

Domótica Inalámbrica

Bajo Plataformas de Hardware Libre

A. Cabrera, (*Universidad de Palermo - Argentina*)

Abstract—En este trabajo se estudian la aplicación de plataformas de hardware libre en sistemas de domótica aplicada. Se presentan estas plataformas en el contexto actual, y se analizan arquitecturas de red de área personal usadas en domótica, y las tecnologías y estándares aplicados, a fin de servir de guía para la comprensión de las soluciones actuales. Se estudia un conjunto de casos basados en software y hardware libre, las herramientas, los estilos arquitectónicos y estándares adoptados en sus soluciones. Se analizan estas soluciones en el marco conceptual del Internet de las Cosas.

Index Terms— Open Source Hardware, Personal Area Networks, ZigBee, Wireless Mesh Network.

I. INTRODUCCIÓN

Debido a los consecuentes avances de la tecnología, conviven en la actualidad en un mismo escenario diversas tecnologías, que resuelven problemas similares con distintos enfoques estratégicos. Para conseguir una solución acorde a nuestra necesidad, se debe escoger no solo cual tecnología se implementará, sino una solución integral que sea apta, factible y aceptable. Entre las opciones, están los estándares abiertos que proponen las instituciones, o la posibilidad de desarrollar los propios cumpliendo con objetivos similares. También es posible utilizar elementos de infraestructura certificada y en contraposición trabajar con tecnología propia. Factores a tener en cuenta son primordialmente si se cuenta con la erogación para adquirir las licencias, pagar los cánones, o será inaceptable por los altos costos que esto implica. Estas, entre otras tantas, son típicas preguntas que se hacen los jefes de proyecto e implementadores antes de encarar un proyecto. Cada decisión presenta riesgos, y cada camino a tomar tiene sus ventajas y desventajas.

En esta disyuntiva entonces se agrega la posibilidad de realizarlo por nuestra cuenta (“Hágalo usted Mismo, DIY”).¹ No se trata de un esfuerzo desmesurado, en pos de evitar las tareas repetitivas, las organizaciones que están detrás de estos proyectos ponen el énfasis en la divulgación de los diseños e implementaciones.²

Desde esta filosofía, parten las plataformas de hardware

abierto, las cuales aportan nuevas herramientas e ideas para solventar problemas de ámbitos específicos, y la domótica es uno más. Por tanto, estas proponen la implementación rápida de pruebas de concepto y la realización de prototipos de infraestructura en hardware abierto, por consiguiente resultando en una solución de bajo costo, dada en un lenguaje de programación específico³, y en el caso de Arduino, en un entorno de desarrollo integrado, también proporcionado en conjunto con la plataforma. Estas fomentan el uso de la creatividad en el desarrollo de proyectos con escasos recursos, y hacen hincapié en los procesos de mejora continua: en contraposición con los diseños cerrados, los diseños abiertos serán plausibles de ser modificados y mejorados.

A continuación, en la sección II. se presentan antecedentes y ventajas de este tipo de plataformas, en la sección III. se realiza una breve introducción al mundo de la domótica, en la sección IV. se presentan las características generales de las redes en soluciones de domótica, las topologías comunes, tecnologías y protocolos conocidos, en la sección Finalmente en la sección VI. se resumen las conclusiones más importantes.

II. PLATAFORMAS DE HARDWARE LIBRE

El nombre Hardware Libre no tiene una definición exacta, algunos lo asocian al término homólogo para el software de código abierto, Software Libre, entonces daremos aquí como definición de Hardware Libre, a aquel medio electrónico físico y lógico de diseño abierto que pretenda cumplir las cuatro libertades del software libre, las cuales son: libertad de uso, de estudio y modificación, de distribución, y de mejora y divulgación de estas. Para dar soporte legal, se crearon distintas licencias de hardware libre, de las cuales podemos mencionar entre los esfuerzos más importantes a las que continúan utilizando GNU GPL y derivadas. Las plataformas de Hardware Libre promueven la independencia tecnológica, fomentan la reutilización, mejora de la tecnología y el consecuente ahorro de costos consiguiendo un hardware de alta calidad.

A. Micro Controladores: sistemas de lógica programable

El avance de los sistemas de lógica impresa hacia los sistemas de lógica programable, consiguió la reutilización de componentes de hardware gracias a la posibilidad de

¹ El “Do It Yourself”, según *Wikipedia*, es la práctica de la fabricación o reparación de cosas por uno mismo. Es una forma de autoproducción sin esperar la voluntad de otros para realizar las convicciones propias.

² *Arduino* recibió una Mención Honorífica en la sección *Digital Communities* de la edición del 2006 del *Ars Electronica Prix*, cuenta con una comunidad de más de cincuenta mil usuarios, organizada de forma regional y por temas de interés.

³ El lenguaje de programación de *Arduino* es una implementación de *Wiring*, una plataforma de computación física parecida, que a su vez se basa en el lenguaje de alto nivel *Processing*.

programación de nuevas funcionalidades en un mismo circuito y la adaptabilidad del hardware a nuevos requisitos. En 1971, la empresa *Texas Instruments* creó el primer micro controlador, combinando memoria ROM, RAM, microprocesador y reloj en un chip, fue el primero y seguido por *Intel*, la cual en 1974 desarrollo el *Intel 8048*, el cual acompañando el avance de la IBM PC logro ser vendido en más de mil millones de unidades.

En 1993 la empresa *Atmel* lanzó el primero en utilizar memoria flash. La masificación de esta tecnología trajo aparejado un notable abaratamiento de los precios de estos componentes. Los fabricantes suelen proveer entonces sus plataformas de desarrollo: una placa con un micro controlador y las herramientas de programación correspondientes.

Generalmente, el precio del producto final suele no ser asequible y en ocasiones estas herramientas traen aparejadas algunas imposiciones en sus términos de uso. Por esta razón, desde algunas comunidades de usuarios surgieron plataformas alternativas de desarrollo, entre las cuales podemos destacar el caso de *Arduino*.

