



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL

UNIDAD OAXACA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: PATRONES Y PROCESOS PARA LA
BIODIVERSIDAD DEL NEOTROPICO

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA
TELEMÉTRICO PARA EL MONITOREO DE
FAUNA SILVESTRE.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

ING. JOEL CRISANTO JUÁREZ

DIRECTORES DE TESIS

DR. GABRIEL RAMOS FERNÁNDEZ

DR. JOSÉ RODOLFO MARTÍNEZ Y CÁRDENAS



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14-BIS

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca siendo las 13:00 horas del día 9 del mes de junio del 2017 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR OAXACA para examinar la tesis titulada:
"Diseño y Construcción de un Sistema Telemétrico para el Monitoreo de Fauna Silvestre"

Presentada por el alumno:

Crisanto Juárez
Apellido paterno Apellido materno
Nombre(s) Joel

Con registro:

A	1	5	0	1	1	2
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Gabriel Ramos Fernández

Dr. Rodolfo Martínez y Cárdenas

Dr. Francisco Castellano León

M.C. Graciela E. González Pérez

Dr. José Roberto Sosa López

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez



**CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.**



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 9 del mes de junio del año 2017, el (la) que suscribe CRISANTO JUÁREZ JOEL alumno(a) del Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES, con número de registro A150112, adscrito(a) al **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca**, manifiesto(a) que es el (la) autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del (de la, de los) **Dres. Gabriel Ramos Fernández y Dr. José Rodolfo Martínez y Cárdenas** y cede los derechos del trabajo titulado **“Diseño y Construcción de un Sistema Telemétrico para el Monitoreo de Fauna Silvestre”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones posgradoax@hotmail.com ó joel.crisanto.juarez@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

CRISANTO JUÁREZ JOEL
Nombre y firma del alumno(a)



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

Resumen

El desarrollo e implementación de la telemetría en el estudio de la fauna silvestre ha ampliado enormemente las posibilidades en las investigaciones en las últimas décadas, ayudando a resolver el problema del rastreo de la fauna silvestre. Sin embargo, existen necesidades específicas que no pueden ser satisfechas mediante comunicaciones punto a punto, por ejemplo, para el estudio de poblaciones de fauna silvestre, en donde se requiere información sobre el movimiento de los individuos obtenida simultáneamente.

La presente investigación ofrece una alternativa a las tecnologías de telemetría actuales, empleando un sistema basado en collares con capacidades de geolocalización, almacenamiento de datos y comunicación inalámbrica mediante una red inalámbrica de tipo Mesh, con lo cual es posible contar con información sobre la ubicación espacial y temporal de cada uno de los dispositivos monitoreados. Esta información, al ser compartida por todos los miembros de la red, ofrece el respaldo y acceso a los datos desde cualquier punto de la misma, permitiendo automatizar la obtención de información de manera remota y continua de poblaciones de fauna silvestre, aún con especies evasivas.

En este documento, se reporta la selección del hardware necesario para desarrollar dicho sistema, basándose en requerimientos específicos como lo son: la potencia de transmisión, la ganancia de la antena, el sensor de posicionamiento, la unidad de control, procesamiento de datos y transmisión inalámbrica. De igual manera, se detalla la implementación de los protocolos de comunicación I2C, SPI, DigiMesh, así como el diseño y construcción del hardware del prototipo. Los resultados obtenidos en las pruebas del sistema demuestran que cumple con las capacidades necesarias para la transmisión en diferentes ambientes, confirmándose la utilidad del sistema para el monitoreo simultáneo de individuos.

Palabras clave: Redes inalámbricas de Sensores, Monitoreo de Fauna, GPS, DigiMesh.

Self-education is, I firmly believe, the only kind of education there is.

- Isaac Asimov

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos al Dr. Gabriel Ramos Fernández por haber confiado en la realización de esta investigación, así como sus valiosos consejos durante el desarrollo de la misma. Al Dr. José Rodolfo Cárdenas por su apoyo incondicional y orientación durante mi formación. Al C. Abelardo Menéndez Cruz por permitirme someter su ganado a estudio y por toda la ayuda prestada durante la realización de las pruebas. A mis compañeros de generación por todas las veces que me guiaron cuando me encontraba perdido. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Instituto Politécnico Nacional por su valioso patrocinio. A los cientos de usuarios anónimos de Internet que día a día colaboran con la generación de conocimiento libre. A mi familia, amigos, y sobre todo a mi madre, que con su esfuerzo, trabajo y ejemplo, me enseñó a salir a delante.

Sin ustedes no hubiese logrado nada de esto.

CONTENIDO GENERAL

INTRODUCCIÓN	9
ANTECEDENTES	14
JUSTIFICACIÓN	19
OBJETIVOS	21
OBJETIVO GENERAL	21
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	21
PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	21
PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	23
<i>SPI</i>	23
<i>UART</i>	26
<i>MTK NMEA Packet Protocol</i>	27
<i>DigiMesh</i>	29
Modos de operación	33
Modo Transparente	33
Modo API	33
Direccionamiento	35
Unicast	35
Broadcast	36
SELECCIÓN DEL HARDWARE	36
<i>Microcontrolador</i>	36
<i>Módulo GPS</i>	40
<i>Módulo MicroSD</i>	40
<i>Reloj de tiempo real</i>	42
<i>Transmisor</i>	43
<i>Sparkfun Xbee Explorer Regulated</i>	52
<i>MOSFET</i>	53
<i>Fuente de energía</i>	54
DISEÑO	55
<i>Etapa de control</i>	55
<i>Etapa principal</i>	56
CONSTRUCCIÓN	59
PRUEBAS DEL SISTEMA	61
PRUEBAS DEL RANGO DE COBERTURA	61
ESCENARIO 1: COMUNICACIÓN PUNTO A PUNTO	62
ESCENARIO 2: COMUNICACIÓN MEDIANTE BRIDGE	62
ESCENARIO 3: COMUNICACIÓN EN RED MESH	63
ESCENARIO 4: PRUEBA EN GANADO CAPRINO	64
RESULTADOS	66
RANGO DE COBERTURA	66
COMUNICACIÓN PUNTO A PUNTO	67

COMUNICACIÓN MEDIANTE BRIDGE.....	67
COMUNICACIÓN EN RED MESH.....	68
PRUEBA EN GANADO CAPRINO.....	69
CONCLUSIONES.....	71
REFERENCIAS.....	72
GLOSARIO.....	75
ANEXOS.....	81
ANEXOS.....	81
CIRCUITOS ESQUEMÁTICOS.....	81
CÓDIGO FUENTE DEL FIRMWARE.....	85
DATASHEET DE LOS COMPONENTES.....	93
<i>Mosfet IRL510</i>	93
<i>Xbee 900HP</i>	94
<i>Xbee 2.4</i>	98
<i>Diodo 1N4001</i>	100

