



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es

Grado en ingeniería Electrónica Industrial y Automática

TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo e implementación de un sistema energéticamente eficiente de iluminación inteligente

Autor: Pepe Somoza Colino

Tutora: Cristina de Dios Fernández

Fecha: Octubre 2014

Resumen/Abstract

El sistema creado con este proyecto está basado en el uso de iluminación de estado sólido o SSL, particularmente utilizando como soporte los diodos LED, unido a un equipo electrónico que lo hace inteligente optimizando su funcionamiento, lo que implica que es capaz de adaptar su capacidad lumínica al entorno en el que trabaja adaptándose de forma automática e instantánea. Como valor añadido dispone de un puerto SMA que le permite actuar como emisor una transmisión de información por VLC (Visible Light Communication).

Con el prototipo desarrollado es posible evaluar el funcionamiento y las ventajas de estas tecnologías que poco a poco se están implantando en el mercado. Esto nos permite conocer con más exactitud sus ventajas e inconvenientes. Como principales ventajas se puede destacar el importante ahorro energético y económico que generan, teniendo además una importante reducción del periodo de amortización. Con estos resultados se puede afirmar de manera taxativa que este es el camino a seguir en los futuros desarrollos de dispositivos y aplicaciones de iluminación.

Contenido

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 4 |
| 1.1. Estado de la técnica | 4 |
| 1.1.1. El diodo LED blanco..... | 5 |
| 1.1.2. Iluminación inteligente..... | 6 |
| 1.1.3 Iluminación eficiente..... | 11 |
| 1.1.4 Comunicación VLC..... | 12 |
| 1.2. Motivación | 14 |
| 1.3. Objetivos | 15 |
| 2. Diseño del sistema iluminación eficiente..... | 16 |
| 2.1. Sistema de iluminación adaptativo..... | 16 |
| 2.1.1. Descripción del diseño completo | 16 |
| 2.1.2. Descripción del diseño del subsistema de detección de luz | 18 |
| 2.1.3. Descripción del diseño del subsistema de iluminación | 23 |
| 2.1.4. Layout de la PCB | 26 |
| 2.1.5. PCB montaje y puesta en funcionamiento | 27 |
| 2.2 Subsistema VLC..... | 29 |
| 2.2.1. Prueba de principio..... | 31 |
| 2.3. Sistema detección presencia..... | 31 |
| 3. Estudio experimental..... | 33 |
| 3.1. Sistema iluminación adaptativa..... | 33 |
| 3.2. Subsistema VLC..... | 36 |
| 4. Estudio de aplicabilidad | 39 |
| 4.1. Puesto de trabajo en biblioteca o de oficina | 39 |
| 4.2. Accesibilidad..... | 39 |
| 4.3. Museos | 40 |
| 4.4. Redes de comunicación..... | 40 |
| 5. Presupuesto | 42 |
| 5.1. Presupuesto del sistema..... | 42 |
| 5.2. Presupuesto del diseño | 42 |
| 5.3. Presupuesto total y amortización..... | 43 |
| 6. Conclusiones y trabajo futuro | 45 |
| 7. Referencias | 46 |

1. Introducción

Esta introducción nos sirve para conocer la línea de desarrollo que se ha seguido para realizar este proyecto y que se verá plasmada a lo largo de esta memoria de Trabajo Fin de Grado.

Este proyecto se centra en aprovechar el potencial de la iluminación basada en dispositivos en estado sólido (SSL), en las diferentes líneas que se describen posteriormente.

Con este Trabajo Fin de Grado se pretende llevar a cabo el desarrollo de un sistema de iluminación LED inteligente con dos objetivos. El primero es estudiar las posibilidades de esta tecnología y evaluar su eficiencia. El segundo se basa en explorar la aplicabilidad de la solución obtenida en diferentes campos para estudiar su alcance y versatilidad.

El funcionamiento que tiene el sistema inteligente que planteamos es directo y está orientado a ofrecer una iluminación basada en diodos emisores de luz o Light Emitting Diode (LED) blancos que se adapten a las condiciones ambientales para así brindar a los usuarios el máximo confort y eficiencia. Mediante un fotodetector se capta la luz ambiente en la zona que se quiere iluminar y se compara con el valor de luz que tenemos predeterminado y que consideramos idóneo para la actividad y entorno donde el sistema está instalado. En función de esta comparación nuestra iluminación se acomodará a dichas condiciones. El valor predeterminado se puede variar con un regulador, si fuese necesaria otro tipo de condición lumínica. Además de esta funcionalidad se ha estudiado la posibilidad de añadir otras funciones al sistema. Una de ellas es la de detección de personas, que se ha evaluado a nivel sólo teórico y su aportación se refleja en los cálculos de eficiencia energética. La segunda es la transmisión de información haciendo de nuestro sistema un emisor para sistemas de comunicación VLC (Visible Light Communication). Esta funcionalidad sí se ha estudiado a nivel práctico y los resultados son detallados en el documento. Como cierre del trabajo se evaluará su aplicabilidad en diferentes entornos como por ejemplo, en un museo o para la ayuda en movilidad de personas con discapacidades.

1.1. Estado de la técnica

En este apartado se pretende mostrar los avances que se han realizado en la actualidad en el campo de la iluminación basada en dispositivos de estado sólido (SSL), principalmente el LED blanco, con el que se desarrolla este trabajo. Existen múltiples empresas y laboratorios que están desarrollando soluciones en este campo.

Vamos a centrarnos, para hablar de estos avances, en cuatro partes diferenciadas empezando por una breve introducción de qué es el LED blanco y su funcionamiento, la iluminación inteligente, la iluminación eficiente y en último lugar, los avances y usos actuales de la tecnología de VLC.

1.1.1. El diodo LED blanco

El LED o Light-Emitting Diode es un tipo de diodo emisor de luz. Es un dispositivo semiconductor que emite luz cuando su unión PN se polariza en directa y a través de ella circula una corriente eléctrica. Generalmente tiene un encapsulado plástico. Cabe destacar que la potencia óptica emitida por un LED es proporcional a la corriente que lo está atravesando, por lo que si la corriente aumenta también lo hará la potencia óptica emitida por el mismo [1]. El espectro típico de emisión de un LED blanco con recubrimiento de fosforo es el que vemos en la Figura 1. Como podemos observar, su ancho espectral cubre desde 450nm hasta 750nm, prácticamente el rango visible al completo. También se aprecia que su espectro óptico muestra dos picos dominantes, uno azul centrado en 465nm y otro verde alrededor de 580nm.

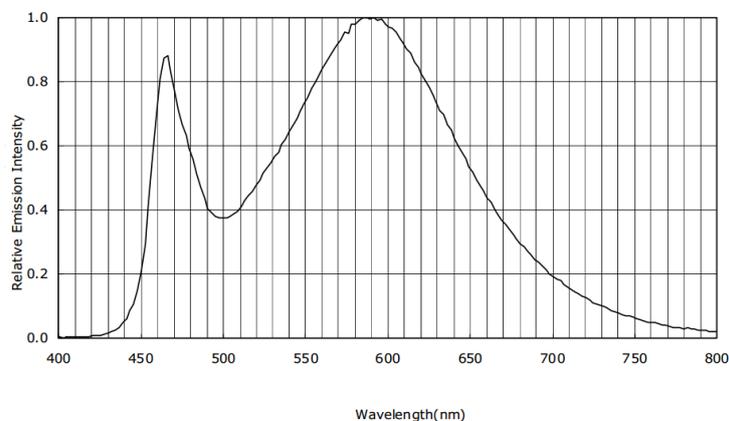


Figura 1 Espectro de emisión de LED blanco RGB

Los primeros desarrollos de diodos LED con los que se trabajó eran fuentes cuasi-monocromáticas emitiendo en diversas longitudes de onda o colores, pero tuvo que pasar un largo periodo de tiempo para conseguir llegar a dispositivos que lograsen emitir una luz blanca que se aproximase a la luz natural, cálida y con un alto brillo que fuese agradable para la vista.

Para desarrollar LEDs blancos, de amplio ancho espectral, se utilizan principalmente dos métodos:

- El primero de ellos combinaba los colores rojo, verde y azul usando tres LEDs integrados. Los resultados obtenidos con este método no son del todo adecuados para iluminación debido a las potencias ópticas que se alcanzan y a que la emisión resultante no es percibida por el ojo humano de manera adecuada, ya que en muchos casos se diferencian los tres colores [2].
- El segundo se basa en usar un recubrimiento de fósforo que transforma la luz de un LED azul en un tono blanquecino gracias a sus características de fluorescencia de amplio espectro [3].

Estos dos métodos tienen sus ventajas y desventajas. La ventaja más importante para el primero es la posibilidad de ajustar el carácter de la luz que emitimos debido al uso de LEDs de diferentes colores, pero esta ventaja trae consigo el inconveniente de un alto coste de producción de componente. En cambio, el segundo método ofrece como

ventaja un alto Índice de Reproducción Cromática, que según el Sistema Internacional es la capacidad de una fuente de luz para reproducir fielmente los colores, pero estos componentes, debido a la conversión producida por el fósforo, ofrecen una eficiencia ligeramente inferior a la de un dispositivo LED sin esta etapa. Para nuestro diseño nos decantaremos por este segundo por su bajo coste y por su mejor calidad lumínica en términos de color.

Para iniciar el funcionamiento de un diodo LED [4] lo primero que se necesita es que el mismo se encuentre polarizado en directa. Una vez lo está, los electrones que circulan por el material semiconductor pueden recombinarse con los huecos que hay en el dispositivo, liberando energía en forma de fotones. Este fenómeno es conocido como electroluminiscencia y el color de la luz emitida está determinado por la energía del gap o salto entre bandas de conducción y valencia del semiconductor usado. Por lo general el área de un LED es pequeña y se usan componentes ópticos para obtener un patrón de radiación que sea útil para labores de iluminación.

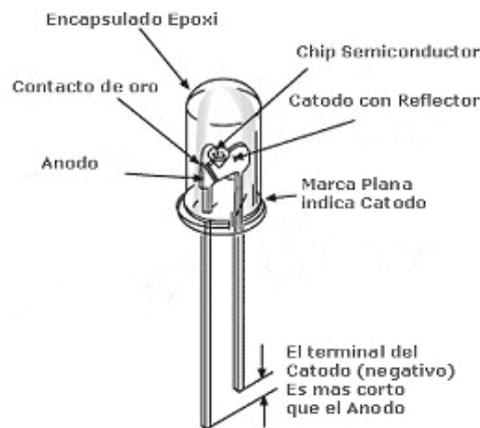


Figura 2 Partes del diodo LED

Estos dispositivos han conseguido, con los últimos avances, implantarse en diversos sistemas de iluminación aportando múltiples ventajas frente a los sistemas tradicionales, como la eficiencia energética y el bajo coste a medio plazo.

1.1.2. Iluminación inteligente

La iluminación inteligente debe su nombre a la posibilidad que tiene de modificarse de forma autónoma adaptándose al entorno y a los cambios del mismo, generando de esta manera un ahorro económico.

Estos sistemas tienen una gran importancia hoy en día debido a la necesidad de aprovechar correctamente los recursos disponibles, dada la situación tanto económica como medioambiental actual. Por este motivo este tipo de avances son esenciales ya que permiten generar un ahorro económico manteniendo, e incluso mejorando, las condiciones lumínicas al dotar a los sistemas de iluminación de capacidades para adaptarse al entorno en el que se encuentran funcionando.

Conocidos los principios de esta iluminación, vamos a repasar el estado de la técnica, en el que destaca la división de iluminación de la multinacional Philips [5] que es considerada como una referencia en el sector de la iluminación inteligente, ya sea tanto

por los productos que comercializa, como por las líneas de investigación futuras en las que trabaja.

Entre los productos más novedosos podemos encontrar la bombilla con control inalámbrico Philips Hue [6] (Figura 3). Se trata de un sistema formado por tres componentes principalmente, la bombilla LED como tal, que tiene en su interior un controlador inalámbrico, un puente de comunicación que funciona con un enlace inalámbrico Zigbee y que para su correcta comunicación estará conectado con un router de internet, además de su conexión a la alimentación. El tercer componente sería una aplicación móvil, o un mando inalámbrico que actuarían de interruptor y controlador.



Figura 3 Bombillas HUE y puente de comunicación

Este sistema, además del control individual de cada bombilla, permite su regulación y cambio de color, pudiendo emitir hasta 16 millones de colores, lo que permite crear ambientes diferenciados en función de las necesidades.

Además este sistema está abierto al desarrollo ya que al usar el protocolo Zigbee programadores externos pueden darle más aplicaciones y buscar mejoras de este sistema, como son casos que han desarrollado el control de este sistema por leap motion, es decir controlado por gestos.

La multinacional Ikea de cara a la introducción en septiembre de 2015 de iluminación LED para todas sus gamas de productos, ha invertido en la empresa Designled [7] de desarrollo de láminas LED ultraligeras y flexibles (Figura 4). El producto como tal es muy interesante dadas las posibilidades que tiene por la ligereza y tamaño. Por este motivo Ikea plantea incluirlo en sus productos para el hogar creando así productos muy interesantes y llamativos.



Figura 4 Lámina LED

Dentro de las diferentes líneas de investigación que hay de la iluminación LED, cabe destacar un desarrollo de Philips, orientado a la decoración, aunque también podría servir para una iluminación de ambiente diferente a la convencional. Se trata de unos paneles luminosos textiles [8] (Figura 5). Estos paneles permiten jugar con el color, el movimiento, la textura y la luz. Además son capaces de amortiguar el sonido y suavizar los ecos. Su instalación es sencilla, ya que solo se necesita colgar y conectar la alimentación y un cable de red para su control.



Figura 5 Panel textil luminoso

En otra línea tenemos la iluminación OLED [9], Organic Light-Emitting Diode, uno de los futuros más próximos en el campo de la iluminación. Este tipo de iluminación está basado en diodos orgánicos fabricados con una capa electroluminiscente formada por una película de componentes orgánicos que reaccionan con una estimulación eléctrica,

consiguiendo así la generación y emisión de luz. Existen múltiples empresas y laboratorios investigando en las posibilidades de esta tecnología.

