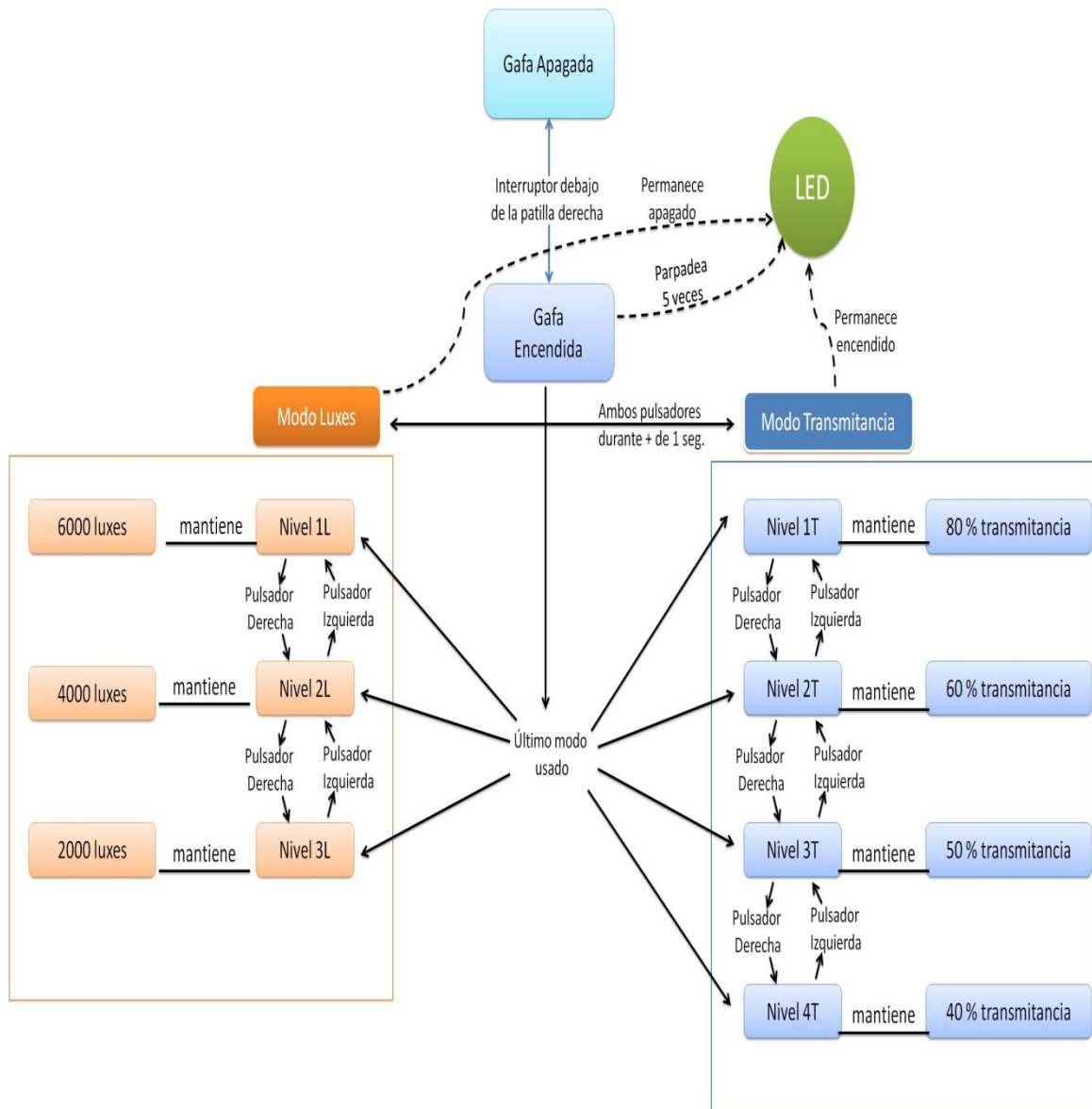


Figura 5.0: Diagrama de funcionamiento del prototipo.

Se puede ver un ejemplo de funcionamiento en la Figura 5.1. La operación es aparentemente correcta para ambos cristales.

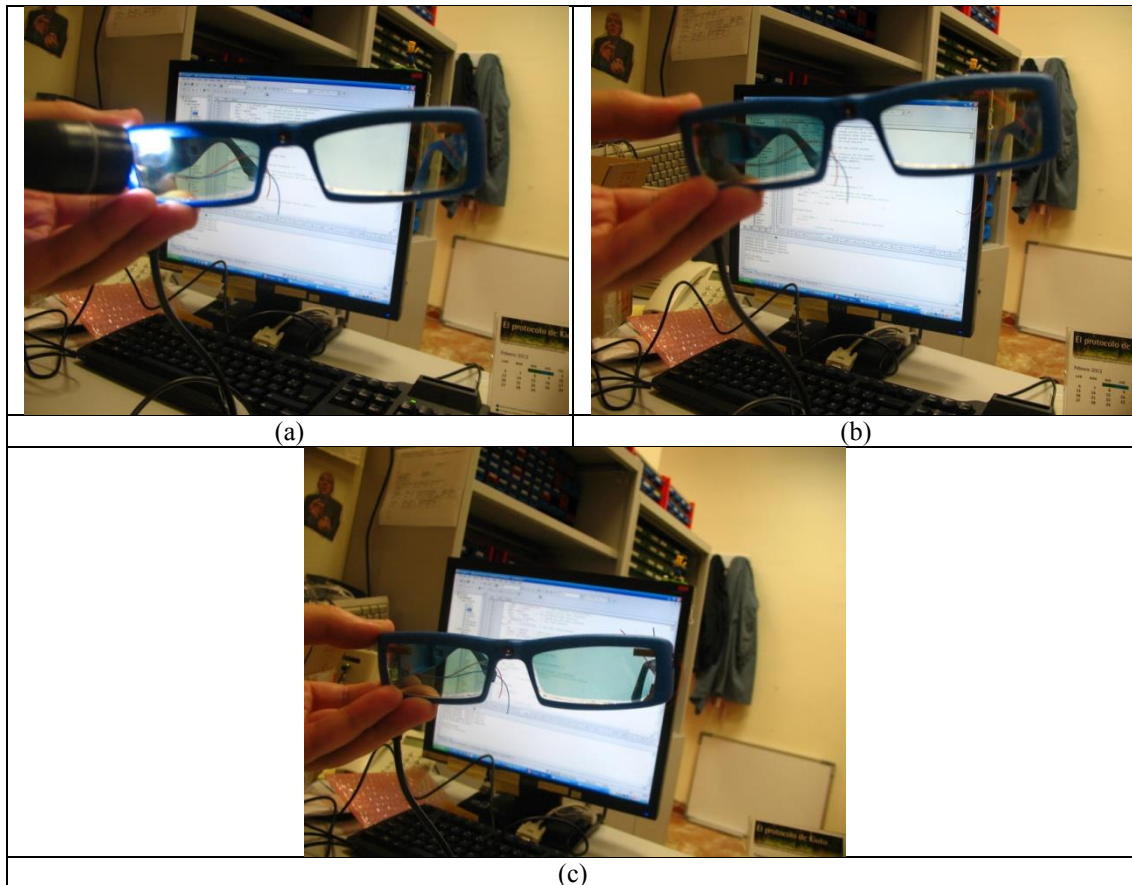


Figura 5.1: Prueba de conmutación: (a) incidencia de luz sobre el fotodiodo derecho. (b) Resultado tras 10 segundos de aplicación. (c) ambos cristales conmutados en modo manual.

Tras pruebas exhaustivas y como si indicó anteriormente, se observan una serie de problemas ópticos que son explicados en el siguiente apartado.

5.1 PROBLEMAS ÓPTICOS: CORRECCIONES POSIBLES POR SOFTWARE Y HARDWARE

5.1.1 HARDWARE

Al salir a la calle para comprobar el funcionamiento del estado automático, se observó que era correcto (ver Figura 5.2). La radiación solar era tan elevada a las 14 horas que se adquirió la mínima transmitancia en pocos segundos. Los niveles de conmutación determinados por la lectura del fotodiodo central, eran aleatorios en esta primera prueba, pero ajustar niveles era una cuestión de usar como calibrador un luxómetro, con lo que no sería problema determinarlos para el test de uso.



Figura 5.2: Prueba de conmutación en modo automático ante radiación solar.

Es interesante resaltar (Figura 5.3) que era esencial que el fotodiodo se ubicase de una manera tal que la montura no viñetease sobre él la radiación solar. Como se aprecia, el diseño inicial tenía una especie de saliente que dificulta esa ubicación y podía provocar lecturas no realistas. Se procedió a estudiar un diseño alternativo, que podría ser:

- Con un puente lo más plano posible.
- Con un fotodiodo inclinado 45° hacia el sol.
- Con una ventana más amplia por la parte superior, o incluso con un vano en esa zona.



Figura 5.3: Detalle del fotodiodo central bajo iluminación diurna, con la mirada al frente.

Finalmente se decidió colocar el fotodiodo justo a ras con la montura fijando el mismo con un adhesivo no conductor.

A la vuelta al laboratorio se siguió comprobando el funcionamiento observando un mal funcionamiento en el cristal derecho (Figura 5.4). Se determinó pronto que el problema no tenía que ver con el funcionamiento del cristal sino con el del circuito. Se estimó que dado que la manipulación del circuito había sido intensa (porque era el usado en todas las pruebas), el fotodiodo derecho había roto su conexión con el resto del circuito. El problema surge porque el fabricante del circuito flexible estima un radio de curvatura que no se debe sobrepasar (5mm) y era factible que al ubicar el circuito junto a los cristales el fotodiodo pudiese haberlo sobrepasado, cortando la conexión. Efectivamente, en algunos casos, si se apretaba la montura o se colocaba de determinada forma, se hacía contacto, y en otros no.



Figura 5.4: Problema del cristal derecho.

Se soldó un hilo de cable desde la zona del circuito del principio del talón al fotodiodo directamente, puenteando la conexión posiblemente rota. No obstante, al pasar la gafa al modo manual se volvía a reproducir el problema. Tras soldar varias veces la conexión del fotodiodo directamente al circuito, se optó por observar los niveles que salían de la



conversión analógica/digital (A/D) de los tres fotodiodos y leída en microcontrolador en tiempo real, haciendo un debug en el ordenador.

En este caso se comprobó que el fotodiodo en cuestión tenía un valor superior al calibrado inicialmente, lo cual encajaba con el hecho de haber reconectado y variado las condiciones resistivas del camino de corriente entre fotodiodo y conversión. Es decir, el valor de la corriente y por tanto el de la tensión medida había variado. Ello se pudo solucionar fácilmente recalibrando on-line el dispositivo gracias a la posibilidad de tener parámetros configurables mediante el modo programación visto anteriormente en el apartado 4.4 y que se puede consultar en detalle en el anexo II.

Además se propuso a INDO hacer un pequeño biselado de la lente, para evitar sobrepasar el radio de curvatura máximo del circuito y evitar posibles problemas. Este biselado, además, podría aprovecharse para encajar el fotodiodo, así como su conexión, si se extiende hacia el centro de la lente.

Una vez cerradas con una tapa atornillada que la montura traía al efecto, se hizo un test cuyo resultado fue una pareja de vídeos cuyos fotogramas relevantes se aprecian en la Figura 5.5 y 5.3. En este caso, la prueba se hizo en modo manual.

En la Figura 5.5(a) se aprecia el estado al encender el interruptor (ON se logra al desplazar su parte móvil hacia la oreja). El cristal está en estado aclarado. En (b) el usuario pulsa el botón +, situado a su izquierda, y tras 21 segundos se aprecia en (c) que ya ha adquirido un 50 % de transmitancia (que era el modo programado). Una nueva pulsación en (d) lo lleva en (e) al 25 % de transmitancia antes de otros 24 segundos.



Figura 5.5: Prueba de oscurecimiento en modo manual.

En cuanto a la prueba de aclarado (Figura 5.6), se aprecia el estado 8 segundos tras pulsar el botón en (a), pasando por (b) y (c) al estado inicial. Como se aprecia, es un aclarado rápido.

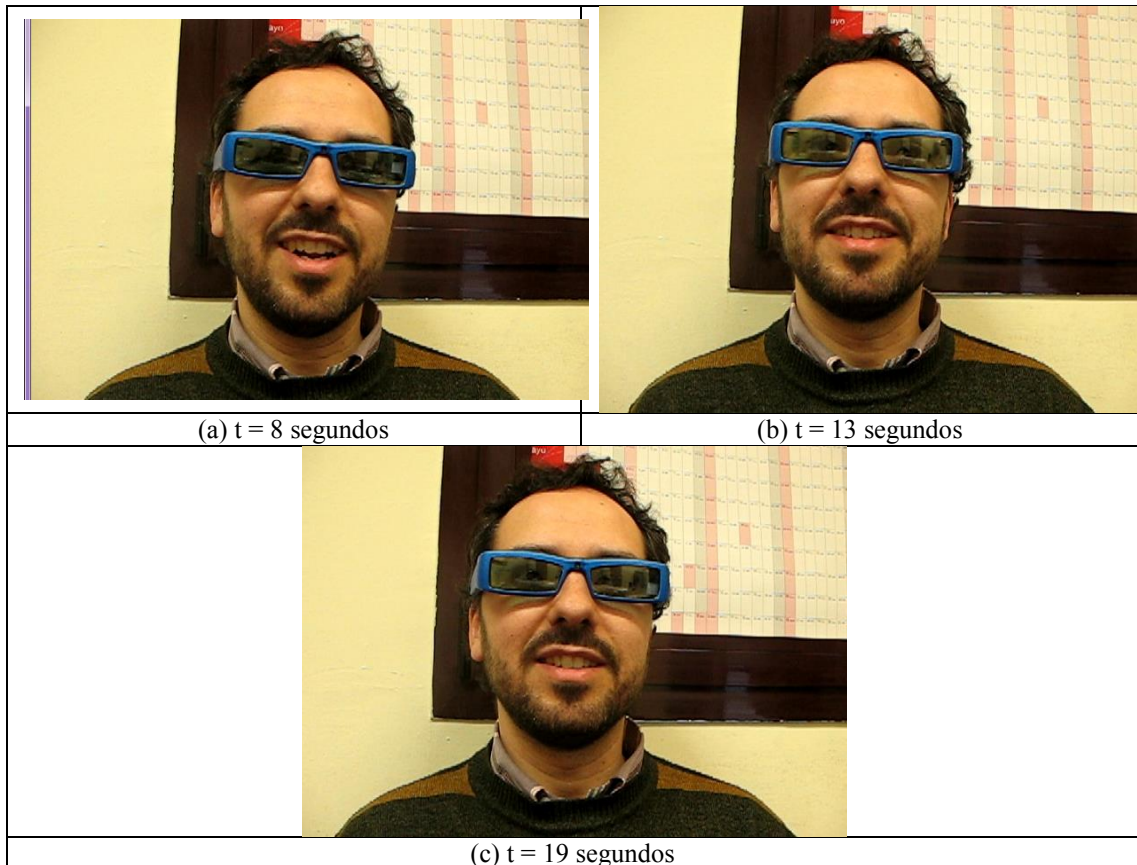


Figura 5.6: Prueba de aclarado en modo manual.

5.1.2 SOFTWARE

Tras varias pruebas, además se observó el problema de que las transmitancias medidas por el prototipo no coincidían con el valor de luxes medidos por el luxómetro (marca Gossen modelo Mavolox 5032C) usado para comprobar su funcionamiento.

Se exploró la causa incidiendo especialmente en la curva espectral de respuesta del fotodiodo, suministrada por el fabricante, Hamamatsu, y que se recuerda en la Figura 5.7. Recordemos que de las tres curvas, sólo nos quedamos con la señalada en verde, similar a la respuesta del ojo en ese rango espectral.

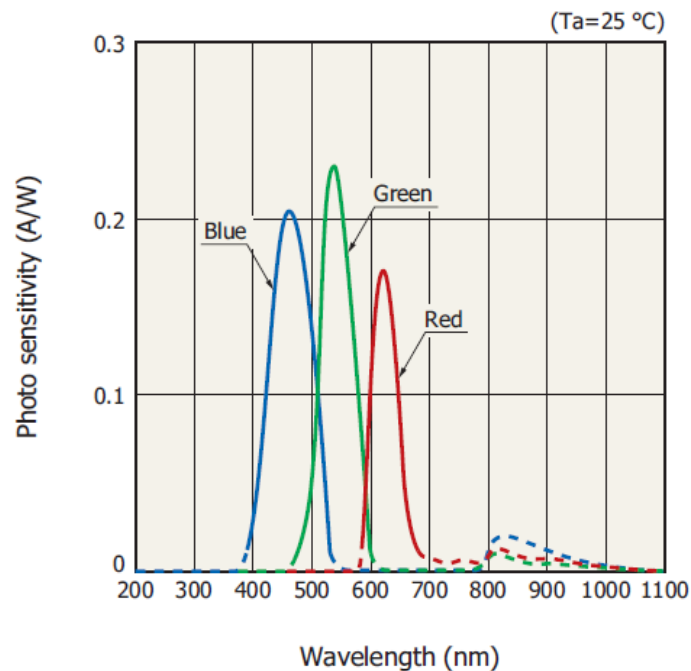


Figura 5.7: respuesta espectral del fotodiodo usado. [66]

Se quiere hacer notar el eje Y de esta curva. Obsérvese que viene dado en “fotosensibilidad”, en A/W, es decir, traduce en corriente eléctrica los vatios de potencia luminosa (irradiancia) que están incidiendo en el fotodiodo. El circuito de acondicionamiento pasa esa corriente a tensiones en voltios (V).

Para hacer un cálculo adecuado de la transmitancia, hay que tener en cuenta la curva de respuesta ante iluminancia del fotodiodo. Primer problema, pues: la respuesta del fotodiodo no está correlacionada directamente con la iluminancia (en luxes), sino con la potencia luminosa incidente (en W, ya que el fotodiodo tiene un área determinada).

A tal respecto, el problema es que la dependencia espectral de la radiación es extremadamente influyente en el resultado de la medida del fotodiodo verde. Así, dicha medida depende no sólo del tipo de iluminante, sino también de las condiciones de medida. Por ejemplo, es sabido que el espectro solar varía de forma a lo largo del día, de tal modo que podemos estar midiendo potencias luminosas en el fotodiodo muy diferentes y tener en realidad los mismos luxes totales incidentes (puesto que integran la medida espectral multiplicada por la curva de respuesta de sensibilidad del ojo humano, de un ancho espectral mucho mayor que la respuesta del fotodiodo).

Esto se detectó repitiendo varias veces la calibración del fotodiodo a lo largo de varios días. Algunas muestras aparecen en la Figura 5.8. En ella se aprecian varias medidas tomadas en dos días de ligeramente diferentes condiciones atmosféricas, comparando la medida del luxómetro usado y la del fotodiodo central con las gafas puestas en un entorno iluminado por el sol (dos curvas) y en otro a la sombra (dos curvas cercanas al origen) y tomadas punto a punto apuntando a diferentes zonas del entorno (hacia la dirección del sol, a direcciones diferentes, mirando al horizonte, etc). Se muestra también la relación con un espectro de una lámpara de incandescencia de tungsteno (una curva).

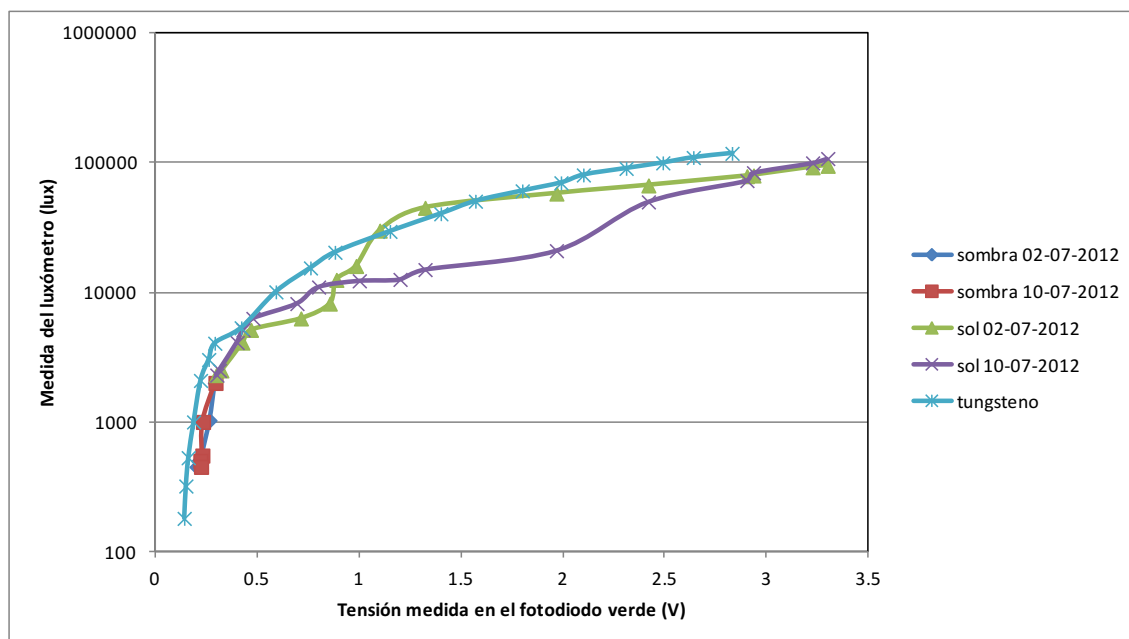


Figura 5.8: Diversas calibraciones del fotodiodo verde usado, en escala logarítmica.

