



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO DE FINAL DE CARRERA

TÍTULO DEL TFC: Diseño e implementación de un sistema de iluminación inteligente basado en ZigBee Light Link

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, especialidad Sistemas de Telecomunicación

AUTOR: José Solís Ayala

DIRECTOR: Luis G. Alonso Zárate

CO-DIRECTOR: Jorge Eduardo Higuera Portilla

DATA: 10 de Mayo de 2013

Título: Diseño e implementación de un sistema de iluminación inteligente basado en ZigBee Light Link

Autor: José Solís Ayala

Director: Luis G. Alonso Zárate

Co-director: Jorge Eduardo Higuera Portilla

Data: 10 de Mayo de 2013

Resumen

La infinidad de avances logrados en las comunicaciones inalámbricas de áreas relativamente reducidas, permiten su integración en un sinnúmero de aplicaciones. Tal es así, que los fabricantes de productos de iluminación ya han empezado su particular carrera apostando por diferentes dispositivos basados en este tipo de comunicaciones, con el fin de proporcionar mayor confort y bienestar a sus clientes y garantizando el menor consumo. Claro ejemplo está en la gran variedad de productos que ya existen capaces de controlar todos nuestros dispositivos de iluminación desde cualquier lugar del mundo.

Es por eso que, este proyecto trata de diseñar un sistema de control de iluminación LED eficiente y de bajo consumo, a partir del perfil de comunicaciones ZigBee Light Link. ZigBee Light Link es un perfil de aplicación que pertenece a la tecnología de comunicaciones inalámbricas ZigBee (basado en el estándar IEEE 802.15.4) y que está destinado a la comunicación de los diferentes dispositivos de iluminación.

Los dispositivos que se han utilizado para la comunicación inalámbrica son las motas de bajo consumo de Libelium. Su lenguaje de programación está basado en una serie de funciones y servicios contenidos en una librería en lenguaje C++. También, a lo largo de este proyecto se ha tenido que diseñar los circuitos de acondicionamiento y control de las luminarias LED.

Este sistema ha sido diseñado durante la primera mitad del proyecto en el laboratorio de la UPC (a lo que respecta al hardware y códigos de las motas) y durante la segunda mitad, en el laboratorio del Instituto de Recerca de Energía de Catalunya (IREC), donde finalmente ha sido instalado y evaluado.

Por acabar, con el sistema correctamente funcionando se han recogido los resultados de los tiempos de asociación entre nodos, los tiempos de vida de las baterías y el consumo total del sistema.

Title: Design and implementation of a system of intelligent lighting based on ZigBee Light Link.

Author: José Solís Ayala

Director: Luis G. Alonso Zárate

Co-director: Jorge Eduardo Higuera Portilla

Date: May, 10th 2013

Overview

The infinity of advances achieved in the wireless communications of relative limited areas, they allow his integration in an endless number of applications. Such it is like that, the manufacture of products of lighting already have begun his particular career betting for different devices based on this type of communications, in order to provide major comfort an well-being to his clients and guaranteeing the minor consumption. Clear example is in the great variety of products that already exist capable of controlling all our devices of lighting from any place of the world.

It is because of it that, this project tries to design a system of control of lighting efficient LED and of low consumption, from the profile of communications ZigBee Light Link. ZigBee Light Link is a profile of application that belongs to the technology of wireless communications ZigBee (based on the standard IEEE 802.15.4) and that is destined for the communication of the different devices of lighting.

The devices that have been in use for the wireless communication are the specks of Libelium's low consumption. His language of programming is based on a series of functions and services contained in a bookshop on language C ++. Also, along this project there has had to be designed the circuits of conditioning and control of the lights LED.

This system has been designed during the first half of the project in the laboratory of the UPC (to what it concerns to the hardware and codes of the specks) and during the second half, in the laboratory of the Catalonia Institute for Energy Research (IREC), where finally it has been installed and evaluated.

For finishing, with the system correctly working there have been gathered the results of the times of association between nodes, the times of life of the batteries and the total consumption of the system.

ÍNDICE

Introducción y contexto	1
Motivación.....	1
Objetivos.....	1
Sistemas de iluminación inteligente.....	1
Concepto.....	1
Sistemas de comunicaciones para iluminación en espacios interiores.	2
Estructuración del proyecto.....	5
Capítulo 1. Tecnologías de comunicaciones inalámbricas y hardware de control.	6
1.1 Comunicaciones inalámbricas de área personal.....	6
1.1.1 Redes de sensores inalámbricas (WSN)	6
1.1.2 IEEE 802.15.4 y ZigBee	7
1.1.2.1 IEEE 802.15.4.....	7
1.1.2.2 ZigBee.....	11
1.1.2.3 ZigBee Light Link.	13
1.2 Hardware de los nodos inalámbricos.	15
1.2.1 Especificaciones de las motas Waspnote.....	15
1.2.2 Módulos transceptores XBEE.....	16
1.3 Iluminación LED.	17
1.4 Normativa sobre iluminación en lugares de trabajo.	18
Capítulo 2. Diseño del sistema de control de iluminación.....	19
2.1 Arquitectura de la red de luminarias LED.....	19
2.2 Descripción de un sistema de control de iluminación LED basado en ZigBee Light Link.	23
2.2.1 Descripción de la mota sensor de presencia.	25
2.2.2 Descripción de la mota del sensor LDR.....	28
2.2.2.1 Caracterización del sensor LDR.....	28
2.2.3 Descripción de la mota control de luminaria.	32
2.3 Aplicación del estándar ZigBee Light Link.....	34
2.3.1 On/Off Cluster.....	34
2.3.2 Level Control Cluster.	34
2.4 Diseño de la luminaria LED y del driver de control.....	35
2.5 Distribución de las motas y simulación con Dialux.....	37
Capítulo 3. Puesta en marcha del sistema y resultados obtenidos	41
3.1 Sistema de control de iluminación.....	41

3.1.1	Calibración del sensor de presencia PIR.....	41
3.1.2	Corrección de la configuración del timer del modulo de PWM del Waspmote.....	41
3.2	Tiempo de asociación de los nodos a la red.	45
3.3	Análisis del consumo energético.....	45
3.4	Nivel de iluminación de los módulos LEDs.....	48
CONCLUSIONES.....		49
BIBLIOGRAFÍA		51
ANEXOS		53
A1.	Fundamentos teóricos sobre iluminación.	53
A2.	Imágenes del sistema de control de iluminación.	56

Introducción y contexto

Motivación

La sociedad de hoy es más consciente de las ventajas que proporcionan las comunicaciones inalámbricas y cómo están más presentes en nuestros hogares. Las redes de sensores inalámbricas es uno de los lugares donde podemos encontrar este tipo de comunicación, y que día a día van adquiriendo mayor peso en una diversidad de aplicaciones.

Las constantes investigaciones y desarrollo de nuevos productos provocan que muchos de los estudiantes del sector de las telecomunicaciones a punto de salir al mercado laboral veamos este tema de gran interés y queramos apostar por él en nuestro trabajo de final de carrera. Este tema además, ayuda a acercarnos un poco más al mundo de las telecomunicaciones y cuenta con una gran proyección de futuro.

Los últimos avances en iluminación LED y de las comunicaciones inalámbricas de área personal han permitido la integración de estas dos tecnologías y así poder aplicarlas al sector de la iluminación, campo en el que en la actualidad busca la eficiencia energética y el confort de los usuarios.

Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es diseñar e implementar un prototipo de sistema de iluminación LED controlado mediante una tecnología de comunicaciones inalámbrica basado en la pila de protocolos ZigBee Light Link. Como punto final, se estudiará sus ventajas e inconvenientes respecto a los sistemas cableados convencionales para el control de luminarias.

Sistemas de iluminación inteligente

Concepto

Las continuas subidas del coste de la energía eléctrica durante los últimos años y las previsiones de que seguirá subiendo en los próximos, hace necesaria e imprescindible la incorporación de nuevos sistemas de reducción del consumo eléctrico. Uno de los mayores desafíos del sector industrial para mejorar su competitividad es la disminución del gasto en iluminación, entre otros. Trabajamos en edificios que continuamente deben estar iluminados, vamos a centros educativos que abren sus puertas más de doce horas, caminamos por unas calles que deben estar bien iluminadas para que nos ofrezcan seguridad cuando oscurece. Además, muchos de los lugares públicos como los aparcamientos, hospitales y otros centros de salud funcionan las 24 horas al día los 365 días del año y requieren de niveles de iluminación diferentes para evitar deslumbramientos y aumentar el confort de los usuarios. En todos estos

casos, las necesidades de iluminación generan unos costes que pueden disminuir con la utilización de sistemas de iluminación LED inteligentes.

Un sistema de iluminación LED inteligente es aquel que a partir de un sistema de gestión y control es capaz de adecuar los niveles de iluminación haciendo al sistema responder en tiempo real a los cambios de iluminación natural del entorno y así, ahorrar energía cuando las condiciones de iluminación exterior lo permita. Además, cuenta con una iluminación que se adapta espectralmente y es respetuosa con el medio ambiente.

Su principal objetivo es lograr el mayor ahorro energético posible y ofrecer, al mismo tiempo, bienestar, confort y el mejor ambiente de trabajo para las personas.

Los sistemas de iluminación inteligente se pueden aplicar a espacios interiores de casas y edificios y en espacios exteriores para el alumbrado de las calles y autovías, adecuando los niveles de iluminación en los diferentes escenarios en tiempo real.

Este proyecto se centra en implementar un sistema de iluminación inteligente basado en tecnologías de comunicaciones inalámbricas con ZigBee Light Link aplicado en espacios interiores.

Sistemas de comunicaciones para iluminación en espacios interiores.

Tradicionalmente los fabricantes de sistemas de control de iluminación para edificios desarrollaban e imponían sus propios protocolos con el fin de limitar la competencia y asegurarse el mercado. Ahora bien, esta estrategia de mercado limita la competencia y la integración de equipos de fabricantes diversos. De tal forma que actualmente se busca la interoperabilidad de sistemas de iluminación de diferentes fabricantes, para reducir los costos de operación y mejorar la integración de sistemas heterogéneos. En la actualidad tanto los fabricantes de dispositivos de campo (sensores y actuadores) como los fabricantes de sistemas de control, desarrollan y utilizan protocolos abiertos y estandarizados a fin de asegurar la compatibilidad de sus productos en sistemas distribuidos de control de iluminación en edificios.

A continuación, en la Tabla 0.1 se enumeran algunos de los protocolos de comunicaciones cableados e inalámbricos más usados para sistemas de control de iluminación, destinados a la automatización en general de edificios de oficinas y en entornos residenciales.

Tabla 0.1. Protocolos de comunicaciones para sistemas de iluminación.

Nombre Protocolo	Tipo de comunicación	Sector de Aplicación	Velocidad de transferencia de datos
Modbus	Cableada	Automatización Industrial	1 Mbit/s en cable par trenzado
BACnet	Cableada	Automatización de edificios	76,8 Kbit/s en cable par trenzado
LonWork	Cableada	Automatización de edificios y viviendas	78 Kbit/s en cable par trenzado. Hasta 1 Gbit/s en cable Ethernet
KNX	Cableada / inalámbrica	Automatización de viviendas	4,7 Kbit/s en cable par trenzado. 38, 4 Kbit/s en la banda de 868 MHz
DALI	Cableada	Control de la iluminación de edificios.	De 10 a 100 Mbit/s en cable Ethernet.
DMX	Cableada	Control de la iluminación en espectáculos (discotecas, teatros, conciertos, etc.).	2 Mbit/s
PLC (Power Line Communication)	Cableada	Automatización industrial y edificios	200 Mbit/s
IEEE 802.15.4 / ZigBee	Inalámbrica	Varias aplicaciones según perfiles de aplicación	128 Kbit/s
EnOcean	Inalámbrica	Automatización de edificios.	120 Kbit/s
Z-wave	Inalámbrica	Automatización de edificios.	40 Kbit/s
Bluetooth (v. 2)	Inalámbrica	Comunicaciones de área personal	3 Mbit/s

La principal diferencia entre estas tecnologías, a parte del tipo de comunicación, es el ámbito en el que se aplica y la velocidad de transferencia de datos. La mayoría sirven para la conectividad de sensores y actuadores en edificios y controlar equipos electrónicos como: termostatos, alarmas, luz, aire acondicionado, ordenadores, televisores, ventanas y persianas eléctricas, etc. como es el caso de LonWork o EnOcean. Mientras que DALI y DMX están orientadas al control nativo de dispositivos de iluminación.

En el caso de ZigBee, define una serie de perfiles de aplicación que se asocian con un perfil de sensor o actuador en particular con unos comandos estándar dependiendo del perfil y las necesidades de la aplicación específica. El

propósito de estos perfiles de dispositivos es el de asegurar la interoperabilidad entre diversos fabricantes mediante las capas de red, seguridad y aplicación de las redes ZigBee.

Los diferentes perfiles que la alianza ZigBee ha creado se recogen en la Tabla 0.2.

Tabla 0.2. Diferentes perfiles de aplicación ZigBee.

Perfil	Descripción
ZigBee Building Automation	Automatización de edificios.
ZigBee Health Care	Destinado a la gestión y seguimiento de servicios relacionados con la salud y el bienestar.
ZigBee Home Automation	Automatización en el sector residencial.
ZigBee input device	Destinado a la conexión de dispositivos tales como teclados, ratones, tabletas y otros dispositivos de entrada que se utilizan en ordenadores o equipos de electrónica de consumo.
ZigBee Light Link	Iluminación en casas y edificios.
ZigBee Network devices	Destinado para ayudar y ampliar las redes ZigBee como por ejemplo para conectar redes ZigBee a Internet o con operadoras de telecomunicaciones.
ZigBee remote control	Este perfil trata de sustituir la tecnología de infrarrojos en los mandos a distancia, eliminando las restricciones de la visión directa con el equipo remoto, al tiempo que ofrece una comunicación bidireccional.
ZigBee smart energy	Primer estándar mundial destinado a monitorizar, controlar, informar y automatizar la entrega y el uso de energía y agua.
ZigBee retail services	Para la supervisión, control y automatización de la compra y entrega de mercancías.
ZigBee Telecom Services	Destinado a una amplia variedad de servicios con el teléfono móvil o otros dispositivos electrónicos portátiles como pagos de productos o servicios, control de acceso a la oficina, creación de redes propias de comunicación o juegos, recepción de cupones o descuentos, entre muchas más.
ZigBee IP	Para conectar dispositivos ZigBee a redes 6LoWPAN.

Estructuración del proyecto.

Este trabajo está estructurado en tres capítulos. En el primero se introduce las bases teóricas de las comunicaciones inalámbricas de área personal, especialmente el estándar IEEE 802.15.4 / ZigBee, y del hardware que se va utilizar. También, en este capítulo se resumen las especificaciones sobre iluminación en puestos de trabajo de oficinas recogida en la normativa europea UNE 12464-1. El segundo capítulo trata del diseño del sistema de control iluminación mediante la tecnología ZigBee basado en el perfil Light Link para iluminación. Y por último, el tercer capítulo contiene la parte experimental incluyendo las primeras pruebas del sistema de iluminación junto con las soluciones de hardware realizadas y los resultados obtenidos. El trabajo termina con las conclusiones finales y el apartado de anexos que incluye algunos conceptos importantes de iluminación que se han tenido en cuenta.

Capítulo 1. Tecnologías de comunicaciones inalámbricas y hardware de control.

1.1 Comunicaciones inalámbricas de área personal.

La comunicación inalámbrica surge de la idea de la conectividad entre dispositivos sin la necesidad de cableado físico y con el fin de obtener una mayor movilidad y adaptabilidad de las soluciones. Las comunicaciones inalámbricas de área personal (< 100m) se realizan generalmente en el espectro electromagnético permitiendo la transmisión de la información de pequeños mensajes entre dispositivos que operan en redes de sensores inalámbricas.

1.1.1 Redes de sensores inalámbricas (WSN)

Una red de sensores inalámbrica (WSN, Wireless Sensor Network) es una red distribuida espacialmente formada por dispositivos que se comunican de forma cooperativa para intercambiar información hasta alcanzar a un nodo coordinador de la red. A su vez, el coordinador puede enviar comandos de control a cada uno de los dispositivos. La arquitectura de hardware de un nodo denominado mota contiene un microcontrolador, uno o varios sensores, un transceptor de radio y una o diversas fuentes de energía, usualmente baterías o módulos de captación de energía de su entorno (energy harvesting). La Figura 1.1 muestra el esquema del Hardware básico de una mota.

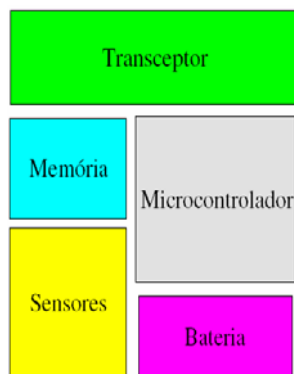


Figura 1.1. Esquema del Hardware básico.

Las motas se caracterizan por su tamaño reducido, bajo costo y facilidad de despliegue, además de poder ser configuradas como emisor o receptor, intercambiando información entre nodos a corta distancia (<100m). También permiten registrar datos referentes a los sensores locales de cada nodo (iluminancia, temperatura, humedad, presencia), ofrecer servicios de enrutamiento entre nodos sin visión directa e implementar funciones de seguridad (autenticidad, cifrado e integridad) para el intercambio de datos. Otras de sus características es su gestión eficiente de la energía que les

permite obtener una autonomía de meses o años dependiendo del sistema de gestión energética y las hacen plenamente operativas y con capacidad de soportar situaciones ambientales extremas.

La Figura 1.2 muestra una distribución de diferentes tecnologías de comunicaciones inalámbricas dependiendo de la velocidad de transmisión a nivel de capa física y de su utilización en diversas aplicaciones.

