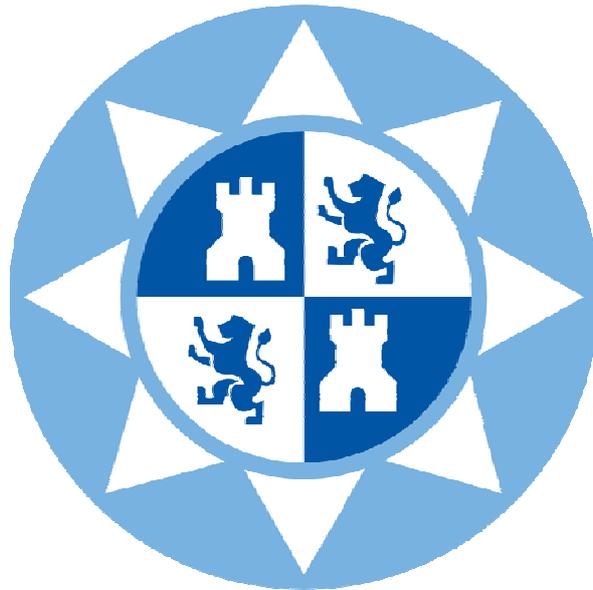


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**



Trabajo de Fin de Máster

**Diseño de un sistema de Gestión Inalámbrica
de Iluminación LED**

AUTOR: Carlos Zorrilla Guzmán

**DIRECTOR: Juan Suardiaz Muro
Fernando Cerdán Cartagena**

Septiembre 2012



Autor	Carlos Zorrilla Guzmán
E-mail del Autor	cvzorrilla@hotmail.com
Director(es)	Juan Suardíaz Muro Fernando Cerdán Cartagena
E-mail del Director	Juan.suardiaz@upct.es Fernando.cerdan@upct.es
Título del PFM	Diseño de un sistema de Gestión Inalámbrica de Iluminación LED
Descriptor	Domótica, Arduino, Microcontrolador, XBee, Iluminación LED

Resumen:

Cada día aumenta la demanda de las tecnologías de la información y las comunicaciones en los hogares y edificios, tanto para hacer más confortable la estancia de estos, para mejorar la seguridad, y para la gestión eficiente de los recursos energéticos. Por otro lado, la crisis que enfrenta actualmente gran parte del mundo, afectada además por el aumento progresivo del precio del petróleo y el intrínseco encarecimiento de la energía, han motivado que actualmente sea una prioridad para los gobiernos, empresas y particulares, el tema de fuentes alternas de energía y el ahorro energético en sentido general. Esto ha ayudado al rápido incremento de participación en el mercado de la iluminación LED, debido a sus beneficios impactantes en cuanto a ahorro de energía se refiere.

En este trabajo de fin de máster, se presenta se presenta una solución enfocada en la domótica para la eficientización de la gestión energética, específicamente el diseño e implementación de un dispositivo para el control inteligente de iluminación de tecnología LED multi-color. Nuestro diseño se enfoca en tres tecnologías específicas: Arduino para el control y gestión de la operación del diseño, XBEE como medio de transmisión inalámbrica, e iluminación LED como fuente de ahorro energético.

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, puede recibir y procesar señales de sensores, controladores etc, tanto analógicas como digitales a través de sus pines, y en función de esto accionar sobre una gama infinita de actuadores según se requiera. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino(basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing).

XBee es una familia de módulos de radio con formato de forma compatibles basados en el

estándar 802.15.4 y diseñados para comunicación inalámbrica punto a punto y punto a multipunto, estos módulos requieren un consumo muy bajo y proveen una fiable transmisión de datos a una velocidad de hasta 250 kbps y un alcance de hasta 90 metros en su versión regular, y hasta más de 1 kilómetro en su versión PRO .

La iluminación LED presenta indudables ventajas: fiabilidad, mayor eficiencia energética, mayor resistencia a las vibraciones, mejor visión ante diversas circunstancias de iluminación, menor disipación de energía, menor riesgo para el medio ambiente, capacidad para operar de forma intermitente de modo continuo, respuesta rápida, etc. El uso de los Diodos LEDs en el ámbito de la iluminación es moderado pero con un previsible crecimiento en el futuro cercano, ya que sus prestaciones son superiores a las de la lámpara incandescente y la lámpara fluorescente, desde diversos puntos de vista. Varias compañías ofrecen lámparas LED para alumbrado de uso general. La tecnología de la iluminación LED está mejorando rápidamente y las nuevas bombillas de bajo consumo de consumo LED están disponibles en gran parte del mercado.

En el presente proyecto en particular, diseñamos y montamos un dispositivo capaz de controlar a distancia una tira de LEDs RGB utilizando placas Arduino y módulos XBee. El dispositivo se compone de dos módulos: el emisor y el receptor. El primero es el módulo emisor, que contiene el tablero de mandos a ser utilizado por el usuario, este módulo está concebido como un tablero de mando empotrado de dimensiones 7 x 7 cm, cuyas dimensiones son similares a los switches de luces convencionales, haciendo más fácil su implementación. El segundo módulo es el receptor, no visible para el usuario y es el encargado de recibir las instrucciones del tablero de mandos y ejecutarlas en las matrices de LEDs.

El proyecto fue montado exitosamente según los objetivos planteados, dando paso al planteamiento de múltiples trabajos futuros como continuación del mismo, entre los que se pueden destacar: creación de placas propias a partir del diseño original, integración con el protocolo DALI, integración con otras tecnologías domóticas establecidas en el mercado, y el diseño de un protocolo domótico propio.

Titulación	Máster en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Departamento	Tecnología electrónica
Fecha de Presentación	Septiembre - 2012

INDICE

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO DEL PROYECTO	1
Capítulo 2: DOMOTICA.....	3
2.1 Generalidades	3
2.2 Áreas de Aplicación	5
2.3 Arquitecturas	8
2.3.1 Arquitectura centralizada.....	8
2.3.2 Arquitectura distribuida.....	9
2.4 Medios de Transmisión.....	10
2.4.1 Líneas de distribución de energía eléctrica (corrientes portadoras).....	10
2.4.2 Soportes metálicos	10
2.5 X-10	12
2.5.1 ¿Cómo funciona?.....	14
2.5.2 Tipos de dispositivos X-10.....	15
2.5.3 Oferta de dispositivos X-10.....	16
2.6 LonWorks	18
2.6.1 Neuron Chip Control processor y transceivers	19
2.6.2 Procotolo de Comunicación LonTalk.....	20
Capítulo 3: ARDUINO	21
3.1 Microcontrolador.....	22
3.1.1 Historia	22
3.1.2 Características	23
3.1.3 Periféricos	24
3.2 ¿Por qué ARDUINO?.....	26

3.3	Hardware	27
3.4	Placas Arduinos Existentes	28
3.5	Arduino UNO	32
3.5.1	Alimentación.....	33
3.5.2	Memoria	34
3.5.3	Entradas y Salidas	34
3.5.4	Comunicaciones	35
3.5.5	Programación.....	35
3.5.6	Reinicio Automático (Software)	35
3.5.7	Protección contra sobretensiones en USB	36
3.5.8	Características Físicas	36
3.6	Entorno de Programación	36
3.6.1	Estructura del Código	38
3.6.2	Interfaz de usuario	39
3.7	XBEE Shield	41
3.7.1	Configuración de los jumpers	42
Capítulo 4: TECNOLOGÍA INALÁMBRICA		43
4.1	IEEE 802.15.4	43
4.2	Arquitectura de la Red	44
4.3	Modelo de Red	45
4.4	Fiabilidad y Seguridad.....	47
4.5	Protocolo ZigBee.....	48
4.5.1	ZigBee vs. Bluetooth.....	49
4.5.2	Tipos de dispositivos	50
4.5.3	Protocolos	50
4.5.4	Hardware y software	52
4.5.5	conexión de los dispositivos en una red Zigbee	53
4.6	XBEE	54
4.6.1	Características Principales XBee Serie 1	55
4.6.2	Información de los Pines	56
4.6.3	Comunicación Serial	57
4.6.4	Configuración	58

Capítulo 5: ILUMINACION LED.....	61
5.1 La Luz, Generalidades	61
5.1.1 Términos relevantes	62
5.1.2 Espectro electromagnético	63
5.1.3 Colores	64
5.1.4 El Ojo Humano y su Percepción de la Luz.....	66
5.2 Diodo	67
5.2.1 Diodo Semiconductor	68
5.2.2 Características Principales	69
5.3 Diodo LED	70
5.3.1 Historia	71
5.3.2 Funcionamiento físico	72
5.3.3 Tiempo de vida y fallos	74
5.3.4 LEDs de Luz Blanca	75
5.4 Lámpara LED	77
5.4.1 Ventajas de la Iluminación LED.....	78
5.4.2 Desventajas y problemas remanentes	79
5.5 DALI.....	80
5.5.1 DALI y los sistemas de gestión de edificaciones	81
5.5.2 Aspectos técnicos.....	83
5.5.3 El grupo DALI.....	85
Capítulo 6: DISEÑO DEL HARDWARE PROPUESTO	87
6.1 Diseño	87
6.2 Hardware	89
6.2.1 Módulo Emisor	89
6.2.2 Módulo Receptor.....	90
6.3 Software	92
6.3.1 Código del Módulo Emisor.....	92
6.3.2 Código del Módulo Receptor	103
6.4 Configuración de los Módulos XBee.....	105
6.5 Presupuesto	106

Capítulo 7: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	107
7.1 Trabajos Futuros	107
7.1.1 Placas propias	107
7.1.2 Integración con DALI.	107
7.1.3 Integración con tecnologías domóticas.....	108
7.1.4 Protocolos propios	108
Bibliografía	109
Índice de Figuras	111

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO DEL PROYECTO

Cada día aumenta la demanda de las tecnologías de la información y las comunicaciones en los hogares y edificios, tanto para hacer más confortable la estancia de estos, para mejorar la seguridad, y para la gestión eficiente de los recursos energéticos. Por otro lado, la crisis que enfrenta actualmente gran parte del mundo, afectada además por el aumento progresivo del precio del petróleo y el intrínseco encarecimiento de la energía, han motivado que actualmente sea una prioridad para los gobiernos, empresas y particulares, el tema de fuentes alternas de energía y el ahorro energético en sentido general. Esto ha ayudado al rápido incremento de participación en el mercado de la iluminación LED, debido a sus beneficios impactantes en cuanto a ahorro de energía se refiere.

El presente proyecto con miras a tesis doctoral, se enfoca en la domótica para la eficientización de la gestión energética en edificaciones, haciendo uso de microcontroladores y protocolos de comunicación inalámbrica para el desarrollo de soluciones en dicho sector.

En este trabajo de fin de máster, se presenta un adelanto de estas soluciones planteadas, específicamente el diseño e implementación de un dispositivo para el control inteligente de iluminación de tecnología LED multi-color.

Capítulo 2: DOMOTICA

2.1 Generalidades

El término Domótica viene del latín “domus” que significa casa y de la palabra “automática”, por lo tanto la Domótica se refiere a una casa automática o como se le ha llamado más comúnmente una casa inteligente. En inglés a la Domótica se le conoce más como “home networking” o “smart home”. Una casa inteligente es aquella cuyos elementos o dispositivos están integrados y automatizados a través de una red (principalmente Internet) y que a través de otro dispositivo remoto o inclusive interno se pueden modificar sus estados o los mismos dispositivos están diseñados para realizar ciertas acciones cuando han detectado cambios en su propio ambiente. (Aguirre & Zapata, 2006)

La enciclopedia Larousse definía en 1988 el término Domótica como: "el concepto de vivienda que integra todos los automatismos en materia de seguridad, gestión de la energía, comunicaciones, etc.". Una definición más técnica del concepto sería: "conjunto de servicios de la vivienda garantizado por sistemas que realizan varias funciones, los cuales pueden estar conectados entre sí y a redes interiores y exteriores de comunicación. Gracias a ello se obtiene un notable ahorro de energía, una eficaz gestión técnica de la vivienda, una buena comunicación con el exterior y un alto nivel de seguridad". [Junestrand, 2002].

Uniendo las definiciones anteriores, podemos decir que la domótica es el conjunto de sistemas automatizados de una vivienda que aportan servicios de gestión energética, seguridad, bienestar y comunicación, y que pueden estar integrados por medio de redes interiores y exteriores de comunicación. Se centra en los servicios de bienestar, seguridad y comunicaciones que pueden facilitarse en la vivienda a sus habitantes. Dicho de otra forma, Entendemos como tal la incorporación al equipamiento de nuestras viviendas y edificios una práctica, intuitiva e innovadora tecnología que permita gestionar de forma energéticamente eficiente, segura y confortable para el usuario, los distintos aparatos e instalaciones domésticas tradicionales que conforman una vivienda (la calefacción, la lavadora, la iluminación...).

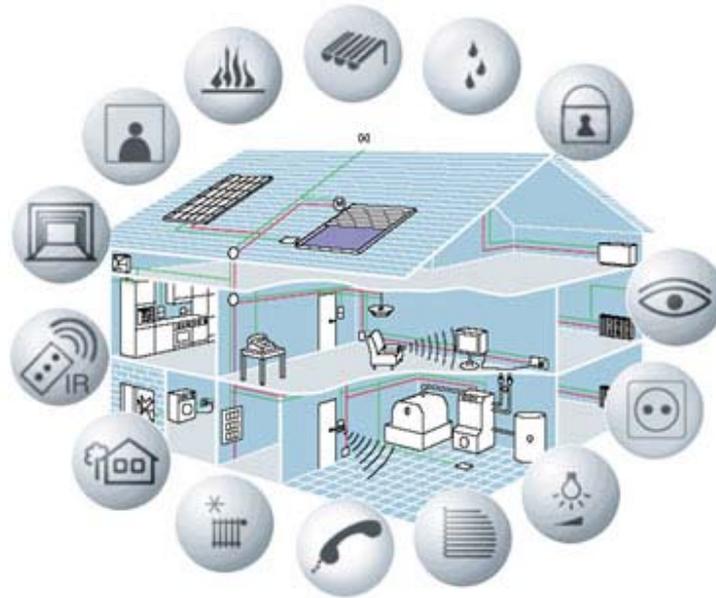


Figura 1. Áreas de Aplicación de la Domótica

Para que un sistema pueda ser considerado inteligente ha de incorporar elementos o sistemas basados en las Nuevas Tecnologías de la Información. Generalmente, un sistema domótico dispondrá de una red de comunicación y diálogo que permite la interconexión de una serie de equipos a fin de obtener información sobre el entorno doméstico y, basándose en dicha red, hará de la vivienda un entorno más funcional, inmediato y a medida de cada usuario.

En la actualidad la propia evolución, la convergencia en prestaciones y campos de aplicación de las tecnologías disponibles, junto con este estado todavía muy inexplorado y otras razones de carácter semántico hacen que se prefiera la denominación Gestión Técnica de Edificios y Viviendas en detrimento del término domótica.

Podemos considerar la domótica como la utilización simultánea de electricidad, electrónica e informática en la gestión técnica de las viviendas o bien decir sencillamente que es el lenguaje mediante el cual el usuario y la vivienda se comunican. Entendemos por gestión técnica la modificación, ya sea local o remota, de los parámetros de los servicios y funciones implementados en la instalación.

2.2 Áreas de Aplicación

La Domótica puede aplicarse de múltiples formas y con una infinidad de dispositivos dentro de un hogar o edificación, pero estas aplicaciones podemos agruparlas en cuatro principales grupos, estos son:

- **Confort:** se refiere a las aplicaciones de la domótica que crean o suman comodidad al usuario por medio de la eliminación de responsabilidades humanas en tareas específicas, o la creación de ambientes más agradables para el usuario, son ejemplos específicos de aplicaciones que gestiona la de domótica en el ámbito del confort las siguientes:
 - Calefacción
 - Refrigeración
 - Iluminación.
 - Control accesos, persianas, ventanas,
 - Sistemas de riego
 - automático con sensores de humedad, presencia, etc.
 - Control por infrarrojos de los distintos automatismos.
 - Gestión de electrodomésticos
 - Simulación de presencia
 - Mando a distancia, pantalla táctil
 - Información de presencia de correo en el buzón.

- **Gestión de la energía:** utilizar tecnologías para la optimización del consumo energético, esto se puede lograr por mecanismos como por ejemplo:
 - Reducción del consumo para climatización fuera de las horas de trabajo normales.
 - Detección de fuentes de pérdidas en sistemas de climatización (por ejemplo, suspensión del funcionamiento en estancias donde se detecten ventanas abiertas).
 - Reducción del consumo para climatización o iluminación en ausencia de individuos en las estancias mediante la detección automática de presencia.
 - Actuación sobre automatismos de persianas para el aprovechamiento de la luz solar.
 - Aprovechamiento de las franjas de tarificación de valle para hacer trabajar
 - aquellos equipos que lo permitan

- **Seguridad:** conjunto de tecnologías orientadas a la seguridad ante intrusos, escape de gases, incendios, etc. La seguridad que nos proporciona un sistema domótico es más amplia que la que nos puede proporcionar cualquier otro sistema, pues integra tres campos de la seguridad que normalmente están controlados por sistemas distintos:

- Seguridad de los bienes: gestión del control de acceso y control de presencia, así como la simulación de presencia, aviso a distancia de activación de alarmas, detección de intrusos, etc.
- Seguridad de las personas: especialmente para las personas mayores, personas minusválidas y enfermas. Ejemplos de esta pueden ser:
 - Alumbrado automático en zonas de riesgo por detección de presencia (escaleras, etc.) para evitar accidentes domésticos.
 - Desactivación de enchufes de corriente para evitar contactos.
 - Manipulación a distancia de interruptores en zonas húmedas.
 - Emisión de avisos telefónicos a números prefijados en caso de necesidad de ayuda urgente.
 - Detectores de fugas de gas o de agua que cierren las válvulas de paso a la vivienda en el caso de producirse escapes.
 - Alarmas de salud. En el caso de personas con necesidades especiales (ancianos, personas discapacitadas) se dispone de pulsadores cuya activación genera un aviso a una central receptora, un familiar o un hospital para solicitar ayuda sanitaria urgente.
- Incidentes y averías: mediante sensores, se pueden detectar los incendios y las fugas de gas y agua, y por ejemplo, por medio del nodo telefónico desviar la alarma hacia los bomberos. También se pueden detectar averías en los accesos, en los ascensores, etc.
- Comunicaciones: en una edificación con tecnología domótica se pueden encontrar tres tipos de redes:
 - Red de control de dispositivos domóticos.
 - Red de datos, usualmente de tipo Ethernet alámbrico o inalámbrico.
 - Red multimedia.

La Domótica tiene una característica fundamental, que es la integración de sistemas, por eso existen nodos o pasarelas que interconectan la red Domótica con diferentes dispositivos de las demás redes mencionadas, como la red telefónica, el videoteléfono, etc. Como nueva tecnología, las redes domóticas están preparadas para la conexión a servicios como por ejemplo la TV por satélite, servicios avanzados de telefonía, compra vía Internet, etc.

Entre las posibilidades de telecomunicación según el tipo de edificio, destacan (Jiménez Buendía, 2009):

- Sistemas de comunicación en el interior: megafonía, difusión de audio/video, intercomunicadores, etc.

- Sistemas de comunicación con el exterior: telefonía básica, video-conferencia, email, Internet, TV digital, TV por cable, fax, radio, transferencia de datos (X25, ATM), etc.
- Comunicaciones externas propias de la vivienda. Mensajes de alarma como fugas de gas, agua, etc., y telecontrol del sistema domótico a través de la línea telefónica o redes de área extensa (Internet).

De entre todas ellas, las que mayor auge están teniendo en los últimos años, desde el punto de vista de aportaciones de investigación e implantación de nuevas tecnologías, son las iniciativas de telecontrol del sistema domótico desde el exterior (Jiménez Buendía, 2009). En este sentido se pueden destacar trabajos como:

- Desarrollo de iniciativas abiertas para la implementación de servicios domóticos en pasarelas residenciales.
- Control de instalaciones domóticas mediante protocolo TCP/IP
- Control de instalaciones domóticas mediante dispositivos móviles (teléfonos móviles, PDA, etc.

Las fronteras entre estos cuatro objetivos son difusas y en muchos casos un mismo dispositivo favorece el logro de varios objetivos a la vez, lo cual, por otra parte, economiza la instalación. Es precisamente esta filosofía de integración la que da realmente significado a la domótica, ya que de otro modo estaríamos hablando de automatizaciones independientes. Es decir, la instalación domótica va más allá de la mera automatización de una vivienda o edificio, ya que integra el control de una serie de sistemas y el uso que se hace de ellos. (Jiménez Buendía, 2009)

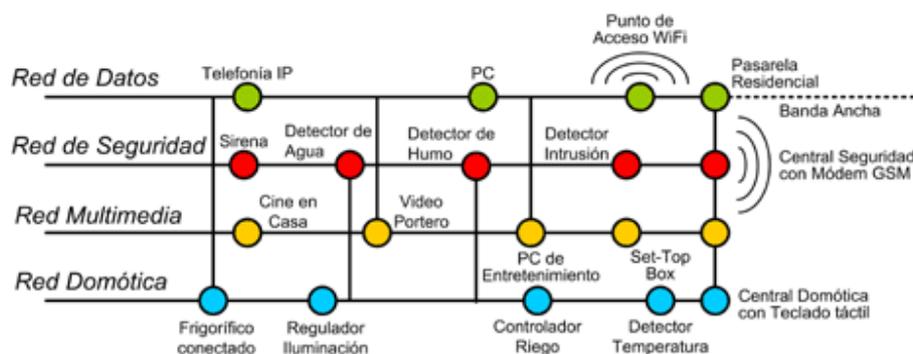


Figura 2. Modelo conceptual de integración de sistemas en la Domótica

2.3 Arquitecturas

La arquitectura de un sistema domótico, como la de cualquier sistema de control, especifica el modo en que los diferentes elementos de control del sistema se van a ubicar. El uso de diferentes tipos de cableado o de red implica diferencias notables en parámetros como la complejidad del cableado, velocidad de transmisión, vulnerabilidad, gestión de la red, tasa de fallos, etc. (Aguirre & Zapata, 2006)

Existen dos arquitecturas básicas: la arquitectura centralizada y la distribuida.

2.3.1 Arquitectura centralizada.

Es aquella en la que los elementos a controlar y supervisar han de cablearse hasta el sistema de control de la vivienda (computador). El controlador centralizado recibe información de múltiples sensores y, una vez procesada, genera las órdenes oportunas para los actuadores. El sistema de control es el corazón de la vivienda, en cuya falta todo deja de funcionar, y su instalación no es compatible con la instalación eléctrica convencional en cuanto que en la fase de construcción hay que elegir esta topología de cableado.



Figura 3. *Arquitectura Centralizada*

Entre sus ventajas destacan:

- Bajo coste ya que ningún elemento necesita módulos especiales de direccionamiento ni interfaces para distintos buses.
- Instalación sencilla y posibilidad de utilizar una gran variedad de elementos comerciales.
- Requerimientos mínimos.

Y entre sus inconvenientes:

- Flexibilidad limitada ya que las reconfiguraciones son costosas.
- Poca robustez puesto que si cae el módulo central cae todo el sistema.
- Mayor longitud de cableado dada la topología, lo que incrementa el coste de la instalación y limita su uso en grandes instalaciones.

2.3.2 Arquitectura distribuida.

En este caso no existe la figura del controlador centralizado sino que toda la inteligencia del sistema está distribuida por todos los módulos, sean sensores o actuadores. En este tipo de arquitectura el elemento de control se sitúa próximo al elemento a controlar. Hay sistemas que son de arquitectura distribuida en cuanto a la capacidad de proceso, pero no lo son en cuanto a la ubicación física de los diferentes elementos de control y viceversa, sistemas que son de arquitectura distribuida en cuanto a su capacidad para ubicar elementos de control físicamente distribuidos, pero no en cuanto a los procesos de control, que son ejecutados en uno o varios procesadores físicamente centralizados.

En los sistemas de arquitectura distribuida que utilizan como medio de transmisión el cable, existe un concepto a tener en cuenta que es la topología de la red de comunicaciones. La topología de la red se define como la distribución física de los elementos de control respecto al medio de comunicación.

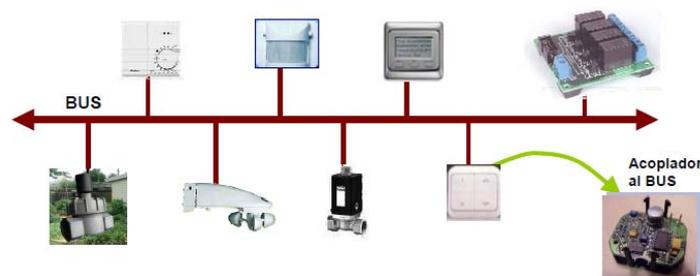


Figura 4. *Arquitectura distribuida*

La arquitectura distribuida es típica de los sistemas con topología en bus y se requiere un protocolo de comunicaciones. Todos los elementos disponen de un acoplador al bus con una interfaz de acceso compartido y técnicas de direccionamiento para que la recepción y el envío de información quede definida y el diálogo entre elementos asegurado. Es habitual, además, que se permitan cableados de topología libre, de manera que se facilita su instalación en la vivienda o edificio.

Las principales ventajas de los sistemas distribuidos son:

- Alta flexibilidad y una gran facilidad para reconfiguraciones.
- Escalabilidad. Suelen ser adaptables a cualquier tamaño de instalación y las ampliaciones resultan sencillas.
- Posibilidad de tecnologías plug & play que simplifican mucho las instalaciones.
- Ahorro de cableado en la instalación, lo que reduce los costes, sobre todo en instalaciones y proyectos a gran escala.

Sus inconvenientes:

- Mayor precio de los componentes, dado el incremento de complejidad que conllevan por la necesidad de incluir los protocolos y técnicas de direccionamiento utilizados.
- Necesidad de compatibilidad entre los equipos y componentes.
- Oferta de productos restringida al protocolo que emplean para garantizar la compatibilidad entre ellos.

2.4 Medios de Transmisión

En todo sistema domótico los diferentes elementos de control deben intercambiar información unos con otros a través de un soporte físico (par trenzado, línea de potencia o red eléctrica, radio-frecuencia, infrarrojos, etc.).

Cada protocolo utiliza un medio de transmisión específico. A continuación enumeramos los siguientes tipos de medios:

2.4.1 Líneas de distribución de energía eléctrica (corrientes portadoras)

Si bien no es el medio más adecuado para la transmisión de datos, sí es una alternativa a tener en cuenta para las comunicaciones domésticas dado el bajo coste que implica su uso, ya que se trata de una instalación existente.

Para aquellos casos en los que las necesidades del sistema no impongan requerimientos muy exigentes en cuanto a la velocidad de transmisión, la línea de distribución de energía eléctrica puede ser suficiente como soporte de dicha transmisión. Dada las especiales características de este medio y, sobretodo, su idoneidad para las instalaciones domesticas lo hacen poseedor de una serie de ventajas e inconvenientes tales como el nulo coste de instalación, la facilidad del conexionado y la poca fiabilidad además de la baja transmisión de datos. (Arias, 2004)

2.4.2 Soportes metálicos

La infraestructura de las redes de comunicación actuales, tanto públicas como privadas, tiene en un porcentaje muy elevado de cables metálicos de cobre como soporte de transmisión de las señales eléctricas que procesa. En general se pueden distinguir dos tipos de cables metálicos: el par metálico y el coaxial.

- Par metálico: son cables formados por varios conductores y pueden dar un soporte a un amplio rango de aplicaciones en el entorno doméstico. Están diseñados para transportar señales de voz, datos y alimentación de corriente continua.

- Coaxial: Un par coaxial es un circuito físico asimétrico, constituido por un conductor filiforme que ocupa el eje longitudinal del otro conductor en forma de tubo. Este tipo de cables permite el transporte de las señales de video y señales de datos a alta velocidad. Dentro del ámbito de la vivienda, el cable coaxial puede ser utilizado como soporte de transmisión para señales de tele-difusión que provienen de las antenas de televisión, televisión por cable, radio y señales de control y datos a baja y media velocidad.
- Fibra óptica: La fibra óptica es el resultado de combinar dos disciplinas no relacionadas, como son la tecnología de semiconductores (que proporciona los materiales necesarios para las fuentes y los detectores de luz), y la tecnología de guiado de ondas ópticas (que proporciona el medio de transmisión, el cable de fibra óptica).

La fibra óptica está constituida por un material dieléctrico transparente, conductor de luz, compuesto por un núcleo con un índice de refracción menor que el del revestimiento, que envuelve a dicho núcleo. Estos dos elementos forman una guía para que la luz se desplace por la fibra. La luz transportada es generalmente infrarroja, y por lo tanto no es visible por el ojo humano.

Algunas de sus múltiples ventajas y escasos inconvenientes son la gran fiabilidad en la transferencia de datos, la inmunidad frente a interferencias electromagnéticas y de radiofrecuencias, la elevada seguridad en la transmisión de datos y el elevado coste del cableado y las conexiones.

- Conexiones wireless (sin hilos): El uso de mandos a distancia basados en transmisión por infrarrojos está ampliamente extendido en el mercado residencial para tele-comandar equipos de audio y vídeo. La comunicación se realiza entre un diodo emisor que emite una luz en la banda de IR, sobre la que se superpone una señal, convenientemente modulada con la información de control, y un fotodiodo receptor cuya misión consiste en extraer de la señal recibida la información de control.

Los controladores de equipos domésticos basados en la transmisión de ondas en la banda de los infrarrojos tienen como principales ventajas: comodidad y flexibilidad, que admiten un gran número de aplicaciones, y Al tratarse de un medio de transmisión óptico es inmune a las radiaciones electromagnéticas producidas por los equipos domésticos.

Mientras que sus principales desventajas e inconvenientes son: la alta sensibilidad a las interferencias, la fácil intervención de las comunicaciones y su dificultad para la integración de las funciones de control y comunicación, en su modalidad de transmisión análoga.