La conclusión es clara: no existe una curva de calibración única. Depende demasiado de las condiciones del entorno. Por consiguiente, toda medida o algoritmo basado en mantener una determinada cantidad de luxes en el ojo es realmente una aproximación.

Si observamos nuevamente la Figura 5.8 comprobamos que existen diferencias muy grandes de iluminancia (en luxes) para una misma tensión medida, pero que son especialmente mayores a tensiones por encima de 1 V.

Con el fin de mejorar en lo posible al menos la calibración, podemos ver en la Figura 5.9 que una correlación lineal, aun con errores grandes, no está muy desencaminada en cuanto a la respuesta del fotodiodo, siempre se tenga en cuenta que habrá un error en iluminaciones bajas (menos de 2300 luxes) como se vio anteriormente en la figura 4.21. En la práctica, este efecto, unido a la adaptación ocular propia de un ojo sano, mitiga visualmente los posibles errores de transmitancia adquirida por los cristales en la prueba real de las gafas en entornos iluminados.

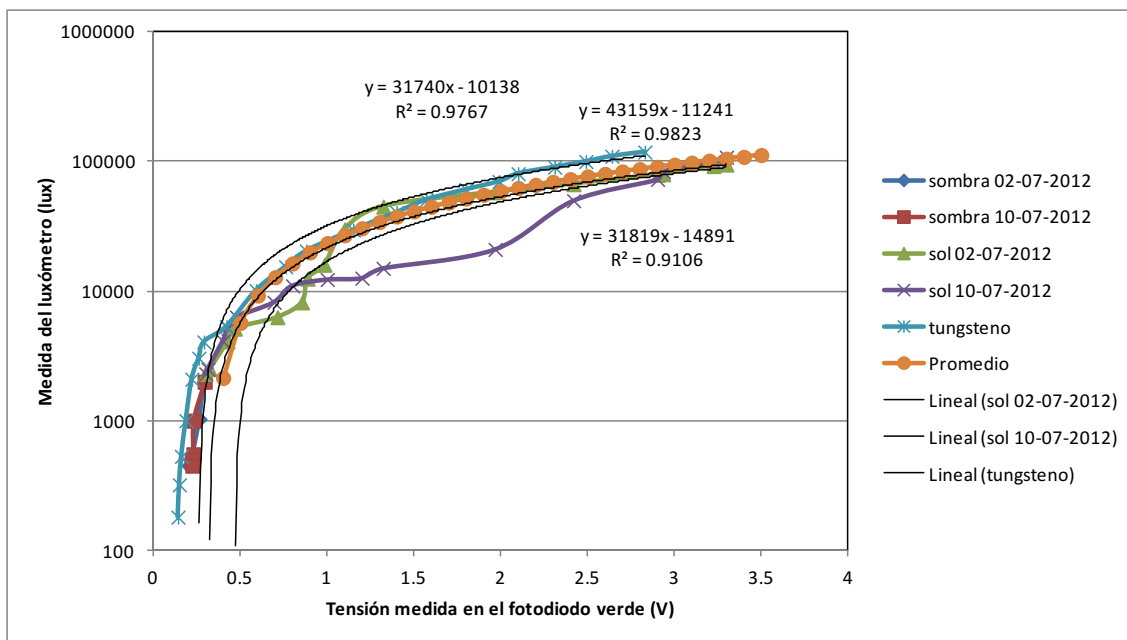


Figura 5.9: Diversas calibraciones del fotodiodo verde usado, en escala logarítmica, con ajustes y promedio.

En dicha Figura se muestran los ajustes y errores del ajuste en los tres casos de sol y lámpara medidos, así como un promedio (puntos naranja) generado a partir de los tres ajustes. Primeramente, se decidió usar este promedio para generar una relación –con el consabido error- entre la medida en luxes y la medida del fotodiodo acondicionada en voltios (V).

$$L (\text{luxes}) = 43159 * V (\text{voltios}) - 11241$$

A continuación, se realizó una mejora en el proceso para obtener una curva auténtica de calibración entre luxes y fotodiodo. Para ello, lo que se utilizó fue un filtro dicróico con una respuesta espectral (Fig. 5.10) parecida a la del fotodiodo (Fig. 5.7). De esta manera, colocando el filtro delante del luxómetro y de las gafas, tanto a las gafas como al luxómetro llegaría el mismo intervalo espectral. Se volvieron a colocar tanto el luxómetro

como las gafas delante de una lámpara de tungsteno, barriendo diferentes iluminancias (Figura 5.11). Esta vez, en cambio, tanto el fotodiodo verde como el luxómetro estarían cubiertos por el mencionado filtro. De esta manera, las respuestas estarían normalizadas a la respuesta del fotodiodo, prácticamente (el filtro tiene una curva muy similar), con lo que los luxes que midiéramos se correlacionarían bien con dicha respuesta, ya que la “ventana espectral” de medida sería la misma en ambos casos, desapareciendo la causa que provoca las diferencias halladas en las figuras anteriores. De este modo, por ejemplo, las tres curvas de la gráfica de la Figura 5.8 deberían resultar solapadas, prácticamente, y por tanto obtendríamos una buena curva de calibración como muestra la Figura 5.12 (más precisa que la de puntos naranjas de la Figura 5.9, obtenida por promediado de los diferentes casos medidos).

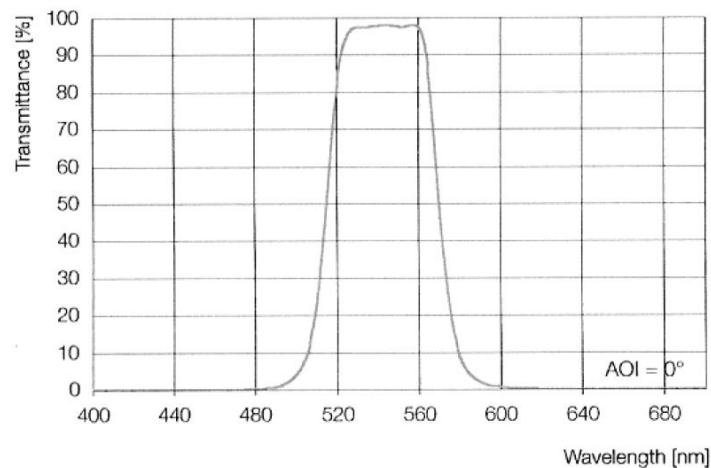


Figura 5.10: Respuesta espectral del filtro de UQG Optics adquirido



Figura 5.11: Calibración del fotodiodo usando Luxómetro y filtro dicróico

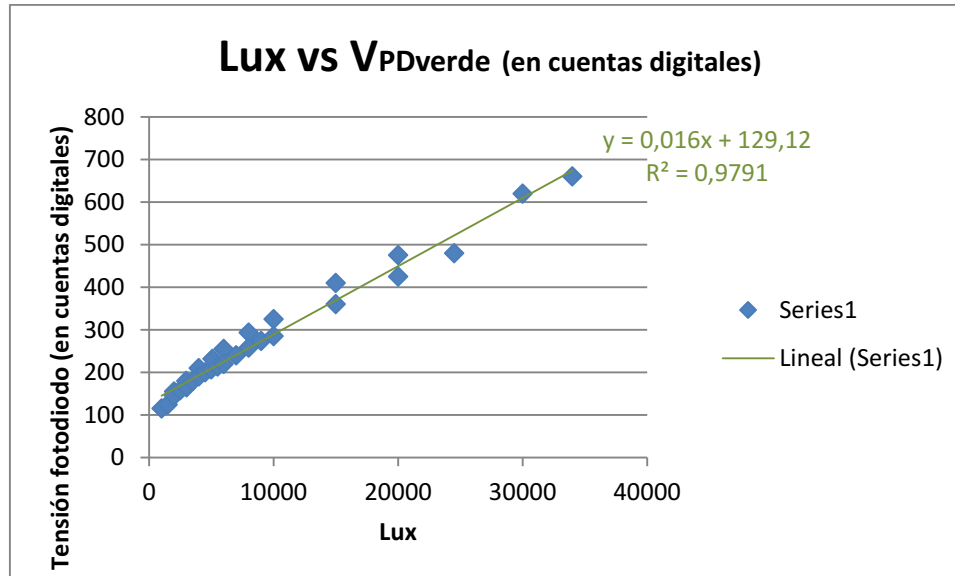


Figura 5.12: Calibración de la tensión del fotodiodo verde con respecto a los luxes medidos.

Por consiguiente, se obtiene la siguiente relación entre la iluminancia L en luxes estimada a través de la medida del fotodiodo verde $V_{PDverde}$ en cuentas digitales, que se aplicará en lo sucesivo⁶:

$$V_{PDverde}(\text{cuentas digitales}) = 0,016018 \cdot L(\text{lux}) + 129,12$$

5.2 RESUMEN SOBRE ENSAYO CLÍNICO

En este punto es de destacar que el ensayo clínico del prototipo fue realizado por Rubén Cuadrado, del Instituto de Oftalmobiología Aplicada de Valladolid (IOBA). Aunque no es ámbito del presente trabajo de Tesis un estudio clínico, se muestra a continuación un resumen del citado ensayo (obtenido a partir del Informe CEYEC-IOBA_Marzo_2013 [95]). El interés de ver aplicado al entorno real el sistema finalmente implementado motiva esta decisión.

El objetivo fue la evaluación de la influencia de los filtros electrocrómicos en la función visual y la satisfacción del paciente. Para ello se utilizó un grupo de 5 personas pseudofáquicas bilaterales (la lente natural del ojo, cristalino, se ha sustituido en ambos ojos con la implantación de una lente artificial) y sin otra patología ocular.

⁶ Cuentas digitales del micro determinadas por los 10 bits de resolución del ADC (10 cuentas = 32,2mV)



La metodología consistió en dos fases:

1. Configuración y verificación de los prototipos.
2. Test de uso. Consistente en:
 - ✚ Una **Visita Inicial** para evaluar la función visual de cada paciente (agudeza visual, sensibilidad al contraste y lectura) con y sin el prototipo.
 - ✚ **Visita a los 7, 14 y 21 días** para evaluar el comportamiento del prototipo (evaluación de la transmitancia de los cristales y por tanto su estabilidad)
 - ✚ **Visita a los 28 días** para evaluar la función visual de cada paciente (agudeza visual, sensibilidad al contraste y lectura) con y sin el prototipo así como completar un cuestionario de satisfacción de uso.

En la evaluación de la AV mediante test ETDRS (Early Treatment Diabetic Retinopathy Study) para la AV y el Pelli-Robson para la sensibilidad al contraste, se establecieron las siguientes condiciones de medida:

- ✚ Sin gafa electrocrómica en condiciones de iluminación de 250 lux a la altura de los ojos del paciente.
- ✚ Con gafa electrocrómica apagada en condiciones de iluminación de 250 lux a la altura de los ojos del paciente.
- ✚ Sin gafa electrocrómica en condiciones de iluminación de 1000 lux a la altura de los ojos del paciente.
- ✚ Con gafa electrocrómica apagada en condiciones de iluminación de 1000 lux a la altura de los ojos del paciente.
- ✚ Con gafa electrocrómica encendida en modo manual nivel máxima transmitancia en condiciones de iluminación de 1000 lux a la altura de los ojos del paciente.
- ✚ Con gafa electrocrómica encendida en modo manual nivel 50% transmitancia en condiciones de iluminación de 1000 lux a la altura de los ojos del paciente.
- ✚ Con gafa electrocrómica encendida en modo manual nivel 25% transmitancia en condiciones de iluminación de 1000 lux a la altura de los ojos del paciente.
- ✚ Con gafa electrocrómica encendida en modo manual nivel 12% transmitancia en condiciones de iluminación de 1000 lux a la altura de los ojos del paciente.



Para la evaluación y comprobación del comportamiento de los filtros, se estableció un período de 2 minutos como tiempo suficiente para que las lentes consiguieran su transmitancia objetivo.

Tras el test de uso se obtuvieron los siguientes resultados:

Función Visual

- ✚ Agudeza visual: No encontraron diferencias estadísticamente entre las pruebas con y sin prototipo en ambas visitas.
- ✚ Sensibilidad al contraste: No encontraron diferencias estadísticamente entre las pruebas con y sin prototipo en ambas visitas.
- ✚ Capacidad lectora: No encontraron diferencias significativas en el tiempo empleado en leer un párrafo del test de lectura y los errores cometidos con y sin filtro, si bien el tiempo empleado en la primera visita con el filtro electrocrómico fue mayor y casi significativo.

Satisfacción de uso

De las personas que participaron en el test de uso sólo 2 de ellas utilizaban anteriormente una solución para el sol consistente en unas gafas neutras.

La figura 5.13 muestra el uso que le dio cada una de las personas en las actividades diarias. El 80% utilizaron la gafa diariamente, y el 20% restante la utilizaron 2-3 días/semana. La principal actividad en la que la utilizaron fue para pasear, donde la utilizaron un 80%. A continuación se muestra una figura resumen del tiempo empleado por actividades.

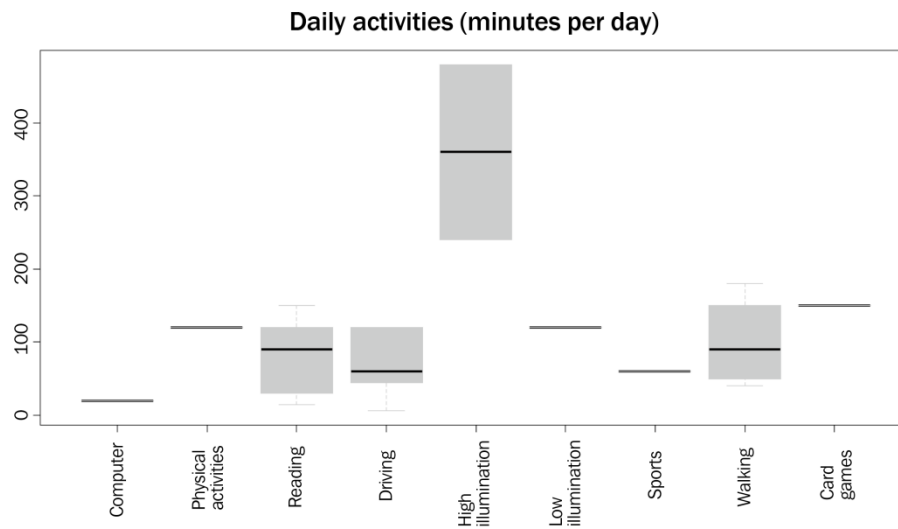


Figura 5.13. Actividades diarias [95]

La primera valoración hace referencia al filtro electrocrómico prototipo como dispositivo (Fig. 5.14). Las respuestas gradan el grado de acuerdo del usuario con las afirmaciones planteadas en una escala de 1 a 4 (1=Muy de acuerdo, 2=Bastante de acuerdo, 3=No muy de acuerdo, 4=En absoluto de acuerdo).

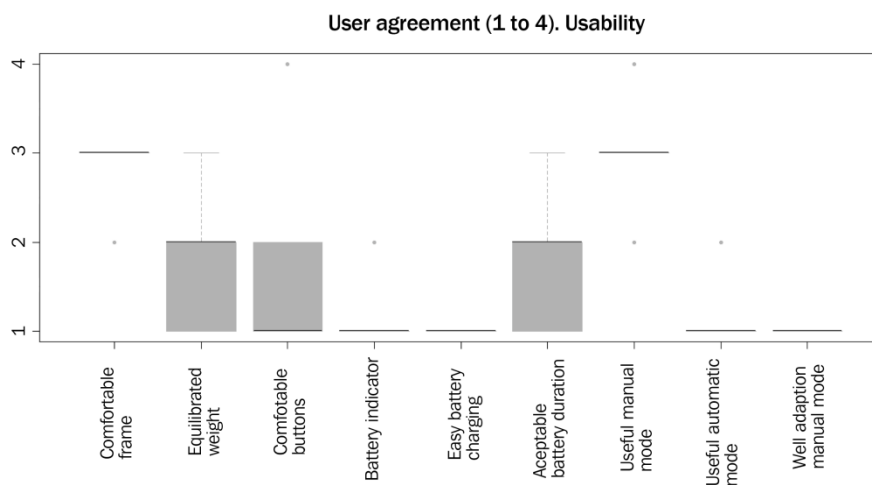


Figura 5.14. Grado de acuerdo de su usabilidad [95]

En cuanto a las características y comportamiento de las lentes (Fig. 5.15), se evaluó de 1 a 5 la velocidad de cambio (Fig. 5.15a) (1=Muy rápido, 2=Rápido, 3=Intermedio, 4=Lento, 5=Muy lento), el grado de transparencia/oscurecimiento (Fig. 5.15c) (1=Muy claro, 2=Claro, 3=Normal, 4=Oscuro, 5=Muy oscuro), y la estética del color de las lentes

(Fig. 5.15b) (1=Estético, 2=Relativamente estético, 3=Normal, 4=Relativamente antiestético, 5=Muy antiestético).

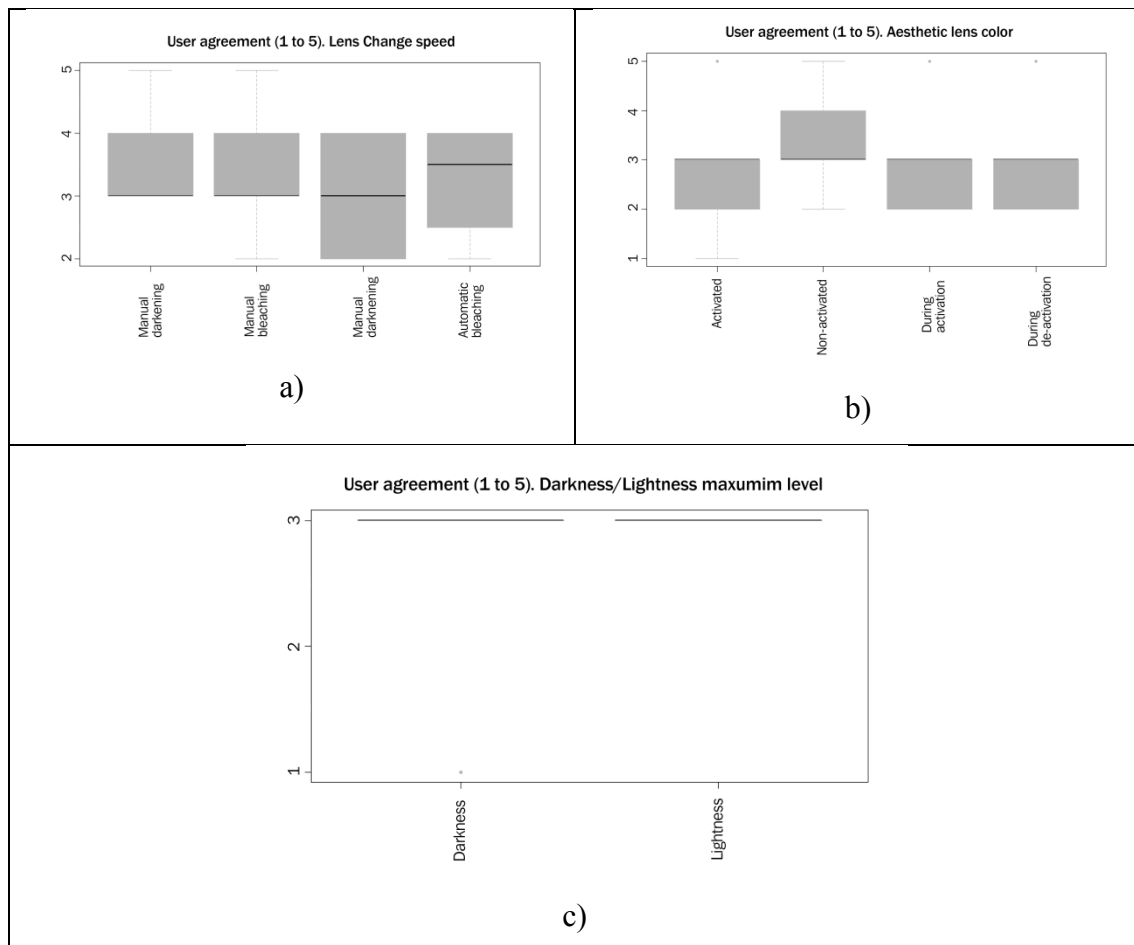


Figura 5.15. Grado de acuerdo velocidad de conmutación/estética del color / nivel de oscurecimiento [95]

En cuanto al comportamiento en sí de las lentes, sólo en una de las variables, *Nivel de oscurecimiento es suficiente*, hay un individuo (20%) que respondió que No. Además hay dos cuestiones: *Mismo oscurecimiento / transparencia que el primer día*, en las que un individuo no sabía. El resto de variables: *Nivel de transparencia suficiente*, *Misma velocidad de activación /desactivación que el primer día* e *Igual comportamiento en ambas lentes*, fueron constantes e iguales a Sí en los 5 usuarios.