<i>Figura 1. Diagrama a bloques de los principales componentes de los nodos del sistema. Fuente: Elaboración propia.</i>	22
<i>Figura 2. Topología del bus de datos de una conexión mediante SPI entre un Master y un Slave. Fuente: Product Datasheet Digi International.</i>	24
<i>Figura 3. Topología del bus de datos de una conexión SPI entre un Master y múltiples Slaves. Fuente: Product Data sheet Digi International.</i>	25
<i>Figura 4. Comunicación SPI. Fuente: Product Data sheet Digi International.</i>	25
<i>Figura 5. Topología del protocolo I2C. Fuente: http://www.robot-electronics.co.uk.</i>	26
<i>Figura 6. Red DigiMesh. Fuente: Product Data sheet Digi International.</i>	30
<i>Figura 7. Estructura de la trama API. Fuente: Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. (2012).</i>	34
<i>Figura 8. Microcontrolador Atmega 328p de 8 bits. Fuente: ATmega328/P Complete Datasheet</i>	37
<i>Figura 9. Distribución de los pines en la plataforma Arduino Uno y el microcontrolador Atmega 328. Fuente: http://www.tr3sdland.com/.</i>	38
<i>Figura 10. Adafruit Ultimate GPS BreakoutGlobalTop GPS Standalone Module. Fuente: GlobalTop GPS Standalone Datasheet</i>	40
<i>Figura 11. Módulo Micro SD card breakout. Fuente: www.adafruit.com.</i>	42
<i>Figura 12. Módulo ZS-042. Fuente: www.arduino.cc.</i>	43
<i>Figura 13. Módulo Xbee. a) Xbee S3B 900HP. b) Xbee 2.4 Fuente: http://www.digi.com/.</i>	44
<i>Figura 14. Diagrama de comunicación entre dos nodos conectados directamente mediante UART. Fuente: Product Data sheet Digi International.</i>	50
<i>Figura 15. Modos de operación del Xbee. Fuente: Product Data sheet Digi International.</i>	51
<i>Figura 16. Diagrama de flujos de la transmisión. Fuente: Product Data sheet Digi International.</i>	52
<i>Figura 17. Módulo Sparkfun Xbee Explorer Regulated Fuente: https://www.sparkfun.com/.</i>	53
<i>Figura 18. MOSFET IRL510. Fuente: Data Sheet IRL510 Vishay Siliconix</i>	54
<i>Figura 19. Arreglo de 4 baterías AA en serie. Fuente: http://www.instructables.com</i>	54
<i>Figura 20. Diodo 1N4001. Fuente: Data Sheet 1N4001 Vishay General Semiconductor</i>	55
<i>Figura 21. Diagrama de conexión mínima del microcontrolador. Fuente: Elaboración propia.</i>	56
<i>Figura 22. Diagrama de conexión del transmisor. Fuente: Elaboración propia.</i>	57
<i>Figura 23. Diagrama de conexión mínima del GPS con el microcontrolador. Fuente: Elaboración propia.</i>	57

Figura 24. Diagrama de conexión del Módulo microSD. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 25. Diagrama de conexión del circuito completo. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 26. Capa Bottom Layer del layout del circuito impreso. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 27. Capa Top Layer del layout del circuito impreso. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 28. Placa del circuito del nodo. A) Vista superior. b) Vista inferior. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 29. Comunicación punto a punto entre dos nodos vecinos. Fuente: Product Datasheet Digi International.	62
Figura 30. Comunicación entre dos nodos sin cobertura mutua mediante bridge. Fuente: Product Datasheet Digi International.	63
Figura 31. Comunicación entre dos nodos mediante la red Mesh. Fuente: Product Datasheet Digi International.	64
Figura 32. Collar sujeto a un individuo del grupo monitoreado. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 33. Prueba de rango a 2.4 GHz. Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 34. Prueba de rango a 900 MHz. Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 35. Mapa de cobertura de la transmisión entre un nodo receptor y un nodo transmisor. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 36. Mapa de cobertura de la transmisión entre tres nodos mediante bridge. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 37. Pruebas de red Mesh. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 38. Ruta recorrida por los individuos durante el primer día. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 39. Ruta recorrida por los individuos durante el segundo día. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 40. Ruta recorrida por los individuos durante el tercer día. Fuente: Elaboración propia.	70
Tabla 1. Estructura de las tramas NMEA. Fuente: GPS Standalone Module Data Sheet.	27
Tabla 2. Descripción de los valores específicos de la trama. Fuente: GPS Standalone Module Data Sheet.	27
Tabla 3. Interpretación de la sentencia. Fuente: GPS Standalone Module Data Sheet.	28
Tabla 4. Canales disponibles en el espectro de frecuencias de 900 MHz Fuente: Elaboración propia. ...	30
Tabla 5. Canales disponibles en el espectro de frecuencias de 900 MHz Fuente: Elaboración propia. ...	32
Tabla 6. Trama API para el envío de los caracteres ASCII "100". Fuente: Elaboración propia.	35
Tabla 7. Comandos para establecer comunicación con la tarjeta SD. Fuente: Elaboración propia.	41
Tabla 8. Características principales del Xbee 900 HP y DigiMesh 2.4. Fuente: www.Digi.com	44
Tabla 9. Descripción de los pines del radio Xbee. Fuente: Elaboración Propia.	47

Introducción

El comportamiento es un vínculo clave entre un animal y su entorno ya que es la forma en que se establece, se mueve o se mantiene en su nicho ecológico. El comportamiento incluye aspectos como la comunicación, el movimiento, la alimentación, apareamiento, crianza, y la cooperación social.

Entre las variables que pueden ser medidas en la fauna silvestre, la posición en espacio y tiempo es de las más importantes, ya que nos permite inferir la relación de los individuos con su ambiente. El contar con puntos de ubicación en diferentes intervalos de tiempo ha permitido determinar patrones de movimiento de algunas especies en el espacio.

El forrajeo es fundamental para la vida de los animales. Un ejemplo de movimiento a escalas locales es el asociado al forrajeo diario, por ejemplo, los movimientos regulares de una especie invasora de pitón asociados a la alimentación en un área determinada (Hart *et al.*, 2015), es decir su ámbito hogareño.

Otra de las características que influyen en movimientos a escalas locales es la territorialidad, esta se basa en la posesión de un área delimitada. Se utiliza para una variedad de propósitos ya mencionados (forrajeo, apareamiento y el cuidado de las crías). El “propietario” del territorio normalmente mantiene a otros individuos de su especie fuera de esta área para asegurar el suministro de alimentos, por lo que sus movimientos se centran en esta escala para mantener la posesión del espacio.

La dispersión es un tipo de movimiento con una escala más amplia, en la cual los animales se mueven para salir de su zona natal en búsqueda de nuevos territorios o áreas de distribución. Las principales causas de la dispersión son: la evasión de la competencia, la dispersión de las crías, la evasión de la endogamia y la colonización.

Existen también movimientos a escalas espaciales y temporales mayores. El más amplio es la migración, la cual es un movimiento de larga distancia entre dos hábitats distintos, lo que la hace compleja y variada ya que depende de las características de la especie. Por ejemplo, el charrán ártico o golondrina de mar *Sterna paradisaea* llega a desplazarse hasta 80,000 Km en su migración anual (Egevang *et al.*, 2010). La migración permite a los animales aprovechar los hábitats que les son favorables en las

diferentes estaciones, o que son beneficiosos para las diferentes etapas del ciclo de su vida.

El seguimiento de estos movimientos ha revelado información biológica de gran valor. Por ejemplo, usando los datos obtenidos, se ha podido determinar, el rango en el que se distribuyen, los tipos de hábitat en los que se desplazan e incluso relaciones complejas como la caza-depredación (Mech, 1967).

Las interacciones en animales sociales son de especial interés en las investigaciones del comportamiento animal, dado que no solo proveen información de la dinámica de los individuos, sino también de la dinámica de grupos y poblaciones. Los animales sociales viven e interactúan entre sí, formando complejas relaciones y estructuras sociales (Wey *et al.*, 2008), esta sociabilidad puede implicar que los contactos entre individuos sean determinados por la densidad de población, la estructura social, el hábitat y la perturbación de su ambiente, entre otras causas.

