

# Diseño y evaluación de un sistema domótico para seguridad en viviendas bajo el estándar IEEE 802.15.4/Zigbee

*Design and evaluation of a home automation system for security in homes under the IEEE 802.15.4/Zigbee standard*

Diana Marcela Paez P.  
Colegio Gimnasio Campestre Santa Sofia  
dianamarcelajulieta@hotmail.com

El presente artículo documenta un proyecto de investigación cuyo objetivo es el de acercar la tecnología ZigBee al alcance de las aplicaciones pertinentes, de bajo costo, altas prestaciones y al alcance del usuario medio. En particular, se busca la evaluación de viabilidad técnica en los sistemas domóticos, más específicamente los sistemas domóticos en el área de seguridad del hogar.

*Palabras clave:* Comunicación, control, domótica, red, seguridad

This paper documents a research project whose goal is to bring the ZigBee technology available to the relevant applications, low cost, high quality and accessible to the average user. In particular, the assessment of technical feasibility in home automation systems, specifically in the area of home security is sought.

*Keywords:* Communication, control, home automation, network, security

## Introducción

La domótica se refiere a una casa automática o también llamada una casa inteligente, en la cual los elementos o dispositivos están integrados mediante una red (Langhammer y Kays, 2012). Estos dispositivos están controlados para realizar acciones cuando han detectado cambio en su ambiente. Los diferentes elementos de control del sistema domótico deben intercambiar información unos con otros a través de un soporte físico, bien puede ser par trenzado, línea de potencia o red eléctrica, radiofrecuencia, infrarrojos, etc.

Existen diferentes protocolos que permiten el envío de información entre los dispositivos que se desean comunicar

en la red domótica. Uno de ellos es el estándar IEEE 1394. Este es un estándar multiplataforma y bidireccional, es decir, funciona para entrada y salida de datos en serie a gran velocidad. Se utiliza para la interconexión de dispositivos digitales, cámaras, videocámara al computador entre otros. Posee un ancho de banda de 400 Mbps. También existe el estándar IEEE. 802.15.1 Bluetooth, este es un estándar global de comunicación inalámbrica que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radio frecuencia. Los principales objetivos de esta norma es facilitar las comunicaciones entre equipos móviles y fijos; elimina cables conectores entre los dispositivos para lograr una mejor adaptabilidad. Adicional a ello, permite crear pequeñas redes inalámbricas entre computadores.

En cuanto a antecedentes relevantes a esta investigación se puede mencionar el estudio que realizaron Ferreas y López (Ferreas y López, 2005). Allí se muestra el estado de la domótica en diferentes países, como España y Estados Unidos, que son los lugares donde ha tenido mayor aceptación. Este documento entrega un detallado estudio de las tecnologías para el control y automatización aplicables en este campo, como; como X-10, CEBUS, EIBus, EHS, BatiBUS, SCP, BACnet, HAVi, Jini, UpnP, HAPI, mostrando las ventajas y desventajas de cada una.

---

Fecha recepción del manuscrito: Agosto 29, 2014

Fecha aceptación del manuscrito: Septiembre 22, 2014

Diana Marcela Paez P., Colegio Gimnasio Campestre Santa Sofia

Esta investigación fue financiada por: Universidad Pedagógica Nacional.

Correspondencia en relación con el artículo debe ser enviada a: Diana Marcela Paez P. Email: dianamarcelajulieta@hotmail.com

La información detallada de los estándares aplicables a un sistema domótico es muy escasa, en trabajo de Sarmiento (Sarmiento, 2009) se detalla el estado del arte del estándar IEEE 802.15.4/Zigbee aplicado a la domótica en Colombia. Se encuentra como aporte la eficiencia y pertinencia del estándar, ya que identifica los competidores de Zigbee en el mercado y realiza una comparación con otros protocolos inalámbricos, en donde se observa que el estándar inalámbrico ZigBee se caracteriza por su baja complejidad y reducidos recursos de operación haciéndolo pertinente para efectos de domótica.

El aporte que da la investigación desarrollada por Henao (Henao, 2006) es pertinente para desarrollar proyectos de aplicación de la domótica, ya que realiza un estudio y análisis minucioso de la información existente sobre domótica, obtenida desde Internet hasta empresas fabricantes. En este documento se realiza un compendio sobre el hardware y el software domótico donde ilustra en forma completa el funcionamiento de los sistemas actuales, lo que permite ser una herramienta de apoyo para la implementación de aplicaciones domóticas. Este trabajo es una fuente de información integral, sirve para el desarrollo de sistemas completos de aplicaciones domóticas y del control para automatizar procesos, entrega información acertada acerca de los componentes de las instalaciones domóticas, como sensores acondicionadores de señal, transmisores, actuadores, unidades de control y software de control existentes, entrega una comparación de los estándares y protocolos domóticos, mostrando ventajas y desventajas.

En cuanto a un sistema domótico, Quiroga (Quiroga, 2009) diseña un proyecto domótico de bajo costo, rápida implementación y fácil crecimiento teniendo en cuenta características económicas, operativas y estructurales. Este trabajo esta orientado a garantizarle al usuario seguridad, ahorro en el consumo de recursos no renovables y acceso remoto a su hogar. En él se diseñó la red bajo el protocolo Z-wave inalámbrico, que trabaja por ondas de radio y es destinado para la comunicación entre los dispositivos eléctricos de su red. Se encuentran aportes orientados al procesamiento y tratamiento de la información que los sensores obtienen.

En Selas, Sánchez y Muñoz (Selas, Sanchez, y Muñoz, 2005) se muestra que una de las principales cualidades que tendrán las casas inteligentes será la de interactuar con el entorno. De esta forma se podrán auto programar riegos según lo que haya llovido, ajustar la temperatura de la casa conforme a la temperatura exterior, etc. Dejan saber la importancia de una base de datos específica, para poder deducir nuevo conocimiento partiendo del ya experimentado.

En Bautista (Valerio, 2005) se profundiza en aspectos concretos de la distribución y servicios que debe tener una casa domotizada, dando a conocer en detalle las ventajas y desventajas que pueden aportar las diferentes

automatizaciones del hogar. Este documento detalla las generalidades que debe tener los dispositivos necesarios para lo domotización. Indica claramente el equipamiento domótico que se debe tener en cuenta para el diseño de este sistema, indica las posibilidades de la red, esclareciendo los diferentes medios de comunicación que pueden utilizarse, adicional a ello, establece las ventajas de implementar el sistema domótico en una casa existente o una que se ha diseñado con antelación para los efectos de la domotización.