La tecnología OLED posee numerosas ventajas frente a la tecnología LED [9]:

- En primer lugar como es lógico, ya que su propio nombre lo indica, que tiene parte orgánica.
- Mayor eficiencia que los LEDs.
- Vida útil mayor.
- No son necesarios los reflectores ni las lentes para dirigir la luz.
- Mejor integración, ya que es posible la fabricación de placas totalmente planas de cualquier forma que emitan luz en toda su superficie sin ser bombillas alineadas como en los LEDs, Figura 6.
- Trabajan a baja temperatura lo que permite usarlos en cualquier lugar.
- Se pueden fabricar sobre sustratos flexibles, lo que permite el desarrollo de dispositivos de iluminación o de pantallas flexibles también.



Figura 6 Paneles OLED

Esta tecnología tiene aún que superar uno de sus grandes problemas, que es su alto precio, aunque ya existen estimaciones, por ejemplo las de Philips, que dicen que en unos cinco años es viable que el precio comience a disminuir y sea una realidad su uso cotidiano.[10]

En el sector del automóvil también se están desarrollando mucho los sistemas de iluminación, entre los que destacan los avances principalmente de Audi y BMW que trabajan tanto en sistemas de iluminación LED, como en los OLED y también en sistemas laser.

En cuanto a los sistemas LED ya se conocen muchos desarrollos comerciales, y hay uno especialmente innovador, llamado Audi Matrix LED [11], que usa únicamente LEDs para la iluminación delantera del vehículo y que destaca por ser adaptativa. Por medio del uso de matrices de LEDs de alta intensidad lumínica es posible la emisión de luz continua mientras no viene ningún vehículo de frente, y en el momento que viene y se detecta la luz proveniente de sus faros, en función de la posición que ocupe la matriz de LEDs, esta se adapta a cada momento encendiendo o apagando los LEDs creando así una pequeña área apagada en la zona en la que se encuentra el otro vehículo. Esto puede verse claramente en la Figura 7.



Figura 7 Sistema Audi Matrix LED

La detección se realiza por medio de un sistema de cámaras que analiza las posibles situaciones de deslumbramiento midiendo la distancia a la que se encuentra el vehículo y permite detectar peatones. Además, detecta mediante posicionamiento GPS si estamos en entorno urbano para ver cuándo activar las luces de cruce o iluminar lo mejor posible en los giros.

Se trabaja también en paneles OLED principalmente para los faros traseros. Tanto BMW [12] como Audi [11] hablan sobre estos sistemas y de su posible uso comercial más completo dentro de unos tres años. Mientras tanto muestran sus vistosos prototipos para el sistema de iluminación trasera de sus vehículos. En la Figura 8 y en la Figura 9 se muestran respectivamente ambos casos.



Figura 8 Faro OLED BMW

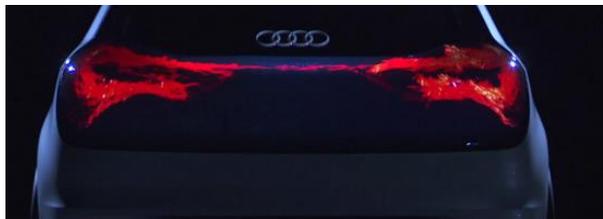


Figura 9 Panel OLED Audi

En el caso de BMW trabajan con pequeños paneles OLED de diferentes formas e incluso curvos. Audi también tiene productos similares, alguno incluso comercial. Sin embargo, su novedad es que ha integrado directamente un panel OLED completo en la parte trasera del vehículo, lo que le permite crear múltiples efectos

Y por último, en la automoción también se trabaja en faros con diodos laser, como es el caso de BMW [13], que logran alumbrar a grandes distancias. Su funcionamiento se basa en varios diodos laser de alto rendimiento proyectados sobre una superficie de fosforo luminiscente a través de un sistema óptico especial, (Figura 10). Emiten una luz blanca de mucha intensidad y muy similar a la luz diurna lo que permite al ojo percibirla como agradable y natural.



Figura 10 Faros laser BMW

1.1.3 Iluminación eficiente

En cuanto a la iluminación eficiente, en la actualidad existen proyectos como es el caso del proyecto europeo Enlight, energy efficient and intelligent lighting systems, financiado por la Comisión Europea, que cuenta con veintisiete socios inscritos entre los que se encuentran importantes empresas del sector de la iluminación, como Philips u Osram, así como universidades, como la Universidad Tecnológica de Eindhoven, en los Países Bajos, además de algún centro de investigación europeo, como el VTT Technical Research Centre de Finlandia. [14]

Este proyecto tiene como objetivo aprovechar todo el potencial de la iluminación de estado sólido (SSL) a través de la innovación en sistemas de iluminación eficientes e inteligentes más allá de lo convencional. Busca reducir en torno a un 40% el consumo energético respecto a los sistemas de LED existentes centrándose para ello en las soluciones inteligentes de SSL. Busca soluciones que sean innovadoras para el mercado de consumo, combinando una electrónica centrada en la eficiencia, un coste reducido y una iluminación SSL con inteligencia, proporcionándole nuevas funciones (Figura 11). Además, este proyecto no descarta la idea de ir inicialmente reconvirtiendo el mercado, sustituyendo las lámparas tradicionales por LEDs. Pero esto sería solo el primer paso ya que la infraestructura actual tiene limitaciones y no es óptima para la futura iluminación en estado sólido. Este consorcio pretende desarrollar no solo los sistemas de iluminación, sino todo lo que los rodea como son sus drivers, su electrónica y sus controladores.

Paradigm shift in illumination



Figura 11 Previsiones de futuro de la iluminación

Todo el sistema contará con una electrónica integrada que permitirá reducir los costes y la posibilidad de tener unos índices de eficiencia mayores.

Todos estos objetivos son los que se pretenden cumplir para crear un estándar en las interfaces de iluminación y que esta sea la iluminación del siglo XXI.

1.1.4 Comunicación VLC

Por último hablamos de los sistemas de comunicación VLC (Visible Light Communications) que, aunque llevan investigándose más de cien años, son una tecnología relativamente nueva. Actualmente estos sistemas se están desarrollando en mayor proporción debido principalmente, a la iluminación LED que permite ser modulada a altas frecuencias, al contrario que los métodos de iluminación tradicionales como las bombillas incandescentes, que no lo permitían.



Figura 12 Conexión Li-Fi

La iluminación LED nos permite transmitir información a altas frecuencias evitando así posibles molestias como el parpadeo de los LEDs a frecuencias bajas.

En la actualidad existen multitud de aplicaciones con esta tecnología, aunque la mayoría se encuentra en pruebas de laboratorio. Una de los que mejores resultados está ofreciendo se basa en utilizar éste tipo de sistemas de comunicación visible para la trasmisión de una conexión de internet, lo que

es conocido en el sector como Li-Fi (Figura 12). Existen numerosos ejemplos de estas pruebas, como por ejemplo el trabajo del grupo Ultra-Parallel Visible Light Communications (UP-VLC) [15], formado por un consorcio de cinco universidades británicas, que pretende revolucionar estas comunicaciones usando un sistema de micro-LEDs que pueden variar la intensidad lumínica del orden de millones de veces por segundo. Se han conseguido velocidades de transmisión de 10,5 Gbps, que se consiguen con 3,5 Gbps en cada color primario (rojo, verde y azul) y que posteriormente multiplexan posteriormente con OFDM (Orthogonal Frequency Divisional Multiplexing). Pretenden seguir desarrollando este sistema y obtener prototipos funcionales antes del 2016, aunque aún existen problemas que solucionar, como la necesidad de visión directa entre el emisor y el receptor de la comunicación.

Actualmente otra de las posibles aplicaciones que se le está dando es el uso de sistemas VLC para guiar a personas dentro de edificios, en los cuales la comunicación GPS es imprecisa y estos sistemas pueden aportar grandes beneficios.

La Fundación i2CAT [16] estudia esta posibilidad por medio de un sistema de posicionamiento que consiste en tener cada lámpara transmitiendo un identificador único que pudiera ser captado por el propio sensor de iluminación que poseen gran parte de los smartphones actuales, y por medio de comunicaciones inalámbricas tradicionales, como puede ser el Wi-Fi o el 3G, posicionar ese indicador en un mapa del establecimiento, siendo capaces de conocer la posición que ocupa con relativa exactitud, con una precisión en torno a un metro (Figura 13).

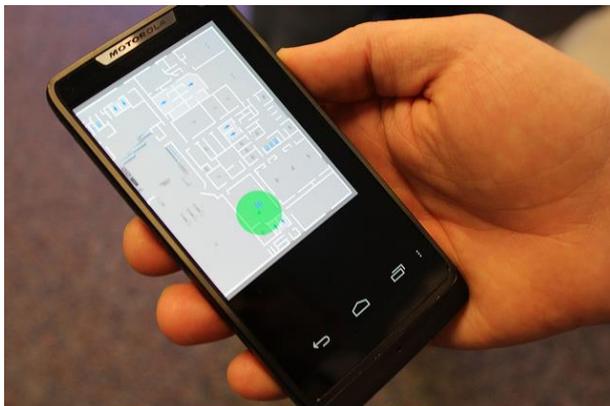


Figura 13 Sistema VLC de posicionamiento en interiores

Esta iniciativa se encuentra en proceso de investigación aunque este grupo tiene previsto que esta tecnología, con múltiples aplicaciones ya que se puede emplear en museos, hospitales, almacenes, etc., pueda ser comercializada en el año 2015

En conclusión existen multitud de proyectos en desarrollo en diferentes ámbitos y todos ellos poseen grandes expectativas de futuro.

1.2. Motivación

Con el presente Trabajo Fin de Grado se pretende explorar algunas de las múltiples posibilidades que existen a día de hoy en el campo de la iluminación basada en dispositivos de estado sólido.

Resulta interesante esta búsqueda y análisis ya que en la actualidad, fijándonos en los sistemas instalados podemos ver que existen multitud de opciones pero gran parte de ellas se basan en sistemas con tecnologías de iluminación anticuadas con mucho margen de mejora en el campo de la eficiencia. Por este motivo se decide que el tipo de tecnología escogida para este diseño sea la iluminación SSL y dentro de esta, la basada en diodos LED, que en la actualidad es la más eficiente del mercado y se está abriendo camino en el mercado y comenzando a implantarse. Por estas razones se considera que es importante estudiar sus posibilidades.

Pero no sólo nos interesa la eficiencia, si no que buscamos sistemas que también sean inteligentes y se adapten de la mejor forma posible a las condiciones cambiantes del entorno.

Como valor añadido y de cara al futuro resulta interesante evaluar la posibilidad de dotar al sistema de comunicación VLC, es decir comunicación por luz visible. Ya que estas comunicaciones serán clave en la próxima generación de comunicaciones inalámbricas o 5G.

Es decir que el resultado es una exploración en las posibilidades de una iluminación eficiente, inteligente y capaz de realizar comunicaciones por VLC, siendo además un sistema lo más sencillo posible que facilite así sus posibilidades de cara a las aplicaciones que pueda tener. Además, se busca un compromiso entre un coste bajo del producto y un consumo mínimo.

Por último se pretenden también evaluar los posibles usos del diseño que pueda tener en diferentes aplicaciones, como por ejemplo en los museos, en un puesto de trabajo, como sistema para mejorar la accesibilidad a discapacitados o como sistema para redes de comunicación.

1.3. Objetivos

Para el desarrollo de este proyecto ha sido importante ir siguiendo los objetivos de la manera más ordenada posible ya que esto ha permitido guiar las tareas que se han realizado y optimizar su realización. Estos objetivos vienen detallados a continuación:

- **Eficiencia energética**
Es el principal objetivo que persigue este trabajo. Para lograrlo, dado que, como hemos visto, existen en el mercado multitud de desarrollos, se ha buscado simplificar al máximo el diseño logrando a la vez la máxima eficiencia energética posible.
- **Bajo coste**
Este segundo objetivo está estrechamente relacionado con el primero, ya que si tenemos un sistema con una alta eficiencia energética es muy interesante su precio de venta no sea excesivo. Por ello, se ha trabajado con componentes económicos y diseños que fueran fáciles de replicar a gran escala para así tener un coste de producción menor y ser más atractivo para la venta.
- **Versatilidad**
En tercer lugar se perseguía tener la mayor versatilidad posible para adaptarse a distintos entornos diferenciados y así ser útil en más aplicaciones. Para ello es muy importante que el tamaño del circuito sea lo menor posible, ya que esto permitiría que pueda integrarse en más lugares aumentando así sus posibilidades.
- **Posibilidades de futuro**
En último lugar cabe destacar la importancia que ha tenido dotar al sistema de las tecnologías más novedosas para garantizar que será un sistema moderno durante el mayor periodo posible, así como la inclusión de las comunicaciones por luz visible que permiten dejar a nuestro sistema preparado para las futuras comunicaciones

Estos objetivos han sido los principales de cara al desarrollo del sistema y siempre han estado presentes en todas las fases del desarrollo. Ha sido importante no alejarse ya que sin alguno de ellos el proyecto perdería forma y capacidades.

Para lograr cada uno de estos objetivos se han tomado las siguientes decisiones a nivel tecnológico:

- Implementación de tecnología LED para la iluminación.
- Uso de componentes comerciales de coste bajo.
- Desarrollo de un sistema de control de la iluminación en función de la cantidad de luz ambiente.

La metodología de trabajo que ha permitido acercarse a los objetivos planteados, y que parte de las decisiones mencionadas antes, se divide en unas tareas concretas:

- Tarea 1: Diseño del sistema de control de la iluminación.
- Tarea 2: Estudio experimental del funcionamiento y capacidades.
- Tarea 3: Estudio de aplicabilidad.

2. Diseño del sistema iluminación eficiente

Nuestro sistema de iluminación inteligente cuenta con varias partes que le dan al diseño una mayor funcionalidad.

- Sistema de iluminación adaptativo, considerado como el corazón de este trabajo.
- Sistema de transmisión VLC (Visible Light Communication)
- Sistema de detección de presencia.

Cada sistema se va a ir explicando desde el diseño principal hasta llegar a la elección de los componentes, es decir de lo más grande a lo más pequeño.

2.1. Sistema de iluminación adaptativo

El sistema de adecuación de la luz al ambiente se puede decir que tiene dos partes, el subsistema de detección de luz ambiente, que es la luz natural, y el subsistema de iluminación, que en función de esa cantidad de luz va a adecuar la luz emitida.