2.5 X-10

Entre 1.976 y 1.978 se desarrolló la tecnología X-10 en Glenrothes, Escocia, por ingenieros de la empresa *Pico Electronics Ltd*; en la actualidad se distribuye X-10 en los cinco continentes, siendo su principal mercado los Estados Unidos. Durante los últimos 15 años se han vendido más de 150 millones de equipos X-10. Desde que empezó su comercialización en 1.978, millones de instalaciones en todo el mundo avalan este sistema técnicamente conocido por *Power Line Carrier* (corrientes portadoras), su funcionamiento se basa en la utilización de la red eléctrica existente en cualquier tipo de edificio, ya sea casa u oficina, como medio físico para la comunicación interna de los distintos componentes del sistema domótico. (Aguirre & Zapata, 2006)

Sus más de 25 años de experiencia, con millares de instalaciones realizadas en España, la multitud de fabricantes que asegura una amplia gama de productos, continuidad de la tecnología y el importante hecho de no tener que realizar obras de infraestructura para cableados especiales, son suficientes motivos para recomendar este sistema domótico destinada para apartamentos, oficinas y locales, tanto de nueva como de antigua construcción.

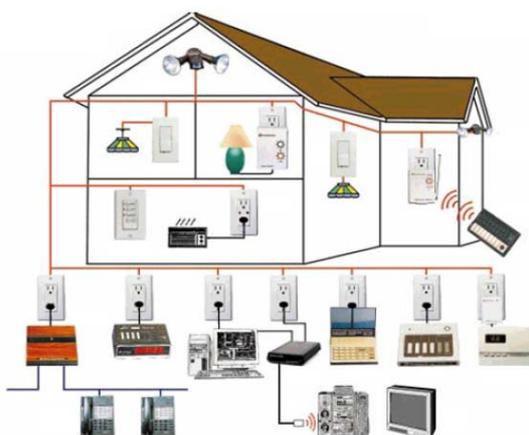


Figura 5. Ilustración de aplicaciones X-10

Pero además, combinando múltiples productos de dilatada y probada experiencia, se puede lograr un sistema domótico de altas prestaciones y baja inversión. Su instalación y configuración es tan sencilla que el propio usuario puede configurar las aplicaciones que desee en cada momento entre una amplia abanico de funciones.

Gracias a la flexibilidad que supone el ser un sistema escalable, resulta todo un interesante y nuevo mundo de bricolaje tanto en seguridad doméstica como en confort, ahorro energético,

comunicación e incluso ocio, pudiendo manejar a distancia el DVD, las fotos, vídeos y canciones mp3 almacenadas en nuestro PC para visionarlas en el *home cinema* de nuestro salón.

La red eléctrica para X-10 sería el equivalente al Bus de otros sistemas como EIB o LonWorks, claro está, salvando las distancias. X-10 es el estándar con mayor implantación en el mercado domótico de corrientes portadoras. La filosofía fundamental de diseño X-10 es que los productos pueden interrelacionarse entre ellos y la compatibilidad con los productos anteriores de la misma gama, es decir, equipos instalados de hace 20 años siguen funcionando con la gama actual.

El sistema X-10 ha sido desarrollado para ser flexible. Se puede empezar con un producto en particular, por ejemplo, un mando a distancia, y expandir luego el sistema para incluir la seguridad o el control con el ordenador, siempre que desee, con componentes fáciles de instalar y no requieren cableados especiales.

X-10 es el lenguaje de comunicación que utilizan los productos compatibles X-10 para hablarse entre ellos y que le permiten controlar las luces y los electrodomésticos de su hogar, aprovechando para ello la instalación eléctrica existente de 220V de su casa, y evitando tener que instalar cables. Los productos de automatización del hogar X-10 están diseñados para que puedan ser instalados fácilmente por cualquier persona sin necesidad de conocimientos especiales.

El sistema X-10 proporciona a los usuarios funcionalidades como:

- Conectar y funcionar (Plug & Play).
- Facilidad de manejo.
- Confort y diversión.

A los instaladores:

- Soluciona problemas economizando proyectos.
- Flexibilidad, modularidad, capacidad de crecimiento.
- Rehabilitación de casas, optimizando recursos con X-10.
- Soluciones inteligentes.

2.5.1 ¿Cómo funciona?

Los equipos X-10 poseen dos ruedas las cuales son utilizadas para la configuración en la red eléctrica, la primera es de color rojo y representa el código de la casa, está identificada con las letras de la *A* a la *P* y la segunda marcada de color negro representa el número del módulo o numérico que corresponde a dicho dispositivo. Cada dispositivo tiene su propia dirección única que el usuario escoge rodando los dos diales en el dispositivo. Si dos actuadores tienen los mismos códigos de casa y numérico, ejecutarán simultáneamente las órdenes procedentes por la red eléctrica. Si a dos detectores de presencia X-10 se les asigna los mismos códigos, cosa que puede resultar útil para encender las luces de escalera desde dos plantas distintas por ejemplo, mandarán la misma orden. Hay 256 combinaciones, así que puede extender su instalación hasta 256 puntos de control X-10. (Jiménez Buendía, 2009)



Figura 6. Transmisión de datos en X-10

Lleva sólo un par de segundos hacerlo: el usuario define un nombre para el dispositivo (usará este nombre al dirigir el sistema por voz), le pone el código correspondiente, prueba el dispositivo en tiempo real, y puede asignar el dispositivo a un grupo para que pueda operar un rango entero de dispositivos y luces incluso con una sola orden. Puede agregar nuevos dispositivos o puede renombrar los existentes todas las veces que el usuario quiera, fijar su funcionamiento a lo largo de las horas de un día, una semana, etc.

Las corrientes portadoras funcionan aprovechando la onda que genera la corriente alterna. Las transmisiones de datos se sincronizan en el paso del cero a la corriente continua. De esta forma se genera una serie de códigos formada por el 1 y el 0.

Debido a las características del medio físico utilizado se transmite dos veces cada uno de estos bloques de información para que conseguir reducir las probabilidades de error en la transmisión. Además, cada par de bloques de información debe estar precedido por seis pasos por cero (tres ciclos de red), tiempo de espera es necesario para que el receptor procese los datos de dirección recibidos. En la Figura 7 se muestran los ciclos totales que necesita un transmisor para realizar una transmisión completa.

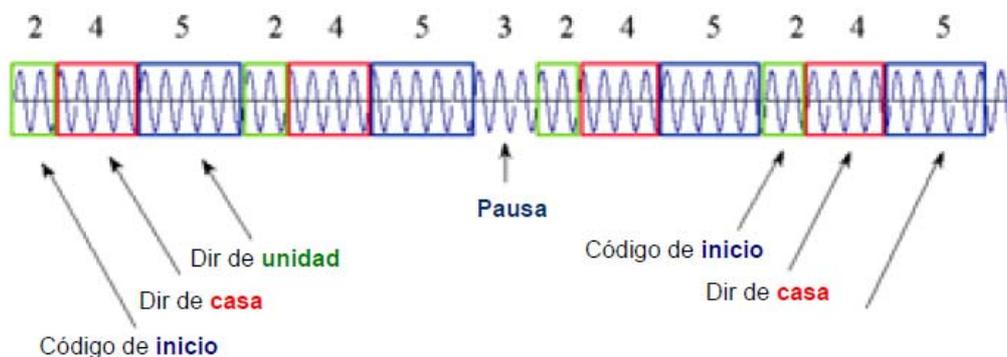


Figura 7. Una transmisión completa en X-10

Cada once ciclos de red se transmite un bloque de datos, y una transmisión estándar X-10 normal necesita 47 ciclos de la señal de red. A una frecuencia de 50 Hz esto supone un tiempo igual a 0,94 segundos en transmitir una orden completa.

2.5.2 Tipos de dispositivos X-10

Los sensores de un sistema domótico transmiten órdenes mientras que los actuadores las

Reciben; por este motivo X-10 hace una clasificación de sus dispositivos de la forma siguiente:

- **Transmisores:** Estos transmisores envían una señal especialmente codificada de bajo voltaje que es superpuesta sobre el voltaje del cableado. Un transmisor es capaz de enviar información hasta 256 dispositivos sobre el cableado eléctrico. Múltiples transmisores pueden enviar señales al mismo módulo.
- **Receptores:** Como los receptores y transmisores pueden comunicarse con 256 direcciones distintas. Cuando se usan con algunos controladores de computadoras, estos dispositivos pueden reportar su estado.
- **Bidireccionales:** Estos dispositivos toman la señal enviada por los dispositivos transmisores. Una vez que la señal es recibida el dispositivo responde encendiéndose (ON) o apagándose (OFF). Los receptores generalmente tienen un código establecido por el usuario para indicar la dirección del dispositivo. Múltiples dispositivos con el mismo código pueden co-existir y responder al mismo tiempo dentro de una misma casa. Los dispositivos bidireccionales, tienen la capacidad de responder y confirmar la correcta realización de una orden, lo cual puede ser muy útil cuando el sistema X-10 está conectado a un programa de ordenador que muestre los estados en que se encuentra la instalación domótica de la vivienda. Este es el caso del programador para PC.

- Inalámbricos: Una unidad que permite conectarse a través de una antena y enviar señales de radio desde una unidad inalámbrica e inyectar la seña X-10 en el cableado eléctrico (como los controles remotos para abrir los portones de los garajes). Estas unidades no están habilitadas para controlar directamente a un receptor X-10, debe utilizarse un módulo transceptor.

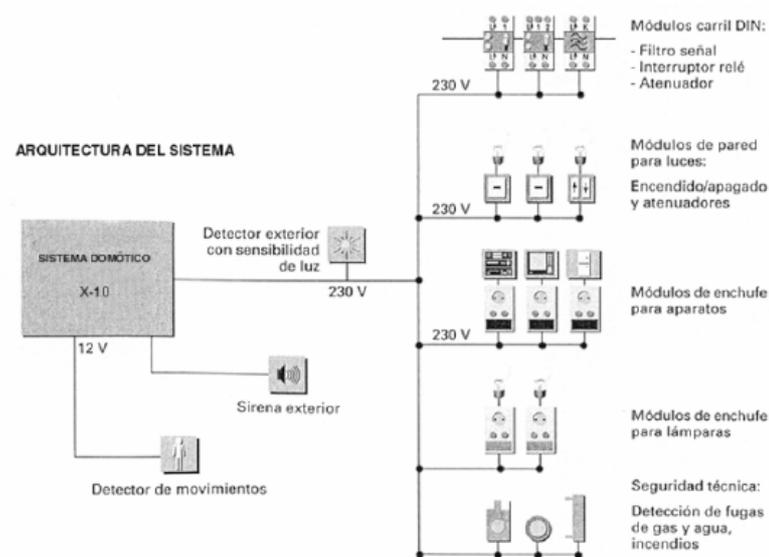


Figura 8. Ejemplo de arquitectura X-10

2.5.3 Oferta de dispositivos X-10

A continuación una selección con algunos módulos de tipología X-10 actualmente en el mercado y que están destinados a satisfacer algunas de las principales necesidades de los usuarios:

- Módulo para lámparas: el módulo de lámpara básico, forma parte de cualquier sistema de domótica, es un receptor de señales X-10 que va enchufado a la red y permite el control de encendido y apagado así como atenuar la luminosidad de una lámpara. Soporta una intensidad de 40w a 300 w. Tan sencillo como conectarlo en el enchufe actual de la lámpara, y luego esta se conecta al módulo.
- Módulo de aparato: permite enchufar cualquier electrodoméstico para controlarlo con este dispositivo. El módulo de domótica para aparatos es similar al de lámpara pero permite

intensidades de hasta 2500w y por el contrario no lleva atenuador. Puede ser activado remota o localmente, es decir en el mismo enchufe o a distancia.

- Módulo para casquillo: permite controlar bombillas directamente de hasta 100Wattios. Es el módulo domótico de lámpara que se enrosca directamente en el casquillo de la bombilla. Controla el encendido de cualquier luz ya sea de interior o de exterior, y solo basta con enroscar el módulo en el lugar donde antes estaba la bombilla. El módulo es de tipo encendido y apagado.
- Módulo universal: módulo que controla el encendido y apagado de aparatos de bajo voltaje o contactos sin tensión por medio de un relé.
- Módulo receptor de radio-frecuencia: es uno de los componentes más importantes que podemos encontrar por parte de la domótica, ya que recibe las señales de los mandos a distancia y envía las ordenes correspondientes para encender y apagar luces y aparatos.
- Módulo receptor universal: este módulo se conecta directamente al PC. Este receptor tiene una antena externa de doble fijación y un cable de 2 metros, que permite colocarlo donde nos sea más idóneo o donde haya mejor recepción.
- Módulo transmisor: este módulo envía las ordenes de encendido y apagado. Es tan pequeño que se instala dentro de las cajitas de los interruptores actuales. Gracias a este tamaño, no hace falta cambiar todos los interruptores de la casa.
- Módulo en aparato: este módulo puede controlar hasta 2000w en lámparas y 3600w en cargas resistivas. Este módulo se instala detrás del enchufe que se quiere controlar, quedando totalmente oculto y conservando los mismos mecanismos existentes. Es muy seguro para los niños, ya que se puede tener la corriente cortada en todas aquellas tomas que no tienen nada conectado.
- Detector de movimiento: se trata de un sensor que detecta los movimientos. No necesita cables y transmite por radio-frecuencia cualquier percepción de movimiento.
- Sensor de puertas y ventanas: este sensor es imprescindible para cualquier sistema de seguridad. Funciona con baterías, y su instalación requiere un mínimo esfuerzo. Se auto-chequea el funcionamiento periódicamente de forma automática.

- Sirena interior: es una sirena que se puede colocar en cualquier sitio de la casa. Es muy segura, ya que tiene unos sonidos muy elevados.
- Detector de rotura de cristales: el detector se coloca al cristal y funciona bajo dos parámetros; detecta las vibraciones del cristal y escucha el sonido de alta frecuencia de la rotura del cristal. Está diseñado para lunas fijas o escaparates y no necesita cables para su instalación, además actúa por radio-frecuencia.

2.6 LonWorks

LonWorks es una plataforma de control creada por la compañía norteamericana Echelon. Las redes LonWorks describen de una manera efectiva una solución completa a los problemas de sistemas de control. Al igual que la industria informática, la industria del control fue creada, y en muchos casos todavía lo es, basada en soluciones centralizadas de control punto-a-punto. Esto significa que existe un “maestro” o controlador principal similar a un ordenador, físicamente cableado a cada punto de control particular, como actuadores o sensores, denominados “esclavos”. El resultado final es funcional, pero es caro y difícil para mantener, ampliar y gestionar. Igualmente, es menos fiable frente a fallos, ya que la caída del controlador principal provoca la caída de todo el sistema. (Aguirre & Zapata, 2006)

El comienzo de las redes LonWorks se basó en conceptos muy simples:

- 1) los sistemas de control son fundamentalmente idénticos, independientemente de la aplicación final;
- 2) un sistema de control distribuido es significativamente más potente, flexible, y ampliable que un sistema de control centralizado;
- 3) las empresas ahorran más dinero a largo plazo instalando redes distribuidas que instalando redes centralizadas.

La tecnología LonWorks proporciona una solución a los múltiples problemas de diseño, construcción, instalación, y mantenimiento de redes de control; redes que pueden variar en tamaño desde dos a 32,000 dispositivos y se pueden usar en cualquier aplicación desde supermercados a plantas de petrolíferas, desde aviones hasta ferrocarriles, desde edición por láser a máquinas de mecanizado, desde rascacielos a viviendas particulares o los esquemas de control basados en sistemas centralizados. Los fabricantes están utilizando sistemas abiertos, chips estándar, sistemas operativos estándar y componentes para construir productos que mejoren la flexibilidad, el costo del sistema y su instalación. La tecnología LonWorks está acelerando la tendencia a evitar los sistemas propietarios o los sistemas centralizados, proporcionando interoperabilidad, una tecnología robusta, desarrollos más rápidos y ahorro económico. (Echelon)

En términos de interoperabilidad y compatibilidad, Lonworks es a las redes de domótica lo que WINDOWS es a los sistemas informáticos, en el sentido que sirve de protocolo común para la compatibilidad entre múltiples fabricantes.

LonWorks es un estándar abierto para cualquier fabricante, está basado en una arquitectura distribuida y multimedia tanto de proceso como de ubicación, es decir, cada elemento del sistema tiene propia capacidad de proceso y puede ser ubicado en cualquier parte de la vivienda. Esta característica proporciona al instalador domótico una libertad de diseño que le posibilita adaptarse a las características físicas de cada vivienda en particular.

Cada sistema de control está compuesto básicamente por los siguientes componentes: sensores, actuadores, programas de aplicación, redes de comunicación, interfaces hombre-máquina y herramientas para el manejo de red.

En esta arquitectura los nodos se conectan entre si utilizando el protocolo LonWorks y por cualquier medio que sea el más conveniente, a esta característica se le denomina multimodal. Los medios disponibles son:

- par trenzado
- línea directa
- radio frecuencia
- fibra óptica
- infrarrojo

La tecnología LonWorks tiene los siguientes elementos fundamentales:

- Neuron Chip Control processor y transceivers
- Protocolo de Comunicación LonTalk

2.6.1 Neuron Chip Control processor y transceivers

Los transceivers son dispositivos emisores-receptores que se encargan de conectar las neuronas con el medio de transmisión.

Mientras que los neuron chip son circuitos integrados que contienen tres microprocesadores y memoria, memorias ROM y RAM, interfaces de comunicación y puertos de entrada y salida (I/O). la ROM del chip contiene el sistema operativo, el protocolo de comunicación LonTalk y una librería de funciones de aplicación. Cada Neuron Chip contiene un único código de 48 bits llamado "Neuron ID", estos chips están disponibles en una serie de velocidades, capacidades de memoria e interfaces diferentes y actualmente son fabricados por Motorola y Toshiba. (Jiménez Buendía, 2009)

Todos los dispositivos presentes en una red Lonworks precisan de un chip Neuron. Dos de los microprocesadores están optimizados para ejecutar el protocolo de comunicaciones, mientras que el tercero está dedicado a ejecutar el programa de control del nodo. Hay por tanto dos procesadores de comunicación y un procesador para la aplicación.

Disponer de dos procesadores dedicados a tareas de comunicación en red y uno dedicado a la aplicación asegura que la complejidad del programa no afecta negativamente a la respuesta de la red y viceversa. Adicionalmente, el hecho de encapsular ambas funciones en un solo chip ahorra tiempos de diseño y producción. Ventajas Técnicas

- El uso del chip Neuron garantiza un entorno de ejecución hardware para el protocolo. Para asegurar suficiente potencia de proceso, el protocolo se implementa como una mezcla de hardware y firmware.
- Diseñado para un amplio rango de aplicaciones, y fabricados en masa por dos de los mayores fabricantes de semiconductores del mundo, el chip Neuron ofrece una implementación del protocolo LonTalk más económica que cualquier otra solución propietaria. El resultado neto se traduce en que el chip Neuron es el mejor y más económico procesador Lonworks para cualquier aplicación que precise potencia de proceso de 8 bits.

2.6.2 Protocolo de Comunicación LonTalk

LonTalk es un protocolo por niveles orientado al envío de paquetes, está totalmente de acuerdo con la arquitectura de niveles propuesta por la ISO (Internacional Standard Organization). Cada uno de los terminales conectados al canal tiene un turno para transmisión de paquetes. Cada paquete tiene un largo variable de bytes y contiene la información sobre el nivel de aplicación a la de direccionamiento y a otra información.

El protocolo LonTalk proporciona principalmente dos técnicas para asegurar el correcto envío y recepción de las transmisiones. La fiabilidad de las transmisiones se asegura mediante una confirmación entre emisor y receptor (la mayoría de los protocolos pueden asegurar que un paquete fue transmitido con éxito, pero no que fue recibido por el destinatario). Todos los terminales conectados miran cada uno de los paquetes para ver si corresponde a ellos, si así lo es, procede a ver el paquete y sino, no pasa nada. Este protocolo es independiente del medio utilizado. La integridad de los datos se garantiza por el hecho que todas las transmisiones disponen de un control de errores basado en códigos polinómicos de 16 bits.

El programa de implementación del protocolo LonTalk firmware esta dentro de la RPM de Neuron Chip, dando una serie de parámetros de seguridad, rendimiento y calidad. Todas las operaciones en la red de control se realizan usando un sistema de “autenticación de remitente” como una capa de nivel 4 (Nivel de Servicio del modelo OSI). Esta capa proporciona una garantía de autenticidad del remitente, que no puede ser violada por piratas informáticos (“hackers”).

Cada transmisión de paquete proporciona autenticación del remitente. Dado que la implementación de esta característica se encuentra a nivel de chip, por una parte no puede ser modificada y por otra está garantizada en todos los productos, independientemente del fabricante del mismo.

Capítulo 3: ARDUINO

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios en donde se desee crear entornos u objetos interactivos.

El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Los microcontroladores más usados son el Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8 por su sencillez y bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños. Por otro lado el software consiste en un entorno de desarrollo y el cargador de arranque (bootloader) que corre en la placa. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino(basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). (Arduino, 2012)

Arduino puede tomar información del entorno a través de sus pines de entrada de toda una gama de sensores y puede afectar aquello que le rodea controlando luces, motores y otros actuadores. Los proyectos hechos con Arduino pueden ejecutarse sin necesidad de conectar a un ordenador, si bien tienen la posibilidad de hacerlo y comunicar con diferentes tipos de software (p.ej. Flash, Processing,MaxMSP).

Las placas pueden ser hechas a mano o compradas de fábrica; el software puede ser descargado de forma gratuita. Los ficheros de diseño de referencia (CAD) están disponibles bajo una licencia abierta, así pues eres libre de adaptarlos a tus necesidades. Al ser open-hardware, tanto su diseño como su distribución es libre. Es decir, puede utilizarse libremente para el desarrollo de cualquier tipo de proyecto sin haber adquirido ninguna licencia.

Antes de proseguir con los pormenores del Arduino, es necesario hablar del concepto de microcontrolador, por ser este el pilar central del Arduino, luego de esto pasamos a detalles sobre el Arduino, tanto de su hardware como la programación del mismo.

3.1 Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior las tres principales unidades funcionales de una computadora (Reyes, 2006):

1. unidad central de procesamiento,
2. memoria
3. periféricos de entrada/salida.

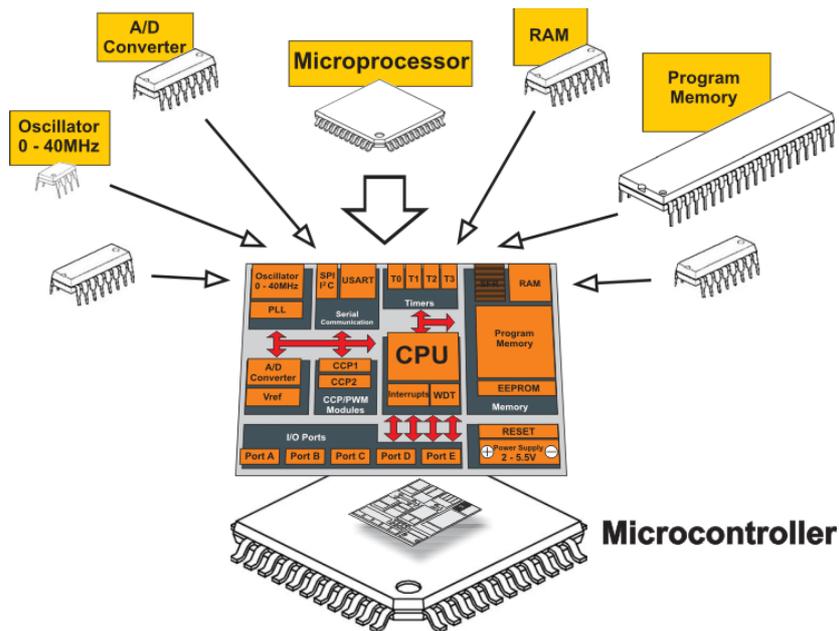


Figura 9. Arquitectura básica de un microcontrolador

3.1.1 Historia

El primer microprocesador fue el Intel 4004 de 4 bits, lanzado en 1971, seguido por el Intel 8008 y otros más capaces. Sin embargo, ambos procesadores requieren circuitos adicionales para implementar un sistema de trabajo, elevando el costo del sistema total. El primer microcontrolador como lo conocemos hoy en día fue desarrollado en 1971 por los ingenieros de Texas Instruments Gary Boone y Michael Cochran, llamado el TMS 1000, fue comercializado en 1974, este combinaba memoria ROM, memoria RAM, microprocesador y reloj en un chip. (Reyes, 2006)

Debido en parte a la existencia del TMS 1000, Intel desarrolló un sistema de ordenador en un chip optimizado para aplicaciones de control, el Intel 8048, que comenzó a comercializarse en 1977.

El costo se ha desplomado en el tiempo, con el más barato microcontrolador de 8 bits disponible por menos de 0,25 dólares para miles de unidades en 2009, y algunos microcontroladores de 32 bits a 1 dólar por cantidades similares. En la actualidad los microcontroladores son baratos y fácilmente disponibles para los aficionados, con grandes comunidades en línea para ciertos procesadores.

3.1.2 Características

Algunos microcontroladores pueden utilizar palabras de cuatro bits y ,funcionan a velocidad de reloj con frecuencias tan bajas como 4 kHz, con un consumo de baja potencia (mW o microvatios). Por lo general, tendrá la capacidad para mantener la funcionalidad a la espera de un evento como pulsar un botón o de otra interrupción, el consumo de energía durante el sueño (reloj de la CPU y los periférico de la mayoría) puede ser sólo nanovatios, lo que hace que muchos de ellos muy adecuados para aplicaciones con batería de larga duración. Otros microcontroladores pueden servir para roles de rendimiento crítico, donde sea necesario actuar más como un procesador digital de señal (DSP), con velocidades de reloj y consumo de energía más altos.

Al ser fabricados, la memoria ROM del microcontrolador no posee datos. Para que pueda controlar algún proceso es necesario generar o crear y luego grabar en la EEPROM o equivalente del microcontrolador algún programa, el cual puede ser escrito en lenguaje ensamblador u otro lenguaje para microcontroladores; sin embargo, para que el programa pueda ser grabado en la memoria del microcontrolador, debe ser codificado en sistema numérico hexadecimal que es finalmente el sistema que hace trabajar al microcontrolador cuando éste es alimentado con el voltaje adecuado y asociado a dispositivos analógicos y discretos para su funcionamiento.

Los microcontroladores son diseñados para reducir el costo económico y el consumo de energía de un sistema en particular. Por eso el tamaño de la unidad central de procesamiento, la cantidad de memoria y los periféricos incluidos dependerán de la aplicación. El control de un electrodoméstico sencillo como una batidora utilizará un procesador muy pequeño (4 u 8 bits) porque sustituirá a un autómata finito. En cambio, un reproductor de música y/o vídeo digital (MP3 o MP4) requerirá de un procesador de 32 bits o de 64 bits y de uno o más códecs de señal digital (audio y/o vídeo). El control de un sistema de frenos ABS (Antilock Brake System) se basa normalmente en un microcontrolador de 16 bits, al igual que el sistema de control electrónico del motor en un automóvil.

Los microcontroladores representan la mayoría de los chips de computadoras vendidos, sobre un 50% son controladores "simples" y el restante corresponde a DSPs más especializados. Mientras se pueden tener uno o dos microprocesadores de propósito general en casa, cada hogar tiene distribuidos seguramente entre los electrodomésticos una o dos docenas de microcontroladores. Pueden encontrarse en casi cualquier dispositivo electrónico como automóviles, lavadoras, hornos microondas, teléfonos, etc.

Un microcontrolador difiere de una unidad central de procesamiento normal, debido a que es más fácil convertirla en una computadora en funcionamiento, con un mínimo de circuitos integrados externos de apoyo. La idea es que el circuito integrado se coloque en el dispositivo, enganchado a la fuente de energía y de información que necesite, y eso es todo. Un microprocesador tradicional no le permitirá hacer esto, ya que espera que todas estas tareas sean manejadas por otros chips. Hay que agregarle los módulos de entrada y salida (puertos) y la memoria para almacenamiento de información.

Un microcontrolador típico tendrá un generador de reloj integrado y una pequeña cantidad de memoria de acceso aleatorio y/o ROM/EPROM/EEPROM/flash, con lo que para hacerlo funcionar todo lo que se necesita son unos pocos programas de control y un cristal de sincronización. Los microcontroladores disponen generalmente también de una gran variedad de dispositivos de entrada/salida, como convertidor analógico digital, temporizadores, UARTs y buses de interfaz serie especializados, como I2C y CAN. Frecuentemente, estos dispositivos integrados pueden ser controlados por instrucciones de procesadores especializados. Los modernos microcontroladores frecuentemente incluyen un lenguaje de programación integrado, como el lenguaje de programación BASIC que se utiliza bastante con este propósito.

Los microcontroladores negocian la velocidad y la flexibilidad para facilitar su uso. Debido a que se utiliza bastante sitio en el chip para incluir funcionalidad, como los dispositivos de entrada/salida o la memoria que incluye el microcontrolador, se ha de prescindir de cualquier otra circuitería.

3.1.3 Periféricos

A continuación describiremos algunos de los periféricos que con mayor frecuencia encontraremos en los microcontroladores (Reyes, 2006):

- **Entradas y salidas de propósito general.** También conocidos como puertos de E/S, generalmente agrupadas en puertos de 8 bits de longitud, permiten leer datos del exterior o escribir en ellos desde el interior del microcontrolador, el destino habitual es el trabajo con dispositivos simples como relés, LED, o cualquier otra cosa que se le ocurra al programador. Algunos puertos de E/S tienen características especiales que le permiten manejar salidas con determinados requerimientos de corriente, o incorporan mecanismos especiales de interrupción para el procesador. Típicamente cualquier pin de E/S puede ser considerada E/S de propósito general, pero como los microcontroladores no pueden tener infinitos pines, ni siquiera todos los pines que queramos, las E/S de propósito general comparten los pines con otros periféricos. Para usar un pin con cualquiera de las características a él asignadas debemos configurarlo mediante los registros destinados a ellos.
- **Temporizadores y contadores.** Son circuitos sincrónicos para el conteo de los pulsos que llegan a su poder para conseguir la entrada de reloj. Si la fuente de un gran conteo es el

oscilador interno del microcontrolador es común que no tengan un pin asociado, y en este caso trabajan como temporizadores. Por otra parte, cuando la fuente de conteo es externa, entonces tienen asociado un pin configurado como entrada, este es el modo contador.