En (Paz, Alarcon, y Laverde, 2006) se pretende aprovechar el tendido de distribución eléctrica para crear una red domótica que ofrezca facilidades de acceso, ahorro de energía, y calidad de servicio. Este proceso esta basado en la transmisión de datos por el tendido eléctrico como canal de transmisión. Lo mas importante de este documento es la claridad que se realiza en cuanto a la transmisión de datos por este canal, debido a sus características, este articulo ofrece una clara conclusión, distinguir los dispositivos esclavos y controladores dentro de la red. Este documento enfatiza en los aspectos de control de errores de la línea de transmisión, así como el direccionamiento de los datos.

Finalmente, en (Gordillo y Trujillo, 2009) se esclarecen los inconvenientes que tiene el sistema en el caso en el que existan muchos obstáculos o la distancia de transmisión sea muy larga, dado los resultados, este proyecto analiza la utilización de ZigBee en sistemas de vigilancia y en la forma de integrarse con redes de mayor velocidad como Ethernet. Como consecuencia de este análisis se proponen dos alternativas en el diseño de esta, una parte hardware y otra de software que permite el trabajo simultaneo con ZigBee e IP, muy acertado para el desarrollo de este proyecto.

Para el diseño propuesto aquí de red domótica se opta por el uso los módulos de transmisión inalámbrica Xbee, que trabajan bajo el estándar IEEE 802.15.4, para el envío de información entre los dispositivos controladores, teniendo en cuenta que la implementación del sistema domótico tenga la mejor adaptación a la aplicación, que es el área de seguridad del hogar. La evaluación de desempeño de dicho esquema será valorada sobre un prototipo a escala de laboratorio. En el se demuestra la eficacia de las estructuras de control propuestas. Los resultados alcanzados son comparados con soluciones convencionales y otras optimizadas y reportadas en investigaciones recientes.

## Metodología

### Requerimientos en aplicaciones de seguridad

Todos los sistemas domóticos necesitan dos partes fundamentales para su correcto funcionamiento, el hardware y el software. En cuanto al hardware, las aplicaciones de seguridad, tienen como requerimientos, alarmas y sistemas de seguridad, estos tienen como fin proteger los inmuebles, los bienes y a sus ocupantes, en estos sistemas

se incluyen alarmas de intrusión, encargados de detectar movimiento, presencia y presión, alarmas técnicas, que tienen como función verificar la presencia de incendios, humo, inundaciones, gas, fallo de suministro eléctrico o fallo de la línea telefónica, finalmente alarmas personales y video vigilancia permanente en la vivienda. Los sistemas domóticos también posee detectores, este tipo de sensores monitorean el entorno y detectan cambios o anomalías (movimiento, presencia, presión, apertura de puertas y ventanas, presencia de agua, gas, humo, fuego, etc.) que transmite al sistema central.

En cuanto al software, los sistemas domóticos requieren programas que permiten la toma de decisiones, normalmente los sistemas domóticos tienen un controlador, el cual controla todo el sistema según su programación y de acuerdo a la señal que recibe, genera comunicación al exterior, determinando acciones sobre el resto del hardware.

Todo sistema domótico tiene un medio de transmisión, este es la infraestructura que transporta la información entre los distintos dispositivos del sistema de seguridad por un cableado propio, por la redes de otros sistemas (red eléctrica, red telefónica, red de datos) o de forma inalámbrica.

Debe existir una interface, la cual se refiere a los dispositivos y sus distintos formatos en los que se muestra la información del sistema para los usuarios (o para otros sistemas) y a través de los cuales se puede interactuar con el sistema (botones, teclados, voz, web, móvil, etc.).

### Características de los medios de transmisión existentes

En el envío de datos de los dispositivos de los sistemas domóticos, se pueden utilizar dos tecnologías si las diferenciamos por el medio físico por el cual transmitimos las señales, bien pueden ser cableadas o inalámbricas, la primera utiliza un medio físico (cable) entre los dispositivos, la segunda no necesita cable para transmitir la señal entre los dispositivos.

**Tecnologías cableadas.** Dentro de las tecnologías cableadas para transmitir la señal, según el cable que se utilice, se puede hablar de dos tipos; cable dedicado, el cual implica realizar una acometida de cable nueva, y la segunda es la de cable compartido, la cual aprovecha el cable que hay distribuido por la vivienda. A continuación se presentan características de las posibles soluciones dentro de las tecnologías cableadas.

- IEEE 1394 cable dedicado

Es un estándar multiplataforma, es bidireccional es decir funciona para entrada y salida de datos en serie a gran velocidad. Se utiliza para la interconexión de dispositivos digitales, cámaras, videocámara al computador. Este posee una velocidad apropiada para este tipo de aplicaciones. Posee un ancho de banda de 400 Mbps.

- USB cable dedicado

Universal Serial Bus (bus universal en serie), este estándar incluye la transmisión de energía eléctrica al dispositivo conectado. El cable USB soporta cuatro velocidades de transferencia de datos; Baja Velocidad (1.0), Velocidad Completa (1.1), Alta Velocidad (2.0), Súper Velocidad (3.0).

#### Ventajas

- Montaje y configuración sencillo
- Ideal para la conexión de todo tipo de dispositivos a un PC o similar.
- Tecnología asequible en cuanto a precio.

#### Desventajas

- Necesita un host que controle la conexión.
- Distancia de transmisión entre dispositivos limitadas.
  - ETHERNET cable dedicado

Ethernet define las características de cableado y señalización de nivel físico y los formatos de trama del nivel de enlace de datos modelo OSI. Ethernet se refiere a las redes de área local y dispositivos bajo el estándar IEEE 802.3 que define el protocolo CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection - Acceso múltiple con escucha de portadora y Detección de Colisiones).

#### Ventajas

- Tecnología de red doméstica más rápida
- Sumamente segura
- Fácil de mantener después de la instalación

#### Desventajas

- La instalación de cableado red y dispositivos de red puede resultar costosa

**Tecnologías inalámbricas.** Dentro de las tecnologías inalámbricas se presentan tres categorías organizadas por la distancia que abarcan, la primera y que es objeto de estudio principalmente de este proyecto son las WPAN (wireless personal área network), la segunda son las WLAN (wireless local área network ) y la tercera WMAN (*wireless metropolitan área network*), a continuación se describe cada una de estas tecnologías sus características ventajas y desventajas.