2.1.1. Descripción del diseño completo

El funcionamiento que se busca es que la iluminación emitida varíe en función de la cantidad de luz que haya en el ambiente, es decir que el conjunto de LEDs aumente la intensidad lumínica cuando la cantidad de luz ambiental disminuya o que disminuya la intensidad lumínica si la luz ambiente aumenta.

Este funcionamiento a primera vista es fácil de comprender, ya que el sistema opera como un regulador de luz, pero sus cambios serían autónomos. Como es de esperar, se pretende dejar la posibilidad de manipulación de la cantidad de luz que emite el sistema al usuario, para que si las condiciones lo requieren pueda modificar lo que estará definido como iluminación de confort.

Para lograr este funcionamiento se plantea un circuito como el de la Figura 14, que se basa en un circuito con varias partes que se detallarán a continuación.

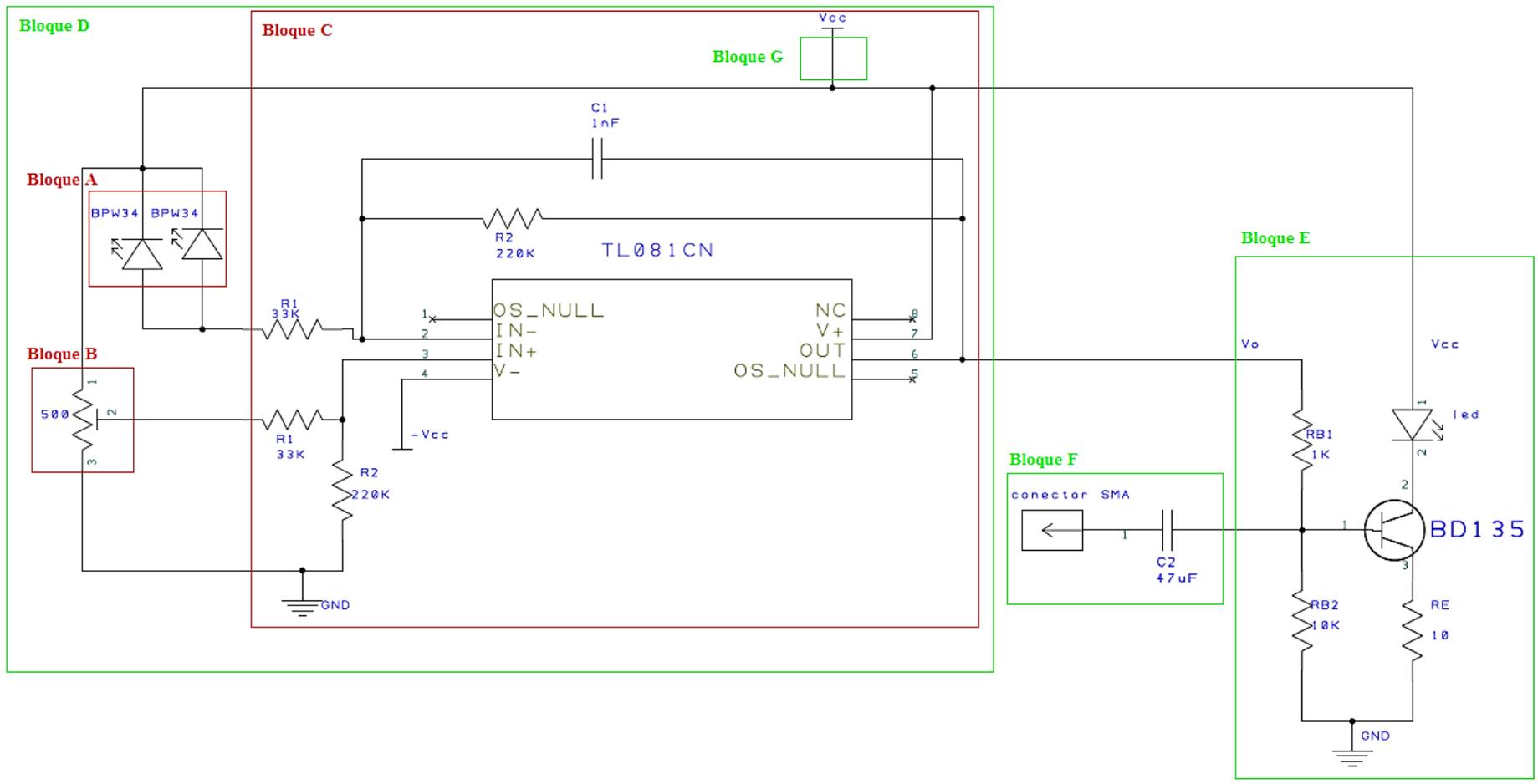


Figura 14 Esquemático completo del diseño

El bloque A está formado por los fotodiodos y sirve para la detección de la cantidad de luz del ambiente.

El bloque B es el regulador que estará accesible al usuario para modificar las condiciones lumínicas en caso de ser necesario.

El bloque C es un circuito que actúa como amplificador en modo diferenciador, permitiendo amplificar la diferencia entre los valores proporcionados por los fotodiodos del bloque A y el valor referencia establecido por el bloque B. En este bloque además del propio amplificador operacional, encontramos la configuración de resistencias que se usan para que funcione en modo diferenciador.

El bloque D está formado por los tres bloques anteriores y constituye el subsistema de detección de luz ambiente y su comparación.

El bloque E lo forma en su completo el subsistema de iluminación en el que se debe destacar que la entrada de la red de polarización del transistor es la salida del subsistema de detección de luz.

El bloque F es la conexión que posee el circuito para la transmisión de información por luz visible, esto se hace con un conector SMA que realiza el acoplo en alterna y con una pista adaptada para el trabajo a altas frecuencias.

El bloque G, aunque no está formado por ningún componente, ya que no se pudo probar, es el lugar elegido para colocar el detector de presencia que cortaría la alimentación a todo el diseño mientras no detecte a ninguna persona, aumentando así la eficiencia energética del dispositivo.

El sistema descrito está diseñado para tener un funcionamiento lo más autónomo posible y salvo modificación del usuario, todos los cambios que se produzcan serán debido a las variaciones de la iluminación ambiental. Cuando se produzcan estos cambios, los fotodiodos registrarán un cambio en la cantidad de luz recibida lo que modificará el valor de corriente fotogenerada. El cambio en la corriente fotogenerada se reproduce en un cambio de la tensión en el terminal negativo del amplificador, mientras que en principio el valor que llega al terminal positivo asumimos que es constante, ya que es el que depende del usuario. Este cambio en la tensión se ve reflejado en la salida del amplificador que modifica su valor aumentando o disminuyendo en función de las necesidades lumínicas del momento. Esta nueva tensión es la que polarizará el transistor, previamente habiendo pasado por el divisor de tensión que tiene este mismo. Con el transistor polarizado comenzaría el funcionamiento, que actuaría de un modo similar a un regulador de luz, ya que va a dejar que circule por el LED la intensidad necesaria para que se emita la cantidad de luz necesaria en cada momento.

Una vez explicado el circuito completo pasaríamos a detallarlo parte por parte separándolo en los sus subsistemas principales.

2.1.2. Descripción del diseño del subsistema de detección de luz

La primera parte del sistema de iluminación es el subsistema de detección de luz ambiente. El diseño que se ha planteado para esta parte no es complejo ya que, como hemos mencionado, uno de los principales intereses perseguido era que fuera económico y simple. La elección de este diseño se tomó de acuerdo a los resultados previos obtenidos

en la prueba de principio desarrollada en la asignatura Optoelectrónica, donde se pudo comprobar su idoneidad y su correcto funcionamiento.

Como se ha mencionado en apartados anteriores este subsistema toma dos valores importantes y opera con ellos, para darnos así un valor de salida que llegará al subsistema de iluminación:

- El primero es el valor obtenido de los fotodiodos que se traduce en una corriente fotogenerada que varía en función de la cantidad de luz existente en el ambiente a controlar.
- El segundo es el valor obtenido por el regulador, el potenciómetro, que será el valor que establecerá la referencia de iluminación que se desea tener en dicha zona. Generalmente este valor estará en un punto en el que se dé la luz necesaria para la aplicación a desarrollar, pero si existe algún cambio y se necesita más o menos, primará el confort para el usuario pudiendo ser modificada.
- El tercero, es el resultado de operar con los dos anteriores en el amplificador operacional, que actúa en modo diferenciador, es el valor que sale de este subsistema y del cual dependerá si la iluminación LED se activa o no y que intensidad tendrá.

Esta parte funciona del siguiente modo, suponiendo fijo el valor de referencia la salida del amplificador obtenida será mayor o menor en función de los cambios en la luminosidad del ambiente.

Para la elección de los componentes de este diseño se ha atendido primero a cumplir las exigencias establecidas por los objetivos y después se ha realizado una pequeña prueba de principio de los principales componentes de este subsistema para comprobar que eran adecuados, como son el fotodiodo y el amplificador, ya que desde el inicio se buscan unas especificaciones que permitan trabajar con LEDs blancos de alta luminosidad.

Para la elección del fotodiodo, cabe destacar inicialmente qué características se buscaban en este componente:

- Amplio ángulo de detección.
- Visión del espectro visible.
- Buena responsividad.
- Precio económico.

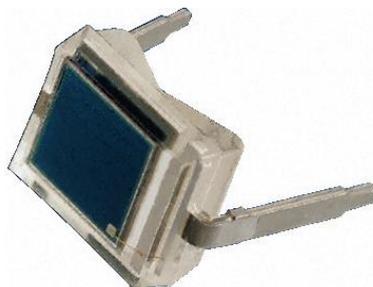


Figura 15 Fotodiodo BPW34

Con todas estas características, y dado que la última tiene más peso debido a los objetivos del proyecto, el componente elegido para este fin sería un fotodiodo BPW34, Figura 15.

Este dispositivo se caracteriza principalmente por su bajo coste, en torno a 0.86€ la unidad (precio de venta de RS [17]), por su amplio ángulo de detección, $\pm 65^\circ$ que es el ángulo de sensibilidad media, y por su gran área sensible de detección, del orden de los 7.5mm^2 con una responsividad de 0.66 A/W .

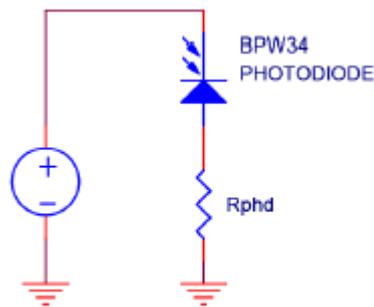


Figura 16 Circuito para prueba de principio del fotodiodo

Con ese modelo de fotodiodo se realiza una prueba de principio para comprobar que los datos teóricos del componente se adaptan de forma correcta a los objetivos y características que se necesitan para el funcionamiento del sistema y así poder caracterizarlo.

Para esta prueba se ha usado el sencillo circuito mostrado en la Figura 16 ya que únicamente se trata de comprobar las características del componente y conocer mejor su respuesta. El circuito está formado por el fotodiodo, una resistencia en serie y todo alimentado con corriente continua. Esta configuración permite conocer en cada momento tanto la tensión como la corriente, que es del orden los $50\ \mu\text{A}$ en un ambiente con unas condiciones lumínicas buenas.

Tras esta prueba se pudo comprobar que cumplía con las exigencias y que se adaptaba al funcionamiento que se quería conseguir.

Para elegir el amplificador operacional no había como en el caso anterior ningún parámetro reseñable que se necesitara, ya que lo que se buscaba era un amplificador que pudiera trabajar con una alimentación de entre 5V y -5V y que no se saturase antes de tiempo. Debido al gran número de posibilidades existentes se eligió trabajar con el TL081, amplificador con el que previamente se había trabajado en otras prácticas y del que se conocía su funcionamiento y respuesta, por lo que su uso sería más sencillo.

Una vez elegidos estos dos componentes, que son los más importantes de esta parte del diseño, se montó el circuito que formaría la parte de detección de la luz ambiente.

En el amplificador operacional se usará una configuración diferencial, como ya se mencionó anteriormente, que a pesar de ser una combinación de las configuraciones inversora y no inversora posee características únicas, ya que posibilita tener aplicada una señal por cada terminal y se aprovecha la amplificación diferencial natural del

componente. Esta función lo que hace es dar en la salida amplificación de la diferencia entre V_2 y V_1 (Figura 17).

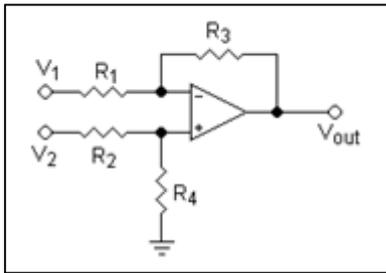


Figura 17 Configuración diferencial del amplificador

Para tener una salida que se adapte a nuestras necesidades se recurre a una configuración de resistencias que, además de simplificar los cálculos para conocer la salida, nos da mayor estabilidad, usando como referencia la configuración y las resistencias ya igualadas como vemos en la Figura 18.