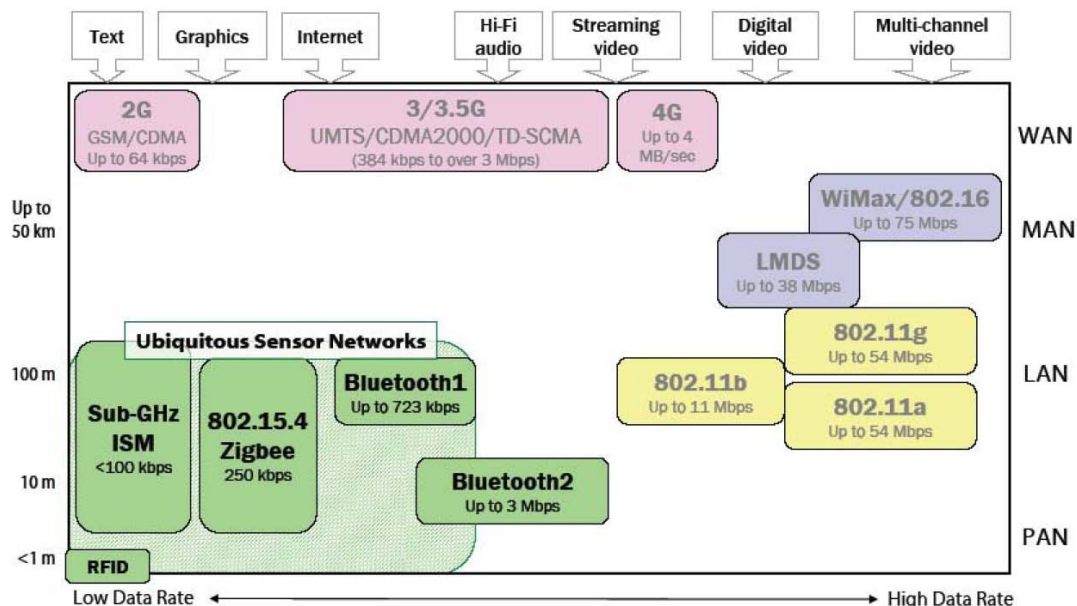


Figura 1.2. Clasificación de las comunicaciones inalámbricas.

Actualmente IEEE 802.15.4 y ZigBee se convierten en los estándares más adecuados para ser usados en redes WSN orientado a aplicaciones de iluminación para espacios interiores.

1.1.2 IEEE 802.15.4 y ZigBee

1.1.2.1 IEEE 802.15.4.

El estándar IEEE 802.15.4 define la capa física (PHY, Physical) y la especificación de la subcapa del control de acceso al medio (MAC, Medium Access Control) para dispositivos que operen en redes inalámbricas de área personal con bajas tasas de envío de datos (LR-WPAN, Low Rate-Wireless Personal Area Network).

IEEE 802.15.4 utiliza el método de codificación de canal DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) que le permite funcionar en bandas de frecuencias no licenciadas coexistiendo con otras tecnologías. Está basado en las modulaciones digitales BPSK y OQPSK que son empleadas según las bandas de trabajo que se definen a continuación (Figura 1.3):

- La banda de 868 MHz con un solo canal y utilizada solamente en Europa, utiliza una modulación BPSK y velocidades de transmisión de 20 kbps.
- La banda de 915 MHz utilizada en América del Norte y con 10 canales. Como en la banda de 868 MHz, utiliza una modulación BPSK pero con velocidades de transmisión de hasta 40 kbps.
- Y la banda de 2,4 GHz, es la más usada por ser una banda libre en todo el mundo y que cuenta con 16 canales de 3 MHz de ancho de banda. Utiliza una modulación O-QPSK obteniendo velocidades de transmisión de hasta 250 kbps.

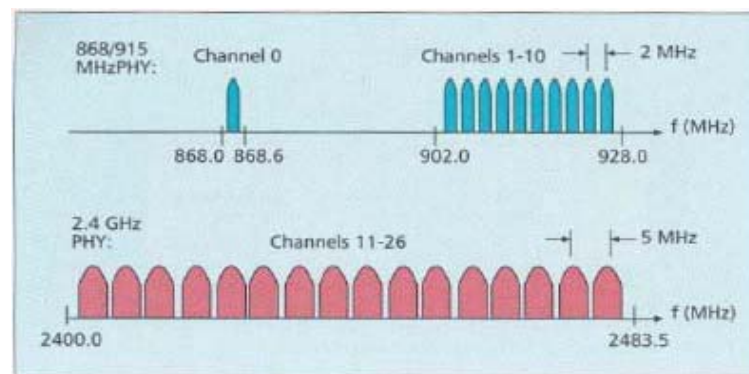


Figura 1.3. Bandas de trabajo de IEEE 802.15.4/ZigBee

En la Tabla 1.1 se resumen las principales funciones de las dos capas del estándar IEEE 802.15.4.

Tabla 1.1. Descripción de las principales funciones de las capas PHY y MAC del estándar IEEE 802.15.4.

Capa física (PHY)	Capa de acceso al medio (MAC)
<ul style="list-style-type: none"> • Detectar el nivel de energía en el canal. • Activación y desactivación del transceptor radio. • Indicación de la calidad del enlace (LQI, <i>Link Quality Indicator</i>). • Selección del canal de comunicación. • Evaluación del estado del canal (<i>Clear Channel Assessment</i>, CCA). • La transmisión y recepción a través del canal radio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Acceso al medio a través del protocolo CSMA/CA (<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>). • Generar tramas de señalización sobre la red (Beacon). • Soportar la asociación y desasociación de las PAN. • Proveer y mantener una conexión fiable entre 2 puntos MAC conectados. • Soportar la seguridad de los dispositivos.

Cada vez que un dispositivo quiere transmitir espera un tiempo aleatorio (*backoff*). Si el canal se encuentra libre, después del período de *backoff*, transmite los datos. Dentro del estándar se contemplan dos tipos de comunicación entre nodos, la comunicación con señalización (*beacon mode*) y la comunicación en modo libre (*non-beacon mode*). En el modo beacon, el coordinador de la red asigna un tiempo de transmisión para cada uno de los nodos (*Polling Time*). De esta manera, un nodo primero tendrá que esperar el tiempo que se le ha asignado para transmitir y después cumplir el protocolo CSMA/CA. Este tipo de comunicación es utilizado en redes extensas tipo árbol o mesh que cuentan con una gran cantidad de nodos. En cambio, en el modo libre, usado en redes inalámbricas de punto a punto con pocos nodos, cada nodo podrá transmitir un paquete de datos cuando quiera pero siempre siguiendo el protocolo de acceso al medio CSMA/CA.

En la Figura 1.4 se muestra la comunicación entre el coordinador y un nodo de la red en el modo beacon. El nodo escucha la trama de señalización emitida por el coordinador, que contiene información como la dirección PAN del nodo o el número de secuencia del ciclo realizado y espera el tiempo dedicado para él para enviar los datos. Para finalizar la comunicación el nodo coordinador envía un paquete de reconocimiento ACK (*acknowledge*) si los datos han sido recibidos correctamente. Si el dispositivo no recibe el ACK vuelve a enviar el paquete de datos, siempre y cuando esté dentro de su tiempo asignado.

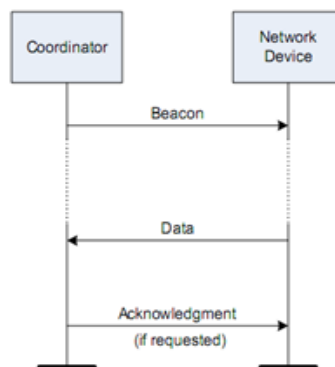


Figura 1.4. Envío de un paquete en modo Beacon.

La Figura 1.5 muestra la comunicación en el caso de que el coordinador tiene datos pendientes para un nodo de la red. En el paquete baliza (*beacon*) el coordinador informa al nodo final que quedan datos por enviar. El nodo final responde con un paquete de solicitud de datos (en inglés *Data Request*) y acto seguido, el coordinador le envía un ACK y su paquete de datos. Si el nodo final devuelve un ACK, el coordinador elimina del paquete beacon el mensaje de datos pendiente para este dispositivo.

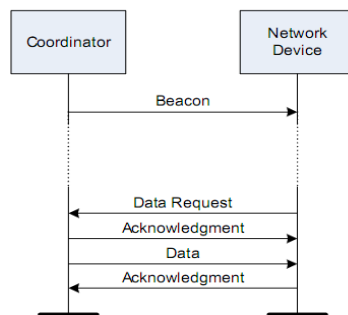


Figura 1.5. Envío de un paquete desde el coordinador en modo Beacon.

En el modo de comunicación libre, el dispositivo envía el paquete de datos al coordinador y espera un ACK (Figura 1.6). Si no recibe este paquete repetirá la operación hasta recibirlo con un máximo de tres transmisiones. Si es el coordinador quien quiere enviar datos a un dispositivo de la red (Figura 1.7) tendrá que esperar a que el dispositivo destinatario le envíe un paquete de solicitud de datos. Una vez recibido, enviará el ACK e inmediatamente el paquete de datos y quedará a la espera del ACK confirmando que el dispositivo ha recibido el paquete de datos.

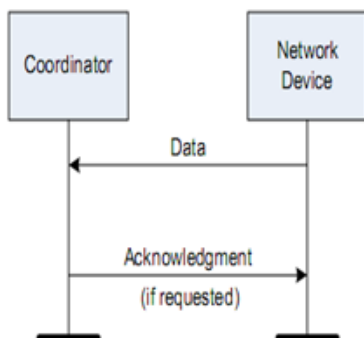


Figura 1.6. Envío de un paquete en modo libre.

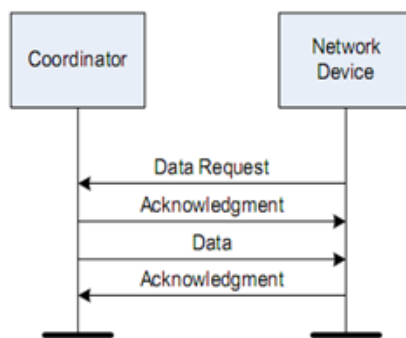


Figura 1.7. Envío de un paquete desde el coordinador en modo libre.

En relación con los dispositivos, hay dos tipos diferentes que pueden participar en una red basada en el estándar IEEE 802.15.4; los dispositivos de funcionalidad completa (FFD, Full Function Device) y los de funcionalidad reducida (RFD, Reduced Function Device). Un FFD puede comunicarse con RFDs y otros FFDs, mientras que un RFD solo puede establecer una comunicación con un dispositivo con el rol de FFD. Un RFD está pensado para aplicaciones que son extremadamente simples, como el interruptor de una luz o un sensor pasivo de infrarrojos; Los nodos RFD no necesitan enviar mensajes muy grandes (>128 bytes) y solo pueden estar asociados con un único FFD en un instante determinado. En consecuencia, el RFD puede ser implementado usando unos mínimos recursos de hardware y una memoria no volátil de reducida capacidad (<8KB).

En función de los requerimientos de la aplicación, una red de sensores IEEE 802.15.4 LR-WPAN puede estar configurada con tres topologías diferentes: la

topología en estrella, punto a punto (peer-to-peer) o tipo árbol. Con la topología en estrella la comunicación se establece entre los dispositivos y un único controlador central, denominado como el coordinador PAN. Un coordinador PAN puede tener una aplicación específica, pero tiene la obligación de iniciar, liberar, o intercambiar los paquetes dentro de la red. Todos los dispositivos que operan en una red con cualquier topología deben tener direcciones únicas de 64-bits. Con esta dirección permite realizar comunicaciones directas dentro de la PAN. También se pueden usar direcciones de 16 bits, que son asignadas a los dispositivos cuando se asocian con el coordinador y que se denotan con el término 'short address'. En relación con los requerimientos energéticos, el coordinador PAN tiene que estar siempre activo. Los nodos RFD no tienen elevados consumos energéticos (<50mA) y generalmente estarán alimentados por baterías primarias no recargables AA o baterías secundarias recargables de iones de litio-Ion o níquel metal hidruro NiMH. Entre las aplicaciones que se pueden beneficiar de una topología en estrella, caben destacar las siguientes: en domótica para la automatización del hogar, periféricos de un computador, pequeños juguetes, y en el ámbito sanitario la monitorización de la salud de pacientes.

La topología punto a punto (peer-to-peer) también tiene un coordinador PAN; sin embargo, se diferencia de la topología en estrella en que es una comunicación entre dos dispositivos que puede intercambiar información siempre y cuando este dentro de su rango de alcance. Una red peer-to-peer puede ser ad-hoc, autoorganizada y con capacidad de auto-reparación. Finalmente, la topología tipo árbol, donde los nodos están colocados en forma de árbol y desde el nodo coordinador se ramifican los demás nodos FFD y RFD permitiendo implementar redes de sensores WSN más complejas con una gran cantidad de nodos. En este caso las aplicaciones que se pueden beneficiar de esta topología son las siguientes: control industrial y monitorización, seguimiento de objetos, agricultura de precisión y la seguridad.

1.1.2.2 *ZigBee.*

La especificación ZigBee es el nombre que reciben las capas de alto nivel que complementan el estándar IEEE 802.15.4. ZigBee es una tecnología inalámbrica de bajo coste y de consumo energético reducido usada en pequeños dispositivos sensores y actuadores.

ZigBee estandariza las capas superiores de la pila del protocolo (Figura 1.8). La capa de red (NWK, Network) se encarga de: ofrecer un enlace entre la capa de acceso al medio y la capa de aplicación (APL, Application Layer), de organizar y proporcionar enrutado sobre una red de tipo multihop, de la configuración de nuevos dispositivos descubiertos y de proporcionar seguridad en la red ZigBee. Esta capa soporta las topologías de red en forma de estrella, malla y árbol.

Por último, esta la capa de aplicación. La APL engloba el application framework, el ZigBee Device Object y la subcapa de aplicación (APS, Application Sub Layer). El application framework puede tener hasta 240 objetos

de aplicación, esto es, módulos de aplicación definidos por el fabricante o por usuario que son parte de la aplicación ZigBee. El ZDO proporciona servicios que permiten descubrir unos APOs (Application Objects) de los otros, así como en organizarse en aplicaciones distribuidas. Y la APS ofrece una interfaz de datos y servicios de seguridad entre los APOs y el ZDO, además de mantener actualizada la tabla de asociaciones de la red (binding tables) en forma de base de datos.

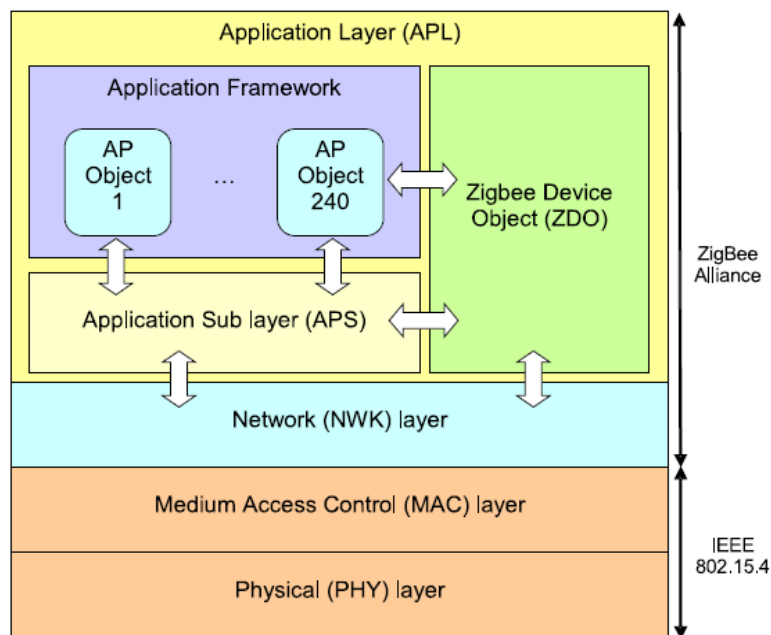


Figura 1.8. Arquitectura del estándar ZigBee.

Los dispositivos ZigBee pueden formar redes malladas conectando entre ellos múltiples nodos inalámbricos FFD y RFD. En general, ZigBee define la especificación de la capa de red para topologías en malla, estrella, árbol y peer-to-peer, y proporciona un marco de trabajo para la programación de las aplicaciones.

En una red ZigBee hay involucrados tres tipos de dispositivos: el coordinador ZigBee (ZC, ZigBee Coordinator), el router ZigBee (ZR, ZigBee Router) y el dispositivo final ZigBee (ZED, ZigBee End Device). El ZED se corresponde con un RFD definido por el estándar IEEE 802.15.4 que actúa como un dispositivo simple. Un ZR es un FFD con capacidad de realizar tareas de enrutado en la red. Y el ZC es un FFD que maneja la red completa y solo puede haber uno en cada red.

A continuación se explica con más detalle el perfil de aplicación ZigBee Light Link que es el escogido para la conectividad entre dispositivos sensores y actuadores de iluminación en este proyecto.

1.1.2.3 ZigBee Light Link.

ZigBee Light Link es un perfil de mensajes de Zigbee destinado a la interoperabilidad entre productos de la industria de la iluminación como se observa en la Figura 1.9 Su objetivo es la creación de redes que proporcionen al consumidor la gestión y el control de los dispositivos de luz, buscando siempre el confort y el ahorro de energía.



Figura 1.9. Perfil ZigBee Light Link.

Este perfil pretende que sea interoperable con otros dispositivos que se encuentran ya en los hogares usando otros perfiles ZigBee, como pueden ser, ZigBee Home Automation, ZigBee Input Device, ZigBee Remote Control o ZigBee Health Care.

En este perfil se han clasificado los posibles dispositivos en dos categorías: los dispositivos de luz y los dispositivos de control. Cada uno de estos dispositivos puede soportar uno o varios clusters, y si actúan como servidores o como clientes. En relación a los clusters, son una colección de atributos y comandos relacionados que juntos definen una interfaz de comunicaciones entre los dispositivos. Están los clusters de tipo cliente y los de tipo servidor. Los de tipo cliente son los encargados de enviar comandos que manipulan los atributos (datos) del correspondiente cluster servidor. Y los de tipo servidor son los que soportan o almacenan todos o la mayoría de los atributos del cluster definido.

En la Tabla 1.2 muestra los dispositivos definidos junto con los clusters que pueden soportar y si son de tipo servidor o cliente.

Tabla 1.2. Clasificación de los dispositivos del perfil Zigbee Light Link y clusters.

Tipo dispositivo	Descripción dispositivo	Cluster permitidos	Tipo de cluster
Dispositivos de luz	On/off light	Identificación Grupos Escenas On/Off Control nivel Control Color	Cluster servidor
	On/off plug-in unit		
	Dimmable light		
	Dimmable plug-in unit		
	Color light		
	Extended color light		
	Color temperatura light		

Dispositivos de control	Color controller	Identificación Grupos Escenas On/Off Control nivel Control Color	Cluster cliente
	Color scene controller		
	Non-color controller		
	Non-color scene controller		
	Control bridge		
	On/off sensor		

En la Figura 1.10 se muestra los controladores remotos, tanto como los de on/off como las luminarias regulables (dimerizables), o la incorporación de temporizadores que activan o desactivan las luminarias en un determinado tiempo.



Figura 1.10. Diferentes controladores de luminarias y ejemplo del sensor de presencia.

Con en el uso de diferentes sensores como pueden ser los de presencia o los de iluminancia se puede lograr reducir el consumo de energía.

ZigBee Light Link permite crear diferentes modos de regulación de la iluminación artificial con escenas que fijan unos niveles de intensidad y colores de las luminarias LED o incluso realizar algunos efectos dinámicos que hacen el lugar algo más atractivo para el usuario, como se observa en la Figura 1.11 donde en la figura de la izquierda muestra una iluminación cálida para el horario nocturno y en la figura de la derecha se configura una iluminación fría para la iluminación diurna.