- **Convertor analógico/digital.** Como es muy frecuente el trabajo con señales analógicas, éstas deben ser convertidas a digital y por ello muchos microcontroladores incorporan un convertor analógico-digital, el cual se utiliza para tomar datos de varias entradas diferentes que se seleccionan mediante un multiplexor. Las resoluciones más frecuentes son 8 y 10 bits, que son suficientes para aplicaciones sencillas. Para aplicaciones en control e instrumentación están disponibles resoluciones de 12bit, 16bit y 24bit6 . También es posible conectar un convertidor externo, en caso de necesidad.
- **Puertos de comunicación**
 - **Puerto serie.** Este periférico está presente en casi cualquier microcontrolador, normalmente en forma de UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) o USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) dependiendo de si permiten o no el modo sincrónico de comunicación. El destino común de este periférico es la comunicación con otro microcontrolador o con una PC y en la mayoría de los casos hay que agregar circuitos externos para completar la interfaz de comunicación. La forma más común de completar el puerto serie es para comunicarlo con una PC mediante la interfaz EIA-232 (más conocida como RS-232), es por ello que muchas personas se refieren a la UART o USART como puerto serie RS-232, pero esto constituye un error, puesto que este periférico se puede utilizar para interconectar dispositivos mediante otros estándares de comunicación. En aplicaciones industriales se utiliza preferiblemente RS-485 por sus superior alcance en distancia, velocidad y resistencia al ruido.
 - **Interface de Periférico Serie(SPI).** Este tipo de periférico se utiliza para comunicar al microcontrolador con otros microcontroladores o con periféricos externos conectados a él, por medio de una interfaz muy sencilla. Hay solo un nodo controlador que permite iniciar cualquier transacción, lo cual es una desventaja en sistemas complejos, pero su sencillez permite el aislamiento galvánico de forma directa por medio de optoacopladores.
 - **Circuitos Inter-Integrados (I²C).** Cumple las mismas funciones que el SPI, pero requiere menos señales de comunicación y cualquier nodo puede iniciar una transacción. Es muy utilizado para conectar las tarjetas gráficas de las computadoras personales con los monitores, para que estos últimos informen de sus prestaciones y permitir la autoconfiguración del sistema de vídeo.
 - **USB.** Los microcontroladores son los que han permitido la existencia de este sistema de comunicación. Es un sistema que trabaja por polling (monitorización) de un conjunto de periféricos inteligentes por parte de un amo, que es normalmente un computador personal. Cada modo inteligente está gobernado inevitablemente por un microcontrolador.

- **Ethernet.** Es el sistema más extendido en el mundo para redes de área local cableadas. Los microcontroladores más poderosos de 32 bits se usan para implementar periféricos lo suficientemente poderosos como para que puedan ser accedidos directamente por la red. Muchos de los enrutadores caseros de pequeñas empresas están contruidos en base a un microcontrolador que hace del cerebro del sistema.
- **Controlador de Área de Red (CAN).** Este protocolo es del tipo CSMA/CD con tolerancia a elevados voltajes de modo común y orientado al tiempo real. Este protocolo es el estándar mas importante en la industria automotriz (OBD). También se usa como capa física del "field bus" para el control industrial.
- **Otros puertos de comunicación.** Hay una enorme cantidad de otros buses disponibles para la industria automotriz (linbus) o de medios audiovisuales como el i2s, IEEE 1394. Es usuario se los encontrará cuando trabaje en algún área especializada.
- **Comparadores.** Son circuitos analógicos basados en amplificadores operacionales que tienen la característica de comparar dos señales analógicas y dar como salida los niveles lógicos '0' o '1' en dependencia del resultado de la comparación. Es un periférico muy útil para detectar cambios en señales de entrada de las que solamente nos interesa conocer cuando está en un rango determinado.
- **Modulador de ancho de pulsos.** Los PWM (Pulse Width Modulator) son periféricos muy útiles sobre todo para el control de motores, sin embargo hay un grupo de aplicaciones que pueden realizarse con este periférico, dentro de las cuales podemos citar: inversión DC/AC para UPS ,conversión digital analógica D/A, control regulado de luz (dimming) entre otras. El PWM consiste en una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal o una cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.
- **Memoria de datos no volátil.** Muchos microcontroladores han incorporado este tipo de memoria como un periférico más, para el almacenamiento de datos de configuración o de los procesos que se controlan. Esta memoria es independiente de la memoria de datos tipo RAM.

3.2 ¿Por qué ARDUINO?

Hay muchos otros microcontroladores y plataformas microcontroladoras disponibles para computación física. Parallax Basic Stamp, Netmedia's BX-24, Phidgets, MIT's Handyboard, y muchas otras ofertas de funcionalidad similar. Todas estas herramientas toman los desordenados detalles de la programación de microcontrolador y la encierran en un paquete fácil de usar y de proceso simplificado. Algunas de sus principales ventajas son:

- **Económico.** Las placas Arduino son relativamente baratas comparadas con otras plataformas microcontroladoras. La versión menos cara del módulo Arduino puede ser

ensamblada a mano, e incluso los módulos de Arduino pre-ensamblados cuestan menos de 50\$.

- **Multiplataforma.** El software de Arduino se ejecuta en sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y GNU/Linux. La mayoría de los sistemas microcontroladores están limitados a Windows.
- **Entorno de programación simple y claro.** El entorno de programación de Arduino es fácil de usar para principiantes, pero suficientemente flexible para que usuarios avanzados puedan aprovecharlo también. Para profesores, está convenientemente basado en el entorno de programación Processing, de manera que estudiantes aprendiendo a programar en ese entorno estarán familiarizados con el aspecto y la imagen de Arduino.
- **Código abierto y software extensible.** El software Arduino está publicado como herramientas de código abierto, disponible para extensión por programadores experimentados. El lenguaje puede ser expandido mediante librerías C++, y la gente que quiera entender los detalles técnicos pueden hacer el salto desde Arduino a la programación en lenguaje AVR C en el cual está basado. De forma similar, puedes añadir código AVR-C directamente en tus programas Arduino si quieres.
- **Código abierto y hardware extensible.** El Arduino está basado en microcontroladores ATMEGA8 y ATMEGA168 de Atmel. Los planos para los módulos están publicados bajo licencia Creative Commons, por lo que diseñadores experimentados de circuitos pueden hacer su propia versión del módulo, extendiéndolo y mejorándolo. Incluso usuarios relativamente inexpertos pueden construir la versión de la placa del módulo para entender como funciona y ahorrar dinero.

3.3 Hardware

Una placa Arduino consiste en un microcontrolador Atmel AVR de 8 bits con componentes complementarios para facilitar la programación y la incorporación en otros circuitos. Un aspecto importante del Arduino es la forma estandarizada en que los conectores son expuestos, permitiendo a la placa Arduino conectarse a una variedad de módulos expansibles intercambiables conocidos como “shields”. Algunos shields se comunican con la placa Arduino directamente a través de varios pines, pero otros son individualmente direccionales via un bus serial I²C, permitiendo que sean apilados y usados en paralelo. (Arduino, 2012)

Los Arduinos oficiales utilizan la serie de microcontroladores megaAVR, específicamente el ATmega8, ATmega168, ATmega328, ATmega1280, y ATmega2560. Varios otros procesadores han sido empleados en Arduinos compatibles.

La mayoría de las placas Arduinos incluyen un regulador lineal de 5 voltios y un oscilador de cristal de 16 MHz, aunque algunos diseños como el LilyPad corren a 8 MHz y no poseen el regulador de voltaje en el board debido a restricciones de tamaño y forma.

Un microcontrolador Arduino es pre-programado con un gestor de arranque (bootloader) que simplifica la subida de programas a la memoria flash del chip en comparación a otros dispositivos que típicamente necesitan un programador externo.

A nivel conceptual, cuando se utiliza la pila de software de Arduino, todas las placas se programan a través de una conexión RS-232, pero la forma en que esto se lleva a cabo varía según la versión de hardware. La placa Arduino Serial contiene un circuito inversor simple para convertir entre niveles RS-232I y las señales de nivel TTL. Las actuales placas Arduino se programan a través de USB, esto a través de un chip adaptador USB-serie como el FTDI FT232. Algunas variantes, como el Arduino Mini y el no-oficial Boarduino, usan un adaptador USB-serial desmontable. (Arduino, 2012)

La placa Arduino expone la mayoría de los pines de entrada/salida del microcontrolador para ser usados por otros circuitos. El Diecimila, Duemilanove, y el actual UNO proveen 14 pines digitales de entradas/salidas, 6 de los cuales pueden producir señales PWM. Estos pines están en la parte superior de la placa, vía conectores hembra de 0.1 pulgadas. Diversos shields para diversas funciones se encuentran comercialmente disponibles.

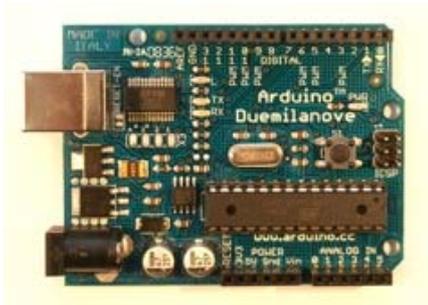
Algunas placas como el Arduino nano y el boarduino pueden proveer conectores machos en la parte inferior de la placa para poder ser insertados en placas de pruebas no soldables.

3.4 Placas Arduinos Existentes

El hardware original Arduino es manufacturado por la compañía italiana Smart Projects, algunas placas originales han sido diseñadas por la compañía estadounidense SpakFun Electronics. A continuación las placas originales Arduinos que a la fecha han sido comercializadas (Arduino, 2012):

- **Arduino USB.** Esta es la placa mas utilizada, ha habido muchas revisiones de esta, ha continuación algunas de estas:
 - **Arduino Uno.** Esta es la última revisión de la placa Arduino USB. Se conecta a la PC vía un cable USB estándar. Es similar a la Duemilanove, pero no usa el chip FTDE para la conversión USB a serial, en vez de esto viene con el ATmega16U2(versión mejorada del Atmega8U2) programado como un convertidor USB-serial. Como esta es la placa utilizada en el presente proyecto, sobre la misma abundaremos en la siguiente sección.





○ **Arduino Duemilanove.** El Duemilanove automáticamente selecciona la fuente de alimentación adecuada (USB o externa), eliminando la necesidad de usar un jumper (especie de conmutador) de selección de fuente como ocurría en placas anteriores. Para que resulte cómodo se puede cortar la pista para deshabilitar el auto-reset y soldar un jumper en el corte para habilitarlo cuando sea necesario. Diseñado originalmente en base al ATmega168, pero a partir de marzo del 2009 empezó a comercializarse con el ATmega328p.

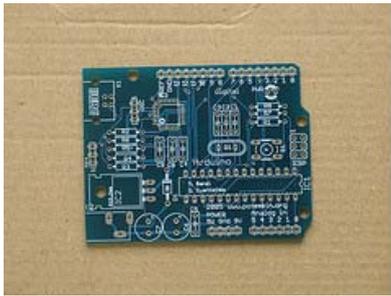
- **Arduino Diecimila.** La principal diferencia en el Arduino Diecimila es que puede ser reseteado desde el PC, sin necesidad de ser reseteado físicamente usando el botón de reset de la placa. El Diecimila usa un regulador de baja caída de tensión lo cual reduce el consumo de la placa cuando se alimenta con una fuente externa (Adaptador de pared o batería). La placa posee un fusible reseteable que protege el puerto USB de tu PC contra cortocircuitos y sobre tensiones. También posee pines hembra para la línea de reset y de 3.3V. Además incluye también un LED en el pin 13. Algunas placas Diecimila azules dicen "Prototype - Limited Edition" (Prototipo - Edición Limitada) pero son en realidad placas totalmente probadas (los verdaderos prototipos son rojos). Utiliza el ATmega168



○ **Arduino NG.** Usa el convertor serie a USB FTDI FT232RL, el cual necesita menos componentes externos que el FT232BM. Este también posee un LED en el pin 13, aunque en su última revisión se eliminó este LED porque podía interferir con la comunicación SPI. Originalmente comercializado con el ATmega8, paso a producirse en base al ATmega168.

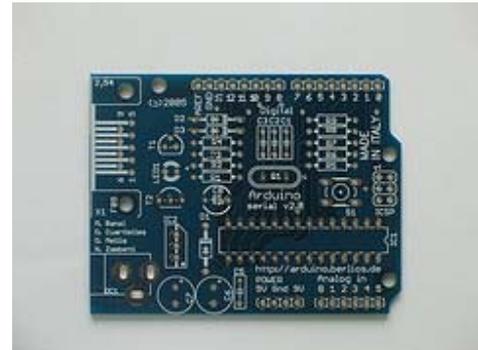
- **Arduino Extreme.** El Arduino Extreme usa más componentes de montaje superficial que las anteriores placas Arduino USB y posee pines hembras. También posee LEDs RX y TX los cuales indican que se están enviando datos desde o a la placa Arduino.





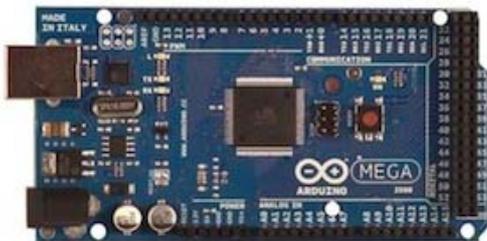
○ **Arduino USB.** La placa Arduino USB fue la primera placa denominada “Arduino”. Estas fueron vendidas principalmente como kits no ensamblados. La primera versión tenía un problema en la colocación del conector USB, problema corregido en su siguiente versión.

- **Arduino Serial.** Se vendía principalmente como kits no ensamblados o solo PCB's. Es una placa básica que utiliza una interfaz RS232 para comunicarse con el ordenador o para la carta de sketches. Esta placa es fácil de montar, incluso como ejercicio de aprendizaje. Fue diseñada para utilizar los componentes mas simples posibles, de manera que sea fácil de construir. También existe una versión de esta placa a una sola cara, haciéndola mas fácil de hacer a mano, esta no fue manufacturada, sino publicada en la web oficial de arduino para que la gente pudiese hacerla ellos mismos.



- **Arduino Mega.** El Arduino Mega representa la artillería pesada de los Arduinos, es una versión más grande y potente de las Arduino USB. Existen dos versiones de este:

- **Arduino Mega (original).** Utiliza el ATmega1280, tiene 54 pines de entrada/salida digitales, de los cuales 14 proporcionan salida PWM, 16 entradas analógicas, 4 UARTS, cristal oscilador de 16MHz, conexión USB, entrada de corriente, conector ICSP y botón de reset. Además es compatible con la mayoría de los shields diseñados para los Arduinos USB.



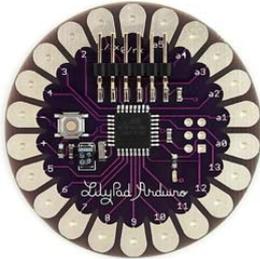
ATMega2560.

- **Arduino Mega 2560.** Es una actualización del Arduino Mega, utiliza el

- **Arduino Fio.** Orientado para usarse como un nodo inalámbrico. Posee conectores para un módulo XBee, un conector para una batería de polímeros de litio y un circuito para cargar la batería.



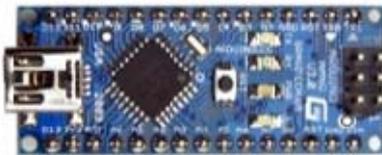
- **Arduino LilyPad.** Una placa Arduino circular, reducida al máximo, diseñada para ser cocida a ropa o a otro tipo de tela o soporte flexible para otro tipo de aplicaciones. Necesita un adaptador adicional para comunicarse con el PC. Puede utilizar complementos como fuentes de alimentación, sensores o actuadores unidos por hilo conductor. La placa está basada en el Atmega168V (versión de bajo consumo del ATmega168) o en el ATmega328V según la versión. Al igual que otros Arduinos posee 14 pines de entrada/salida digitales, con 6 de estos permitiendo salidas PWM y 6 salidas analógicas. Su reloj funciona a 8MHz.



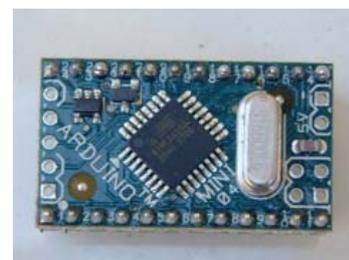
- **Arduino BT.** Este viene con un módulo bluetooth integrado para las comunicaciones móviles. Originalmente basado en el ATmega168, actualmente se suministra con el ATmega328. Soporta comunicación serial inalámbrica a través de bluetooth, pero su comunicación bluetooth no es compatible con headsets u otros dispositivos de audio.



- **Arduino Nano.** El Arduino Nano es una pequeña y completa placa basada en el ATmega328 (Arduino Nano 3.0) o ATmega168 (Arduino Nano 2.x) que se usa conectándola a una protoboard. Tiene más o menos la misma funcionalidad que el Arduino Duemilanove, pero con una presentación diferente. No posee conector para alimentación externa, y funciona con un cable USB Mini-B en vez de el cable estándar.



- **Arduino Mini.** es una placa con un pequeño microcontrolador basada en el ATmega168, pensada para ser usada en placas de prototipo y donde el espacio es un bien escaso. Cuenta con 14 entradas/salidas digitales (de las cuales 6 pueden ser usadas como salidas PWM), 8 entradas analógicas y un cristal de 16 MHz. Puede ser programada con el adaptador Mini USB u otros adaptadores USB o RS232 a TTL serial.



3.5 Arduino UNO

El Arduino UNO es una placa con microcontrolador basada en el ATmega328, Tiene 14 pines con entradas/salidas digitales (6 de las cuales pueden ser usadas como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un cristal oscilador a 16Mhz, conexión USB, entrada de alimentación, una cabecera ISCP, y un botón de reset. Contiene todo lo necesario para utilizar el microcontrolador; simplemente conectarse al ordenador a través del cable USB o alimentarlo con un transformador o una batería para empezar a trabajar con él. (Arduino, 2012)

“Uno” significa uno en italiano, y se nombro así para remarcar el lanzamiento próximo de Arduino 1.0, dado que el Arduino UNO y la versión 1.0 están llamados a ser la versión de referencia de Arduino.

El Arduino UNO difiere de todos sus precedentes en que no usa el chip driver FTDI USB-to-serial. En vez de esto viene con un Atmega16U2 programado como convertidor USB-to-serial.

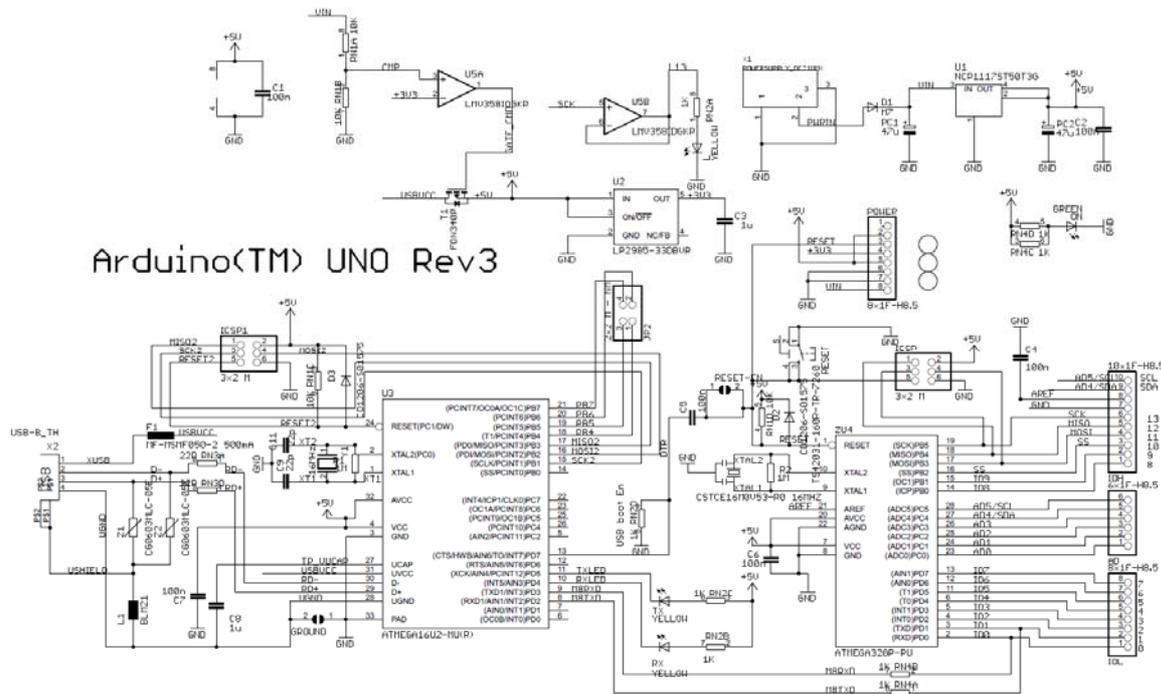


Figura 10. Esquemático del Arduino UNO

Cuadro Resumen

Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (limite)	6-20V
Pines E/S digitales	14 (6 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica	6
Intensidad por pin	40 mA
Intensidad en pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB de los cuales 0.5 KB las usa el gestor de arranque(bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidad de reloj	16 MHz

3.5.1 Alimentación

El Arduino UNO puede ser alimentado vía la conexión USB o con una fuente de alimentación externa. El origen de la alimentación se selecciona automáticamente.

Las fuentes de alimentación externas (no-USB) pueden ser tanto un transformador o una batería. El transformador se puede conectar usando un conector macho de 2.1mm con centro positivo en el conector hembra de la placa. Los cables de la batería puede conectarse a los pines Gnd y Vin en los conectores de alimentación (POWER)

La placa puede trabajar con una alimentación externa de entre 6 a 20 voltios. Si el voltaje suministrado es inferior a 7V el pin de 5V puede proporcionar menos de 5 Voltios y la placa puede volverse inestable, si se usan mas de 12V los reguladores de voltaje se pueden sobrecalentar y dañar la placa. El rango recomendado es de 7 a 12 voltios.

Los pines de alimentación son los siguientes:

- **VIN.** La entrada de voltaje a la placa Arduino cuando se está usando una fuente externa de alimentación (en opuesto a los 5 voltios de la conexión USB). Se puede proporcionar voltaje a través de este pin, o, si se está alimentado a través de la conexión de 2.1mm , acceder a ella a través de este pin.
- **5V.** este pin ofrece una salida regulada a 5V por el regulador de la placa independientemente de la fuente y voltaje utilizado para alimentar la placa (7-12v vía conector externo o 5V vía USB). No se recomienda suministrar voltaje a la placa a través de este pin pues puede dañarla.
- **3V3.** Similar al pin 5V, ofrece una salida de 3.3V por el regulador de la placa.
- **GND.** Pines de toma de tierra.

3.5.2 **Memoria**

El ATmega328 tiene 32KB de memoria flash para almacenar código (2KB son usados para el arranque del sistema (bootloader)), 2 KB de memoria SRAM y 1KB de EEPROM (al cual puede ser leída y escrita usando la librería EEPROM).

3.5.3 **Entradas y Salidas**

Cada uno de los 14 pines digitales en el UNO pueden utilizarse como entradas o como salidas usando las funciones `pinMode()`, `digitalWrite()`, y `digitalRead()`. Las E/S operan a 5 voltios. Cada pin puede proporcionar o recibir una intensidad máxima de 40mA y tiene una resistencia interna (desconectada por defecto) de 20-50kOhms. Además, algunos pines tienen funciones especializadas:

- **Serie:** 0 (RX) y 1 (TX). Usado para recibir (RX) transmitir (TX) datos a través de puerto serie TTL. Estos pines están conectados a los pines correspondientes del chip FTDI USB-to-TTL.
- **Interrupciones Externas:** 2 y 3. Estos pines se pueden configurar para lanzar una interrupción en un valor LOW(0V), en flancos de subida o bajada (cambio de LOW a HIGH(5V) o viceversa), o en cambios de valor.
- **PWM:** 3, 5, 6, 9, 10, y 11. Proporciona una salida PWM de 8 bits de resolución (valores de 0 a 255) a través de la función `analogWrite()`.
- **SPI:** 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Estos pines proporcionan comunicación SPI usando la librería SPI.
- **LED:** 13. Hay un LED integrado en la placa conectado al pin digital 13, cuando este pin tiene un valor HIGH(5V) el LED se enciende y cuando este tiene un valor LOW(0V) este se apaga.

El UNO tiene 6 entradas analógicas, y cada una de ellas proporciona una resolución de 10bits (1024 valores). Por defecto se mide de tierra a 5 voltios, aunque es posible cambiar la cota superior de este rango usando el pin AREF y la función `analogReference()`. Además algunos pines tienen funciones especializadas:

- **I2C: 4 (SDA) y 5 (SCL).** Soporte del protocolo de comunicaciones I2C (TWI) usando la librería Wire.

Otros pines en la placa:

- **AREF.** Voltaje de referencia para las entradas analógicas. Usado por `analogReference()`.
- Suministrar un valor LOW(0V) para reiniciar el microcontrolador. Típicamente usado para añadir un botón de reset a los shields que no dejan acceso a este botón en la placa.

3.5.4 Comunicaciones

EL Arduino UNO facilita en varios aspectos la comunicación con el ordenador, otro Arduino u otros microcontroladores. El ATmega328 proporciona comunicación vía serie UART TTL (5V), disponible a través de los pines digitales 0(RX) y 1(TX). El chip ATmega16U2 en la placa canaliza esta comunicación serial a través del Puerto USB y aparece como un Puerto virtual en la computadora. El firmware del 16U2 utiliza drivers estándar para USB, por lo que no es necesario suministrarle los drivers al ordenador, aun así, para Windows se necesita suministrar un archivo de extensión inf. El software incluye un monitor de puerto serie que permite enviar y recibir información textual de la placa Arduino. Los LEDs RX y TX de la placa parpadean cuando transmite información vía el chip USB-to-serial y vía USB a la computadora (no parpadearan si se usa la comunicación serie a través de los pines 0 y 1).

La librería SoftwareSerial permite comunicación serie por cualquier par de pines digitales del UNO.

El ATmega328 también soportan la comunicación I2C (TWI) y SPI. El software de Arduino incluye una librería Wire para simplificar el uso del bus I2C. Para el uso de la comunicación SPI se usa la librería SPI.

3.5.5 Programación

El Arduino UNO se puede programar a través del software Arduino. El ATmega328 viene pre cargado con un gestor de arranque (bootloader) que permite cargar nuevo código sin necesidad de un programador por hardware externo. Se comunica utilizando el protocolo STK500 original. También es posible sobrepasar el gestor de descarga y programar el microcontrolador a través del cabezal ICSP. (Arduino, 2012)

3.5.6 Reinicio Automático (Software)

En vez de necesitar reiniciar presionando físicamente el botón de reset antes de cargar, el Arduino UNO está diseñado de manera que es posible reiniciar por software desde el ordenador donde esté conectado. Una de las líneas de control de flujo(DTR) del ATmega16U2 está conectada a la línea de reinicio del ATmega328 a través de un condensador de 100 nanofaradios. Cuando la línea se pone a LOW(0V), la línea de reinicio también se pone a LOW el tiempo suficiente para reiniciar el chip. El software de Arduino utiliza esta característica para permitir cargar los sketches con solo apretar un botón del entorno. Dado que el gestor de arranque tiene un lapso de tiempo para ello, la activación del DTR y la carga del sketch se coordinan perfectamente.

Esta configuración tiene otras implicaciones. Cuando el UNO se conecta a un ordenador con Mac OS X o Linux, esto reinicia la placa cada vez que se realiza una conexión desde el software (vía USB). El medio segundo aproximadamente posterior, el gestor de arranque se esta ejecutando. A pesar de estar programado para ignorar datos mal formateados (ej. cualquier cosa que la carga de un programa nuevo) intercepta los primeros bytes que se envían

a la placa justo después de que se abra la conexión. Si un sketch ejecutándose en la placa recibe algún tipo de configuración inicial u otro tipo de información al inicio del programa, es necesario asegurarse que el software con el cual se comunica espera un segundo después de abrir la conexión antes de enviar los datos.

El UNO contiene una pista que puede ser cortada para deshabilitar el auto-reset. Las terminaciones a cada lado pueden ser soldadas entre ellas para rehabilitarlo. Están etiquetadas con "RESET-EN". También podéis deshabilitar el auto-reset conectando una resistencia de 110 ohms desde el pin 5V al pin de reset.

3.5.7 Protección contra sobretensiones en USB

El Arduino UNO tiene un multifusible reinicializable que protege la conexión USB de tu ordenador de cortocircuitos y sobretensiones. Aparte que la mayoría de ordenadores proporcionan su propia protección interna, el fusible proporciona una capa extra de protección. Si mas de 500mA son detectados en el puerto USB, el fusible automáticamente corta la conexión hasta que el cortocircuito o la sobretensión desaparecen.

3.5.8 Características Físicas

La longitud y amplitud máxima de la placa Arduino UNO es de 2.7 y 2.1 pulgadas respectivamente, con el conector USB y la conexión de alimentación sobresaliendo de estas dimensiones. Cuatro agujeros para fijación con tornillos permiten colocar la placa en superficies y cajas.