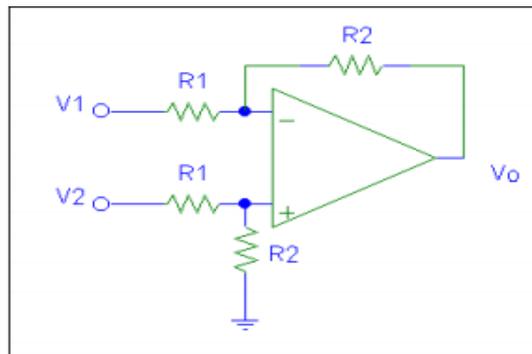


Figura 18 Configuración diferencial del amplificador de nuestro diseño

Se realizan cálculos del valor de la tensión de salida aplicando superposición. El circuito se divide en dos para así obtener la fórmula de V_o . En primer lugar se pone $V_2=0$ y $V_1 \neq 0$ obteniendo una configuración inversora cuya ecuación de tensión de salida es:

$$V_{o(V_2=0)} = -\frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (1)$$

En el caso de poner $V_1=0$, $V_2 \neq 0$ se obtiene una configuración no inversora y se debe conocer el valor de tensión en el terminal positivo del amplificador y una vez conocido sustituirlo en la de la configuración inversora:

$$V_+ = I_1 R_2 = \frac{V_2}{R_1 + R_2} R_2 \quad (2)$$

$$V_{o(V_1=0)} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_+ = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_2 = \frac{R_2}{R_1} V_2$$

Una vez calculadas las dos se superponen obteniendo así la salida del amplificador:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_1 + \frac{R_2}{R_1} V_2 = (V_2 - V_1) \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

La elección de los valores de las resistencias se hizo en base a la ganancia que fuera suficiente para el correcto funcionamiento del siguiente sistema:

$$G = \frac{V_o}{V_2 - V_1} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{220k\Omega}{33k\Omega} = 6.67 \quad (4)$$

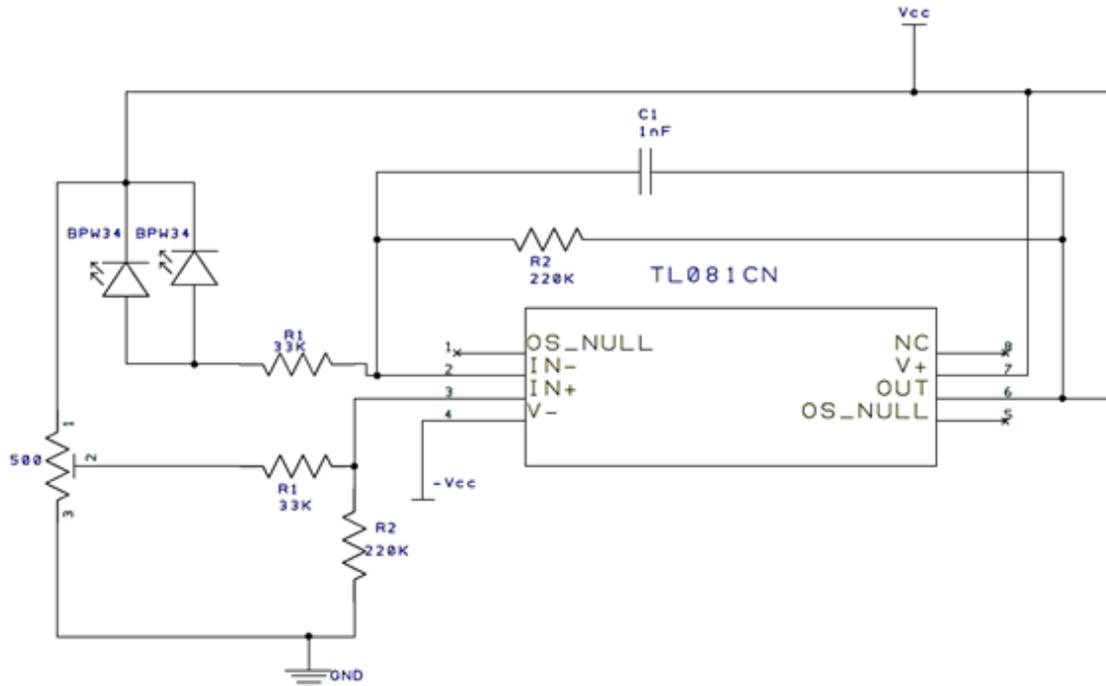


Figura 19 Esquemático del subsistema de detección de luz

Con esta ganancia garantizamos el correcto funcionamiento de la siguiente etapa, ya que al estar trabajando con valores muy pequeños de corriente fotogenerada, se necesitaba una amplificación suficiente para garantizar que la salida de esta etapa, V_o , que es a su vez la entrada de la siguiente (bloque E, subsistema de iluminación) tenga un valor suficiente como para que garantizar que la tensión que llega a la base del transistor que lo forma sea suficiente para polarizarlo en activa directa y que trabaje con las condiciones buscadas.

Como se observa en la Figura 19 se han usado dos fotodiodos en lugar de uno, ya que se comprobó que al colocarlos en paralelo sus corrientes fotogeneradas se sumaban y así se tendría un rango de funcionamiento mejor ante los cambios de la luz.

Conectado al terminal positivo del amplificador, solo se tiene un potenciómetro de 500Ω multivuelta. Inicialmente se probó con uno de $1k\Omega$ pero no se necesitaba tan grande ya que se desaprovechaba debido a que nunca se llegaba a los valores más altos, esa fue la razón de escoger el de 500Ω . Ésta será la señal que llegará al terminal positivo del amplificador y que podrá ser controlada por el usuario en función de las necesidades de iluminación de cada momento.

Una vez diseñada teóricamente esta parte del circuito, se comprobó el diseño en una placa protoboard, ya que generalmente al implementar un diseño en la realidad siempre hay pequeñas desviaciones que ajustar. Una vez comprobado su correcto funcionamiento se pasó al diseño del otro subsistema.

2.1.3. Descripción del diseño del subsistema de iluminación

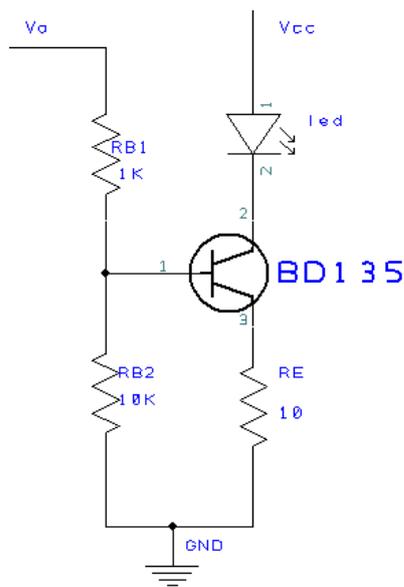


Figura 20 Esquemático del subsistema de iluminación

El diseño de este subsistema es el mostrado en la Figura 20. La configuración elegida está basada en el uso de un transistor para polarizar el LED con la tensión V_o , que depende de la iluminación ambiente. Para polarizar el LED usamos un circuito formado por un transistor y su circuito de polarización y en el lugar donde iría la resistencia de colector es donde se coloca el LED, que estará alimentado por V_{cc} . Mientras el transistor no esté en zona activa el LED se mantendrá apagado. Para pasar a la zona activa del transistor tenemos el circuito de polarización con las resistencias de base, que actúan como divisor de tensión para que lo que llega a la base del transistor sea suficiente para que se produzca el paso a activa cuando las condiciones del entorno requieran el funcionamiento del LED.

El transistor de este diseño actúa como si fuera un interruptor del LED, y además, como la corriente de base no es constante, también funcionara como regulador, ya que según varía la luz ambiente cambia el valor de la corriente que circula por el diodo LED aumentando o disminuyendo la intensidad lumínica, buscando mantener un valor de iluminación constante en el ambiente.

Inicialmente se planteó este diseño con un equilibrio en las resistencias de base, es decir poniéndolas del mismo valor. Pero cuando se probó el circuito se comprobó que esos valores provocaban que el transistor funcionase en una zona que no era activa y que aunque el sistema funcionase, tenía cambios que no tenían explicación y esto se debía a la zona en la que trabajaba el transistor. Para conseguir el correcto funcionamiento se desequilibraron los valores de estas resistencias logrando que la división de tensión sea menor y que lo que llegue a la base del transistor sea lo suficiente para polarizarse y trabajar en la zona activa.

Cabe destacar que la resistencia de emisor es de potencia superior al resto, de 1W para que en caso de ser necesario, con LEDs de más potencia, éste sea capaz de disipar toda esa potencia sin problemas.

En el funcionamiento adecuado de este sistema cabe destacar la importancia de que el circuito funcione como un sistema realimentado negativamente, ya que gracias a ello la iluminación se adecúa a las condiciones del entorno. Analizando la expresión de la salida V_o del bloque anterior, entrada de éste, en términos optoelectrónicos se observa lo siguiente:

$$\begin{aligned}
V_O &= -i_{PH}(R_1 + R_2) + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_2 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = \\
&= -2P_{inc} \Re(R_1 + R_2) + V_2 \cdot \frac{R_2}{R_1} = V_1 \frac{R_2}{R_1} \cdot V_2 - 2\Re(R_1 + R_2) \cdot P_{inc} \\
\text{Siendo } \rightarrow P_{inc} &= P_{emitida} \cdot L_{oss} = i_{LED} \Re\left(\frac{W}{A}\right) \cdot L_{oss} \quad (5) \\
i_{LED} &= (V_{BB} - V_{BE}) \frac{1}{R_E} = \left(\frac{R_{B_2}}{R_{B_2} + R_{B_1}} \cdot V_O - V_{BE} \right) \cdot \frac{1}{R_E} \\
\text{Si...} i_{LED} \uparrow &\Rightarrow P_{emitida} \uparrow \Rightarrow P_{inc} \uparrow \Rightarrow i_{PH} \uparrow \Rightarrow V_O \downarrow \Rightarrow V_{BB} \downarrow \Rightarrow i_{LED} \downarrow
\end{aligned}$$

Figura 21 Funcionamiento realimentación negativa

Siendo i_{PH} la corriente fotogenerada por los fotodiodos que monitorizan la luz ambiente, \Re su responsividad, P_{inc} la potencia óptica incidente sobre ellos, L_{oss} las pérdidas que relacionan la luz emitida por el LED de iluminación que se está controlando y la fracción de esa luz que llega a los fotodiodos y V_{BB} la tensión en la base del transistor que controla el punto de trabajo del LED.

Como se puede ver en Figura 21 la realimentación negativa consigue que exista el equilibrio buscado en el sistema, ya que es la parte del sistema que cuando se produce un cambio rápidamente lo corrige y se adapta.

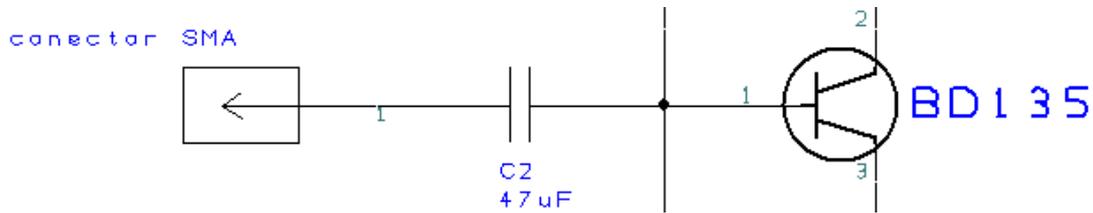


Figura 22 Esquemático del sistema de comunicación VLC

Conectada a la base del transistor, se aprecia en la Figura 22, se encuentra el subsistema VLC para la transmisión de información, pero ésta se explicará en los próximos apartados. Está conectado un condensador para eliminar la continua y el conector SMA para la entrada de la información a altas frecuencias.

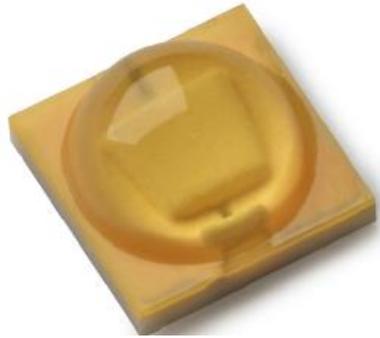


Figura 23 Diodo LED LUXEON Q



Figura 24 Diodo LED de encapsulado epoxi

Una vez planteado el diseño que se quiere emplear hay que realizar una correcta selección de los componentes a utilizar. En este caso es muy importante que el LED elegido emita suficiente flujo luminoso para unas condiciones lumínicas adecuadas y que el transistor sea de potencia, para así poder disipar potencia de forma correcta.

En el caso del LED, inicialmente se buscaba uno de montaje superficial que pudiera dar en torno a unos 300 lúmenes [18], que es el valor de referencia para unas condiciones de trabajo óptimas. En la búsqueda de este componente, se seleccionó el LUXEON Q (Figura 23) que se adaptaba a las condiciones lumínicas buscadas, llega a los 300 lúmenes como máximo aunque su valor normal es algo inferior, en torno a los 240 lúmenes para así alargar su vida útil. Se trata de una fuente que incluye un array o matriz de diodos LED blancos. Su precio también era adecuado, ya que a pesar de ser el componente más caro de todo el diseño, en torno a 1,7€, dentro de las posibilidades encajaba bien en el trabajo. Por diversos motivos no se pudo adquirir un LED de estas características y finalmente se trabajó con un LED blanco de encapsulado epoxi, (Figura 24) de los más tradicionales, y del cual no se disponía de hoja de características, por lo que fue necesaria una caracterización del mismo con una pequeña prueba detallada a continuación.

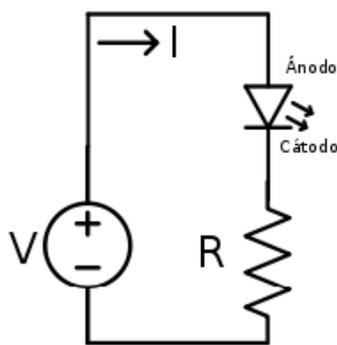


Figura 25 Circuito para prueba de principio del LED

Para poder comprobar que este LED era adecuado para nuestro diseño, se realizó, por medio de un circuito muy sencillo una prueba para ver en que valores de corriente comenzaba la ventana de funcionamiento adecuado y así también ver la cantidad de luz que podía emitir (Figura 25) y la tensión entre cátodo y ánodo. Por medio del circuito de la figura se hicieron estas pequeñas comprobaciones que resultaron muy útiles para los siguientes pasos. Se observó que para $I_{Cmax} = 70mA$ emitía de forma adecuada y exhibía una tensión $V_{LED} = 3.4V$. Comparando estas características con componentes similares del mercado se pudo determinar que la emisión típica de este dispositivo era de 23 lm para su corriente de operación [19], lo que implica que ofrece una responsividad

$$\mathfrak{R} = 23lm/70mA = 329 \text{ lm/A}$$

Para el caso del transistor se buscó principalmente uno que pudiera soportar altas corrientes sin deteriorarse y sin alcanzar altas temperaturas, con lo que sería necesario un

transistor de potencia que disipase una buena cantidad de potencia para asegurar el buen funcionamiento.

El transistor elegido es el BD135 un transistor bipolar de tipo NPN que soporta una corriente de colector de hasta 1,5A, lo que permite asegurarnos del correcto funcionamiento con LEDs de mayor potencia luminosa, ya que disipa como máximo en torno a los 12,5W. El principal defecto del transistor era su lentitud para la transmisión de información por VLC que nos actuara como un limitador del ancho de banda, pero esto se detallará más adelante.