Ninguno de los usuarios percibió variaciones en el comportamiento en función de las condiciones ambientales.

En cuanto a la percepción de alteraciones de la visión de los colores o en el contraste, el 60% no percibieron alteraciones. Los dos usuarios que contestaron que sí refirieron:

- “*Me proporciona mayor claridad, ya no me hace daño el sol, es como si tuviera mayor nitidez*”.
- “*La percepción de los colores viendo la televisión es distinta. Al leer me ha parecido muy cómodo. Por la calle los edificios me parecían mas contrastados*”.

Igualmente, solo dos pacientes refirieron molestias en el uso:

- ✚ El primero en la semana 3 comenzó a notar unas luces nada más quitarse las gafas y mirar a la izquierda y abajo. (Éste paciente abandonó el estudio sin finalizarlo y lo hizo por esta molestia).
- ✚ Al segundo se le caían: tuvo que sujetarlas con un cordel y aun así se le caían, le quedaban muy grandes.

En cuanto a posibles problemas durante la utilización del filtro electrocrómico prototipo, la variable *Incomodidad en paso de túneles* no fue contestada en todos los individuos. Las variables *No suficientemente claras en interiores*, *No se oscurecen en el coche*, *Incomodidad poner y quitar* y *Otros problemas* son constantes e iguales a “No” en los 5 individuos, En el caso de *No se oscurecen en el coche* sólo contestan 2 individuos. En las variables *Exceso tiempo en oscurecer*, *Exceso tiempo en aclarar* y *No suficiente oscuras con condiciones extremas de luz*, solo un usuario refirió tener problemas.

A la hora de comparar el filtro electrocrómico prototipo con respecto a la solución previa para el sol (Fig. 5.16), sólo un usuario NO encontró ventajas.



Figura 5.16. Ventaja frente a su solución previa de sol. [95]

Los 4 que encontraron ventajas refirieron:

- *“Al conducir estaba más cómodo con ellas porque apenas tenía que poner el parasol del coche.”*
- *“Veo más nítido y definido.”*
- *“Comodidad del cambio de paso de luz.”*
- *“Mayor contraste, más luminosos los edificios, mayor tamaño para ver los objetos.”*

Posteriormente se valoró la opinión global del comportamiento de las lentes (Fig. 5.17), la montura, la funcionalidad del manejo y la gafa prototipo en conjunto (lentes + montura + funcionalidad), gradando las respuestas de 1 a 5 (1=Muy bueno, 2=Bueno, 3=Satisfactorio, 4=Poco Satisfactorio, 5=Muy poco satisfactorio).

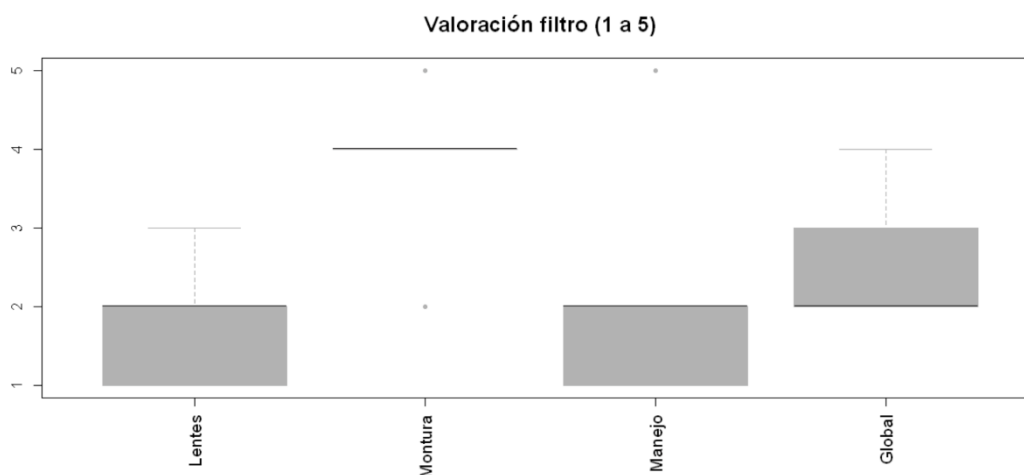


Figura 5.17. Valoración general del filtro [95]

A la hora de realizar una estimación sobre el precio que estarían dispuestos a pagar por el filtro electrocrómico, respondieron 2 de los usuarios, estimando que gastarían una media de precio de 128.07% más de lo que habían desembolsado por su solución para el sol.

En conclusión, los resultados muestran que no hay diferencias en las medidas de la función visual realizadas, tanto agudeza visual como sensibilidad al contraste y capacidad lectora. Estos resultados en la medida con la corrección óptica en gafa eran esperables ya que, a no ser que haya algún cambio ocular (que no fue el caso), deberían ser iguales. En las medidas con el filtro electrocrómico la NO diferencia significativa indica que:

- ✓ El filtro electrocrómico prototipo no mejora ni empeora la función visual respecto a la corrección en gafa; esto es, el filtro electrocrómico no influye negativamente en la agudeza visual (en condiciones normales o con alta iluminación), en la sensibilidad al contraste ni en la capacidad lectora, como sí pueden hacerlo algunos filtros de absorción selectiva, lentes coloreadas grises o filtros de densidad neutra [96-100].
- ✓ El filtro electrocrómico no ha tenido degradación subjetiva durante el período de uso que influya en la función visual.

Analizando las respuestas del cuestionario se puede deducir:

- ✚ La montura no resultó cómoda, ya que casi la totalidad de los usuarios refirieron que estaban no muy de acuerdo con dicha afirmación. Esto es debido a la limitación de seleccionar y adaptar la montura de acuerdo a la fisonomía del usuario, ya que la montura era modelo único.
- ✚ El peso está bastante conseguido, ya que la mayoría lo encontraron mucho o bastante de acuerdo, excepto uno que estaba no muy de acuerdo. Se podría optimizar más el peso si hay avances en el mercado de las baterías o se reduce el consumo de los dispositivos.
- ✚ Los botones de control los encontraron muy fáciles de manejar, excepto un usuario.
- ✚ Los aspectos de la batería (duración, indicador, carga) son correctos, ya que la valoración es positiva en todos los pacientes excepto uno.
- ✚ La disposición de un modo manual de cambio de transmitancia no pareció muy útil, al contrario del modo automático donde casi la totalidad lo consideró útil. Todos consideraron que el modo automático ajustaba bien el oscurecimiento con la iluminación ambiental. Esto nos podría indicar que el modo manual no es necesario, aunque este resultado puede estar también influenciado por un cierto conformismo o grado de aceptación de los usuarios al estado seleccionado del sistema, ya que apenas realizaron cambios diarios de modo manual↔automático, un máximo 2 veces.
- ✚ La velocidad de oscurecimiento y de aclaramiento, tanto en el modo manual como automático parece que no es lo suficientemente rápida, ya que no han sido bien valorado. Este aspecto puede influir en gran medida en el grado de satisfacción final, ya que una demora excesiva en el oscurecimiento o aclaramiento influirá en la adaptación de los usuarios a los cambios repentinos de iluminación ambiental, como puede ser al entrar o salir de edificios, etc.

5.3 CONCLUSIONES DEL ENSAYO CLÍNICO

A la vista de los resultados, parece que el filtro electrocrómico es útil, y su tamaño y peso es aceptable, por lo que puede ser una opción de solución para el sol con ventajas sobre las existentes en el mercado hasta el momento como son:

- ✚ La posibilidad de ajustarse a entornos de luz cambiantes automáticamente.
- ✚ La posibilidad de un ajuste manual.
- ✚ Aunque la velocidad de conmutación no ha salido bien valorada en el ensayo clínico, el tiempo de oscurecimiento se sitúa en 5 segundos menos y el de aclarado en 1 minuto 30 segundos menos que la solución comercial PhotoFusion® de ZEISS ⁷ como se vio en el capítulo 3.
- ✚ Mejora su adaptabilidad frente a lentes foto-cromáticas, ya que no necesitan radiación UV para conmutar, haciéndolas idóneas para la conducción.
- ✚ Bajo coste (el precio de réplica del dispositivo se estima en torno a 100 euros en el momento de la realización del presente trabajo).

Sin embargo estos resultados no se pueden tomar como concluyentes, debido a varios factores:

- ✚ El número de usuarios evaluados ha sido escaso. Sería necesario evaluar un mayor número de usuarios del filtro electrocrómico para que los resultados tengan una mayor fuerza estadística y ratifiquen o rechacen estos resultados.
- ✚ El período de uso puede no haber sido suficientemente amplio. Un mes de uso puede no ser tiempo suficiente para valorar el dispositivo con todas sus opciones, máxime cuando la climatología no fue la óptima, al haber estado bastantes días nublado o con niebla debido al período en el que se realizó. Así, la evaluación en condiciones extremas de luz, como días muy soleados, no pudo ser valorada correctamente.
- ✚ El material electrocrómico usado en los prototipos tiene una respuesta “lenta” según la percepción de los usuarios, lo que influye en la satisfacción de los mismos.

⁷ *Supuesto para el peor de los casos en ambos dispositivos.*



Por lo tanto, se hace necesario ampliar el estudio en esta área, aumentando el número de usuarios para poder obtener unos resultados más concluyentes, y desarrollando nuevos materiales con diferentes cortes de absorción, coloraciones y sobre todo con una rápida y constante respuesta.





6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se pueden sacar varias conclusiones del presente trabajo; por un lado unas conclusiones generales y por otro unas conclusiones específicas en cuanto al comportamiento de los cristales electrocrómicos, la forma de onda que, aplicada a los dispositivos, es “a priori” óptima, y su uso como ayuda técnica en rehabilitación visual. En este capítulo primeramente se hará un breve resumen de las conclusiones generales del presente trabajo, así como de los resultados y conclusiones específicas presentadas en los capítulos previos, para luego abordar posibles trabajos futuros.

6.1 CONCLUSIONES

- ✚ Se ha demostrado la solución de los cristales electrocrómicos como una **solución alternativa los filtros ópticos y las lentes fotocromáticas**, erradicando sus problemas.
- ✚ Se ha logrado introducir toda la electrónica en el frontal de la montura propuesta.
- ✚ **Se ha conseguido optimizar su consumo** y alargar la duración de las baterías situándose el tiempo de funcionamiento entre 2 y 10 días (según las condiciones de funcionamiento).

- ✚ Se ha logrado desarrollar un prototipo **funcional tanto en interiores como exteriores** siendo su **velocidad de conmutación** en ambos casos **del orden de varios segundos** en el peor de los casos analizados.
- ✚ El prototipo desarrollado es **capaz de ajustar la transmitancia** de los cristales **automáticamente** a diferentes porcentajes **en varios segundos**.
- ✚ El prototipo desarrollado es **capaz de ajustar, automáticamente, la cantidad de luxes que llegan al ojo**.
- ✚ Se ha logrado desarrollar un prototipo **completamente configurable por parte del profesional oftalmológico** de modo que se puede personalizar a las necesidades de cada persona.

En referencia, a los resultados de los capítulos previos podemos remarcar las siguientes conclusiones:

- ✚ ΔT **augmenta con la tensión** hasta cierto valor de tensión en el que se produce una degradación repentina del EC (Figuras 3.6a y 3.8).
- ✚ La **transmitancia (mínima) disminuye linealmente con el espesor** (Fig. 3.1c) siendo del orden de $0,1 \% / \mu\text{m}$.
- ✚ El **tiempo de oscurecimiento** (t_f) permanece **casi constante** para un espesor dado **a diferentes tensiones** (Fig. 3.2b) y **augmenta linealmente con el espesor** (Fig. 3.2d).
- ✚ El tiempo de aclarado (t_r) sin embargo es **mayor si aumentamos la tensión** para un espesor dado (Fig. 3.2a) y **augmenta exponencialmente con el espesor** (Fig. 3.2c)
- ✚ El **tiempo de oscurecimiento** se sitúa entre los 3 segundos, para el espesor de 60 micras (Fig.3.32a), y los 20 segundos, para el de 260 micras (Fig.3.20a) **mejorando ligeramente el tiempo de lentes foto-cromáticas** como el caso de las PhotoFusion[®] de ZEISS, que varía entre 15 y 30 segundos [80].

- ✚ El **tiempo de aclarado** se sitúa entre 1 segundo para el espesor de 60 micras (Fig. 3.32b) y los 27 segundos para el de 260 micras (Fig. 3.20b) **mejorando sustancialmente** el tiempo de lentes foto-cromáticas como el caso de las PhotoFusion® de ZEISS que varía entre 5 y 10 minutos en lugares cerrados [80].
- ✚ Todos los cristales sometidos a estudio se comportaron bastante estables en cuanto a **ciclabilidad, perdiendo en torno al 2% de ΔT tras 5000 ciclos**. No se ha demostrado que la inversión de polaridad (algoritmos 3 y 4) provoque una gran mejora, en la ciclabilidad, frente a la no inversión (algoritmo 1. Estos resultados están incluso mejorando la ciclabilidad de nuevas mezclas recientemente publicadas.
- ✚ El hecho de **invertir la polaridad parece mejorar el t_r en torno a $\frac{1}{2}$ segundo** (Fig. 3.34b) **pero empeora el tiempo de oscurecimiento** para espesores mayores de 160 μm , siendo éste dependiente del espesor (Fig. 3.34a) pero mayor de 1 segundo.
- ✚ El hecho de **no invertir la polaridad hace que la corriente máxima (o de pico) sea casi lineal y en ningún caso superior a 9 mA** (Fig. 3.35c) en los espesores analizados. Sin embargo si se invierte la polaridad, ésta corriente se dispara produciéndose picos de hasta 19mA para el espesor de 160micras (Fig. 3.35c). Además **el algoritmo 1 es el menos consumo tiene, en términos de P_{et}** , para espesores mayores de 60 micras llegando a consumir entre un 9% y un 40% menos que el algoritmo 4 (Fig. 3.35b)
- ✚ **No se aprecia influencia de la temperatura en la variación de la transmitancia**, para las temperaturas registradas (Fig. 3.38)
- ✚ **No se ha apreciado una fuerte dependencia entre la temperatura y el tiempo de conmutación**, si bien parece haber una cierta influencia para espesores mayores de 160 micras (Fig. 3.37) siendo ésta influencia algo más lineal para el algoritmo 1 (Fig. 3.39). No obstante, las variaciones de temperatura no fueron excesivas (entre 30°C y 45°C) pudiendo estar los datos obtenidos influenciados por la ciclabilidad de los cristales.

- ✚ El **algoritmo1** (variaciones entre V_p y 0 V) es **el más eficiente** de los cuatro analizados, en términos generales y manteniendo el compromiso de ciclabilidad / tiempo conmutación / variación de la transmitancia / consumo.
- ✚ El **algoritmo 1 hace que la corriente de pico sea mínima**, e incluso, casi lineal e independiente del espesor, alargando la vida de las baterías en un posible prototipo comercial.
- ✚ Aunque parece haber cierta **relación entre el tiempo de conmutación y la temperatura, no ha podido ser demostrada, ni cuantificada** con los datos obtenidos.
- ✚ Usando los resultados anteriores, se ha **desarrollado un prototipo de bajo coste** de ayuda técnica para personas con discapacidad visual, siendo su coste de réplica estimado inferior a 90 Euros.

En relación a los resultados del test de uso, aunque no pueden considerarse concluyentes por el bajo número de usuarios participantes:

- ✚ Se ha **desarrollado un prototipo de tamaño y peso aceptables** ya que sólo un usuario no encontró ventajas frente a la solución previa para el sol, por lo que puede ser una buena solución para el sol con ventajas frente a lo existente en el mercado actual.
- ✚ El **prototipo desarrollado debería mejorar estéticamente**, cosa normal por otro lado al tratarse de un primer prototipo.
- ✚ La percepción de los usuarios respecto a la velocidad de conmutación es que su respuesta no es muy rápida, si bien ninguno de ellos había utilizado previamente lentes fotocromáticas.

6.2 TRABAJOS FUTUROS

Finalmente, se proponen aquí una serie mejoras o trabajos futuros.

- ✚ Realizar un estudio exhaustivo de la relación entre el tiempo de conmutación y la temperatura con mayores variaciones de temperatura y menos conmutaciones (en un entorno controlado), aislando así la posible influencia de la degradación,.
- ✚ Estudiar la degradación de los cristales EC ante el incremento del periodo de conmutación, a fin de comprobar si el mantenimiento de la tensión aplicada durante minutos y horas la incrementa.
- ✚ Utilizar nuevos cristales electrocrómicos con mayor velocidad de conmutación.
- ✚ Integración de fotodiodos RGB con conexión serie I2C al micro-controlador minimizando el número de conexiones, de modo que se facilite el ruteado de la placa por el frente de la montura. De este modo se obtendría más información del tipo de iluminante, pudiendo ajustar más precisamente los distintos niveles de transmitancia, incluso el comportamiento espectral de la misma si se dispusiera de un EC adecuado, en función del tipo de iluminante.
- ✚ Emplear / desarrollar nuevas monturas mejoradas, tanto estéticamente como ergonómicamente, puesto que este punto podría ser muy importante en la percepción global que tiene el usuario del dispositivo.
- ✚ Incluir en futuros test de uso, usuarios de lentes fotocromáticas a fin de comparar su percepción de la velocidad conmutación respecto a las lentes fotocromáticas.





REFERENCIAS

1. OMS, Ceguera y discapacidad visual, Nota descriptiva N° 282, Agosto de 2014
2. <http://www.opticapedraza.com/es/servicios-de-gabinete-baja-vision>(último acceso: 21/10/2015)
3. http://centrovision21.com/defecto_visual.html (último acceso: 21/10/2015)
4. <http://www.opticas.info/articulos/retinosis-pigmentaria-1.html>(último acceso: 21/10/2015)
5. www.retinosis.org(último acceso: 21/10/2015)
6. www.bajavision.es/comoven.html#arriba (último acceso: 21/10/2015)
7. Academia Americana de Oftalmología. <http://www.geteyesmart.org/eyesmart/diseases-es/degeneracion-macular-relacionada-con-la-edad/sintomas.cfm> (último acceso: 21/10/2015)
8. MedlinePlus. <https://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/003039.htm> (último acceso: 21/10/2015)
9. Academia Americana de Oftalmología. <http://www.geteyesmart.org/eyesmart/diseases-es/cataratas/sintomas.cfm> (último acceso: 21/10/2015)
10. Maino JH, McMahon TT. NoIRs and low vision. Journal of the American Optometric Association. 1986 Jul;57(7):532-5. PubMed PMID: 3745758.
11. Dickinson C. Low vision : principles and practice. Oxford ; Boston: Butterworth-Heinemann; 1998. vii, 338 p. p.
12. Eperjesi F, Fowler CW, Evans BJ. Effect of light filters on reading speed in normal and low vision due to age-related macular degeneration. Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians. 2004 Jan;24(1):17-25. PubMed PMID: 14687197.
13. Frennesson IC, Nilsson UL. Contrast sensitivity peripheral to an absolute central scotoma in age-related macular degeneration and the influence of a yellow or an orange filter. Documenta ophthalmologica Advances in ophthalmology. 1993;84(2):135-44. PubMed PMID: 8299504.
14. Hellinger G. The use of CPF lenses for light sensitive individuals. J Vis Impair Blind. 1983;77:20.
15. Leguire LE, Suh S. Effect of light filters on contrast sensitivity function in normal and retinal degeneration subjects. Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians. 1993 Apr;13(2):124-8. PubMed PMID: 8265145.
16. Lynch D, Brilliant R. An evaluation of the Corning CPF550 lens. Optometric Monthly. 1984;75:36-42.
17. Marron JA, Bailey IL. Visual factors and orientation-mobility performance. American journal of optometry and physiological optics. 1982 May;59(5):413-26. PubMed PMID: 7102800.