#### 1. WPAN

Las redes inalámbricas de área personal por sus siglas en ingles, wireless personal área, cubren distancias del orden de 10 metros a la redonda, este tipo de conexiones no requiere altos índices de transmisión de datos y generalmente tienen un bajo consumo de potencia, para satisfacer las diferentes necesidades de comunicación dentro de un área personal. La IEEE divide grupos de trabajos encargados del desarrollo de los estándares, en estos grupos se encuentran IEEE. 802.15.1 Bluetooth, IEEE 802.15.3 Wimedia Alliance, IEEE. 802.15.4 ZigBee, y otras tecnologías propietarias como Z-WAVE.

- IEEE. 802.15.1 Bluetooth

Este es un estándar global de comunicación inalámbrica, que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radio frecuencia. Los principales objetivos que pretende conseguir esta norma es

facilitar las comunicaciones entre equipos móviles y fijos, éste elimina cables conectores entre los dispositivos para lograr una mejor adaptabilidad, adicional a ello permite crear pequeñas redes inalámbricas entre computadores.

#### **Ventajas**

- No se utiliza cables para la transmisión de datos.
- Protocolo estandarizado.
- Intercambio de voz y de datos.

#### **Desventajas**

- La velocidad de transmisión es muy lenta para transferencia de archivos muy pesados.
- Limitado radio de acción.
- Alto consumo de energía de la batería cuando se encuentra en el modo visible.
- IEEE 802.15.3 Wimedia Alliance

UWB por sus siglas en ingles *ultra-wide-band*, este usa un ancho muy alto de banda del espectro de RF para transmitir información, esta tecnología de radio utiliza un ancho de banda mayor de 500 MHz . Por lo tanto, UWB es capaz de transmitir más información en menos tiempo que las tecnologías anteriormente citadas. UWB puede usar frecuencias que van desde 3.1 GHz hasta 10.6 GHz: una banda de más de 7 GHz de anchura. Cada canal de radio tiene una anchura de más de 500 Mhz, dependiendo de su frecuencia central.

#### **Ventajas**

- Mientras que Bluetooth, WiFi, teléfonos inalámbricos y demás dispositivos de radiofrecuencia están limitadas a frecuencias sin licencia en los 900 MHz, 2.4 GHz y 5.1 GHz, UWB hace uso de un espectro de frecuencia recientemente legalizado.
- Wimedia esta diseñado para soportar una variedad de aplicaciones utilizando diferentes protocolos inalámbricos incluyendo, Wireless USB (480 Mbps), Bluetooth technology Wireless 1394a (400 Mbps), Adaptation Layer (PAL), Wireless IP.
- IEEE. 802.15.4 Zigbee

ZigBee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de comunicación de alto nivel para su utilización con radios digitales de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (wireless personal area network, WPAN). 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. Como lo es la domótica la cual utiliza un bajo consumo y el sistema es de comunicaciones es radio frecuencia .

#### **Ventajas**

- Ideal para conexiones punto a punto y punto a multipunto.
- Diseñado para el direccionamiento de información y el refrescamiento de la red.
- Opera en la banda libre de ISM 2.4 Ghz para conexiones inalámbricas.

- Óptimo para redes de baja tasa de transferencia de datos.
- Alojamiento de 16 bits a 64 bits de dirección extendida.
- Reduce tiempos de espera en el envío y recepción de paquetes.
- Bajo ciclo de trabajo - Proporciona larga duración de la batería.
- Soporte para múltiples topologías de red: Estática, dinámica, estrella y malla.
- Hasta 65.000 nodos en una red.
- 128-bit AES de cifrado.
- Provee conexiones seguras entre dispositivos:

#### **Desventajas**

- La tasa de transferencia es muy baja.
- Solo manipula transmisión de datos cortos comparados con otras tecnologías.
- Zigbee trabaja de manera que no puede ser compatible con bluetooth en todos sus aspectos porque no llegan a tener las mismas tasas de transferencia, ni la misma capacidad de soporte para nodos.
- Tiene menor cobertura porque pertenece a redes inalámbricas de tipo WPAN.
- Z-WAVE

Z-Wave es un protocolo inalámbrico por ondas de radio destinado para la comunicación entre dispositivos domésticos eléctricos. Sirve para crear una red única con los equipos eléctricos como; termostatos, alarmas, ordenadores, teléfonos, aire acondicionado y el manejo de las ventanas eléctricas y persianas. A la red se pueden conectar todos los dispositivos eléctricos que tengan el módulo del sistema Z-Wave.

#### **2. WLAN**

Son redes de área local inalámbrica, estas tiene una cobertura de 100 metros al aire libre, para que los dispositivos de esta red se puedan comunicar existen una serie de protocolos 802.11.x o WI-FI, que definen las características de una red de área local inalámbrica, estos permiten tener redes de alta velocidad de 11 mbps a 600 mbps. La información es enviada por RF, que dependiendo del estándar opera en la banda de los 2.4 ó 5 Ghz. Wi-Fi se creó para ser utilizada en redes locales inalámbricas, pero es frecuente que en la actualidad también se utilice para acceder a Internet.

#### **Alternativas de solución propuestas**

La solución propuesta para la implementación del sistema domótico, se desarrolla con los módulos Xbee con protocolo de comunicación 802.15.4 fabricados por Maxstream, los módulos XBee son módulos de radio frecuencia que trabajan en la banda de 2.4 GHz. La siguiente Fig. 1 se muestra los módulos existentes.

**Circuito básico para el Xbee.** En la Fig. 2, se muestran las conexiones mínimas que necesita el módulo Xbee para poder ser utilizado. Posteriormente, se configura según el modo de operación dependiendo la aplicación.

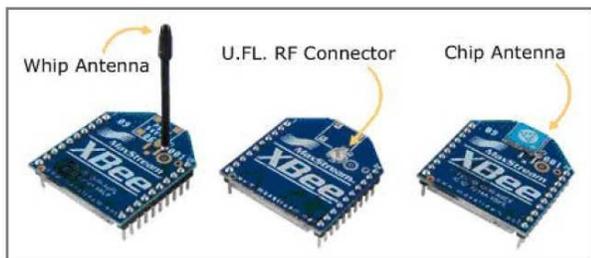


Figura 1. Módulos RF Xbee (catalogo MaxStream TM).