2.1.4. Layout de la PCB

Cuando el funcionamiento del diseño fue el esperado se pasó el diseño a una placa PCB y se realizó el diseño completo con el programa DesignSpark PCB.

El DesignSpark PCB es un programa relativamente nuevo, ya que su distribución comenzó en el año 2010, y está desarrollado en gran parte por RS-components, un importante distribuidor de componentes electrónicos, cosa que facilita mucho el encontrar componentes reales con el footprint hecho para implementar directamente en la PCB. Además de la gran biblioteca de componentes existe la posibilidad de descargarlos de la página web oficial del programa ya que es un programa abierto y gratuito en el que todo el mundo puede compartir, si así lo desea, sus diseños o sus componentes, que no estén en la biblioteca. Posee además una herramienta propia para diseñar el footprint de los componentes para PCB que es muy intuitiva y sencilla y con muchos ejemplos y plantillas para que sea más fácil seguir todo el proceso.

La curva de aprendizaje de este programa es muy buena ya que en poco tiempo es posible adaptarse al funcionamiento del mismo y además tiene similitudes con otros programas referentes en este campo como el OrCAD, que es mucho más complejo de manejar, lo que permite el paso de uno a otro sin excesivos problemas.

En la PCB que se ha diseñado se ha buscado miniaturizarla lo más posible, ya que el sistema busca poder implementarse en cualquier lugar, y un tamaño lo más reducido posible siempre es bueno para lograr este objetivo. Se han usado componentes de orificio pasante, que aportaban mayor facilidad de montaje y manipulación.

La PCB se ha diseñado solo con una capa con recubrimiento de cobre, que en este caso ha sido la inferior, en la cual además de las pistas que conectaban los componentes del circuito se ha puesto una couper pour que nos sirve como referencia a tierra de nuestro sistema y así mejorar la respuesta en frecuencia de cara a la transmisión VLC.

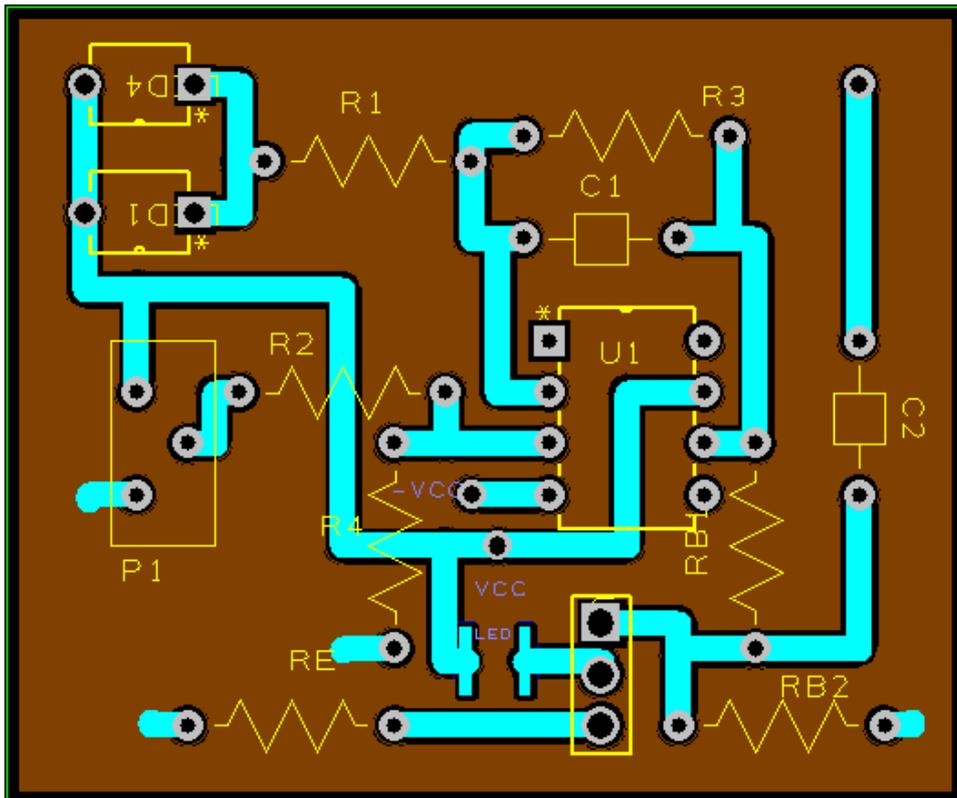


Figura 26 Layout de la PCB

Como se ve en la Figura 26, cabe destacar que la conexión para el diodo LED se había diseñado para el LED de montaje superficial que inicialmente se había elegido, y como finalmente se supo que no podría adquirirse una vez la placa ya había sido fabricada, (Figura 27), se mantuvo el diseño y se adaptó de la mejor forma posible para poder trabajar con ella.

2.1.5. PCB montaje y puesta en funcionamiento

La PCB tras la fabricación tenía el aspecto que puede verse en la Figura 27 y para comenzar a trabajar con ella, en primer lugar se comenzó realizando los taladros en los pads en los que irían todos los componentes. Para ello, con ayuda de un taladro fijo y de brocas de diámetro de 0.5 mm, se realizaron con precisión todos los orificios pasantes.

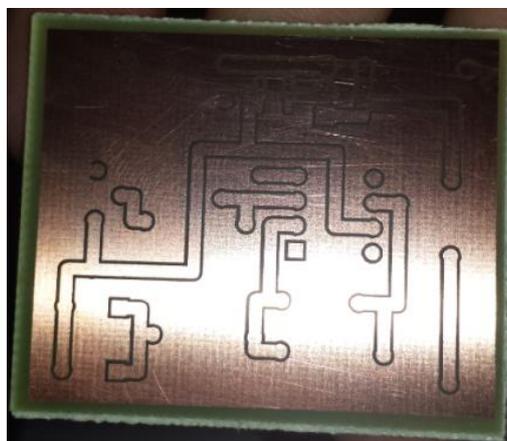


Figura 27 PCB fabricada

Para el caso del LED para aprovechar el diseño se decidió realizar dos taladros y así poder colocar el LED que se usó en el lugar que le correspondía.

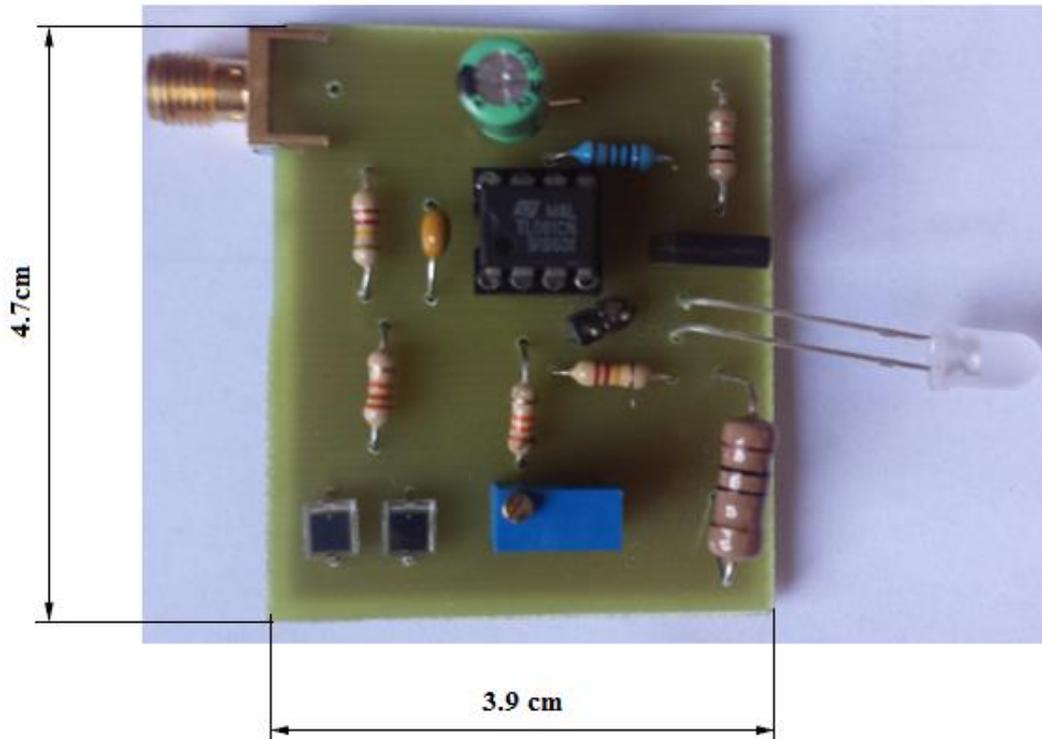


Figura 28 Placa montada y funcional

Una vez hechos todos los orificios, se procedió a soldar todos los componentes con estaño a la PCB, para conseguir el resultado que vemos en la Figura 28. Durante esta tarea se presentaron diversos problemas debido a que era la primera vez que se realizaba esta tarea. En primer lugar debido a que la placa no se había limpiado correctamente se generaron muchos problemas para que el estaño se adhiriese bien a las pistas de cobre, problema que provocó que se alargase mucho esta labor y que muchas de las soldaduras, aparentemente bien hechas no lo estuvieran y generando muchos problemas de funcionamiento en las primeras pruebas.

Durante las primeras comprobaciones previas a alimentar la PCB se comprobó cómo había muchos componentes que hacían contacto con la capa de tierra y otros que no hacían contacto con la pista. Poco a poco se fueron solucionando estos problemas y se terminó por alimentar y se observó que el funcionamiento no era constante, si no que funcionaba unas veces sí y otras no.

Tras múltiples revisiones y pruebas se fueron solucionando los pequeños defectos que había y finalmente se consiguió un funcionamiento adecuado para el control del LED en función de la luz ambiente, que era el esperado tras las pruebas en las placas protoboard.

En las pruebas de este circuito se comprobó que es muy importante que la alimentación del circuito sea muy estable. En el caso de que haya fluctuaciones en la alimentación se pueden producir picos de corriente que quemar algún componente, con lo que es adecuado tener siempre una fuente de alimentación en buen estado.

En el caso de la instalación normal del sistema en un puesto de trabajo conviene comprobar si el sistema eléctrico con el que se va a alimentar es adecuado para evitar problemas mayores. Para evitar este problema y obtener así más seguridad se podría añadir al diseño un fusible o un sistema de regulación de la alimentación, ambos colocados en la entrada.

2.2 Subsistema VLC

El sistema VLC (Visible Light Communication) se decide implementar como valor añadido al circuito para así darle una posibilidad más al mismo.

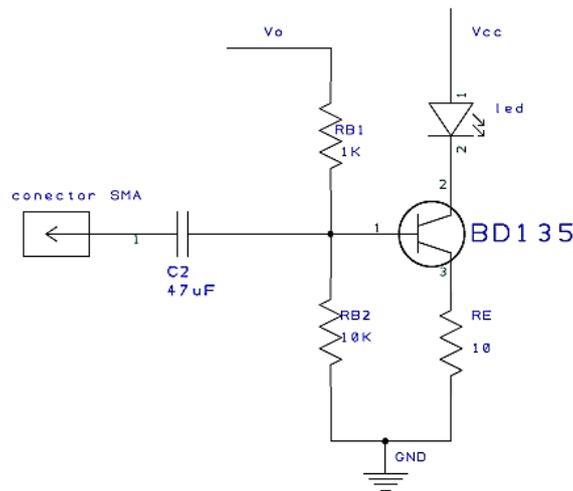


Figura 29 Esquemático circuito de comunicación VLC

Este sistema se basa en la transmisión de datos por medio de la luz emitida por los LEDs, y se acopló a nuestro sistema por medio de un condensador que elimine la continua y un conector SMA que permite la entrada de datos. Todo ello en una pista de la PCB adaptada para tener una impedancia de 50Ω que permita garantizar su correcta respuesta a altas frecuencias. Esta conexión se observa en la Figura 29.

Como puede verse este subsistema se conecta en medio de las resistencias de base del transistor. El conector SMA elegido no tiene ángulo para evitar tener problemas de comunicación, y está colocado en paralelo a la PCB, buscando tener unas soldaduras lo más precisas posibles para obtener mejores resultados en las pruebas experimentales.

Además de las pruebas experimentales se hizo previamente una aproximación teórica de la frecuencia de corte inferior y superior que se esperaba que tuviera nuestro sistema de comunicación. Cabe destacar que son dos frecuencias las que se van a calcular ya que al colocar C2 creamos un filtro que nos elimina la continua para permitir el acoplo en alterna de la señal moduladora.

Para el cálculo de la frecuencia de corte inferior que, como se ha mencionado viene marcada por el condensador C2, se necesita obtener la resistencia que ve ese condensador a frecuencias bajas. Previamente se pone todo el esquema de esta parte del circuito a frecuencias medias, lo que hace que el transistor se sustituya por su modelo equivalente a frecuencias medias, que es un amplificador.

Para obtener la frecuencia de corte inferior usamos la siguiente expresión [20]:

$$f_L = \frac{1}{2\pi \cdot C_2 \cdot (R_{B1} // R_{B2} // r_\pi)} = 44,36Hz \quad (6)$$

Siendo $\rightarrow r_\pi = \frac{\beta \cdot V_T}{I_C}$ ($V_T = cte = 25mV$)

El valor de r_π depende de las características del transistor y de la I_C que circula por él, que como es un valor que cambia en función de las necesidades, se ha tomado el valor intermedio, es decir $I_C=45mA$.

El cálculo de la frecuencia de corte superior se basa en la aplicación del método de las constantes de tiempo a la etapa en emisor común que conforma nuestro circuito de modulación del diodo LED. Partiendo del modelo en π del transistor bipolar habría que calcular la resistencia que ven los condensadores parásitos del transistor C_π y C_μ , aunque el segundo es despreciado en este caso. Esta resistencia que se vería sería la siguiente:

$$R_{C\pi} = \frac{(R_B + R_E)}{1 + \frac{R_B + (R_E \cdot (1 + \beta))}{r_\pi}}$$

$$R_B = R_{B1} // R_{B2} \quad (7)$$

Siendo $\rightarrow g_m = \frac{I_C}{V_T}$

Siendo $\rightarrow r_\pi = \frac{V_T \beta}{I_C}$

Con los valores de las resistencias que ven esos condensadores ya solo hay que sustituirlos en la fórmula (8) para obtener la frecuencia de corte superior:

$$f_T = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{g_m}{C_\pi + C_\mu} \rightarrow C_\pi = \frac{g_m}{f_T \cdot 2\pi} = 1.91nF$$

$C_\mu \approx 0$

Siendo $\rightarrow f_T = 150MHz$ (8)

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{C_\pi \cdot R_{C\pi}} + \frac{1}{C_\mu \cdot R_{C\mu}} \right) = 2.72MHz$$

Tanto los datos de la β como la f_T se obtuvieron de las hojas de características del transistor empleado.