Figura 1.11. Ejemplo del contraste de dos escenas creadas.

1.2 Hardware de los nodos inalámbricos.

Diseñar una mota no se reduce a miniaturizar un ordenador personal, sino que hay que tener en cuenta que se quiere obtener un espacio reducido, un consumo muy bajo de energía y un coste de los dispositivos reducido.

Actualmente, se disponen de múltiples opciones de motas para redes de sensores WSN. En este trabajo nos hemos centrado en el hardware de Libelium, el Wasmote. Este dispositivo se basa en una interfaz de programación que fue desarrollada por Arduino, creando un dispositivo de bajo coste open-hardware de libre distribución y con gran volumen en aplicaciones de propósito general.

1.2.1 Especificaciones de las motas Wasmote.

Se trata de una tarjeta que cuenta con un microcontrolador Atmel (ATmega1281), de 8 bit, basado en arquitectura RISC, que lo hace de bajo coste y repercute en que haya una gran información sobre él en internet y está orientado tanto al uso doméstico como industrial. La mota Wasmote incluye también un transceptor de comunicaciones inalámbricas IEEE802.15.4/ZigBee de XBee que trabaja en frecuencias de 2,4 GHz, 900 MHz y 868 MHz y, siendo capaz de alcanzar distancias de hasta 12 km dependiendo del modelo empleado, el tipo de antena y la potencia de transmisión configurada.

Se puede hacer especial hincapié en el bajo consumo que tiene la mota Wasmote. En condiciones normales es de solo 9 mA, pero se puede reducir a 0,7 uA en un modo de hibernación que permite ahorrar batería cuando no tiene que realizar medidas ni transmitir/recibir ninguna señal teniendo apagado el transceptor Xbee. De esta manera, puede funcionar durante varios meses con la carga de una batería recargable de iones litio Li-ion.

En cuanto a la programación, se basa en un interfaz de programación desarrollada inicialmente para la plataforma Arduino. Contiene una librería API que no es más que una serie de funciones o servicios que el sistema ofrece al programador en lenguaje C++. La estructura de los códigos está dividida en dos secciones: setup y el loop.

En lo que respecta a la conectividad, cuenta con diversos conectores de expansión que le permiten a parte de los módulos transceptores XBee (802.15.4 / ZigBee), añadir un módulo Bluetooth, un módulo GSM/ GPRS para el envío y recepción de datos a través de la red GSM o un módulo GPS con su correspondiente antena.

Estas son algunas de sus especificaciones técnicas: frecuencia de 8 MHz, memoria SRAM de 8 KB, EEPROM de 4 KB y FLASH de 128 KB, rango de temperatura de -20°C a +65°C y tensión de alimentación de 3 a 4,2 V.

1.2.2 Módulos transceptores XBEE.

Los módulos transceptores XBee y XBee-PRO fabricados por la empresa Digi International, permiten cumplir con el estándar IEEE 802.15.4 / ZigBee junto con la necesidad de bajo costo y baja potencia de las redes de sensores inalámbricas en diferentes bandas de radiofrecuencias. El módulo de la Figura 1.12 funciona en la banda ISM 2,4 GHz de frecuencia pero también existen modelos para las bandas de frecuencia de 868 MHz, 915 MHz. La Tabla 1.3 muestra las especificaciones que presentan los módulos XBee en la banda de 2.4 GHz:

Tabla 1.3. Especificaciones transceptor XBee.

Especificaciones		XBee	XBee - Pro
Rendimiento	Alcance en ambientes interiores	Hasta 30 m	Hasta 100 m
	Alcance de RF en líneas de visión para ambientes exteriores	Hasta 100 m	Hasta 1200 m
	Potencia de salida de transmisión	1 mW (0 dBm)	60 mW (18 dBm)
	Régimen RF de datos	250 kbps	250 kbps
	Sensibilidad del receptor	-92 dBm (1% PER)	-100 dBm (1% PER)
Rendimiento de potencia	Suministro del voltaje	2.8 – 3,4 V	2.8 – 3,4 V
	Corriente de transmisión	45 mA	270 mA
	Corriente de recepción	50 mA	55 mA
	Corriente Power-Down	< 10 uA	< 10 uA
Información general	Frecuencia	ISM 2,4 GHz	ISM 2,4 GHz



Figura 1.12. Módulo Wasp mote más el transceptor de Digi.

El fabricante de los transceptores Digi proporciona una aplicación para Windows llamada X-CTU, que permite la configuración de los parámetros de los transceptores XBee tales como potencia de transmisión, seguridad de los mensajes o tiempo de asociación de los nodos y contiene diferentes ficheros de configuración para actualizar el firmware de los transceptores.

1.3 Iluminación LED.

De las siglas en inglés **Light-Emitting Diode**, los LEDs son diodos que emiten luz. Los LEDs de potencia están formados por el chip de LED (dispositivo semiconductor formado por una unión P-N con una ventana que genera la luz cuando se polariza el diodo), la lente (pieza de precisión óptica que enfoca la luz del chip en dirección y forma de haz), el ánodo y el cátodo (los contactos eléctricos de los LEDs). Adicionalmente los LEDs de potencia requieren de un disipador de calor (pieza de gran tamaño de material térmico conductor que permite la disipación térmica del LED), el encapsulado (material claro que ayuda a emparejar el chip con la lente) y la carcasa (cuerpo del LED, que sirve como protección, montaje y guía de fabricación y aporta solidez al mecanismo). La Figura 1.13 muestra una representación de un LED de potencia usado en iluminación general.

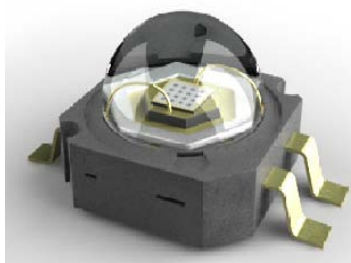


Figura 1.13. Imagen de un Led proporcionada por el fabricante Philips

Los LEDs han avanzado durante los últimos diez años hasta llegar a formar una categoría de iluminación totalmente nueva que aporta sentido y simplicidad a nuestra iluminación artificial diaria. Para hacernos una idea en la evolución actual de esta tecnología, en términos de eficiencia, los LEDs de potencia para iluminación general basados en fósforos de luz blanca cuentan con una eficiencia luminosa de más de 150 lm/W, utilizando para ello una corriente de polarización directa de 350 mA a 700 mA y requieren de fuentes controladas por corriente. La eficiencia luminosa de los LEDs es aproximadamente 1,7 veces superior a la de una lámpara fluorescente con índice de reproducción cromático CRI de 90 y (90 lm/W) y aproximadamente 11,5 veces la de una lámpara incandescente (13 lm/W), a pesar de que su índice de reproducción cromático es alto CRI de 100. Actualmente los LEDs han alcanzado una eficiencia luminosa más alta que la de una lámpara de vapor de sodio de alta presión (132 lm/W) usada en la iluminación de calles y autopistas, que hasta ahora era considerada como una de las fuentes de luz más eficientes a pesar de su bajo índice de reproducción cromático.

Además, los LEDs cuentan con serie de ventajas que aún las hacen más apropiadas para iluminar lo mismo que con cualquier otro tipo de iluminación artificial convencional. Se destacan las siguientes características de los LEDs:

- Mayor eficiencia energética cercana al 30%.
- Tienen una vida sin mantenimiento de hasta 50.000 horas (respecto a luminarias convencionales como fluorescentes que tienen una vida útil de cerca de 10.000 horas y las halógenas de 2.000 horas).

- Permiten crear luminarias con luz muy direccional basado en diseños de modernos diseños de ópticas.
- Tienen un elevado nivel de brillo e intensidad luminosa.
- Mayor eficiencia luminosa lm/w.
- No emiten rayos ultravioleta ni contienen mercurio.
- Alta fiabilidad (resistentes a los golpes y a la vibración).
- Producen una bella calidad de luz cálida o fría y logran índices de reproducción cromática (CRI > 90).

1.4 Normativa sobre iluminación en lugares de trabajo.

A la hora de diseñar sistemas de iluminación artificial en lugares de trabajo se ha de tener cuenta los criterios y recomendaciones recogidas en la norma UNE 12464-1 relativa a “Iluminación de los lugares de trabajo en interior”, redactada por parte de la Comisión de Normalización Europea en setiembre de 2002.

Esta norma se rige en el cumplimiento no solo cuantitativo, sino cualitativo de dos aspectos de la tarea visual que son el confort visual y el rendimiento de colores. Dentro del confort visual se engloban parámetros como la relación de luminancias entre una tarea a realizar y su entorno de trabajo, o el control estricto para evitar el deslumbramiento por iluminación artificial de los usuarios.

Con el cumplimiento de esta normativa se contribuye a diseñar y ejecutar instalaciones de iluminación en interiores que mejoran la calidad de vida y las condiciones de trabajo.

En esta norma se definen los requisitos de iluminación en varios lugares de trabajo según su actividad. Dado que en este proyecto se basa en el diseño de un sistema de iluminación artificial en despachos de oficina, se centrará únicamente en el capítulo de requisitos de iluminación en “Oficinas”.

La Tabla 1.4 muestra los niveles de iluminancia promedio (E_m) y rendimiento en color (CRI), así como el índice de deslumbramiento UGR que se deben de garantizar en el sistema de iluminación según el tipo de tarea o actividad que se efectúe en espacios interiores.

Tabla 1.4. Tabla con el nivel de iluminación, rendimiento de color y deslumbramiento según la normativa UNE 12464-1.

Tipo de interior, tarea y actividad	E_m [lux]	UGR	CRI
Archivo, copias, etc.	300	19	80
Escritura, escritura a máquina, lectura y tratamiento de datos	500	19	80
Dibujo técnico	750	16	80
Puestos de trabajo de CAD	500	19	80
Salas de conferencias y reuniones	500	19	80
Mostrador de recepción	300	22	80
Archivos	200	25	80

Capítulo 2. Diseño del sistema de control de iluminación.

Una vez explicado la parte teórica en la que se ha basado el proyecto, en este capítulo se explicará todo el trabajo realizado para el diseño e implementación del sistema de control de iluminación basado en el estándar ZigBee Light Link.

2.1 Arquitectura de la red de luminarias LED

Antes de empezar con el diseño del sistema, primero se explicará la arquitectura de la red y un ejemplo básico de la comunicación que se realizará entre luminarias LED que incluyen un driver controlador basado en las motas Wasmote.

La arquitectura de red está compuesta por un total de cuatro motas que incluye dos luminarias, un sensor de presencia PIR y un sensor de iluminancia. Las motas Wasmote con los sensores tienen comunicación directa con las motas ubicadas en las luminarias, con el fin de evitar saltos de los mensajes y que el control sobre las luminarias sea lo más rápido posible. La Figura 2.1 muestra la arquitectura que presenta el sistema de control de iluminación.

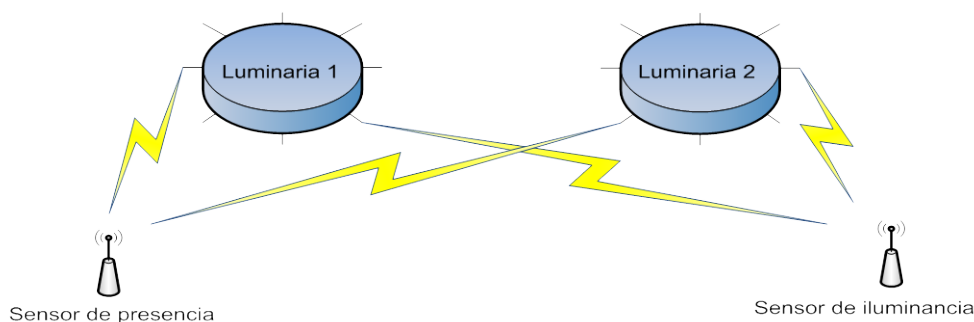


Figura 2.1. Arquitectura de la red de luminarias LED.

La luminaria 1 además tendrá la función de coordinador de la red encargado de permitir el acceso a la red de nuevos dispositivos y de transmitir los comandos de control de la red. Mientras, la otra luminaria actuará como un router de la red.

Inicialmente surgieron problemas cuando se asignaban los nodos sensores como dispositivos finales debido a que éstos solo pueden tener comunicación directa con su respectiva luminaria padre (dispositivo FFD que ha realizado su asociación a la red), restringiendo la comunicación directa con la otra luminaria. Además, cada vez que los nodos sensores despertaban de un modo de sueño profundo debía de realizar un proceso de asociación que duraba algunos segundos (< 20 s) y por tanto, ocurrían demoras en la transmisión de los mensajes de la red ZigBee a las luminarias.

Para acelerar el proceso de intercambio de mensajes en la red y los tiempos de asociación para que las luminarias actuaran lo más rápido posible ante cualquier cambio en los sensores, los transceptores de los nodos sensores fueron asignados como routers pero con la condición de que solo se activara su transceptor cada vez que tuvieran que transmitir mensajes, quedándose el resto de tiempo desactivado. Los routers tienen la ventaja respecto los dispositivos finales, que cada vez que se activan, lo único que han de hacer es comprobar que la red a la que fueron unidos sigue operativa. Si no es así, proceden a la búsqueda de nuevas redes PAN.

El ejemplo que se explica a continuación, tiene el propósito de familiarizarse con las motas de Libelium en cuanto al código programado en C++, su funcionamiento y parámetros de red, y a la vez la creación de la red PAN que se utilizará en el sistema de iluminación.

Este primer ejemplo está compuesto por un coordinador conectado a un PC mediante el Gateway Xbee, y dos Wasmotes con los transceptores XBee en modo router. Mediante el programa X-CTU se configuran los modos de los transceptores XBee-PRO, así como también, los parámetros de la nueva red PAN.

Los Wasmotes serán los encargados de enviar y recibir el mensaje mientras que el transceptor coordinador hará de nodo intermedio, pasando el mensaje transmitido por él. En uno de los Wasmotes se cargará un código para que transmita el mensaje "Hello World! I'm the first! y la información de su dirección MAC, posición del acelerómetro, temperatura y estado de batería para estudiar otras funciones que implementa la mota Wasmote. En cuanto la mota receptora, se le cargará un código para el tratamiento de los mensajes. La Figura 2.2 muestra la arquitectura para este ejemplo práctico.

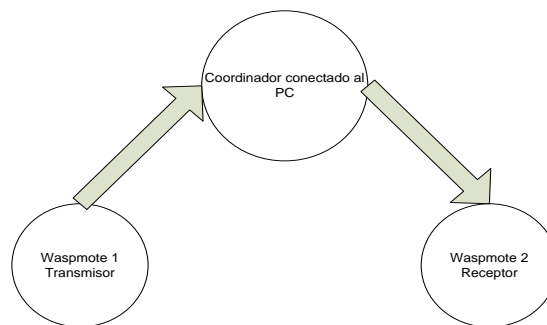


Figura 2.2. Arquitectura del ejemplo básico.

Una vez realizada las configuraciones de los transceptores y cargados los programas en los Wasmotes, se abre un hiperterminal en el coordinador para poder ver la información del mensaje transmitido, tal y como muestra la Figura 2.3.

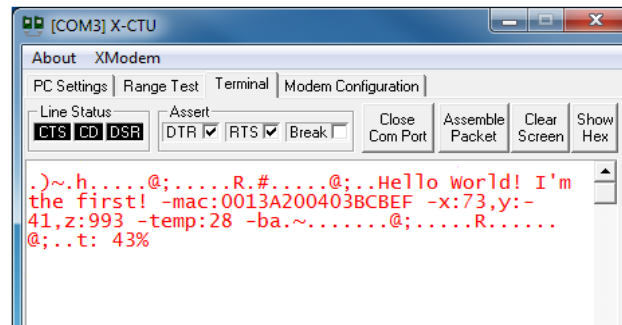


Figura 2.3. Resultado de la primera conexión entre las motas.

Como se observa en la figura anterior, aparece el mensaje enviado por la mota TX con su correspondiente información. Aparentemente se puede considerar que la comunicación entre motas se ha realizado con éxito pero, cómo se puede verificar que ha sido recibido correctamente por la mota RX? ¿O verificar que se ha unido a la red correspondiente y no a otra red equivocadamente? A la primera pregunta se podría solucionar rápidamente con el uso de los LEDs de señalización que incorpora la propia mota Wasp mote en el momento que reciba el paquete, pero la segunda sería algo más complicado que usando los LEDs. Es por eso que la manera más eficaz para comprobar que los nodos se han asociado adecuadamente a la red y que el mensaje ha sido recibido por su destinatario, es mediante el uso de un Sniffer para redes de sensores. Un Sniffer es una herramienta que sirve para capturar todos los paquetes transmitidos desde cualquier transceptor cercano en su radio de acción. Ésta herramienta procesa los paquetes capturados de la red y los muestra por pantalla según el formato de la trama correspondiente para luego almacenarlos en un formato de texto.

El Sniffer usado en este proyecto fue el “Paquet Sniffer” modelo “Smart RF04EB + CC2520EM” de “Texas Instrument” (Figura 2.4). Como se observa en la Figura 2.5 realizamos una captura de todos los paquetes que se transmiten en la red.



Figura 2.4. Paquet Sniffer de Texas Instrument.

[illegible]

Envío del paquete
con la información
al nodo receptor.

Asociación del
nodo transmisor
con el
coordinador.

Asociación del nodo receptor con el coordinador.

Figura 2.5. Resultado de la captura de los paquetes transmitido en la red.

El primer paquete que aparece es un paquete de tipo comando transmitido por el coordinador. Éste sirve para descubrir nuevos dispositivos de la red. Cuando un nuevo dispositivo recibe este paquete seguidamente envía la solicitud de unión (Beacon Request) hasta tres veces y en el momento que el coordinador recibe el mensaje inicia el proceso de asociación. Durante este proceso, el nuevo dispositivo envía información de la configuración de su transceptor ZigBee, a cambio, el coordinador le envía la información de la red para poder unirse. Una vez se han intercambiado los datos, el coordinador le envía un último paquete con la nueva dirección PAN de 16 bits que usará en la red y el estado de asociación completada.

Realizadas las dos asociaciones de los nuevos dispositivos a la nueva red, el nodo transmisor ya puede comunicarse con el nodo receptor y enviarle la información.

Comprobado que la nueva red PAN se ha creado perfectamente estableciéndose en unos de los canales de la banda de 2,4 GHz y que los dos Wasmotes se han asociado sin problemas, además de haber introducido el uso de una herramienta importante como el Sniffer para el desarrollo del proyecto, nos centraremos a continuación en la descripción del sistema de control de iluminación LED.