18. Rosenblum YZ, Zak PP, Ostrovsky MA, Smolyaninova IL, Bora EV, Dyadina UV, et al. Spectral filters in low-vision correction. *Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians*. 2000 Jul;20(4):335-341. PubMed PMID: 10962699.
19. Tupper B, Miller D, Miller R. The effect of a 550 nm cutoff filter on the vision of cataract patients. *Annals of ophthalmology*. 1985 Jan;17(1):67-72. PubMed PMID: 3977222.
20. Wolffsohn JS, Dinardo C, Vingrys AJ. Benefit of coloured lenses for age-related macular degeneration. *Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians*. 2002 Jul;22(4):300-11. PubMed PMID: 12162481.
21. Zigman S. Vision enhancement using a short wavelength light-absorbing filter. *Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry*. 1990 Feb;67(2):100-4. PubMed PMID: 2336247.
22. Perez MJ, Puell MC, Sanchez C, Langa A. Effect of a yellow filter on mesopic contrast perception and differential light sensitivity in the visual field. *Ophthalmic research*. 2003 Jan-Feb;35(1):54-9. PubMed PMID: 12566864.
23. Hazel CA, Petre KL, Armstrong RA, Benson MT, Frost NA. Visual function and subjective quality of life compared in subjects with acquired macular disease. *Investigative ophthalmology & visual science*. 2000 May;41(6):1309-15. PubMed PMID: 10798645.
24. Leat SJ, Fryer A, Rumney NJ. Outcome of low vision aid provision: the effectiveness of a low vision clinic. *Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry*. 1994 Mar;71(3):199-206. PubMed PMID: 8196946.
25. McClure ME, Hart PM, Jackson AJ, Stevenson MR, Chakravarthy U. Macular degeneration: do conventional measurements of impaired visual function equate with visual disability? *The British journal of ophthalmology*. 2000 Mar;84(3):244-50. PubMed PMID: 10684832. Pubmed Central PMCID: 1723404.
26. <http://opticakepler.com/blog/> (último acceso: 21/10/2015)
27. C. Sanchez-Ramos. Tesis doctoral "Filtros ópticos contra el efecto fototóxico del espectro visible en la retina: Experimentación animal", Universidad Europea de Madrid, 2010.
28. J.J.Nussbaum, R.C. Pruett, and F. C. Delori, "Historic perspectives. Macular yellow pigment. The first 200 years," *Retina*, Vol. 1, (1981), pp 296-310
29. G. L. Walls and H.D. Judd, "Intra-ocular color filters of vertebrates", *British Journal of Ophthalmology*, Vol. 17, (1933), pp 641-675
30. A. Cayado. Tesis de máster "Espectro electromagnético y eficacia de los filtros ópticos en patologías oculares", Universidad de Valladolid, 2014.
31. Gregory L. Stephens and John K. Davis, "Ophthalmic Lens Tints and Coatings", Volume1, Chapter 51. Duanes's Ophthalmology on cd-rom, 2006 edition.
32. R. Vergaz, C. Vega, J.M. Sánchez-Pena, J.C. Torres-Zafra, A. Lopez-Miguel, R. Cuadrado, B. Coco, R. Coco, "New Electro-Optic and Display Technology for Visually Disabled People"



- Handbook of research on ICTs for human-centered healthcare and social care services, Medical Information Science Reference, Chapter 36, (2013).
33. <http://www.engadget.com/2011/01/08/pixeloptics-empower-electronic-eyeglasses-hands-on/> (último acceso: 21/10/2015)
 34. http://www.roanoke.com/business/news/roanoke/pixeloptics-leaves-ex-ceo-with-broken-dreams/article_7577c6b0-912f-11e3-8f2f-0017a43b2370.html (último acceso: 21/10/2015)
 35. Chunye Xu, Chao Ma, "Smart sunglasses feature lenses that change color on demand", 233rd American Chemical Society National Meeting, Chicago, USA (2007).
 36. Granqvist, C. G., Handbook of Inorganic Electrochromic Materials (Elsevier, Amsterdam 1995; reprinted 2002).
 37. Granqvist, C. G., Electrochromic tungsten n oxide films: Review of progress 1993-1998, Solar Energy Mater. Solar Cells , Vol. 60, (2001), pp 201-262.
 38. C.G. Granqvist, C. G., Avendaño, A. & A zens A., Electrochromic coatings and devices: Survey of some recent advances, Thin Solid Films , Vol. 442, (2003), pp 201-211.
 39. C.G. Granqvist, S. Greena, G.A. Niklassona, N.R. Mlyukaa, S. von Kræmerb, P. Georénb, "Advances in chromogenic materials and devices", Thin Solid Films, Vol. 518, (2010), pp 3046–3053
 40. <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/36130-Juguetes-con-dispositivos-electronicos-en-sustratos-plasticos.html> , (último acceso: 21/10/2015)
 41. R. Vergaz, J.M.S. Pena, C. Vazquez, M. Reyes, J.A. Pomposo "Nuevos Materiales electrocrómicos para aplicaciones fotónicas y domóticas de valor añadido",Mundo Electrónico, n° 349, (2004), pp 54-58.
 42. P.M.S. Monk, R.J.Mortimerand D.R.Rosseinsky. Electrochromism: Fundamentals and Applications,VCH,Weinheim,ISBN3-527-29063-X,(1995).
 43. D.R. Rosseinsky, R.J.Mortimer. "Electrochromic Systems and Prospects for Devices",Adv.Mat.,Vol.13, (2001), pp 783-793.
 44. C.G. Granqvist. Handbook of Inorganic Electrochromic Materials.Ed: Elsevier.1995.ISBN: 9780444899309. Chapter 31.
 45. J. Padilla Tesis Doctoral "Caracterización y optimización electroquímica de dispositivos electrcrómicos duales basados en polímeros conductores", Universidad Politécnica de Cartagena, 2006.
 46. C.M Lampert. Durability of Electrochromic Switching Devices for Glazing. Internacional congress on optical science and enginnering. The Netherlands, 12-15 March 1990.



47. S. Hellström, P. Henriksson, R. Kroon, E. Wang, M.R. Anderson. Blue-to-transitive electrochromic switching of solution processable donor-acceptor polymers. *Organic Electronics*. Dec 2011. pp 1406-1413
48. Y. Pang, H. Xu, X. Li, H. Ding, Y. Cheng, G. Shi, L. Jin. Electrochemical synthesis, Characterization, and electrochromic properties of poly (3-chlorothiophene) and its copolymer with 3-methylthiophene in a room temperature ionic liquid. *Electrochemistry Communications*. Aug 2006. pp 1757-1763.
49. V. Jain, H.M. Yochum, R. Montazami, J.R. Heflin. Millisecon switching in solid state electrochromic polymer devices fabricated from ionic self-assembled multilayers. *Appl. Phys. Lett.* Volume 92, issue , 2008
50. S.K Deb, A Novel Electrophotographic System, *Applied Optics* 8 Suppl 1, (1969), pp 192-195.
51. A. Azens, C.G. Granqvist, *Journal of Solid State Electro-Chemistry*. Vol. 7, (2003), pp 64.
52. E.S. Lee, D.L. Bartolomeo. "Application issues for large-area electrochromic windows in commercial buildings". *Solar energy materials and solar cells*, Vol. 71, (2002), pp 465-491.
53. <http://www.wired.com/2012/07/boeing-787-dreamliner-flight/> (último acceso: 21/10/2015)
54. Harlan J. Byker, Gentex Corporation, "Single-compartment, self-erasing, solution-phase electrochromic devices, solutions for use therein, and uses thereof", U.S. Patent No. 4,902,108, (1990).
55. <https://www.gentex.com/automotive/products/driver-safety> (último acceso: 21/10/2015)
56. http://www.nims.go.jp/mana/news/press/press_200804141/index.html (último acceso: 21/10/2015)
57. P. Andersson, J. Kawahara, M. Berggren, "Printed passive matrix addressed electrochromic displays", *Organic Electronics*, Vol. 14, (2013). pp. 3371-3378
58. Thomas J. Richardson, "New electrochromic mirror systems", *Solid State Ionics*, Vol. 165, (2003). pp 305-308.
59. A.C. van Geest-Lokhorst, "Reflections on switchable mirror devices", PhD. Thesis, Vrije University Amsterdam, The Netherlands (2006).
60. H. Demiryont, D. Moorehead, "Electrochromic emissivity modulator for spacecraft thermal management", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 93, Issue 12, (2009), pp 2075-2078
61. A. Laforque. "Electrically controlled colour-changing textiles using the resistive heating properties of PEDOT nanofibers". *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 20, Issue 38, (2010), pp 8233-8235



62. Granqvist, C. G. “Electrochromic foil devices with variable optical transmittance, Active, functional and nanostructured coatings”, 4th Mikkeli International Industrial Coating Seminar MIICS, Mikkeli, Finland (2008).
63. NI 6343 Specifications. <http://www.ni.com/pdf/manuals/374567c.pdf> (último acceso: 21/10/2015)
64. David Barrios Puerto, Phd Thesis “Characterization and applications of new electrochromic devices. Comparison with other electrically controllable transmittance technologies” (2012)
65. C. Vega, R. Vergaz, D. Barrios, J.M. Sánchez-Pena, A. Viñuales, H. Grande, R. Cuadrado, B. Coco, R. Coco, “Dispositivos electrocrómicos aplicados en una ayuda técnica para personas con discapacidad visual”, VII Reunión Nacional de Optoelectrónica OPTOEL 2011. (Spain)
66. S10917-35GT datasheet. <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/alpha/R/4153/S10917-35GT/index.html> (último acceso: 21/10/2015)
67. R. Vergaz, D. Barrios, J.M. Sánchez-Pena, C. Pozo-Gonzalo, M. Salsamendi,” Relating cyclic voltammetry and impedance analysis in a viologen electrochromic device”, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 93, Issue 12, December 2009, pp 2125–2132
68. AD620 datasheet. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf> (último acceso: 21/10/2015)
69. AD8546 datasheet. http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8546_8548.PDF (último acceso: 21/10/2015)
70. LM335 datasheet. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm335.pdf> (último acceso: 21/10/2015)
71. C. Pozo-Gonzalo, M. Salsamendi, A. Viñuales, J.A. Pomposo, H. Grande, “Highly transparent electrochromic plastic device that changes to purple and to blue by increasing the potential”, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 93, Issue 12, December 2009, pp 2093–2097
72. J. Kawaharaa, P.A. Ersmana, I., M. Berggren,” Improving the color switch contrast in PEDOT:PSS-based electrochromic displays”, Organic Electronics, Volume 13, Issue 3, March 2012, pp 469–474
73. J. Palenzuela, A. Viñuales, I. Odriozola, G. Cabañero, H. J. Grande, V. Ruiz, “Flexible Viologen Electrochromic Devices with Low Operational Voltages Using Reduced Graphene Oxide Electrodes”, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2014, 6 (16), pp 14562–14567
74. Nicols G. Tsierekzos. Cyclic Voltammetric Studies of Ferrocene in Noaqueous Solvents in the temperature Range from 248.15 to 298.15 °K. Journal of Solution Chemistry. March 2007, Volume 36, Issue 3, pp 289-302
75. D. Kozak, M. Panigrahi, M. Grabda, E. Shibata, T. Nakamura. Ferrocene redox in trihexyl(tetradecyl)phosphonium bis-2,4,4-(trimethylpentyl) phosphinate (Cyphos IL-104)/ethanol at glassy carbon and platinum working electrodes. Electronica Acta. Volume 163. 2015 May. pp 41-47



76. S. M. Batterjee, M.I. Marzouk, M.E. Aazab, M.A. EI-Hashash. The electrochemistry of some ferrocene derivatives: redox potential and substituent effects. *Applied Organometallic Chemistry*. Volume 17, Issue 5, 2003 May. pp 291-297.
77. N. Garino, S. Zanarini, S. Bodoardo, J. R. Nair, S. Pereira, L. Pereira, R. Martins, E. Fortunato, and N. Penazzi1, "Fast Switching Electrochromic Devices Containing Optimized BEMA/PEGMA Gel Polymer Electrolytes", *International Journal of Electrochemistry*, Vol.2013 (2013), pp 1-10. Article ID 138753.
78. C.E. Tracy, J.G. Zhang, D.K. Benson, A.W. Czanderna, and S.K. Deb. Accelerated Durability Testing of Electrochromic Windows. *International Meeting on Electrochromism London, UK* September 7-9, 1998.
79. César Vega Colado, Tesis de Máster "Sistema de control de gafas electrocrómicas con realimentación" Universidad Carlos III de Madrid, 2009
80. www.Zeiss.es. http://www.zeiss.es/vision-care/es_es/better-vision/mejor-vision-con-zeiss/tus-lentes-individualizadas-zeiss/oscurece-rapido-Se-aclara-rapido-Las-lentes-fotosensibles-de-ZEISS.html (último acceso: 21/10/2015)
81. R.-T. Wen, M.A. Arvizu, G.A. Niklasson, C.G. Granqvist. "Electrochromics for energy efficient buildings: Towards long-term durability and materials rejuvenation". *Surface & Coatings Technology*: Vol. 278, (2015), pp 121-125
82. "Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT" http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar/atlas_de_radiacion_24042012.pdf (último acceso: 21/10/2015)
83. Renesas E8a On-Chip Debugging Emulator. http://documentation.renesas.com/doc/products/tool/apn/rej06j0049_r8c_e8a_ap.pdf (último acceso: 21/10/2015)
84. LMH6718 Datasheet. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmh6718.pdf> (último acceso: 21/10/2015)
85. ADG749 Datasheet. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADG794.pdf> (último acceso: 21/10/2015)
86. Future Technology Devices International Ltd TTL - 232RG. http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Cables/DS_TTL-232RG_CABLES.pdf (último acceso: 21/10/2015)
87. www.diseñoparatodos.es (último acceso: 21/10/2015)
88. TPS73233 Datasheet. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps732.pdf> (último acceso: 21/10/2015)



89. MCP73832T-2ACI/OT. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001984g.pdf> (último acceso: 21/10/2015)
90. IPC-2221 “Standard on Printed Board Design”. <http://www.ipc.org/toc/ipc-2221.pdf> (último acceso: 21/10/2015)
91. Würth Elektronik Design_Rules_xF_und_xF-Ri_1_2. http://www.wonline.com/web/en/leiterplatten/download_center/Download_Center.php?p=3#dbfilter (último acceso: 21/10/2015)
92. Ogata, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. Tercera edición. Editorial Prentice Hall. 1998.
93. Método de Ziegler-Nichols. <https://sites.google.com/site/picuino/ziegler-nichols> (último acceso: 21/10/2015)
94. J. de la Fuente, "Sintonía de reguladores PID," Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid. 2010.
95. Informe interno del Proyecto CEYEC, Rubén Cuadrado, IOBA, Marzo 2013.
96. Eperjesi F, Fowler CW, Evans BJ. “Do tinted lenses or filters improve visual performance in low vision? A review of the literature”. Ophthalmic & physiological optics: the journal of the British College of Ophthalmic Opticians. Vol.22 (2002,), pp 68-77. PubMed PMID: 11829009.
97. Barron C, Waiss B. An evaluation of visual acuity with the Corning CPF 527 lens. Journal of the American Optometric Association. Vol. 58, (1987), pp 50-4. PubMed PMID: 3819288.
98. Kelly SA. “Effect of yellow-tinted lenses on brightness”. Journal of the Optical Society of America A, Optics and image science. Vol. 7, (1990), pp 1905-11. PubMed PMID: 2231102.
99. Rabin J, Wiley R. “Differences in apparent contrast in yellow and white light”. Ophthalmic & physiological optics: The journal of the British College of Ophthalmic Opticians. Vol.16, (1996), pp 68-72. PubMed PMID: 8729569.
100. Yap M. “The effect of a yellow filter on contrast sensitivity”. Ophthalmic & physiological optics. The journal of the British College of Ophthalmic Opticians. Vol.4, (1984), pp 227-32. PubMed PMID: 6472852.





ANEXO I



I PROTOTIPOS EXPERIMENTALES: HARDWARE

En el presente apartado se hará una descripción detallada tanto de los distintos prototipos implementados así como los sub-circuitos (hardware) que los componen.

I.1 SENSOR Y ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL LUMÍNICA

En este apartado se pretende realizar una justificación completa de la elección del fotodiodo utilizado en el Capítulo 2 (Hamamatsu S10917-35GT) [66], su circuito de acondicionamiento y las ventajas del mismo.

En este punto, hay que ajustarse a dos premisas principales:

- Encontrar un sensor que minimice el espacio ocupado.
- Explorar opciones de acondicionamiento de la señal. Lograr reducir el esquema electrónico de acondicionamiento y permitir mayor adaptabilidad a nuevos tipos de luz.

En el Capítulo 2 ya se justificó su elección por su respuesta espectral, pero es ahora donde las dimensiones del sensor serán cruciales. Como se puede observar en la Figura I.1 este fotodiodo triple tiene unas dimensiones de apenas 5mm^2 , esto es, $3 \times 1,6 \times 1 \text{ mm}$, $0,048 \text{ cm}^2 \times 1\text{mm}$ de grosor. Por tanto, sus reducidas dimensiones concuerdan con la especificación de miniaturización buscada, convirtiéndolo en ideal en el momento de realizar el presente trabajo, ya que tras realizar una búsqueda exhaustiva por los principales fabricantes, no existía otro de menores dimensiones y similares características.

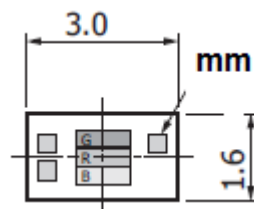


Figura I.1. Hamamatsu S10917-35GT [66].

Las características específicas de la transducción y sensibilidad de este componente (S10917-35GT) se mostraron en la figura 2.4.



A través del fotodiodo se produce la transducción de la intensidad de radiación luminosa a una medida eléctrica, de intensidad de corriente, pero es a través del acondicionamiento de la señal como se transforma la intensidad en tensión eléctrica. Esta transformación es necesaria para poder realizar la medida de la señal mediante un conversor Analógico-Digital de tensión, de modo que pueda ser leída por el microcontrolador.

Tras barajar diferentes esquemas de acondicionamiento de la señal como el utilizado en el Capítulo 2, un amplificador operacional en su configuración de transimpedancia, finalmente se ha optado por la robustez y economía de espacio que supone la configuración más sencilla posible: una resistencia en serie con el fotodiodo polarizado en inversa.

La corriente generada por cada fotodiodo, proporcional a la intensidad de la luz recibida, atraviesa la resistencia conectada al mismo, y así se obtiene una diferencia de potencial en bornes de la resistencia proporcional a la corriente creada, por la ley de Ohm, y por consiguiente proporcional a la intensidad de radiación recibida.

Para elegir el valor adecuado de cada resistencia, se hizo un estudio experimental mediante un circuito, situando el fotodiodo junto a tres potenciómetros y midiendo el valor de tensión obtenido en la situación de incidencia directa de luz solar un día soleado de verano en Madrid (en torno a $5,65 \text{ Kwh/m}^2$ según la agencia estatal de meteorología [82]), ajustando este valor a la tensión de saturación $3,3 \text{ V}$. Se obtienen así unos valores de resistencia que serán denominados en adelante R_{rojo} , R_{verde} y R_{azul} , uno por cada fotodiodo usado.

Posteriormente se midieron los valores de tensión en situaciones de oscuridad, dando valores del orden de mV, los cuales son aceptables para su correcta medición en las citadas condiciones.

Estos valores son compatibles con la serie 0402SMD de $62,5 \text{ mW}$ de potencia. Esta serie resulta adecuada para este prototipo, puesto que no habrá corrientes superiores a $5 \mu\text{A}$ según la hoja de características [66] del fotodiodo, lo que supone un máximo de $16,5 \mu\text{W}$.



Las dimensiones para la construcción de esta parte del circuito impreso son de 1 mm x 0,35 mm, muy reducidas.

I.2 DRIVER DE CONTROL

El principal objetivo es conseguir un microcontrolador capaz de poder medir las señales provenientes de los sensores RGB, tomar una decisión en función de la intensidad lumínica y aplicar una salida independiente a los EC, sin olvidar el reducido tamaño y bajo consumo.