El módulo requiere una alimentación desde 2.8 a 3.4 V, la conexión a tierra y las líneas de transmisión de datos por medio del UART (Txd y Rxd) para comunicarse con un microcontrolador, o directamente a un puerto serial utilizando algún convertidor adecuado para los niveles de voltaje. Para el desarrollo del proyecto, el modulo se comunica con el microcontrolador PIC 16F877A de Microchip y el microcontrolador MC9S08QGB de Freescale, en diferentes circuitos del sistema, pero en realidad se puede utilizar cualquier microcontrolador que utilice el RS232. Los módulos se adaptan a cualquier microcontrolador siempre y cuando utilice el puerto serial.

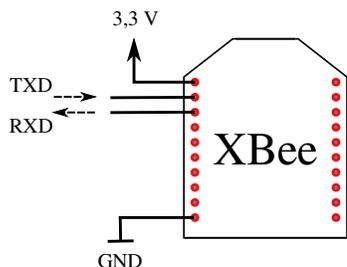


Figura 2. Conexiones mínimas requeridas para el Xbee.

Como anteriormente se mencionaba, después de realizar las conexiones mínimas con las que funciona el módulo se debe determinar el modo de operación. Los módulos Xbee pueden operar en los siguientes cinco modos:

**Modo recibir/transmitir.** Se encuentra en estos modos cuando al módulo le llega algún paquete RF a través de la antena (modo Receive) o cuando se manda información serial al buffer del pin 3 (UART Data in) que luego será transmitida (modo Transmit). La información transmitida puede ser Directa o Indirecta. En el modo directo la información se envía inmediatamente a la dirección de destino. En el modo Indirecto la información es retenida durante un período de tiempo y es enviada sólo cuando la dirección de destino la solicita.

**Modo de bajo consumo (Sleep Mode).** El modo de bajo consumo, hace posible que el módulo RF entre en un modo de bajo consumo de energía cuando no se encuentra en uso. Para poder entrar en el sleep mode, se debe cumplir una de las siguientes condiciones:

Sleep RQ (pin 9) está en alto y el módulo está en pin sleep mode ( $SM = 1, 2$  o  $5$ )

El módulo está en reposo (no hay transmisión ni recepción de datos) por la cantidad de tiempo definido por ST (Time before Sleep, ST sólo está activado cuando  $SM = 4, 5$ ).

**Modo de comando.** Este modo permite ingresar comandos AT al módulo Xbee, para configurar, ajustar o modificar parámetros. Permite ajustar parámetros como la dirección propia o la de destino, así como su modo de operación entre otras cosas. Para poder ingresar los comandos AT se utiliza el Hyperterminal de Windows, el programa X-CTU o algún microcontrolador que maneje UART y tenga los comandos guardados en memoria o los adquiera de alguna otra forma.

Para ingresar a este modo se debe esperar un tiempo dado por el comando GT (Guard Time, por defecto  $ATGT=0x3E84$  que equivalen a 1000 ms) luego ingresar +++ y luego esperar otro tiempo GT. Como respuesta el módulo entregará un OK. El módulo Xbee viene por defecto con una velocidad de 9600 baudios. En caso de no poder ingresar al modo de comandos, es posible que sea debido a la diferencia de velocidades entre el módulo y la interfaz que se comunica vía serial. En la Fig. 3 se observa la sintaxis de un comando AT. Luego de ingresar a este modo, se debe ingresar el comando deseado para ajustar los parámetros del módulo Xbee.

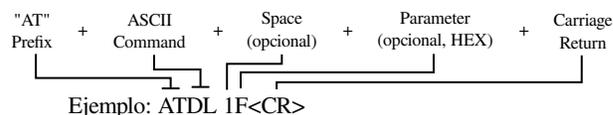


Figura 3. Ejemplo comando AT.

**Modo transparente.** En este modo todo lo que ingresa por el pin 3 (Data in), es guardado en el buffer de entrada y luego transmitido y todo lo que ingresa como paquete RF, es guardado en el buffer de salida y luego enviado por el pin 2 (Data out). El modo Transparente viene por defecto en los módulos Xbee. Este modo está destinado principalmente a la comunicación punto a punto, donde no es necesario ningún tipo de control. También se usa para reemplazar alguna conexión serial por cable, ya que es la configuración más sencilla posible y no requiere una mayor configuración.

En este modo, la información es recibida por el pin 3 del módulo Xbee, y guardada en el buffer de entrada. Dependiendo de cómo se configure el comando RO, se puede transmitir la información apenas llegue un carácter ( $RO=0$ ) o después de un tiempo dado sin recibir ningún carácter serial por el pin 3. En ese momento, se toma lo que se tenga en el buffer de entrada, se empaqueta, es decir, se integra a un paquete RF, y se transmite. Otra condición que puede cumplirse para la transmisión es cuando el buffer de entrada se llena, esto es, más de 100 bytes de información.

**Modo de conexión transparente.** Esta es la conexión que viene por defecto y es la más sencilla forma de configurar el módem. Básicamente todo lo que pasa por el puerto UART (DIN, pin 3), es enviado al módulo deseado, y lo que llega al módulo, es enviado devuelta por el mismo puerto UART (DOUT, pin2).

Existen básicamente tres tipos de conexión transparente. La diferencia principal radica en el número de nodos o puntos de acceso, y la forma en que éstos interactúan entre sí.

1. Punto a Punto: Es la conexión ideal para remplazar comunicación serial por un cable. Sólo se debe configurar la dirección. Para ello se utilizan los comandos MY y el DL. La idea, es que se define arbitrariamente una dirección para un módulo, usando el comando MY, el cual se va a comunicar con otro que tiene la dirección DL, también definida arbitrariamente. Con esto cada módulo define su dirección con MY, y escribe la dirección del módulo al cual se desea conectar usando DL. En este modo, el módulo receptor del mensaje envía un paquete al módulo de origen llamado ACK (viene de Acknowledge) que indica que el mensaje se recibió correctamente.