B. Plataformas libres: Arduino

Arduino es una plataforma basada en micro controlador RISC AVR de la empresa *Atmel*, desarrollada en el instituto *IVREA* en Italia. Durante la crisis económica que enfrentaba tal institución, fue pensada como alternativa de bajo costo para los estudiantes, frente a otras soluciones de micro controladores de la época más caras, y teniendo en cuenta el embargo inminente del material del instituto. Es desarrollada para ser compatible con el lenguaje de programación de código libre *Processing*⁴, y cuenta con soporte multiplataforma.



Ilustración 1- Arduino Uno r3

A posteriori del surgimiento de *Arduino*, nacieron otros proyectos similares, como el caso de *Netduino*: una alternativa para trabajar en conjunto con el *.Net Micro Framework*. También existen soluciones de mayores capacidades con arquitecturas de “computadora completa en una placa”: estas cuentan con un diseño en el que en la misma placa se integran microprocesador y memoria junto a todas las características requeridas para una computadora completamente funcional⁵.

⁴ Processing es un lenguaje de programación y entorno de desarrollo integrado de código abierto basado en Java, de fácil utilización, y que sirve como medio para la enseñanza y producción de proyectos multimedia e interactivos de diseño digital.

⁵ Junto a la evolución de la computadora personal, la tendencia de fabricación dominante era una placa base con múltiples tarjetas de expansión (para agregar puertos seriales, controladores de E/S, de video y audio).

En este tipo de plataformas se enmarca la *Raspberry Pi*, plataforma de hardware libre que cuenta con capacidades gráficas extendidas. En el siguiente cuadro comparativo se detallan las características de ambos tipos de soluciones.

Tabla 1 – cuadro comparativo de especificaciones técnicas

Nombre	Arduino	Netduino	Raspberry Pi
Modelo	Uno R3	Plus 2	Model B
Tamaño	2.95”x2.10”	6.7”x5.2”	3.37”x2.125”
Procesador	ATMega 328	Cortex-M4	ARM11
Vel. De Reloj	16MHz	168MHz	700MHz
RAM	2KB	128KB	256MB
Flash	32KB	384KB	(Tarj. SD)
EEPROM	1KB		
Volt. Entrada	7-12V	7.5-9v	5v
Pot. Mínima	42mA (.3W)	45mA	700mA (3.6w)
Digital GPIO	14	22	8
Entr. Analóg.	6 10-bit	6	ND
PWM	6	6	ND
TWI/I2C	2	1	1
SPI	1	1	1
UART	1	4	1
IDE	Arduino Tool	Microsoft Visual Studio	IDLE, Scratch, Squeak/Linux
Ethernet	ND	10/100	10/100
USB Master	ND	ND	2 USB 2.0
Salida Video	ND	ND	HDMI/Comp.
Salida Audio	ND	ND	HDMI/Analóg

Al ser hardware abierto, en la actualidad se encuentran en el mercado múltiples clones Arduino compatibles con distintas características, y los números de ventas de los modelos oficiales ascienden las 50.000 unidades, muestra de la aceptación masiva que tuvo en el ámbito académico y la industria. Google ya dio el visto bueno a estas tecnologías, proporcionando el ADK para *Android* [4], un kit de desarrollo de accesorios *Arduino* compatible para la plataforma *Android*.

1) Domótica y la analogía con otros proyectos abiertos

Uno de los proyectos basados en Arduino en auge es el de las impresoras 3D RepRap. RepRap es un proyecto abierto internacional de impresoras 3d FDM. Las impresoras trabajan con un firmware llamado Marlin (de código abierto) que corre sobre un Arduino Mega.

Replikat es un emprendimiento Argentino, basado en RepRap. Nace a principios del 2012, como un proyecto de verano de dos estudiantes universitarios, para construir dos máquinas para uso personal, convirtiéndose más adelante en un emprendimiento comercial. Sus productos fueron presentados en Tecnópolis, la muestra de ciencia e innovación más importante de Argentina.

En sus oficinas de desarrollo se prepara un Scanner 3D, también basado en Arduino y OpenCV -una librería de código abierto de visión por computador-.

Pero con el auge de los dispositivos móviles parece haberse invertido esta tendencia, hacia las “computadoras completas en una placa” ó “Single Board Computer” (SBC), de tamaño reducido y bajo consumo.

Principalmente su tarea para el primer modelo fue incorporar al mercado una versión nacional de la Impresora Mendel 90 de RepRap. Y continuar introduciendo mejoras.

III. DOMÓTICA

Se define a la Domótica como un grupo de sistemas relacionados, que al trabajar en conjunto, son capaces de automatizar una vivienda.

Los ámbitos de actuación pueden ser vastos, pero en términos generales se agrupan en cinco: ahorro energético, confort, seguridad, comunicaciones y accesibilidad.

Cada ámbito merece un tratamiento particular, ya que las aplicaciones son diversas, en el ámbito de la seguridad nos encontramos con alarmas, sistemas de detección de movimiento, sistemas de detección de incendios, sistemas de video vigilancia y de control de acceso, entre otros.

Es importante analizar la complejidad por la íntima relación que pueden tener estos sistemas entre sí, y así mismo con sistemas de otros ámbitos, y no tanto por las capacidades técnicas que poseen. Se puede Considerar que la dificultad radica en la interconexión de estos en una misma red, bajo un mismo protocolo. Por lo tanto, se analizaran entonces las estrategias de interconexión de dispositivos en red.

IV. DOMÓTICA Y REDES

En la actualidad es habitual conseguir un sistema de alarmas con conexión a un sistema de telefonía, o conseguir un sistema de video vigilancia con detección de movimiento.