2.2 Descripción de un sistema de control de iluminación LED basado en ZigBee Light Link.

El diseño del prototipo del sistema de control de iluminación basado en ZigBee Light Link, se implementó en uno de los laboratorios del Instituto de Investigación en Energía de Catalunya (IREC), ubicado en Sant Adrià del Besos (Barcelona), y que cuenta con unas dimensiones de 4,1 metros por 3,5 metros (14,35 m²). Cabe destacar que este laboratorio cuenta con dos ventanas de 2 m x 0,8 m orientadas al noreste donde la iluminación natural entrante permite, durante gran parte del día, prescindir del uso de la iluminación artificial o un uso mínimo de ellas y así ahorrar energía.

La Figura 2.6 muestra una representación en 3D del laboratorio donde se instalará el sistema de control de iluminación.



Figura 2.6. Representación en 3D del laboratorio de iluminación.

El sistema de control de luminarias para este lugar no requiere de una gran extensión de dispositivos de control o de varias luminarias. Si queremos proporcionar al laboratorio de confort y a la vez ahorrar en energía, el sistema primero debe de contar con un dispositivo capaz de encender o apagar las luces en función de si hay o no personas en el interior. En segundo lugar, para hacer un sistema más inteligente y eficiente, se incorporará un dispositivo cerca de la ventana que capte la luz natural entrante y de esta forma evitar un uso innecesario de luz artificial cuando las condiciones lo permitan. Y por último y más importante, habrá un dispositivo en cada una de las luminaria que trate cada mensaje recibido y actúe adecuadamente sobre el nivel de iluminación artificial para optimizar el confort y disminuir el consumo de energía del sistema de iluminación del laboratorio.

Inicialmente, con las luminarias apagadas, la mota controladora de la luminaria se encontrará a la espera de recibir un paquete y poder tratarlo. Mientras, los otros dos nodos se encontrarán en un estado de sueño. El sensor analógico LDR (del inglés Light Dependent Resistor, resistencia que varía su valor en función de la luz recibida) se despertará cada cierto tiempo para realizar una captura del nivel de iluminación actual. Si el resultado de esa nueva captura varía respecto el anterior, será enviado a las motas de las luminarias para que mantengan actualizada el valor que aplicará sobre la regulación del nivel de iluminación de la luminaria. Si no es así, volverá al estado de sueño sin tener que habilitar el transceptor, reduciendo al mínimo su consumo de energía proporcionado por las baterías secundarias recargables.

En el momento que la mota del sensor de presencia PIR es despertado a causa de la detección del movimiento de una persona, éste enviará un mensaje a las dos motas de las luminarias. Estas dos motas en cuanto reciben el mensaje, recuperan el último valor almacenado de la iluminancia y lo aplicarán a la luminaria adaptando el nivel de regulación de iluminación artificial a la luminaria LED con su correspondiente brillo. Este valor puede variar entre 0 a 100% sobre el brillo de la luminaria. En el caso de 0 % significará que la luminaria debe de estar apagada porque la cantidad de luz natural entrante es suficiente para alumbrar todo el laboratorio.

Transcurrido cinco minutos desde el último mensaje del sensor de presencia, significará que no hay nadie en el lugar y por lo tanto, se procederá a apagar automáticamente la luminaria. Si durante ese intervalo vuelve a recibir un mensaje, se reiniciará el contador a cero. Este tiempo corresponde a los valores propuestos en el estándar de iluminación europeo UNE 12464-1.

La Figura 2.7 muestra de manera resumida la máquina de estados con las funciones del sistema de iluminación con solo una luminaria, ya que el proceso es el mismo para la segunda luminaria.

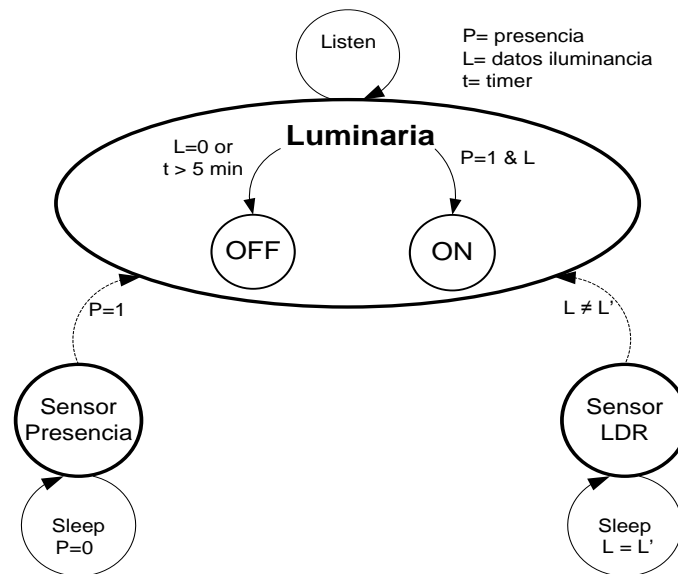


Figura 2.7. Diagrama de estados del sistema de control de iluminación en general.

2.2.1 Descripción de la mota sensor de presencia.

La mota con el sensor de presencia tiene la misión de avisar a la luminaria de la presencia de personas para que ésta se encienda o en el caso de ya estarlo, que se mantenga encendida dependiendo de las condiciones de iluminación natural.

Como uno de los objetivos de este proyecto es la reducción del consumo de energía, esta mota mientras no capte presencia de ninguna persona, deberá estar en un estado de mínimo consumo pero siempre atento a cualquier movimiento. Por lo tanto, se definen dos estados de funcionamiento en la mota: un estado para la transmisión del comando de encendido a las luminarias cuando detecte presencia y otro estado de mínimo consumo en el que permanecerá mientras no detecte nada.

Si hacemos un repaso a las especificaciones de las motas Wasp mote, ésta permite dos estados de bajo consumo, Sleep o DeepSleep y Hibernate. La

diferencia entre los estados sleeps y hibernar es que, en los primeros el programa principal se detiene y el microcontrolador entra en un estado de latencia en el que es despertado por cualquier interrupción, bien por los sensores o por una alarma anteriormente programada. Mientras que en el estado de hibernación no solo detiene el programa principal sino también el microcontrolador, desconectando por completo todos los módulos incorporados (sensores, transceptores, acelerómetro,...) y solo es despertado por una alarma previamente programada. De ahí su consumo tan bajo respecto los modos sleeps.

Como pretendemos que la mota se despierte por la interrupción de un sensor, usaremos uno de los dos modos sleeps, quedando de la siguiente manera el diagrama de estados de funcionamiento de la mota.

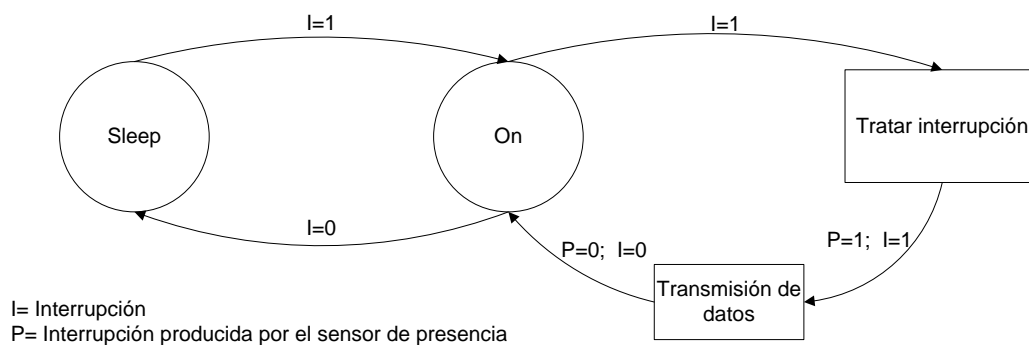


Figura 2.8. Diagrama de estados de la mota sensor de presencia.

El nodo comienza en el estado de sueño dejando solo habilitado el módulo del sensor para que así pueda despertarlo. En el momento que capta presencia, se despierta y va a verificar que la interrupción es producida por el sensor de presencia, mediante su bandera de interrupción. Inicializado la bandera, seguidamente se dirige a la rutina de transmisión de datos, donde ahí prepara el mensaje con las direcciones de destino, cluster al que pertenece y la información útil ($P=1$) y la envía a las luminarias. Realizada la transmisión y recibido el ACK vuelve al estado sleep a la espera de la siguiente interrupción que se produzca.

Si pasamos a la parte del código de la mota, la Figura 2.9 presenta el diagrama de flujo del código implementado en la mota:

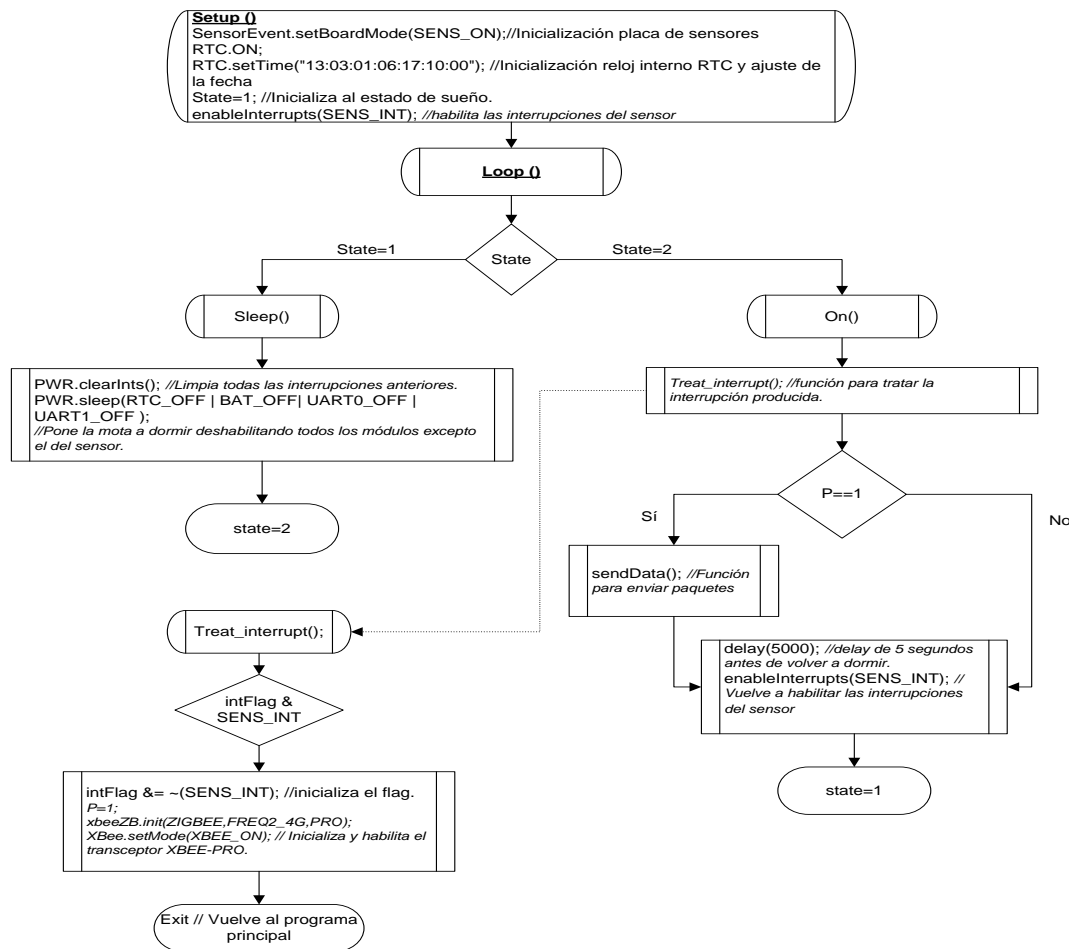


Figura 2.9. Diagrama de flujo del código de programa del sensor de presencia.

Respecto al sensor de presencia, se utilizará uno proporcionado por el fabricante de Waspote, Libelium (Figura 2.10), de las siguientes características:

Sensor piroeléctrico (PIR): dispositivo digital que detecta el movimiento mediante la medición de cambios en los niveles de radiación infrarroja emitida por los objetos a su alrededor. Como respuesta al movimiento, el sensor cambia el nivel lógico en el pin de salida.

- Rango de medición: hasta 7 metros.
- Ángulo de ataque: 120 °.
- Tensión de alimentación: 3 a 6 V.
- Temperatura de funcionamiento: 0 a 50 °C.
- Respuesta on/off (0 y 1) dependiendo si detecta movimiento.

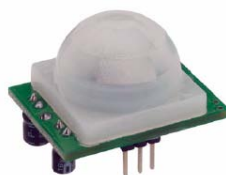


Figura 2.10. Imagen del sensor piroeléctrico (PIR) utilizado.

2.2.2 Descripción de la mota del sensor LDR.

Esta segunda mota incorpora un sensor LDR cuya función es analizar el nivel de iluminancia interior proveniente de la luz natural y artificial. El resultado de ese análisis será enviado a las motas de las luminarias con el fin de que éstas adapten la iluminancia artificial teniendo en cuenta la luz natural en el entorno de trabajo, con la simple regla de a mayor cantidad de luz natural, menor luz artificial. Hay que tener en cuenta de que este valor no será aplicado en la luminaria hasta que el sensor de presencia de la orden de encendido.

Ahora, esta descripción hay que aplicarla en la mota siguiendo con el principal objetivo de reducir al mínimo posible el consumo sin afectar en su funcionamiento. Para ello, se volverá a utilizar el estado de sueño 'Sleep' para reducir el consumo como en el sensor de presencia, pero con la diferencia de que éste se despertará en dos condiciones: programando una alarma para que la mota se despierte cada cierto tiempo o por la interrupción producida cuando el nivel de luminancia esté por debajo de un umbral fijado.

Cada vez que el Wasmote se despierta por la alarma y realice la captura, el resultado será comparado con el anterior que fue transmitido para reducir el uso constante del transceptor radio. Si el resultado es idéntico volverá al estado de sueño, pero si es diferente será transmitido. La Figura 2.11 muestra el diagrama de estados de la mota con sensor LDR.

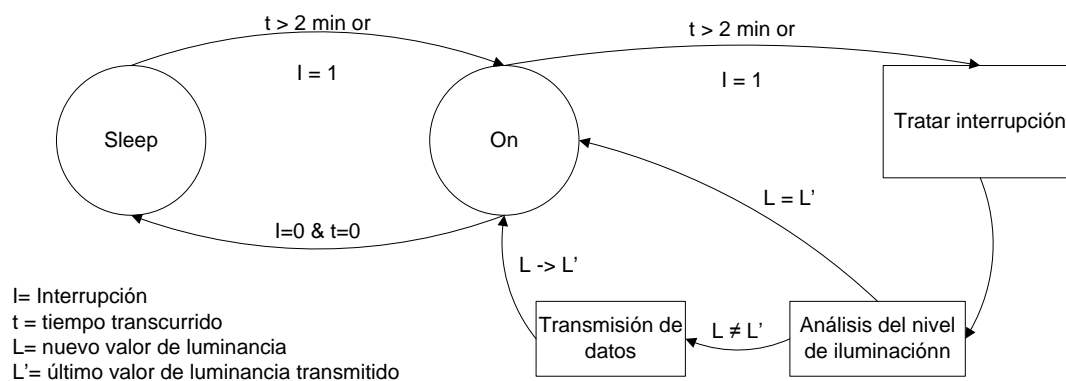


Figura 2.11. Diagrama de estados de la mota sensor LDR.

2.2.2.1 Caracterización del sensor LDR.

Un sensor LDR es una fotorresistencia que disminuye su resistencia cuando aumenta la intensidad de la luz incidente. Su resistencia puede variar de unos cuantos megahoms cuando no hay luz hasta unos pocos ohmios cuando hay luz incidente.

Este sensor se introduce en una de las entradas analógicas que dispone la mota Wasmote. Cada entrada analógica está conectada a un convertidor analógico digital (ADC) que utiliza el microcontrolador de aproximaciones sucesivas de 10 bits. El valor que se obtiene del sensor es convertido en un

número entero entre 0 y 1023, donde el 0 correspondería al nivel más bajo de luz (oscuridad por completo) y 1023 al más alto posible por el sensor. En el programa principal, el valor es traducido en voltios que correspondería si al sensor le aplicásemos directamente una tensión de 3,3 V y leyéramos el resultado con un multímetro. 1023 corresponde con los 3,3 V.

A la hora de caracterizar el sensor LDR para conocer su relación respecto a la iluminancia en unidades de lux, se ha creado la Figura 2.12 con diferentes valores de iluminación recogidos por el sensor y por un luxómetro. Para una mejor lectura del valor obtenido por el sensor, se ha multiplicado por el mil en el programa.

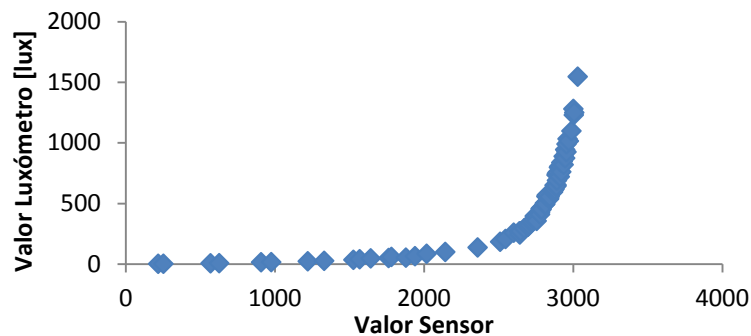


Figura 2.12 Relación sensor LDR vs iluminación.

Con esta figura determinamos el nivel de iluminación que hace referencia al valor obtenido del sensor. La ecuación exponencial que se obtiene de la figura es la ecuación (2.1):

$$y = 0,0055 e^{0,0041x} \quad (2.1)$$

Para un valor de 2800 en el sensor, significará que está captando 532 lux de iluminancia en lux.

Centrándonos otra vez con el diseño del sistema de control, se fija un umbral de iluminancia en el que se prescindirá del uso de la iluminación artificial. Para poder prescindir del encendido de la luminaria, se debe garantizar que a partir de la iluminación natural exterior en cada uno de los puestos de trabajo a la altura de 1 metro se está por encima de los 500 lux (según normativa UNE 12464-1, apartado 1.4). Entonces, para fijar este umbral hemos medido los niveles de iluminancia en puesto de trabajo por encima de los 500 lux y seguidamente, el nivel de iluminancia en el lugar donde se colocará el sensor LDR. Como resultado hemos obtenido que para un valor en el sensor mayor de 2950 (984 lux reales) obtendremos un mínimo de 550 lux en los puestos de trabajo.

Por otro lado, se fija otro umbral mínimo para que por debajo de él sea necesario el 100% del uso de la luminaria. Ese valor se fija en 2650 (300 lux de iluminación natural).

Para poder regular el brillo de la luminaria entre el 0 y el 100%, se utilizará la modulación por ancho de pulso PWM (Pulse With Modulation), que incorpora el microcontrolador de la mota Wasmote.