Las principales características serían las siguientes:

- ✚ Entradas ADC: 9 entradas ADC, puesto que son tres sensores con tres salidas cada uno.
- ✚ Salidas DAC: 2 con una corriente de salida de 20mA cada una, ya que ninguno de los algoritmos presentados en el Capítulo 2 superaba este valor para ningún espesor, y una tensión máxima de 1V o superior.
- ✚ Frecuencia de muestreo $\geq 2\text{kHz}$
- ✚ Dimensiones: $\leq 4 \times 4\text{ mm}$.
- ✚ Tensión de alimentación: $\leq 3\text{V}$ para hacerlo compatible con baterías comerciales de pequeñas dimensiones.
- ✚ Consumo: El mínimo posible.

Tras la búsqueda, y teniendo en cuenta las condiciones de partida del apartado 4.1, finalmente se decidió utilizar el microcontrolador R8C-3GC de Renesas por sus reducidas dimensiones y amplias características (además de su bajo coste: de apenas 1,5 euros) que si bien no cumple completamente las especificaciones, es el que más se aproxima a las premisas de partida de entre todos los hallados en el momento en que se hizo la búsqueda.

Se hicieron varias pruebas con otros microcontroladores como por ejemplo con el dsPIC33FJ128GP802, saliendo ganador el R8C-3GC por sus dimensiones (4x4mm frente a 6x6mm) y precio (1,5 € frente a 3,8 €).

Algunas de las principales características del R8C-3GC son:

- ✚ 8 conversores A/D de 10 bits. \rightarrow Resolución ($V_{cc}=3,3\text{V}$) 3,2mV
- ✚ Oscilador “On-chip” (20 MHz).
- ✚ 2 conversores D/A de 8 bits. \rightarrow Resolución ($V_{cc}=3,3\text{V}$) 12,9mV
- ✚ Unas dimensiones de 4x4mm.

- ✚ 7 entradas para interrupciones externas.
- ✚ Memoria Flash Datos (4kbytes)
- ✚ Circuito de detección de voltaje de alimentación bajo.
- ✚ 2 interfaces serie (UART).
- ✚ Voltaje de funcionamiento de 1,8V hasta 5,5V.

La parte esencial de todo microcontrolador es su oscilador. Dispone de numerosas opciones de configuración. Para este prototipo se ha utilizado el oscilador interno rápido (*High-speed on-chip oscillator clock*), con una frecuencia de 20MHz. Como su nombre indica es interno, y no necesita de ningún componente externo, lo que supone una ventaja a la hora de la miniaturización.

Para su programación se requiere la conexión del E8a *Emulator debugger* a 4 pines del microcontrolador. La programación se lleva a cabo con el entorno de programación software HEW (High-performance Embedded Workshop) (Fig. I.2).

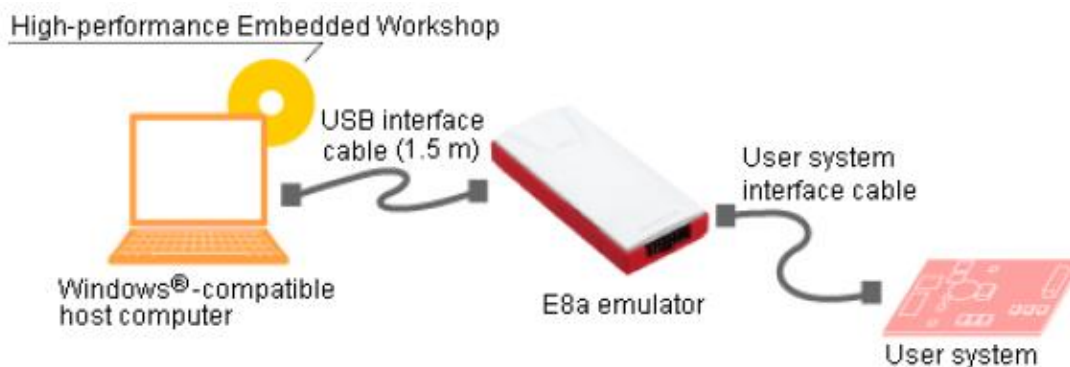


Figura I.2. Entorno de programación E8a [83]

En la Figura I.2 se puede observar el programador E8a consta de dos conexiones:

- 1.- USB port connection, conectado mediante un cable mini USB al PC.
- 2.- Programming Connector, conexión al prototipo para la programación.

La conexión entre el E8a y el circuito impreso se realiza mediante un conector micro-USB, como se puede apreciar en la Figura I.3.



Figura I.3. Cable conexión al E8a

La programación del microcontrolador se puede realizar en cualquier momento y sin necesidad de extraerlo del circuito impreso.

A continuación se detallan los periféricos empleados para este proyecto y sus características hardware.

➤ **ADC y puertos ANx.**

Se utiliza un convertor analógico digital (ADC) de 10 bit, para obtener una resolución de 1024 valores entre las tensiones de referencia fijadas en los pines VREF (3.3V pues es la tensión que ofrece el mínimo consumo y permite un correcto funcionamiento) y Vss (0V).

Es necesario realizar tres conversiones A/D, una para cada sensor. Gracias a la posibilidad de configurar por software el pin de medida del ADC, se podrán sensar sucesivamente los tres valores.

➤ **Int0 e int1**

Los pines Int0 e int1 están preconfigurados como interrupción externa, y se encargarán de la señal de “aumentar y disminuir nivel” proveniente de los pulsadores electromecánicos para el control manual de usuario.

➤ **Convertor D/A**



El DAC que implementa el R8C-3GC es un convertor de 2 canales que ofrece en el pin de salida de cada canal una resolución de 256 niveles (8 bits). Para el Prototipo utilizaremos ambos canales, y la resolución nos va a permitir ajustar de una manera muy precisa la transmitancia que deseemos en nuestros cristales. Como la tecnología actual de los cristales EC no es tan lineal y repetitiva como para asegurar que se obtenga una transmitancia fija acorde con esta precisión, se ha diseñado el sistema en previsión de esta situación.

El funcionamiento interno del DAC se basa en una red de resistencias R-2R lo que proporciona una alta velocidad de conversión [52]. De manera indirecta en el Prototipo se conectan a este DAC los cristales EC izquierdo y derecho. En esta versión del prototipo ambos cristales reciben un nivel de tensión independiente por lo que se mejora el ajuste debido a la no homogeneidad de ambos cristales.

Los niveles de tensión de salida serán configurables entre 0 y 3,3V. Dada la baja corriente de salida (<2mA), se acondicionará la señal añadiéndole posteriormente una etapa de salida para poder suministrar corrientes de hasta 20 mA, como vimos anteriormente.

➤ **UART**

Un módulo Receptor Transmisor Asíncrono Universal (UART) es una de las comunicaciones serie disponibles en este microcontrolador. Es un sistema full-dúplex asíncrono que comunica el micro con diferentes periféricos, como un PC, el estándar LIN (*Local Interconnect Network*), interfaces RS-232 o RS-485. Mediante este módulo, se enviará la información pertinente al PC, empleando el protocolo RS-232, de modo que el profesional oftalmológico podrá configurar ciertos parámetros prototipo.

I.3 ETAPAS DE SALIDA

Uno de los problemas de todos los microcontroladores encontrados es la limitación que tienen en cuanto la corriente de salida suministrada por el convertor D/A integrado, siendo en todos los casos inferior a 5mA, por lo que se hace necesario incluir una etapa

de salida para suministrar 20 mA, una cantidad de corriente suficiente para que, aunque la corriente demandada por los cristales EC sea mayor de la suministrada por el micro, no haya problemas en mantener la tensión aplicada. En nuestro caso se ha optado por un buffer y un multiplexor analógico proporcionándonos la posibilidad de invertir las señales.

Las dos funciones básicas de las etapas de salida están implementadas por el Buffer LMH6718, de reducidas dimensiones (5x6 mm), y el multiplexor analógico ADG794.

El Buffer LMH6718 mantiene la tensión del convertidor digital-analógico del micro y consigue ofrecer hasta 200mA a su salida [84], realizando a la vez la función de aislar las etapas anteriores.

El multiplexor analógico ADG794 [85], proporciona la funcionalidad de inversión de la tensión de salida (lo que permite implementar algoritmos de inversión de polaridad como los vistos en el Capítulo 2).

Ambos chips obtienen la alimentación de un regulador de tensión de 3,3V que ofrece hasta 200 mA de corriente, como se verá más adelante en el apartado 4.2.7, lo que cubre las necesidades del dispositivo para nuestro propósito.

I.4 CONECTOR DE PROGRAMACIÓN Y COMUNICACIÓN SERIE

El Prototipo dispone de un conector micro-USB para permitir posibles reprogramaciones de futuras versiones del software y para la comunicación serie con un PC (configuraciones del profesional oftalmológico). Esto se consigue mediante la multiplexación del bus a través de 4 jumpers en el circuito impreso (Fig. I.4), de modo que se multiplexan las señales del puerto serie (configuración de usuario) y MODE (reprogramación),

En el esquema mostrado en la figura I.4, si se conecta J7 y J8 y se desconecta J5 y J6 el dispositivo estaría listo para modificar parámetros por parte de un usuario. Por el contrario si se conecta J5 y J6 y se desconecta J7 y J8 el dispositivo estaría listo para ser reprogramado (modificación del software interno del micro).

Se ha escogido el conector micro-USB de la Figura I.5 por sus reducidas dimensiones y estandarización, debido a que este mismo conector será el usado para la carga del dispositivo.

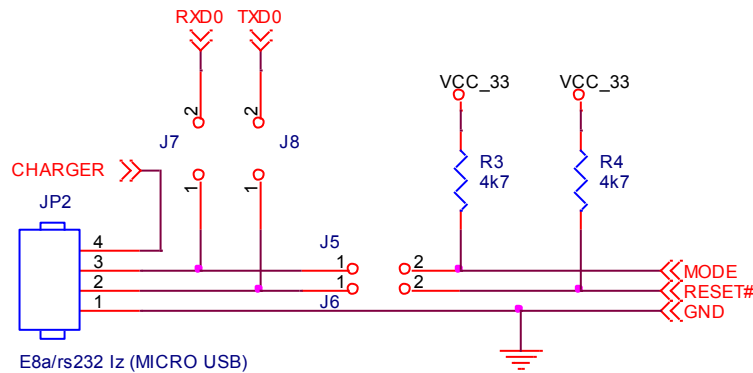


Figura I.4. Esquema de la multiplexación de señales.



Figura I.5. Conector micro-USB.

I.5 ADAPTADOR DE COMUNICACIÓN SERIE-USB

Este adaptador sirve para comunicar el microcontrolador con cualquier PC vía un puerto USB. Se trata de un cable externo al dispositivo y sólo necesario en el caso de que el usuario quiera cambiar ciertos parámetros configurables (como se verá más adelante).

Es una solución comercial (TTL-232RG-VSW5V-WE) [86], que crea un puerto serie virtual en el PC mediante el USB del mismo y se encarga de comunicar la UART del micro con el software hyperterminal de Windows.

Este cable consta por un extremo de un conector micro-USB (para conectar al dispositivo) y por el otro de un conector USB para conectar al PC, siendo el aspecto final el de la Figura I.6.

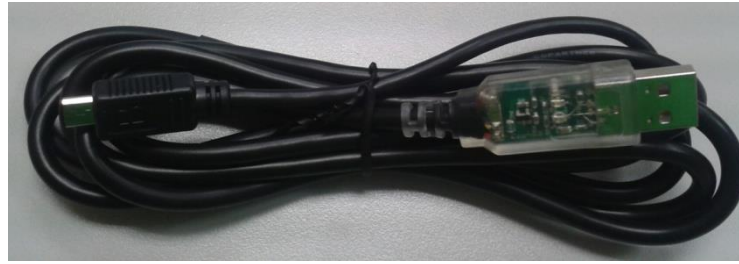


Figura I.6. Apariencia del adaptador serie a USB.

I.6 PULSADORES DE CONTROL DE USUARIO

Se han utilizado dos sencillos pulsadores electromecánicos para dotar de una interfaz de control por parte del usuario al dispositivo. El modelo utilizado es el B3SL-1022P y se puede ver una imagen del mismo en la Figura I.7.



Figura I.7. Pulsador B3SL-1022P empleado

Los pulsadores se encuentran conectados un pin del microcontrolador que permite recibir interrupciones externas.

La elección del pulsador se hizo pensando en su sencillo manejo para los futuros usuarios, normalmente personas que a la discapacidad visual añaden otras de movilidad debido a su avanzada edad. El tamaño del pulsador es adecuado para pulsar con la yema del dedo, 2,5 mm de diámetro, siendo necesaria una fuerza de 1,96 Newtons para la pulsación. Aunque a priori se puede pensar que es algo problemático, puesto que resulta necesario agarrar la patilla con el dedo pulgar mientras se pulsa con el dedo índice, la configuración fue recomendada por el IOBA: de este modo el usuario será realmente consciente de que

la pulsación se ha producido⁸. Estos pulsadores a su vez permiten una buena integración en la montura de la gafa, por su reducido tamaño (6x6mm).

I.7 ALIMENTACIÓN Y CARGA

El bloque de alimentación debe suministrar una tensión continua de 3,3V y hasta 115mA (ec.4.2), y sirve para alimentar el microcontrolador, que admite un rango entre 1,8V-5,5 V, así como el resto de componentes.

Es de gran importancia que estos niveles de tensión sean muy constantes, dado que de lo contrario podrían oscilar los niveles de tensión de salida aplicadas a los dispositivos y las medidas procedentes de los sensores. Para este cometido se ha empleado un regulador de tensión, tps73233 (3.3V) de reducidas dimensiones, apenas 3x3 mm (encapsulado SOT23). Este regulador tiene la importante característica de ofrecer a su salida hasta 250mA [88], suficiente corriente para cubrir las necesidades del Prototipo R8C-3GC. La corriente máxima total aproximada, en el peor de los casos ya que se ha tenido en cuenta el máximo consumo posible de los componentes según sus hojas de características sobredimensionando el sistema, se calcula como:

$$I_{TOTAL\ MAX} = 15mA \text{ (fotodiodos)} + 10mA \text{ (micro)} + 20mA \text{ (Amplificador)} + 20mA \text{ (buffer)} + 50mA \text{ (límite superior previsto para dos cristales EC)} = 115mA \text{ (e.c.4.2)}$$

Se ha comprobado que el funcionamiento del regulador tps73033 es correcto con una tensión de alimentación mínima de 3V. Por ello, aunque la tensión de las dos baterías disminuya hasta la tensión de 3,2 V, el funcionamiento del circuito se mantiene.

Las baterías escogidas han sido de Litio-Polímero modelo AE401438P8H suministradas por la empresa Tempel (Fig. I.8). La elección se hizo bajo dos premisas: obtener unas baterías que ofreciesen la mayor capacidad posible y la máxima corriente de descarga continua posible, para soportar picos de corriente en caso de usar algoritmos con inversión de polaridad o cristales que aun funcionando con el algoritmo 1 (sin inversión de

⁸ Esta consulta forma parte lógica del proceso de diseño, enmarcado en este ámbito con las consideraciones del Diseño para Todos [85]

polaridad) demandaran más corriente de la medida en el capítulo anterior, pero teniendo en cuenta su integración en la montura de las gafas. Sus dimensiones de 38mm x 14mm x 4mm y 4g de peso hacen viable su colocación en las patillas de las gafas, y su capacidad (160mAh) junto con su corriente máxima de descarga continua (320mA) hacen de esta batería un buen candidato. Además cuentan con un circuito de protección contra cortocircuitos y sobrecarga.



Figura I.8. Batería AE401438P8H

El cargador de baterías se ha integrado dentro del prototipo, mediante el controlador de carga MCP73832T-2ACI/OT de apenas 3x3 mm [89], lo que hará que se puedan cargar mediante cualquier cable microUSB conectado a una fuente de alimentación, como puede ser un puerto USB del PC.

El ruteado y aspecto final es el que se muestra en la Figura I.9.

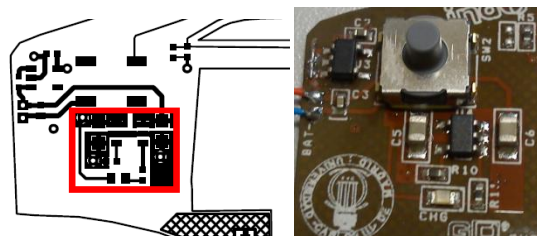


Figura I.9. Ruteado y aspecto del subcircuito de carga

El MCP73832 utiliza un algoritmo de corriente-constante/tensión-constante, como indica el fabricante de las baterías. La tensión constante es fija en 4,2 V, sin embargo la corriente constante es fijada por la resistencia R_{prog} , en nuestro caso 6K2, para una carga a 160mA (0,5C).

Al conectar el cargador al dispositivo, se enciende un led que indica que se ha conectado a alimentación y por tanto se encuentra cargándose. Una vez completada la carga se apaga el mismo.

La funcionalidad de encendido y apagado se lleva a cabo mediante la conexión y desconexión de las baterías con un micro interruptor de reducidas dimensiones (8,6 mm x 3,5 mm) como se muestra en la Figura I.10.



Figura I.10. Interruptor conexión desconexión.

Antes de insertar el circuito dentro del layout final se realizaron varias pruebas, con una placa prototipo, de carga-descarga y de dos maneras diferentes:

- ✚ Usando un transformador de red de marca Carrefour de 5V y 500mA (Figura I.11), puesto que la premisa del bajo coste y facilidad de reposición por parte del usuario ha estado siempre presente.



Figura I.11: Proceso de carga con cargador de red.

- ✚ Usando la salida USB de un ordenador portátil.

obteniendo los resultados mostrados en los siguientes apartados, donde se muestran las gráficas de las cargas de una pareja de baterías (condiciones idénticas a las de trabajo normal) por ambos métodos. La carga se ha realizado con el circuito de la Figura I.12, que consta del MCP73832T-2ACI/OT y una resistencia de valor 4K7 para dar una corriente máxima de carga de 220mA aproximadamente (110mA por batería). En un principio se usó una corriente menor, ya que aunque según las indicaciones del fabricante de las baterías se pueden cargar hasta 1C (320mA) en cargas rápidas sin peligro de daño

o deterioro, la temperatura alcanzada podría ser elevada. Finalmente, en vista de que ni se producían calentamientos ni el sistema electrónico estaba en sus límites, se aumentó dicha corriente en el sistema final a 160mA (0,5C) por batería, como recomendaba el fabricante.

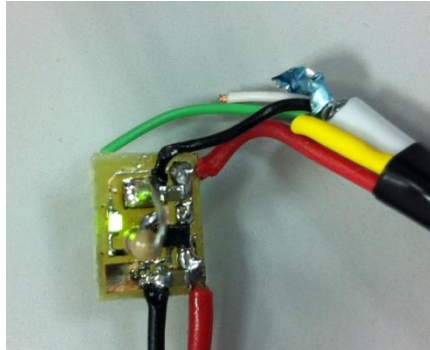


Figura I.12: Circuito empleado para limitar la corriente de carga a 220mA.

Los tiempos de carga que se indican a continuación corresponden con el momento en el que se completa la carga produciéndose el apagado del LED del circuito de la figura I.12, circunstancia que indicará al usuario que puede dar la carga por completada.

La medida de la temperatura de la batería se realizó con una sonda de temperatura que viene integrada en el multímetro marca Velleman modelo DVM891 y un multímetro digital marca amprobe, modelo 35XP-A (Figura I.13), obteniéndose que el valor de temperatura alcanzado por las baterías es inferior a la temperatura ambiente del laboratorio (23°C).



Figura I.13: Medida de la temperatura de las baterías.

Carga con cargador de red

- ✚ Tensión de inicio: 3,62V
- ✚ Tensión final: 4.21V
- ✚ Tiempo de carga: 2horas 13minutos

En la figura I.14 se puede ver la evolución de la tensión en las baterías durante el proceso de carga con el cargador de red.