2. Punto a Multipunto: Esta conexión, permite prestaciones extras. Se diferencia del Broadcast, en que permite transmitir información, desde la entrada serial de un módulo (DIN, pin 3) a uno o varios módulos conectados a la misma red de manera más controlada, ya que se necesitan las direcciones de los otros módulos, por lo que existe mayor seguridad. Para esto se necesitan dos comandos más aparte de MY y DL. Se utilizará el direccionamiento de 16 bits. El primer comando es el ID de la PAN (Personal Area Network- Red de Área Personal). Todos los módulos que tengan idéntico PAN ID, pertenecerán a la misma red. El comando para configurar este valor es ID, es decir, ATID, y su rango va entre 0x0 y 0xFFFF. El otro comando corresponde al canal por el cual se va a comunicar. Se disponen de 16 canales según el protocolo IEEE 802.15.4. Esta norma indica que entre cada canal, deben existir 5 MHz de diferencia, partiendo de la frecuencia base 2.405 GHz, se llegan hasta los 2.480 GHz.

3. Broadcast: Esta configuración permite el envío de información desde un nodo a varios nodos en una misma red. La información recibida es la misma para todos los nodos. Para configurar los módulos, es necesario ajustarlos con la dirección de Broadcast. Cualquier módulo que reciba un paquete con una dirección de destino de Broadcast será aceptado. La dirección de Broadcast es:

DL=0x0000FFFF

DH=0x00000000

Esta dirección debe ser configurada en todos los nodos de la red, ya sea que estén en direccionamiento de 16 o 64 bits. Así se debe ingresar ATDH0 y ATDL0000FFFF en todos los módulos para que el modo broadcast esté habilitado.

**Modo de operación API.** Este modo es más complejo, pero permite el uso de frames con cabeceras que aseguran la entrega de los datos, al estilo TCP. Cuando el módulo XBEE se encuentra en este modo, toda la información que entra y sale, es empaquetada en frames, que definen operaciones y eventos dentro del módulo. Así, un Frame de Transmisión de Información (información recibida por el pin 3 o DIN) incluye: Frame de información RF transmitida, Frame de comandos (equivalente a comandos AT). Mientras que un Frame de Recepción de Información incluye: Frame de información RF recibida, comando de respuesta y notificaciones de eventos como Reset, Associate y Disassociate.

**Idle.** Cuando el módulo no se está en ninguno de los otros modos, se encuentra en éste. Es decir, si no está ni transmitiendo ni recibiendo, ni ahorrando energía ni en el modo de comandos, entonces se dice que se encuentra en un estado al que se le llama IDLE.

### Diseño del sistema prototipo

Es un sistema de seguridad electrónico controlado de forma inalámbrica; se compone de un *hardware* y de un *software*, los componentes del *hardware* que se utilizaron para el prototipo son los siguientes: sensor de movimiento referencia Lx28, este necesita una fuente de alimentación de 100v/AC-115v/AC, frecuencia de trabajo de 60 Hz y tiene un ángulo de detección de 360°, la temperatura de trabajo debe ser menor de 40°C y la distancia de detección es de 12 metros. La distancia de detección puede ser ajustada de acuerdo a la posición de montaje y campo de detección requerido. En la siguiente Fig. 4 se muestra el sensor utilizado en el sistema domótico de seguridad.



Figura 4. Sensor de movimiento LX28 (catalogo IPSA).

También se utilizó un microcontrolador PIC 16F877a, este es el controlador principal del sistema. Este microcontrolador se programó con un software para realizar algunas tareas dentro del sistema. En el sistema de seguridad implementado fue utilizado el microcontrolador MC9S08QGB de Freescale en dos sistemas de menor complejidad. También se utilizó una pantalla de cristal líquido LCD o display LCD. El proceso de visualización es administrado por el microcontrolador PIC 16F877A. Este display permite visualizar los eventos que suceden en la casa, de acuerdo a la programación.

Se utilizaron dos reguladores de voltaje para la alimentación de la electrónica: el LM7805AC y el FAN 1616A. El primero soporta un voltaje de entrada entre 5 V y 18 V, y entrega a la salida un voltaje de 4.8 V a 5.2 V. El segundo regulador soporta en la entrada de voltaje  $V_{in}$  12 V y entrega en su salida 3.3 V.

Otros componentes que se utilizaron fueron: una alarma de 5 V, un dispositivo electromecánico denominado relé, que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico, en el que por medio de una bobina y un electro imán, se acciona un juego de un contacto que permiten abrir o cerrar otro circuito eléctrico independiente, se utilizó para aislar un circuito de potencia de uno digital en uno de los sistemas de menor complejidad.

En cuanto al *software* del sistema domótico de seguridad, se realizaron tres programas para el debido funcionamiento del sistema. Estos programas los poseen los microcontroladores que se utilizaron. El sistema domótico se dividió en tres sistemas, dos de menor complejidad y un sistema de control general denominados: *sistema sensor*, *sistema controlador y actuador puerta* y finalmente *sistema actuador alarma*. A continuación se presentan los diagramas de flujo de los programas que contienen cada uno de los sistemas:

1. El diagrama de flujo del *sistema sensor*. Este programa se utilizó para el microcontrolador MC9S08QGB de Freescale (Fig. 5).

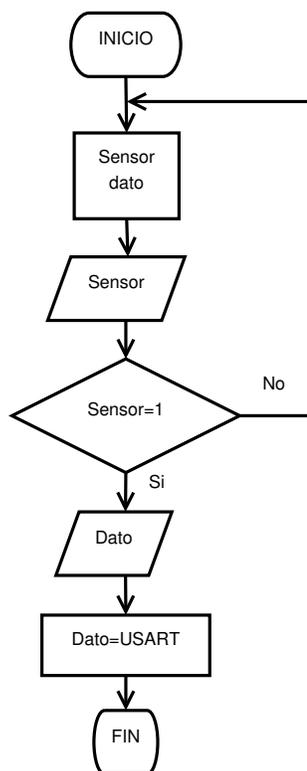


Figura 5. Diagrama de flujo del sistema sensor.

2. El diagrama de flujo del *sistema controlador y actuador puerta* se presenta en Fig. 6. Este programa se maneja para el microcontrolador PIC 16F877A.