3.6 Entorno de Programación

La plataforma Arduino se programa mediante el uso de un lenguaje propio basado en el popular lenguaje de programación de alto nivel Processing. Sin embargo, es posible utilizar otros lenguajes de programación y aplicaciones populares en Arduino como son: Java, Flash, processing, Python, Visual Basic .NET, C, C++, etc. (Arduino, 2012)

Esto es posible debido a que Arduino se comunica mediante la transmisión de datos en formato serie que es algo que la mayoría de los lenguajes anteriormente citados soportan. Para los que no soportan el formato serie de forma nativa, es posible utilizar software intermediario que traduzca los mensajes enviados por ambas partes para permitir una comunicación fluida. Es bastante interesante tener la posibilidad de interactuar Arduino mediante esta gran variedad de sistemas y lenguajes puesto que dependiendo de cuales sean las necesidades del problema

que vamos a resolver podremos aprovecharnos de la gran compatibilidad de comunicación que ofrece. (Evans, 2007)

El IDE de Arduino es una aplicación multipaltforma escrita en Java, y se deriva de la IDE para el lenguaje de programación Processing y el proyecto Wring. Incluye un editor de código con funciones tales como resalto de sintaxis, emparejamiento de llaves, sangría automática, entre otras funcionalidades. También es capaz de compilar y cargar programas a la placa Arduino en un solo click. Normalmente no hay necesidad de editar los makefiles o ejecutar programas en una interfaz de línea de comandos, de todos modos la construcción de línea de comandos es posible con algunas herramientas de terceros como Ino. (Evans, 2007)

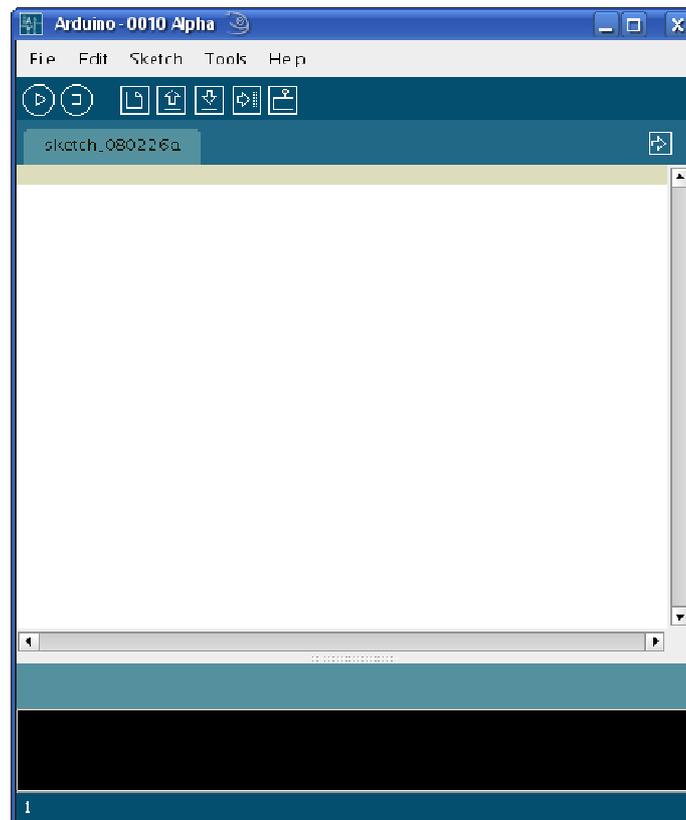


Figura 11. *Interfaz de programación Arduino*

El IDE de Arduino viene con una librería C/C++ llamada "Wiring" (del proyecto con el mismo nombre), lo que hace más fáciles muchas operaciones comunes de entra/salida. Los programas de Arduino están escrito en C/C++, aunque los usuarios solo necesitan definir dos funciones para realizar un programa ejecutable: `setup()` y `loop()`.

3.6.1 **Estructura del Código**

La estructura básica del lenguaje de programación Arduino es bastante simple y se organiza en al menos dos partes o funciones que encierran bloques de declaraciones. Ambas funciones son requeridas para que el programa funcione.

```
void setup()
{
    statements;
}

void loop()
{
    statements;
}
```

setup().

La función setup debería contener la declaración de cualquier variable al comienzo del programa. Es la primera función a ejecutar en el programa, es ejecutada una vez y es usada para asignar por ejemplo pinMode o inicializar las comunicaciones serie.

loop()

La función loop se ejecuta a continuación e incluye el código que se ejecuta continuamente leyendo entradas, activando salidas, etc. Esta función es el núcleo de todos los programas Arduino y hace la mayor parte del trabajo.

funciones

Una función es un bloque de código que tiene un nombre y un grupo de declaraciones que se ejecutan cuando se llama a la función. Podemos hacer uso de funciones integradas como void setup() y void loop() o escribir nuevas.

Las funciones se escriben para ejecutar tareas repetitivas y reducir el desorden en un programa. En primer lugar se declara el tipo de la función, que será el valor retornado por la función (int, void...). A continuación del tipo, se declara el nombre de la función y, entre paréntesis, los parámetros que se pasan a la función.

llaves {}

Las llaves definen el comienzo y el final de bloques de función y bloques de declaraciones como void loop() y sentencias for e if. Las llaves deben estar balanceadas (a una llave de apertura { debe seguirle una llave de cierre }). Las llaves no balanceadas provocan errores de compilación. El entorno Arduino incluye una práctica característica para chequear el balance de llaves. Sólo selecciona una llave y su compañera lógica aparecerá resaltada.

Punto y coma ;

Un punto y coma debe usarse al final de cada declaración y separa los elementos del programa. También se usa para separar los elementos en un bucle for. Olvidar un punto y coma al final de una declaración producirá un error de compilación.

Bloques de comentarios /*...*/

Los bloques de comentarios, o comentarios multilínea, son áreas de texto ignoradas por el programa y se usan para grandes descripciones de código o comentarios que ayudan a otras personas a entender partes del programa. Empiezan con /* y terminan con */ y pueden abarcar múltiples líneas.

Como los comentarios son ignorados por el programa y no ocupan espacio en memoria pueden usarse generosamente y también pueden usarse para comentar bloques de código con propósitos de depuración.

Comentarios de línea //

Comentarios de una línea empiezan con // y terminan con la siguiente línea de código. Como el bloque de comentarios, son ignorados por el programa y no toman espacio en memoria. Comentarios de una línea se usan a menudo después de declaraciones válidas para proporcionar más información sobre qué lleva la declaración o proporcionar un recordatorio en el futuro.

3.6.2 Interfaz de usuario

3.6.2.1 *Barra de Herramientas*

A continuación se presentan los botones y accesos directos que aparecen en la barra de herramienta del IDE Arduino:

Verify/Compile

Chequea el código en busca de errores

New



Crea una nueva rutina

Open



Muestra un menú con todas las rutinas de tu _sketchbook_

Save



Guarda tus rutinas

Upload to I/O board		<i>Carga tu código a la placa Arduino I/O. Asegúrate de guardar o verificar tu rutina antes de cargarla</i>
Serial Monitor		<i>Muestra datos serie enviados desde la placa Arduino. Para enviar datos a la placa, se introduce el texto y hacer click en el botón "Send" o presionar "Enter". Elegir la velocidad de transmisión de datos desde el desplegable que asigna la velocidad</i>

3.6.2.2 Menús

A continuación el contenido de los Menús mas relevantes:

- **Menú Sketch**
 - Verify/Compile: Comprueba tu rutina para errores.
 - Import Library: Utiliza una librería en tu rutina. Trabaja añadiendo #include en la cima de tu código. Esto añade funcionalidad extra a tu rutina, pero incrementa su tamaño. Para parar de usar una librería, elimina el #include apropiado de la cima de tu rutina.
 - Show Sketch Folder: Abre la carpeta de rutinas en tu escritorio.
 - Add File... : Añade otro chero fuente a la rutina. El nuevo archivo aparece en una nueva pestaña en la ventana de la rutina. Esto facilita y agranda proyectos con múltiples archivos fuente. Los archivos pueden ser eliminados de una rutina usando el Tab Menu.
- **Menú Tools**
 - Auto Format: Esto formatea tu código amigablemente.
 - Copy for Discourse: Copia el código de tu rutina al portapapeles de forma conveniente para postear en un foro, completa con resaltado de sintaxis.
 - Board: Selecciona la placa que estas usando. Esto controla la forma en que tu rutina es compilada y cargada así como el comportamiento de los elementos del menú Burn Bootloader.
 - Serial Port: Este menú contiene todos los dispositivos serie (reales o virtuales) de tu máquina. Debería actualizarse automáticamente cada vez que abres el nivel superior del menú Tools. Antes de subir tu rutina, necesitas seleccionar el elemento de este menú que representa a tu placa Arduino. En el Mac, esto es probablemente algo como /dev/tty.usbserial-1B1 (para la placa USB), o /dev/tty.USA19QW1b1P1.1

(para una placa Serie conectada con un adaptador USB-a-Serie Keyspan). En Windows, es probablemente COM1 o COM2 (para una placa Serie) o COM4, COM5, COM7 o superior (para una placa USB) – para descubrirlo, busca USB serial device en la sección puertos del Gestor de dispositivos de Windows.

- Burn Bootloader: Los elementos en este menú te permiten grabar un bootloader en tu placa con una variedad de programadores. Esto no es necesario para uso normal de una placa Arduino, pero puede ser útil si encargas ATmegas adicionales o estás construyendo una placa por tu cuenta. Asegurate que has seleccionado la placa correcta del menú Boards de antemano. Para grabar un bootloader con el AVR ISP, necesitas seleccionar el elemento que corresponde a tu programador del menú Serial Port.

3.7 XBEE Shield

La Xbee shield permite a una placa Arduino comunicarse de forma inalámbrica usando Zigbee. Está basada en el módulo Xbee de MaxStream. Puede ser usado como reemplazo del puerto serie/USB o puedes ponerlo en modo de comandos y configurarlo para una variedad de opciones de redes broadcast o mallas. La shield tiene pistas desde cada pin del Xbee hasta un orificio de soldar. También provee conectores hembra para usar los pines digitales desde 2 hasta 7 y las entradas analógicas, las cuales están cubiertas por la shield (los pines digitales de 8 a 13 no están cubiertos por la placa, así que puedes usar los conectores de la placa directamente). (Arduino, 2012)

La Xbee shield fue creada en colaboración con Libelium, quienes la desarrollaron para usarlo en sus SquidBee motes(usados para crear redes de sensores).

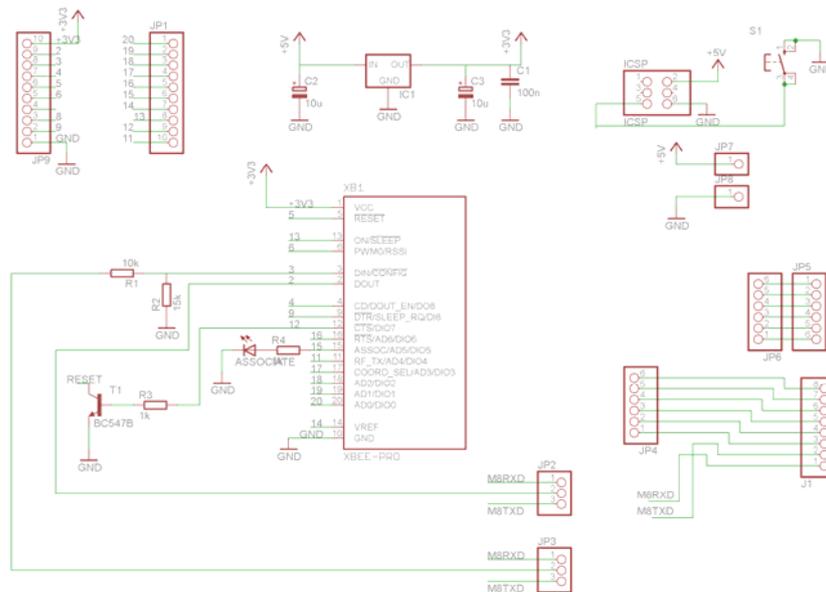


Figura 12. Diagrama esquemático de la Xbee Shield

3.7.1 Configuración de los jumpers

La Xbee shield tiene dos jumpers etiquetados como Xbee/USB. Estos determinan como se conecta la comunicación serie del Xbee entre el microcontrolador y el chip serie FTDI de la placa Arduino.

Con los jumpers en la posición Xbee, el pin DOUT (*VER acápite 4.6.2*) de el módulo Xbee está conectado al pin RX del microcontrolador; y el pin DIN está conectado a TX. Aun así los pines RX y TX del microcontrolador están todavía conectados a los pines TX y RX respectivamente del chip FTDI, esto significa que los datos enviados desde el microcontrolador serán transmitidos al ordenador vía USB y a la vez enviados de forma inalámbrica por el módulo Xbee. El microcontrolador, sin embargo, solo será capaz de recibir datos desde el módulo Xbee, no desde el USB del ordenador.

Con los jumpers en la posición USB (e.g. en los dos pines más cercanos al borde de la placa), el pin DOUT del módulo Xbee está conectado al pin RX del pin del chip FTDI, y el DIN del módulo Xbee está conectado al pin TX del el chip FTDI. Esto significa que el módulo Xbee puede comunicarse directamente con el ordenador - sin embargo, esto solo funciona si el microcontrolador ha sido quitado de la placa Arduino. Si el microcontrolador se deja en la placa Arduino, solo será capaz de comunicarse con el ordenador vía USB, pero ni el ordenador ni el microcontrolador podrán comunicarse con el módulo Xbee.

Capítulo 4: TECNOLOGÍA INALÁMBRICA

En el presente capítulo se expondrán las tecnologías de comunicación inalámbricas relevantes para nuestro proyecto, empezando por el IEE 802.15.4, que es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de la red inalámbrica con tasas bajas de transmisión de datos

Luego veremos ZigBee, que es la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radios digitales de bajo consumo basados en el estándar IEEE 802.15.4

Finalmente expondremos XBEE, que es una familia de módulos de radio con formato de forma compatibles fabricados por Digi Internacional y que están basados en el estándar 802.15.4-2003 diseñado para comunicación inalámbrica punto a punto y punto a multipunto.

4.1 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos (low-rate wireless personal area network, LR-WPAN), es la base sobre la que se define la especificación de ZigBee, cuyo propósito es ofrecer una solución completa para este tipo de redes construyendo los niveles superiores de la pila de protocolos que el estándar no cubre.

El propósito del estándar es definir los niveles de red básicos para dar servicio a un tipo específico de red inalámbrica de área personal (WPAN) centrada en la habilitación de comunicación entre dispositivos ubicuos con bajo coste y velocidad (en contraste con esfuerzos más orientados directamente a los usuarios medios, como WiFi). Se enfatiza el bajo coste de comunicación con nodos cercanos y sin infraestructura o con muy poca, para favorecer aún más el bajo consumo.

En su forma básica se concibe un área de comunicación de 10 metros con una tasa de transferencia de 250 kbps. Se pueden realizar compromisos que favorezcan aproximaciones más radicales a los sistemas embebidos con requerimientos de consumo aún menores. Para ello se definen no uno, sino varios niveles físicos. Se definieron inicialmente tasas alternativas de 20 y 40 kbps; la versión actual añade una tasa adicional de 100 kbps. Se pueden lograr tasas aún menores con la consiguiente reducción de consumo de energía. Como se ha indicado, la característica fundamental de 802.15.4 entre las WPAN's es la obtención de costes

de fabricación excepcionalmente bajos por medio de la sencillez tecnológica, sin perjuicio de la generalidad o la adaptabilidad.

Entre los aspectos más importantes se encuentra la adecuación de su uso para tiempo real por medio de slots de tiempo garantizados, evasión de colisiones por CSMA/CA y soporte integrado a las comunicaciones seguras. También se incluyen funciones de control del consumo de energía como calidad del enlace y detección de energía.

4.2 Arquitectura de la Red

Los dispositivos se relacionan entre sí a través de una red inalámbrica sencilla. La definición de los niveles se basa en el modelo OSI. Aunque los niveles inferiores se definen en el estándar, se prevé la interacción con el resto de niveles, posiblemente por medio de un subnivel de control de enlace lógico basado en IEEE 802.2, que acceda a MAC a través de un subnivel de convergencia. La implementación puede basarse en dispositivos externos o integrarlo todo en dispositivos autónomos. (IEEE-SA Standards Board, 2003)

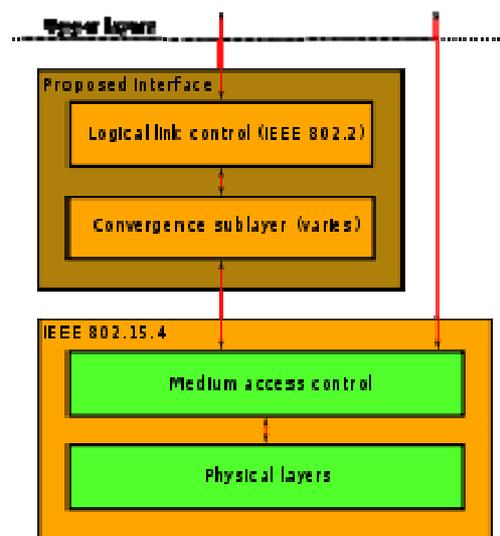


Figura 13. Arquitectura de red

El nivel físico (PHY) provee el servicio de transmisión de datos sobre el medio físico propiamente dicho, así como la interfaz con la entidad de gestión del nivel físico, por medio de la cual se puede acceder a todos los servicios de gestión del nivel y que mantiene una base de datos con información de redes de área personal relacionadas. De esta forma, PHY controla el transceptor de radiofrecuencia y realiza la selección de canales junto con el control de consumo y de la señal. Opera en una de tres posibles bandas de frecuencia de uso no regulado:

- 868-868,8 MHz: Europa, permite un canal de comunicación (versión de 2003), extendido a tres en la revisión de 2006.

- 902-928 MHz: Norte América, hasta diez canales (2003) extendidos a treinta (2006).
- 2400-2483,5 MHz: uso en todo el mundo, hasta dieciséis canales (2003, 2006).

La versión original del estándar especifica dos niveles físicos basados en espectro ensanchado por secuencia directa (direct sequence spread spectrum, DSSS): uno en las bandas de 868/915 MHz con tasas de 20 y 40 kbps; y otra en la banda de 2450 MHz con hasta 250 kbps.

La revisión de 2006 incrementa las tasas de datos máximas de las bandas de 868/915 MHz, que permiten hasta 100 y 250 kbps. Aún más, define cuatro niveles físicos en base al método de modulación usado. Tres de ellas preservan el mecanismo por DSSS: las bandas de 868/915 MHz, que usan modulación en fase binaria o por cuadratura en offset (offset quadrature phase shift keying, ésta segunda opcional). En la banda de 2450 MHz se usa esta segunda técnica. Adicionalmente, se define una combinación opcional de modulación binaria y en amplitud para las bandas de menor frecuencia, basadas por lo tanto en una difusión de espectro paralela, no secuencial (PSSS). Si se usan éstas bandas de menor frecuencia, se puede cambiar dinámicamente el nivel físico usado de entre los soportados.

El control de acceso al medio (MAC) transmite tramas MAC usando para ello el canal físico. Además del servicio de datos, ofrece una interfaz de control y regula el acceso al canal físico y al balizado de la red. También controla la validación de las tramas y las asociaciones entre nodos, y garantiza slots de tiempo. Por último, ofrece puntos de enganche para servicios seguros.

El estándar no define niveles superiores ni subcapas de interoperabilidad. Existen extensiones, como la especificación de ZigBee, que complementan al estándar en la propuesta de soluciones completas.

4.3 Modelo de Red

El estándar define dos tipos de nodo en la red. El primero es el dispositivo de funcionalidad completa (full-function device, FFD). Puede funcionar como coordinador de una red de área personal (PAN) o como un nodo normal. Implementa un modelo general de comunicación que le permite establecer un intercambio con cualquier otro dispositivo. Puede, además, encaminar mensajes, en cuyo caso se le denomina coordinador (coordinador de la PAN si es el responsable de toda la red y no sólo de su entorno). (IEEE-SA Standards Board, 2003)

Contrapuestos a éstos están los dispositivos de funcionalidad reducida (reduced-function device, RFD). Se plantean como dispositivos muy sencillos con recursos y necesidades de comunicación muy limitadas. Por ello, sólo pueden comunicarse con FFD's y nunca pueden ser coordinadores.

Las redes de nodos pueden construirse como redes punto a punto o en estrella. En cualquier caso, toda red necesita al menos un FFD que actúe como su coordinador. Las redes están

compuestas por grupos de dispositivos separados por distancias suficientemente reducidas; cada dispositivo posee un identificador único de 64 bits, aunque si se dan ciertas condiciones de entorno en éste pueden utilizarse identificadores cortos de 16 bits. Probablemente éstos se utilizarán dentro del dominio de cada PAN separada.

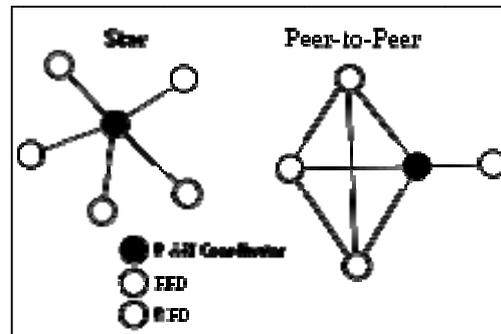


Figura 14. Red en estrella y en punto a punto IEEE 802.15.4

Las redes punto a punto pueden formar patrones arbitrarios de conexionado, y su extensión está limitada únicamente por la distancia existente entre cada par de nodos. Forman la base de redes ad hoc auto-organizativas. El estándar no define un nivel de red, por lo que no se soportan funciones de ruteo de forma directa, aunque si dicho nivel se añade pueden realizarse comunicaciones en varios saltos. Pueden imponerse otras restricciones topológicas; en concreto, el estándar menciona el árbol de clusters como una estructura que aprovecha que los RFD's sólo pueden conectarse con un FFD al tiempo para formar redes en las que los RFD's son siempre hojas del árbol, y donde la mayoría de los nodos son FFD's. Puede relajarse la estructura para formar redes en malla genéricas, cuyos nodos sean árboles de clusters con un coordinador local para cada cluster, junto con un coordinador global.

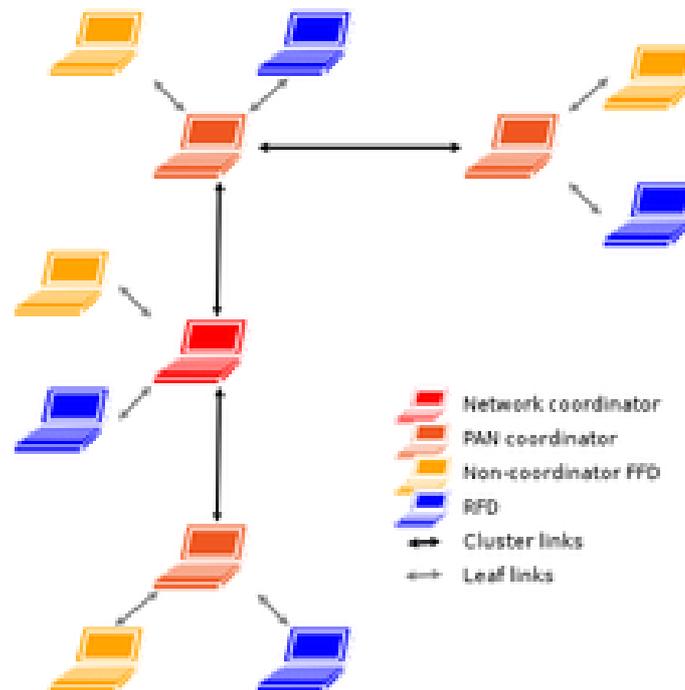


Figura 15. Árbol de clusters IEEE 802.15.4

También pueden formarse redes en estrella, en las que el coordinador va a ser siempre el nodo central. Una red así se forma cuando un FFD decide crear su PAN y se nombra a sí mismo coordinador, tras elegir un identificador de PAN único. Tras ello, otros dispositivos pueden unirse a una red totalmente independiente del resto de redes en estrella.

4.4 Fiabilidad y Seguridad

El medio físico es un recurso al que se accede utilizando CSMA/CA. Las redes que no utilizan métodos balizado hacen uso de una variación del mismo basada en la escucha del medio, balanceada por un algoritmo de backoff exponencial aleatorio, salvo en el caso de las confirmaciones. Las transmisiones de datos típicas utilizan slots no reservados cuando se utilizan balizas; de nuevo, la excepción son las confirmaciones. (IEEE-SA Standards Board, 2003)

Estos mensajes de confirmación pueden ser opcionales en algunos casos; en ellos, se realiza un supuesto de éxito. En cualquier caso, si un dispositivo es incapaz de procesar una trama en un momento dados, no confirma su recepción. Pueden realizarse reintentos basados en timeout un cierto número de veces, tras lo cual se decide si seguir intentándolo o dar error de transmisión.

El entorno de funcionamiento previsto para este tipo de redes exige que se maximice la vida de la fuente de energía (baterías, posiblemente), por lo que se favorecen los protocolos que conducen a estos fines. Para ello, se programan comprobaciones periódicas de mensajes pendientes, más o menos frecuentes según la aplicación concreta.

En lo que respecta a seguridad en las comunicaciones, el subnivel MAC ofrece funcionalidades que los niveles superiores pueden utilizar para lograr alcanzar el nivel de seguridad deseado. Estos niveles pueden especificar claves simétricas para proteger los datos y restringir éstos a un grupo de dispositivos o a un enlace punto a punto. Estos grupos se especifican en listas de control de acceso. Además, MAC realiza comprobaciones de frescura (freshness check) entre recepciones sucesivas para asegurar que las tramas viejas, cuyo contenido no se considera útil o válido ya, no trascienden a los niveles superiores.

Adicionalmente, existe un modo MAC inseguro que permite el uso de listas de control de acceso únicamente como mecanismo de decisión de aceptación de tramas en base a su (supuesto) origen.

4.5 Protocolo ZigBee

ZigBee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo. Esta basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (wireless personal area network, WPAN). (ZigBee Alliance, 2012)

Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. ZigBee forma un ecosistema global de organizaciones que crean soluciones inalámbricas para uso en aplicaciones de gestión energética, residenciales, comerciales y de consumo.

ZigBee utiliza la banda ISM para usos industriales, científicos y médicos; en concreto, 868 MHz en Europa, 915 en Estados Unidos y 2,4 GHz en todo el mundo. Sin embargo, a la hora de diseñar dispositivos, las empresas optarán prácticamente siempre por la banda de 2,4 GHz, por ser libre en todo el mundo. El desarrollo de la tecnología se centra en la sencillez y el bajo costo más que otras redes inalámbricas semejantes de la familia WPAN. (ZigBee Alliance, 2012)

Los protocolos ZigBee están definidos para su uso en aplicaciones encastradas con requerimientos muy bajos de transmisión de datos y consumo energético. Se pretende su uso en aplicaciones de propósito general con características auto organizativas y bajo costo (redes en malla, en concreto). Puede utilizarse para realizar control industrial, albergar sensores empotrados, recolectar datos médicos, ejercer labores de detección de humo o intrusos o domótica. La red en su conjunto utilizará una cantidad muy pequeña de energía de forma que

cada dispositivo individual pueda tener una autonomía de hasta 5 años antes de necesitar un recambio en su sistema de alimentación. (Daintree Networks, 2009)

Un nodo ZigBee reduce su consumo gracias a que puede permanecer dormido la mayor parte del tiempo (incluso muchos días seguidos). Cuando se requiere su uso, el nodo ZigBee es capaz de despertar en un tiempo ínfimo, para volverse a dormir cuando deje de ser requerido. Un nodo cualquiera despierta en aproximadamente 15 ms.

4.5.1 ZigBee vs. Bluetooth

ZigBee es muy similar al Bluetooth pero con algunas diferencias:

- Una red ZigBee puede constar de un máximo de 65535 nodos distribuidos en subredes de 255 nodos, frente a los 8 máximos de una subred (Piconet) Bluetooth.
- Menor consumo eléctrico que el de Bluetooth. En términos exactos, ZigBee tiene un consumo de 30 mA transmitiendo y de 3 uA en reposo, frente a los 40 mA transmitiendo y 0,2 mA en reposo que tiene el Bluetooth. Este menor consumo se debe a que el sistema ZigBee se queda la mayor parte del tiempo dormido, mientras que en una comunicación Bluetooth esto no se puede dar, y siempre se está transmitiendo y/o recibiendo.
- Tiene una velocidad de hasta 250 kbps, mientras que en Bluetooth es de hasta 3 Mbps.
- Debido a las velocidades de cada uno, uno es más apropiado que el otro para ciertas cosas. Por ejemplo, mientras que el Bluetooth se usa para aplicaciones como los teléfonos móviles y la informática casera, la velocidad del ZigBee se hace insuficiente para estas tareas, desviándolo a usos tales como la Domótica, los productos dependientes de la batería, los sensores médicos, y en artículos de juguetería, en los cuales la transferencia de datos es menor.
- Existe una versión que integra el sistema de radiofrecuencias característico de Bluetooth junto a una interfaz de transmisión de datos vía infrarrojos desarrollado por IBM mediante un protocolo ADSI y MDSI.

4.5.2 Tipos de dispositivos

Se definen tres tipos distintos de dispositivo ZigBee según su papel en la red (ZigBee Alliance, 2012):

- **Coordinador ZigBee (ZigBee Coordinator, ZC).** El tipo de dispositivo más completo. Debe existir uno por red. Sus funciones son las de encargarse de controlar la red y los caminos que deben seguir los dispositivos para conectarse entre ellos.
- **Router ZigBee (ZigBee Router, ZR).** Interconecta dispositivos separados en la topología de la red, además de ofrecer un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario.
- **Dispositivo final (ZigBee End Device, ZED).** Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos. De esta forma, este tipo de nodo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus baterías. Un ZED tiene requerimientos mínimos de memoria y es por tanto significativamente más barato.

Mientras que basándose en su funcionalidad, puede plantearse una segunda clasificación (Daintree Networks, 2009):

- **Dispositivo de funcionalidad completa (FFD):** También conocidos como nodo activo. Es capaz de recibir mensajes en formato 802.15.4. Gracias a la memoria adicional y a la capacidad de computar, puede funcionar como Coordinador o Router ZigBee, o puede ser usado en dispositivos de red que actúen de interfaz con los usuarios.
- **Dispositivo de funcionalidad reducida (RFD):** También conocido como nodo pasivo. Tiene capacidad y funcionalidad limitadas (especificada en el estándar) con el objetivo de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.