La información sobre estas interacciones es importante para la comprensión de los patrones de comportamiento de algunas especies en particular. Por ejemplo, cómo el tamaño en un grupo de animales puede afectar el riesgo de depredación como en el caso de bancos de peces, usando el efecto de confusión (Krakauer, 1995) o usando la dilución (Milinski y Heller, 1978). Los lazos sociales pueden también influir por ejemplo, en el apareamiento y la propagación de parásitos y enfermedades (Ji, White, y Clout, 2005), también, para encontrar diversos tipos de recursos, como en el caso de algunas especies de aves en la que orden de llegada a nuevos parches de alimentos es predicho por asociaciones (Aplin *et al.*, 2012). Asimismo, las relaciones sociales determinan cómo las propiedades de los subgrupos y las interacciones influyen en las decisiones individuales de monos araña en estructuras sociales de fusión-fisión (Ramos-Fernández y Morales, 2014), o la formación de estructuras multinivel en sociedades de elefantes (Wittemyer *et al.*, 2005). Estas interacciones son difíciles de medir en la naturaleza, en particular para las especies nocturnas y evasivas. La obtención de información sobre sus relaciones con la población y el hábitat de manera automatizada y continua ha estado limitado por la tecnología disponible, por lo que la mayoría de los estudios realizados no pueden medir automáticamente estas relaciones sino a través de observaciones directas.

Durante muchos años, la única manera de rastrear la fauna silvestre consistía simplemente en seguir y observar el movimiento y los hábitos de un animal, o bien capturarlo y poner una etiqueta o marca en alguna parte visible de su cuerpo, para después esperar a que en algún momento pudiera ser recapturado. El etiquetado o marcado facilita el rastreo de los individuos, pero por su naturaleza externa tiene muchas desventajas; las etiquetas pueden llegar a perderse o ser ilegibles al momento de la recaptura, las marcas pueden ya no ser visibles, además del factor humano que es propenso a errores (Gibbons y Andrews, 2004).

La telemetría es una tecnología muy usada para resolver el problema del rastreo de la fauna silvestre. Esta tecnología permite la medición remota de magnitudes, lo cual ha incrementado la eficiencia en la obtención de información, ampliado enormemente las posibilidades en las investigaciones en las últimas décadas. Algunos de los métodos tradicionales para el monitoreo de movimientos y fenómenos relacionados con la migración de algunas especies mediante telemetría incluyen el uso de radiotransmisores que operan en la frecuencia denominada VHF (Very High Frequency). Otra de las tecnologías de mayor uso es la relacionada con dispositivos de geolocalización por satélite o mediante el Sistema de Posicionamiento Global (Global Position System).

Las mayores limitantes actuales de los dispositivos de telemetría son los relacionados al tipo de transmisión y al tipo de sensores que utilizan, ya que fueron desarrollados para obtener datos de la posición de individuos pero no sobre las posibles interacciones entre individuos de una misma población. Los estudios realizados con estas tecnologías se enfocan en el monitoreo de animales individuales o grupos de animales sin tomar las relaciones entre ellos.

Ante la dificultad de obtener la información sobre las posiciones de los individuos con comportamiento social en poblaciones de fauna silvestre, la alternativa más viable consiste en desplegar una infraestructura de monitoreo basada en redes inalámbricas de sensores (Wireless Sensor Networks). Las WSN son una colección de sensores, con su propia fuente de energía, comunicación inalámbrica, así como capacidades de almacenamiento y procesamiento de datos. Estos sensores pueden llegar a medir una gran variedad de magnitudes dependiendo del hardware que utilicen, y son capaces de transmitir la información obtenida a otra ubicación de forma inalámbrica haciendo uso de protocolos de comunicación sofisticados. Usando estos protocolos de

comunicaciones entre nodos, los datos de cualquier nodo pueden ser dirigidos hacia un destinatario o nodo central, el cual es el encargado de mantener la infraestructura de comunicación entre los nodos y de recibir la información colectada.

Una de las ventajas principales de las WSN es que no requieren de intervención directa para establecer la comunicación entre los nodos de la red, y enviar los datos. Trabajando en conjunto, una red puede proveer información de ubicaciones espaciales utilizando sistemas de posicionamiento global (GPS). Sin embargo, muchos de los protocolos de comunicación usados actualmente en el monitoreo de fauna, requieren de nodos específicos que deben permanecer siempre activos, ya que son los encargados de recibir la información de los nodos que son portados por los individuos y que envían la información de los sensores hacia el nodo central.

En la mayoría de los estudios recientes de fauna silvestre que hace uso de redes inalámbricas de sensores siguen utilizando infraestructuras consistentes en dispositivos que son desplegados en ubicaciones fijas, mientras mantienen desplegados nodos móviles atados mediante collares en individuos de la población bajo estudio, de este modo, los nodos móviles pueden comunicarse con el arreglo de nodos estáticos para redirigir la información hacia un nodo central, normalmente operado por un usuario o interconectado a una red de mayor cobertura para su monitoreo permanente (Dyo et al., 2010; Handcock *et al.*, 2009; Garcia-Sanchez *et al.*, 2010).

Cuando los animales se encuentran fuera del alcance de los nodos fijos de la WSN la señal no es recibida. Esto implica que los nodos en los collares deben almacenar los datos hasta que el animal se encuentre dentro de la zona de cobertura.

Sin embargo, en algunos casos no es posible desplegar la infraestructura necesaria para cubrir un área específica, ya sea por ser un área muy extensa, porque la geografía del lugar no lo permite, o bien, por la misma naturaleza impredecible del movimiento de las poblaciones. Esta dificultad es en la actualidad una de los mayores impedimentos para el monitoreo de poblaciones de fauna silvestre mediante WSN (Singh y Asutkar, 2015).

El presente proyecto de investigación ofrece una alternativa a esta problemática, usando un protocolo de comunicación basado en redes de topología Mesh denominado DigiMesh. DigiMesh es un protocolo de comunicación basado en el estándar de comunicación 802.15.4 para redes inalámbricas de sensores en frecuencias de 2.4 GHz

y 900 MHz, desarrollado la compañía Digi International. El protocolo permite desplegar una WSN mediante nodos que son capaces de mantener comunicación entre ellos sin necesidad de jerarquías preestablecidas. En el protocolo DigiMesh, todos los nodos pertenecen al mismo tipo de dispositivos, por lo que no se requiere de una topología compleja como sucede en otros protocolos de WSN, en los cuales es necesario tener un coordinador central, nodos fijos, y finalmente nodos que son portados por los individuos monitoreados. En este protocolo, todos los nodos son capaces de asumir las tareas de ruteo de información, lo que le permite enviar la información de un nodo hacia los demás y estos a su vez, retransmitir la información a nodos vecinos, haciéndola una red robusta y homogénea. Gracias a esta capacidad, el rango de la red puede ser extendido a cualquier punto en donde se ubique un nodo similar, utilizando la habilidad del protocolo de dar saltos entre nodos y de encontrar la ruta más adecuada para la propagación de la información, permitiendo incluso la creación de rutas alternas entre nodos vecinos en caso de fallas en la comunicación en algún punto de la red.

Con este protocolo de comunicación los individuos de una población se pueden usar como nodos, mediante el uso de collares atados a ellos, convirtiéndolos en transmisores, repetidores y/o receptores; creando una colección de nodos móviles, manteniendo así a la red en movimiento junto a la población a estudio, y transformando la red fija en una red inalámbrica móvil.