A pesar de esto suele implicar una gran dificultad el encontrar sistemas que puedan adaptarse a nuevos requisitos, que sean expansibles y trabajen en su conjunto con otros de distinto fabricante.

Algo tan simple como un sistema de relés conectado a un micro controlador como Arduino puede accionar sobre un sistema de iluminación de un edificio.

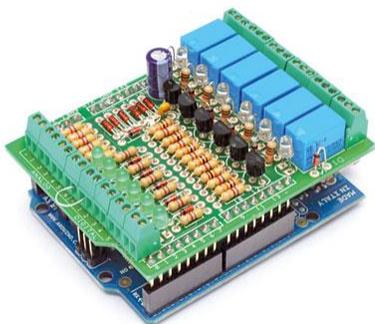


Ilustración 2 – Arduino Uno con un Shield de 6 Relés

Se Considera que la dificultad en el ámbito de la domótica radica en la comunicación e interacción de los sistemas: los llamados nodos actuadores-sensores y la unidad de control central, lo que podrá encarecer y abaratar el proyecto en cuestión, dificultar y simplificar sustancialmente la implementación.

Se trataran entonces los factores clave en una arquitectura de red para una solución integral domótica.

A. Medios de Transmisión

La primera cuestión que merece ser analizada es si se opta por una red cableada o una inalámbrica. En caso de optar por una red cableada, se deberá tener en cuenta que la dificultad de implementación de la red cableada crece exponencialmente a medida del tamaño de la solución domótica propuesta.

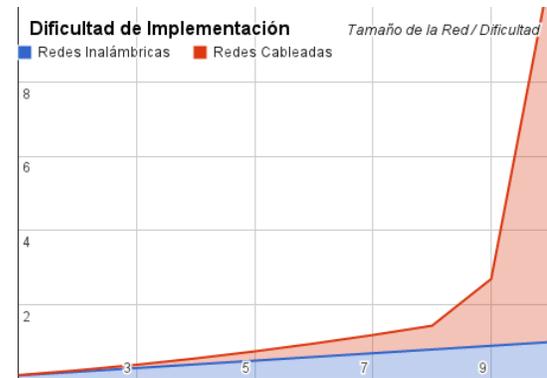


Ilustración 3 - complejidad en la implementación de las redes

Es importante notar que generalmente, según su tamaño, las soluciones tienen un umbral de factibilidad en su implementación. Detectarlo en la etapa de planeamiento y diseño es la tarea de un buen realizador.

B. Topologías de Red

1) Topología en BUS

En una solución cableada de mediana complejidad en adelante, generalmente se debe enfocar en una topología en BUS, en la cual cada nodo actuador – sensor transmite por un único canal.

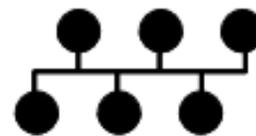


Ilustración 4 – Topología en BUS

El estándar en domótica más utilizado es el protocolo X10, que trabaja sobre la red eléctrica cableada – PLC -. X10 fue desarrollado en 1978 por Pico Electronics y es actualmente el estándar en aplicaciones de Domótica.

Siendo una red en BUS, cada vez que un dispositivo X10 envía un mensaje a través de la red eléctrica, lo reciben todos los dispositivos presentes. Cuenta con una capacidad de hasta 256 dispositivos conectados, y con un ancho de banda limitado.

Si bien es un estándar de aceptación mundial, en sus primeras versiones, las transmisiones de 120kHz del protocolo X10 no eran inmunes al ruido eléctrico, lo que presentó severas dificultades a la hora de implementarlo, nuevos dispositivos como Hornos Microondas, consolas de

videojuegos traían serias complicaciones a posteriori.

Otra aproximación posible son los sistemas inalámbricos, en los cuales cada nodo de la red inalámbrica es el encargado de actuar y/o pensar en cada uno de los sistemas descritos, a su vez, suele dedicarse un dispositivo como servidor para la gestión centralizada y brindar conectividad entre redes.

Se hará hincapié en generalizar las topologías comunes que se encuentran en las redes de sensores–actuadores inalámbricas.

2) Topología Par a Par (Punto a Punto)

La primera de estas topologías es la *Par a Par*, en la cual se prescinde de una gestión centralizada, permitiendo a cada nodo comunicarse directamente uno con otro, cada uno puede actuar como cliente o servidor, comunicándose entre sí con cada nodo de la red.



Ilustración 5 – Topología Par a Par

3) Topología en Estrella

Una alternativa esta topología son las redes en estrella, en las cuales los nodos se conectan a un nodo central, el cual difunde, conmuta o enruta el tráfico de los demás nodos, los nodos no pueden comunicarse entre sí, sino a través del nodo central. Cada nodo trabaja como cliente y el nodo central como servidor.



Ilustración 6 – Topología en estrella

4) Topología en Árbol

La topología en forma de árbol usa un nodo central llamado **nodo raíz** como enrutador principal de las comunicaciones. Un nivel abajo en la jerarquía de nodos, existen los nodos centrales, este nivel bajo conforma una red en estrella.

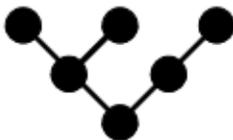


Ilustración 7 – Topología en árbol de dos niveles

La topología en árbol puede considerarse un híbrido entre las topologías en estrella y par a par.

5) Topología en Malla

Las redes en malla permiten a los datos viajar de nodo a nodo, permitiendo a la red recuperarse ante fallas, cada nodo puede comunicarse con otro y entonces los datos son enrutados nodo a nodo hasta lograr el destino deseado. Este tipo de redes es una de las más complejas y su correcta instalación puede conllevar un costo monetario significativo.



Ilustración 8 – Topología en malla

Como muestra la figura anterior, esta topología puede estar o no físicamente “completamente conectada”.

Las redes de sensores–actuadores suelen presentar topologías híbridas generalmente basadas en las presentadas con antelación.