Los valores obtenidos, principalmente el de la frecuencia de corte superior es más que aceptable teniendo en cuenta que los componentes usados son de precio bajo y que serían necesarios pocos cambios para transformarlo en un sistema con mejores características, aunque estos datos son teóricos y faltaría corroborarlos con la prueba experimental.

2.2.1. Prueba de principio

En esta prueba de principio lo más importante era conocer los parámetros característicos de nuestro circuito, que sería el emisor de información en un sistema VLC completo. Destacamos por tanto que no está dentro del alcance de nuestro estudio el sistema receptor. Por ello, se emplearon como receptores dos sistemas sencillos con la única intención de cerrar el lazo de comunicación para evaluar nuestro emisor. El primer circuito detector utiliza un fotodiodo BPW34 con peor respuesta en frecuencia y el otro, utiliza un APD con mejor ancho de banda. Esto se explicará más adelante.

Para poder probar este sistema de comunicación, se diseñó un circuito de recepción para comprobar los parámetros comunes de la comunicación y el funcionamiento adecuado, el circuito usado es muy sencillo, similar al nuestro de recepción.

Los objetivos a verificar en esta prueba eran realizar un test de enlace entre nuestro emisor y el receptor usado y caracterizar el ancho de banda de nuestro emisor. Con esto se pretende comprobar que la comunicación es correcta, ya que no nos interesa conocer datos sobre el receptor.

Durante esta prueba de principio uno de los primeros parámetros que se comprobó es, debido a los componentes usados que son de bajo coste, que la distancia de funcionamiento para esta comunicación entre el emisor y el receptor no podía ser muy grande ya que se producían pérdidas de la señal que transmitimos. Este error como es lógico, se subsanaría con el uso de componentes ópticos de mayor calidad, ya que los que más limitan este parámetro son, el diodo LED emisor, que podría sustituirse por varios LEDs para mejorar el resultado, el transistor del diseño que es demasiado lento y el fotodiodo receptor.

El otro defecto que se encontró a este sistema eran las interferencias que se generaban con otros tipos de iluminación que no son LED, ya que por ejemplo la luz fluorescente nos introduce un ruido en nuestra señal recibida. En principio este sistema está diseñado para funcionar en entornos en los cuales la emisión de luz es únicamente con LEDs, en caso contrario, es decir de que se instale en una zona de iluminación mixta, existe una posibilidad de eliminar esta interferencia por medio de un filtro paso alto que nos eliminase toda esa interferencia. Sin embargo esto también hace que el ancho de banda del sistema se reduzca a bajas frecuencias, pero no se plantea usar el sistema de comunicación a estas frecuencias, ya que producen un parpadeo de los LEDs que es visible para el ojo humano lo que llega a ser muy molesto.

La caracterización del ancho de banda se explicará en el apartado del estudio experimental. Tras estas pequeñas pruebas se comprobó que el diseño era apto para este tipo de comunicaciones y con unos resultados bastante aceptables.

2.3. Sistema detección presencia

Un sistema de detección de presencia ofrecería un extra de ahorro energético y por ello se plantea añadirlo. Si a lo ya implementado, se añade dicho sistema, el ahorro energético aumenta considerablemente, aunque en este caso solo se ha realizado el diseño y se ha estudiado su funcionamiento teórico esperado.

El funcionamiento de este sistema se basaría sencillamente en que el sistema de control de iluminación solo estaría funcionando en el momento en el que el detector de presencia detectara que en la zona afectada por nuestro sistema se encuentra alguna persona. Mientras no haya ninguna persona el otro sistema no consume nada por lo que en horarios, por ejemplo de comidas en los que no todas las personas están en su puesto de trabajo el sistema se mantendría completamente apagado.



Figura 30 Detector de presencia

Este sistema (Figura 30) iría colocado a la entrada de la alimentación del sistema de iluminación inteligente y como ya se ha mencionado actuaría como un interruptor que impediría la alimentación al circuito de iluminación.

Según las recomendaciones del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo [21] a lo largo de una jornada laboral en un puesto informático es necesario tener descansos de alrededor del 8% del tiempo trabajado en esa jornada, además de 15 minutos por cada seis horas de trabajo. Durante ese periodo de tiempo es de asumir que el trabajador no se encontrara en su puesto de trabajo. Durante este tiempo la detección de personas nos generaría un ahorro, teniendo en cuenta además que solo valoramos estas pausas recomendadas, si por algún motivo hubiera más tiempo con el trabajador fuera de su puesto de trabajo el ahorro aumentaría.

El dispositivo funciona con un sensor piroeléctrico, lo que significa que la detección de la persona se produce detectando el cambio de temperatura que genera, ya que este cambio de temperatura induce un campo eléctrico en el interior del sensor. Cuando esto pasa se abre y se permite la alimentación del circuito para que comience el funcionamiento. Este tipo de sensores no necesita alimentación, por lo que no repercutiría en el consumo del sistema. Este dispositivo se permite controlar con corriente continua lo cual es un punto a favor ya que todo nuestro diseño funciona así.

El precio de este dispositivo es de 18.40€ pero, por motivos ajenos a este proyecto, no se ha podido adquirir para realizar pruebas de laboratorio con el mismo, aunque si se añadirán las ventajas del mismo al periodo de amortización del sistema para que se pueda valorar su funcionamiento.

3. Estudio experimental

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos tras las pruebas de laboratorio realizadas con este diseño tanto en el apartado de adecuación al ambiente como en el de comunicación por VLC, ya que como se mencionó anteriormente, la parte de control de presencia no se ha podido probar por motivos ajenos a este trabajo.

Se dará especial importancia a los puntos claves de estos dos sistemas, como son por un lado el consumo eléctrico y el ahorro posible que generará y por otro lado los valores correctos de comunicación

3.1. Sistema iluminación adaptativa

El funcionamiento del circuito se ha acercado a lo que se esperaba por lo se han tomado diversas medidas de consumo eléctrico para determinar el ahorro obtenido por el uso de este sistema.

Las medidas tomadas se corresponden únicamente a lo que circula por el LED, ya que las medidas obtenidas en otros componentes eran demasiado pequeñas para ser tenidas en cuenta de cara al cálculo de energía consumida. Además, para poder comparar con otras fuentes luminosas es lo único necesario, ya que en los datos de consumo que facilitan los fabricantes sólo se habla del componente, no del resto del sistema que se necesite en cada caso.

Antes de ver una comparativa de consumo hay que destacar que el sistema implementado incluye sólo un LED, que no es suficiente para satisfacer las necesidades lumínicas mínimas de unos 300 lm según la normativa [18]. Para realizar las comparativas del consumo eléctrico con otros sistemas es importante que en todos los casos emitan aproximadamente la misma cantidad de luz, con lo que realizaremos una aproximación escalando nuestro sistema a uno con un flujo luminoso acorde a lo buscado, esto se explicará más adelante.

Para el cálculo del consumo se ha medido la caída de tensión y la corriente que pasa por el LED, mostrados en la Figura 31, en diferentes condiciones para simular así un día soleado, un día con nubes y claros y un día oscuro, y así tener una referencia completa del consumo en diferentes condiciones:

| | Tensión | Corriente |
|-------------------------------|----------------|------------------|
| Día despejado | 150mV | 11.3mA |
| Día con nubes y claros | 2.93V | 42.6mA |
| Día oscuro | 3.74V | 90mA |

Figura 31 Tabla de tensión y corriente por el LED

Una vez medidos los datos de tensión eléctrica que cae en el LED se obtiene la potencia eléctrica de nuestro LED por medio de la siguiente formula:

$$P = V \cdot I \quad (9)$$

Con esta expresión se puede obtener la potencia eléctrica que consume este diseño, (Figura 32) teniendo únicamente en cuenta el consumo del LED como ya se comentó antes.

| | Lumens emitidos | Potencia eléctrica consumida |
|-------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Día despejado | 0.1 lm | $1.7 \cdot 10^{-3}$ W |
| Día con nubes y claros | 8.1 lm | 0.12 W |
| Día oscuro | 23 lm | 0.34 W |

Figura 32 Potencia eléctrica consumida por el diseño

Como podemos ver en la Figura 32 en el caso de mayor flujo luminoso tenemos aproximadamente 23 lm y para cumplir con los requerimientos de 300 lm sería necesario que tuviéramos 13 LEDs de estas características formando un array. Con esta configuración si cumpliríamos las necesidades lumínicas por lo que las comparaciones con otros sistemas serian adecuadas.

En primer lugar se muestran los cálculos de consumo con el LED con el que se han realizado las pruebas y estos son datos experimentales, Figura 33. Los datos de consumo serán calculados en kilovatios hora y se calcularán con una media de 8 horas diarias de uso, que es la media de jornada laboral, y con unos 30 días de media al mes.

| | KWh día | KWh mes | KWh año |
|--|----------------------|----------------------|---------------------|
| Consumo eléctrico del sistema en día despejado | $1.36 \cdot 10^{-5}$ | $4.08 \cdot 10^{-4}$ | $4.9 \cdot 10^{-3}$ |
| Consumo eléctrico del sistema en día con nubes y claros | $9.6 \cdot 10^{-4}$ | 0.03 | 0.35 |
| Consumo eléctrico del sistema en día oscuro | $2.7 \cdot 10^{-3}$ | 0.08 | 0.97 |
| Consumo eléctrico con inteligencia (condiciones cambiantes) | $1.22 \cdot 10^{-3}$ | 0.037 | 0.44 |

Figura 33 Consumo del sistema diario, mensual y anual

Como se puede observar el consumo eléctrico es muy bajo, lo cual es muy bueno, aunque como se ha mencionado estos datos son con un solo LED que no es suficiente para tener unas condiciones lumínicas aceptables. Las tres primeras filas de la Figura 33 son el consumo eléctrico solo en una de las posibles condiciones y la cuarta es estableciendo una media entre los distintos valores de las filas anteriores, asumiendo que hay el mismo número de horas de sol que de oscuridad, que nos daría una aproximación de consumo de nuestro sistema adaptándose a los cambios del ambiente.

Para hacernos una idea, y antes de comparar los datos de consumo entre diferentes sistemas de iluminación, sería bueno ver las diferencias existentes en estos consumos en función de la zona en la que se instale, ya que no hay las mismas horas de sol en el norte que en el sur de España.

Tomamos los datos del Instituto Nacional de Estadística (INE) [22] que se resumen en que en Sevilla hay un 40% más de horas de sol anuales que en A Coruña. Las medidas son del año 2012, último año del que se facilitan estos datos.

Por tanto, la diferencia es notable lo que implica que en consumo eléctrico anual medio del sistema de iluminación con inteligencia también podríamos ver la diferencia, como se muestra en la siguiente Figura 34:

| | A Coruña | Sevilla |
|--------------------------------------|-----------------|----------------|
| Consumo eléctrico anual (KWh) | 0.58 | 0.39 |

Figura 34 Consumo anual en diferentes lugares

Como se puede apreciar en la Figura 34, es una diferencia importante en el consumo, lo que nos dice por un lado que el sistema será más atractivo en lugares con mayor cantidad de días soleados y por otro que los cálculos de consumo medios de la última fila de la Figura 33 nos valen como aproximación para un país como es España.

En la Figura 35 se pueden ver las equivalencias de todas los tipos de iluminación en cuanto a la necesidad de más vatios en las bombillas más comunes como son las incandescentes, las de bajo consumo y los tubos fluorescentes [23]. Como era lógico esperar las de tecnología LED son las que menos vatios necesitan para una cantidad determinada de lumens. Si esto se traduce a consumo eléctrico es como en la Figura 33 multiplicar el valor de los vatios de cada fuente de iluminación por unas ocho horas diarias, por unos treinta días al mes y por doce meses para obtener el consumo anual

| Tecnología LED | Bombillas incandescentes & Lámparas Halógenas | Tubos T8 fluorescentes | Lumen (lm) |
|-----------------------|--|-------------------------------|-------------------|
| 1W | 10W | | 50-80 |
| 3W | 20W | | 120-180 |
| 5W | 35W | | 210-280 |
| 7W | 50W | | 280-320 |
| 10W | 80W | 20W | 550 |
| 12W | 100W | 24W | 650-750 |
| 15W | 120W | 30W | 700 |
| 20W | 150W | 40W | 950 |

Figura 35 Potencia eléctrica necesaria de diferentes sistemas de iluminación y sus equivalencias [23]

Para ver mejor la diferencia entre nuestro sistema y los otros sistemas de iluminación se realiza una comparativa, mostrada en la Figura 36, mostrando sus consumos tanto diarios como mensuales y anuales. Cabe recordar, cómo se explicó antes, que el de nuestro diseño se escalará para cubrir las necesidades lumínicas. Además de los consumos también se añade el cálculo de la eficacia luminosa, que es la cantidad de lumens generados por cada vatio. Cuanto mayor sea este dato más eficiente será el sistema de iluminación. Los datos usados para calcular este dato se han obtenido de la Figura 35, con la media de los lumens en cada caso.

| | Bombilla incandescente (50W) | Tubo fluorescente (20W) | LED (7W) | Nuestro diseño sin inteligencia escalado a 300lm | Nuestro diseño inteligente escalado a 300lm |
|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------|---|--|
| K_{eff} (lm/W) | 6 | 27.5 | 42.86 | 67.64 | 67.64 |
| Consumo diario (KWh) | 0.4 | 0.16 | 0.056 | 0.035 | 0.016 |
| Consumo mensual (KWh) | 12 | 4.8 | 1.68 | 1.04 | 0.48 |
| Consumo anual (KWh) | 144 | 57.6 | 20.16 | 12.61 | 5.71 |
| Gasto anual (€) | 47.13 | 18.85 | 6.6 | 4.13 | 1.87 |

Figura 36 Comparativa de consumos eléctricos de sistemas de iluminación

La última fila detalla el gasto anual de cada sistema calculado a través del precio medio del KWh mas sus peajes [24].