De esta manera es posible incrementar la cobertura de la red solo con la presencia de cualquier nodo que esté en cobertura de uno o varios de los demás nodos que conforman la red, a diferencia de otros sistemas en los que es necesario esperar a que el animal este en contacto con los nodos fijos para poder enviar la información. Esta característica de movilidad añade un peso extra, debido consumo de energía a los nodos desplegados; sin embargo, los recientes avances en hardware, permiten el diseño y construcción de nodos lo suficientemente pequeños para ser portados por animales de tamaño mediano y de gestionar la energía utilizando modos de bajo consumo.

Utilizando el sistema de posicionamiento global es posible rastrear a los individuos de una población. El GPS puede proveer ubicaciones precisas y frecuentes de muchas especies de animales, y permitir la obtención de posiciones a intervalos frecuentes y regulares en lugares remotos o de difícil acceso, durante casi todo el tiempo y en variadas condiciones climatológicas. Sin embargo al aumentar la frecuencia de los

muestreos, aumenta el tamaño del total de los datos recabados lo cual implica que el collar debe contar con suficiente capacidad de almacenamiento. Si la frecuencia disminuye, decrece la cantidad de datos pero con ello disminuye la exactitud de las predicciones en los modelos que puedan ser elaborados utilizando la información recabada. Existen también limitantes de ancho de banda (la cantidad de información que puede ser enviada en una vía de comunicación en determinado instante) y de energía que afectan la cantidad de datos que pueden ser recolectados y transmitidos. Dada las características de la comunicación y las limitantes mencionadas, es posible programar los collares para coleccionar datos de posiciones mediante GPS en intervalos preestablecidos, almacenar la información, y transmitirla hacia los demás collares (nodos) en ventanas de transmisión predeterminadas y desde luego mantener estados de bajo consumo entre actividades.

Antecedentes

La radio telemetría ha incrementado la eficiencia en la obtención de información en diferentes campos de la ciencia utilizando las señales de radio para localizar a los individuos y seguir sus movimientos. Se ha empleado esta tecnología para aprender sobre especies como, elefantes (Blake *et al.*, 2001), Aves (Weimerskirch *et al.*, 1993), ballenas (Mate *et al.*, 1998), lobos (Fuller, 1991), entre muchos otros.

El estudio de la fauna silvestre terrestre mediante radio telemetría se remonta a principios de la década de 1960 cuando por primera vez se usaron collares con dispositivos de radiofrecuencia para el monitoreo de la ardilla *Tamias striatus* (Le Munyan *et al.*, 1959). Uno de los estudios pioneros en mamíferos de gran tamaño y ámbitos hogareños amplios fue realizado por Heezen y Tester (1967) para monitorear al venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*). Para poder realizar el monitoreo, los transmisores son sujetos al individuo mediante correas, desde la distancia, se utiliza un receptor de radio y una antena direccional para localizar la señal y seguirla hasta el individuo portador. Sin embargo, para localizar a un individuo mediante el seguimiento de la señal del radio del transmisor, es necesario estar lo suficientemente cerca del individuo ya que la distancia desde la que la señal puede ser detectada es el resultado de muchos factores como la potencia del transmisor, la calidad del receptor y la ganancia de la antena receptora, que se verán influidos por factores externos como el clima, el terreno y a las obstrucciones del medio. Esta distancia puede ir de unos cientos de

metros hasta varios kilómetros dependiendo de todos estos factores, además la antena debe estar correctamente direccionada para que pueda captar la señal del transmisor proveniente de la correa del individuo.

Una alternativa a esta limitante, es la telemetría basada en comunicación satelital. El rastreo por telemetría satelital es similar al rastreo por radio telemetría, pero en lugar de que la señal de radio se envíe a un receptor, se envía a un satélite usando una radiofrecuencia baja. Para calcular la posición del individuo en el espacio se utiliza un método basado en el efecto conocido como Doppler Shift, y para estimar la ubicación, se requieren de cuatro transmisiones además de una serie de cálculos que incluyen la rotación de la tierra y la velocidad del transmisor. Con la telemetría satelital los operadores no tienen que estar cerca de los individuos para captar la señal, por lo que es posible realizar el seguimiento del animal usando una computadora conectada a los servicios satelitales. El sistema de telemetría satelital para monitoreo de fauna más usado es el sistema ARGOS (Advanced Research and Global Observation Satellite). Sin embargo, el sistema ARGOS no es muy preciso. Esto quedó demostrado durante el seguimiento de mamíferos de gran tamaño en Alaska en 1984, utilizando dispositivos que pesaban entre 1.2 y 2 kilogramos, con un margen de error en la ubicación de hasta 1700 metros (Fancy *et al*, 1988).

Una de las tecnologías más utilizadas para solucionar el problema de precisión es el sistema de telemetría que combina la radio telemetría con la tecnología Global Positioning System (GPS) Tracking. En el rastreo por GPS, un receptor es colocado en el individuo. El receptor de radio capta las señales de la red de satélites GPS, el cuál es posteriormente decodificado por un microprocesador, la información resultante incluye la posición del individuo en el espacio terrestre, la altitud, la hora exacta al momento de la recepción de la señal, además de información adicional que puede ser calculada después de obtener dos ubicaciones consecutivas, como el rumbo y la velocidad a la que se mueve el individuo. Estos datos pueden ser almacenados dentro del dispositivo mismo (data loggers), enviados a través del sistema ARGOS, transmitidos por radiofrecuencia, o incluso, recuperados físicamente. Un ejemplo del uso de esta tecnología para el monitoreo de fauna silvestre es el estudio realizado sobre los patrones de los movimientos de un grupo de lobos, en donde los datos colectados de hembras, machos, y cachorros, demostraron la utilidad de la telemetría por GPS para determinar cuando los miembros del grupo viajaban juntos o separados (Merrill y Mech, 2003).

Conforme la tecnología avanza y los componentes electrónicos se hacen más pequeños se logra una disminución significativa en el peso y tamaño. A principios del año 2000 surgió la tecnología de comunicación basada en la red GSM (Global System For Mobile Communications). Esta forma de transmisión utiliza la red de telefonía celular para la transmisión de datos sobre una extensa área geográfica. La tecnología no pasó desapercibida por los interesados en el rastreo de fauna silvestre, por lo que ya ha sido utilizada, prueba de esto es el estudio del comportamiento del oso pardo en Finlandia (Sundell *et al.*, 2006). Entre las mayores ventajas de la telemetría por GSM se encuentran, la comunicación a dos vías (envío y recepción simultánea), el bajo costo de mantenimiento y el bajo costo en la transmisión de datos.

En algunos estudios con animales de tamaño reducido, el uso de la tecnología denominada PIT (Passive Integrated Transponder) tagging es más adecuado. El PIT tagging, es una tecnología que funciona como marcadores codificados, una especie de huella digital electrónica para la identificación individual. Un PIT tag es un microchip encapsulado en un material biocompatible, de entre 10 a 14 milímetros de largo y 2 milímetros de diámetro que contiene un código digital único. Los tags son colocados bajo la piel del individuo mediante una inyección o insertados quirúrgicamente, permaneciendo inactivos hasta que son energizados por un dispositivo lector, para lograr esto, el lector genera un pequeño campo electromagnético que activa la etiqueta y transmite un código único con el cual el individuo portador puede ser identificado (Gibbons y Andrews, 2004).

El PIT tagging ha sido utilizado con éxito en los estudios de movimiento con pequeños mamíferos (Harper y Batzli, 1996) y ampliamente en peces, ya que su uso es ideal para especies pequeñas (Brännäs *et al.*, 1994). Gracias a su reducido tamaño, se ha podido responder a preguntas relativas a las tasas de crecimiento, supervivencia, redes alimentarias, y patrones de movimiento. Una de las principales ventajas frente a los métodos de marcado y recaptura es que los animales marcados no tienen que ser recapturados, sólo tienen que pasar cerca de la antena del dispositivo lector, automatizando así el sistema de lectura. Las distancias de recepción varían dependiendo del medio, pero en promedio se han reportado a menos de dos metros (Cooke, 2013).