C. WSN, Redes de sensores–actuadores

Una red inalámbrica de sensores–actuadores consiste en múltiples nodos, autónomos, distribuidos espacialmente, para monitorear condiciones del ambiente, por ejemplo temperatura, detectar presencia y movimiento, o destinados a encender un sistema de iluminación, accionar un motor levanta cortinas, o realizar cualquiera sea la tarea de automatización a la que fue encomendado. Si bien el concepto de una WSN es similar al de las redes inalámbricas de sensores, conocidas como WSN, una red de sensores–actuadores no necesariamente cuenta con las mismas exigencias de una red de sensores WSN, específicamente en cuanto a consumo energético se refiere, ya que generalmente al variar su distribución geográfica hacia un ámbito de aplicación de menor alcance, los nodos de una WSN suelen ser alimentados con baterías de larga duración [5] o no hacer uso de baterías.

Mientras los nodos sensores son dispositivos pequeños, de bajo costo, con capacidades computacionales, inalámbricas y de censo limitadas, los actuadores son generalmente dispositivos ricos en recursos, equipados con mejores capacidades de procesamiento, importantes capacidades de transmisión y capacidades de batería extendida.

Los datos se envían nodo a nodo de forma cooperativa con dirección a un destino principal (unidad de control central). Las topologías comunes de una red de sensores–actuadores suelen ser redes tipo estrella o bien redes más avanzadas, tipo malla de salto múltiple. Suelen utilizarse técnicas de salto por inundación o enrutamiento.

Las características principales en estas redes son la habilidad de continuar funcionando ante fallas de alguno de los nodos, la movilidad de los nodos sensores, las fallas en la

comunicación, la heterogeneidad de los nodos, la escalabilidad para la implementación a gran escala, y la habilidad para trabajar en condiciones ambientales no favorables, por último es importante destacar la facilidad de uso. Algunas de estas características son heredadas por las WSN en mayor o menor medida. Uno de los grandes retos en una WSN es producir nodos de tamaño reducido y a bajo costo. Al tratarse en la mayor parte de los casos de redes descentralizadas, la fiabilidad de estas redes es un factor determinante a la hora de escoger una solución de este tipo.

La capacidad de estas redes de trabajar en entornos complejos, como puede ser una fábrica con maquinarias industriales, hizo que sean de especial interés, y un ámbito de estudio frecuente en el entorno académico.

D. WPAN, Redes Inalámbricas de área personal

Texto parcialmente tomado de [3] y [13]

Si bien estas redes fueron diseñadas para el uso en la comunicación entre dispositivos cercanos al punto de acceso -lo cual no siempre se cumple en una instalación domótica-, con la popularización de tecnologías como Bluetooth y más recientemente las basadas en el estándar IEEE 802.15.4, se ha visto un interés creciente en el uso para aplicaciones de domótica. El ámbito de utilización de estas redes es el definido por el alcance de la voz humana, entre 1 a 100 metros.

Dentro de las redes WPAN podemos destacar algunas de uso frecuente y de gran aceptación como IrDA, Bluetooth y ZigBee.

1) Bluetooth – 802.15.1

Bluetooth es una especificación industrial para redes WPAN desarrollada y promovida desde 1998 por el *Bluetooth Special Interest Group* [14]. Posibilita transmisión de voz, datos y sincronización entre diferentes dispositivos mediante enlace de radiofrecuencia en la banda libre ISM en 2.4Ghz⁶, por esta razón, al ser una banda compartida, para prevenir interferencias se emplea un sistema de saltos de frecuencias⁷.

Sus objetivos son: la eliminación de cables, facilitar las comunicaciones entre dispositivos fijos y móviles, ofrecer la posibilidad de conectarse en pequeñas redes inalámbricas y realizar la sincronización de dispositivos. Como se muestra en la tabla a continuación, las emisiones deben ser en baja potencia.

Tabla 2 – Clases de redes Bluetooth

Clase	Potencia máx. permitida	Potencia máx. permitida	Alcance aprox.
-------	-------------------------	-------------------------	----------------

⁶ ISM (Industrial, Scientific and Medical) son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica. Actualmente han sido popularizadas por su uso en comunicaciones WLAN o WPAN

⁷ Además del sistema de salto de frecuencias FHSS para evitar interferencias, pueden encontrarse también técnicas como ARQ (Automatic Repeat Request) y FEC (Forward Error Correction)

Clase 1	100 mW	20 dBm	~30 metros
Clase 2	2.5 mW	4 dBm	~10-5 metros
Clase 3	1 mW	0 dBm	~1 metro

El estándar fue desarrollado para la sincronización de datos OBEX⁸, audio y voz, por lo tanto se hizo hincapié en el ancho de banda disponible y no así en el bajo consumo. En las últimas versiones (v4.0) se soportan los modos: legacy, de bajo consumo, y de alta velocidad (EDR, “Enhanced Data Rate”), basado en Wi-Fi.

El protocolo define 27 perfiles, estos son especificaciones de interfaz de comportamientos de alto nivel que engloban la mayoría de las diversas aplicaciones del protocolo.

Algunos de los más relevantes listados en la tabla a continuación, si bien el estándar no exige la implementación de todos los perfiles en una solución.

Tabla 3 – Perfiles Bluetooth más comunes

Siglas	Nombre
A2DP	Advanced Audio Distribution Profile
AVRCP	Audio / Video Transport Protocol
BPP	Basic Printing Protocol
CTP	Cordless Telephony Profile
DUN	Dial-Up Network Profile
FTP	File Transfer Profile
HFP	Hands-Free Profile
HSP	Headset Profile
HID	Human Interface Profile
ICP	Intercom Profile
PAN	Personal Area Network Profile
SYNC	Synchronization Profile
VDP	Video Distribution Profile

Podemos notar que la especificación Bluetooth no contempla un perfil específico para domótica.