Con respecto a la bombilla incandescente existe un ahorro del 96%, siendo esta la mayor diferencia vista ya que es el sistema más antiguo y menos eficiente. Con respecto al tubo fluorescente el ahorro estimado sería del 90%, aunque es necesario destacar que el fluorescente emitirá mayor cantidad de luz de la necesaria, con lo que es de esperar que con uno que sí se adapte a estas necesidades el ahorro sea algo menor. La eficacia luminosa, nos sirve para aproximarlos mejor, y se ve que es un 60% más baja que la de nuestro sistema, lo que indica cómo se menciona una mejora muy sustancial. Con la bombilla LED el margen de ahorro es menor que los anteriores pero aún es destacable, ya que es de un 71%. Con estos tres datos se abarcan la mayoría de sistemas de iluminación utilizados y en todos los casos el ahorro es bastante reseñable justificando de esta manera el cambio a nuestro diseño.

El cuarto valor mostrado es el de nuestro sistema sin funcionar la inteligencia, es decir siempre con la iluminación máxima, y se observó una diferencia en el consumo del 54%, lo que remarca la utilidad de estos sistemas inteligentes en entornos reales y justifica su cambio por estos novedosos sistemas.

3.2. Subsistema VLC

El funcionamiento del subsistema de comunicación por VLC ha tenido un funcionamiento mejor de lo esperado inicialmente, aunque tras los cálculos teóricos se predijo que el resultado podía ser bastante bueno, siempre dentro de las posibilidades del diseño.

Las medidas del ancho de banda de nuestro diseño, que funciona como emisor de la comunicación, se tomaron conectando el generador de funciones por medio del puerto SMA y se inyectaba una señal senoidal desde las bajas frecuencias hasta las más altas. Para comprobar en todo momento que la señal que sale del generador y la que llega al receptor es adecuada se usa el osciloscopio conectándole en diferentes sondas tanto la

entrada, que es directamente la salida del generador de funciones, como la salida del receptor.

Usando este método se caracterizó el ancho de banda de nuestro sistema emisor. Se tomaron dos medidas una con un BPW34 como receptor y otra con un APD como receptor. Por si acaso también y dada la posibilidad, con el APD se usó también un generador de funciones de mayor calidad y un osciloscopio digital, ya que con los originales se producían numerosos errores que no tenían que ver con el diseño y se buscó así minimizarlos y obtener un resultado más preciso.

Para las primeras medidas con el detector BPW34 se obtuvo el resultado de la Figura 37, que ya era cercano a nuestro cálculo teórico, lo que demostraba el buen funcionamiento de nuestro sistema.

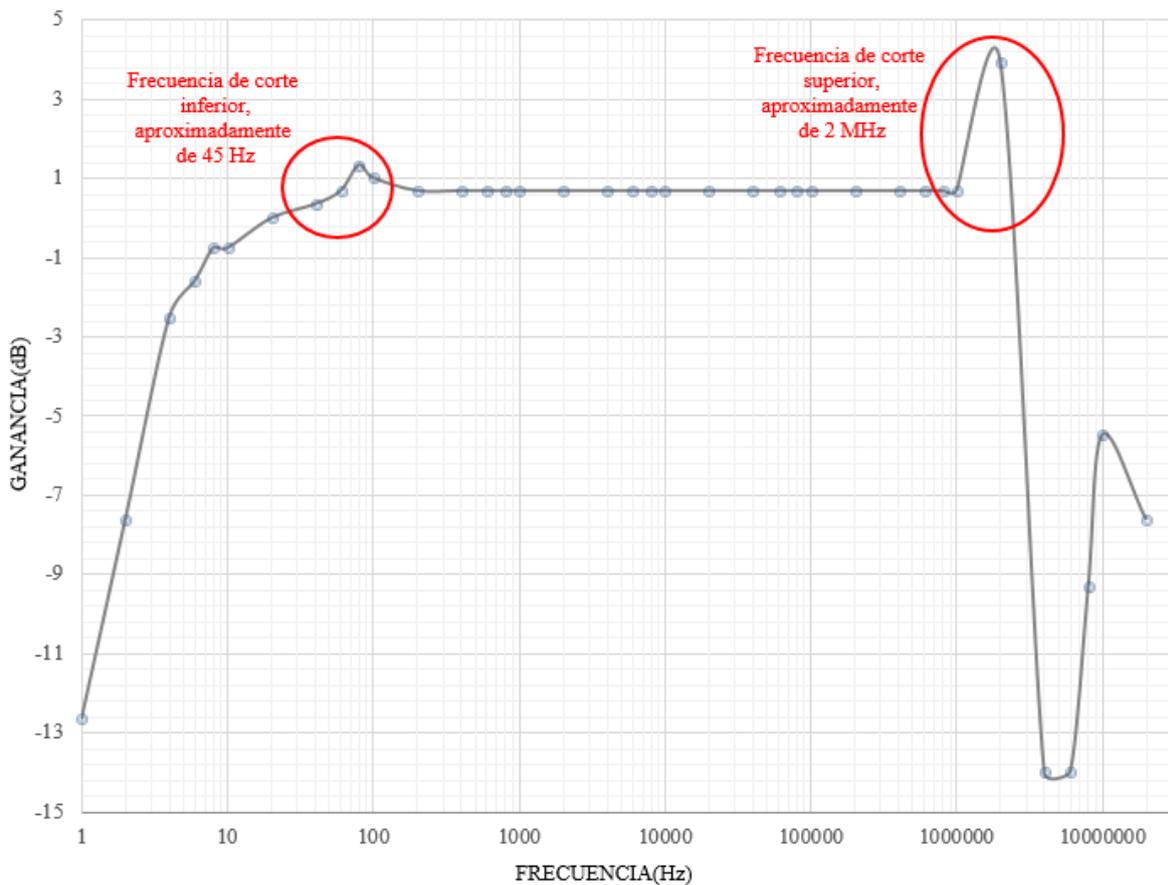


Figura 37 Ancho de banda de comunicación con BPW34 en detección

Para comprobarlo se tomaron otras veces estas medidas con el APD y los equipos mejores como ya se mencionó, y el resultado fue el mostrado en la Figura 378

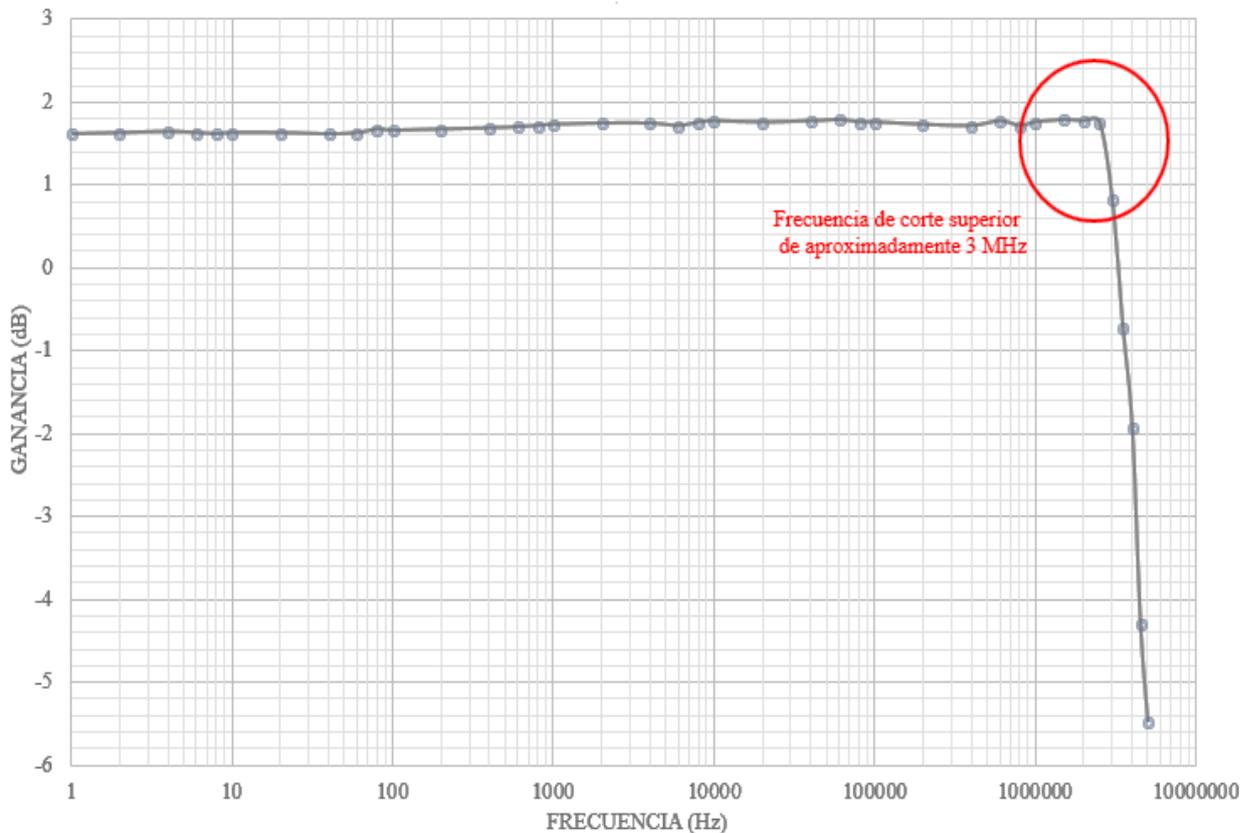


Figura 38 Ancho de banda de comunicación con APD como receptor

Como se puede ver la frecuencia de corte superior ha aumentado ligeramente lo que asegura un buen rango de funcionamiento y corrobora que como se esperaba que las medidas anteriores no eran completamente precisas. También se observa mayor inestabilidad, lo cual puede ser debido a que como usábamos un osciloscopio digital con mayor precisión se podían apreciar mejor las múltiples perturbaciones producidas en este tipo de comunicaciones, como el uso de iluminación por fluorescentes, como es el caso del laboratorio, que introduce un ruido en nuestra comunicación. Para evitar este problema se podría añadir un filtro que eliminase ese ruido, pero en principio se asumió que este sistema se usaría en zonas con iluminación completa por medio de LEDs.

Es importante destacar que los cálculos teóricos realizados concuerdan con los resultados experimentales obtenidos los que permite corroborar como ya se comentó que el sistema, dentro de sus limitaciones es apto para estas comunicaciones.

4. Estudio de aplicabilidad

El sistema diseñado puede ser útil para diferentes situaciones, ya que otro de los objetivos era su versatilidad para así permitir tener varios usos. Se explica en los siguientes apartados como se adaptaría nuestro sistema a distintos entornos y que mejoras se tendrían en cada uno de ellos en función de las distintas funcionalidades del sistema.

4.1. Puesto de trabajo en biblioteca o de oficina

En este entorno, como es uno de los más probables para nuestro sistema, su adaptación es de las más sencillas ya que es el entorno en el que se ha pensado al diseñar el sistema.

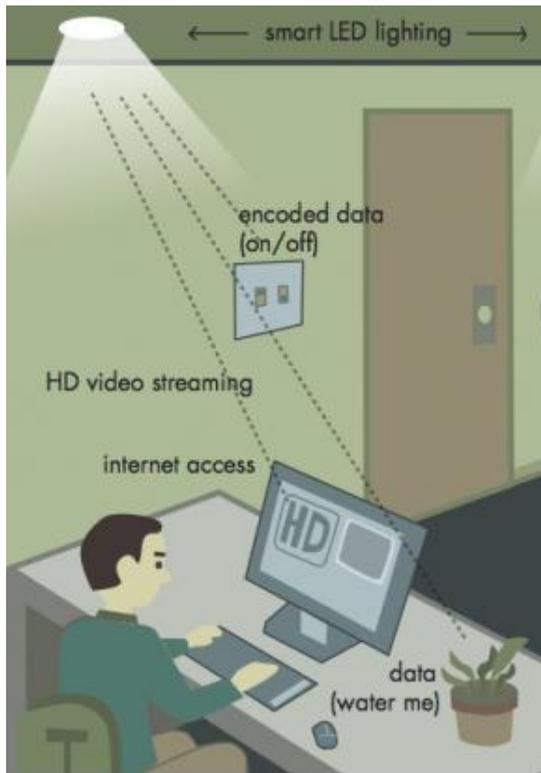


Figura 39 Ejemplo de funcionamiento en puesto de trabajo

Por un lado tenemos que las funcionalidades básicas de iluminación para las que se diseñó el sistema se adaptan a la perfección. El sistema se instalaría sobre el puesto de trabajo para que pudiera iluminar esa zona exclusivamente y que la zona de detección de presencia fuera esa misma también. Con esto ya se conseguiría un sistema como el de la Figura 39 que permitiría un importante ahorro energético ya solo por el control de iluminación inteligente. La otra parte del ahorro se da debido a, como es lógico, que la iluminación sea LED.

La otra funcionalidad principal de este sistema que es la comunicación de información por luz visible (VLC) podría ser aprovechada, al menos por el momento, para enviar pequeños paquetes de datos de información de libros, en el caso de las bibliotecas, o información de reuniones y eventos en el caso de la oficina.

Es lógico que para esta última funcionalidad sea necesaria una adaptación previa que integre un receptor que permita ver e interpretar esa información de salida, pudiendo ser tan simple como el circuito usado en este proyecto con el software necesario para poder comprender esa información y mostrarla al usuario.

4.2. Accesibilidad

Este uso es mucho más complejo ya que para sistemas de accesibilidad además de existir mucha normativa es necesario que sea muy preciso, exacto y sin fallos para así conseguir siempre resultados óptimos para los usuarios.

Para esto se plantea usarlo como sistema de guía para discapacitados, usando como función principal la de comunicación VLC. Se usaría como guía con el sistema de navegación por interiores con cada luz LED como una baliza de posicionamiento en un mapa virtual consiguiendo así por ejemplo ir guiando a cada persona a su destino sin molestar al resto.

Como el anterior, este sistema plantea la necesidad de un receptor para poder ver esas balizas de posicionamiento y un sistema de navegación que se nutra de esta información para poder guiar a los usuarios en el interior del edificio.