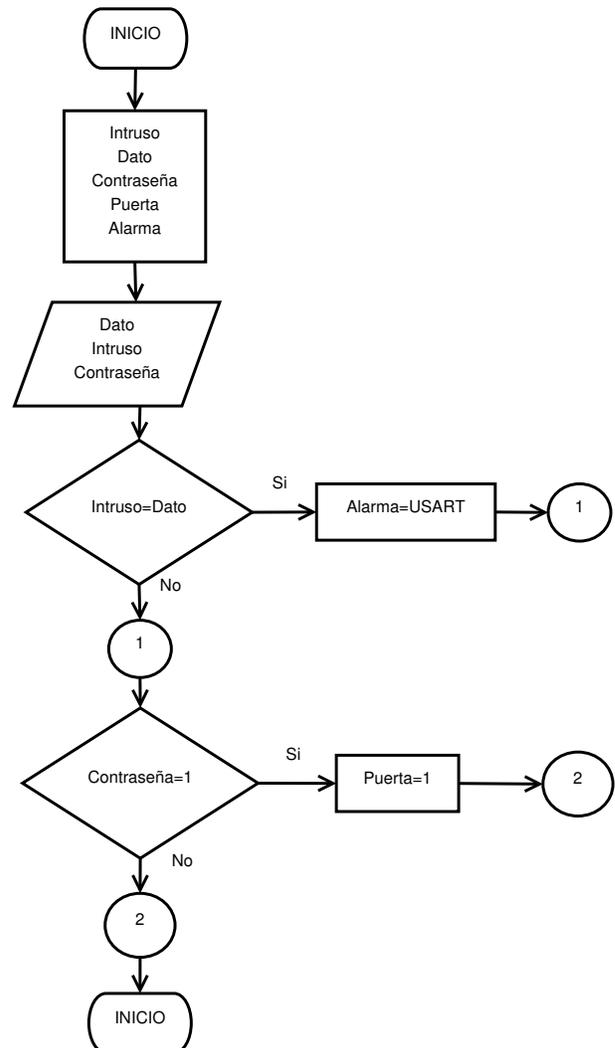


Figura 6. Diagrama de flujo del sistema controlador y actuador puerta.

3. El diagrama de flujo *sistema actuador alarma* se presenta en la Fig. 7. Este programa se utilizó en el microcontrolador MC9S08QGB de Freescale.

El canal para transmitir los datos es el aire y se logra por medio de los módulos Xbee, estos son los encargados de transmitir la información y trabajan bajo el protocolo 802.15.4/ZigBee. En el sistema domótico existen tres módulos Xbee encargados de esta función. A continuación se presenta la forma en la cual se debe programar los módulos para que puedan transmitir la información.

Para configurar los módulos se puede utilizar el hiperterminal o el X-CTU, para el desarrollo de este proyecto se usó el programa X-CTU. Antes de empezar con la configuración del módulo Xbee se tiene que

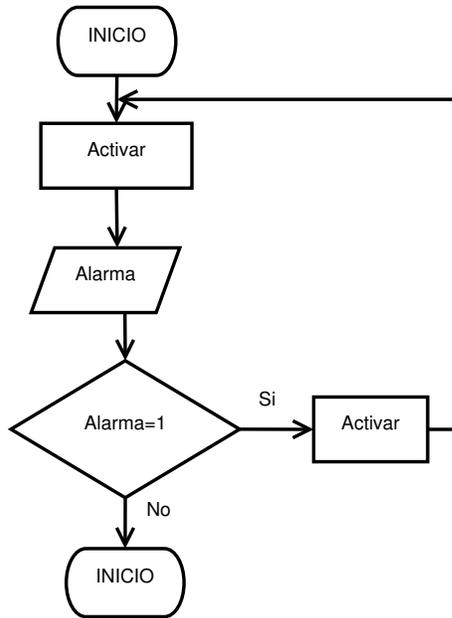


Figura 7. Diagrama de flujo del sistema actuador alarma.

instalar el programa X-CTU. Primero se debe descargar el archivo instalable, que se puede encontrar en el enlace <http://ftp1.digi.com/support/utilities>, una vez descargado el archivo se procede a la instalación del programa. Posteriormente se abre el llamado X-CTU.

Se debe conectar el Xbee por medio de la tarjeta Xbee explorer. Después, en la ventana principal se debe señalar en la ventana *Select Com Port*, el puerto usb y definir la tasa de transmisión, para el caso 9600 baudios. Se selecciona el botón *Test/Query* y aparece una ventana que permite reconocer el Xbee y verificar su referencia.

Luego, basta con programar tres parámetros bastante sencillos para poder conectar los módulos. Estos parámetros son: MY dirección origen, DL dirección destino, BD baud rate (velocidad de transmisión). En el parámetro MY se introduce el valor 123 y en el parámetro DL se introduce el valor 321. De esta forma el transmisor se llama 123 y le transmite al receptor que se llama 321. Los valores pueden ser cualesquiera.

Para el caso del receptor, en el parámetro MY se introduce el valor 321 y en el parámetro DL el valor 123. De esta manera el receptor se llama 321 y solo recibe del transmisor que se llama 123. El último parámetro a configurar es el de BD (del menú *Serial Interfacing*), aquí se introduce el valor de la velocidad a la cual el microcontrolador enviará y recibirá datos. Por defecto, los módulos vienen programados a 9600 baudios, basta seleccionar el parámetro al valor deseado. Una vez hecho todo lo anterior, se debe seleccionar *Write* para que todos los cambios se queden grabados permanentemente en el módulo XBEE. También se pueden

dejar los módulos en modo transparente, que es el modo en el que se han configurado los módulos del sistema domótico.

**Sistema sensor.** Este es un sistema de menor complejidad, compuesto por el sensor LX28, el microcontrolador MC9S08QGB de Freescale y un módulo transmisor de la señal llamado módulo Xbee. El sensor tiene la función de detectar. Está diseñado para activarse cuando detecta un cambio de temperatura en un ambiente. Todos los objetos irradian una cierta cantidad de energía infrarroja o calor, cuando existe un cambio en dicho nivel de energía, como el que produce una persona que entra al área protegida, el detector infrarrojo lo percibe y envía una señal al microcontrolador. El alcance que tiene de 12 m a lo largo y de 3 m a lo alto, con un ángulo de cobertura de unos 90° a 110° a lo ancho. Estos dispositivos están diseñados para trabajar en áreas abiertas, esto quiere decir que no pueden ver a través de las paredes u otros obstáculos.