El protocolo provee mecanismos de autenticación y encriptación en forma de rutinas que deben ser implementadas de igual forma en cada dispositivo.

El canal físico utilizado por Bluetooth está subdividido en unidades de tiempo llamadas ranuras (“slots”). Los datos son transmitidos entre los dispositivos mediante paquetes que son colocados en dichas ranuras. La tecnología Bluetooth proporciona el efecto de transmisión “full dúplex” mediante la implementación de un esquema de división de tiempo dúplex (TDD). El canal de radio es compartido por un grupo de dispositivos sincronizados a un reloj común y con el mismo patrón de saltos de frecuencia. Un dispositivo provee la referencia de sincronización y es conocido como “maestro”.

Todos los otros dispositivos se conocen como “esclavos”. Un grupo de dispositivos sincronizados de esta manera forman una piconet.

Bluetooth soporta topologías punto a punto y ad-hoc mediante el establecimiento de las piconets. Dentro de estas

⁸ “Object Exchange” (OBEX) es un protocolo de comunicaciones que facilita el intercambio de objetos binarios entre dispositivos. Es mantenido por la Infrared Data Association (IrDA) pero ha sido adoptada también por el Bluetooth Special Interest Group.

últimas, es muy importante la sincronización de la que se habló porque es este el mecanismo que permite que los dispositivos se mantengan en contacto y evadiendo otras piconets que podrían estar operando en el mismo sitio.

Mediante el canal de radio es posible formar un enlace físico entre cualesquiera dos dispositivos que transmitan paquetes en cualquier dirección entre ellos. En una piconet hay restricciones sobre qué dispositivos pueden formar un enlace físico. Existe enlace físico entre cada esclavo y el maestro pero no pueden formarse entre esclavos en una piconet. Además, debido a las restricciones de tiempo para comunicación entre dispositivos, se dice que un elemento maestro sólo puede comunicarse con hasta siete esclavos. Otra característica a tener en cuenta es que un dispositivo con tecnología inalámbrica Bluetooth puede participar simultáneamente en dos o más piconets mediante un esquema de multiplexación por división de tiempo, siempre respetando que un dispositivo no puede ser maestro de más de una piconet, solamente maestro de una y esclavo de varias.

En la Ilustración 9 se muestra un ejemplo de topología que ilustra varias de las características arquitecturales de la comunicación con tecnología inalámbrica Bluetooth.

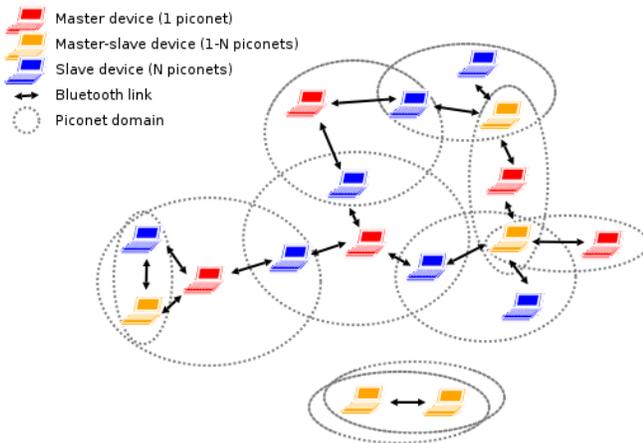


Ilustración 9 – Diagrama Topológico de una red Bluetooth

E. LR-WPAN, el estándar IEEE 802.15.4

Este estándar define el protocolo y la interconexión compatible para dispositivos de comunicación de datos, en la capa física y capa de enlace (capas 1 y 2 del modelo OSI), que usan transmisiones de radio frecuencia de corto alcance con baja tasa de transferencia de datos, bajo consumo de energía específicamente en redes inalámbricas de área personal.

Dependiendo de los requisitos de cada aplicación, una red inalámbrica según el IEEE 802.15.4 puede conformar tanto una topología en estrella o una topología punto a punto.

En la topología en estrella, la comunicación se establece entre varios dispositivos y un único controlador central llamado coordinador. Los dispositivos se usan típicamente para alguna aplicación asociada y resultan ser el punto de inicio o el punto de terminación de una comunicación en la

red. Por su parte el coordinador es el único que puede realizar la conformación de la red, gestionar los nodos, y comúnmente el enrutamiento en la capa de red (no definida por el estándar).

La topología punto a punto también tiene un coordinador, sin embargo difiere de la topología en estrella en que cualquier dispositivo puede comunicarse directamente con cualquier otro que esté en su rango de alcance. Este tipo de conexión permite implementar formaciones de red más elaboradas como la topología en malla. Es importante aclarar, que el estándar IEEE 802.15.4 no establece el área de cobertura específica que debe tener la red inalámbrica en ninguna de sus topologías, pues se sabe que las características de propagación de las señales son dinámicas e inciertas.

Pequeños cambios de posición o dirección pueden ocasionar diferencias drásticas en la intensidad de la señal y la calidad del enlace de comunicación. Estos efectos ocurren tanto si el dispositivo está en movimiento como si está estacionario ya que los objetos móviles alrededor pueden impactar las características de propagación.

En el estándar se definen también dos tipos de dispositivos que podrán participar en una red de estas características: los dispositivos de función completa (“full-function device”, FFD) y los dispositivos de función reducida (“reduced-function device”, RFD). Un FFD puede comunicarse con RFDs o con otros FFDs, mientras que un RFD sólo puede comunicarse con un FFD. Los FFD están diseñados para que puedan operar como coordinadores de la red mientras que los RFD están previstos como nodos sensores-actuadores, los cuales no necesitan enviar grandes cantidades de información por lo que pueden ser implementados con cantidad de recursos y capacidad de memoria mínimas.