Los patrones de comportamiento de la fauna son variados entre especies, por lo que es difícil desarrollar una tecnología que pueda satisfacer todas las necesidades de

investigación. En su lugar se debe optar por una especificación en el desarrollo de los dispositivos y sistemas para que empleen adecuadamente los múltiples tipos de transmisión de datos y los diversos sensores, así los parámetros obtenidos serán específicos para las especies en estudio, por ejemplo, para los animales con comportamiento social. Los mejores intentos de medir las interacciones en grupos de animales sociales mediante tasas de contacto, se han basado en datos obtenidos con observaciones directas. Algunos métodos más adecuados para la obtención de este tipo de información mediante la telemetría, ha sido utilizando sensores de proximidad, midiendo encuentros entre individuos en un rango de menos de 40 cm (Ji *et al.*, 2005).

Uno de los avances más recientes en telemetría para monitoreo ha sido el desarrollo del sistema Encounternet, el cuál es una nueva tecnología que ofrece ventajas respecto a las tecnologías anteriores, ésta se basa en la radio digital y el monitoreo automatizado para pequeños animales (Mennill *et al.*, 2012). Encounternet es un sistema que utiliza nodos similares a los tags PIT, la diferencia fundamental es el cambio de tecnología pasiva a tecnología activa, es decir, en lugar de un simple transmisor de radio, se utiliza un complejo sistema compuesto de tres elementos principales; sensores, microcontroladores y un transmisor digital. Esta combinación de elementos permite al sistema Encounternet obtener información sobre posición, aceleración, temperatura, entre otros. En cada tag o nodo se compone de estos tres elementos, el microcontrolador es el encargado de procesar la señal análoga captada por los sensores, para después convertirla a una señal digital. Posteriormente la señal es transmitida mediante pulsos hasta una estación base. Esta estación base se encarga de registrar cada uno de los pulsos o eventos, y guardar un historial de cada uno de los nodos desplegados. La estación funciona de manera automatizada, y la información que contiene puede ser accedida de manera remota usando un nodo maestro. El nodo maestro es una de las partes más fundamentales del sistema ya que es por este medio que se recoge la información recabada por largos periodos de tiempo. El microcontrolador al ser de naturaleza programable, ofrece una ventaja sin precedentes en relación a otros tipos sistemas.

Si bien las distintas tecnologías de telemetría mencionadas satisfacen necesidades para la obtención de información sobre individuos en su medio natural y de manera remota, quedan aún muchas limitantes que no se han podido satisfacer debido a diversos factores tecnológico. Por ejemplo, en la radio telemetría es la falta de precisión para la

localización una vez desplegado en campo, en el caso de la telemetría satelital, la precisión es mayor, pero depende de la transmisión satelital en la banda denominada SHF (Super High Frequency), la cual además de ser una transmisión con un costo muy elevado, conlleva un consumo energético mayor. En la telemetría GSM la mayor limitante es la cobertura de la red celular y en el PIT tagging es la distancia de transmisión.

Encounternet es una clara muestra del tipo de tecnologías que se pueden desarrollar unificando las tecnologías existentes y que pueden satisfacer las necesidades de estudios con grupos de individuos. Desafortunadamente, esta tecnología no proporciona ubicaciones espaciales de cada uno de los individuos rastreados, en su lugar, la ubicación se da a razón de distancias entre individuos, por lo que la precisión es inadecuada.

Los dispositivos de rastreo deben ser lo suficientemente pequeños para que los individuos sujetos a la investigación puedan soportar su peso sin afectar su comportamiento, además, deben transmitir con la potencia suficiente que permita su detección. Otra de las características más importantes es la precisión en el cálculo de la ubicación. Estas necesidades de precisión y potencia de transmisión, así como la relación peso-tamaño han sido históricamente la mayor dificultad en especies que requieren ser estudiadas por largos periodos de tiempo. La respuesta más obvia a estas necesidades fue la inclusión de fuentes de energía de gran capacidad. Desgraciadamente las baterías tienen un costo en el peso y el tamaño en los dispositivos, por lo que se debe optar por minimizar la frecuencia y duración de las transmisiones para prolongar la vida útil de la fuente de energía, o por fuentes de energía más grandes y en consecuencia, potencias y periodos de transmisión más prolongados. A pesar del constante desarrollo tecnológico de fuentes de energía, estas siguen siendo de tamaño considerable.

En la actualidad, la manera más idónea de monitorear variables en un espacio determinado es mediante el uso de redes inalámbricas de sensores. Las redes inalámbricas de sensores o SWN (Wireless Sensor Networks) son conjuntos de dispositivos de comunicación inalámbrica denominados nodos, los cuales permiten la recolección de datos de su entorno y el envío de esta información mediante protocolos de comunicación que están específicamente diseñados para gestionar eficientemente el uso de energía. Esta clase de redes se caracterizan por su facilidad de despliegue y por

ser autoconfigurables, pudiendo convertir a los nodos en todo momento en emisor, receptor, y puentes de comunicación entre nodos sin visión directa. Los nodos consisten típicamente en un radiotransmisor, un microcontrolador, y sensores que le permiten medir variables o funcionar como actuadores.

La implementación de redes inalámbricas de sensores ha dado auge a sistemas inteligentes de monitoreo en diversas zonas de interés. Para el caso específico de monitoreo de fauna, se ha empleado para detectar la presencia de elefantes en zonas habitadas (Nakandala *et al.*, 2014), para mantener videovigilancia sobre comunidades de animales (Costa y Guedes, 2010) y hasta para evitar colisiones de vehículos con animales en carreteras (Viani *et al.*, 2011). Sin embargo, en los ejemplos citados se reportan redes inalámbricas de sensores con topologías fijas. Los individuos son detectados mediante radio bases, normalmente consistentes en nodos de la red en posiciones fijas, lo cual limita el área de estudio a la cobertura del alcance de los nodos. Los avances en la microelectrónica y las telecomunicaciones ha permitido la miniaturización de componentes electrónicos y por lo tanto la creación de circuitos electrónicos de tamaño reducido. La miniaturización de estos componentes electrónicos nos permite diseñar circuitos de nodos que permitan comunicación inalámbrica confiable, con bajo consumo de energía y bajas tasas de transmisión para nuevas aplicaciones de monitoreo, en las que son necesarias características específicas que nos pueden ser satisfechas debido a la naturaleza fija de las topologías de redes inalámbricas de sensores que son usadas para este fin.

Justificación

Modelar el movimiento animal es importante para poder responder a las múltiples preguntas en ecología. Por ejemplo, saber a dónde y por qué se mueven las poblaciones dado que las actividades humanas afectan directamente su hábitat y por lo tanto implican un gran riesgo a esa movilidad, analizar y describir los patrones de ámbito hogareño, calcular el tamaño efectivo de una población, y en el caso específico de la fauna silvestre con comportamiento social, la posibilidad de hacer mejores modelos que informen sobre sus interacciones y la emergencia de patrones colectivos de uso del hábitat, cooperación, navegación, propagación de enfermedades, etc.