Para la aplicación del proyecto solo se utiliza un sensor, pero si se desea cubrir más áreas, solo bastaría poner mas sensores. En el evento en que detecte un intruso el sensor informa al microcontrolador. Este tiene como función recibir la información proveniente del él, esta información recibe un tratamiento para posteriormente proporcionar la información por una salida del microcontrolador de forma serial al Xbee. Es precisamente este último, el otro integrante de este sistema, el modulo Xbee, es el encargado de transmitir la información de forma inalámbrica al microcontrolador principal, que se encuentra en el sistema controlador y actuador puerta.

**Sistema controlador y actuador puerta.** Este es el sistema más importante puesto que el toma las decisiones de todos los eventos que pueden suceder en el hogar, que para el caso son tres: Percibir el ambiente, activar alarma y controlar el acceso al hogar. Este sistema esta compuesto por un microcontrolador PIC 16F877A. El microcontrolador hace las veces de controlador principal, contiene un programa que se encarga de activar la apertura de la puerta cuando el usuario digite la clave correcta. Si el usuario no digita la clave correcta, no se realizará ningún evento. La LCD indicará el estado del sistema domótico, esta es la encargada de informar los eventos que sucedan, bien puede ser informar sobre un intruso presente en el ambiente o informar si ha introducido la contraseña correcta para poder abrir la puerta. El teclado es la interfaz por la cual el usuario podrá digitar la clave, que ha sido previamente guardada en el programa que contiene el microcontrolador. En el evento en el que el usuario digite la clave correcta, el controlador permitirá la apertura de la puerta enviando una señal al solenoide que para este caso es el dispositivo actuador.

**Sistema actuador alarma.** El sistema actuador alarma, básicamente se encarga de recibir la señal proveniente del microcontrolador principal para activar la alarma. Este sistema consta de un modulo Xbee, un microcontrolador

MC9S08QGB de Freescale y una alarma acústica. El sistema se pone en marcha cuando se ha detectado un intruso en el sistema sensor y el microcontrolador principal, que conoce todos los eventos del sistema domótico, resulta en una acción, informar al Xbee del sistema actuador alarma la información proveniente del microcontrolador principal. Esta información es comunicada al microcontrolador MC9S08QGB de freescale de forma serial, y es este el que activa la alarma.

El sistema prototipo se muestra en las Fig. 8 y 9.

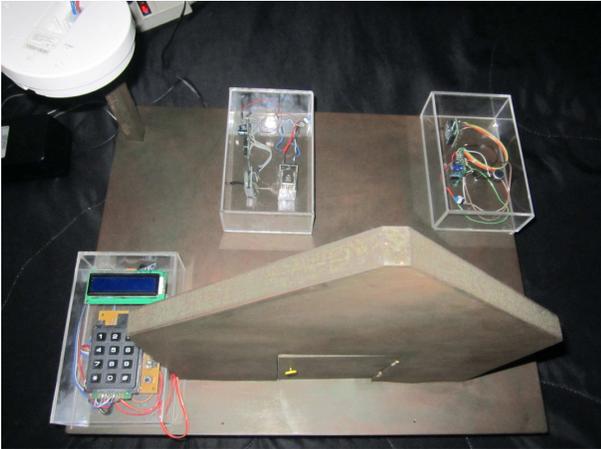


Figura 8. Prototipo de evaluación, vista frontal.

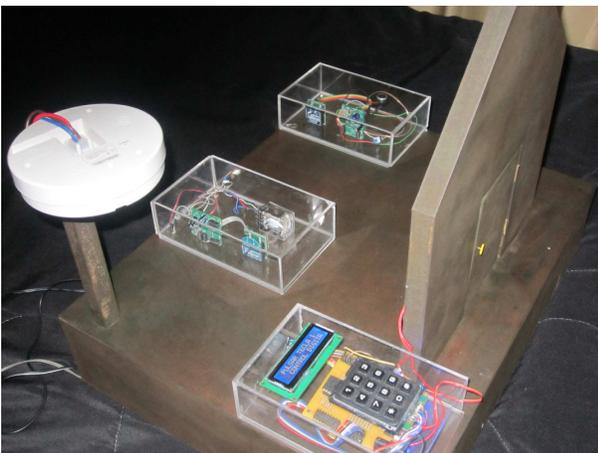


Figura 9. Prototipo de evaluación, vista lateral.

### Resultados

El sistema domótico se divide en tres sistemas, cada uno encargado de determinadas funciones como se vio en la sección anterior. Estos son: el sistema sensor, sistema controlador y actuador puerta.

El sensor funciona a 110 V, debe ir conectado a la red eléctrica del hogar, este se encarga de percibir el ambiente cuando detecta presencia y le envía esta información al

microcontrolador MC9S08QGB de Freescale, en medio de estos dos se encuentra un relé, este aísla el circuito de potencia del circuito digital, puesto que el microcontrolador trabaja con 3 V al igual que el Xbee. Los 3 V se consiguen con un regulador Fan 1616, quien entrega el voltaje para alimentar tanto al microcontrolador como al módulo Xbee.

El relé realiza el contacto cuando el sensor se activa, lo que permite cerrar el circuito digital y así poner en funcionamiento un dato digital en el microcontrolador, este recibe la información y de acuerdo al programa, cuando por el pin 16 (pta0) ingresa un dato, inmediatamente envía la información al pin 3 (Rx) del módulo Xbee. Este módulo está programado como módulo transmisor RF, está configurado en modo transparente como se indicó en la sección anterior. El módulo Xbee en este sistema le envía la información al módulo Xbee que tiene el microcontrolador principal.

El sistema controlador y actuador puerta, es el sistema principal, está compuesto por un teclado matricial, por un display LCD, un módulo Xbee y un actuador, para el caso un solenoide. Este sistema es el central de todo el sistema domótico. El teclado matricial tiene como función permitir al usuario digitar la clave para poder ingresar a su hogar, esto en el caso que sea correcta la clave. El display permite visualizar todos los eventos que suceden en el hogar, eventos que han sido transmitidos por medio del módulo Xbee del microcontrolador principal. Este módulo ha sido configurado en el modo transparente y no solo tiene la función de recibir la información que viene del sistema sensor, si no que también es transmisor de información al sistema actuador alarma, es decir, este módulo trabaja de forma bidireccional.