F. La especificación ZigBee

Ésta especificación es desarrollada por la Alianza ZigBee, una agrupación global de compañías creando soluciones inalámbricas para utilizar en aplicaciones industriales, comerciales, del hogar y de manejo de energía. Desde su primera versión ratificada en 2004, se presenta como el único estándar global de comunicaciones inalámbricas que permite el desarrollo de productos para monitorización y control, de bajo costo y bajo consumo de energía.

El protocolo ZigBee utiliza como base el estándar 802.15.4, con estas definiciones como base, la Alianza ZigBee se enfocó en construir, por encima, básicamente tres nuevos bloques: la especificación de la capa de red, la especificación de la capa de aplicación y la especificación de servicios de seguridad.

Define una red de área doméstica que soporta bajas tasas de transferencia con seguridad y confiabilidad. Más allá del protocolo especificado, la Alianza ZigBee ha comenzado por dirigir sus intereses hacia campos muy específicos de desarrollo, delimitándolos con la publicación de perfiles estándar de aplicación. La especificación ZigBee toma todo lo definido por el IEEE 802.15.4 como base y establece los parámetros, protocolos y configuraciones por encima, creando un estándar más específico y detallado. Concretamente, se delimitan cuatro entidades más allá del IEEE 802.15.4:

- La especificación de red.
- La especificación de la capa de aplicación.
- La especificación de servicios de seguridad.

- Los perfiles para aplicaciones específicas.

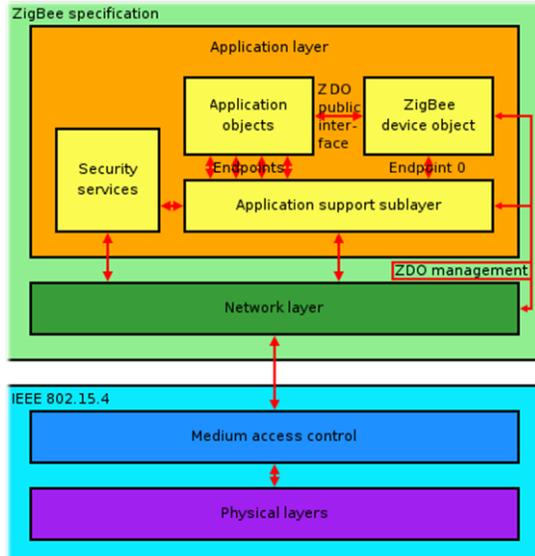


Ilustración 10 – La pila de protocolos ZigBee y 802.15.4

La capa de red de ZigBee soporta topologías en estrella, en árbol y en malla presentando adiciones a lo establecido por el IEEE 802.15.4. En todas las topologías, el coordinador ZigBee es responsable de iniciar la red y elegir algunos parámetros clave para la misma, pero en las conexiones en árbol y en malla, la red puede extenderse por el uso de enrutadores ZigBee. Para las redes en árbol, los enrutadores encaminan la información usando una estrategia jerárquica, mientras que para las redes en malla se permite la comunicación punto a punto. En la capa de aplicación ZigBee, se establecen varios parámetros y acuerdos de funcionamiento que permiten la estandarización de funciones similares.

Los servicios de seguridad proporcionados para dispositivos ZigBee se basan en el establecimiento y los mecanismos de gestión de claves conocidas solamente por los dispositivos confiables para la red. Dichos servicios forman bloques de construcción para implementar políticas de seguridad elaboradas en un dispositivo ZigBee en particular. Específicamente, los servicios definidos en la especificación ZigBee incluyen el establecimiento de claves, el transporte de claves, la protección de tramas de información y la administración de dispositivos confiables.

Finalmente, los perfiles de aplicación son acuerdos estandarizados sobre los mensajes específicos, los formatos para los mensajes y las acciones de procesamiento a realizar que permitan a los desarrolladores crear aplicaciones distribuidas con interoperabilidad entre fabricantes. De esta manera, los perfiles forman parte de la capa de aplicación permitiendo a las aplicaciones transmitir comandos, solicitar información y procesar comandos y peticiones.

G. La especificación ZigBee IP

Es una especificación superior para el protocolo IPv6: una especificación “paraguas” para un conjunto de RFCs del IETF. Es desarrollada primariamente para SEP 2.0 (Smart Energy Profile) –más adelante- para la capa de aplicación.

La especificación define la implementación obligatoria de diversos protocolos de red, incluyendo el protocolo de adaptación 6LoWPAN [6]. En la capa de red define la utilización de protocolos IPv6 [7] e ICMPv6 [8], y entre otros, el protocolo de enrutamiento RPL [7], de cifrado TLS [11], conformando una pila de protocolos como se muestra en la figura a continuación.

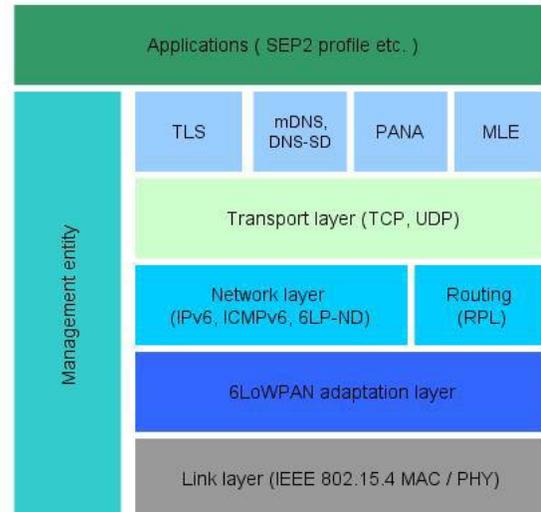


Ilustración 11 - Pila de protocolos ZigBeeIP

Adicionalmente se desarrolló un conjunto de protocolos IETF tales como MLE (Mesh Link Establishment) –para la transferencia de información de red entre pares-, PANA Relay –habilita PANA en redes multisalto-, y PANA Encryption Extensions –para el envío seguro de parámetros de configuración-.