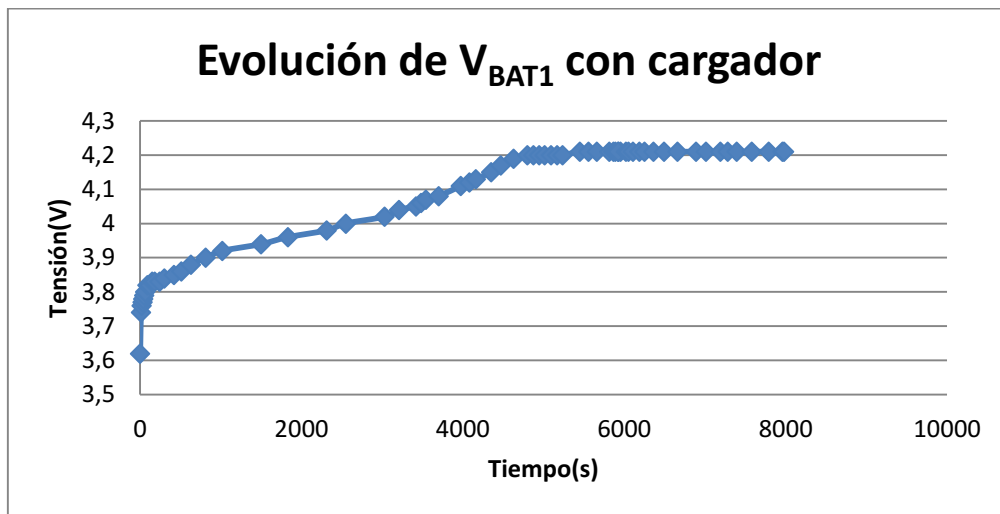


Figura I.14. Evolución de la tensión en BAT1 al realizar la carga con el cargador de red

En la figura I.15 se puede ver la evolución de la corriente en las baterías durante el proceso de carga con el cargador de red.

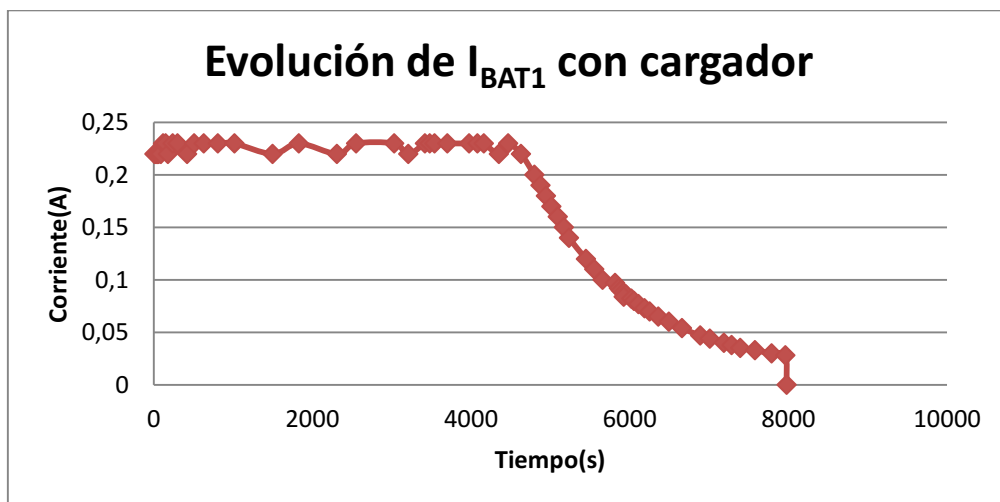


Figura I.15. Evolución de la corriente en BAT1 al realizar la carga con el cargador de red

Carga con PC

- Tensión de inicio: 3,61V
- Tensión final: 4.21V
- Tiempo de carga: 2horas 11minutos 48segundos

En la figura I.16 se puede ver la evolución de la tensión en las baterías durante el proceso de carga con el puerto USB del PC.

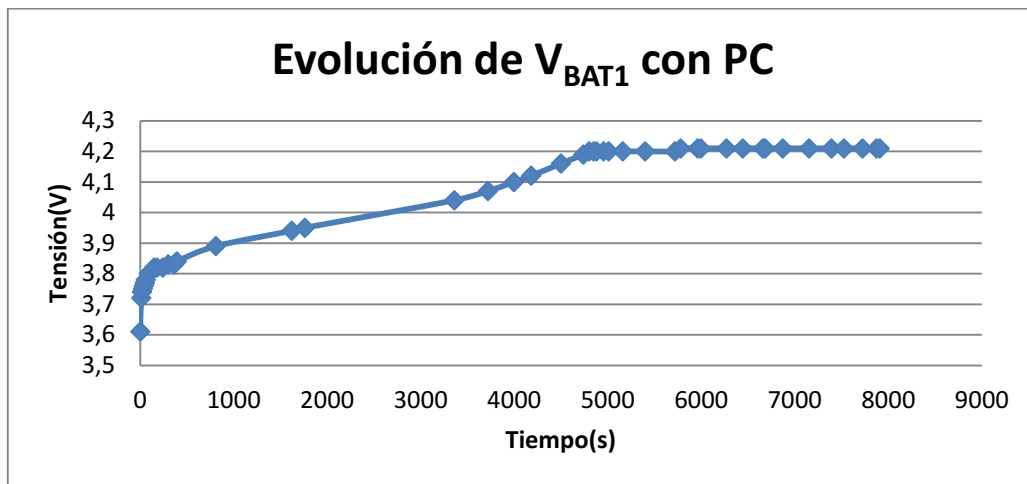


Figura I.16. Evolución de la tensión en BAT1 al realizar la carga con el PC

En la figura I.17 se puede ver la evolución de la corriente en las baterías durante el proceso de carga con el puerto USB del PC.

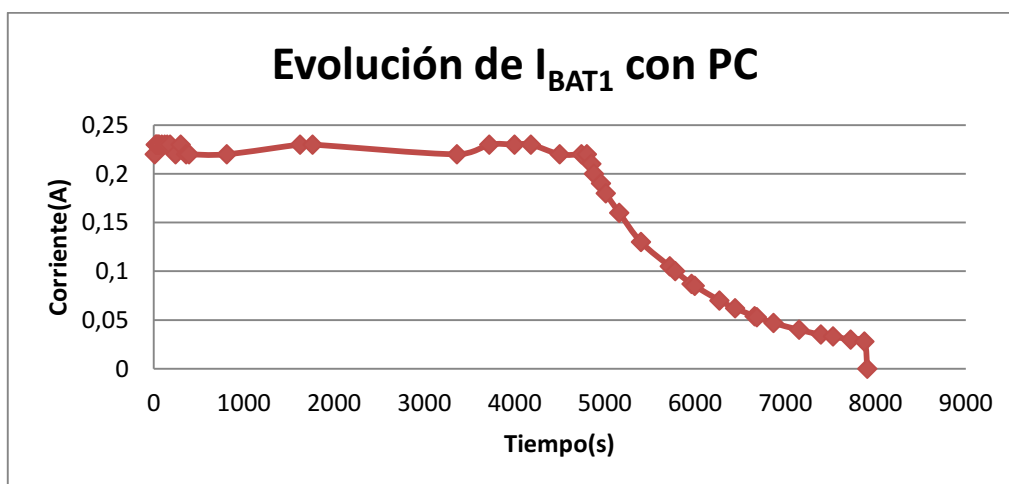


Figura I.17. Evolución de la corriente en BAT1 al realizar la carga con el PC

Como era de esperar, ya que la carga se controla mediante el chip MCP73832T-2ACI/OT, de los resultados anteriores se puede deducir que el proceso de carga con PC o con el cargador de red ofrece resultados idénticos, obteniéndose el mismo valor de carga en el mismo tiempo de carga.

Descarga de las baterías

Para comprobar el correcto funcionamiento de las baterías en la futura operación del dispositivo, se programaron diferentes comportamientos temporales basados en la conmutación usando el algoritmo1 (visto en el capítulo 3). Se tiene en cuenta que los mayores consumos de corriente se producen durante la conmutación del dispositivo, tal como se comprobó en el apartado 3.1.2 (Fig. 3.13-3.17). Por tanto, se programaron a modo de funcionamiento continuo dos comportamientos de conmutación, uno a razón de una vez cada 5 minutos, y otro aún más rápido, a dos veces por minuto. Al aplicarlos en el sistema final y medir la tensión en las baterías, se puede conocer el consumo real del dispositivo completo en operación.

Algoritmo 1 conmutando en torno a una vez cada 5 minutos

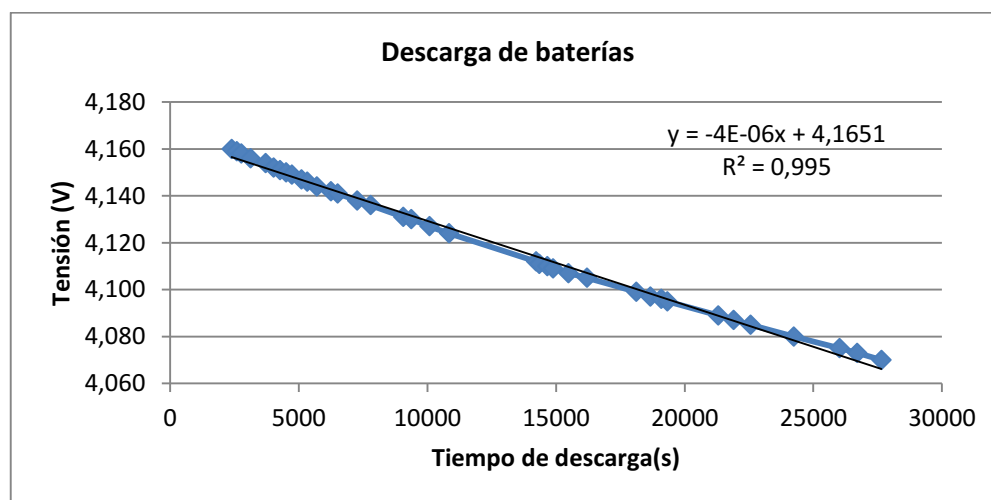


Figura I.18. Representación de la evolución de la tensión de las baterías (test 1)

Como se puede ver en la figura I.18, la batería se descarga casi linealmente. Extrapolando los resultados anteriores se alcanzaría una tensión de 3V transcurridos 291.275 segundos o lo que es igual **80,9** horas. Esto significa que a un ritmo lento de conmutaciones, durante

8 horas al día, podríamos estar hablando de **unos de 10 días sin necesidad real de recarga.**

Algoritmo 1 conmutando unas 2 veces por minuto

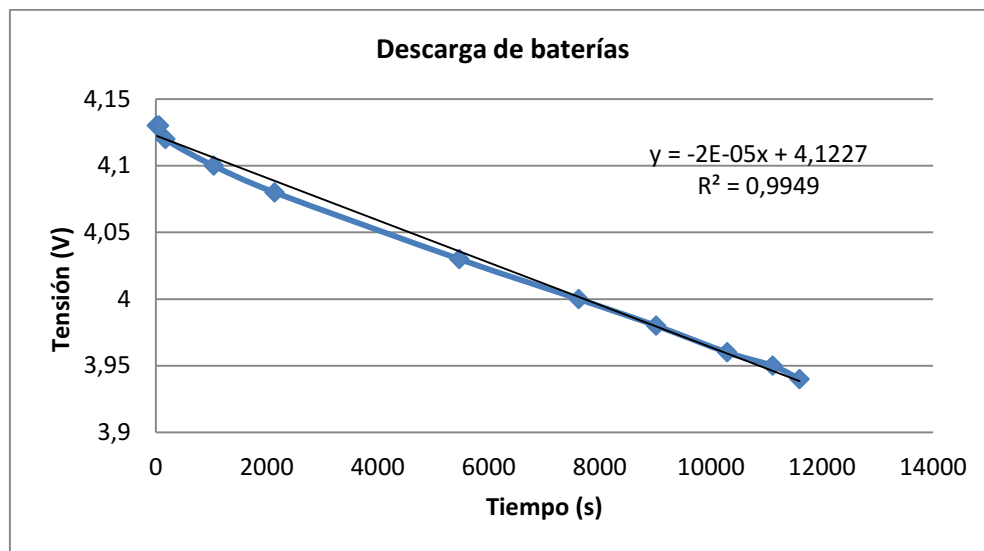


Figura I.19. Representación de la evolución de la tensión de las baterías (test 2)

Extrapolando los resultados anteriores (Fig. I.19) se alcanzaría una tensión de 3V transcurridos 56.135 segundos o lo que es igual **15,59 horas**. Esto significa que a un ritmo intenso de conmutaciones (donde mayor es el consumo de corriente) durante 8 horas al día, podríamos estar hablando de **más de 2 días sin necesidad real de recarga.**





ANEXO II



II PROTOTIPOS EXPERIMENTALES: SOFTWARE

En este apartado se presenta el software desarrollado para que los cristales EC realicen la función prevista en las gafas descritas en el apartado anterior.

El entorno de programación escogido fue el *High-performance Embedded Workshop* (HEW) de Renesas Electronics Corporation., versión 4.09.01.007. Su elección fue obvia por ser el entorno ofrecido por la propia marca del microcontrolador. Para facilitar una programación de alto nivel se ha utilizado el compilador M16C Series, R8C Family C Compiler V.6.0 Release 00, que permite una programación en C y una rápida compilación al lenguaje del Microcontrolador. Este software se puede descargar de forma gratuita desde la página Web del fabricante “www.renesas.com” así como su manual de usuario.

A continuación podemos ver la distribución de ficheros en el árbol del proyecto del HEW (Figura II.2) para el programa completo así como la ventana de conexión del programador con el microcontrolador (Figura II.1)

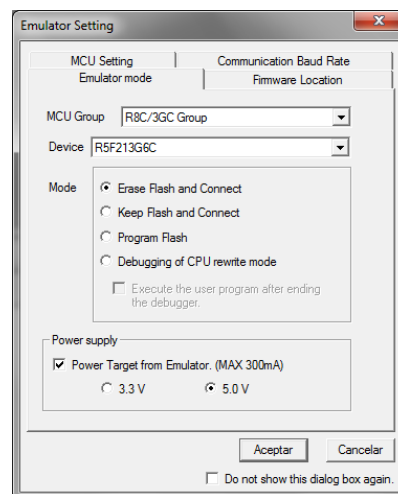


Figura II.1. Conexión del software de desarrollo (HEW) y el micro

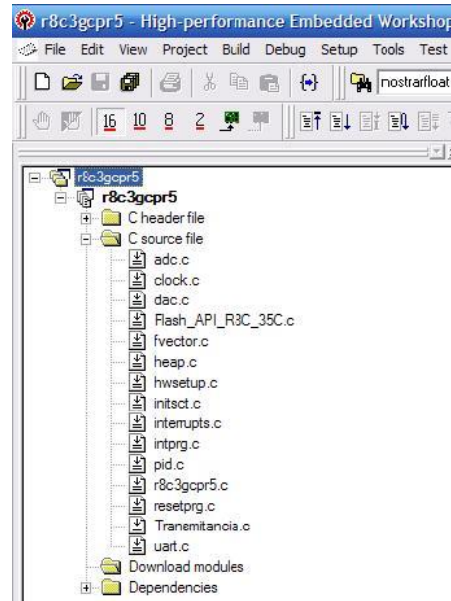


Figura II.2. Distribución de ficheros del proyecto.

En los subsiguientes apartados se explicará, acompañando con diagramas de flujo, el funcionamiento del programa y sus diferentes funciones.

II.1 PROGRAMA COMPLETO: R8C3GCPR5.C

En la Figura II.3 se representa el diagrama de funcionamiento de este nuevo Prototipo. Para la comprensión de la ejecución de este programa se debe tener en cuenta que, a la vez que se ejecuta el programa principal, existen procesos paralelos en ejecución o en espera.

Se desglosan cada uno de los bloques de este diagrama para su explicación detallada en sucesivos apartados.

Por tanto se divide el programa completo en *código principal* y *procesos paralelos*. Estos procesos paralelos se conocen como interrupciones.

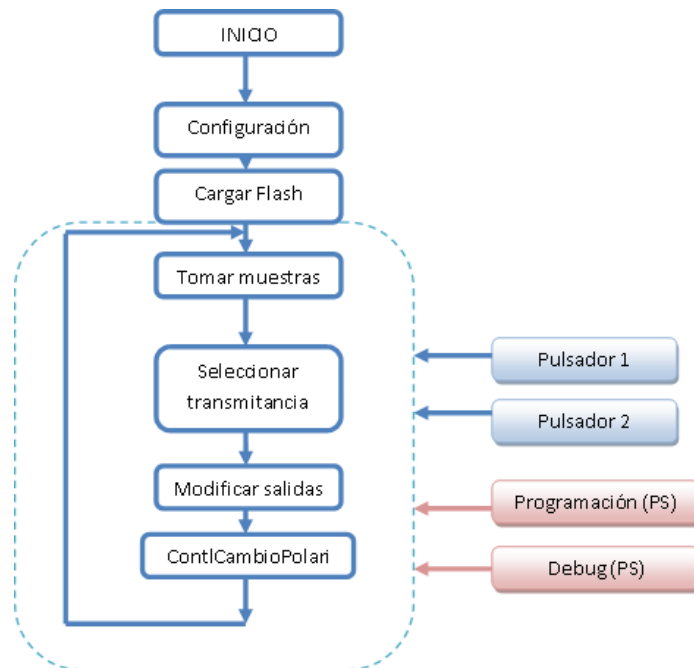


Figura II.3. Diagrama de bloques del programa completo.

El código principal comienza con una inicialización de todas las constantes y variables comunes a toda la ejecución del código, y la definición de todos los métodos empleados.

Inmediatamente después de la inicialización, comienza la función *main*, que se puede distinguir nuevamente en tres partes: *configuración*, *cargar flash* y *ejecución principal*.

Como su nombre indica, la configuración se encarga de ajustar los registros y flags adecuados para el funcionamiento de todos los periféricos necesarios y precargar los procesos paralelos, o interrupciones.

La carga de flash verifica si se ha realizado una configuración manualmente mediante el puerto serie, y si ese es el caso sustituye los parámetros por defecto por los hallados en la memoria flash.

La ejecución principal se trata de un bucle infinito en el que se mantiene la gafa desde su encendido hasta su apagado. Esta parte del código es el núcleo del funcionamiento del mismo: mediante diferentes métodos y algoritmos se obtiene el nivel de tensión que le corresponde colocar a la salida al driver electrónico. Será mediante la comparación entre la información obtenida del sensor lumínico central y/o la información obtenida de los sensores situados detrás de cada cristal lo que proporcione el nivel de transmitancia.



Existen 4 interrupciones o procesos paralelos.

Las dos primeras interrupciones son *Pulsador1* y *Pulsador2*:

- ✓ Se encargan de indicar al proceso principal que el usuario desea aumentar/disminuir respectivamente un nivel respecto del que actualmente posee la gafa: son las interrupciones externas provocadas por la activación de los pulsadores por parte del usuario.
- ✓ Alternar entre los modos de funcionamiento Manual y Automático.
- ✓ Entrar en modo comprobación (oscurecimiento continuo durante 15 segundos).

A ambas se entra automáticamente cuando se presenta un nivel bajo (que proviene de los pulsadores vistos anteriormente) en la patilla correspondiente del micro.

Las dos segundas corresponden con la reprogramación del micro (programación PS) o visualización de parámetros (Debug PS) ambas mediante el puerto serie del micro.

Se pasa a detallar las partes mencionadas de código.

II.2 INICIALIZACIÓN Y CONFIGURACIÓN

La parte de inicialización y configuración se diferencia del código de ejecución principal en que sólo se ejecuta una vez por cada encendido del dispositivo. Existen dos partes diferenciadas: inicialización y configuración, como se puede ver en la Figura II.4.

La etapa de configuración pertenece a la función principal: *main*. La primera acción realizada es inicializar las variables comunes a la ejecución principal a su valor por defecto. Luego llama a las funciones encargadas de realizar la configuración de cada uno de los periféricos:



- “*ConfigureInternalClock()*;”. Configura el reloj para trabajar a 20MHz utilizando la opción de Oscilador interno rápido (*High-speed on-chip oscillator clock*) y otras opciones.
- “*HardwareSetup()*”. Habilita mediante software las interrupciones externas de los pulsadores y el configura tipo de interrupción por flanco de bajada. Establece los pines a utilizar así como si son de entrada o de salida.
- “*Init_ADC ()*”. Configura el ADC. Preestablece los pines de muestreo como pines de entrada analógicos, configura el ADC para realizar conversiones de 10 bits.
- “*pid_Init()*”. Se inicializan los PID.
- “*Uart_Init()*”. Configura la comunicación PC-Micro. Selecciona los pines de TX y RX (transmisión y recepción) para la comunicación. Establece las características del tipo de configuración: sin bit de parada, sin bit de paridad y velocidad de 9600 Baudios. Esta velocidad es suficiente para la comunicación con el PC, siendo la normalmente establecida en configuraciones serie como la usada.
- “*cargarFlash()*”. Copia los parámetros se que encuentran en memoria flash, previamente configurados mediante la reprogramación vía puerto serie.