### Trabajo futuro

El presente proyecto, si bien está encaminado al área de seguridad, presenta muy pocas áreas de aplicación dentro de esta misma, dada la amplitud de la domótica. El proyecto es básico frente a las posibilidades. Se podría presentar mejoras en cuanto a la implementación de una red más amplia, que involucrara más dispositivos Xbee, donde se pudiera visualizar claramente una red más grande. También se podría desarrollar una interfaz que permitiera al usuario conectarse al sistema domótico por medio de Internet y saber el estado de su casa desde cualquier lugar, es de alta importancia el Internet hoy en día, y la domótica es un gran aliado.

Dentro de estos sistemas se acostumbra a tener sistema de video que permita visualizar desde Internet el estado de su casa, o permita al usuario ver desde el interior de su casa, el exterior de esta, que genere control de las personas que se acerca a su hogar sin necesidad de salir de este.

El sistema de control de acceso del hogar, si bien funciona dentro de los requerimientos expuestos anteriormente, podría ser más eficiente y podría generar alarmas en caso de alteración de software por parte de los intrusos. El sistema actualmente detecta intrusos y genera una alarma acústica,

pero podría generar también alarma enviando algún tipo de mensaje, voz, video o texto a los celulares de los ocupantes del hogar, implicaría un mayor grado de complejidad en los sistemas de control, o bien podría comunicarse a una central de alarmas.

### Conclusiones

El proceso de comunicación entre los módulos Xbee es de fácil configuración, pero a la hora de enviar paquetes de información, presenta inconvenientes, puesto que los módulos estaban configurados en modo transparente y este no asegura la transmisión de los datos. En definitiva es mejor realizar una trama de paquetes de datos para poder corroborar el dato y así el paquete llegue completo.

Los dispositivos que operan en la banda de los 2.4 GHz como los módulos Xbee, reciben interferencia causada por otros servicios que operan en dicha banda. Esta situación es aceptable en las aplicaciones que utilizan el estándar IEEE 802.15.4, las cuales requieren una baja calidad de servicio, no requiere comunicación asíncrona, y hay que realizar varios intentos para completar la transmisión de paquetes. Por el contrario, un requerimiento primario de las aplicaciones del IEEE 802.15.4 es una larga duración en baterías, los módulos Xbee con su modo de operación de bajo consumo, logran una larga vida útil de las baterías, por que utilizan poca energía de transmisión y muy pocos ciclos de servicio.

Al usar esta tecnología no se tiene problemas en la instalación del cableado debido a que es una tecnología inalámbrica, es de fácil adaptabilidad, por ejemplo en los interruptores, teniendo la facilidad de cambiarlos de lugar sin problema alguno, o en los hogares ya existentes y se desee implementar el sistema. La principal aplicación de ZigBee, son los sistemas para redes domóticas, pues ha sido creado para cubrir las necesidades del mercado en este campo, sin embargo, ZigBee tiene amplias capacidades de desarrollo que le permite ser utilizado en múltiples aplicaciones, como los sistemas de medición avanzada, medidores de agua, luz y gas que forman parte de una red con otros dispositivos como displays ubicados dentro de las casas, que pueden monitorear el consumo de energía, también pueden interactuar con electrodomésticos o cualquier otro sistema eléctrico como bombas de agua o calefacción, con la finalidad de aprovechar mejor la energía. Esta interoperabilidad es favorable no solo por lo anteriormente descrito, si no también por que es adaptable a cualquier dispositivo que se comunique de forma serial.

En la actualidad existen una gran cantidad de estándares que permiten todo tipo de aplicaciones en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas, las mismas que permiten grandes tasas de transferencias de audio, video, datos. Sin embargo, estos estándares no son adecuados para situaciones en las que se requiere de un bajo consumo de energía como lo

es ZigBee el cual tiene la capacidad de hacer que sus baterías sean perdurables.

El estándar IEEE 802.15.4 permite que la transmisión de datos sea bidireccional. Esto es favorable, puesto que se logra un mayor control sobre las aplicaciones en las que se desarrolle. Es decir aprovechando esto, el microcontrolador puede ratificar el envío de datos de una forma muy eficiente, puesto que puede preguntarle al módulo transmisor por el envío de datos y a la vez este módulo puede responder si su paquete fue enviado o no. Dado que la frecuencia de trabajo de los módulos es 2.4 Ghz, y en esta frecuencia se encuentra transmitiendo demasiados dispositivos, se presentan interferencias, pero el estándar IEEE 802.15.4 ofrece una solución viable, puesto que tiene 16 canales, el escoge el canal que no este ocupado y pueda realizar el envío de datos.

### Referencias

- Ferreiras, J., y López, P. (2005). Redes de datos y servicios multimedia domesticos. *La domotica en el mundo, estado del arte*, 753-778.
- Gordillo, R., y Trujillo, D. (2009). *Diseño de un sistema de vigilancia no convencional basado en redes zigbee (802.15.4) para realizar un control sobre equipos de video e integracion a sistemas de supervision de mayor jerarquia*. Tesis de Master no publicada, Escuela Politecnica del Ejercito, carrera de ingenieria de electronica en telecomunicaciones.
- Henaó, O. (2006). *Hardware y software domótico*. Tesis de Master no publicada, Facultad de Ingeniería Electrónica Universidad Pontificia Bolivariana.
- Langhammer, N., y Kays, R. (2012). Performance evaluation of wireless home automation networks in indoor scenarios. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 2252-2261.
- Paz, H., Alarcon, R., y Laverde, A. (2006). Diseño e implementación de una red domótica para un laboratorio de ingeniería electrónica. *Grupo de investigación Ecitronica*.
- Quiroga, J. (2009). *Z-wave demotica bajo arquitectura mesh*. Tesis de Master no publicada, Facultad de Ingeniería Universidad Santo Tomas de Aquino.
- Sarmiento, J. (2009). *Estado el arte del estandar i.eee 802.15.4 zigbee aplicado a la domótica en colombia*. Tesis de Master no publicada, Facultad de Ingeniería Universidad Santo Tomas de Aquino.
- Selas, M., Sanchez, D., y Muñoz, F. (2005). Aplicación de inteligencia artificial en el hogar inteligente. En *Casa futura*.
- Valerio, R. (2005). Domotica. como debe ser una casa domotizada. *Revista digital Investigación y educación*, II.