4.5.3 Protocolos

Los protocolos de los ZigBee se basan en investigaciones recientes sobre algoritmos de para la construcción de redes ad-hoc de baja velocidad. La mayoría de redes grandes están pensadas para formar un cluster de clusters. También puede estructurarse en forma de malla o como un solo cluster. Los perfiles actuales de los protocolos soportan redes que utilicen o no facilidades de balizado. (Daintree Networks, 2009)

Las redes sin balizas (aquéllas cuyo grado de balizado es 15) acceden al canal por medio de CSMA/CA (*acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones*). Los routers suelen estar activos todo el tiempo, por lo que requieren una alimentación estable en general.

Esto, a cambio, permite redes heterogéneas en las que algunos dispositivos pueden estar transmitiendo todo el tiempo, mientras que otros sólo transmiten ante la presencia de estímulos externos. El ejemplo típico es un interruptor inalámbrico: un nodo en la lámpara puede estar recibiendo continuamente ya que está conectado a la red; por el contrario, un interruptor a pilas estaría dormido hasta que el mecanismo se activa. En una red así la lámpara sería un router o coordinador, y el interruptor un dispositivo final.

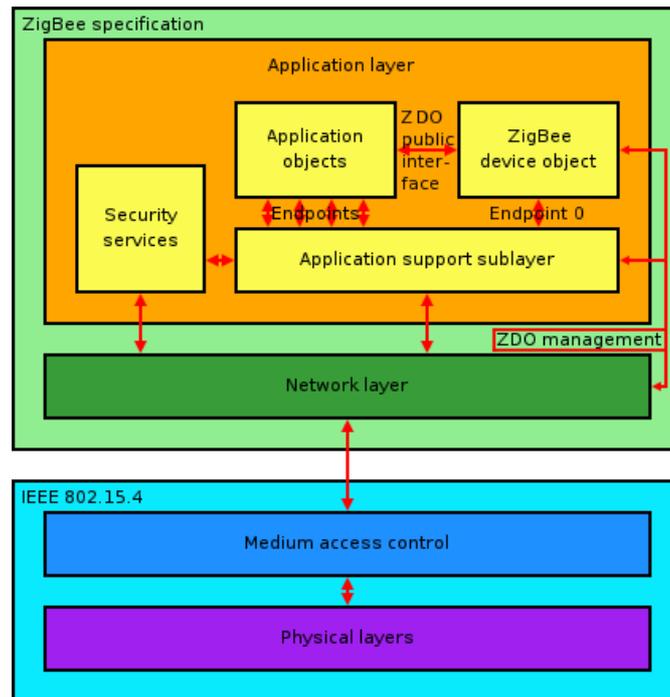


Figura 16. Protocolo ZigBee

Si la red utiliza balizas, los routers las generan periódicamente para confirmar su presencia a otros nodos. Los nodos pueden desactivarse entre las recepciones de balizas reduciendo su ciclo de servicio (duty cycle). Los intervalos de balizado pueden ir desde 15,36 ms a $15,36 \text{ ms} * 214 = 251,65824$ segundos a 250 kbps; de 24 ms a $24 \text{ ms} * 214 = 393,216$ segundos a 40 kbps; y de 48 ms a $48 \text{ ms} * 214 = 786,432$ segundos a 20 kbps. Sin embargo, los periodos largos con ciclos de servicio cortos necesitan que una temporización precisa, lo que puede ir en contra del principio de bajo coste.

En general, los protocolos ZigBee minimizan el tiempo de actividad de la radio para evitar el uso de energía. En las redes con balizas los nodos sólo necesitan estar despiertos mientras se transmiten las balizas (además de cuando se les asigna tiempo para transmitir). Si no hay balizas, el consumo es asimétrico repartido en dispositivos permanentemente activos y otros que sólo no están esporádicamente.

Los dispositivos ZigBee deben respetar el estándar de WPAN de baja tasa de transmisión IEEE 802.15.4-2003. Éste define los niveles más bajos: el nivel físico (PHY) y el control de acceso al medio (MAC, parte del nivel de enlace de datos, DLL). El estándar trabaja sobre las bandas ISM de uso no regulado detalladas más arriba. Se definen hasta 16 canales en el rango de 2,4

GHz, cada uno de ellos con un ancho de banda de 5 MHz. La frecuencia central de cada canal puede calcularse como: $FC = (2405 + 5 \cdot (k-11))$ MHz, con $k = 11, 12, \dots, 26$.

Las radios utilizan un espectro de dispersión de secuencia directa. Se utiliza BPSK en los dos rangos menores de frecuencia, así como un QPSK(Quadrature Phase-Shift Keying) ortogonal que transmite dos bits por símbolo en la banda de 2,4 GHz. Ésta permite tasas de transmisión en el aire de hasta 250 kbps, mientras que las bandas inferiores se han ampliado con la última revisión a esta tasa desde los 40 kbps de la primera versión. Los rangos de transmisión oscilan entre los 10 y 75 metros, aunque depende bastante del entorno. La potencia de salida de las radios suele ser de 0 dBm (1 mW).

Si bien en general se utiliza CSMA/CA para evitar colisiones en la transmisión, hay algunas excepciones a su uso: por una parte, las tramas siguen una temporización fija que debe ser respetada; por otra, las confirmaciones de envíos tampoco siguen esta disciplina; por último, si se asignan slots de tiempo garantizados para una transmisión tampoco es posible que exista contención.

4.5.4 Hardware y software

El software se ha diseñado para ejecutarse en procesadores y microcontroladores de bajo coste, con un diseño de radio muy optimizado para lograr bajos costes con altos volúmenes de producción. Utiliza circuitos digitales siempre que es posible y evita los componentes analógicos. (ZigBee Alliance, 2012)

Si bien el hardware es sencillo, el proceso de certificación de un dispositivo conlleva una validación completa de los requerimientos del nivel físico. Esta revisión intensiva tiene múltiples ventajas, ya que todas las radios fabricadas a partir de una misma máscara de semiconductor gozarán de las mismas características de radiofrecuencia. Por otro lado, un nivel físico mal controlado podría perjudicar no sólo al propio dispositivo, sino al consumo de energía de otros dispositivos en la red. Otros estándares pueden compensar ciertos problemas, mientras que ZigBee trabaja en márgenes muy estrechos de consumo y ancho de banda. Por ello, según el 802.15.4, las radios pasan validaciones ISO 17025(establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración). La mayoría de fabricantes integran la radio y el microcontrolador en un único chip, lo cual permite crear dispositivos más compactos.

4.5.5 conexión de los dispositivos en una red Zigbee

ZigBee permite tres topologías de red (ZigBee Alliance, 2012):

- Topología en estrella: el coordinador se sitúa en el centro.
- Topología en árbol: el coordinador será la raíz del árbol.
- Topología de malla: al menos uno de los nodos tendrá más de dos conexiones.

La topología más interesante (y una de las causas por las que parece que puede triunfar ZigBee) es la topología de malla. Ésta permite que si, en un momento dado, un nodo del camino falla y se cae, pueda seguir la comunicación entre todos los demás nodos debido a que se rehacen todos los caminos. La gestión de los caminos es tarea del coordinador.

Por otro lado, las redes ZigBee han sido diseñadas para conservar la potencia en los nodos esclavos. De esta forma se consigue el bajo consumo de potencia. La estrategia consiste en que, durante mucho tiempo, un dispositivo "esclavo" está en modo "dormido", de tal forma que solo se "despierta" por una fracción de segundo para confirmar que está "vivo" en la red de dispositivos de la que forma parte. Esta transición del modo "dormido" al modo "despierto" (modo en el que realmente transmite), dura unos 15ms, y la enumeración de "esclavos" dura alrededor de 30ms, como ya se ha comentado anteriormente.

En las redes Zigbee, se pueden usar dos tipos de entornos o sistemas (Daintree Networks, 2009):

- **Con balizas.** Es un mecanismo de control del consumo de potencia en la red. Permite a todos los dispositivos saber cuándo pueden transmitir. En este modelo, los dos caminos de la red tienen un distribuidor que se encarga de controlar el canal y dirigir las transmisiones. Las balizas que dan nombre a este tipo de entorno, se usan para poder sincronizar todos los dispositivos que conforman la red, identificando la red domótica, y describiendo la estructura de la "supertrama". Los intervalos de las balizas son asignados por el coordinador de red y pueden variar desde los 15ms hasta los 4 minutos.

Este modo es más recomendable cuando el coordinador de red trabaja con una batería. Los dispositivos que conforman la red, escuchan a dicho coordinador durante el "balizamiento" (envío de mensajes a todos los dispositivos -broadcast-, entre 0,015 y 252 segundos). Un dispositivo que quiera intervenir, lo primero que tendrá que hacer es registrarse para el coordinador, y es entonces cuando mira si hay mensajes para él. En el caso de que no haya mensajes, este dispositivo vuelve a "dormir", y se despierta de acuerdo a un horario que ha establecido previamente el coordinador. En cuanto el coordinador termina el "balizamiento", vuelve a "dormirse".

- **Sin balizas.** Se usa el acceso múltiple al sistema Zigbee en una red punto a punto cercano. En este tipo, cada dispositivo es autónomo, pudiendo iniciar una conversación, en la cual los otros pueden interferir. A veces, puede ocurrir que el dispositivo destino puede no oír la petición, o que el canal esté ocupado.

Este sistema se usa típicamente en los sistemas de seguridad, en los cuales sus dispositivos (sensores, detectores de movimiento o de rotura de cristales), duermen prácticamente todo el tiempo (el 99,999%). Para que se les tenga en cuenta, estos elementos se "despiertan" de forma regular para anunciar que siguen en la red. Cuando se produce un evento (en nuestro sistema será cuando se detecta algo), el sensor "despierta" instantáneamente y transmite la alarma correspondiente. Es en ese momento cuando el coordinador de red, recibe el mensaje enviado por el sensor, y activa la alarma correspondiente. En este caso, el coordinador de red se alimenta de la red principal durante todo el tiempo.

4.6 XBEE

XBee es el nombre comercial de Digi Internacional para una familia de módulos de radio con formato de forma compatibles. Los primeros módulos XBee se introdujeron al mercado bajo la marca MaxStream en 2005, estaban basados en el estándar 802.15.4-2003 diseñado para comunicación inalámbrica punto a punto y punto a multipunto y con una velocidad de transmisión de 250 kbit/s. Dos modelos fueron presentados inicialmente; el primero ofrecía un menor costo y potencia de 1 mW, y el segundo ofrecía una mayor potencia (100 mW), el XBee-PRO. Desde entonces, diversos diferentes modelos de estos módulos se ha producidos y se comercializan actualmente bajo la marga "Digi". (Digi International Inc., 2012)

A continuación los diversos radios XBee en el mercado (Digi International Inc., 2012):

- XBee 802.15.4 (también conocido como Serie 1) – funciona punto-a-punto (PTP), punto-a-multipunto (PTM) y corre bajo el protocolo IEEE 802.15.4. Este es el modelo que utilizaremos en el presente proyecto, y por tanto sobre el cual abundaremos.
- XBee-PRO 802.15.4 (Series 1) – versión más potente de la anterior
- XBee ZB (conocido como Serie 2) – es un módulo XBee que incorpora el protocolo de red en malla de ZigBee PRO.
- XBee-PRO ZB (Serie 2) – versión más potente de la anterior
- XBee ZB SMT – Un montaje en superficie XBee que ejecute el protocolo ZigBee
- XBee-PRO ZB SMT – versión más potente de la anterior
- XBee SE – An XBee ZB módulo que incorpora el grupo de seguridad para el perfil de "ZigBee Smart Energy public".
- XBee PRO SE – versión más potente de la anterior
- XBee PRO 900 – una versión a 900 MHz que funciona PTP y PTM
- XBee PRO 868 – una versión a 868 MHz que funciona PTP y PTM para Europa
- XBee-PRO DigiMesh 900 – un radio a 900 MHz que incorpore un protocolo de dormida en red malla.
- XBee DigiMesh 2.4 – igual al anterior, pero funcionando a 2.4 GHz

- XBee-PRO DigiMesh 2.4 – versión más potente de la anterior

La mayoría de los XBees vienen con varias opciones de antena, aunque no todas las variantes tienen exactamente los mismos conectores. El conector U.FL(un conector coaxial miniatura de RF para señales de altafrecuencia de hasta 6 GHz y manufacturadas por Hirose Electric Group en Japon) es común en toda la familia XBee, y todas las variantes vienen o con un chip antena, o con una antena empotrada en el PCB. Otras antenas incluyen una tira $\frac{1}{4}$ de onda integrada y un conector RP-SMA para antenas de cabezas grandes. (Digi International Inc., 2012)

4.6.1 Características Principales XBee Serie 1

Los módulos XBee, en este caso el Serie 1, han sido diseñados para cumplir con los requerimientos de bajo costo y bajo consumo de las redes de sensores. Por lo tanto, estos módulos requieren un consumo muy bajo y proveen una fiable transmisión de datos a una velocidad de hasta 250 kbps.

A continuación las principales características de estos módulos:

Rendimiento	
Rango en interior o entorno urbano	hasta 30m
exterior/vista directa entre módulos	hasta 90m
Potencia de transmisión	1 mW
Velocidad por RF	250 kbps
velocidad por puerto serie	1200 bps - 250 kbps
sensibilidad de recepción	-92 dBm

Contrario a las especificaciones anteriores, el módulo XBee PRO ofrece un alcance de hasta 90 metros en interiores y hasta 1.5 kilómetros (pueden ser hasta 10 kilómetros con una antena expandida) en exterior, pero a cambio de un mayor consumo de potencia (63 mW). Sin embargo el rango de alcance que brinda el XBee serie 1 es suficiente para aplicaciones demóticas que es el enfoque de nuestro proyecto.

Requerimientos de Potencia	
tensión de alimentación	2,8 - 3,4 VDC
corriente de transmisión	45 mA
corriente en recepción	50 mA
corriente en inactividad	<10 uA

Características Generales	
Dimensiones	0.960" x 1.087" (2.438 cm x 2.761 cm)
temperatura de operación	-40 to 85 C

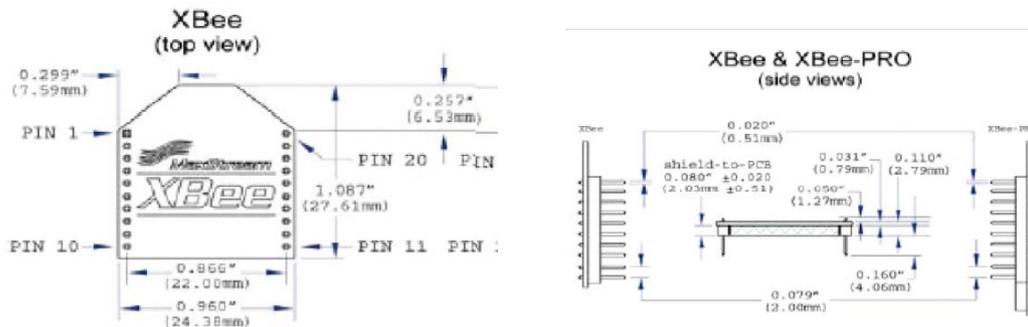


Figura 17. Dimensiones Físicas

Características de Red	
topologías de red soportadas	mallas, punto a punto, punto a multipunto, peer-to-peer
número de canales	16 canales en secuencia directa
encriptación	128 bit AES
opciones de direccionamiento	PAN ID, Canales y direcciones de 64 bits

4.6.2 Información de los Pines

La descripción de los pines del módulo XBee Serie 1 se muestra en la figura 18. De estos 20 pines, los únicos requeridos para llevar a cabo una comunicación elemental son el Vcc (alimentación), GND (tierra), DIN (entrada de datos) y el DOUT (salida de datos). Para actualizar el firmware aparte de los pines citados anteriormente se habrán de usar el RTS y el DTR. (Digi International Inc., 2012)

Pin #	Name	Direction	Description
1	Vcc	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DIO12	Either	Digital I/O 12
5	RESET	Input/Open drain output	Module Reset (reset pulse must be at least 100 us. This must be driven as an open drain/collector. The module will drive this line low when a reset occurs. This line should never be driven high.)
6	PWM0 / RSSI / DIO10	Either	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator / Digital IO
7	PWM / DIO11	Either	PWM Output 1 / Digital I/O 11
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ/ DIO8	Either	Pin Sleep Control Line or Digital IO 8
10	GND	-	Ground
11	AD4/DIO4	Either	Analog Input 4 or Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP	Output	Module Status Indicator or Digital I/O 9
14	VREF	-	This line must be connected if analog IO sampling is desired. Must be between 2.6 V and Vcc.
15	Associate / DIO5/AD5	Either	Associated Indicator, Digital I/O 5
16	RTS / DIO6	Either	Request-to-Send Flow Control, Digital I/O 6
17	AD3 / DIO3	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0 / Commissioning Button	Either	Analog Input 0, Digital I/O 0, or Commissioning Button

Figura 18. Listado descriptivo de los pines del módulo XBee

Todos los pines no utilizados deben dejarse desconectado, pero no hay un tratamiento específico o requerido para las salidas no utilizadas. Otros pines pueden estar conectados a circuitos externos por conveniencia de operación, como lo son el pin 15 asociado a LED y el pin de botón de puesta en marcha (pin 20). El pin 15 parpadeará de forma diferente dependiendo del estado del módulo, y un pulsador conectado a la patilla 20 puede permitir el despliegue y diversas soluciones de problemas de funciones sin tener que enviar comandos UART. Si se desea muestreo analógico, el pin VREF (pin 14) debe ser conectado a una tensión de referencia.

4.6.3 Comunicación Serial

El módulo XBee se puede comunicar con un dispositivo anfitrión a través un puerto serie a nivel asíncrono. A través de este puerto serie, el módulo se puede comunicar con cualquier lógica y a cualquier voltaje compatible con UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter); o si es adaptado a cualquier dispositivo serial, ejemplo de este último es el XBee Shield utilizado en este proyecto y descrito en el acápite 3.7. (Digi International Inc., 2012)

Los dispositivos que tienen una interfaz UART pueden conectarse directamente a los terminales del módulo de RF, como se muestra en la figura 19.

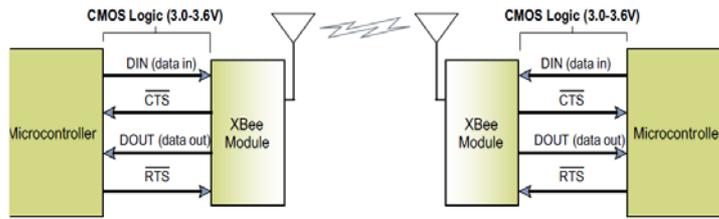


Figura 19. Comunicación entre módulos XBee

Los datos entran al módulo UART a través del DIN (pin 3) como una señal serie asíncrona. La señal debe permanecer en high cuando no se está transmitiendo información. Cada byte de dato consiste en un bit de inicio (low), 8 bit de datos (el menos significativo se envía primero) y un bit de parada (high). La figura 20 ilustra el patrón de transmisión de datos serial del módulo.

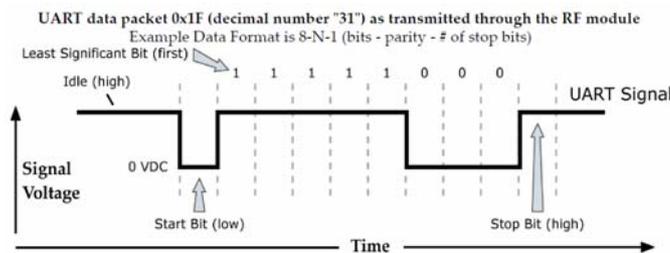


Figura 20. Patrón de transmisión de datos serial en los módulos XBee

4.6.4 Configuración

Hay múltiples parámetros que necesitan ser configurados correctamente para que dos módulos puedan comunicarse entre ellos, en la figura 20 se muestra un listado de todos los parámetros configurables en el módulo XBee serie 1.

Para que dos módulos se puedan comunicar necesitan estar en la misma red, definida por el parámetro ID, los módulos necesitan estar en el mismo canal, definido por el parámetro CH, y finalmente, la dirección de destino de un módulo (parámetros DH y DL) determina que módulo en esa red y canal recibirá los datos transmitidos. Esto puede suceder de las siguientes formas:

- Si el DH de un módulo es 0 y su DL es menor de 0xFFFF, los datos transmitidos por ese módulo serán recibidos por cualquier módulo cuyos 16 bits de dirección del parámetro MY sea igual al DL.
- Si el DH es 0 y el DL es igual a 0xFFFF, las transmisiones del módulo serán recibidas por todos los módulos.

- Si el DH no es cero o el DL es mayor de 0xFFFF, la transmisión solo será recibida por el módulo cuyo número de serie sea igual a la dirección de destino del módulo transmisor (cuyos SH es igual al DH del módulo transmisor y cuyo SL sea igual a su DL).

De nuevo, esta correspondencia de direcciones solo sucederá entre módulos en la misma red y canal. Si dos módulos están en diferentes redes o canales, no podrán comunicarse sea cual sea sus direcciones.

Comando	Descripción	Valores válidos	Valor por defecto
ID	El ID de la red del módulo Xbee.	0 - 0xFFFF	3332
CH	El canal del módulo Xbee.	0x0B - 0x1A	0X0C
SH y SL	El número serie del módulo Xbee (^{SH} devuelve los 32 bits superiores, ^{SL} los 32 inferiores). De solo-lectura	0 - 0xFFFFFFFF (para ambos ^{SH} y ^{SL})	diferente para cada módulo
MY	La dirección de 16-bit del módulo.	0 - 0xFFFF	0
DH y DL	La dirección de destino para las comunicaciones inalámbricas(^{DH} son los 32 bits superiores, ^{DL} son los 32 inferiores).	0 - 0xFFFFFFFF (para ambos ^{DH} y ^{DL})	0 (para ambos ^{DH} y ^{DL})
BD	La velocidad de transmisión usada para las comunicaciones con el Arduino o el ordenador.	0 (1200 bps) 1 (2400 bps) 2 (4800 bps) 3 (9600 bps) 4 (19200 bps) 5 (38400 bps) 6 (57600 bps) 7 (115200 bps)	3 (9600 bps)

Figura 21. Tabla de parámetros de configuración del módulo XBEE serie 1

Capítulo 5: ILUMINACION LED

El uso de los Diodos LEDs en el ámbito de la iluminación es moderado pero con un previsible crecimiento en el futuro cercano, ya que sus prestaciones son superiores a las de la lámpara incandescente y la lámpara fluorescente, desde diversos puntos de vista. La iluminación con LEDs presenta indudables ventajas: fiabilidad, mayor eficiencia energética, mayor resistencia a las vibraciones, mejor visión ante diversas circunstancias de iluminación, menor disipación de energía, menor riesgo para el medio ambiente, capacidad para operar de forma intermitente de modo continuo, respuesta rápida, etc. Asimismo, con LEDs se pueden producir luces de diferentes colores con un rendimiento luminoso elevado, a diferencia de muchas de las lámparas utilizadas hasta ahora, que tienen filtros para lograr un efecto similar (lo que supone una reducción de su eficiencia energética). Cabe destacar también que diversas pruebas realizadas por importantes empresas y organismos han concluido que el ahorro energético varía entre el 70 y el 80% respecto a la iluminación tradicional que se utiliza hasta ahora. Todo ello pone de manifiesto las numerosas ventajas que los LEDs ofrecen en relación al alumbrado público.

Los LEDs de luz blanca son uno de los desarrollos más recientes y pueden considerarse como un intento muy bien fundamentado para sustituir los focos o bombillas actuales (lámparas incandescentes) por dispositivos mucho más ventajosos. En la actualidad se dispone de tecnología que consume el 92% menos que las lámparas incandescentes de uso doméstico común y el 30% menos que la mayoría de las lámparas fluorescentes; además, estos LEDs pueden durar hasta 20 años y suponer el 200% menos de costes totales de propiedad si se comparan con las lámparas o tubos fluorescentes convencionales. Estas características convierten a los LEDs de luz blanca en una alternativa muy prometedora para la iluminación.

Para entender bien los por menores de la iluminación a base de diodos LEDs, veremos antes conceptos generales de la luz, el diodo y el diodo LED.

5.1 La Luz, Generalidades

Se llama luz (del latín lux, lucis) a la parte de la radiación electromagnética que puede ser percibida por el ojo humano. En física, el término luz se usa en un sentido más amplio e incluye todo el campo de la radiación conocido como espectro electromagnético, mientras que la expresión luz visible señala específicamente la radiación en el espectro visible. La luz presenta

una naturaleza compleja: depende de cómo la observemos se manifestará como una onda o como una partícula. Estos dos estados no se excluyen, sino que son complementarios. (Díaz Hernández, 2010)

5.1.1 Términos relevantes

- **Flujo Luminoso.** Potencia (W) emitida en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible. Su símbolo es Φ y su unidad es el lumen (lm).



Figura 22. Flujo luminoso

- **Intensidad Luminosa.** Si pensamos en una lámpara con proyector, no en una bombilla colgada del techo, es fácil discernir que sólo iluminará en una dirección concreta. Por tanto, la Intensidad Luminosa será el Flujo Luminoso emitido por unidad de ángulo sólido (estereorradianes) en una dirección del espacio. Su símbolo es I y su unidad la **candela** (cd).

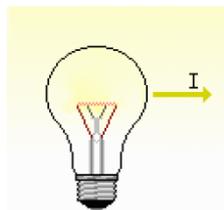


Figura 23. Intensidad Luminosa

- **Iluminancia.** El flujo luminoso que llega a una superficie es función de la distancia a la que se encuentre ésta. Por tanto, se define iluminancia como el flujo luminoso recibido por una superficie. Su símbolo es E y su unidad el lux (lx) que es un lm/m². La medida de este parámetro se realiza con el Luxómetro.

Dependiendo de la distancia y forma de un objeto, la cantidad de luz que llegue desde un foco luminoso será diferente. Por tanto, se debe separar en sus componentes

horizontal y vertical. Más tarde, cuando una persona perciba ese objeto, se deberá tener en cuenta la posición de éste, en lo que se denomina superficie aparente, que será función de la emisión luminosa reflejada por el objeto.

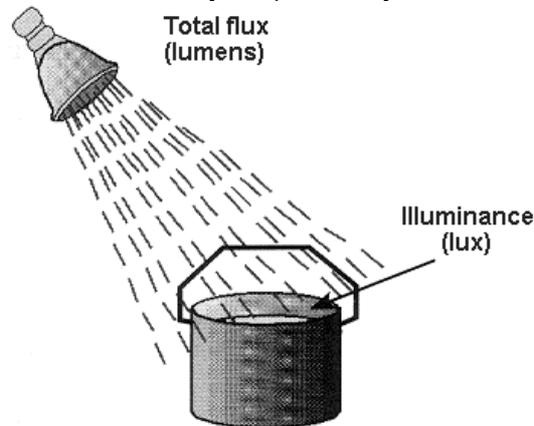


Figura 24. Iluminancia

- **Luminancia.** Relación entre la intensidad luminosa y la superficie aparente vista por el ojo en una dirección determinada. Su símbolo es L y su unidad es la candela por metro cuadrado (cd/m^2).

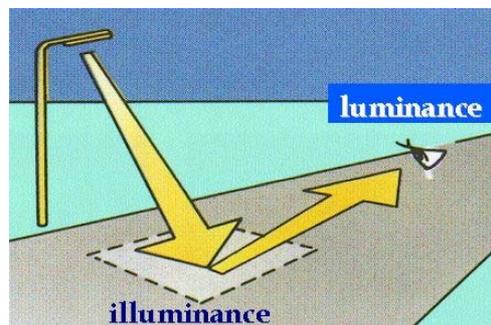


Figura 25. Luminancia

5.1.2 Espectro electromagnético

Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Referido a un objeto se denomina espectro electromagnético o simplemente espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia. Dicha radiación sirve para identificar la sustancia de manera análoga a una huella dactilar. Los espectros se pueden observar mediante espectroscopios que, además de permitir observar el espectro, permiten realizar medidas sobre el mismo, como son la longitud de onda, la frecuencia y la intensidad de la radiación. (Díaz Hernández, 2010)

El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos

infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio. Se cree que el límite para la longitud de onda más pequeña posible es la longitud de Planck mientras que el límite máximo sería el tamaño del Universo aunque formalmente el espectro electromagnético es infinito y continuo. (Soltic & Chalmers, 2012)

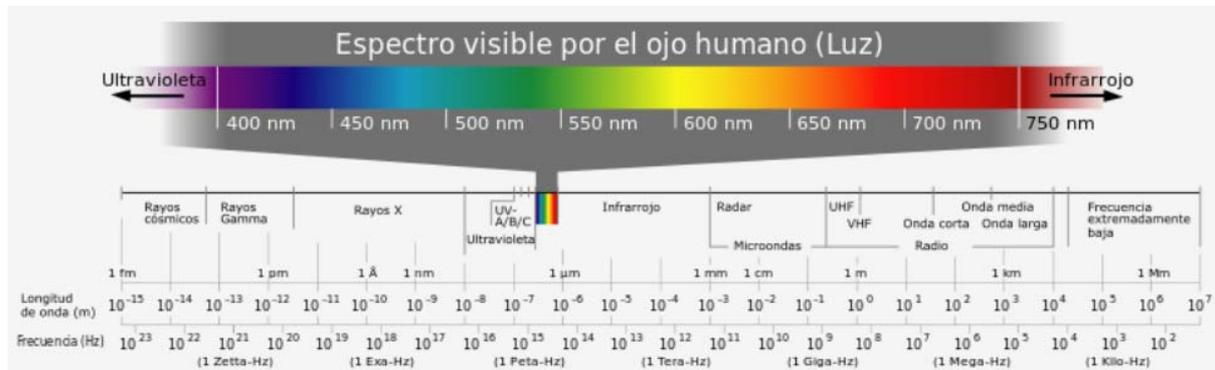


Figura 26. Distribución del espectro electromagnético

De todo el espectro, la porción que el ser humano es capaz de ver es muy pequeña en comparación con las otras regiones espectrales. Esta región, denominada espectro visible, comprende longitudes de onda desde los 380 nm hasta los 780 nm. La luz de cada una de estas longitudes de onda es percibida por el ojo humano como un color diferente, por eso, en la descomposición de la luz blanca en todas sus longitudes de onda, por prismas o por la lluvia en el arco iris, el ojo ve todos los colores.