V. INTERNET DE LAS COSAS

La evolución de los sistemas de lógica impresa hacia los de lógica programable, los avances en el sistema de código de barras hacia el RFID⁹, y así mismo el avance del protocolo IP hacia la versión 6 –con la apertura de los nuevos espacios de direcciones- brindaron el sustento técnico para el concepto de la Internet de las Cosas¹⁰, en el cual los objetos cotidianos que rodean a las personas son conectados en red, permitiendo localizar objetos que se creían perdidos, realizar el seguimiento de productos, entre otras cosas. El micro controlador y las plataformas de hardware libre se orientan hacia un “Internet de las Cosas” siendo los últimos avances en este sentido, entre los que podemos notar destacar el caso de *Spark Core*.

A. *Spark Core: Wi-Fi para todos.*

Spark Core es una plataforma basada en Arduino, proyecto

⁹ La “Identificación por Radio Frecuencia” o “Radio Frequency Identification” (RFID) [9] es un sistema de almacenamiento y recuperación de datos de forma remota. De aceptación masiva en múltiples ámbitos, su objetivo es transmitir la identidad de un objeto mediante ondas de radio.

¹⁰ El término *Internet de las Cosas* fue propuesto por Kevin Ashton en 2009. El concepto primero se hizo popular gracias al *Auto-ID Center* en el MIT y las publicaciones de análisis de mercado relacionadas.

surgido en el sitio de financiamiento colectivo *Kickstarter.com*, su propósito fundacional es acercar las redes Wi-Fi a los objetos de la vida cotidiana.

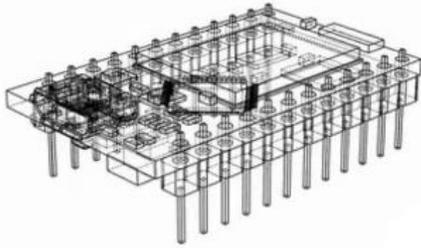


Ilustración 12 – Esquemático 3D del Spark Core

El *Spark Core* cuenta con reducidas dimensiones (2cm de ancho por 3.3cm de alto) un micro controlador más potente que el de Arduino, ya que debe ser capaz de –entre otras cosas- cifrar tráfico HTTP, pero fue desarrollado de tal forma que el código Arduino pueda ejecutarse sin problemas en este.

Sus pines son compatibles con una placa de prototipado estándar, y en sus especificaciones técnicas cuenta con un micro controlador STM32F103 de 32 Bits, arquitectura ARM Cortex M3 en 72Mhz, 128KB de memoria Flash y 20KB de memoria RAM, un chip Wi-Fi Simple Link CC3000 de Texas Instruments, 2MB de memoria flash externa, alimentación de 3.3V en DC, 50mA de consumo de corriente típico, 300mA en los picos de consumo –durante la transmisión-, 8 líneas de E/S digitales, 4 líneas de PWM, 8 líneas de E/S analógicas, puerto de comunicaciones serie (UART), SPI y de periféricos I2C.

Las capacidades de comunicación vía Wi-Fi son entre los 30 y 100 metros, se cuenta con un modelo de antena en el chip o conector para antena externa u-FL.

Spark Core cuenta con un servicio en la nube para el paso seguro de mensajes proporcionando a tal fin una interfaz de programación REST en el dispositivo.

El proyecto prevé en su lanzamiento liberar el código, para ejecutar y alojar el servicio de computación en la nube en el ámbito privado.

B. Arquitecturas REST y computación en la nube

La Transferencia de Estado Representacional (REST), propuesta por Fielding [1], es una técnica de arquitectura de software para sistemas distribuidos como la World Wide Web. Aplica para la uniformidad de interfaces, datos auto descriptivos, comunicación sin estado, cache de componentes, y restricciones de código bajo demanda en una arquitectura inicial cliente-servidor, resultando en un estilo arquitectónico adecuado para aplicaciones en redes distribuidas que hagan énfasis en la escalabilidad, generalidad de interfaces, desarrollo independiente/auto-organizado de componentes y componentes intermediarios.

1) ZigBee Smart Energy Profile

Smart Energy Profile (SEP) es el protocolo para la capa de aplicación desarrollado por la ZigBee Alliance. Fue diseñado implementando una arquitectura REST. Construido a través comandos centrales como GET, HEAD, PUT, POST y

DELETE (propias de una arquitectura REST), con la adición de mecanismos de suscripción livianos. Todo protocolo de aplicación que implemente este conjunto de comandos REST puede ser usado con SEP 2, siendo HTTP un requisito de línea base para interoperar con implementaciones SEP 2.

HTTP utiliza TCP como su mecanismo de transporte, como resultado, TCP maneja la sesión proveyendo aseguramiento en la entrega y escalamiento por ventanas. Los servidores y clientes Smart Energy Profile 2.0 deben cumplimentar con el RFC 2616 [13].

SEP utiliza códigos de respuesta HTTP tal como es habitual en las plataformas RESTful. Estos códigos de respuesta intentan seguir buenas prácticas comunes a las interfaces REST, pero en la especificación se han adaptado para cumplimentar las capacidades limitadas de las plataformas embebidas.

2) Soluciones Domóticas: Spark Socket y Philips Hue

El mismo enfoque están siguiendo en la capa de aplicación nuevos productos en domótica, como el caso del proyecto antecesor al *Spark Core*: *Spark Socket*, un “portalámparas inteligente” para una lámpara de luz estándar.

Su capa de aplicación, de software libre, fue diseñada utilizando los principios arquitectónicos de REST, esta solución integra también un sistema de control en la nube.

El hardware, típicamente un micro controlador (en el caso de *Spark*, un *Arduino* con Wi-Fi integrado) junto a un circuito de alta potencia con un regulador de intensidad Triac¹¹.