La señal de PWM es una onda cuadrada con una frecuencia que permite modificar su ciclo de trabajo y con ello, controlar la cantidad de energía aplicada a un driver controlador de una luminaria LED. El PWM que incorpora Wasmote es una señal en amplitud de 0 a 3,3V y con una resolución de 8 bits, es decir, que puede configurar hasta 255 valores intermedios entre 0 y 100%. En la Figura 2.13 se puede ver los diferentes ciclos de trabajo del PWM dependiendo del valor del registro de control del modulo PWM de la mota.

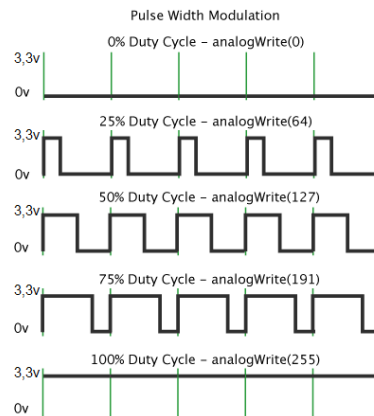


Figura 2.13. Ciclos de trabajo del PWM.

En este caso la mota con sensor LDR enviará el valor calculado de PWM requerido a las luminarias. Los valores del PWM estarán comprendidos entre los umbrales anteriormente fijados. Para valores menores de 2650 se asignará el PWM máximo, 255, mientras que para valores mayores de 2950 el valor de PWM será igual a 0.

A partir de la Figura 2.14 se puede determinar la ecuación que seguirá la mota del sensor para determinar el valor de PWM que debe enviar hacia la luminaria LED.

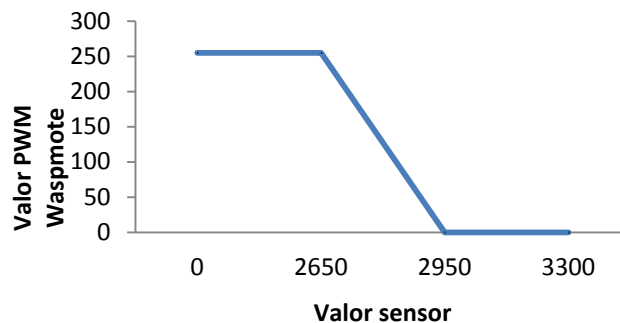


Figura 2.14 Relación PWM vs sensor.

La ecuación (2.2) es la siguiente:

$$pwm = -0,7286x + 2185,714 \quad (2.2)$$

Una vez caracterizado el sensor LDR y definida la ecuación del PWM, ya se puede pasar al diagrama de flujo (Figura 2.15) que tendrá el código de la mota.

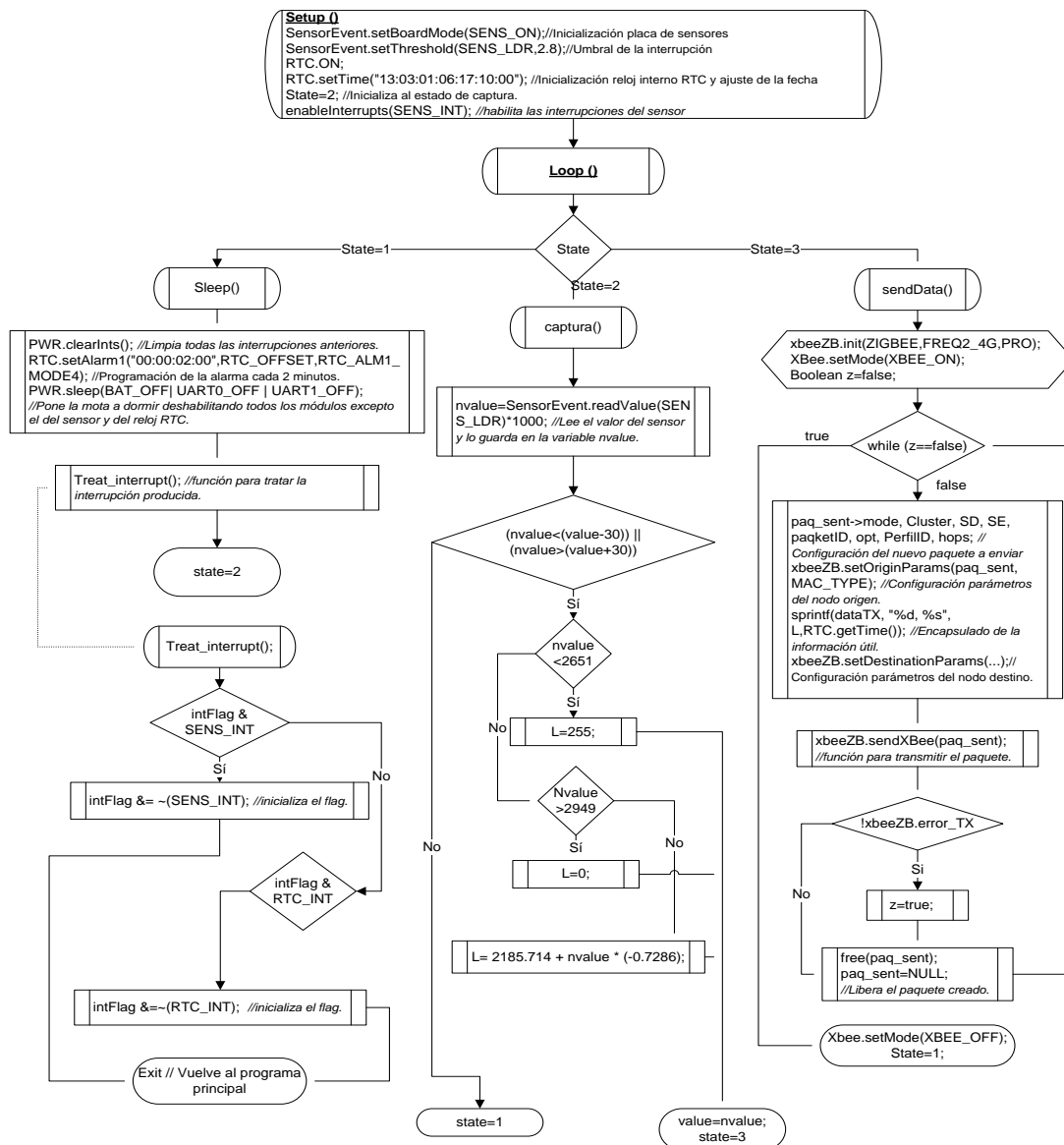


Figura 2.15. Diagrama de flujo de la mota sensor LDR.

Para evitar posibles reenvíos innecesarios del valor de iluminancias cuando se producen pequeñas variaciones entre captura y captura, se pone la condición de que si el nuevo valor supera al anterior transmitido más un offset de 30, será enviado ese nuevo valor a la luminaria. Pero si no es el caso, el nodo sensor volverá al estado de sueño.

2.2.3 Descripción de la mota control de luminaria.

En esta aplicación de iluminación, las motas Wasmote con sensores son las encargadas de enviar los mensajes con la información útil hacia las luminarias, y éstas se encargan de recibirlos y tratarlos según su finalidad. Para la correcta recepción de los mensajes, las luminarias siempre deben estar disponibles para recibir mensajes sin demoras o pérdidas de paquetes. Debido a su continuo funcionamiento, son dispositivos que reciben energía del driver controlador de luminaria conectado a la red eléctrica que alimenta a la luminaria.

La Figura 2.16 muestra el diagrama de estados que se implementó en la mota Wasmote controladora de la luminaria LED:

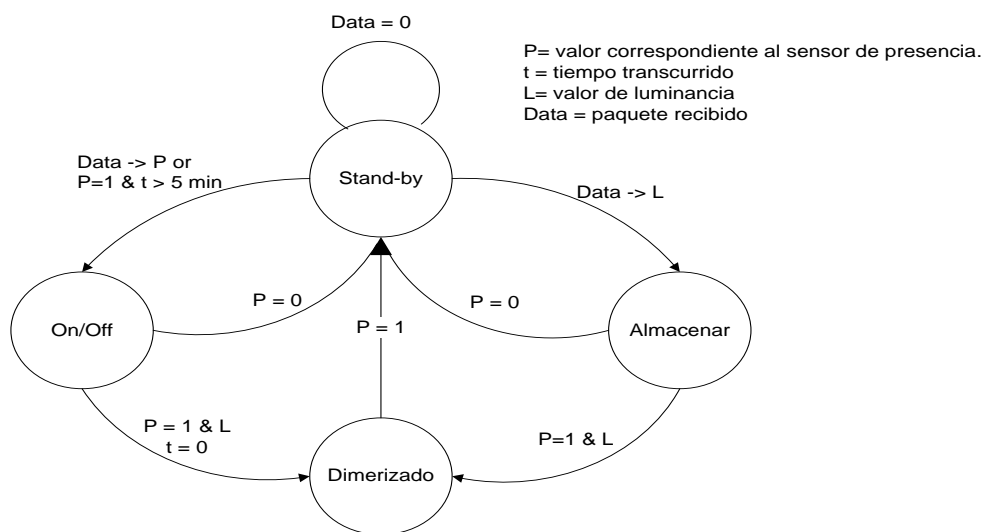


Figura 2.16. Diagrama de estados de la mota que controla de la luminaria.

El programa comienza en un estado de stand-by a la espera de recibir algún mensaje de la red de sensores. En el momento que recibe un mensaje y ha sido tratado, tiene dos opciones: la primera, si el mensaje procede del sensor de presencia (Data->P) con el comando de encendido, se dirigirá rápidamente al estado On/Off para encender la luminaria (P=1). La luminaria se encenderá con el último valor PWM que haya recibido del sensor LDR y volverá al estado inicial, pero antes iniciará un contador (t). Y la segunda opción, corresponde a que si el mensaje procede del sensor LDR, se dirigirá al estado de configuración donde almacenará el nuevo valor de PWM. En el caso de que reciba este nuevo valor y la luminaria esté encendida, pasará al estado dimerizado para regular el brillo de la luminaria según el nuevo valor de PWM. Pero en el caso de que la luminaria esté apagada, simplemente volverá al estado inicial. Adicionalmente, si durante el intervalo de 5 minutos ($t=5'$) y con las luminarias encendidas no ha vuelto a recibir ningún otro mensaje procedente del sensor de presencia, automáticamente la luminaria pasará al estado Off de apagado (correspondiente a que el lugar está vacío). Pero si durante el intervalo de tiempo de cinco minutos, recibe un nuevo mensaje del sensor de presencia, se volverá a inicializar el contador t a cero.

Se ha de tener en cuenta que el tiempo en el que permanecerá en los estados On/Off, Dimerizado y Almacenar será lo más corto posible para poder volver en cuanto antes al estado inicial y tratar el siguiente mensaje de la red.

La Figura 2.17 muestra el diagrama de flujo que seguirá el programa que se cargará en la mota de la luminaria.

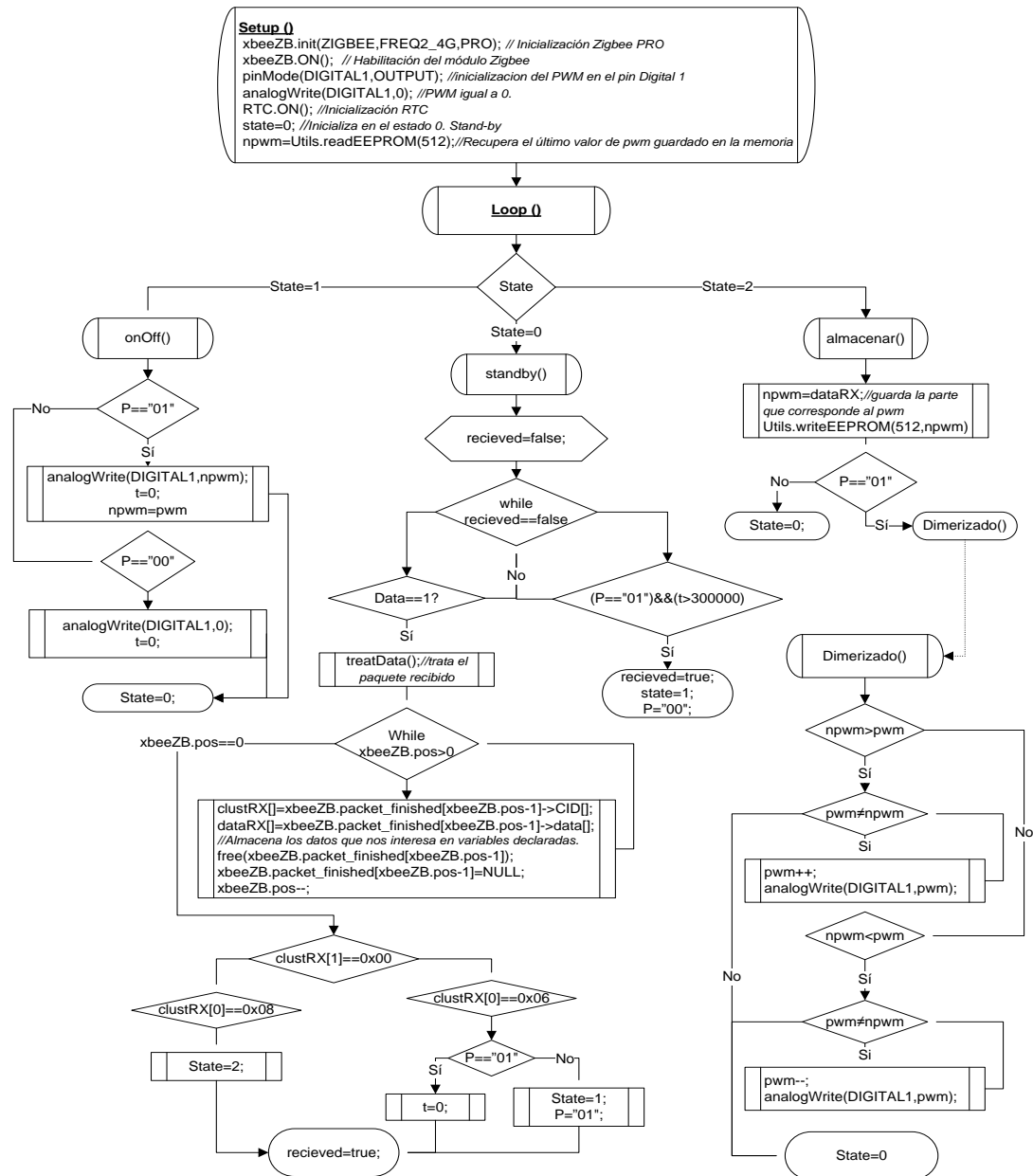


Figura 2.17. Diagrama de flujo de la mota que controla la luminaria.

El valor almacenado del nuevo PWM recibido, será guardado en la memoria interna de la placa para que en hipotéticos casos en que se fuera el suministro eléctrico y dejase a la mota sin energía, lo mantuviese una vez que se reiniciase.

2.3 Aplicación del estándar ZigBee Light Link.

A la hora de implementar el estándar ZLL en el sistema para garantizar la interoperabilidad con los dispositivos ZigBee de otros fabricantes que utilicen el mismo perfil u otro, se tendrá en cuenta los dispositivos y sus clusters que soportan el estándar.

Debido a que las especificaciones ZigBee Light Link son muy recientes en la fecha de escritura de esta memoria y que el documento con las especificaciones que establece el estándar no se pudo obtener hasta un mes antes de la redacción de nuestros resultados, su estudio y práctica se ha propuesto partiendo de motas ZigBee con el perfil ZigBee Home Automation.

La Tabla 2.1 especifica los tipos de dispositivos y clusters que se han utilizado en este sistema de iluminación respecto la Tabla 1.2. (Clasificación de los dispositivos del perfil Zigbee Light Link y clusters) y teniendo en cuenta en qué tipo de mota se implementa (sensor-actuador).

Tabla 2.1. Dispositivos ZigBee Light Link y clusters utilizados.

Mota	Dispositivo ZLL	Clusters	Tipo Cluster
Actuadora sobre luminaria	Dimmable light	On/Off Level Control	Servidor
Sensor presencia PIR	On/Off sensor	On/Off	Cliente
Sensor LDR	Non-Color controller	Level Control	Cliente

2.3.1 On/Off Cluster.

El dispositivo que actuará como el servidor de este cluster serán las motas que controlan las luminarias (Dimmable light, ID 0x0000). Los atributos definidos en el servidor son, el campo obligatorio OnOff con el identificador 0x0000 y el atributo OnTime (0x4001) que contiene el tiempo que permanecerá la luminaria encendida. Los comandos que recibirá este cluster como servidor serán On y Off.

En cuanto el cluster cliente, este rol en la red lo desempeñará el dispositivo sensor On/Off (ID 0x0850) y solo se encargará de generar los comandos On (0x01) y Off (0x00).

2.3.2 Level Control Cluster.

Para este cluster es igual que el anterior, la luminaria LED será el dispositivo Dimmable light que actuará como servidor. Su único atributo definido será el Current Level (0x0000) que contendrá la información del nivel de iluminancia (en este proyecto corresponde con el nivel del registro de PWM). El comando

que recibirá por parte del cliente será el Move to Level (0x00) junto con el valor del nivel a mover.

En cuanto el cluster cliente, lo desempeñará la mota sensor LDR que es el dispositivo Non-color controller (ID 0x0820) y solo se encargará de generar el comando Move to Level (0x00) y el valor del nivel a mover (PWM).

La Figura 2.18 muestra la estructura que presentará cada mensaje transmitido según el estándar ZigBee Light Link:

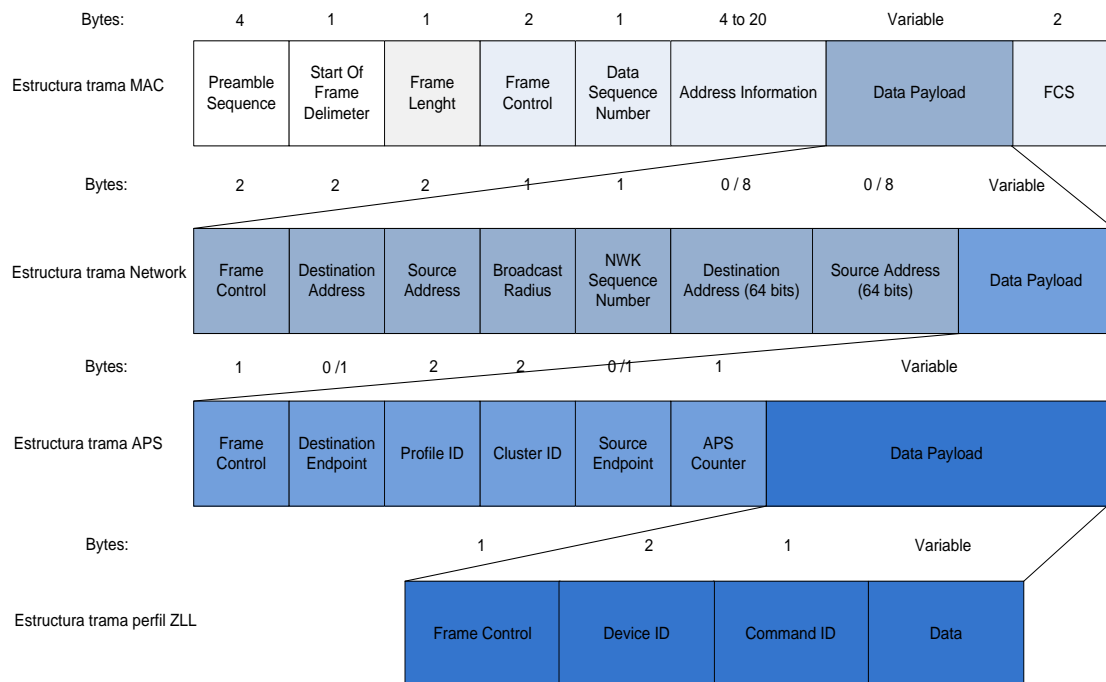


Figura 2.18. Estructura de la trama transmitida.