5.1.3 Colores

En 1931, la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE por sus siglas en francés), definió los colores visibles por el ojo humano de forma objetiva. Para esta clasificación realizó el gráfico que se muestra, en una especie de parábola en dos dimensiones, donde las coordenadas (x, y) definen cualquier color de forma inequívoca. Cuando una empresa u organismo desea referirse a un color determinado, indica las coordenadas (x, y) de la CIE y queda perfectamente determinado el color al que se refiere. (Díaz Hernández, 2010)

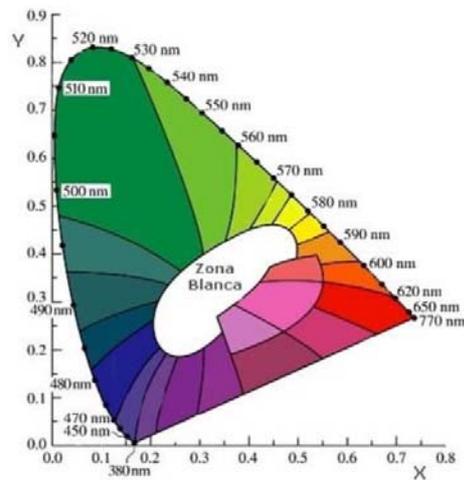


Figura 27. Diagrama de colores de la CIE

De la misma forma, en 1924, la CIE definió la cantidad de iluminación que recibe el ojo humano en función de la longitud de onda del color de que se trate. Se observó que el ojo humano no percibe por igual todas las longitudes de onda visibles. Esto está limitado por nuestro sistema de recepción del color (ojo, nervio óptico, cerebro). En esta gráfica, figura 28, se muestra que la máxima sensibilidad a la recepción de un color determinado (longitud de onda), está en torno a 555nm (un amarillo-verdoso). Esta clasificación es importante para el estudio que se realizó. Dado que la emisión de luz por parte de los LEDs es de sólo dos longitudes de onda, a saber, las correspondientes al azul y al amarillo, se deberá valorar adecuadamente el flujo luminoso percibido por el ojo humano. Es decir, 1W de flujo luminoso de luz amarilla nuestro ojo no lo percibe igual que 1W de flujo luminoso de color rojo.

Debido a que la *zona blanca* del diagrama de cromaticidad es muy amplia y la ya citada *interpretación* del color por parte nuestro sistema de visión, se debió modificar las coordenadas del diagrama de cromaticidad. (Soltic & Chalmers, 2012)

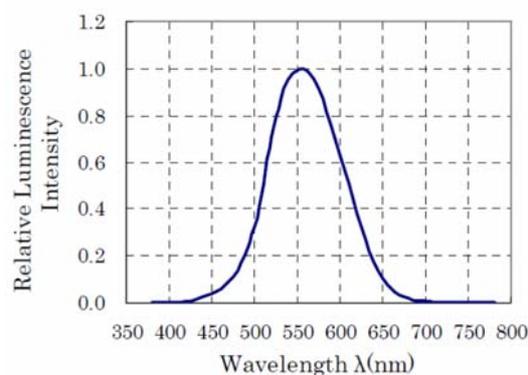


Figura 28. Campo colorimétrico ponderado (CIE 1924)

5.1.4 El Ojo Humano y su Percepción de la Luz

En los mamíferos superiores, y en este caso específicamente en los humanos, el sentido de la vista es el encargado de recibir y procesar la información de la luz a su alrededor en forma de fotones, utilizando el ojo como órgano receptor. El ojo como elemento sensor es muy complejo y se encarga tanto de adecuar la cantidad de luz, que las células encargadas de recibir la luz se estimulen y por último transmitan adecuadamente esta información al cerebro para que las procese adecuadamente.

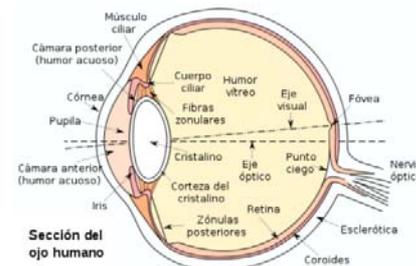


Figura 29. El ojo humano

Las células receptoras de la luz que entre en el ojo se encuentran en la parte interior y última del globo ocular, la retina. Se obvian aquí partes como la córnea, el cristalino, la pupila, el iris, el humor acuoso, etc. Nos centraremos en la parte donde impacta los fotones, en la zona macular, formada por la fovea, el punto ciego, nervio óptico, etc. Las células encargadas de recibir los fotones se encuentran en la retina, éstas son los conos y los bastones, por la forma que éstos poseen.

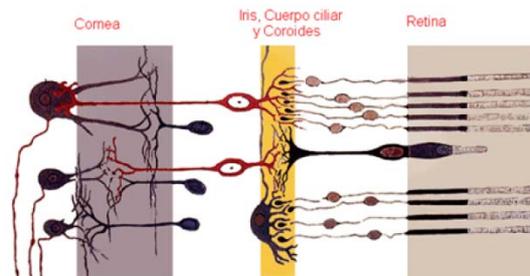


Figura 30. Distribución de las células sensibles a la luz en el ojo humano

Estos elementos fueron reconocidos y dispuestos inicialmente en la retina por Santiago Ramón y Cajal en 1892, mediante la tinción de las células con un método descubierto por el italiano Camilo Golgi, por el que compartiría el Premio Nobel de Medicina en 1906. Aunque Cajal lo recibió por el descubrimiento del funcionamiento del sistema nervioso y su interconexión mediante neuronas, no por las células del ojo.

La distribución de las células receptoras no es uniforme, ni en cantidad ni en posición sobre la retina, contando incluso con la discontinuidad del punto ciego. Los menos abundantes, los conos, de los cuales existen unos 7 millones de células y que responden a una longitud de

onda de 400-600nm, en lo que se denomina la visión fotópica o diurna, existen tres tipos diferentes. Se les nombra por su sensibilidad a las longitudes de onda. Los sensibles a la longitud de onda más corta, los conos-S (Short, 430nm), son más sensibles a las longitudes de onda de los azules, los de longitud de onda media o conos-M (Medium, 530nm) más sensibles a los verdes, y por último los conosL (Long, 560nm) o sensibles a las longitudes de onda más largas o los colores de la zona de los rojos. Figura 31.

Por otro lado, los bastones con una población estimada de 120 millones de células, son los encargados de recibir los fotones cuando las condiciones de luz son muy bajas, en los que se conoce como visión escotópica. Estas células son sensibles al blanco, negro y algunos tonos de gris (Longitud de onda de 510nm).

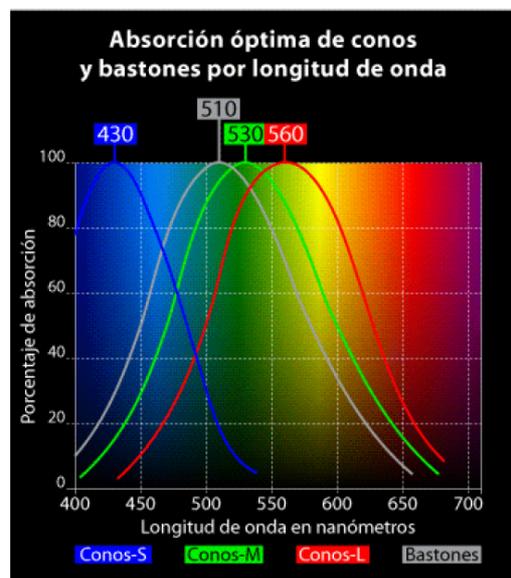


Figura 31. Distribución de los conos y los bastones por longitudes de onda

5.2 Diodo

Un diodo es un componente electrónico de dos terminales que permite la circulación de la corriente eléctrica a través de él en un solo sentido. Este término generalmente se usa para referirse al diodo semiconductor, el más común en la actualidad; consta de una pieza de cristal semiconductor conectada a dos terminales eléctricos. El diodo de vacío (que actualmente ya no se usa, excepto para tecnologías de alta potencia) es un tubo de vacío con dos electrodos: una lámina como ánodo, y un cátodo. (Hambley, 2001)

De forma simplificada, la curva característica de un diodo (I-V) consta de dos regiones: por debajo de cierta diferencia de potencial, se comporta como un circuito abierto (no conduce), y por encima de ella como un circuito cerrado con una resistencia eléctrica muy pequeña. Debido a este comportamiento, se les suele denominar rectificadores, ya que son dispositivos capaces de suprimir la parte negativa de cualquier señal.

El símbolo del diodo se muestra en la Figura 32(a), mientras que en la Figura 32(b) se muestra su característica tensión-corriente. Como se ve en la Figura 3.1(a), la tensión V_d en el diodo se

toma como positiva de ánodo a cátodo. De igual manera, la corriente i_D en el diodo se referencia como positiva cuando circula de ánodo a cátodo.

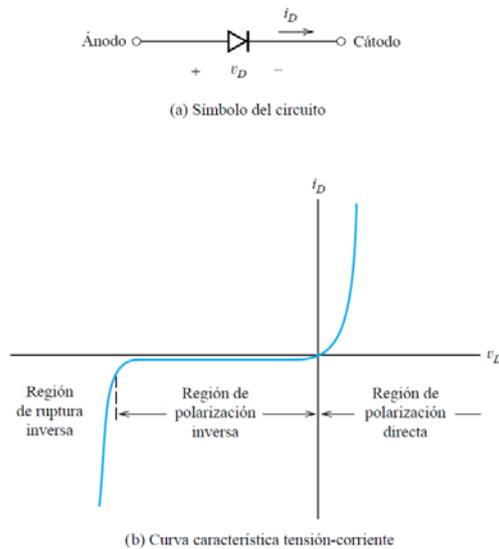


Figura 32. Símbolo del diodo y su curva característica de tensión-corriente

5.2.1 Diodo Semiconductor

Un diodo semiconductor moderno está hecho de cristal semiconductor como el silicio con impurezas en él para crear una región que contiene portadores de carga negativos (electrones), llamado semiconductor de tipo n, y una región en el otro lado que contiene portadores de carga positiva (huecos), llamado semiconductor tipo p. Las terminales del diodo se unen a cada región. El límite dentro del cristal de estas dos regiones, llamado una unión PN, es donde la importancia del diodo toma su lugar. El cristal conduce una corriente de electrones del lado n (llamado cátodo), pero no en la dirección opuesta; es decir, cuando una corriente convencional fluye del ánodo al cátodo (opuesto al flujo de los electrones). (Hambley, 2001)

Al unir ambos cristales, se manifiesta una difusión de electrones del cristal n al p (Je). Al establecerse una corriente de difusión, estas corrientes aparecen cargas fijas en una zona a ambos lados de la unión, zona que recibe el nombre de región de agotamiento.

A medida que progresa el proceso de difusión, la región de agotamiento va incrementando su anchura profundizando en los cristales a ambos lados de la unión. Sin embargo, la acumulación de iones positivos en la zona n y de iones negativos en la zona p, crea un campo eléctrico (E) que actuará sobre los electrones libres de la zona n con una determinada fuerza de desplazamiento, que se opondrá a la corriente de electrones y terminará deteniéndolos.

Este campo eléctrico es equivalente a decir que aparece una diferencia de tensión entre las zonas p y n. Esta diferencia de potencial (V_D) es de 0,7 V en el caso del silicio y 0,3 V para los cristales de germanio.

La anchura de la región de agotamiento una vez alcanzado el equilibrio, suele ser del orden de 0,5 micras pero cuando uno de los cristales está mucho más dopado que el otro, la zona de carga espacial es mucho mayor.

Cuando se somete al diodo a una diferencia de tensión externa, se dice que el diodo está polarizado, pudiendo ser la polarización directa o inversa.

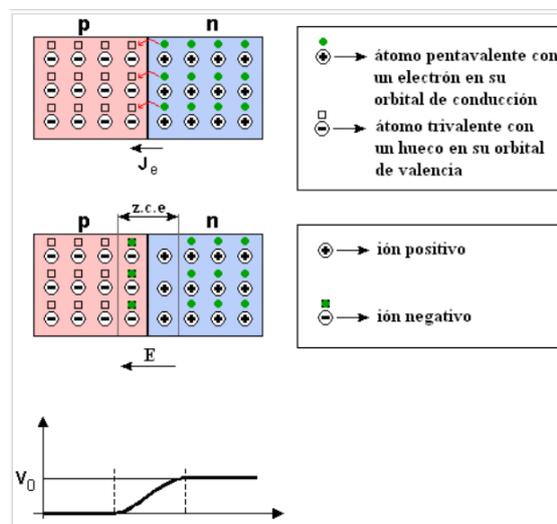


Figura 33. Formación de la región de agotamiento

5.2.2 Características Principales

- **Tensión umbral, de codo o de partida (V_y).** La tensión umbral (también llamada barrera de potencial) de polarización directa coincide en valor con la tensión de la zona de carga espacial del diodo no polarizado. Al polarizar directamente el diodo, la barrera de potencial inicial se va reduciendo, incrementando la corriente ligeramente, alrededor del 1% de la nominal. Sin embargo, cuando la tensión externa supera la tensión umbral, la barrera de potencial desaparece, de forma que para pequeños incrementos de tensión se producen grandes variaciones de la intensidad de corriente.
- **Corriente máxima (I_{max}).** Es la intensidad de corriente máxima que puede conducir el diodo sin fundirse por el efecto Joule. Dado que es función de la cantidad de calor que puede disipar el diodo, depende sobre todo del diseño del mismo.
- **Corriente inversa de saturación (I_s).** Es la pequeña corriente que se establece al polarizar inversamente el diodo por la formación de pares electrón-hueco debido a la temperatura, admitiéndose que se duplica por cada incremento de 10° en la temperatura.

- **Corriente superficial de fugas.** Es la pequeña corriente que circula por la superficie del diodo (ver polarización inversa), esta corriente es función de la tensión aplicada al diodo, con lo que al aumentar la tensión, aumenta la corriente superficial de fugas.
- **Tensión de ruptura (V_r).** Es la tensión inversa máxima que el diodo puede soportar antes de darse el efecto avalancha.
- **Efecto avalancha** (diodos poco dopados). En polarización inversa se generan pares electrón-hueco que provocan la corriente inversa de saturación; si la tensión inversa es elevada los electrones se aceleran incrementando su energía cinética de forma que al chocar con electrones de valencia pueden provocar su salto a la banda de conducción. Estos electrones liberados, a su vez, se aceleran por efecto de la tensión, chocando con más electrones de valencia y liberándolos a su vez. El resultado es una *avalancha* de electrones que provoca una corriente grande. Este fenómeno se produce para valores de la tensión superiores a 6 V.
- **Efecto Zener** (diodos muy dopados). Cuanto más dopado está el material, menor es la anchura de la zona de carga. Puesto que el campo eléctrico E puede expresarse como cociente de la tensión V entre la distancia d ; cuando el diodo esté muy dopado, y por tanto d sea pequeño, el campo eléctrico será grande, del orden de $3 \cdot 10^5$ V/cm. En estas condiciones, el propio campo puede ser capaz de arrancar electrones de valencia incrementándose la corriente. Este efecto se produce para tensiones de 4 V o menores

5.3 Diodo LED

Un led1 (de la sigla inglesa LED: Light-Emitting Diode: 'diodo emisor de luz', también 'diodo luminoso') es un diodo semiconductor que emite luz. Se usan como indicadores en muchos dispositivos, y cada vez con mucha más frecuencia, en iluminación. Presentado como un componente electrónico en 1962, los primeros leds emitían luz roja de baja intensidad, pero los dispositivos actuales emiten luz de alto brillo en el espectro infrarrojo, visible y ultravioleta. (Hambley, 2001)

Cuando un led se encuentra en polarización directa, los electrones pueden recombinarse con los huecos en el dispositivo, liberando energía en forma de fotones. Este efecto es llamado electroluminiscencia y el color de la luz (correspondiente a la energía del fotón) se determina a partir de la banda de energía del semiconductor. Por lo general, el área de un led es muy pequeña (menor a 1 mm²), y se pueden usar componentes ópticos integrados para formar su patrón de radiación. Los leds presentan muchas ventajas sobre las fuentes de luz incandescente y fluorescente, principalmente con un consumo de energía mucho menor, mayor tiempo de vida, tamaño más pequeño, gran durabilidad, resistencia a las vibraciones, no es frágil, reduce considerablemente la emisión de calor que produce el efecto invernadero en

nuestro planeta, no contienen mercurio (el cual al exponerse en el medio ambiente es altamente venenoso) a comparación de la tecnología fluorescente o de inducción magnética que si contienen mercurio, no crean campos magnéticos altos como la tecnología de inducción magnética con los cuales se crea mayor radiación hacia el ser humano, cuentan con un alto factor de CRI, reducen ruidos en las líneas eléctricas, son especiales para utilizarse con sistemas foto voltaicos (paneles solares) a comparación de cualquier otra tecnología actual, no les afecta el encendido intermitente (es decir pueden funcionar como luces estroboscópicas) y esto no reduce su vida promedio, son especiales para sistemas anti-exposición ya que no es fácil quebrar un diodo emisor de luz (led) y cuentan con una alta fiabilidad. Los ledes con la potencia suficiente para la iluminación de interiores son relativamente caros y requieren una corriente eléctrica más precisa, por su sistema electrónico para funcionar con voltaje alterno y requieren de disipadores de calor cada vez más eficientes a comparación de las bombillas fluorescentes de potencia equiparable.

5.3.1 *Historia*

Hacia mediados de la década de 1920, Oleg Vladimirovich Losev, trabajando en el Laboratorio Cenbtra de Radio de Leningrado, observó la luz emitida por un diodo rectificador utilizado en los receptores de radio. El científico fabricó ese diodo cristalino a base de Óxido de Cinc y Carburo de Silicio, y al pasar corriente eléctrica por el mismo se producía una emisión de fotones. Había nacido así el famoso diodo emisor de luz. En 1927 Losev escribió acerca de los LED un memorable informe, que se publicó en la revista de Telefonía de Rusia, bajo el título de "Detector luminoso de carburo de silicio y detección con cristales". (Díaz Hernández, 2010)



Figura 34. *Oleg Vladimirovich Losev*

Sin embargo el LED no se usó en la industria hasta los años sesenta, cuando Nick Holonyak desarrolló el primer led que emitía en el espectro visible en 1962 mientras trabajaba como científico asesor en un laboratorio de General Electric en Syracuse (Nueva York), y es por ello considerado como el "padre del diodo emisor de luz". Solo se podían construir de color rojo, verde y amarillo con poca intensidad de luz y se limitaba su utilización a mandos a distancia (controles remotos) y electrodomésticos para marcar el encendido y apagado.

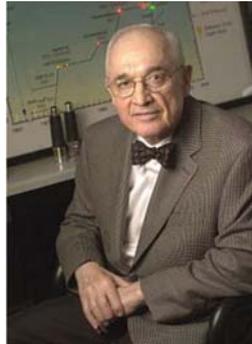


Figura 35. *Nick Holonyak*

El siguiente paso importante en la historia de los LEDs lo llevo a cabo Shuji Nakamura, cuando en 1993 inventó los LEDs azules, verdes y blancos, además de los diodos de láser azul, trabajo por el cual recibió El Millenium Technology Prize, dotado con un millón de euros. El cual se da a desarrollos que tienen un impacto en la calidad de vida y el desarrollo sostenible, también le fue concedido el Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica 2008.



Figura 36. *Shuji Nakamura*

5.3.2 Funcionamiento físico

El funcionamiento normal consiste en que, en los materiales conductores, un electrón al pasar de la banda de conducción a la de valencia, pierde energía; esta energía perdida se manifiesta en forma de un fotón desprendido, con una amplitud, una dirección y una fase aleatoria. El que esa energía perdida cuando pasa un electrón de la banda de conducción a la de valencia se manifieste como un fotón desprendido o como otra forma de energía (calor por ejemplo) depende principalmente del tipo de material semiconductor. Cuando un diodo semiconductor se polariza directamente, los huecos de la zona positiva se mueven hacia la zona negativa y los electrones se mueven de la zona negativa hacia la zona positiva; ambos desplazamientos de cargas constituyen la corriente que circula por el diodo.

Si los electrones y huecos están en la misma región, pueden recombinarse, es decir, los electrones pueden pasar a "ocupar" los huecos, "cayendo" desde un nivel energético superior a otro inferior más estable. Este proceso emite con frecuencia un fotón en semiconductores de banda prohibida directa [direct bandgap] con la energía correspondiente a su banda prohibida (véase semiconductor). Esto no quiere decir que en los demás semiconductores (semiconductores de banda prohibida indirecta [indirect bandgap]) no se produzcan emisiones en forma de fotones; sin embargo, estas emisiones son mucho más probables en los semiconductores de banda prohibida directa (como el nitruro de galio) que en los semiconductores de banda prohibida indirecta (como el silicio). (Hambley, 2001)

La emisión espontánea, por tanto, no se produce de forma notable en todos los diodos y solo es visible en diodos como los LEDs de luz visible, que tienen una disposición constructiva especial con el propósito de evitar que la radiación sea reabsorbida por el material circundante, y una energía de la banda prohibida coincidente con la correspondiente al espectro visible. En otros diodos, la energía se libera principalmente en forma de calor, radiación infrarroja o radiación ultravioleta. En el caso de que el diodo libere la energía en forma de radiación ultravioleta, se puede conseguir aprovechar esta radiación para producir radiación visible, mediante sustancias fluorescentes o fosforescentes que absorban la radiación ultravioleta emitida por el diodo y posteriormente emitan luz visible.

El dispositivo semiconductor está comúnmente encapsulado en una cubierta de plástico de mayor resistencia que las de vidrio que usualmente se emplean en las lámparas incandescentes. Aunque el plástico puede estar coloreado, es solo por razones estéticas, ya que ello no influye en el color de la luz emitida. Usualmente un led es una fuente de luz compuesta con diferentes partes, razón por la cual el patrón de intensidad de la luz emitida puede ser bastante complejo.

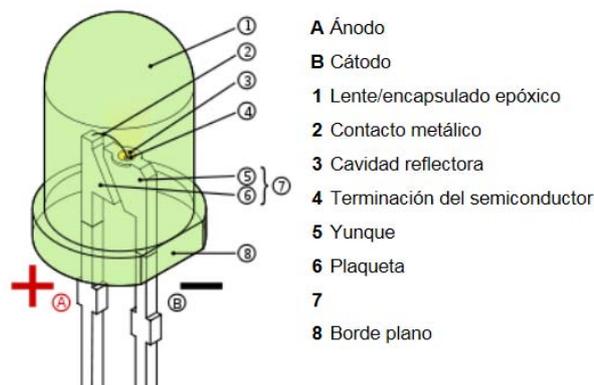


Figura 37. Partes de un diodo LED

Para obtener buena intensidad luminosa debe escogerse bien la corriente que atraviesa el led; para ello, hay que tener en cuenta que el voltaje de operación va desde 1,8 hasta 3,8 voltios aproximadamente (lo que está relacionado con el material de fabricación y el color de la luz que emite) y la gama de intensidades que debe circular por él varía según su aplicación. Valores típicos de corriente directa de polarización de un led corriente están comprendidos entre los 10 y los 40 mA. En general, los leds suelen tener mejor eficiencia cuanto menor es la corriente que circula por ellos, con lo cual, en su operación de forma optimizada, se suele buscar un compromiso entre la intensidad luminosa que producen (mayor cuanto más grande es la intensidad que circula por ellos) y la eficiencia (mayor cuanto menor es la intensidad que circula por ellos).

Compuesto	Color	Long. de onda
arseniuro de galio (GaAs)	Infrarrojo	940 nm
arseniuro de galio y aluminio (AlGaAs)	rojo e infrarrojo	890 nm
arseniuro fosfuro de galio (GaAsP)	rojo, anaranjado y amarillo	630 nm
fosfuro de galio (GaP)	verde	555 nm
nitruro de galio (GaN)	verde	525 nm
seleniuro de zinc (ZnSe)	azul	
nitruro de galio e indio (InGaN)	azul	450 nm
carburo de silicio (SiC)	azul	480 nm
diamante (C)	ultravioleta	
silicio (Si)	en desarrollo	

5.3.3 Tiempo de vida y fallos

Dispositivos de estado sólido, tales como los LEDs están sujetos a un desgaste muy limitado si se opera a bajas corrientes y bajas temperaturas. Muchos de los LED fabricados en los años 1970 y 1980 todavía están en servicio actualmente. La vida típica según los fabricantes pueden rondar entre las 25,000 a 100,000 horas, pero el calor y la configuración de la corriente utilizada puede alargar o acortar este tiempo significativamente. (Soltic & Chalmers, 2012)

El síntoma más común de fallo en LEDs es al degradación gradual de la luz emitida y la pérdida de eficiencia. Los fallos súbitos, aunque raros, también pueden ocurrir. En un principio los LEDs rojos eran notables por sus cortos tiempos de vida. Con el desarrollo de LEDs de alta potencia, los mismos se someten a temperaturas de unión superior y mayores densidades de corriente que los dispositivos tradicionales, esto puede causar tensión en el material y puede causar una temprana degradación de la luz emitida. Para clasificar cuantitativamente la vida útil de una forma estandarizada se ha sugerido el uso de los términos L70 and L50, lo cual indica el tiempo que le tomara al LED en cuestión alcanzar el 70% o el 50% de su luz emitida respectivamente. (Soltic & Chalmers, 2012)

Al igual que otros dispositivos de iluminación, el rendimiento del LED es dependiente de la temperatura. De acuerdo a lo expresado por la mayoría de los fabricantes, la temperatura idónea de operación es de 25 grados centígrados. (citar) por el lado contrario al caso anterior, la luz emitida por los LEDs tiende a aumentar a bajas temperaturas, esto puede suceder dependiendo del tipo de LED alrededor de los -30°C, debido a esto los LEDs resultan una buena opción para la iluminación de por ejemplo, cuartos fríos, que sumado a lo anterior y su duración, está el hecho de ahorro energético al emitir menor cantidad de calor que sus tecnologías adversarias.

5.3.4 *LEDs de Luz Blanca*

Existen dos métodos principales para producir diodos LEDs emisores de luz blanca, el primero es el uso de LEDs individuales que emitan los tres colores primarios (rojo, verde y azul) obteniendo el color blanco de la mezcla de estos tres. El segundo método es el uso de un material de fosforo para convertir la luz monocromática de azul al ancho de banda de la luz blanca, esto en forma parecida a como operan las bombillas fluorescentes.

5.3.4.1 *LEDs RGB*

La mezcla del color blanco se puede obtener con diferentes mezcla de colores, la mas común de esta es la de los colores rojo, verde y azul (RGB). Debido a que estos necesitan circuitos electrónicos especiales para controlar la mezcla y la difusión de diferentes colores, y debido a que los LEDs de color individuales típicamente tienen patrones de emisión ligeramente diferentes (que conduce a la variación del color dependiendo de la dirección), incluso si están hechas como una sola unidad, este método es poco utilizado para producir luz blanca. No obstante, este método es particularmente interesante en muchos usos, debido a la flexibilidad de la mezcla de diferentes colores y, en principio, este mecanismo tiene también una mayor eficiencia cuántica en la producción de luz blanca.

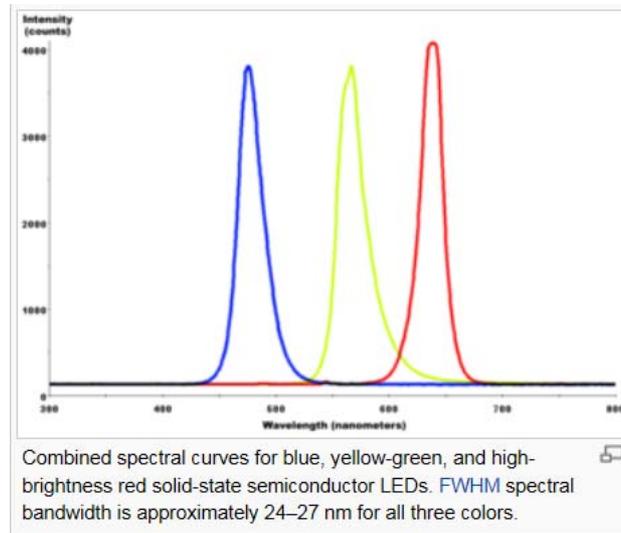


Figura 38. Espectro combinado de las curvas espectrales de brillo de LEDs azul, amarillo-verde y rojo

Existen numerosos tipos de LEDs multi-colores. Diferentes factores fundamentales existen entre estos diversos tipos, como son: estabilidad del color, capacidad de estabilidad, eficiencia de la luminosidad, etc. Con frecuencia, alta eficiencia ha de significar bajas prestaciones de color, presentando un intercambio entre eficiencia luminosa y prestaciones de colores.

Los LEDs multi-color ofrecen no sólo otro medio para formar la luz blanca, sino un nuevo medio para formar luz de diferentes colores. Colores más perceptibles pueden ser formados por mezcla de diferentes cantidades de tres colores primarios. Esto permite un control preciso de color dinámico. A medida que más esfuerzo se dedica a la investigación de este método, más grande es la influencia de los LEDs multi-color en los métodos utilizados para producir y controlar el color de la luz. Sin embargo, antes de que este tipo de LED pueda desempeñar un papel en el mercado, varios problemas técnicos deben resolverse, como por ejemplo; la potencia de emisión de estos LEDs decae exponencialmente con el aumento de la temperatura, [71], resultando en un cambio sustancial en la estabilidad del color. Este tipo de problemas inhiben y pueden impedir su uso a nivel industrial. Este tipo de inconvenientes es objeto en la actualidad de múltiples investigaciones.