Las actuales tecnologías de telemetría involucradas en el monitoreo del movimiento de fauna silvestre, entre las que se encuentran la radio telemetría, la telemetría satelital, la telemetría por GSM, etc., se utilizan principalmente para rastrear y obtener información de manera individual, es decir, entre un usuario y el animal portador. Esto es inadecuado para la obtención de información de especies que requieren de la observación de grupos de individuos. Las nuevas tecnologías de transmisión de datos, protocolos de comunicación y sensores de diversos tipos, pueden ser utilizados para desarrollar un sistema que tome ventaja de estas tecnologías, respondiendo así a las necesidades de estudios en las que la información de grupos de individuos son requeridos en su conjunto.

La presente investigación ofrece una alternativa a las tecnologías de telemetría más usadas, empleando un sistema conformado por nodos de sensores inalámbricos portados por los individuos bajo estudio mediante el uso de collares. Esta red, basada en el protocolo de comunicación DigiMesh para redes inalámbricas de sensores, establece comunicación entre todos los dispositivos desplegados en un área determinada, recolectando la información de los nodos de manera autónoma y simultánea, y logrando tanto una transmisión confiable como un consumo energético reducido, ampliando de esta manera la autonomía del sistema. Mediante localización vía GPS, se puede contar con información sobre la ubicación espacial y temporal de cada uno de los dispositivos de la red. La información recabada, al ser compartida por toda la red, logra el respaldo y acceso a la información desde cualquier punto de la misma. La obtención de información mediante una red de dispositivos que puedan comunicarse entre sí, proporcionará mejoras importantes frente a otros sistemas, esto es una clara ventaja en comparación con las tecnologías actuales de telemetría o en sistemas que utilizan comunicaciones punto a punto para el monitoreo de fauna silvestre.

Animales equipados con este sistema de nodos, pueden coleccionar información de las posiciones espaciales de grupos enteros y facilitar el análisis y la descripción de los patrones de movimiento, para así dar respuesta a algunas preguntas sobre su comportamiento y contribuir a minimizar el daño a la biodiversidad y determinar el óptimo manejo y las estrategias de intervención para su conservación.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y construir un sistema telemétrico de bajo consumo energético para el despliegue de una red de monitoreo que sirva a los propósitos de la investigación de fauna silvestre.

Objetivos específicos

- Diseñar un dispositivo que incorpore sensores GPS, con capacidades de almacenamiento de datos y transmisión inalámbrica.
- Implementar protocolos de comunicación más eficientes en la transmisión de datos, en el manejo del consumo de energía del dispositivo y que permita el despliegue de una red para el intercambio de información entre dispositivos.
- Diseñar el circuito electrónico del dispositivo de rastreo.

Diseño y Construcción

Principio de funcionamiento

El sistema de monitoreo de fauna desarrollado, es un sistema conformado por collares, cada collar contiene un nodo con capacidades de geolocalización, almacenamiento de datos y comunicación inalámbrica. Los nodos constan de un microcontrolador, un chipset GPS, una tarjeta MicroSd, un reloj de tiempo real y un radiotransmisor con antena incorporada, los cuales son interconectados en una sola placa de circuito impreso alimentada por una fuente de energía externa (Figura 1).

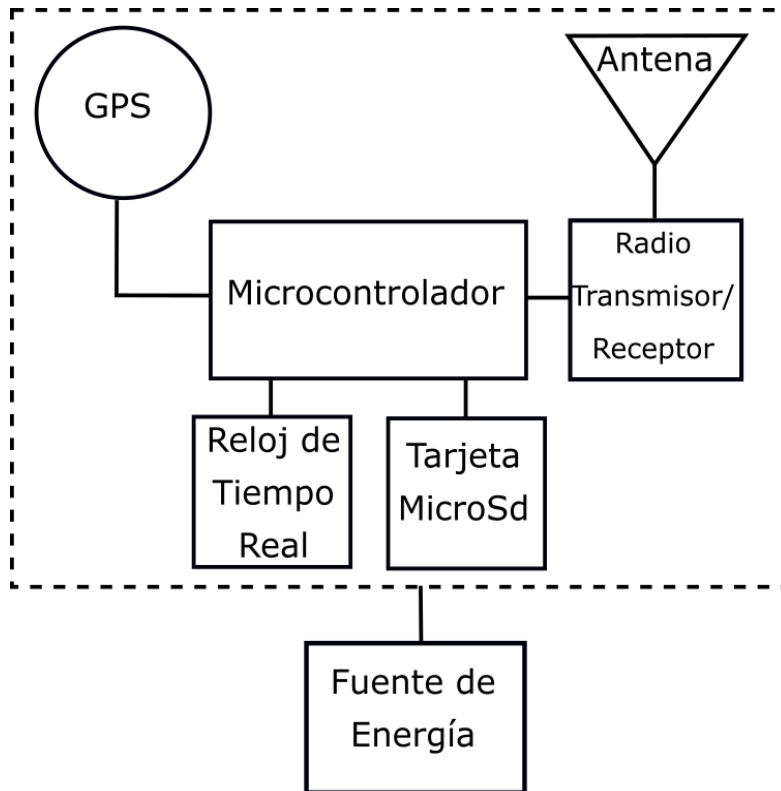


Figura 1. Diagrama a bloques de los principales componentes de los nodos del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

Para llevar a cabo la comunicación, el nodo utiliza el radio transmisor que opera un protocolo de comunicación de tipo Mesh. Este protocolo permite la comunicación entre todos los collares que sean desplegados en un área determinada por la cobertura de los radios, sin necesidad de mantener una topología fija y sin jerarquías maestro-esclavo. La comunicación puede llevarse a cabo siempre y cuando el área de cobertura del nodo (collar) que desea transmitir se encuentre en contacto con el área de cobertura de uno o más nodos cercanos. Estos nodos a su vez, cubren un área similar conectándose con nodos vecinos que se encuentran fuera de la cobertura del nodo transmisor pero dentro de la cobertura de estos segundos nodos, convirtiéndolos en un puente de comunicación y extendiendo el área de cobertura de la red de monitoreo a cualquier área en el que se encuentren subsecuentes nodos vecinos.

El módulo GPS le permite al nodo determinar las coordenadas geográficas (latitud y longitud) con una precisión de hasta 3 metros en intervalos de 1 segundo, así como el tiempo exacto en que se muestrea esta ubicación. Las ubicaciones son posteriormente guardadas en el módulo de almacenamiento consistente en una tarjeta MicroSd de 4 GB incorporada a la placa del circuito. El microcontrolador del nodo es programado para

mantener intervalos de muestreo e intervalos de inactividad en bajo consumo de energía en el hardware, lo cual se logra gracias a que cada nodo cuenta con un reloj de tiempo real con alarmas definidas por el usuario. Las alarmas permiten mantener al nodo en actividad solo cuando se requiera muestrear la posición, posterior a este muestreo el microcontrolador se encarga de cortar el suministro de energía al resto del hardware (radio, GPS y el módulo de almacenamiento) e inmediatamente entra en modo de bajo consumo hasta la siguiente alarma, logrando incrementar la vida útil de la fuente de energía.

Una vez reunidos una cantidad considerable de datos en el nodo durante los tiempos de actividad de los individuos, se puede compartir la información a los restantes nodos de la red en ventanas de transmisión (por ejemplo durante la madrugada). Con esta capacidad, los nodos mantienen el respaldo de la información de los demás nodos de la red, asegurando que la información obtenida (hasta el momento de la transmisión) no se pierda en caso de que algún individuo no se reúna nuevamente con el grupo sometido a monitoreo. Posteriormente, la información de las posiciones puede ser extraída por el usuario al recuperar físicamente el collar o de manera remota (desde cualquier punto de la red) utilizando comunicación inalámbrica con un nodo similar a los portados por los individuos.