En el caso de que el paquete esté encriptado, el payload se reduce a 66 bytes en modo unicast o por el contrario tendrá 84 bytes en modo multicast. Adicionalmente, si el paquete no está encriptado, el payload puede ser de 74 o 92 bytes, según los modos unicast o multicast.

En el campo de Data se introducirá aparte del valor de PWM en el caso del sensor LDR, la fecha y hora en que se transmite el paquete y el estado de la batería.

2.4 Diseño de la luminaria LED y del driver de control.

Para el prototipo del sistema de control de iluminación, se implementaron dos módulos de luminarias LEDs diferentes. El primero, es un una placa PCB en sustrato de fibra de vidrio FR4 con cuatro LEDs de potencia con fosforo incorporado, ubicados en serie a la salida del driver de control para alimentarse a una tensión de entre 12-24 VDC. Esta placa fue diseñada en el laboratorio de

iluminación de IREC. Los LEDs utilizados en esta luminaria son del fabricante Phillips y pertenecen al modelo Luxeon Rebel White con las siguientes características:

- Temperatura de color: 4000K.
- CRI típico: 85
- Flujo luminoso típico: 85 lm @ 12VDC y 100mA.
- Tensión típica: 3 V.
- Tensión mínima: 2,55 V
- Corriente media: 350 mA.

La Figura 2.19 muestra el primer módulo de LEDs con una entrada para su alimentación y un difusor térmico para aislar el calor generado por los LEDs.



Figura 2.19. Primer modulo de cuatro LEDs en serie diseñado para el prototipo de luminaria LED.

El segundo módulo en cambio, es un módulo más robusto y compacto compuesto por tres LEDs de potencia OSRAM Dragon White dispuestos en serie en un sustrato de aluminio MCPCB y un disipador térmico ensamblado en el laboratorio de iluminación de (IREC). Este modulo tiene un flujo luminoso de 290 lúmenes, una temperatura de color más cálida de 3000K blanco, una tensión de alimentación de 12 V y una potencia de 4,2 W. La Figura 2.20 muestra su diseño final sin el difusor de la luminaria.

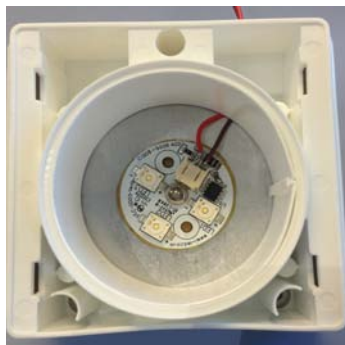


Figura 2.20. Diseño del segundo módulo prototipo de luminaria LED para iluminación general.

Para la alimentación de estos módulos y la regulación de la iluminancia en función del PWM de la mota, se diseñó un driver de control de iluminación LED con el circuito integrado LM3406. El LM3406 es un regulador DC-DC (Buck) monolítico que está diseñado para proporcionar una corriente constante a los LEDs de alta potencia. El esquema que muestra la Figura 2.21 es el que contiene el driver de control con el LM3406 y permite regular hasta cinco LEDs mediante el control PWM de la tensión. Tiene una alimentación de 12 V a 24 V, una frecuencia de conmutación interna de 550 KHz y una corriente máxima de 2 A.

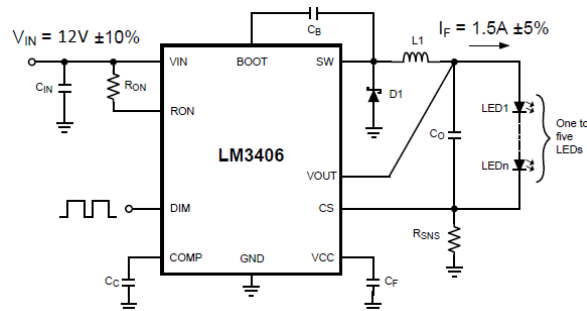


Figura 2.21. Esquema del diseño para el driver de LEDs.

Con la ayuda del programa EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor) se diseñaron los dos circuitos impresos para los drivers de las dos luminarias LED.

El último componente que falta para tener por completo los componentes de la luminaria, es el convertidor AC-DC. Para las fuentes de alimentación se utilizaron dos Traco Power compactos en una misma luminaria; uno para alimentar el driver y el módulo de LEDs de 12 V y el otro para la alimentar el Waspnote de 3.3 V.

Los Traco Power se integran en el circuito impreso del driver con tal de reducir espacio en la luminaria LED.

2.5 Distribución de las motas y simulación con Dialux.

Una vez tenemos el diseño del funcionamiento cada una de los Waspnotes y de los módulos LEDs con sus driver de control que utilizarán en el primer prototipo del sistema de control de iluminación, pasamos a su distribución en el laboratorio donde más adelante se recogerán los resultados finales. Con Dialux se efectuó una simulación por ordenador de diferentes ambientes de luz natural y artificial para observar los diferentes niveles de iluminación existentes en el laboratorio según la distribución espacial de las luminarias.

La mota con el sensor de iluminancia se colocará en la primera ventana entrando por la puerta ya que es en este punto donde existe la mayor cantidad de iluminancia natural producida por el sol a lo largo del día durante el año. El

sensor de presencia PIR se colocará en la esquina cercana de la segunda ventana y mirando hacia la puerta para garantizar mayor campo de visión que permita la detección de personas. Y los módulos drivers controladores se colocaran en cada una de las luminarias del laboratorio simulando su actuación como se observa en la Figura 2.22.

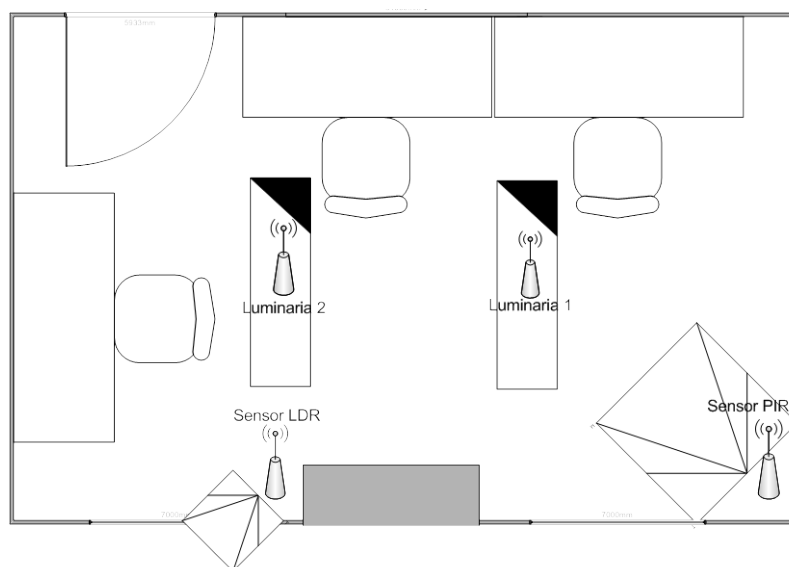


Figura 2.22. Distribución de las luminarias y sensores del sistema de control de iluminación en el laboratorio.

Para el diseño de sistemas de iluminación, DIALux permite la creación de proyectos de iluminación en interiores y exteriores simulando los niveles de iluminación en cualquier momento del día y del año teniendo en cuenta adicionalmente la ubicación del despacho. Con este software se efectuaron todos los cálculos luminotécnicos y consumos energéticos para poder justificar el cumplimiento de todas las normas de iluminación en edificios. Una de las ventajas que tiene DIALux, aparte de tener resultados experimentales en poco tiempo con ambientes en 3D, es que está abierto a todos los fabricantes de luminarias, hecho que permite seleccionar siempre la luminaria y el modelo deseado para incluir en un proyecto de iluminación.

El propósito del uso de Dialux en este proyecto ha sido el de simular la iluminación del laboratorio en tres momentos del día y con luminarias LEDs equivalentes a las actuales luminarias fluorescentes del laboratorio de iluminación de IREC.

Los resultados de la simulación además, permitieron estudiar la regulación del brillo de las luminarias respecto la iluminación natural del despacho, para cumplir en todo momento con el mínimo de 500 lux en cada puesto de trabajo (especificado en la normativa UNE 12464-1 del apartado 1.4).

En la Figura 2.23, simulada a las 9 horas de la mañana, se aprecia que la luz natural entrante es suficiente para cumplir con el nivel mínimo de iluminación prescindiendo del uso de las luminarias.

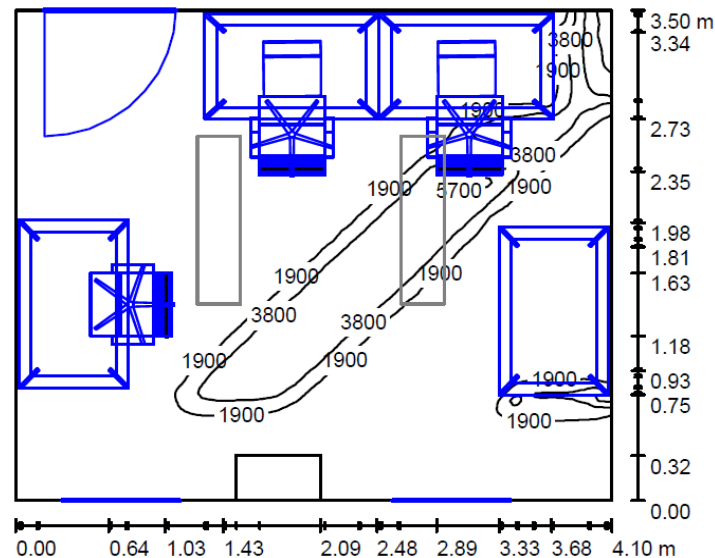


Figura 2.23. Nivel de iluminación a las 9 horas de la mañana.

La Figura 2.24, corresponde a una simulación de la misma sala cuatro horas más tarde donde se puede observar que en el centro de la habitación es donde se concentra el mayor nivel de iluminación junto con las proximidades de las ventanas. Esto es debido a que el descenso de la iluminación exterior obliga a usar las luminarias para garantizar el mínimo de iluminancia para cumplir con la normativa UNE 12464-1. Con solo el 50% del uso de las luminarias es suficiente para obtener alrededor de los 500 lux en los puestos de trabajo.

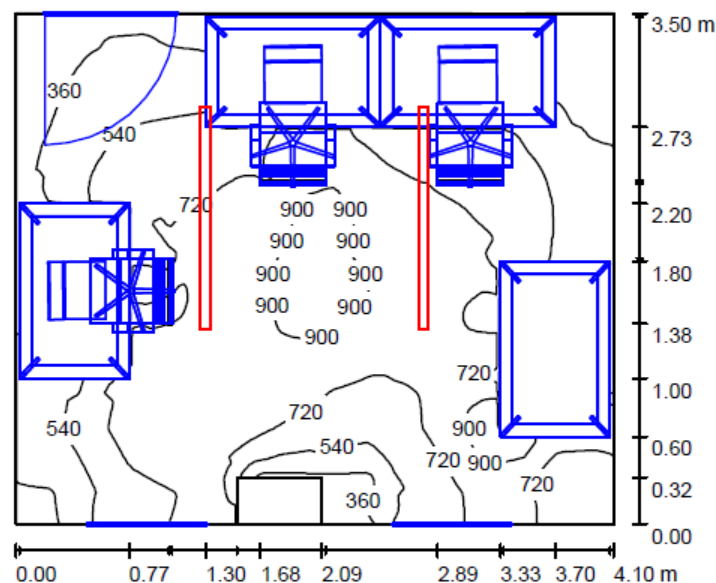


Figura 2.24. Nivel de iluminación a las 13 horas.

Y la tercera simulación (Figura 2.25), situándose totalmente de noche con ningún tipo iluminación externa, se puede observar como el uso del 100% de la iluminación de las luminarias garantizan los niveles de iluminancia en lux exigido por la normativa UNE 12464-1.

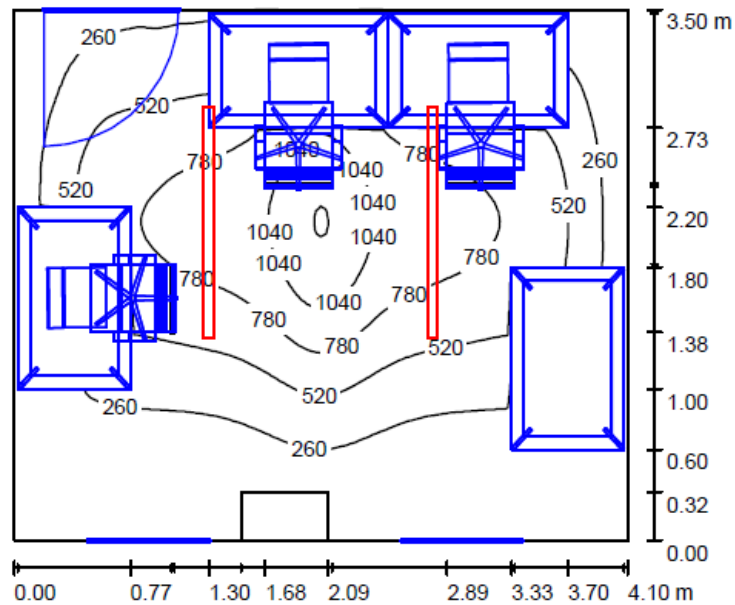


Figura 2.25. Nivel de iluminación a las 21 horas.

Como conclusión de estas simulaciones según las figuras 2.23, 2.24 y 2.25, en cualquier momento del día, bien aprovechando la luz natural o bien con el uso de las luminarias parcial o total, se consigue garantizar el mínimo de iluminancia establecido en cada uno de los puestos de trabajos distribuidos en la habitación.

Aunque esto no deja de ser una simulación, siempre hay que verificar en la vida real cada uno de los resultados obtenidos para el cumplimiento de la normativa UNE 12464-1 vigente.

Capítulo 3. Puesta en marcha del sistema y resultados obtenidos

3.1 Sistema de control de iluminación.

Una vez está todo preparado, se realizan dos primeras prueba del sistema en las que aparecen dos errores que impiden el funcionamiento correcto del sistema. Estos errores se comentan a continuación.

3.1.1 Calibración del sensor de presencia PIR.

En la primera prueba del conjunto del sistema, surgió un problema que ya venía apareciendo en las pruebas previas del sensor de presencia. Cuando provocamos la interrupción del sensor pasando por delante de él para que despertara y transmitiera un mensaje hacia el nodo de la luminaria, comprobamos que el nodo sensor captaba nuestros movimientos y despertaba la mota pero no transmitía ningún mensaje.

Abriendo un hiperterminal en el ordenador para verificar los datos del sensor, observamos que aunque el modulo captaba nuestros movimientos, no levanta la correspondiente bandera del sensor. Cuando se verificaba el tipo de interrupción que lo había provocado, no se identificaba ninguna bandera y volvía el nodo al estado de sueño.

Tras buscar información sobre sensores de presencia PIR, encontramos que para algunos lugares este tipo de sensor requería de más tiempo de preparación para comenzar a operar de forma adecuada. Esto se debe a que tiene que ocurrir la adaptación a las condiciones propias de operación del ambiente donde está instalado. Este período de calibración puede prolongarse hasta varios minutos y se recomienda la ausencia de personas en las proximidades del sensor.

Asumida esta información, se procedió a realizar la calibración del sensor sin presencia alguna de personas y de un tiempo de aproximadamente 5 minutos.

3.1.2 Corrección de la configuración del timer del modulo de PWM del Waspnote

Después de probar que la calibración del sensor de presencia se había efectuado correctamente y que transmitía el mensaje de encendido de luminarias adecuadamente, en la segunda prueba de todo el conjunto nos encontramos con un nuevo problema en la tensión de alimentación a los módulos LEDs.

En el momento que debía encenderse los módulos LEDs en cualquier ciclo de trabajo del PWM, excepto al 100%, aparecía un nivel de parpadeo (flicker)

notable en los LEDs. Este parpadeo estaba provocado por la reducida frecuencia de conmutación del PWM en la salida del Wasmote. Comprobado que el driver funcionaba correctamente mediante la simulación de un PWM con el generador de frecuencia, conectamos la salida del Wasmote a un osciloscopio digital Agilent para ver la salida del PWM. Se observó que la frecuencia de trabajo era de apenas 61,35 Hz, algo baja para el funcionamiento adecuado de los LEDs.

Una primera solución que probamos fue introducir un filtro formado por un condensador y una resistencia a la salida del Wasmote. Con el filtro se pretendía reducir el rizado de la señal PWM y evitar el nivel de parpadeo molesto. La Figura 3.1 muestra dos capturas en el osciloscopio de la señal PWM (61,35 Hz) más la salida de uno de los LEDs a dos ciclos de trabajo diferentes.



Figura 3.1. Señal del PWM más filtro DC y ciclos de trabajo al 25 y 50%.

El resultado de la integración del filtro fue negativo ya que continuaba apreciando el parpadeo en los LEDs. La segunda opción fue modificar la frecuencia de trabajo del PWM en las librerías del Wasmote.

La mínima frecuencia que se establece para evitar el parpadeo de los LEDs es de 120 Hz. Nuestro propósito fue el de modificar la frecuencia de trabajo del PWM a una frecuencia por encima del mínimo y así asegurar que no existiese ningún parpadeo en ninguno de los diferentes ciclos de trabajo. Para ello, tuvimos que adentrarnos en la librería API del Wasmote y modificar el registro que controla el timer del PWM.