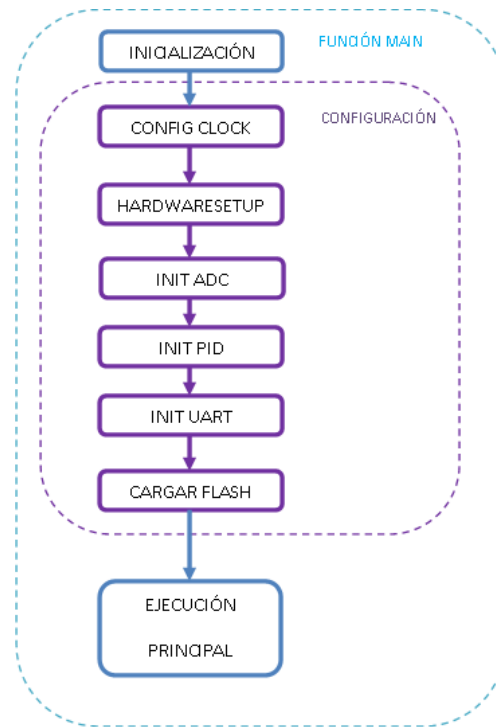


Figura II.4. Diagrama de Flujo de inicialización y configuración

II.3 EJECUCIÓN PRINCIPAL

La etapa de ejecución Principal se corresponde con el bucle de ejecución infinita (`while(1){}`) de la función *main*.

Tal como se muestra en la Figura II.5 de diagrama de bloques, la gafa está constantemente ejecutando este código. Sólo las 4 interrupciones externas pueden interaccionar con este bloque.

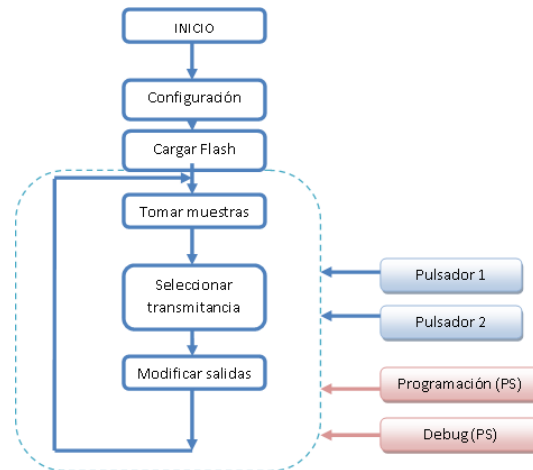


Figura II.5. Diagrama de flujo de *Ejecución Principal*

Este bloque consta de 3 etapas diferenciadas y que constituyen el núcleo de la aplicación.

Primero se toman medidas de los tres sensores cumpliendo una serie de requisitos. Estas medidas serán utilizadas en un postprocesado por parte de la función *SeleccionarTransmitancia()*. Con esta información y la obtenida desde el posible control manual del usuario, se decide el porcentaje de transmitancia, y en consecuencia los niveles de tensión de salida a indicarle al DAC, y se vuelve de nuevo a comenzar el proceso.

A continuación se detallarán cada uno de estos algoritmos, dada su importancia.

II.4 TOMAR MUESTRAS

El propósito de esta función es tomar muestras de los sensores para un posterior procesado.

Debido a las posibles señales a medir por el sensor, entre ellas luz fluorescente pulsando a una frecuencia típica de 100Hz, se han tenido una serie de cuidados a la hora de realizar el muestreo. Se desea tomar las muestras de manera que se pueda obviar el uso de un filtro paso bajo hardware a la frecuencia indicada, pues aumentaría el tamaño del circuito a desarrollar y uno de los objetivos es la miniaturización.

Utilizando la teoría del muestreo y el teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia de la señal (200Hz en este caso).



Como el reloj del ADC se selecciona a 20MHz (igual que el micro) el tiempo que tarda en adquirirse una muestra según el manual del fabricante es de $T=0,8\text{ns}$, el tiempo total para tres muestras es $T_{AD}=0,8\text{ns} \times 3= 2,4\text{ns}$.

Como T_{AD} tiene que ser $\leq 1/200\text{Hz}$ esto significa que:

$1/200\text{Hz} \leq 24\text{ns}+N$ (tiempo ejecución de las demás funciones) $\rightarrow N < 4,9\text{ms}$ (N tiene que ser menor que 4,9ms)

En este prototipo se establece el valor $N < 4\text{ms}$ tras varias pruebas, ya que cumple con el teorema de Nyquist y no hace lenta la respuesta de las gafas, dando un $T_{AD\text{total}}=4\text{ms}+2,4\text{ns} < 4,1\text{ms}$ o en términos de frecuencia, una frecuencia de muestreo de $f > 1/4,1\text{ms} \rightarrow f > 243\text{Hz}$.

Como se ha dicho antes, se trata de una función ejecutándose continuamente dentro la función principal *main*.

II.5 FUNCIÓN SELECCIONAR TRANSMITANCIA

Esta función realiza un procesamiento de las muestras tomadas y su diagrama de flujo es el mostrado en la figura II.6. En este caso se va a comparar el nivel de tensión detectado con unos umbrales de tensión:

- ✚ bien obtenidos experimentalmente por calibración en un entorno luminoso controlado, a fin de determinar el nivel de iluminación, o intensidad de luz recibida.
- ✚ bien determinados por el usuario mediante el control manual del dispositivo⁹.

⁹ Si la iluminación es mayor de la definida mediante la programación de usuario (10000 Lux por defecto) el software ajusta el porcentaje mediante un control automático: en caso contrario se ajustan unas tensiones concretas, a cada cristal, almacenadas en una tabla (modificable mediante de software) "MODO A CIEGAS"

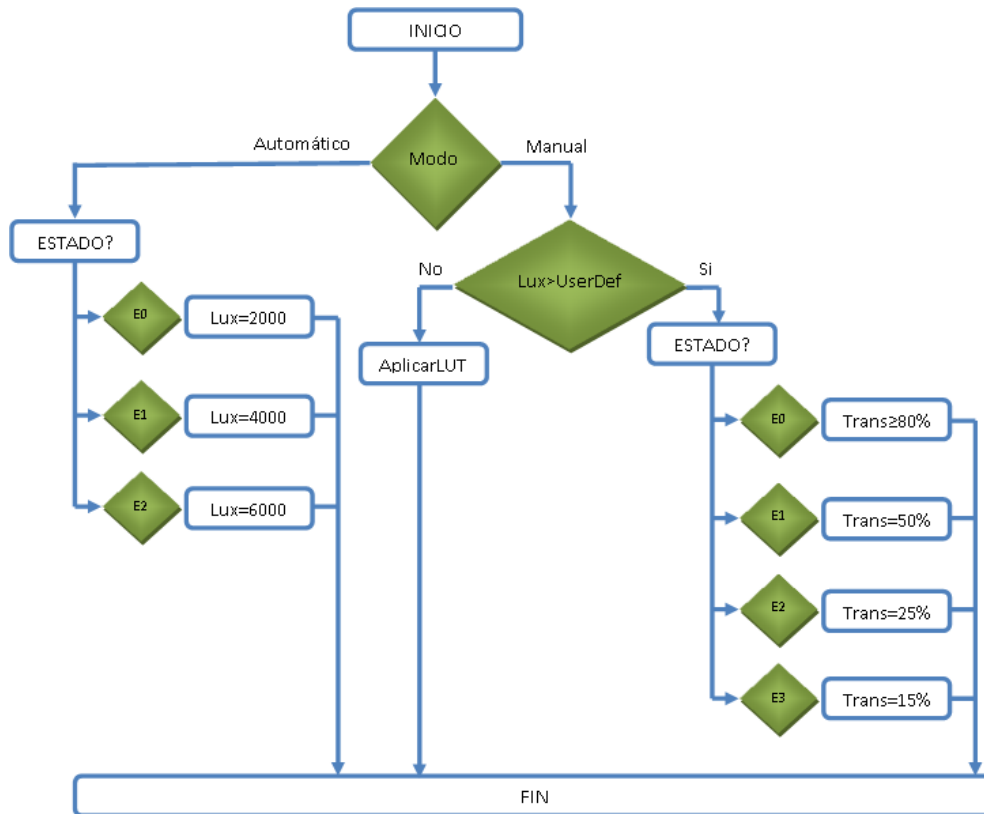


Figura II.6. Diagrama flujo función seleccionar transmitancia

Todos los valores de Lux y de transmitancia son modificables mediante software por el usuario (profesional oftalmológico).

Primero comprueba el modo de funcionamiento en el que se encuentra el dispositivo (manual o automático) y en función de éste y del nivel seleccionado mediante los pulsadores, selecciona el parámetro objetivo: bien *Luxes ajustados en los fotodiodos traseros* (modo automático) o bien *tanto por ciento de transmitancia* (modo manual), siempre que, en el modo manual, el sensor central detecte una cantidad de luxes mayor o igual que el definido para el usuario (en la programación del dispositivo mediante el cable USB). En caso contrario se aplican unas tensiones fijas para cada nivel, mediante una tabla predefinida (también configurable mediante el cable de programación USB).

Esta tabla es debida a la imposibilidad de mantener unos niveles de transmitancia en determinadas circunstancias como son las condiciones de baja luminosidad, y cuya generación se explica a continuación.

Si se observa detenidamente la figura II.7 (extraída de las hojas de características del fotodiodo), se encuentra la particularidad de que la curva no acaba en el punto (0,0) como cabe esperar. Este punto sería el que, a una iluminancia dada, genera una tensión nula. No es así. No se puede tener una tensión nula nunca, por dos motivos: uno es que el fotodiodo tiene una sensibilidad mínima para que empiece a conducir, a generar una corriente. No se podrá “ver” nada por debajo de una cierta cantidad de luxes porque el fotodiodo simplemente no reacciona. Aunque esta cantidad puede ser muy pequeña, existe además el hecho, reflejado en la figura II.7 de que existe una corriente de oscuridad en función de la tensión de polarización del fotodiodo. Esta corriente existe se haga lo que se haga, y deriva, naturalmente, en una tensión mínima medida. Como se aprecia en la figura II.7, esta corriente es mayor cuanto mayor sea la tensión de polarización del fotodiodo. Sin embargo, aunque sea la menor posible, se genera una corriente que, multiplicada por la resistencia de acondicionamiento, da lugar a una tensión mínima a mayores.

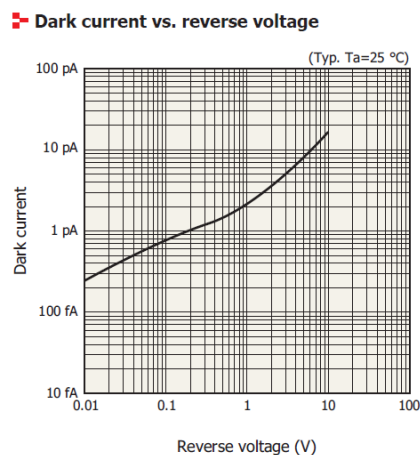


Figura II.7. Curva del fotodiodo [66]

Si medimos experimentalmente el mínimo mensurable de iluminación incidente en el fotodiodo en luxes, reproduciendo el montaje que ha dado lugar a la calibración de la figura II.7, encontramos un valor aproximado de 300. Por lo tanto el nivel mínimo de iluminancia mensurable es de 300 Luxes.

Este valor conlleva que se tendrán problemas adicionales en diferentes niveles. Para percibirlos correctamente, se presenta una tabla (Figura II.8) de doble entrada: horizontalmente se muestran los luxes que llegan al fotodiodo central, de 2400 a 300

luxes. Verticalmente se muestran las transmitancias que pudieran ser programadas desde el 100 % al 12,5 % (supondremos que será un valor límite inferior, se consensuó con los profesionales de IOBA que por debajo de esta transmitancia no es operativa la funcionalidad del ojo humano en un entorno), dando lugar en cada celda de la tabla al valor en luxes que recibiría un ojo ubicado tras el dispositivo que tuviera la correspondiente transmitancia.

luxes PD central	transmitancia (%)									
	12,5	20	30	40	50	60	70	80	90	100
2400	300	480	720	960	1200	1440	1680	1920	2160	2400
2300	287,5	460	690	920	1150	1380	1610	1840	2070	2300
2200	275	440	660	880	1100	1320	1540	1760	1980	2200
2100	262,5	420	630	840	1050	1260	1470	1680	1890	2100
2000	250	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
1900	237,5	380	570	760	950	1140	1330	1520	1710	1900
1800	225	360	540	720	900	1080	1260	1440	1620	1800
1700	212,5	340	510	680	850	1020	1190	1360	1530	1700
1600	200	320	480	640	800	960	1120	1280	1440	1600
1500	187,5	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500
1400	175	280	420	560	700	840	980	1120	1260	1400
1300	162,5	260	390	520	650	780	910	1040	1170	1300
1200	150	240	360	480	600	720	840	960	1080	1200
1100	137,5	220	330	440	550	660	770	880	990	1100
1000	125	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
900	112,5	180	270	360	450	540	630	720	810	900
800	100	160	240	320	400	480	560	640	720	800
700	87,5	140	210	280	350	420	490	560	630	700
600	75	120	180	240	300	360	420	480	540	600
500	62,5	100	150	200	250	300	350	400	450	500
400	50	80	120	160	200	240	280	320	360	400
300	37,5	60	90	120	150	180	210	240	270	300

Figura II.8. Luxes fotodiodo central vs transmitancia

Como se puede ver, el problema sólo surge a partir de tener menos de 2400 luxes recibidos en el fotodiodo central. Además, se puede acotar el problema a tres zonas de influencia:

- De 2400 a 1500 luxes en el fotodiodo central, el problema se limita a si el usuario quiere colocar una transmitancia del 12,5 % (es decir, la más baja) porque ésta sería indetectable por los fotodiodos traseros.
- De 1500 a 1000 luxes en el fotodiodo central, el problema se limita a transmitancias hasta del 20 %.
- Progresivamente, bajando de 1000 luxes en el fotodiodo central, el problema surge en transmitancias mayores. Es de esperar, en cualquier caso, que por debajo de estas condiciones el usuario no quiera tener oscurecidas las gafas. Por ejemplo,

se recomiendan 500 luxes para leer cómodamente. En ese caso, sólo tendríamos problemas por no conocer el estado del cristal si el usuario quiere mantener una transmitancia por debajo del 50 %, caso improbable en general.

Estos problemas fueron puestos en común con los profesionales oftalmológicos (IOBA) y la empresa Indo, que llegaron a la conclusión de que era más operativo de cara al usuario establecer una LUT (*look up table*) mediante la cual se aplican unas tensiones constantes que hacen comportarse los cristales de acuerdo a lo siguientes categorías (según la norma UNE-EN 1836:2006):

- ✚ **Nivel 1:** Lentes muy oscuras. Categoría de filtro 3. Apto para la conducción diurna.
- ✚ **Nivel 2:** Lentes oscuras. Categoría de filtro 2. Apto para la conducción diurna.
- ✚ **Nivel 3:** Lentes ligeramente oscuras: Categoría de filtro 1. Apto para la conducción diurna.
- ✚ **Nivel 4:** Lentes lo más claras que permite la gafa. Categoría de filtro 0. Apto para la conducción diurna y nocturna.

De este modo, el prototipo está configurado por defecto para que si se detectan menos de 2400 luxes en el fotodiodo central, el sistema entre en un modo a ciegas en el cual se aplican unas tensiones predefinidas (pero modificables por parte del profesional oftalmológico) a cada cristal para mantener los cristales con una coloración de acuerdo a las categorías definidas en la norma UNE-EN 1836:2006.

Tras visualizar este problema podría surgir la cuestión de qué pasaría si se saturase alguno de los fotodiodos (entornos muy luminosos). Como se puede ver en la figura II.9, los fotodiodos están saturados por encima de 6000 luxes, a una tensión de 3,29 V.

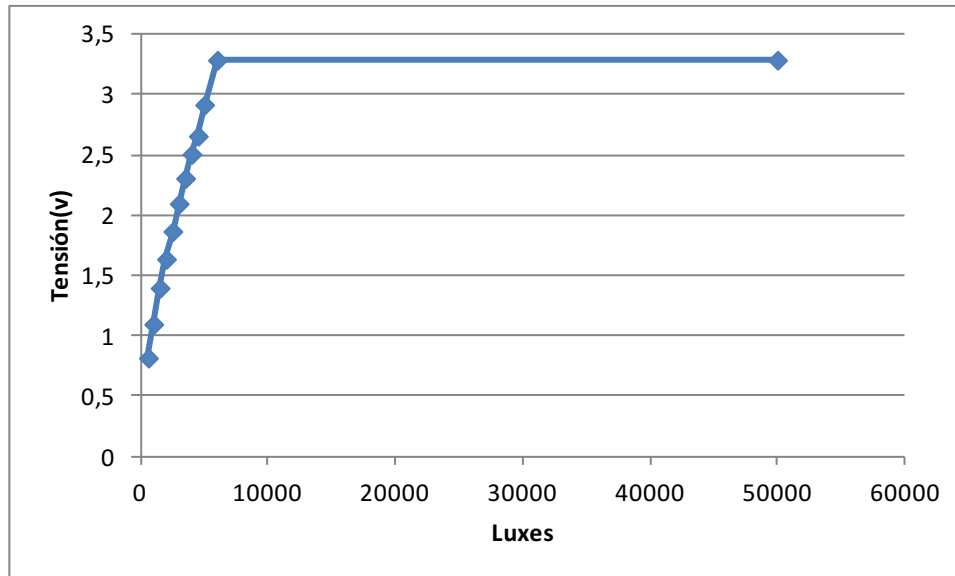


Figura II.9. Tensión medida vs luxes

Este valor podría haberse cambiado por otro variando el valor la resistencia de acondicionamiento, pero en ese caso cambiaríamos el rango dinámico. Es decir, la capacidad de discernir entre niveles de iluminancia cambiaría, por ejemplo, a discernir entre 3000 y 16000 luxes, perdiendo información por debajo de 3000 luxes. Según los profesionales oftalmológicos, éstos niveles son más importantes puesto que a partir de 6000 luxes el filtro debería tener su máxima coloración, por lo que no se hacen más variaciones.

II.6 MODIFICAR SALIDAS

El propósito de esta función es ajustar las tensiones aplicadas a cada uno de los cristales.

Como se vio en el Capítulo 3, al aplicar un 1V a los cristales, se obtiene la mínima transmitancia transcurrido un periodo de tiempo. Además, como se vio en el apartado 3.1.2 “determinación de V_p ” menores diferencias de potencial provocaban una variación de la transmitancia menor. Esto significa que una vez alcanzado un nivel y para mantenerle, se podrían aplicar menores diferencias de potencial. Con este fin, se ha implementado un PID¹⁰ que junto con los resultados obtenidos en el capítulo 3 (apartado 3.1.3 “ciclabilidad y determinación del algoritmo óptimo) provocará variaciones de

¹⁰ Mecanismo de control por realimentación (proporcional-integral-derivativo) que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste la salida.

tensión entre 0 voltios y 1 voltio, como muestra la figura II.10. Tras ejecutarse la función *PID_Control ()*, se comprueba que la tensión que se va aplicar no supere la máxima (1V) o mínima (0V) configurada. De esta manera se asegura que no se apliquen tensiones que pudieran dañar los cristales.

El algoritmo de cálculo de control PID (proporcional-integral-derivativo) se da en tres parámetros distintos:

- ✚ El proporcional determina la reacción del error actual.
- ✚ El integral genera una corrección proporcional a la integral del error: esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero.
- ✚ El derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce.

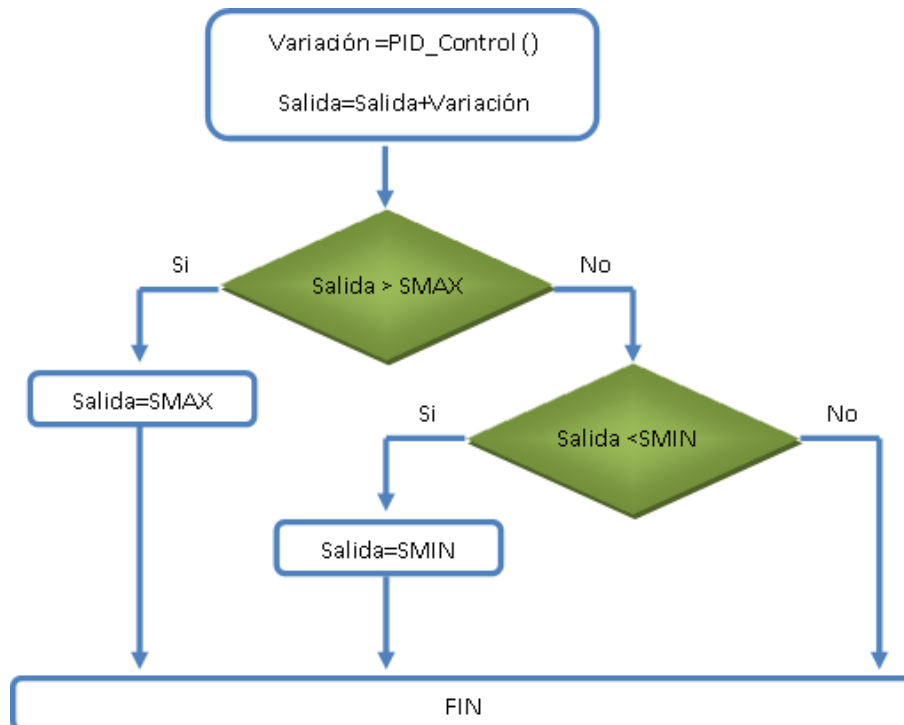


Figura II.10. Diagrama de flujo función modificar salidas

Básicamente devuelve la cantidad de voltios a aplicar a la salida, que será proporcional a distancia de entre el valor objetivo y el valor medido.