En este caso la función de iluminación inteligente queda en segundo plano aunque puede servir para ahorrar energía y, si es para luz ambiente, se podría escoger otro LED con mayor ángulo de emisión para evitar que la luz sea demasiado directiva, siempre y cuando la función de comunicación VLC no se vea comprometida por este cambio y no se comunique de manera correcta.

4.3. Museos

Esta aplicación es una que actualmente se está implantando, principalmente para la comunicación VLC dejando también en un papel secundario la iluminación.



Figura 40 Ejemplo de funcionamiento en museo

En este caso el sistema sirve como sustituto al sistema de audio guía existente eliminando así la necesidad de seguir una ruta predeterminada por las diferentes salas del museo. Con este sistema se ofrece la posibilidad de que cada persona pueda moverse del modo que quiera por el museo evitando además aglomeraciones en algunas zonas. Como en el sistema antiguo también es necesario dar un sistema físico a los usuarios para que lean la información en cada caso y esta aplicación la vemos en la Figura 40.

4.4. Redes de comunicación

Esta es una de las aplicaciones más novedosas de este sistema y que actualmente se encuentra en fase de pruebas ya que está enfocada a las nuevas redes móviles de quinta generación, debido a que dentro de las características que se pretende que tenga la nueva generación de redes móviles está la de que los puntos de iluminación LED sirvan para transmitir comunicaciones de datos móviles y ejerzan como puntos de acceso a la red de los operadores.

Como esta nueva generación de redes aún está en desarrollo y no se prevé su llegada al mercado hasta el año 2020, aunque no es una fecha definitiva. Este tiempo da margen para resolver los múltiples problemas que tienen hoy por hoy las comunicaciones por luz visible que necesitan unas condiciones de comunicación que son posibles en el laboratorio pero que en entornos reales presentan diversos problemas.

5. Presupuesto

Uno de los propósitos de este proyecto es que el sistema fuera económicamente atractivo para el gran público, y por ello en este apartado se detallará desde el coste del propio sistema, incluyendo las horas del ingeniero que lo diseñó y el posible coste de su instalación, hasta el tiempo necesario para una amortización completa en función del ahorro proporcionado y del coste

5.1. Presupuesto del sistema

Dentro de este apartado se incluye el coste de los componentes del diseño con el que se ha trabajado, Figura 41. El precio de los componentes está basado en el precio marcado por un distribuidor oficial RS Componentes.

| Elemento | Características | Coste(€) | Número de unidades | Coste total(€) |
|----------------------|----------------------------------|----------|--------------------|----------------|
| Fotodiodo | BPW34 Vishay | 0.866 | 2 | 1.732 |
| Potenciómetro | 500Ω | 0.6 | 1 | 0.6 |
| Amplificador | TL081 Texas Instruments | 0.31 | 1 | 0.31 |
| Transistor | BD135 STMicroelectronics | 0.183 | 1 | 0.183 |
| Diodo LED | Nichia | 0.82 | 1 | 0.82 |
| Conector SMA | Low Power Radio Solutions, Recto | 1.076 | 1 | 1.076 |
| Resistencias | Resistencias varias | 0.05 | 5 | 0.25 |
| Resistencia | Potencia 1 W | 0.2 | 1 | 0.2 |
| Condensadores | Condensadores varios | 0.1 | 2 | 0.2 |
| TOTAL | | | | 5.37 |

Figura 41 Presupuesto del sistema

5.2. Presupuesto del diseño

A continuación se muestra en la Figura 42 el presupuesto del estudio, diseño, fabricación y pruebas de este proyecto:

| Actividad | €/hora | Horas de trabajo | Coste (€) |
|----------------------------------|--------|------------------|-----------|
| Estudio previo | 10 | 55 | 550 |
| Diseño | 15 | 95 | 1425 |
| Implementación | 8 | 50 | 400 |
| Pruebas | 8 | 60 | 480 |
| Elaboración de la memoria | 8 | 70 | 560 |
| Horas de supervisión | 20 | 50 | 1000 |
| TOTAL | | 380 | 4415 |

Figura 42 Presupuesto del diseño

5.3. Presupuesto total y amortización

En la Figura 43 se muestra el presupuesto total del diseño probado agrupando los dos anteriores y añadiendo los impuestos pertinentes:

| Tipo de coste | Coste (€) |
|-----------------------------|----------------|
| Coste del material | 5.37 |
| Coste del desarrollo | 4415 |
| Total antes de I.V.A | 4420.37 |
| I.V.A (21%) | 928.27 |
| TOTAL | 5348.65 |

Figura 43 Presupuesto completo

Una vez visto el precio total del proyecto sería útil conocer el periodo de amortización del mismo en un caso práctico, por ejemplo si el diseño se instalase en una oficina con 200 puestos de trabajo, los cuales actualmente están iluminados con bombillas incandescentes de 50W cada uno. Se analiza por un lado el coste del sistema añadiendo su coste de fabricación unitario además de añadir el coste de desarrollo que se aplicará como un solo pago. Es importante destacar que para estos cálculos se añade el gasto que supone cambiar el LED usado por el LUXEON Q para el cual el diseño está preparado y que cumpliría con las necesidades lumínicas. Este coste se detalla como el coste del nuevo componente menos el coste del componente que reemplaza, es decir, descontar 0.82€ a el precio del nuevo componente, que es de 1.7€ En la Figura 44 se detalla el coste de este proyecto

| | Unidades | Coste (€) | Coste total (€) |
|----------------------------------|----------|-----------|-----------------|
| Coste total de desarrollo | 1 | 3465 | 4415 |
| Materiales placa | 200 | 5.37 | 1074 |
| Cambio a LUXEON Q | 200 | 0.88 | 176 |
| Fabricación y ensamblado | 200 | 3 | 600 |
| Sustitución y montaje | 200 | 2 | 400 |
| Total antes de I.V.A | | | 6665 |
| I.V.A (21%) | | | 1399.65 |
| Total | | | 8064.65 |

Figura 44 Coste de proyecto ejemplo

Para amortizar este gasto nos basamos en el ahorro anual que se produce con nuestro sistema teniendo en cuenta una jornada de 8 horas, para el caso de nuestro diseño inteligente, y de 7 horas y 7 minutos, por los descansos antes comentados, para el sistema inteligente con detección de presencia. El segundo sirve como aproximación ya que no hay comprobaciones experimentales. Para ambos y dado que en este ejemplo se asume el uso de LUXEON Q usaremos los datos escalados a 300 lm de nuestro sistema ya que nuestro sistema está preparado para ello y el transistor puede operar con esos valores de

intensidad sin deteriorarse. Aunque esto no será un resultado exacto nos vale para valorar el ahorro aproximado que se produce.

En la Figura 45 se muestran las diferencias existentes entre los diferentes sistemas.

| | Consumo eléctrico anual KWh | Coste en € al año | Ahorro con el sistema menos eficiente (€) |
|--|------------------------------------|--------------------------|--|
| Sistema de iluminación instalado | 28800 | 9425.45 | 0 |
| Sistema de iluminación inteligente | 1142 | 373.74 | 9051.71 |
| Sistema de iluminación inteligente + control de presencia | 1015.9 | 332.47 | 9092.97 |

Figura 45 Diferencias de consumo y coste entre sistemas

Como se puede ver la diferencia entre los dos últimos es escasa y teniendo en cuenta que encarecería el precio del sistema en 18,4€ por unidad, no parece resultar nada atractivo su posible instalación, pero es necesario valorar que sólo se ha tenido en cuenta que de las 8 horas diarias se reducen unos 53 min al día, y es muy posible que en realidad esto sea mayor ya que falten incluir por ejemplo reuniones, pausas para comer y otro tipo de casos no detallados específicamente y que aumentarían la diferencia de consumo entre ambos haciéndolo más atractivo.

En el caso del sistema sin detección de presencia la amortización llegaría pasados los 325 días desde su instalación, mientras que en el otro llegaría más tarde por el encarecimiento de este componente y el poco ahorro que se ve solo con esas pausas y que llegaría 474 días después de la puesta en marcha.

En cualquier caso es importante ver como este sistema muestra un gran atractivo de cara al consumidor por el escaso periodo de amortización y que hace que el desembolso económico producido para cambiarse pronto se traduzca en ahorro económico.

6. Conclusiones y trabajo futuro

Como conclusión de este trabajo podemos destacar que se han cumplido los objetivos que teníamos planteados al inicio del mismo ya que el sistema que planteábamos ha funcionado de forma adecuada y con los resultados esperados con lo que se podría afirmar que es posible desarrollar sistemas de iluminación inteligentes, eficientes y económicos. Como contrapunto a esto se quiere destacar que dadas las limitación presupuestarias no se han podido usar componentes que hubieran sido perfectos para nuestro diseño como es el caso del LED LUXEON Q y el detector de presencia, ya que con ambos se hubiese evitado tener que escalar los datos de consumo energético y obtener así comparativas más fiables.

En cuanto a los resultados son muy esperanzadores, tanto por el ahorro conseguido como por la rápida amortización que se produce, ya que si con un presupuesto tan limitado con el que se ha trabajado se consiguen estos resultados es un indicador de que grandes empresas pueden poner a la venta sistemas como este diseñado a un bajo precio, que es actualmente la mayor barrera de estos productos.

Este desarrollo nos brinda algunas posibilidades de mejora bastante sencillas de implementar y que aportarían beneficios al sistema como:

- Alejar los fotodiodos entre ellos para así obtener una detección de iluminación mejor.
- Cambiar el diodo LED por otro en función de las necesidades del lugar donde se va a usar.
- Usar un transistor que sea más rápido, por tanto que no los limite la comunicación VLC, pero cuidando de que cumpla las necesidades eléctricas de potencia y corriente.
- Adaptar el diseño de la PCB a componentes de montaje superficial para miniaturizar más el diseño.

En cuanto a trabajos futuros es de destacar una posible aplicación de este sistema como emisor de comunicaciones de datos de red 5G, actualmente en desarrollo, y que dadas las características del diseño se podría adaptar a las necesidades de este nuevo estándar de comunicación y usarse masivamente para esta tarea. En esta línea, se ha iniciado una colaboración con el Departamento de Teoría de la Señal de la Universidad Carlos III de Madrid para estudiar las posibilidades que este tipo de sistemas tienen como emisores en entornos VLC orientados a redes de comunicación.

7. Referencias

- [1] A. Kar and A. Kar, “New generation illumination engineering-An overview of recent trends in science & technology.”
- [2] S. Muthu, F. J. P. Schuurmans, and M. D. Pashley, “Red, Green, and Blue LEDs for white light illumination,” in *TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, 2002, pp. 333–338.
- [3] R. Mueller-Mach, G. O. Mueller, M. R. Krames, and T. Trottier, “High-Power Phosphor-Converted Light-Emitting Diodes Based on III–Nitrides,” in *TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, 2002, pp. 339–345.
- [4] Endel Uiga, *Optoelectronics*. 1995.
- [5] Philips, “Philips Alumbrado.” [Online]. Available: <http://www.lighting.philips.es/>. [Accessed: 12-Sep-2014].
- [6] Philips, “HUE.” [Online]. Available: <http://www2.meethue.com/es-es/>. [Accessed: 07-Sep-2014].
- [7] Design LED Products, “Laminas LED.” [Online]. Available: <http://designledproducts.com/>. [Accessed: 07-Sep-2014].
- [8] Philips, “Large Luminous Surfaces.” [Online]. Available: <http://www.largeluminoussurfaces.com/>. [Accessed: 07-Sep-2014].
- [9] P. C. POSADA, J. M. GIL, P. M. RAMOS, and L. M. NAVAS GRACIA, *FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA OLED*. UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, 2008, p. 219.
- [10] Philips, “Iluminación OLED.” [Online]. Available: <http://www.lighting.philips.es/lightcommunity/oled>. [Accessed: 07-Sep-2014].
- [11] Tecmovia, “Audi Matrix LED.” [Online]. Available: <http://www.tecmovia.com/2013/04/09/audi-matrix-led-la-iluminacion-se-hace-inteligente-laboratorio-tecmovia/>. [Accessed: 09-Apr-2013].
- [12] B. Press, “BMW lights.” [Online]. Available: https://www.press.bmwgroup.com/global/pressDetail.html?title=bmw-lights-the-way-into-the-future&outputChannelId=6&id=T0176448EN&left_menu_item=node__5236. [Accessed: 13-Sep-2014].
- [13] SmartLIGHTING, “Iluminación láser de BMW.” [Online]. Available: <http://smart-lighting.es/laser/iluminacion-laser-de-bmw-en-otono-y-proximamente-faros-traseros-oled/>. [Accessed: 07-Sep-2014].
- [14] C. EnLight, “Proyect EnLight.” [Online]. Available: <http://www.enlight-project.eu/en/home/>. [Accessed: 07-Sep-2014].
- [15] EPSRC’s, “UP-VLC.” [Online]. Available: <http://up-vlc.photonics.ac.uk/Home/tabid/1881/Default.aspx>. [Accessed: 07-Sep-2014].

- [16] I2cat, “VLC indoor localization.” [Online]. Available: <http://www.i2cat.net/en/blog/new-solutions-i2cat-mobile-world-congress>. [Accessed: 07-Sep-2014].
- [17] RS, “RS Components.” [Online]. Available: <http://es.rs-online.com>.
- [18] BOE, *REAL DECRETO 486/1997*. España, 1997.
- [19] Nichia, “datasheet LED.” [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1831483.pdf>. [Accessed: 20-Sep-2014].
- [20] J. Pleite, R. Vergaz, and J. M. Ruiz, *Electronica Analógica para ingenieros*. .
- [21] I. nacional de seguridad e higiene en el Trabajo, “El descanso en el trabajo.” [Online]. Available: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/891a925/916w.pdf>. [Accessed: 18-Sep-2014].
- [22] I. N. de Estadística, “Horas de sol.” [Online]. Available: <http://www.ine.es/jaxi/tabla.do?path=/t43/a012/a1998/10/&file=t200111b.px&type=pcaxis>. [Accessed: 17-Sep-2014].
- [23] LEDPASSION, “Comparativas LED.” [Online]. Available: <http://ledpassion.com/comparativa-led>. [Accessed: 13-Sep-2014].
- [24] Red Electrica Española, “Calculadora consumo electrico.” [Online]. Available: <http://www.esios.ree.es/web-publica/>. [Accessed: 17-Sep-2014].