El microcontrolador ATmega 1281 cuenta con 5 timers diferentes en los cuales, cada uno contiene tres registros de 8 bits. Nuestro PWM está controlado por el timer 3. Los PWMs que posee el microcontrolador pueden operar de cuatro modos diferentes: modo normal, modo rápido, modo PWM corrector de fase y modo PWM corrector de fase y frecuencia. Cada uno de ellos configura la frecuencia de trabajo de forma distinta. En nuestro caso, el PWM trabaja en modo corrector de fase y la frecuencia se obtiene de la siguiente ecuación (3.1):

$$f_{\text{PWM}} = \frac{f_{\text{CLK}}/2}{N \cdot 510} \quad (3.1)$$

La variable N representa el preescalador divisor por un factor de (1, 8, 64, 256 o 1024) y 510 es un factor divisor que proviene del uso del modo corrector de fase. Por lo tanto, nuestro objetivo fue encontrar el registro que contenía el preescalador y configurarlo de forma que la frecuencia de salida del modulo PWM fuera superior a 120 Hz para evitar generar parpadeos en los LEDs.

De los tres registros que contiene el timer 3, en el registro B se encuentra los tres bits de configuración del prescaler. La Figura 3.2 muestra los 8 bits del registro B del timer 3.

TCCR3B – Timer/Counter 3 Control Register B

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x91)	ICNC3	ICES3	–	WGM33	WGM32	CS32	CS31	CS30	TCCR3B
Read/Write	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figura 3.2. Registro B del timer 3 para configuración del preescalador del modulo PWM.

Los bits 0, 1 y 2 (CS3n) son los que contienen los parámetros de configuración del prescaler. La Tabla 3.1 muestra la descripción de las diferentes configuraciones de los 3 bits en función del preescalador.

Tabla 3.1. Descripción de la selección del bit de prescaler.

CS32	CS31	CS30	Descripción prescaler
0	0	0	Timer parado
0	0	1	N = 1 (no prescalado)
0	1	0	N = 8
0	1	1	N = 64
1	0	0	N = 256
1	0	1	N = 1024

Conociendo la frecuencia del reloj interno de la mota Wasp mote ($f_{\text{CLK}} = 16 \text{ MHz}$) y configurando el prescaler igual a 8 (bits 010), obtenemos una frecuencia de trabajo del PWM de 1.96 KHz, suficiente para garantizar que en todos los ciclos de trabajo del PWM no se aprecia ningún parpadeo en los LEDs.

Modificando en la librería API el nuevo valor de prescaler y volviendo a generar el programa en el Wasp mote, obtuvimos la salida del PWM junto con la salida de un LED en un osciloscopio como se observa en la Figura 3.3.

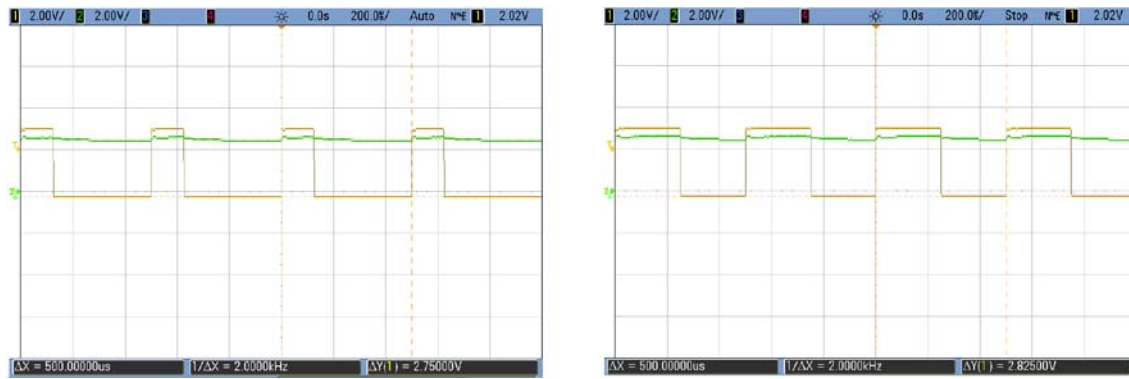


Figura 3.3. Señal del PWM a una frecuencia de 1,96 KHz y ciclos de trabajo al 25 y 50 %.

Si volvemos a probar todo el sistema de iluminación con la frecuencia PWM modificada a 1,96 KHz, observamos que todo el sistema actúa correctamente y sin apreciar parpadeos en los LEDs. Si modificamos la iluminación exterior bajando o subiendo las persianas, observamos que los módulos LEDs se regulan ajustándose a la iluminación del ambiente. La Figura 3.4 muestran dos ambientes diferentes del laboratorio, uno con la persiana totalmente bajada y la otra levantada, y como los módulos LEDs se iluminan según la iluminancia a la que deben de regularse las luminarias.

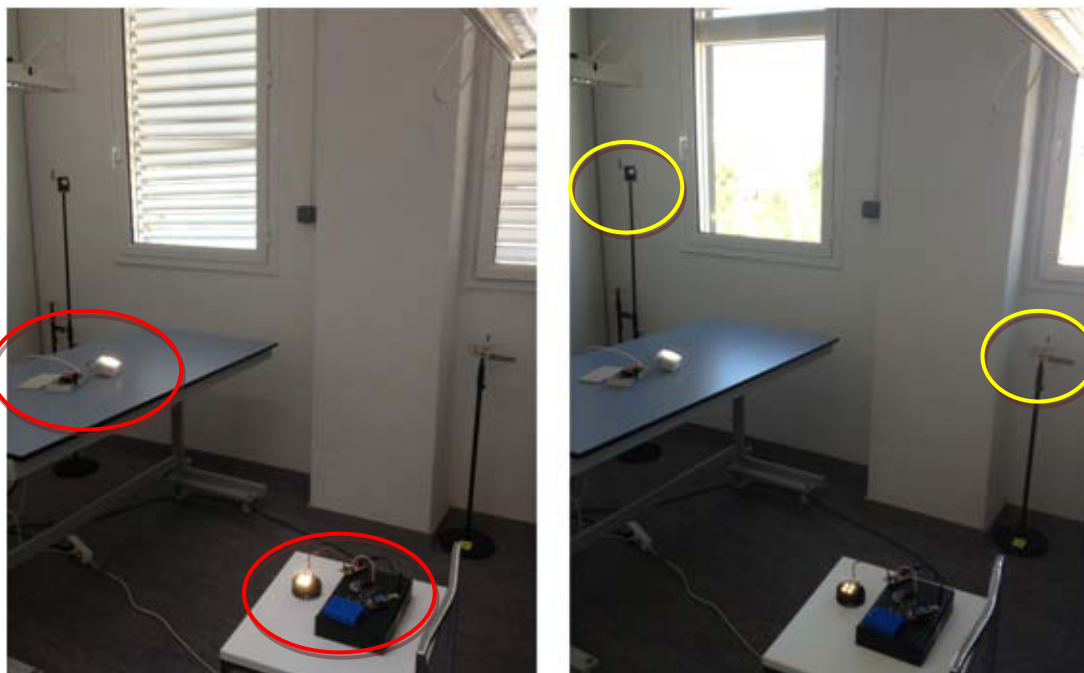


Figura 3.4. Iluminación de los módulos LEDs según el ambiente.

Con esta tercera prueba se ha verificado que la transmisión y recepción de los mensajes con la estructura ZigBee Light Link se realiza con éxito. A continuación, se procede a la recogida de los resultados experimentales.

3.2 Tiempo de asociación de los nodos a la red.

El tiempo medio que se ha recogido después de varias medidas desde que el sensor PIR detecta nuestra presencia hasta que los módulos LEDs se encienden con el valor PWM correspondiente a la iluminancia del ambiente, es de 4,1 segundos. Este tiempo corresponde a la sumatoria del tiempo de ejecución del programa del Waspote y del tiempo de asociación del nodo transmisor a la red.

Este apartado trata de recoger los diferentes tiempos de asociación de un nodo a la red para conseguir el mínimo tiempo de respuesta de la luminaria una vez se detecta presencia. Para ello, se ha modificado el parámetro del transceptor Scan Duration (SD, duración del escáner).

La Tabla 3.2 muestra los tiempos de asociación en función del SD utilizado, a partir de la captura de 20 transmisiones entre un nodo Router y un nodo coordinador a una distancia de 3 metros. Se muestran el mínimo, el máximo y la media obtenida por cada valor de SD. También muestra la cantidad de paquetes perdidos de los 20 transmitidos

Tabla 3.2. Tiempo de asociación de un nodo router a la red ZigBee.

Valor Scan Duration	Min (s)	Avg (s)	Max (s)	Paquetes perdidos (%)
1	2,1	3,87	4,4	1 (5%)
2	2,2	3,68	4,5	0
3	2,1	3,30	4,6	0
4	2,2	3,94	4,9	0
5	2,5	3,99	4,6	0
6	2,5	4,10	4,8	0

Se puede observar que el valor SD que garantiza el menor tiempo de asociación y a la vez la recepción de todos los paquetes transmitidos es el SD=3.

3.3 Análisis del consumo energético

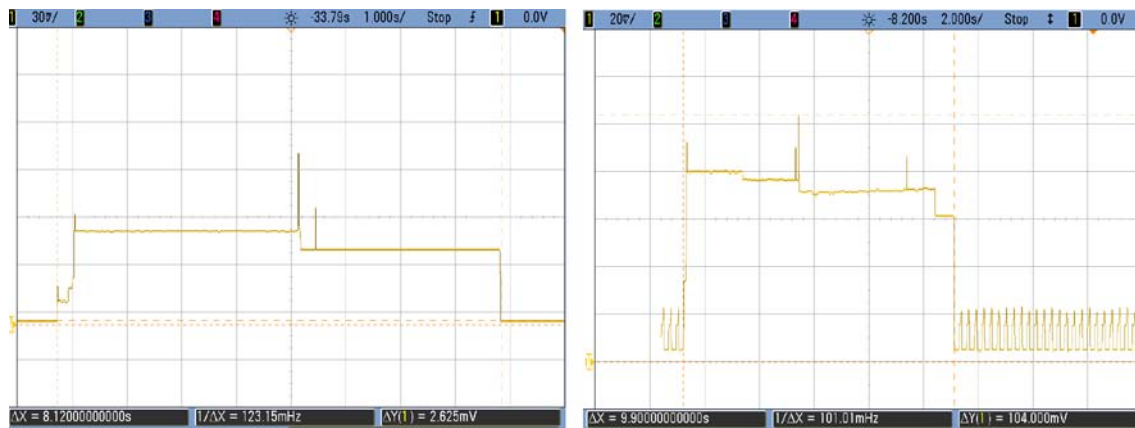
Los consumos medios obtenidos de las diferentes motas del sistema, se recogen en la tabla 9 junto con la estimación del tiempo de vida de las diferentes baterías de Li-Ion recargables que disponen los Waspotes.

Tabla 3.3. Consumos medios de las diferentes motas usadas.

Mota	I_{AVG} (mA)	Tiempo estimado de la batería		
		1150 mAh	2500 mAh	6600 mAh
Sensor PIR	10,84	4,4 días	9,6 días	25,4 días
Sensor LDR	3,02	15,8 días	34,5 días	91 días
Luminaria	55	No requiere de batería		

Estos consumos medios se han obtenido a partir de la medida de la corriente de los módulos en mili-amperios (mA) consumidos durante un minuto teniendo en cuenta el ciclo de trabajo de cada mota.

La Figura 3.5 muestra las respuestas en mV del consumo de un ciclo de trabajo de las motas con sensores, capturadas en el osciloscopio. En la izquierda se encuentra la del sensor LDR y en la derecha la del sensor PIR.

**Figura 3.5.** Captura del consumo de corriente en las motas de sensores.

Volviendo a la Tabla 3.3, podemos observar que el consumo medio de la mota con el sensor de presencia es más alto de lo esperado. Esto es debido a que el sensor PIR durante el periodo de sueño necesita estar constantemente alimentado para poder estar disponible ante cualquier presencia de personas. Mientras, el sensor LDR tiene un consumo menor pero aun así alto si queremos que la batería dure más allá de un mes. En referencia a la mota de la luminaria, esta tiene el consumo propio que especifica la tabla 3 (Especificaciones transceptor XBee) por tener el transceptor habilitado a la espera de recepción de mensajes. Y sobre el tiempo de vida de las baterías que muestran la Tabla 3.3, solo son datos teóricos que sirven de referente ya que en la vida real, la descarga de la batería no siempre es lineal.

Si queremos proporcionar a las baterías de mayor tiempo de vida, tendremos que incorporar a las motas módulos de captación de energía (energy harvesting), como placas solares de Silicio Amorfo para operación en interiores.

Las placas solares de interior que disponemos en el laboratorio son de una tensión máxima de 5V.

Durante un fin de semana dejamos las motas en funcionamiento y monitorizamos el estado de las baterías (%) con y sin placa solar. Al final, observamos que con el uso de las placas, aunque no llega a cargar del todo la batería, ralentiza la descarga de la batería. Esto se traduce en mayor tiempo de vida de las baterías secundarias recargables de iones de Litio.

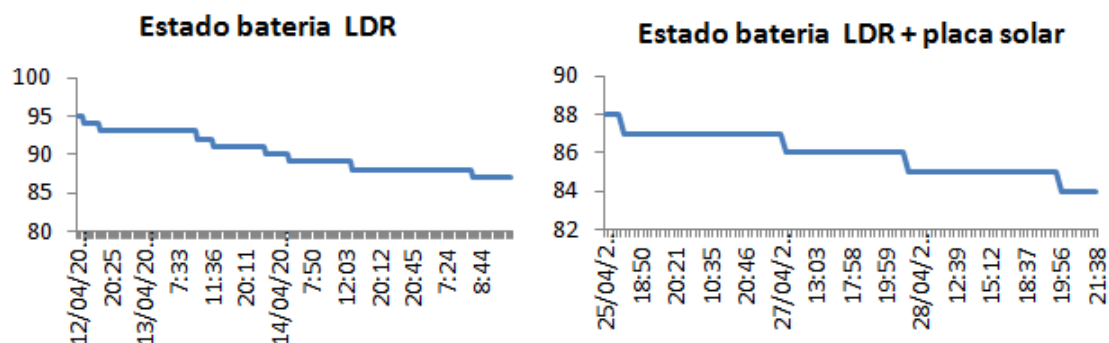


Figura 3.6. Evolución del estado de la batería en % del sensor LDR sin y con placa solar durante tres días.

Los gráficos que se observan en la Figura 3.6, muestran los resultados obtenidos de este último experimento de la vida útil del nodo. En el caso del sensor LDR (en este caso) sin usar la placa solar, se puede ver que el estado de la batería desciende casi un 9%. Mientras que en el caso con la placa solar para el mismo periodo de tiempo, desciende solo un 4%. Claramente se ve como el uso de las placas solares ayudan a mejorar el consumo de las motas. Si quisiéramos proporcionarles a las baterías de mayor tiempo de vida, habría que integrarle a las motas de otro módulo de energy harvesting con mejores características.

Para acabar, la Tabla 3.4 muestra el consumo eléctrico (W) de todos los dispositivos usados en el sistema.

Tabla 3.4. Consumo eléctrico del sistema de iluminación.

Dispositivo	Consumo eléctrico (W)
Mota sensor LDR	9,96 e(-3)
Mota sensor PIR	35,7 e(-3)
Mota luminaria (x2)	0,36
Módulo LED (x2)	8,4
Total:	8,8

Como se puede observar, el consumo eléctrico total del sistema de iluminación es realmente bajo y teniendo en cuenta que los módulos LEDs que hemos usado son de 4,2 W. Pero si en vez de utilizar estos módulos utilizásemos las luminarias LEDs que se usaron en la simulación con DIALux (potencia igual a

34, 5 W, apartado 2.5), el consumo total del sistema sería 69,4 W. Un consumo muy bajo y a la vez eficiente y que estaríamos garantizando el mayor confort al trabajador y ahorro al usuario.

3.4 Nivel de iluminación de los módulos LEDs.

Se realizan unas medidas en los módulos LEDs para conocer su iluminancia según el difusor usado.

Para estas medidas se ha usado el luxómetro Konica Minolta T-10 ubicándolo a una distancia de 1 m y varios tipos de difusores para el módulo LED Figura 3.7. En cuanto al módulo LED, su tensión es 12 V y 150 mA.

La Tabla 3.5 muestra los resultados de estas medidas.

Tabla 3.5. Tabla de los diferentes difusores del módulo LED y su nivel iluminancia.

Número del difusor	Nivel de iluminación (lux)
Sin difusor	118,9
PC9060-170	112,3
PMMA4040CS-190	117,1
PMMA1515-100	118,6
PCUV6060-450	115,7
PCUV8080-540	115,2
PCUV4040-210	117,3
PCUV100100-810	112,6
PCUV2020-100	118
Difusor Philips con fosforo externo (Amarillo)	110,2

El difusor escogido para colocarlo en el módulo LED es el PCUV8080-540 ya que garantiza un nivel de iluminación alto y a la vez proporciona una iluminación totalmente homogénea sin que se aprecie ninguno de los LEDs interiores.



Figura 3.7. Diferentes difusores utilizados.

CONCLUSIONES

El objetivo inicial de este proyecto era el de diseñar un sistema de control de iluminación inalámbrico que fuese interoperable con otros dispositivos, basándose en un estándar de ZigBee, y que además fuese eficiente y de bajo consumo.

Una vez finalizado el proyecto, se puede decir que el sistema funciona correctamente y que se ha alcanzado el objetivo inicial. Se ha comprobado que es posible crear un sistema de control de iluminación a través de una comunicación inalámbrica entre dispositivos e interoperable.

Según se ha podido comprobar en los resultados, este sistema cumple con el objetivo eficiencia y de bajo consumo y que con la utilización de dispositivos de módulos de captación de energía permite al usuario olvidarse durante un largo periodo del mantenimiento del sistema.

También, se ha podido garantizar que el sistema de iluminación diseñado cumple con la normativa UNE 12464-1 que rige los mínimos del nivel iluminación y máximos de deslumbramientos en los lugares de trabajo.

Es importante recalcar que este sistema basado en las comunicaciones inalámbricas cuenta con una serie de ventajas e inconvenientes respecto a los actuales sistemas de iluminación cableados. En cuanto a las ventajas se puede decir que es un sistema escalable, de menor consumo, que no requiere ningún tipo de cableado de control, de un menor coste de mantenimiento y que cuenta con una rápida instalación y de bajo coste. Aunque por el contrario, también cuenta con drivers y controladores más complejos, menor robustez frente a interferencias electromagnéticas, menor seguridad de la red ya que puede ser interceptada y sabotada, y de tiempos de respuestas de las luminarias altos.

Aunque el sistema diseñado es un sistema básico que cumple con los requisitos de encendido y apagado de las luminarias, siempre se puede mejorar y ampliar para hacer frente a los inconvenientes mencionados.