5.3.4.2 LEDs a base de Fosforo

Este método consiste en el revestimiento de un LED de un color determinado (LED azul en su mayoría hechos de nitruro de galio e indio) con fósforo de diferentes colores para formar la luz blanca, los LEDs resultantes se les llama LEDs blancos basados en fosforo. Una fracción de la luz azul se somete al desplazamiento de Stokes (la diferencia en amplitud de onda o frecuencia

entre la banda máxima de absorción y el espectro de emisión), transformándose de longitudes de onda cortas a ondas largas. Dependiendo del color del LED original se pueden utilizar fósforo de diferentes colores. Si se aplican varias capas de fosforo de distintos colores, el espectro emitido se amplía, aumentando el valor del índice de rendimiento de color (CRI) para el LED en cuestión. (Soltic & Chalmers, 2012)

Las pérdidas de eficiencia en los LEDs basados en fosforo se deben a la pérdida de calor debido al desplazamiento de Stokes, y por otros aspectos relacionados a la degradación del fosforo. Su eficiencia en comparación con los LEDs normales depende de la distribución espectral de la salida de luz resultante y la longitud de onda original de la misma LED. Dada la facilidad de su fabricación, este es el método más popular para la fabricación de diodos LEDs blancos, esto debido a que el diseño y producción de un diodo LED blanco usando un LED de emisión monocromática y añadirle una conversión de color a base de fosforo es más simple y barato que el complejo sistema del método RGB, por ende la mayoría de los LEDs blancos de alta intensidad utilizados en el mercado son manufacturados utilizando el método de conversión de color a base de fosforo.

5.4 Lámpara LED

Una lámpara de LED es una lámpara de estado sólido que usa diodos LEDs como fuente luminosa. Debido a que la luz capaz de emitir un LED no es muy intensa, para alcanzar la intensidad luminosa similar a las otras lámparas existentes como las incandescentes o las fluorescentes compactas, las lámparas de LED están compuestas por agrupaciones de LEDs, en mayor o menor número, según la intensidad luminosa deseada.

	Color Temperature	Avg Rated Life	Maintained Lumens/Watt	Contains Mercury	Visual Flicker
 LED	Neutral 	50,000 HOURS	60	NO 	NO 
 CFL	Cool 	20,000 HOURS	50	YES 	YES 
 Inc	Warm 	2,000 HOURS	10	NO 	NO 

Figura 39. Tabla comparativa de tecnologías de iluminación

Los diodos funcionan con energía eléctrica de corriente continua (CC), de modo que las lámparas de LED deben incluir circuitos internos para operar desde el voltaje CA estándar. Los LED se dañan a altas temperaturas, por lo que las lámparas de LED tienen elementos de gestión del calor, tales como disipadores y aletas de refrigeración.

Actualmente las lámparas de LED se pueden usar para cualquier aplicación comercial, desde el alumbrado decorativo hasta el de jardines y vías públicas. Las lámparas LED poseen diseños que encajan en el enroscado de las tradicionales bombillas incandescentes o fluorescentes compactas, facilitando así la sustitución de una tecnología a otra. En el normal de los casos la tasa de reemplazo de bombillas incandescentes a lámparas LEDs es de 60 a 5 watts. Para tener otra idea de comparación, una bombilla incandescente estándar de propósito general emite luz con una eficiencia de alrededor de 14 a 17 lumens/Watt, mientras que la eficiencia de la luz emitida por una lámpara LED ronda entre 90 a 100 lumens/Watt.

Varias compañías ofrecen lámparas LED para alumbrado de uso general. La tecnología de la iluminación LED está mejorando rápidamente y las nuevas bombillas de bajo consumo de consumo LED están disponibles en gran parte del mercado.



Figura 40. Ejemplos de lámparas LEDs disponibles en el mercado

5.4.1 Ventajas de la Iluminación LED

- **Consumo.** Una lámpara LED consume alrededor de una décima parte que una bombilla incandescente equivalente, y la mitad de su equivalente fluorescente. El LED no genera pérdidas por radiación infrarroja o ultravioleta, la pérdida por calor es inferior a las incandescentes y halógenas. Por todo ello, la iluminación conseguida por vatio consumido es mayor.
- **Tiempo de Vida.** El tiempo de vida de un LED puede sobrepasar las 50,000 horas, esto es 50 veces más que el de una bombilla incandescente y más de dos veces el de una lámpara fluorescente.
- **Emisión de Calor.** Los LEDs producen mucho menos calor que sus competidoras, lo que contribuye a un menor encapsulamiento pues necesita disipar menos calor, disminuye los costos de acondicionamiento de temperatura en espacios cerrados, y en general beneficia al medio ambiente al reducir el efecto invernadero en el planeta.

- **Tiempo de respuesta.** El tiempo de respuesta de las lámparas LEDs se encuentra en el orden de los microsegundos, frente a los milisegundos de las lámparas incandescentes, y frente al tiempo de respuesta de las lámparas fluorescentes que es mucho mayor que ambas. La bombilla incandescente está basada en la utilización de filamentos incandescentes, muy largos en algunos casos, lo que genera una gran persistencia a la hora de enfriarse y volver a encenderse. Es decir, su velocidad de encendido y apagado es baja frente a la utilización de componentes semiconductores.
- **Luminosidad.** los LEDs son más brillantes que una bombilla tradicional, brillan por igual desde el principio y con menor degradación de flujo durante su vida útil. Uno de los problemas principales de los sistemas de iluminación actuales es el mantenimiento del flujo luminoso a lo largo de la vida útil de las lámparas. Por diferentes circunstancias, la mayoría de los sistemas degradan rápidamente su flujo luminoso en función del tiempo.
- **Resistencia mecánica.** como los LEDs no tienen ampolla de cristal ni un frágil filamento, son muy resistentes y más duraderos que cualquier otra fuente de luz. Dada la temperatura que suelen alcanzar los filamentos de las lámparas actuales, pueden llegar a los 500°C, los materiales que soportan bien estas temperaturas y son transparentes, son el vidrio y el cristal.
- **Libre de Mercurio.** Las lámparas fluorescentes, las más utilizadas aun el día de hoy debido a su bajo consumo en relación a las bombillas incandescentes, funcionan al pasar electricidad a través de vapor de mercurio. Si una lámpara fluorescente se rompe puede provocar exposición al mercurio, el cual es un elemento altamente contaminante y venenoso. Las lámparas LEDs ofrecen alrededor del doble de eficiencia que una lámpara fluorescente siendo libres de mercurio, haciendo de esta una opción más confiable para el usuario y para el medio ambiente.

5.4.2 Desventajas y problemas remanentes

El proceso de producción de LEDs blancos es complejo y tiene muchos aspectos por mejorar. Esto significa que el costo de producción a alto volumen es aún relativamente alta en comparación con las fuentes de luz tradicionales. El proceso utilizado para depositar las capas de semiconductores activos de la LED está constantemente mejorando para aumentar el rendimiento en la producción. También se ha informado sobre problemas relativos a la dificultad de manejo del fósforo para obtener resultados estandarizados en cuanto ancho de banda de la luz obtenida. (Soltic & Chalmers, 2012)

Los LEDs tienen una tolerancia limitada al aumento de temperatura, lo cual puede provocar degradación de la eficiencia de los LEDs o en el peor de los casos el colapso del mismo. Este inconveniente limita el total de LEDs que pueden ser encapsulados de forma práctica en lámparas comerciales y requiere de una correcta aplicación de disipadores de calor en el encapsulado.

5.5 DALI

En un principio la iluminación tenía un único objetivo; proveer luz para tarea visual. Hoy en día conveniencia, funcionalidad y ahorro de energía son características atractivas que deben ser consideradas como objetivos, y las instalaciones eléctricas tradicionales basadas en un simple cableado de switches, reguladores de intensidad y bombillas es inadecuado para responder a estos requerimientos. Esta es de las razones por lo cual los sistemas de buses residenciales han tenido gran auge desde la década de 1980, por permitir comunicación digital entre todos los componentes de un sistema de iluminación.

Estos buses residenciales, regularmente implican un alto costo de instalación, además que suelen demandar un alto conocimiento tanto como del diseñador como el electricista para llevar a cabo una adecuada instalación. Esto ha motivado que la industria de la iluminación defina un nuevo estándar para la comunicación digital entre componentes de un sistema de iluminación, que pueda permitir la creación de un sistema de bajo costo en componentes y de fácil manejo, dando así nacimiento a DALI.

DALI es un acrónimo cuyo significado en inglés es “Digital Addressable Lighting Interface”, es decir, Interfase de Iluminación Digital Direccional. Es un protocolo internacional de iluminación, basado en el estándar IEC 62386 y que tiene por objetivo un sistema de administración inteligente de iluminación que provee ahorro de energía, facilidad de instalación y mantenimiento y un control óptimo y flexible. Al ser DALI un protocolo abierto, existen múltiples fabricantes con equipos DALI en el mercado los cuales son compatibles entre sí y pueden ser integrados en un mismo sistema DALI. Esto le permite a los planificadores, fabricantes, dueños de edificaciones, instaladores y usuarios finales la seguridad de suplirse de distintas fuentes con la seguridad de la compatibilidad de sus productos.



Figura 41. Logo DALI

DALI cada vez se utiliza más en iluminación de edificios, la moderna e inteligente tecnología actual de iluminación es factible con DALI, incluyendo la iluminación con luces de colores. Hay balastos y equipos electrónicos adecuados y disponibles para todos los tipos de lámparas (p.e. Lámparas halógenas, fluorescentes, bombillas incandescentes, LEDs). La relación de productos y componentes DALI es extensa, por lo que los arquitectos y decoradores de iluminación aceptan DALI como una herramienta ideal de la tecnología de iluminación

Podemos decir que los principales beneficios que proporciona DALI son:

- Cableado sencillo de líneas de control (sin formación de grupos, sin polaridad)
- Se puede elegir entre control de unidades individuales (direccionamiento individual) o grupos (grupo de direccionamiento)
- Un control simultáneo de todas las unidades es posible en cualquier momento (incorporado en función de la operación inicial) a través de broadcast.
- No es de esperar interferencia en la comunicación de datos debido a la simple estructura de los datos.
- Permite solicitar a los dispositivos su actual estado
- Búsqueda automática de dispositivos de control
- Fácil formación de grupos a través de "luces parpadeantes"
- atenuación automática y simultánea de todas las unidades cuando se selecciona una escena
- regulación de comportamiento logarítmico para coincidir con la sensibilidad del ojo humano.
- Sistemas con inteligencia asignada (cada unidad contiene entre otras las siguientes informaciones asignadas: dirección individual, dirección de grupo, valor de escenas, etc).
- Tolerancias de operación en las lámparas pueden ser almacenadas como valores.
- Permite efecto de desvanecimiento por medio del ajuste de la velocidad de atenuación.
- Identificación del tipo de unidad.
- Se puede establecer una escena adicional de emergencia.
- Sistema menos costosos que los tradicionales buses de instalación u otros sistemas de iluminación como el sistema 1-10.

5.5.1 DALI y los sistemas de gestión de edificaciones

DALI no es adecuado para establecerse como un sistema de gestión de edificaciones por su baja complejidad, por lo tanto, dentro del esquema general de un sistema de administración de edificación, un sistema de gestión de iluminación basado en DALI puede ser usado solo como un subsistema para la gestión de la iluminación.

Las principales diferencias entre DALI y un sistema de gestión de edificio podemos decir que son las siguientes:

- DALI tiene un tamaño limitado del sistema (64 direcciones).
- DALI está sólo destinado a sistemas de iluminación, mientras que BMS incluye otras funcionalidades (HVAC, sistemas de alarma, etc).
- Un sistema BMS comúnmente tiene ilimitadas posibilidades de expansión, que Dalí no tiene.
- DALI no está compitiendo contra los sistemas BMS, mas les sirve de complemento, y para esto están disponibles gateways para conectar los sistemas DALI con sistemas de BMS como EIB-KNX, LON, etc.

La integración de DALI dentro de un sistema de administración de edificación se puede dar en uno de los siguientes contextos:

5.5.1.1 DALI como un sistema autónomo

Esta es la opción más simple, in la mayoría de los casos, consistirá de una unidad de control que no usara la total funcionalidad de DALI. Ha de ser un sistema autónomo de gestión de iluminación sin conexión a ningún otro sistema. Todas las funciones son llevadas a cabo a través de la unidad de control, igualmente todos los elementos de control y sensores se conectan directamente a la unidad de control.

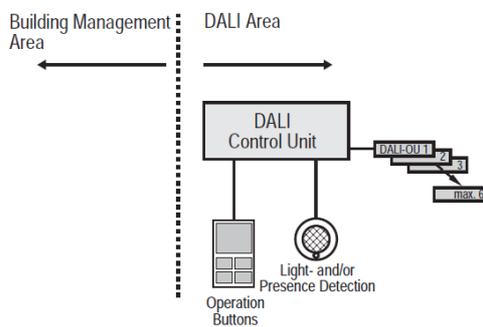


Figura 42. Sistema autónomo

5.5.1.2 DALI como un subsistema autónomo

Esta opción es un subsistema independiente dentro sistema de gestión del edificio. Sin embargo, en comparación con la opción anterior si está conectado al sistema de gestión de edificios, pero sólo las informaciones más importantes (estado de fallo, las funciones centrales de conmutación etc) se intercambian entre sistema y subsistema. La comunicación entre los dos sistemas puede ser en la forma más simple (un sí o no) con respecto a los fallos o fracasos. Los sensores, elementos de control, la unidad de programación y mando a distancia se pueden integrar como de costumbre (por ejemplo inalámbrica). La inicialización puede llevarse a cabo a través de la gestión de edificios siempre que esta opción será ofrecida por el software herramientas. Este modelo también puede operar de forma autónoma.

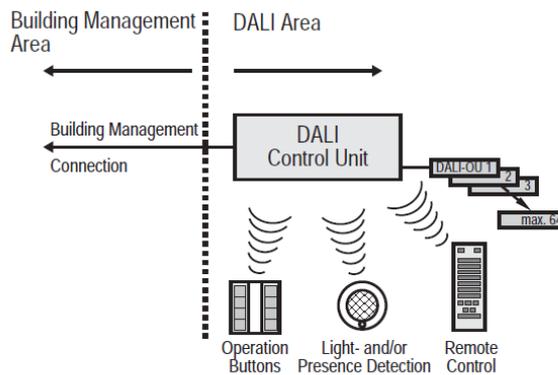
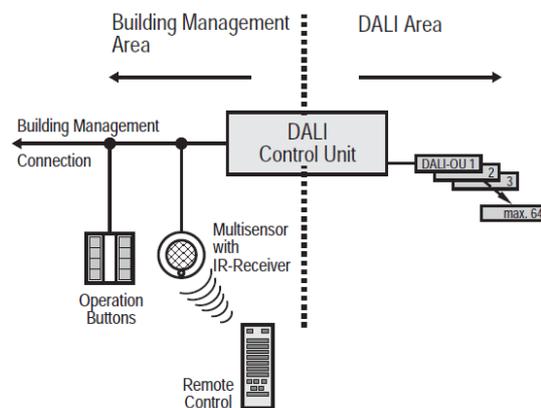


Figura 43. *Subsistema autónomo***5.5.1.3 DALI como un subsistema puro**

Un traductor (gateway) está previsto para esta opción. Todos los componentes instalados por ejemplo en un salón o una parte del edificio utilizan la misma técnica de transferencia de datos como la gestión de edificios. El gateway traduce los comandos del sistema de gestión del edificio y viceversa para permitir el establecimiento de la comunicación entre ambos sistemas. El sistema de gestión de iluminación no ha sido diseñado como una solución autónoma en este tipo de aplicación, es por esto que la inicialización del sistema de control de iluminación y otras funciones básicas dependen por completo del sistema de gestión del edificio.

**Figura 44.** *Puro subsistema***5.5.2 Aspectos técnicos.**

La velocidad de transmisión de datos es de 1,200 bits/seg, la cual permite una operación del sistema libre de interferencia.

En cuanto al voltaje, el cero lógico está establecido en 0 ± 4.5 Voltios en la transmisión y 0 ± 6.5 Voltios en la recepción, mientras que el uno lógico está establecido en 16 ± 4.5 voltios en la transmisión y 16 ± 6.5 voltios en la recepción.

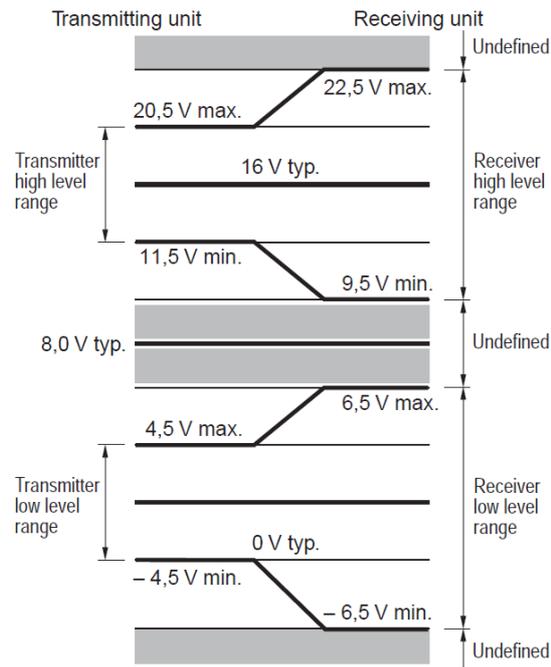


Figura 45. Rango de voltaje

En cuanto al no hay requerimientos especiales para el cableado en los sistemas DALI, y no hay necesidad de instalar resistencias de terminación en los cables para protegerlos contra los reflejos, el cable de control puede ser un cable estándar de 5 hilos.

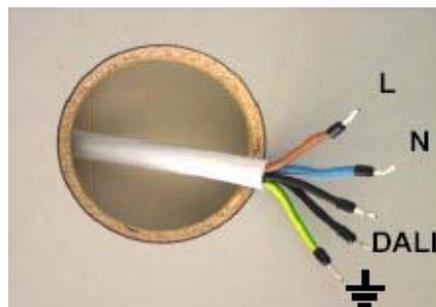


Figura 46. Cableado utilizado en DALI

5.5.3 El grupo DALI

El estándar (DALI) es compartido y apoyado por los más importantes fabricantes de balastos y electrónicos de iluminación a nivel mundial desde 1999. Hay un Grupo de Trabajo (Activity Group DALI –www.dali-ag.org) dedicado a establecer el Estándar DALI. Algunos miembros del Grupo de Trabajo son: AG DALI: ABB, BAG, CEAG, DELMATIC, DIAL, ECKERLE, ERC, ERCO, ETAP, GEWISS, GITRONICA, HADLER, HELVAR, HÜCO, INSTA, JOHANSON CONTROLS, LIGHTOLIER, LUTRON, LUXMATE, MAY&CHRISTE, NIKO, OSRAM, PHILIPS LIGHTING, SANDER, TRIDONIC, TROLL, UNIVERSAL LIGTHING TECHNOLOGIES, VOSSLOHGIES, VOSSLOH-SCHWABE, WILA

Son tareas del Grupo de Trabajo DALI :

- Adopción de la tecnología DALI mundialmente
- Asegurar la compatibilidad de los productos DALI
- Soportar las aplicaciones DALI

Capítulo 6: DISEÑO DEL HARDWARE PROPUESTO

6.1 Diseño

En el presente proyecto diseñamos y montamos un dispositivo capaz de controlar a distancia una tira de LEDs RGB utilizando placas Arduino y módulos XBee. Esto según lo planteado en los objetivos del proyecto.

El dispositivo se compone de dos módulos: el emisor y el receptor, en la figura 47 se muestra el esquema general proyecto. El primero es el módulo emisor, que contiene el tablero de mandos a ser utilizado por el usuario, este módulo está concebido como un tablero de mando empotrado de dimensiones 7 x 7 cm, cuyas dimensiones son similares a los switches de luces convencionales, haciendo más fácil su implementación.

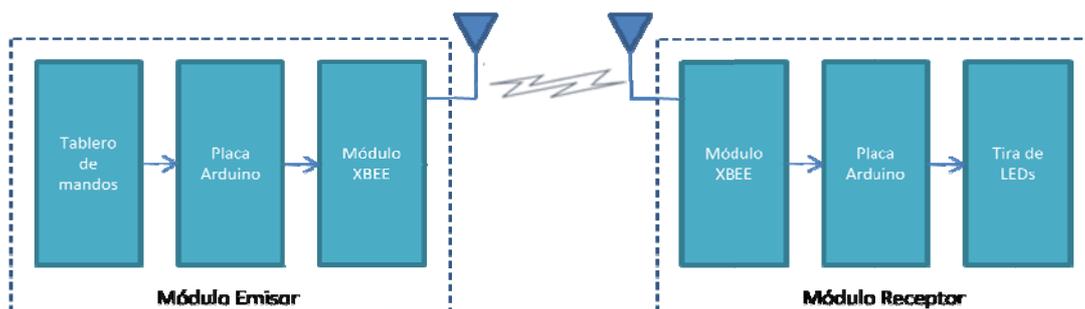


Figura 47. Esquema general del funcionamiento del dispositivo

El esquema planteado del tablero de mandos del módulo emisor se muestra en la figura 48, dispone de tres pulsadores, uno de ellos para el encendido y apagado de las luces, y los otros dos para seleccionar entre el modo luz blanca y el modo luz de color. Si se selecciona el modo luz blanca, las tres matrices de LEDs se atenúan con el mismo valor y su intensidad puede ser modulada utilizando el potenciómetro “Rojo/Blanco”, si por el contrario se activa el modo luz de color, la intensidad de cada una de las tres matrices de LEDs se pueden variar utilizando el potenciómetro del color correspondiente.

Por otro lado, el tablero de mandos presenta tres botones de escenas y uno de programación, esto permite almacenar en memoria tres escenas diferentes, definiéndose una escena como un nivel de intensidad de deseada en cada una de las tres matrices de LEDs y que puedan ser llamadas rápidamente con solo presionar el botón de la escena elegida. Para guardar una escena, el usuario habrá de mantener pulsado el botón de programación hasta que se

encienda el LED del modo programación (aproximadamente dos segundos), en ese entonces se presiona el botón de la escena deseada mientras este encendido el LED del modo programación (aproximadamente tres segundos) y con esto la intensidades que tengan en ese momento cada matriz de LEDs quedaran guardadas en memoria. Cabe destacar que estos valores se almacenan en la memoria EEPROM del microprocesador, por lo que los valores almacenados son inmunes a la falta de energía eléctrica.

En la parte superior del tablero de mandos se deja una apertura de 7 x 7mm para exposición al exterior de la antena del módulo XBee, facilitando así su transmisión.

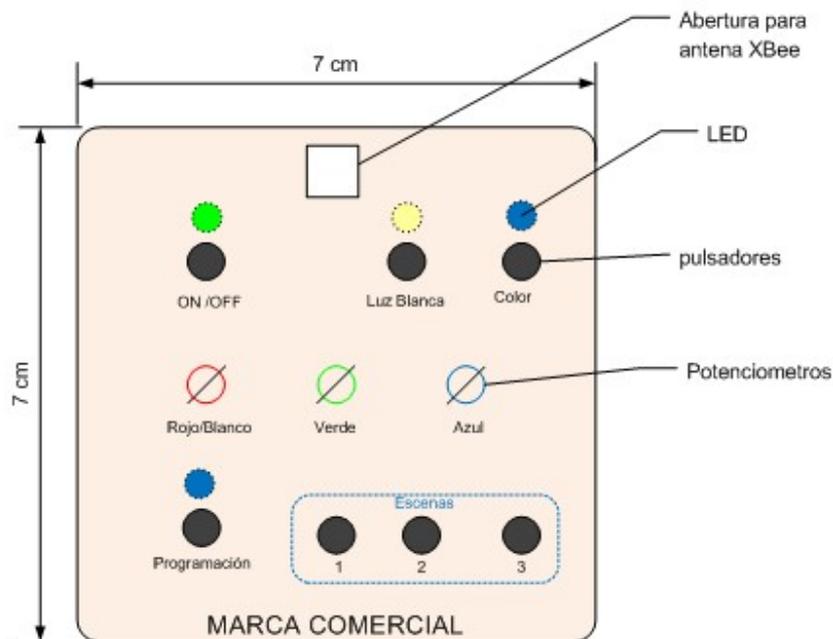


Figura 48. Boceto de la presentación comercial del diseño

El segundo módulo es el receptor, no visible para el usuario y es el encargado de recibir las instrucciones del tablero de mandos y ejecutarlas en las matrices de LEDs. Este módulo está diseñado para controlar una tira de LED como la mostrada en la figura 49, la está compuesta de tres matrices de LEDs independientes entre si, una de luz roja, otra de luz verde y otra de luz azul. Cada matriz de LEDs funciona a 12 voltios y consume 25W de potencia.



Figura 49. *Tira de diodos LEDs RGB.*

6.2 Hardware

En esta sección se presenta y explica el diseño utilizado tanto en el módulo emisor como en el módulo receptor de nuestro proyecto.

6.2.1 Módulo Emisor

En la figura 50 se muestra el diagrama esquemático del módulo emisor de nuestro dispositivo, como se observa, solo se requiere de pocos elementos externos al Arduino para completar el circuito, siendo estos básicamente elementos de entrada (potenciómetros y pulsadores) o LEDs indicadores.

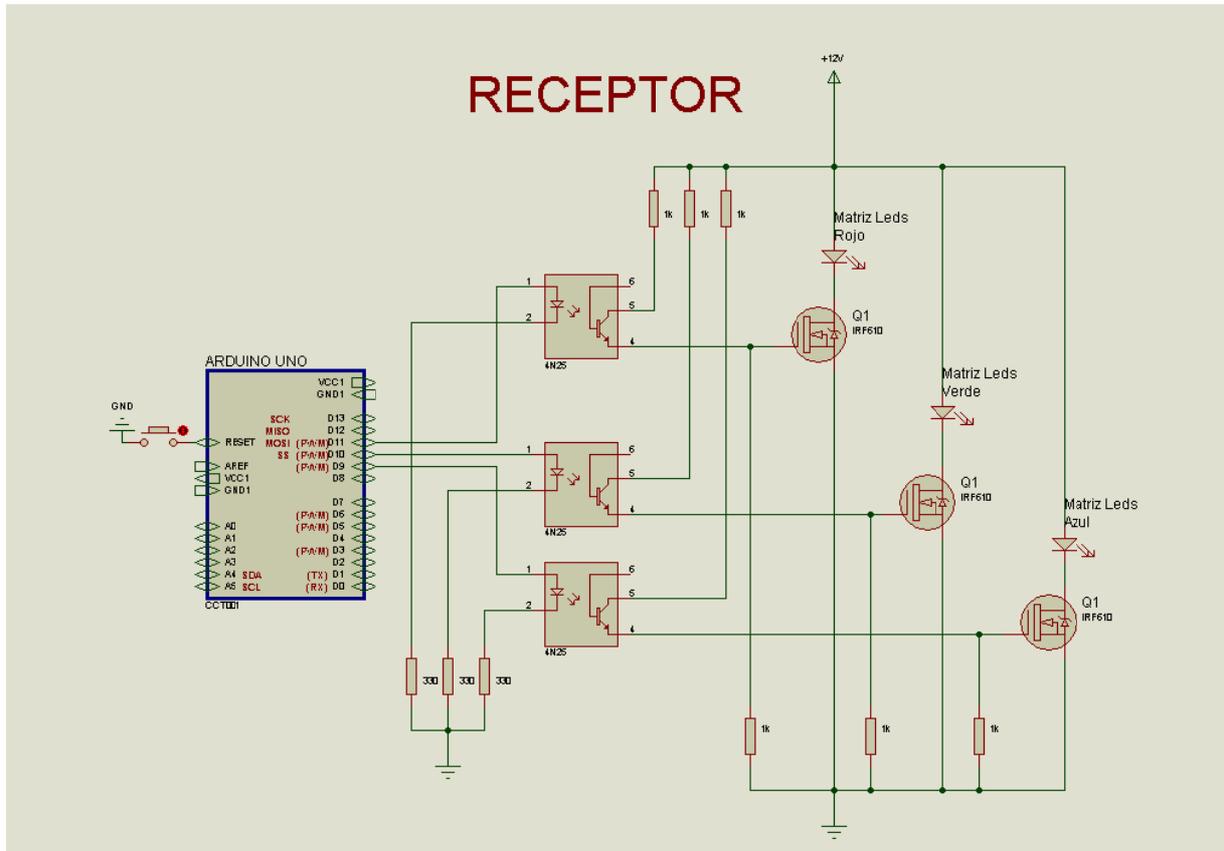


Figura 51. Diagrama esquemático del módulo receptor.

Dado que los pines de Arduino no pueden proveer más de 40mA, se requiere del circuito mostrado en el diagrama para adaptar la señal de baja potencia proveniente del Arduino a las matrices de LEDs de 25W utilizadas en el proyecto. Este circuito para la adaptación de potencia se replica tres veces, una para cada matriz de LEDs.

El circuito de adaptador de potencia cuenta de dos fases, en la primera se utiliza un optocoplador 4N25 cuya función es separar físicamente el Arduino del resto del circuito para protegerlo de posibles fallas por exceso de corriente. La segunda fase utiliza un MOSFET IRF610 que actúa como switch de potencia, en este caso utilizamos el MOSFET IRF610, el cual permite una corriente de 3.3A entre el drenador y surtidor, suficiente para los requerimientos de este proyecto.

En resumen, la señal PWM a 5V proveniente de los pines 9, 10 y 11 del Arduino van al optocoplador, encendiendo el LED interno del 4N25, lo que a su vez permitirá el paso de corriente a la salida del mismo proveyendo un voltaje de hasta 6V en la puerta del MOSFET, creando un cortocircuito entre drenador y puerta permitiendo así encender la matriz de LEDs en función de la señal PWM del Arduino.

6.3 Software

En esta sección se explica los códigos utilizado para programar las dos placas Arduinos utilizadas en este proyecto, cada una de la cual se presenta a continuación y por separado.

6.3.1 Código del Módulo Emisor

Este es el código que se ha cargado al microcontrolador de la placa Arduino utilizada en el módulo emisor. Para mayor claridad el código se ha separado en bloques y se explican de forma individual.