Una población de individuos de fauna silvestre portando estos collares y moviéndose en conjunto en un área cualquiera, convierte al sistema de collares en una red autónoma de nodos móviles. Uno o más individuos que se alejen del hipotético grupo, pueden mantener los nodos operando sin ningún problema ya que no dependen de un nodo principal para su funcionamiento, una vez que regresen al grupo pueden transmitir la información en el momento en que se les haya programado. Con estas características el sistema de nodos permite automatizar la obtención de información de manera remota y continua en poblaciones de fauna silvestre, aún con especies evasivas.

Protocolos de comunicación

Para poder integrar los diferentes componentes que conforman el hardware de los nodos, es necesario entender el funcionamiento básico de los protocolos que rigen la comunicación entre los dispositivos. Los protocolos utilizados son: SPI, I2C, UART, DigiMesh y MTK NMEA Packet. A continuación se describe su funcionamiento.

SPI

El protocolo SPI (Serial Peripheral Interface), consiste en una transmisión bidireccional de datos síncrona a tres hilos, lo cual permite altas velocidades de transmisión. Se basa en la jerarquía Master-Slave (Figura 2). En este protocolo un único dispositivo central (generalmente un microcontrolador) inicia la comunicación con los esclavos (dispositivos como el MicroSd Card).

Para este tipo de comunicación, son necesarias 4 líneas principales, los cuales son:

- SS o Chip Select: Es la línea de selección de esclavo que se va a comunicar con el maestro. Habrá tantos pines SS como número de periféricos conectados al bus.
- MOSI (Master Out/Slave In): Es la salida de datos para el maestro y la entrada de datos para el esclavo.
- MISO (Master In/Slave OUT): Es la entrada de datos para el maestro y la salida para el esclavo.
- SCLK: Es la salida de reloj del maestro y la entrada de reloj para el esclavo o esclavos.

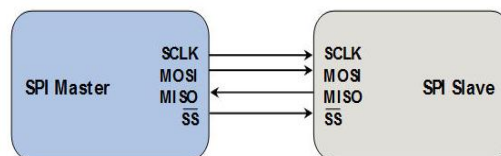


Figura 2. Topología del bus de datos de una conexión mediante SPI entre un Master y un Slave. Fuente: Product Datasheet Digi International.

La topología permite tener más de un esclavo mediante una conexión punto-multipunto, para seleccionar el dispositivo sobre el que se leerá o escribirá, se utilizan las señales SS, por lo que existe una línea SS por cada dispositivo. Los comandos enviados por el bus solo serán reconocidos por el dispositivo seleccionado mediante estas líneas (Figura 3). Cuando el Master necesita enviar o recibir datos a más de un dispositivo esclavo, este selecciona dicho dispositivo al poner la línea Chip Select en estado bajo (voltaje a 0) y activando la señal de reloj (SCLK) a una frecuencia en común entre el esclavo y el Master, el Master genera entonces la información en la línea MOSI y se realiza un muestreo de la información proveniente de la línea MISO.

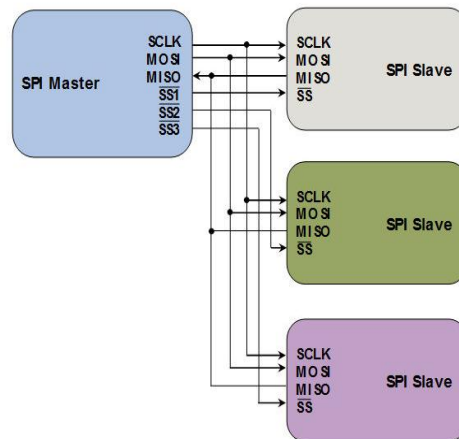


Figura 3. Topología del bus de datos de una conexión SPI entre un Master y múltiples Slaves. Fuente: Product Data sheet Digi International.

Existen 4 modos para la comunicación SPI, los cuales definen la sensibilidad al borde (pendiente generada al pasar de estado bajo a alto y viceversa) en la cual la línea MOSI puede cambiar y en la cual se hace el muestreo de la línea MISO para obtener la información. Los datos en las líneas MOSI y MISO cambian al cambiar el estado del SCLK de alto a bajo. Cuando el estado de SCLK cambia de bajo a alto se realiza el muestreo de los datos en MISO y paralelamente se envía información en MOSI tal como se ilustra en la Figura 4.

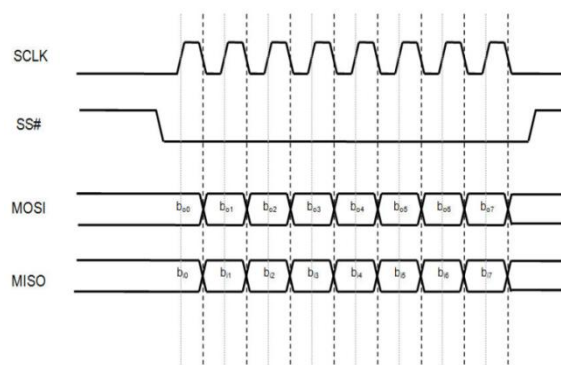


Figura 4. Comunicación SPI. Fuente: Product Data sheet Digi International.

I2C

El protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit) es un bus de dos hilos con interfaz serie. Fue diseñado por Philips a principios de 1980 para permitir una comunicación sencilla entre componentes que pertenecen a una misma placa de circuito electrónico, específicamente

microcontroladores. Permite la interconexión de hasta 128 dispositivos diferentes (0 a 7F en hexadecimal) usando las dos líneas bidireccionales de bus. No se requiere un baud rate fijo, en su lugar se utiliza una señal para el reloj SCK (serial clock) de hasta 400 kHz y otra para los datos SDA (serial data). Para la implementación únicamente son necesarias dos resistencias pull-up, una para cada línea.

Cada uno de los dispositivos conectados al bus tienen una dirección única, esta dirección se utiliza para seleccionar un dispositivo en concreto del bus. La comunicación consistirá en que un dispositivo direcciona a otro, con lo que los siguientes eventos del bus solo los atenderá ese dispositivo. Con un dispositivo direccionado se pueden enviar comandos o acceder a sus registros de memoria para leerlos o escribirlos. La topología se muestra en la Figura 12.

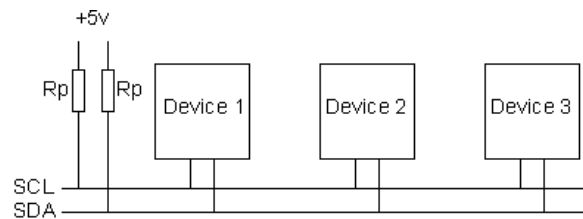


Figura 5. Topología del protocolo I2C. Fuente: <http://www.robot-electronics.co.uk>

Los dispositivos en el bus I2C pueden ser maestros o esclavos. El maestro es quien genera la señal de reloj SCL, por lo que el esclavo no puede iniciar una transferencia en el bus ya que solo el maestro incorpora la señal de reloj.

UART

Se trata de un puerto de comunicaciones serie muy versátil denominado Universal Asynchronous Serial Receiver and Transmitter. Son comúnmente encontrados en microcontroladores ya que utilizan voltajes TTL (transistor-transistor logic). Los pines de conexión que se utilizan son los siguientes:

- RXD: Puerto de entrada de datos.
- TXD: Puerto de salida de datos.
- SCK: Señal de reloj (solo para el modo síncrono).

Se pueden configurar las velocidades de transmisión y el número de bits de datos a transmitir (entre 5 y 9), por lo que el protocolo UART puede aceptar un total de 30 combinaciones de formato de tramas.