Ilustración 13 - Spark Socket

De manera similar lo hacen los productos *Philips Hue* [12], basado en el estándar ZigBee, cuenta con una arquitectura REST bien documentada y disponible para la integración en otros sistemas. Mención aparte merece *FLIX*, -proyecto el cual fue financiado también en la plataforma de *KickStarter.com*, consiguiendo superar ampliamente sus metas de financiamiento. Basado en una red en malla, es conectada a Wi-Fi a través de una lámpara “maestra”, su lanzamiento está planificado para 2014 y su software todavía no está disponible al público. A diferencia del *Spark Socket*, tanto *FLIX* como *Philips Hue* integran la lámpara en la solución domótica.

¹¹ Según [2] un TRIAC o Trífodo para Corriente Alterna es un dispositivo semiconductor, de la familia de los tiristores. La diferencia con un tiristor convencional es que éste es unidireccional y el TRIAC es bidireccional. De forma coloquial podría decirse que el TRIAC es un interruptor capaz de conmutar la corriente alterna.

VI. CONCLUSIONES

La creciente utilización del protocolo IP en el ámbito de la domótica, junto a la instalación a gran escala de redes hogareñas inalámbricas tanto Bluetooth como Wi-Fi, trajeron aparejadas nuevas soluciones de domótica en redes cuales desde la arquitectura no fueron orientadas a tal fin. Estas redes no fueron diseñadas para brindar soluciones de seguridad a nivel industrial, o en grandes instalaciones, de bajo consumo energético. A pesar de esto, serán factibles de ser instaladas en estas redes domóticas hogareñas, cumpliendo con términos de escalabilidad y seguridad aceptables. Las redes ZigBee fueron pensadas para cubrir los espacios que estas redes no pueden cubrir, y tienen también un gran camino para continuar evolucionando, realizándose actualmente un importante esfuerzo innovador desde los fabricantes.

El creciente interés en las arquitecturas REST y las aplicaciones domóticas en la nube -como analizamos en la sección V. B. -, es orientado en cierta medida debido a que aporta gran escalabilidad a las soluciones domóticas, y fundamentalmente: interoperabilidad simple entre sistemas. No es intención de este trabajo promover una tecnología específica, estándar o arquitectura de red, ya que consideramos que son tópicos que deben ser tratados individualmente en cada proyecto, considerando los recursos que se dispongan y el entorno donde se llevará a cabo.

Entendemos que los proyectos abiertos y las plataformas de hardware libre favorecerán la rápida adquisición de nuevas tecnologías, nuevos actores en escena y traerán aparejado grandes cambios a largo plazo. Por último, consideramos importante notar que la capacidad de identificar, rastrear e interactuar con cada objeto que nos rodea expande potencialmente la noción de un hogar inteligente a todos los ámbitos de nuestras vidas, y es aquí donde queda un camino amplio por recorrer.

VII. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la colaboración y soporte del Lic. Claudio Zamoszczyk y el Lic. Pablo Lena para la revisión de este documento.

VIII. REFERENCIAS

- [1] R. T. Fielding, *Architectural Styles and the Designs*, Irvine: University of California, 2000.
- [2] Wikimedia, inc, «Triac,» 2013. [En línea]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Triac>.
- [3] I. d. I. P. Gonzalez, *Tesis de Grado*, Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguas Callientes, 2009.
- [4] Google, inc, «Android ADK,» 2013. [En línea]. Available: <http://developer.android.com/tools/adk/index.html>.
- [5] Georgia Tech College of Engineering, «Wireless Sensor and Actor Networks (WSAN),» 2001. [En línea]. Available: <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/actors/>. [Último acceso: 23 Octubre 2013].
- [6] Internet Engineering Task Force (IETF), «RFC6286, Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks,» Septiembre 2011. [En línea]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc6282>. [Último acceso: 23 Octubre 2013].
- [7] Internet Engineering Task Force (IETF), «RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks,» Marzo 2012. [En línea]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc6550>. [Último acceso: 23 Octubre 2013].
- [8] Network Working Group, IETF, «RFC2460, Internet Protocol, Version 6 (IPv6),» Diciembre 1998. [En línea]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc2460>. [Último acceso: 23 Octubre 2013].
- [9] Network Working Group, IETF, «RFC2616, Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.1,» Junio 1999. [En línea]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc2616>.
- [10] Network Working Group, IETF, «RFC4443, Internet Control Message Protocol (ICMPv6),» Marzo 2006. [En línea]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc4443>. [Último acceso: 23 Octubre 2013].
- [11] Network Working Group, IETF, «RFC5246, The Transport Layer Security (TLS) Protocol, Version 1.2,» Agosto 2008. [En línea]. Available: <http://tools.ietf.org/html/rfc5246>. [Último acceso: 23 Octubre 2013].
- [12] Philips, Inc, «Philips Hue API, Developer Center,» Philips, 2012. [En línea]. Available: <http://developers.meethue.com/>. [Último acceso: 23 Octubre 2013].
- [13] ZigBee Alliance, «ZigBee Specification,» 2001. [En línea]. Available: <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/download.aspx>. [Último acceso: 23 Octubre 2013].
- [14] Bluetooth SIG, «Bluetooth Core Specification,» 1998. [En línea]. Available: <https://developer.bluetooth.org/TechnologyOverview/Pages/v4.aspx>. [Último acceso: 23 Octubre 2013].

IX. BIOGRAFIA



Andrés Cabrera Argentino. Estudiante de último año en la carrera Licenciatura en Informática en Universidad de Palermo. Apasionado por la computación y el desarrollo de software. Se desempeñó en varias empresas como desarrollador de Software. También adquirió experiencia como investigador en el ámbito de la inteligencia artificial en la misma casa de altos estudios.

Notas a pie e imágenes contenidas en este documento fueron tomadas de Wikipedia.org, son parte del dominio público o son propiedad de sus respectivos dueños.