Declaraciones Generales. En este declaramos todas las variables a utilizar, la definición de cada variable aparece como comentario al lado de cada una de estas.

```
int IR = 0; // potenciometro para led Rojo
int IG = 1; // potenciometro para led verde
int IB = 2; // potenciometro para led azul

int Rled = 9; //salida modulada led Rojo //9
int Gled = 10; //salida modulada led verde
int Bled = 11; //salida modulada led Azul

int IW = 3; // botón para el modo luz blanca
int IC = 4; // boton para el modo luz de color

int Wled = 5; // led indicador de modo luz blanca
int Cled = 6; // led indicador de modo luz de color

boolean modoW = HIGH; // estado del modo luz blanca
boolean modoC = LOW; // estado del modo luz de color

int onPin = 7; // boton de encendido
int ledonPin = 13; // indicador de encendido
boolean lastButton = LOW; // variable de control
boolean On = false; //estado de encendido o apagado

int val;
int ledLevel;
int ledLevelR;
int ledLevelG;
int ledLevelB;

char imprime;
```

```
int b;
```

Void Setup. El setup se establece al inicio de un programa, y se ejecuta una única vez después de que se conecta la placa Arduino a la fuente de alimentación o cuando se resetea. En esta hemos declarado el estado de los pines a utilizar, inicializamos la comunicación Serial y establecimos el voltaje de referencia para las entradas analógicas.

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);

  pinMode(Rled, OUTPUT);
  pinMode(Gled, OUTPUT);
  pinMode(Bled, OUTPUT);

  analogReference(DEFAULT);

  pinMode(Wled, OUTPUT);
  pinMode(Cled, OUTPUT);

  pinMode(IW, INPUT);
  pinMode(IC, INPUT);

  pinMode(onPin, INPUT);
  pinMode(ledonPin, OUTPUT);
}
```

Void lopp. Esta función se ejecuta de forma consecutiva e indefinida tal como su nombre lo dice. Esta la explicaremos por según los distintos bloques que en esta aparecen.

```
void loop()
{
```

Encendido-Apagado. En este bloque se define el encendido o apagado del dispositivo utilizando el botón conectado al pin 7 y destinado para este fin en el diseño. Se utiliza la variable de control “lastButton” para controlar el correcto cambio de estado independientemente de la duración de la pulsación del botón de encendido.

```
// ENCENDIDO-APAGADO
```

```
if (digitalRead(onPin) == HIGH && lastButton == LOW)
{
  On = !On;
  lastButton = HIGH;
}
else
{
  //lastButton = LOW;
  lastButton = digitalRead(onPin);
}

digitalWrite(ledonPin, On);
```

Cambio entre modo Blanco y modo Color. En este bloque se controla el modo de operación del dispositivo entre el modo de luz blanca (los tres paneles de LEDs operando a la misma intensidad) o el modo de luz de color (control individual de los tres paneles de LEDs). A diferencia del bloque anterior, no se requiere de una variable de control para el cambio de estado dado que según las especificaciones del diseño, se dispone de un botón individual para la activación de cada Modo.

```
// CAMBIO DE MODO BLANCO O MODO COLOR
```

```
if (digitalRead(IC) == HIGH)
{
  modoW = LOW;
  modoC = HIGH;
}

if (digitalRead(IW) == HIGH)
{
  modoW = HIGH;
  modoC = LOW;
}

digitalWrite(Wled, modoW);
digitalWrite(Cled, modoC);
```

Control en modo Color. Si en el dispositivo esta encendido y se ha seleccionado el modo de luz a color, este es el módulo responsable de leer cada uno de los tres potenciómetros asignados a cada color de luz y enviar los valores correspondientes al

módulo receptor por Radio Frecuencia a través del módulo XBee. Antes de continuar la explicación del código, a continuación explicaremos el método utilizado para la transmisión de la información.

Método de transmisión

Diciéndolo de forma simple, el módulo XBee transforma en transmisión inalámbrica lo que se imprime por el puerto serie del Arduino, dicho esto, en nuestro diseño codificamos la información del color a controlar y la intensidad de lugar en un solo byte para minimizar las transmisiones. Para esto utilizamos una variable tipo char, el cual ocupa un byte de memoria con signo, dado que uno de los 8bits está reservado para el signo, utilizamos los restantes 7 bits para codificar la información a enviar, los 2 mas significativo para el color y los 5 menos significativos para el valor de la intensidad. la codificación de color es como sigue:

Valor	Color
00	No utilizado
01	Rojo
10	Verde
11	Azul

Ejemplo: si se envía por el puerto serie el caracter "T", este equivale en binario a "1010100", según se explico los dos bits mas significativos(10) representan el color, que según la tabla anterior corresponde al color verde, y los cinco bits menos significativos (10100) representan la intensidad, esto corresponde a 20 en decimal. Es decir, al enviar el valor "T", se le esta indicando a la matriz de LEDs Verde que ponga su intensidad en 20 en una escala de 0 a 31.

El proceso utilizado en este bloque es similar para cada uno de los tres colores así que lo explicaremos en común: se lee el valor conectado al potenciómetro correspondiente y se asigna a la variable "val". La función "analogRead" devuelve un numero entero entre 0 y 1023 según el valor leído entre 0V y el valor de referencia (5V en este caso), como en el diseño se determino que el voltaje que llega al pin de lectura habrá de variar entre 2.5 y 5V, se restringe los valores entre 512 y 1024 previendo alguna fluctuación en la lectura. Luego este valor se mapea dentro de los 5 bits que utilizamos para establecer el nivel de intensidad, esto es de 0 a 31. A continuación se compara el valor leído con el valor registrado en la lectura anterior, si estos dos valores son similares pues no se efectúa la transmisión, pero si se registra un cambio en el valor leído, se codifica el color y el valor de la intensidad en la variable "imprime" y se envía por el puerto serie con el comando Serial.print.

```
// CONTROL EN MODO COLOR

if (On == true && modoC == HIGH)
{
// Color Rojo

    val = analogRead(IR);
    val = constrain(val, 512, 1024);
    ledLevel = map(val, 512, 1024, 0, 31);

    if (ledLevel != ledLevelR) {
        imprime = char(32 | ledLevel);
        Serial.print(imprime);
        ledLevelR = ledLevel;
    }

// Color Verde
    val = analogRead(IG);
    val = constrain(val, 512, 1024);
    ledLevel = map(val, 512, 1024, 0, 31);

    if (ledLevel != ledLevelG) {
        imprime = char(64 | ledLevel);
        Serial.print(imprime);
        ledLevelG = ledLevel;
    }

}

// Color Azul
    val = analogRead(IB);
    val = constrain(val, 512, 1024);
    ledLevel = map(val, 512, 1024, 0, 31);

    if (ledLevel != ledLevelB) {
        imprime = char(96 | ledLevel);
        Serial.print(imprime);
        ledLevelB = ledLevel;
    }
}
```

Control en modo luz blanca. Este bloque opera si en el dispositivo esta encendido y se ha seleccionado el modo de luz blanca. Funciona de forma similar al bloque anterior, con la diferencia que la intensidad de las tres matrices de LEDs son idénticas

y se gradúan con un solo potenciómetro, y al asignar igual valor de rojo, verde y azul, se obtiene la luz blanca.

```
// CONTROL EN MODO LUZ BLANCA

if (On == true && modoW == HIGH) {
  val = analogRead(IR);
  val = constrain(val, 512, 1024);
  ledLevel = map(val, 512, 1024,0,31);

  // Color Rojo
  if (ledLevel != ledLevelR) {

    imprime = char(32 | ledLevel);
    Serial.print(imprime);
    ledLevelR = ledLevel;

  }

  // Color Verde
  if (ledLevel != ledLevelG) {
    imprime = char(64 | ledLevel);
    Serial.print(imprime);
    ledLevelG = ledLevel;

  }

  // Color Azul
  if (ledLevel != ledLevelB) {
    imprime = char(96 | ledLevel);
    Serial.print(imprime);
    ledLevelB = ledLevel;

  }

}
```

Apagado. Cuando mediante el botón de encendido-apagado el dispositivo se pone en modo OFF, este bloque apaga las tres matrices de LEDs poniendo el valor de intensidad de cada matriz en cero. El funcionamiento es similar a los dos bloques anteriores.

```
// APAGAR en OFF
```

```
if (On == false) {  
  ledLevel = 0;  
  
  // Color Rojo  
  if (ledLevelR != 0) {  
    imprime = char(32 | ledLevel);  
    Serial.print(imprime);  
    ledLevelR = ledLevel;  
  }  
  
  // Color Verde  
  if (ledLevelG != 0) {  
    imprime = char(64 | ledLevel);  
    Serial.print(imprime);  
    ledLevelG = ledLevel;  
  }  
  
  // Color Azul  
  if (ledLevelB != 0) {  
    imprime = char(96 | ledLevel);  
    Serial.print(imprime);  
    ledLevelB = ledLevel;  
  }  
}
```

Modo Programación. Este bloque es responsable de la programación o memorización de escenas. Está dividido en dos sub-bloques, en el primero se activa el modo programación por medio del pulsado por dos segundos aproximadamente del botón de programación, y el segundo almacena en memoria las intensidades de ese instantes en una de las tres escenas disponibles.

Para la activación del modo programación se lee el estado del botón programación (bp), si se detecta como pulsado, se inicia un bucle que se mantendrá mientras dicho botón este presionado. Utilizando la función “micros” se mide el tiempo entre el inicio del bucle y otro instante cualquiera, de esta forma activamos el modo programación mediante la variable “epb” una vez se detecte de que el botón de programación ha sido pulsado durante dos segundos.

```
// MODO PROGRAMACION  
time1 = micros();  
while (digitalRead(bp) == HIGH) {
```

```

time2 = micros()-2000000;
if (time2 > time1 ) {
  ebp = HIGH;
  digitalWrite(lp, HIGH);
}
}

```

En el segundo sub-bloque del modo programación, se activa cuando se detecta en HIGH la variable del modo programación (ebp), dando inicio a un bucle que durara tres segundos, y si dentro de la duración de estos 3 segundos se presiona cualquiera de los 3 botones de escena, se procede a almacenar en la EEPROM del microprocesador los valores que en ese momento tienen las tres matrices de LEDs, almacenadas en las variables ledLevelR, ledLevelG y ledlevelB. Cada una de las 3 escenas dispone de 3 espacios de memoria para cada uno de los 3 colores. Luego de que se almacenan los valores de la escena, el LED del modo programación parpadea dos veces y se apaga. El bucle termina o al pasar los 3 segundos previstos o al presionar el botón de escena deseado.

```

if (ebp == HIGH){

time1 = micros();
do {
  if (digitalRead(e1)== HIGH){
    EEPROM.write(0, ledLevelR);
    EEPROM.write(1, ledLevelG);
    EEPROM.write(2, ledLevelB);
    digitalWrite(lp, LOW);
    delay(500);
    digitalWrite(lp, HIGH);
    delay(300);
    digitalWrite(lp, LOW);
    break;
  }

  if (digitalRead(e2)== HIGH){
    EEPROM.write(3, ledLevelR);
    EEPROM.write(4, ledLevelG);
    EEPROM.write(5, ledLevelB);
    digitalWrite(lp, LOW);
    delay(500);
    digitalWrite(lp, HIGH);
    delay(300);
    digitalWrite(lp, LOW);
    break;
  }

  if (digitalRead(e3)== HIGH){

```

```

    EEPROM.write(6, ledLevelR);
    EEPROM.write(7, ledLevelG);
    EEPROM.write(8, ledLevelB);
    digitalWrite(lp, LOW);
    delay(500);
    digitalWrite(lp, HIGH);
    delay(300);
    digitalWrite(lp, LOW);
    break;
}

time2 = micros()-3000000;
} while (time2 < time1);
ebp = LOW;
digitalWrite(lp, LOW);
}

```

Modo Escena. En esta sección se controla la llamada de las escenas grabadas en memoria por medio del accionar de uno de los tres botones de escenas del tablero de control. Para lograr esto, el código detecta la pulsación del botón de escena en cuestión a la vez que se verifica que el modo “On” este activado, luego de verificado dichos estados, se procede a leer en la memoria EEPROM del microprocesador el valor requerido y se procede a enviar la información al módulo receptor de la misma forma explicada en el bloque de “Control en modo color”.

```

// MODO ESCENA

b = 1;
while (digitalRead(e1) == HIGH){
  if (b == 1 && On == true ){

    // color rojo
    ledLevel = EEPROM.read(0);
    if (ledLevel < (ledLevelR-1) || ledLevel > (ledLevelR+1)) {
      imprime = char(32 | ledLevel);
      Serial.print(imprime);
      ledLevelR = ledLevel;
    }

    // Color Verde
    ledLevel = EEPROM.read(1);
    if (ledLevel < (ledLevelG-1) || ledLevel > (ledLevelG+1)) {

```

```
    imprime = char(64 | ledLevel);
    Serial.print(imprime);
    ledLevelG = ledLevel;
}

// Color Azul
    ledLevel = EEPROM.read(2);

    if (ledLevel < (ledLevelB-1) || ledLevel > (ledLevelB+1)) {
        imprime = char(96 | ledLevel);
        Serial.print(imprime);
        ledLevelB = ledLevel;
    }
    b++;
}
}

b = 1;
while (digitalRead(e2) == HIGH){
    if (b == 1 && On == true ){

        // color rojo
        ledLevel = EEPROM.read(3);
        if (ledLevel < (ledLevelR-1) || ledLevel > (ledLevelR+1)) {
            imprime = char(32 | ledLevel);
            Serial.print(imprime);
            ledLevelR = ledLevel;
        }

        // Color Verde
        ledLevel = EEPROM.read(4);
        if (ledLevel < (ledLevelG-1) || ledLevel > (ledLevelG+1)) {
            imprime = char(64 | ledLevel);
            Serial.print(imprime);
            ledLevelG = ledLevel;
        }

        // Color Azul
        ledLevel = EEPROM.read(5);

        if (ledLevel < (ledLevelB-1) || ledLevel > (ledLevelB+1)) {
            imprime = char(96 | ledLevel);
            Serial.print(imprime);
            ledLevelB = ledLevel;
        }
    }
}
```

```
    b++;
  }
}

b = 1;
while (digitalRead(e3) == HIGH){
  if (b == 1 && On == true ){

    // color rojo
    ledLevel = EEPROM.read(6);
    if (ledLevel < (ledLevelR-1) || ledLevel > (ledLevelR+1)) {
      imprime = char(32 | ledLevel);
      Serial.print(imprime);
      ledLevelR = ledLevel;
    }

    // Color Verde
    ledLevel = EEPROM.read(7);
    if (ledLevel < (ledLevelG-1) || ledLevel > (ledLevelG+1)) {
      imprime = char(64 | ledLevel);
      Serial.print(imprime);
      ledLevelG = ledLevel;
    }

    // Color Azul
    ledLevel = EEPROM.read(8);

    if (ledLevel < (ledLevelB-1) || ledLevel > (ledLevelB+1)) {
      imprime = char(96 | ledLevel);
      Serial.print(imprime);
      ledLevelB = ledLevel;
    }
    b++;
  }
}
}
```

6.3.2 Código del Módulo Receptor

Al igual que su circuito, el código con el que se ha programado el microcontrolador del módulo receptor es mucho más simple que la requerida en el módulo emisor. Al igual que en el módulo emisor, explicaremos el código por bloque:

Declaraciones Generales. En este declaramos todas las variables a utilizar, la definición de cada variable aparece como comentario al lado de cada una de estas.

```
int iblete = 0; // variable utilizada para leer los datos recibido.
int color; // variable en la que se almacena el color incluido en la variable iblete
int val; // variable en la que se almacena el valor de la intensidad incluido en la variable iblete

int Rled = 11; //salida modulada led Rojo
int Gled = 10; //salida modulada led verde
int Bled = 09; //salida modulada led Azul
```

Void Setup. Como dijimos antes, el setup se ejecuta una única vez después de que se conecta la placa Arduino. En este código solo es requerido para inicializar la comunicación serial.

```
void setup() {
    Serial.begin(9600);
}
```

Void lopp. Esta función se ejecuta de forma consecutiva e indefinida tal como su nombre lo dice. Esta la explicaremos por según los distintos bloques que en esta aparecen.

```
void loop() {
```

Lectura de Datos. En este bloque se leen y procesan las transmisiones recibidas por el módulo XBee. Primero por medio de la función “Serial.available” detectamos si se dispone de datos recibidos, mientras no sea este el caso el resto del código no se ejecuta, ahorrando así energía. Cuando se dispone de datos recibidos, el primer byte disponible se asigna a variable iblete (si hay mas bytes disponibles, esperan en cola tipo FIFO y se procesan en la siguiente corrida de la función loop).

A continuación se lee la información del color contenida ahora en la variable iblete y se almacena en la variable “color”, esto se logra enmascarando la variable iblete con el valor numérico 96, equivalente en binario a “1100000”, utilizando el comparador “&”, el cual ejecuta una operación “AND” a nivel de bits.

Ejemplo: si se recibe el caracter "F", que equivale al binario "100011", al exponerlo a una operación AND bit a bit con la máscara "1100000", el resultado es "1000000", es decir, pone a 0 los 5 bits menos significativos y extrae únicamente la información de los dos bits más significativos que es la que nos interesa.

A continuación se lee la información del valor de intensidad exactamente de la misma forma anteriormente explicada utilizando el decimal "31" como mascara, y se almacena en la variable "val".

```
// LECTURA
if (Serial.available()>0) {
  ibyte = Serial.read();
  color = ibyte & 96;
  val = ibyte & 31;
  val = map(val,0,31,0,255);
}
```

Escritura. Luego de obtenido la información de la intensidad deseada y el color a controlar, se procede a escribir dicha información en el pin correspondiente. Para esto se utiliza la sentencia "switch" para indicar al programa el código a ejecutar según la matriz de LEDs a controlar. Luego de esto, simplemente se setea el valor de lugar en el pin correspondiente utilizando la función "analogWrite", lo cual proporciona una salida PWM según el valor indicado.

```
// ESCRITURA
switch (color){

  case 32: // Rojo
    analogWrite(Rled, val);
    break;

  case 64: // Verde
    analogWrite(Gled, val);
    break;

  case 96: // Azul
    analogWrite(Bled, val);
    break;

}

}
```

Delay. Un pequeño delay al final del loop es recomendado para evitar que se lean dos veces el mismo dato, en esta ocasión añadimos un delay de 40 milisegundos imperceptibles en la utilización de este dispositivo.

```
delay(40);
}
```

6.4 Configuración de los Módulos XBee

Para poder transmitir los datos desde el modulo emisor al modulo receptor, hace falta configurar los módulos XBee. En la figura 45 se muestran los parámetros configurados en los módulos XBee del emisor y del receptor.

Parámetro	Descripción	Módulo 1	Módulo 2
ID	El ID de la red del módulo Xbee.	1111	1111
CH	El canal del módulo Xbee.	0B	0B
SH y SL	El número serie del módulo Xbee (SH devuelve los 32 bits superiores, SL los 32 inferiores). De solo-lectura	(indiferente)	(indiferente)
MY	La dirección de 16-bit del módulo.	1000	1001
DH	Los 32 bits superiores de la dirección destino	0	0
DL	Los 32 bits inferiores de la dirección destino	1001	1000
BD	La velocidad de transmisión usada para las comunicaciones con el Arduino o el ordenador.	3 (9600 bps)	3 (9600 bps)

Figura 52. Configuración utilizada en los módulos XBee

Según se explico en el acápite 4.6.4, si DH es igual a 0, los mensajes que envía un módulo son recibidos por otro modulo cuyo MY sea igual al DL del emisor, además de estar en el mismo canal y en la misma red. Por lo tanto los dos módulos están comunicados entre si y de forma indiferente se pueden colocar en el modulo emisor o en el modulo receptor del nuestro proyecto.

6.5 Presupuesto

La lista de componentes utilizados para montar el prototipo del dispositivo mostrado y sus respectivos precios estimados se muestran a continuación:

Componente	Cantidad			Costo (€)			
	Emisor	Receptor	Total	Unitario	Emisor	Receptor	Total
Placa Arduino UNO	1	1	2	30,4	30,4	30,4	60,8
XBEE Shield	1	1	2	16	16	16	32
Modulo XBEE S1	1	1	2	15	15	15	30
Potenciometro 10k	3		3	2,45	7,35		7,35
Resistencia 10k	3		3	0,05	0,15		0,15
resistencia 1k	7	6	13	0,05	0,35	0,3	0,65
Resistencia 300	4	3	7	0,05	0,2	0,15	0,35
pulsador	7		7	0,15	1,05		1,05
Diodo LED	4		4	0,85	3,4		3,4
Optocoplador 4N25		3	3	2,5		7,5	7,5
MOSFET IRF610		3	3	3,65		10,95	10,95
Tira LED RGB 5 metros		1	1	24,5		24,5	24,5
				TOTAL	73,9	104,8	178,7

Capítulo 7: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente proyecto nos hemos enfocado en hacer uso de la domótica para la eficientización de la gestión energética en edificaciones haciendo uso de microcontroladores y protocolos de comunicación inalámbrica para el desarrollo de una solución en este sector.

En este ámbito, hemos desarrollado un dispositivo capaz de administrar de forma inteligente e inalámbrica un sistema de iluminación LED de bajo costo, el cual cumplió de forma satisfactoria para el autor de este proyecto los objetivos planteados, sirviendo de base para las investigaciones y trabajos subsiguientes planteados a continuación.

7.1 Trabajos Futuros

Como es habitual en cualquier trabajo de investigación, la consecución de un objetivo abre a su vez múltiples nuevos retos y objetivos posibles. En este sentido, una vez alcanzado los resultados expuestos en el presente informe, quedan abiertos los siguientes planteamientos como metas futuras para la ampliación de este proyecto:

7.1.1 Placas propias

Para el diseño utilizado en el presente proyecto utilizamos Arduino, que es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador ATmega328 y un entorno de desarrollo propio basado en processing. El uso de esta plataforma brinda múltiples beneficios de facilidad y flexibilidad a la hora del diseño, sin embargo, a la hora de obtener productos finales, el hardware del Arduino limita la optimización del espacio, estética del diseño y la optimización de los costos.

Por la razón expuesta anteriormente se hace necesario el desarrollo de placas propias basadas en el microprocesador ATmega328 según los diseños finales de nuestro proyecto, permitiendo así optimizar los costos y permitir diseños flexibles según los objetivos finales del dispositivo en cuestión.

7.1.2 Integración con DALI.

El Protocolo DALI proporciona un medio de administración inteligente de iluminación que provee ahorro de energía, facilidad de instalación y mantenimiento y un control

óptimo y flexible. Es en la actualidad el protocolo de automatización / gestión electrónica / domótica más eficiente en el campo de la iluminación. En este sentido, nos proponemos la adaptación del diseño realizado en el presente proyecto para que pueda utilizar de forma bidireccional el protocolo DALI, permitiendo tanto integrarse a una red DALI existente, como el crear una red propia en un bus inalámbrico común y comandando balastos comercialmente disponibles que utilizan el protocolo DALI.

7.1.3 Integración con tecnologías domóticas.

En el ámbito de la domótica existen múltiples tecnologías establecidas en el mercado, como lo son la LonWorks y la X-10 expuestas en el presente informe, y otras tantas como KNX, batibus etc, además de protocolos propios no abiertos de casas comerciales como Ingenium. Aunque cada uno de estas tecnologías utilizan protocolos diferentes, existen gateways capaces de comunicar dos tecnologías diferentes según las necesidades de los usuarios/implementadores/desarrolladores.

Siendo el eje primario la nuestro proyecto la eficientización energética, y siendo el primer producto diseñado para este TFM un controlador inteligente de iluminación, hacen de la integración con DALI un primer objetivo futuro lógico, sin embargo, es nuestra intención ampliar el alcance del proyecto a todos los ámbitos de la domótica, para lo cual nos planteamos extender el uso de nuestros diseños a dispositivos capaces de utilizar diferentes tecnologías domóticas de forma flexible y versátil.

7.1.4 Protocolos propios

Como hemos expuesto a lo largo del presente informe, existen múltiples tecnologías utilizadas en la domótica, cada una de ellas con sus ventajas y desventajas, pero en general todas orientadas principalmente a edificaciones de cierto tamaño, haciendo de estas tecnologías soluciones costosas para hogares y edificaciones pequeñas. Además que a excepción del protocolo X-10 basado en corriente portadoras, todas las tecnologías domóticas existentes requieren la instalación de una línea de buses a lo largo del área de impacto, que aunque existen dispositivos puntuales para la comunicación inalámbrica dentro de algunas de estas tecnologías, son una excepción a la regla y no pueden ser tomadas como referencias.

En este sentido, es nuestro fin último el desarrollar un protocolo propio de tecnología domótica inalámbrica, que permita soluciones de bajo costo para la gestión inteligente de edificaciones en ámbitos de confort, seguridad, comunicaciones y optimización energética.

El bus de datos tradicional será sustituido por una red inalámbrica basada en el protocolo de alto nivel de comunicación inalámbrica ZigBee, permitiendo así facilidad en la instalación y flexibilidad en las modificaciones sin aumento considerable de los costos.

Bibliografía

- Aguirre, J., & Zapata, o. (2006). *Estado del Arte de la Domótica en Colombia*. bogota.
- Arduino. (2012). *Arduino*. Recuperado el Julio de 2012, de www.arduino.cc/en/
- Arias, S. (2004). Diseño de una Casa Inteligente basado en la Tecnología JINI.
- Boylestad, N. *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos electrónicos*. Prentice Hall.
- Daintree Networks. (2009). Introducing ZigBee RF4CE.
- DALI AG. (2001). DALI Manual. Frankfurt, Alemania.
- Díaz Hernández, P. (Septiembre de 2010). Alumbrado público basado en LED: Estudio y aplicaciones. Cartagena, Murcia, España.
- Digi International Inc. (2012). *DIGI*. Recuperado el Julio de 2012, de www.digi.com
- Digi International Inc. (2011). *Mesh Networking Embedded RF Modules for OEMs*. Recuperado el Julio de 2012, de www.digi.com
- Digi International Inc. (2012). *XBee/XBee-PRO®DigiMesh 2.4 RF Modules*. Minnetonka, MN 55343.
- Echelon. (s.f.). *Echelon*. Obtenido de www.echelon.com/technology/lonworks
- Evans, B. W. (2007). *Arduino Notebook: A Beginner's Reference*. San Francisco, California.
- Hambley, A. (2001). *Electrónica*. Madrid: Pearson Educación.
- IEEE-SA Standards Board. (12 de Mayo de 2003). IEEE 802.15.4-2006. New York, NY, United States of America.
- Jiménez Buendía, M. (2009). Desarrollo de Sistemas Domoticos Utilizando un Enfoque Dirigido por Modelos. Cartagena.
- Reyes, C. A. (2006). *Microcontroladores PIC Programacion en Basic*. Quito: AUTOMASIS.
- Soltic, S., & Chalmers, A. (2012). Differential evolution for the optimisation of multi-band white LED light sources. *Lighting Res. Technol* , 224-237.
- Verle, M. (2010). *PIC Microcontrollers* . mikroElektronika.
- ZigBee Alliance. (2012). *ZigBee Alliance*. Recuperado el Julio de 2012, de www.zigbee.org

Índice de Figuras

Figura 1.	Áreas de Aplicación de la Domótica.....	4
Figura 2.	Modelo conceptual de integración de sistemas en la Domótica.....	7
Figura 3.	Arquitectura Centralizada	8
Figura 4.	Arquitectura distribuida	9
Figura 5.	Ilustración de aplicaciones X-10.....	12
Figura 6.	Transmisión de datos en X-10.....	14
Figura 7.	Una transmisión completa en X-10	15
Figura 8.	Ejemplo de arquitectura X-10	16
Figura 9.	Arquitectura básica de un microcontrolador.....	22
Figura 10.	Esquemático del Arduino UNO.....	32
Figura 11.	Interfaz de programación Arduino	37
Figura 12.	Diagrama esquemático de la Xbee Shield	42
Figura 13.	Arquitectura de red	44
Figura 14.	Red en estrella y en punto a punto IEEE 802.15.4.....	46
Figura 15.	Árbol de clusters IEEE 802.15.4.....	47
Figura 16.	Protocolo ZigBee	51
Figura 17.	Dimensiones Físicas	56
Figura 18.	Listado descriptivo de los pines del módulo XBee.....	57
Figura 19.	Comunicación entre módulos XBee	58
Figura 20.	Patrón de transmisión de datos serial en los módulos XBee	58
Figura 21.	Tabla de parámetros de configuración del módulo XBEE serie 1	59
Figura 22.	Flujo luminoso	62
Figura 23.	Intensidad Luminosa.....	62
Figura 24.	Iluminancia	63
Figura 25.	Luminancia.....	63
Figura 26.	Distribución del espectro electromagnético	64

Figura 27.	Diagrama de colores de la CIE.....	65
Figura 28.	Campo colorimétrico ponderado (CIE 1924).....	65
Figura 29.	El ojo humano	66
Figura 30.	Distribución de las células sensibles a la luz en el ojo humano	66
Figura 31.	Distribución de los conos y los bastones por longitudes de onda	67
Figura 32.	Símbolo del diodo y su curva característica de tensión-corriente	68
Figura 33.	Formación de la región de acotamiento	69
Figura 34.	Oleg Vladimirovich Losev	71
Figura 35.	Nick Holonyak	72
Figura 36.	Shuji Nakamura	72
Figura 37.	Partes de un diodo LED.....	73
Figura 38.	Espectro combinado de las curvas espectrales de brillo de LEDs azul, amarillo-verde y rojo	76
Figura 39.	Tabla comparativa de tecnologías de iluminación	77
Figura 40.	Ejemplos de lámparas LEDs disponibles en el mercado.....	78
Figura 41.	Logo DALI	80
Figura 42.	Sistema autónomo	82
Figura 43.	Subsistema autónomo	83
Figura 44.	Puro subsistema	83
Figura 45.	Rango de voltaje	84
Figura 46.	Cableado utilizado en DALI	84
Figura 47.	Esquema general del funcionamiento del dispositivo	87
Figura 48.	Boceto de la presentación comercial del diseño.....	88
Figura 49.	Tira de diodos LEDs RGB.	89
Figura 50.	Diagrama esquemático del módulo emisor.....	90
Figura 51.	Diagrama esquemático del módulo receptor.	91
Figura 52.	Configuración utilizada en los módulos XBee.....	105