Como conclusión final, quisiera matizar que este proyecto ha sido trabajado y avanzado desde el punto en que únicamente partía de la disposición de los dispositivos de comunicación inalámbrica Waspnotes y de la idea de aplicarlos en un sistema de control de iluminación LED. Es decir, que según mi opinión, éstas ideas ha evolucionado hasta un estado bastante completo, aunque como proyecto ambicioso que es, queda abierto para trabajarlo y poderlo llevar a otro más complejo.

Referente a la realización de este proyecto me ha servido para:

- Ampliar mis conocimientos sobre la recerca, tratamiento y selección de la información, principalmente en las comunicaciones inalámbricas de área personal, la electrónica aplicada para ella y sobre la eficiencia energética en los productos de la iluminación.

- Recopilar y aprender de manera autónoma toda la información requerida para la utilización de este proyecto, así como a resolver los problemas que surgen durante la realización de todo el proyecto.
- Aprender a manejar tanto dispositivos dedicados a la comunicación inalámbrica de área personal (los Waspnotes y los transceptores XBee) como luminarias de tipo LED y sus drivers para la regulación.
- Ampliar mis conocimientos en cuanto a nuevos equipos de medida en el sector de las telecomunicaciones.
- Madurar y poner en práctica los conocimientos aprendidos a lo largo de mi carrera de ingeniero de telecomunicaciones.
- La formación de la elaboración de un proyecto para la mejora de la eficiencia en la iluminación.

Para acabar, deseo comentar que después de haber realizado este proyecto y ver los resultados obtenidos de un sistema diseñado desde cero y tras un largo periodo de dedicación y trabajo, no hay otras palabras que puedan describir mejor este momento que plenitud, satisfacción y orgullo de haberlo realizado. Así como agradecer a aquellas personas su colaboración prestada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Wasmote de Libelium
URL: [http:// www.libelium.com/development/wasmote](http://www.libelium.com/development/wasmote)
- [2] Foro de Wasmote
URL: <http://www.libelium.com/forum/index.php>
- [3]. ZigBee Alliance
URL: <http://www.zigbee.org/>
ZigBee Specification.
ZigBee Cluster Library Specification.
ZigBee Home Automation Profile Specification.
ZigBee Light Link Profile Specification.
- [4]. Digi
URL: <http://www.digi.com/>
- [5]. Wireless Sensor Network
URL: <http://www.sensor-networks.org/index.php>
- [6]. Sistemas de iluminación
URL: <http://www.dali-ag.org/>
URL: http://es.wikipedia.org/wiki/Digital_Multiplex
URL: <http://es.wikipedia.org/wiki/Modbus>
URL: <http://es.wikipedia.org/wiki/BACnet>
URL: <http://es.wikipedia.org/wiki/KNX>
URL: <http://www.multilamp.es/es/tecnologia.html>
- [7]. Tecnológica LED
URL: <http://www.philipslumileds.com/>
URL: <http://www.osram.es/>
URL: <http://es.rs-online.com>
URL: <http://ledsmagazine.com>
- [8]. DIALux
URL: <http://www.dial.de/DIAL/es/home.html>
- [9]. EAGLE
URL: <http://www.cadsoftusa.com/>
- [10]. Texas Instrument
URL: <http://www.ti.com>
- [11]. ATmega 1281
URL: <http://www.atmel.com/devices/atmega1281.aspx>
- [12]. Datasheet LM3406
URL: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/244247/NSC/LM3406.html>

- [13]. Jorge Higuera, Elli Kartsakli, José L. Valenzuela, Luis Alonso, Andres Laya, Raquel Martínez, Alicia Aguilar, "Experimental study of Bluetooth, ZigBee and IEEE 802.15.4 technologies on board high-speed trains", UPC, SENER y ADIF, 2012.
- [14]. María Peñahora García Sanz, "Iluminación en el puesto de trabajo. Criterios para su evaluación y acondicionamiento." Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- [15]. UNE 12464-:2003. *Iluminación de los lugares de trabajo. Parte 1: lugares de trabajo en interiores.*
- [16]. Santi Devroyé, "Evaluación de protocolos basados en transmisión cooperativa para sistemas de redes de sensores", TFC, Universitat Politècnica de Catalunya, Octubre 2008.
- [17]. Eric Olmos Martínez, "Xarxa de sensors sense fils per la monitorització ambiental del Campus del Baix Llobregat" TFC, Universitat Politècnica de Catalunya, Juliol 2008.
- [18]. Sonia Pardo y Jordi Pérez, "Implementación y análisis de mecanismos de transmisión cooperativa en sistemas de comunicaciones inalámbricos", TFC, Universitat Politècnica de Catalunya, Octubre 2009.

ANEXOS

A1. Fundamentos teóricos sobre iluminación.

En este apartado se hará una breve explicación sobre conceptos teóricos a tener en cuenta sobre la iluminación, como puede ser flujo luminoso, iluminancia, intensidad luminosa o las leyes fundamentales de la luminotecnia.

Flujo Luminoso: Teniendo en cuenta que la luz es la radiación visible apreciada de acuerdo con la sensibilidad del ojo humano, el flujo luminoso se define como la cantidad de energía luminosa radiada por una fuente en cada segundo. Es decir, la potencia de la energía luminosa radiada por la fuente en la unidad de tiempo.

La unidad del flujo luminoso es el lumen y se puede definir según la ecuación (0.1):

$$\Phi = \frac{Q}{t} \text{ [lm]} \quad (0.1)$$

Una aplicación importante de estos conceptos consiste en la expresión del rendimiento luminoso de las luminarias. De toda la potencia eléctrica consumida por una lámpara (eficiencia energética) tan solo una fracción se convierte en flujo luminoso (eficacia luminosa). El rendimiento luminoso de una luminaria es la relación entre el flujo luminoso emitido por la lámpara y la potencia eléctrica en Wattios consumida por la misma:

$$\mu = \frac{\Phi}{W} \text{ [lm/W]} \quad (0.2)$$

Intensidad luminosa: es la cantidad de luz emitida (flujo luminoso) por una fuente puntual por unidad de ángulo sólido que se propaga en una determinada dirección. Su unidad es la candela (cd) y su expresión es la ecuación (0.3):

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \text{ [cd]} \quad (0.3)$$

Donde ω es igual al ángulo sólido en estereorradianes.

Nivel de iluminación o Iluminancia (lux): Se denomina nivel de iluminación o iluminancia, al flujo luminoso incidente por unidad de superficie. Su unidad es el lux. Un lux se define como el nivel de iluminación de una superficie de un metro cuadrado cuando sobre ella incide, uniformemente repartido, un flujo luminoso de un lumen.

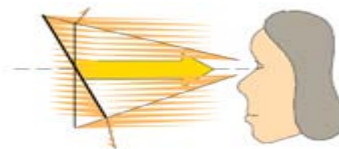
$$E = \frac{\Phi}{s} \text{ [lux]} \quad (0.4)$$

El nivel de iluminación es la magnitud utilizada con mayor frecuencia para evaluar la cantidad de luz existente en los puestos de trabajo.

Luminancia: La luminancia, o brillo fotométrico, es la magnitud que sirve para expresar el brillo de las fuentes de luz o de los objetos iluminados y es la que determina la sensación visual producida por dichos objetos. Esta magnitud es de gran importancia para evaluar el grado de deslumbramiento, como veremos más adelante.

La luminancia se expresa en candelas/m² y se define como:

$$L = \frac{I}{s * \cos \alpha} \text{ [cd/m}^2\text{]} \quad (0.5)$$



Como se ha definido en la fórmula, la luminancia debe considerarse como la intensidad luminosa por unidad de superficie aparente. La superficie aparente es la proyección de la superficie real sobre un plano perpendicular a la dirección de la mirada. Así pues, el valor de la superficie aparente será igual al de la superficie real multiplicado por el coseno del ángulo que forma la línea de visión con la perpendicular a dicha superficie real.

Ley de la inversa del cuadrado de la distancia: esta ley dice que el nivel de iluminación, proporcionado por una fuente de luz en una dirección determinada, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la que se encuentra la fuente respecto al plano considerado, por ejemplo, el plano de trabajo.

El deslumbramiento: Uno de los factores importantes del entorno que puede perturbar la percepción y el rendimiento visual es el deslumbramiento. El deslumbramiento se puede presentar de dos formas, aunque habitualmente se presentan juntas:

- El deslumbramiento perturbador: Tiene lugar cuando una fuente de alta luminancia se percibe en las proximidades de la línea de visión y

cuyo efecto es reducir la percepción del contraste, y por tanto, el rendimiento visual (sin que ello provoque necesariamente discomfort).

- El deslumbramiento molesto: Se experimenta como una sensación de discomfort que tiende a ir aumentando con el tiempo y causa fatiga visual. Este tipo de deslumbramiento es producido por las fuentes luminosas situadas dentro del campo visual y depende de la luminancia de las fuentes, su tamaño aparente, del número de fuentes en el campo visual, de la distancia angular de cada fuente al eje visual y de la luminancia L de fondo.

La C.I.E (Comisión Internacional de Iluminación) define el llamado índice UGR (Unified glare rating) para determinar la sensación de deslumbramiento. Cuanto mayor sea el índice UGR mayor será la sensación de deslumbramiento.

Índice de reproducción cromática (CRI). Rendimiento en color y tonalidad de la luz: Otro factor importante del medio ambiente que puede influir en el rendimiento visual son la tonalidad de la luz y la composición de su espectro cromático.

La tonalidad de la luz emitida por una luminaria y su capacidad de reproducir el color son cosas distintas. La capacidad de una lámpara para reproducir el color se conoce como “rendimiento en color” (R_a) también conocido como CRI de la luminaria. Este rendimiento en color se suele expresar en una escala de uno a cien, en la que el valor 100 corresponde a un rendimiento igual al obtenido con la luz natural del sol (radiación de un cuerpo negro). Por su parte, la tonalidad de su luz se expresa mediante la llamada “temperatura de color” (T_c) en grados Kelvin. Ambos parámetros son atributos de cada tipo de luminaria. Temperaturas de color cálidas corresponden a luminarias con menos de 4500 K (color amarillento rojo) y temperaturas frías (>4500 K) corresponden a tonalidades más azuladas.

A2. Imágenes del sistema de control de iluminación.

El objetivo de este apartado de anexos es mostrar aquellas imágenes capturas durante la realización del proyecto y que no se han podido mostrar en el trabajo.



Figura A.1. Ejercicio básico (apartado 2.1). Dos motas Wasp mote más transceptor Coordinador.

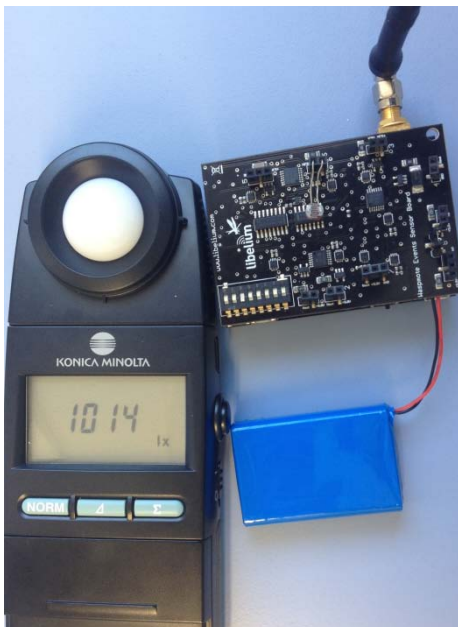


Figura A.2. Calibración Mota Sensor LDR con el Luxómetro “Kónica Minolta” (apartado 2.2.2.1)

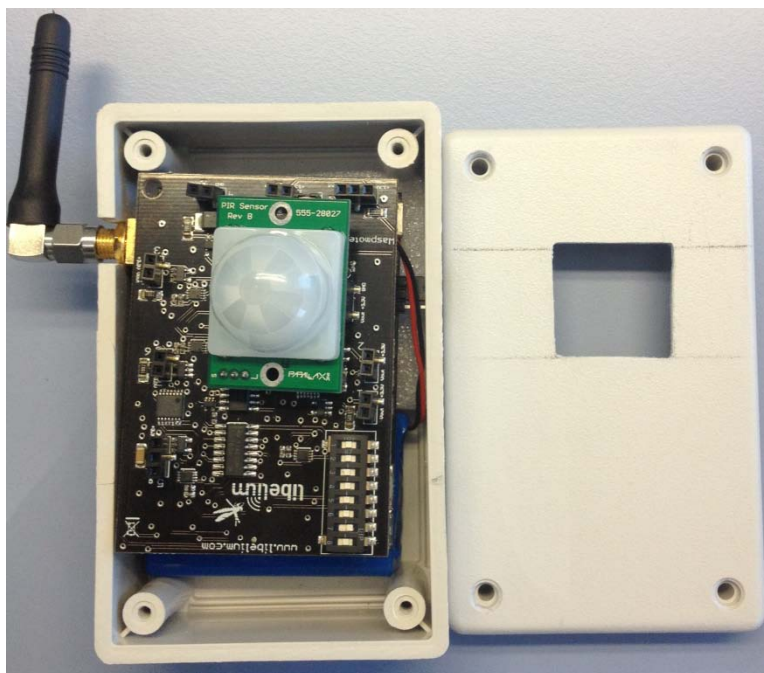


Figura A.3. Encapsulado final Sensor PIR.



Figura A.4. Encapsulado final sensor LDR.

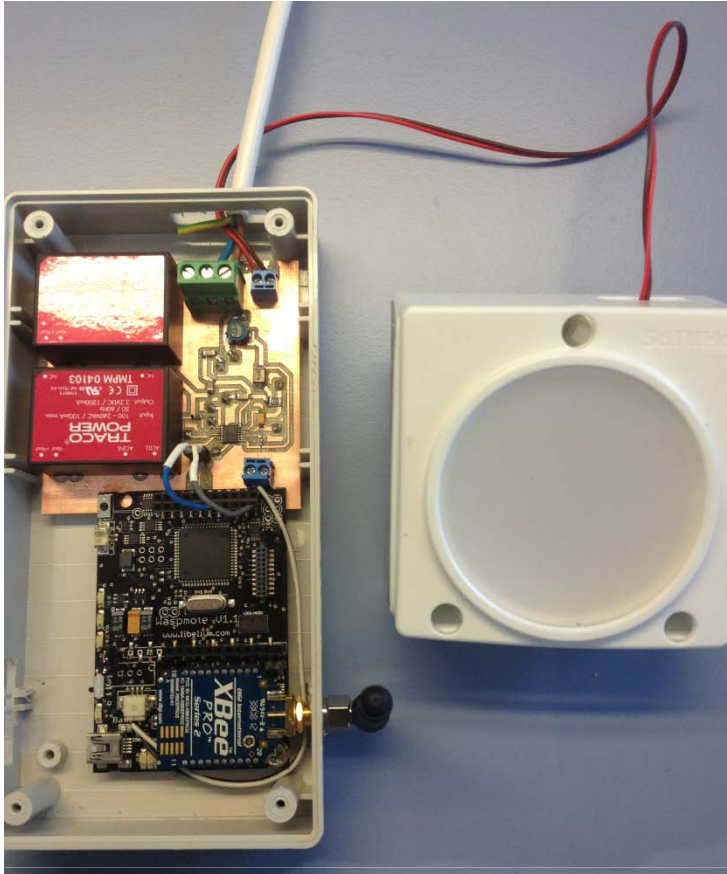


Figura A.5. Encapsulado final de la luminaria.

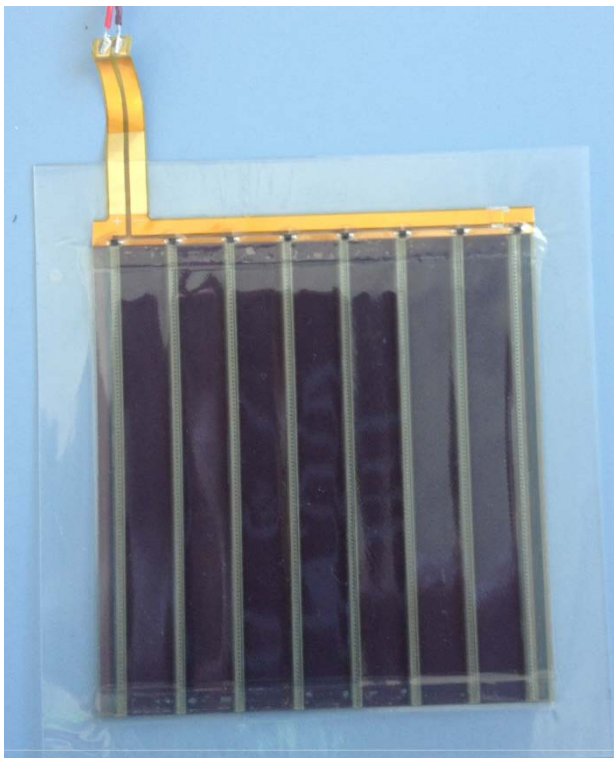


Figura A.6. Imagen de la placa solar interior utilizada.



Figura A.7. Imagen del Sensor PIR más la placa solar en el laboratorio.

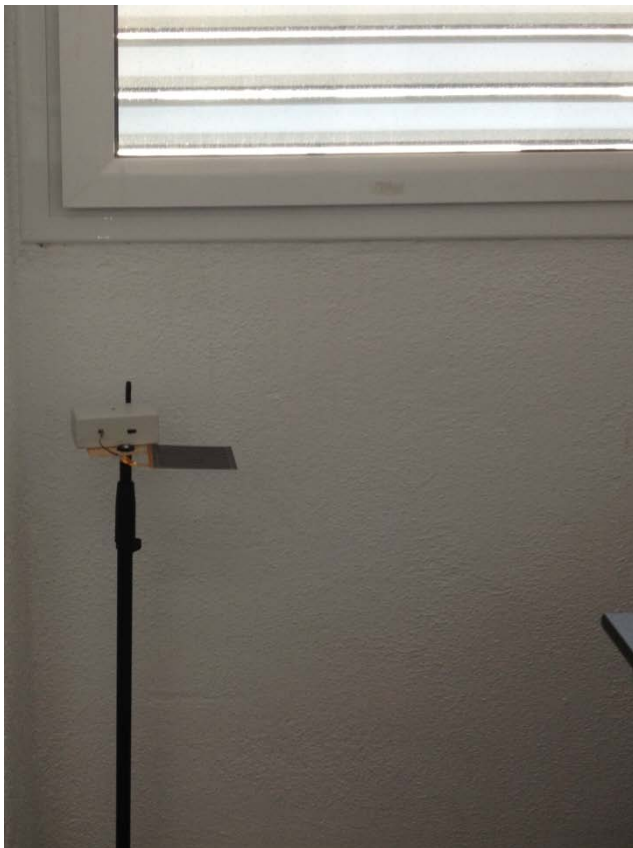


Figura A.8. Imagen del sensor LDR más la placa solar en el laboratorio.