A continuación en la figura II.11 se puede ver el diagrama de flujo de la función *PID_Control()*

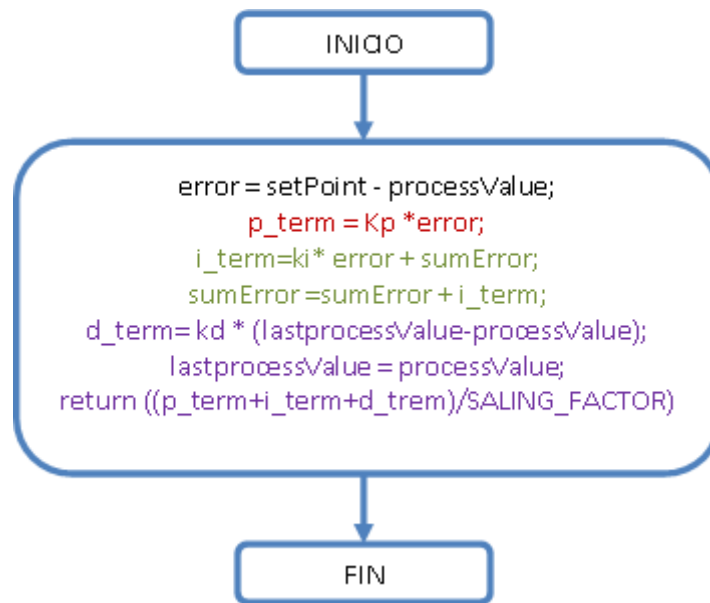


Figura II.11. Diagrama de flujo sin control de overflow para simplificar su dibujo

Partiendo de que se conocen el valor de transmitancia o luxes objetivo (*setPoint*) y el valor actual (*processValue*) medido por los fotodiodos, se restan uno de otro y se obtiene el error actual del dispositivo. Posteriormente:

4. se multiplica ese error por el factor proporcional (*kp*) dándonos el término proporcional *p_term* para lograr que el error en estado estacionario se aproxime a cero.
5. se multiplica ese error por el factor integral (*ki*) y le sumamos el error integral acumulado, dándonos el término integrativo *i_term* para después sumarlo al *i_term* acumulado.

6. Se calcula la diferencia entre el anterior valor medido y el actual y se multiplica por el factor derivativo (kd), dándonos el término derivativo d_term .

Para terminar se suman todos y se divide por un factor de escalado. Este valor será la variación de tensión a aplicar a la salida, como se vio previamente.

La forma de obtener los factores kp , ki y kd es mediante el método de Ziegler-Nichols, basado en tres parámetros. La ganancia estática del sistema (k), la constante del sistema de primer orden (T_2) y el retardo puro (T_1) [92,93]. Éste método, permite ajustar el PID de forma empírica (mediante su respuesta a la señal escalón). Los valores propuestos por este método intentan conseguir en el sistema realimentado una respuesta al escalón con un sobreamortiguamiento máximo del 25%, que es un valor robusto con buenas características de rapidez y estabilidad para la mayoría de los sistemas [92,93].

En la figura II.12 se puede ver la respuesta en transmitancia del fotodiodo rojo tras el cristal al aplicar una señal de 1 V durante 60 segundos y 0V 60 segundos. En línea de puntos se ha marcado el valor mínimo de transmitancia.

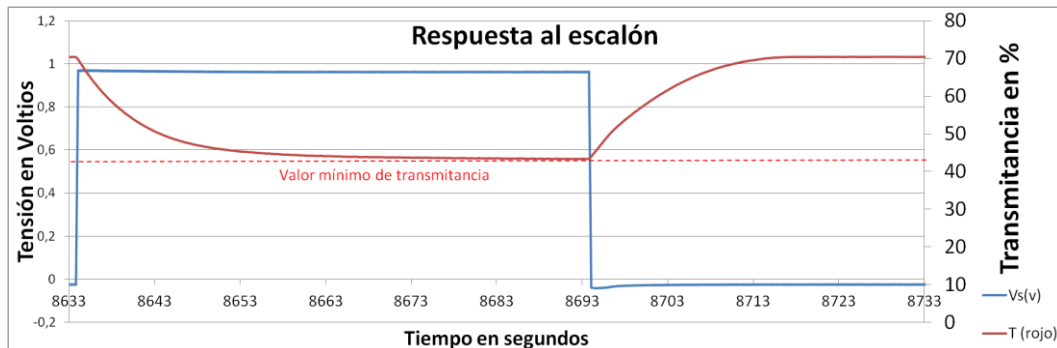


Figura II.12. Respuesta en transmitancia del fotodiodo rojo al escalón de 1V.

Para calcular los parámetros (se puede ver gráficamente en la figura II.13) se comienza por trazar una línea recta tangente a la señal de salida del sistema (curva roja). Esta tangente está dibujada en la figura II.13 con una recta a trazos de color azul. El tiempo T_1 corresponde al tiempo de retardo o tiempo muerto. Este es el tiempo que tarda el sistema en comenzar a responder. Este intervalo se mide desde que la señal escalón sube, hasta el punto en que la transmitancia empieza a descender. El tiempo T_2 es la constante de tiempo. Este tiempo se calcula desde el punto en el que la recta tangente corta al valor inicial del sistema (fin de T_1) hasta el punto en el que la recta tangente llega al valor final del sistema (corta la recta a trazos de color rojo).

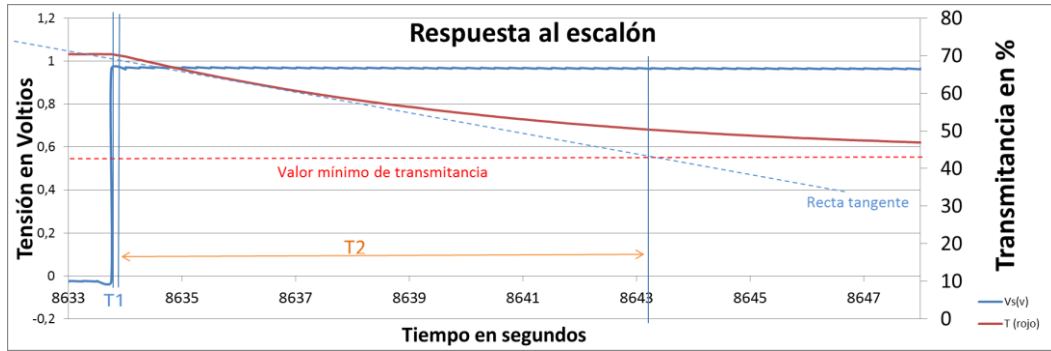


Figura II.13. Respuesta en transmitancia del fotodiodo rojo al escalón de 1V ampliado.

Si se amplía aún más la figura II.13, se obtiene que $T_1 = 0,4s$ (Fig. II.14) y $T_2 = 9s$ (Fig. II.15)

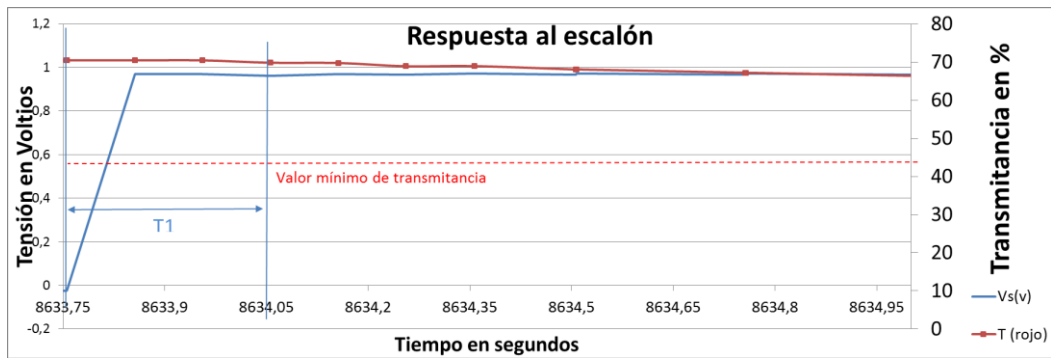


Figura II.14. Respuesta en transmitancia del fotodiodo rojo al escalón de 1V ampliado 2.

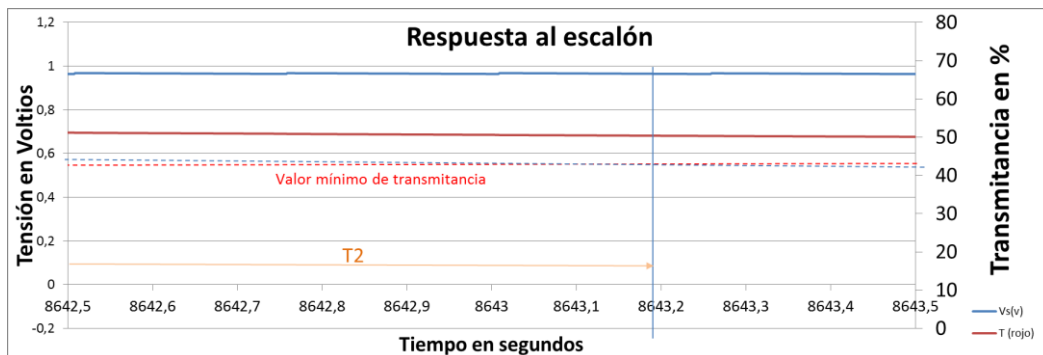


Figura II.15. Respuesta en transmitancia del fotodiodo rojo al escalón de 1V ampliado 3.

Faltaría calcular el valor de la constante k , como el cociente entre el cambio observado a la salida y el cambio provocado en la entrada del proceso.

Siendo $k = dx/dy$ (ec. II.3) [92-94]

En este caso, la variación de la señal escalón corresponde a $dx = 1$ voltio y la variación del sistema corresponde a $dy = 27,32$ (70,53% - 43,21%) por lo que $k = 1/27,32 = 0,037$

A partir de estos valores se puede calcular la constante del sistema k_0 :

$$k_0 = k * \frac{T_2}{T_1} = \frac{dx}{dy} * \frac{T_2}{T_1} \quad (\text{ec. II.4}) [93,94]$$

Sustituyendo los valores obtenidos anteriormente en la ecuación II.4 se obtiene que:

$$k_0 = 0,82$$

Y así se pueden extraer los parámetros de acuerdo a regla de sintonización de Ziegler-Nichols basada en la respuesta al escalón, y que se resume en la siguiente tabla [92-94].

	k_p	T_i	T_d
P	k_0		
PI	$0,9 * k_0$	$3 * T_1$	
PID	$1,2 * k_0$	$2 * T_1$	$0,5 * T_1$

Tabla II.1. Reglas Ziegler-Nichols en lazo abierto constantes de tiempo. [92-94]

La constante k_p corresponde a la ganancia proporcional, T_i es la constante de tiempo integral y T_d es la constante de tiempo derivativa. En este caso, como el controlador PID es configurado con la ganancia integral K_i y derivativa K_d en vez de los tiempos T_i y T_d , hay que tener en cuenta las siguientes relaciones entre ellos [93,94]:

$$K_i = K_p / T_i$$

$$K_d = K_p * T_d$$

Con lo cual la tabla de los valores para ajustar el PID es la siguiente:

	k_p	k_i	k_d
P	k_0		
PI	$0,9 * k_0$	$k_0 / 3 * T_1$	
PID	$1,2 * k_0$	$k_0 / 2 * T_1$	$0,5 * k_0 * T_1$

Tabla II.2. Reglas Ziegler-Nichols en lazo abierto para ganancias k_i y k_d .

Según los valores obtenidos de la figura II.14, la ecuación II.3 y la tabla II.2 se pueden sacar los siguientes parámetros de la tabla II.3:

	k_p	k_i	k_d
<i>P</i>	<i>0,82</i>		
<i>PI</i>	<i>0,738</i>	<i>0,683</i>	
<i>PID</i>	<i>0,984</i>	<i>1</i>	<i>0,164</i>

Tabla II.3. Ganancias Ziegler-Nichols en lazo abierto del sistema.

II.7 PULSADORES

Este proceso es la típica interrupción externa (hardware) de un microcontrolador. En el momento en que se pulsa uno de los dos botones del Prototipo, salta una interrupción en el microcontrolador. Esta interrupción simplemente actualiza el nivel (lo aumenta o disminuye) en que se encuentra el dispositivo, dependiendo de si se pulsa un botón u otro, forzando un margen de tiempo de seguridad entre cada pulsación para evitar posibles cambios de estado indeseados. Además mediante la pulsación simultánea de ambos pulsadores se puede alternar entre el modo manual y automático o bien, realizar un test de los cristales, según el tiempo que se mantenga esa pulsación simultánea.

Existen dos posibles situaciones:

- ✚ Pulsación de un solo pulsador. El dispositivo cambia entre los niveles de funcionamiento dentro del modo manual o automático.
- ✚ Pulsación de ambos simultáneamente. Tenemos dos opciones nuevamente.
 - ✚ Si se mantienen pulsados menos de 5 segundos: el dispositivo cambia el modo de funcionamiento entre manual y automático.
 - ✚ Si se mantienen pulsados más de 5 segundos: el dispositivo comprueba el funcionamiento de los cristales aplicando máxima tensión posible a ambos durante 15 segundos, para luego retornar al modo de funcionamiento en el cual se encontraba.

II.8 PROGRAMACION (PS)

Como se ha visto anteriormente el programa principal se encuentra en un bucle infinito. En este bucle se comprueba siempre si ha habido una pulsación de tecla desde un PC y si ésta se corresponde con el carácter ‘p’ o el carácter ‘P’ de manera que si es así se entra en un modo programación donde se pueden configurar todos los parámetros del dispositivo por parte del profesional oftalmológico (para esto es necesario conectar el dispositivo a un pc mediante el cable usb-microusb descrito anteriormente y que se prevé suministrar con las gafas, y un PC con hyperterminal o similar). Estos parámetros son almacenados en memoria flash de modo que permanecen tras el apagado del dispositivo.

Los parámetros configurables son:

- ✚ La tensión máxima a aplicar a los cristales.
- ✚ Los porcentajes de transmitancia para cada nivel en modo manual.
- ✚ Los Lux para cada nivel en modo automático.
- ✚ Los Lux a partir de los cuales entra/sale del modo “a ciegas”.
- ✚ Los valores de tensión a aplicar para cada nivel del modo “a ciegas”.
- ✚ Un factor de corrección para cada fotodiodo sobre los valores medidos.

A continuación en la figura II.16 se muestra su diagrama de flujo

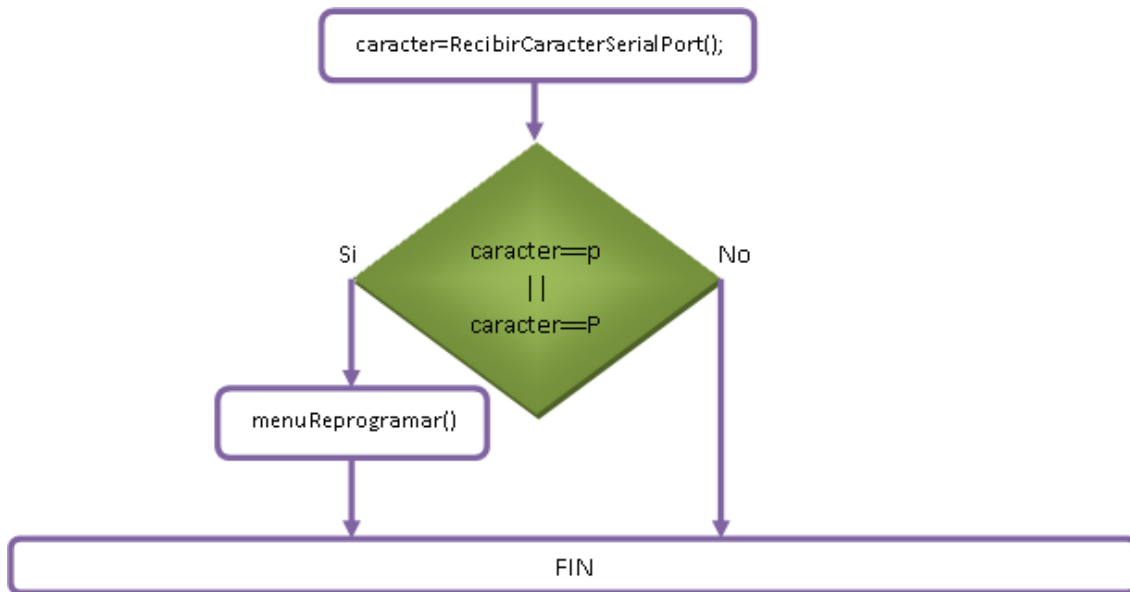


Figura II.16. Diagrama de flujo interrupción reprogramar

II.9 DEBUG (PS)

Como habíamos visto anteriormente el programa principal se encuentra en un bucle infinito. En este bucle se comprueba siempre si ha habido una pulsación de tecla desde un PC y si ésta se corresponde con el carácter 'd' o el carácter 'D' de manera que si es así se entra en un modo debug, mediante el cual el profesional oftalmológico puede visualizar en tiempo real, mediante el hyperterminal de un PC, todos los parámetros del dispositivo (para esto es necesario conectar el dispositivo a un PC mediante el cable usb-microusb suministrado y un PC con hyperterminal o similar)

Los parámetros que se pueden visualizar son:

- ✚ Tensión aplicada a los cristales.
- ✚ Valores medidos por los fotodiodos.
- ✚ Valor objetivo del dispositivo.

A continuación en la figura II.17 se muestra su diagrama de flujo.

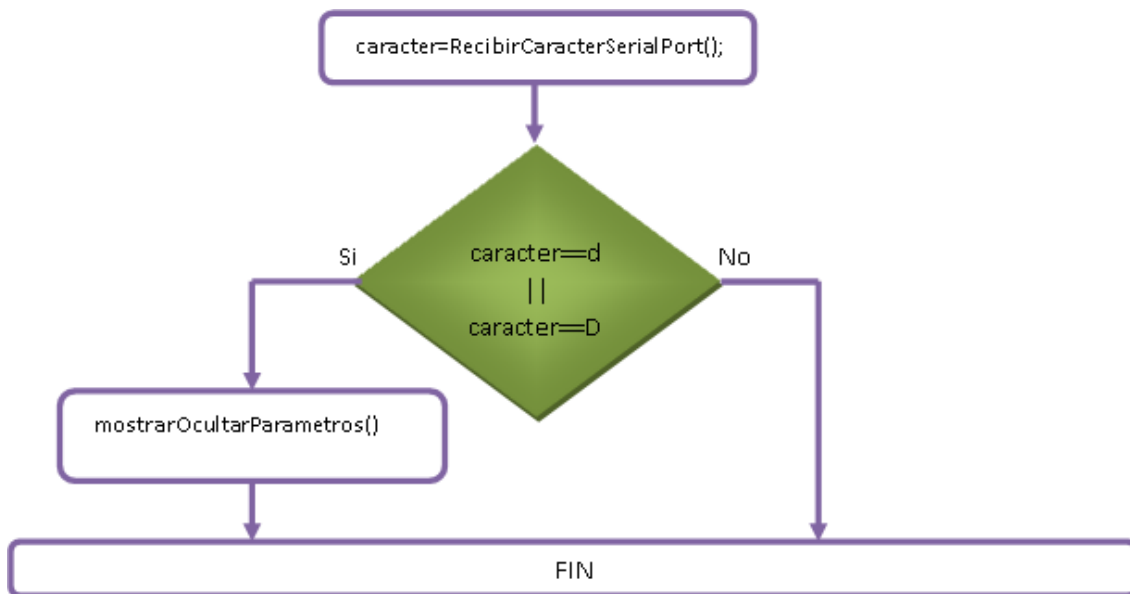


Figura II.17. Diagrama de flujo interrupción modo debug