MTK NMEA Packet Protocol

Las tramas de las sentencias NMEA (National Marine Electronics Association sentences) son un formato estándar para los datos del GPS que están contenidos en esta única línea con elementos separados por comas. El MTK NMEA Packet Protocol es un protocolo propietario de MediaTek, Inc., que permite al chipset MTK3339 obtener los datos de las tramas NMEA provenientes de las señales de satélite. La estructura de estas tramas se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Estructura de las tramas NMEA. Fuente: GPS Standalone Module Data Sheet.

Preamble	Talker ID	Pkt Type	Date Field	*	CHK1	CHK2	CR	LF
----------	-----------	----------	------------	---	------	------	----	----

En donde cada campo contiene valores específicos para los diferentes tipos de tramas, tal como se ejemplifica en la Tabla 2:

Tabla 2. Descripción de los valores específicos de la trama. Fuente: GPS Standalone Module Data Sheet.

Campo	Tamaño	Tipo	Descripción
Preamble	1 byte	Caracter	“\$”
Talker ID	4 bytes	Cadena de caracteres	“PMTK”
Pkt type	3 bytes	Cadena de caracteres	De “000” a “999”, es un identificador usado para indicarle al decodificador cómo interpretar el campo Data Field

Data Field	Variable	Carácter	Una “,” debe ser insertada antes de cada campo para que el decodificador procese los datos de este campo correctamente
*	1 byte	Carácter	El símbolo “*” es usado para marcar el final del campo de los datos
CHK1, CHK2	2 byte	Cadena de caracteres	Checksum de los datos entre “,” y “*”
CR,LF	2 byte	Datos binarios	Usados para identificar el final de la trama

Con esta información, y recurriendo al Datasheet del GPS (GlobalTop Tech, 2011) podemos identificar la información de cualquier sentencia recibida desde el módulo GPS. Por ejemplo, para la sentencia RMC (Recommended Minimum): \$GPRMC,123519,A,4807.038,N,01131.000,E,022.4,084.4,230394,003.1,W*6A el mensaje y el significado de los diversos campos son los mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Interpretación de la sentencia. Fuente: GPS Standalone Module Data Sheet.

Valor	Descripción
RMC	Recommended Minimum sentence C
123519	Fix al satélite obtenido a las 12:35:19 UTC
A	Status A=activo o V=inválido

4807.038,N	Latitud 48° 07.038' N
01131.000,E	Longitud 11° 31.000' E
022.4	Velocidad relativa al suelo en nudos
084.4	Track angle en grados
230394	Fecha: 23 de Marzo de 1994
003.1,W	Variación magnética
*6A	Checksum de los datos, empezando siempre con *

DigiMesh

DigiMesh es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para los radiotransmisores Xbee basado en el estándar IEEE 801.14.5 de redes inalámbricas de área personal. Se enfoca en las capas físicas (physical layer) y de acceso al medio del protocolo (Medium Access Control o MAC). El protocolo DigiMesh consiste en una comunicación Mesh mediante nodos repetidores (Figura 6), formando una red Mesh o de malla, en que los datos son enviados a través de distintos nodos hasta encontrar al nodo final, esto gracias a que a diferencia de protocolos basados enteramente en el estándar IEEE 801.14.5, solo existe un tipo de nodo, lo cual hace a la red más homogénea. Es similar en algunas características al protocolo Zigbee ya que ambos soportan la topología punto multipunto, sin embargo, DigiMesh tiene características especiales que le dan una ventaja importante en algunas aplicaciones en particular.

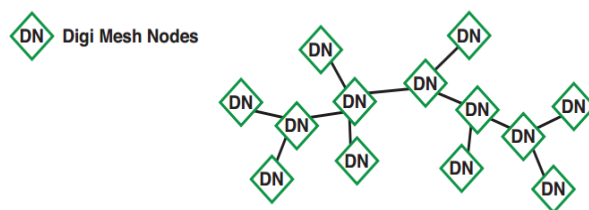


Figura 6. Red DigiMesh. Fuente: Product Data sheet Digi International.

Las características más destacadas del protocolo que difieren de protocolos similares son:

- Self-healing: Este proceso determina automáticamente si un nodo de la red no está presente y la reconfigura para reparar la ruta, de este modo cualquier nodo puede entrar o salir de la red en cualquier momento sin causar fallos.
- Route Discovery: En lugar de mantener un ruteo establecido para la red, las rutas son descubiertas y creadas en caso de fallas, solo cuando es necesario.
- Arquitectura P2P (Peer to Peer): Este proceso crea una red entera de nodos sobre la marcha, sin necesidad de ninguna intervención por parte del usuario. Las jerarquías y relaciones Parent-child no son necesarias.
- Modo Sleep en todos los nodos: El modo Sleep es soportado por todos los nodos de la red.

Para la banda de frecuencia de 900 MHz, la distribución de los canales disponibles en el espectro de frecuencia se distribuye de la manera en que se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Canales disponibles en el espectro de frecuencias de 900 MHz Fuente:

Elaboración propia.

Número de canal	Frecuencia
0x01 – Canal 1	902 – 904,16 MHz

0x02 – Canal 2	904,16 – 906,32 MHz
0x03 – Canal 3	906,32 – 908,48 MHz
0x04 – Canal 4	908,48 – 910,64 MHz
0x05 – Canal 5	910,64 – 912,80 MHz
0x06 – Canal 6	912,80 – 914,96 MHz
0x07 – Canal 7	914,96 – 917,12 MHz
0x08 – Canal 8	917,12 – 919,28 MHz
0x09 – Canal 9	919,28 – 921,44 MHz
0x0A – Canal 10	921,44 – 923,6 MHz
0x0B – Canal 11	923,6 – 925,76 MHz
0x0C – Canal 12	925,76 – 928 MHz

Para la banda de 2.4 GHz, se dispone de los 12 canales mostrados en la tabla 5.

Tabla 5. Canales disponibles en el espectro de frecuencias de 900 MHz Fuente:

Elaboración propia.

Número de canal	Frecuencia
0x0c – Canal 12	2.405 – 2.410 GHz
0x0D – Canal 13	2.410 – 2.415 GHz
0x0E – Canal 14	2.415 – 2.420 GHz
0x0F – Canal 15	2.420 – 2.425 GHz
0x10 – Canal 16	2.425 – 2.430 GHz
0x11 – Canal 17	2.430 – 2.435 GHz
0x12 – Canal 18	2.435 – 2.440 GHz
0x13 – Canal 19	2.440 – 2.445 GHz
0x14 – Canal 20	2.445 – 2.450

	GHz
0x15 – Canal 21	2.450 – 2.455 GHz
0x16 – Canal 22	2.455 – 2.460 G GHz
0x17– Canal 23	2.460 – 2.465 GHz

Modos de operación

Modo Transparente

El modo transparente es un modo de comunicación que permite a dos nodos comunicarse directamente mediante el protocolo DigiMesh, es decir, actúa de la misma forma que una comunicación en serie. Todos los datos recibidos en los pines de entrada del radio son enviados hacia el host exactamente como fueron recibidos. Esta comunicación es similar a tener dos nodos conectados directamente de manera física. Para que la comunicación se establezca, el radio transmisor debe tener configurada la dirección del radio al que se le envía la información y viceversa. Sin embargo, este modo tiene como limitante la necesidad de modificar la dirección de destino para cada nodo al que se desee transmitir dentro de una determinada red.

Modo API

En algunos casos la transmisión de datos requiere de ciertas estructuras y funciones para que pueda llevarse a cabo. Debido a la limitación en la carga útil que se puede enviar en cada transmisión, normalmente se fragmentan los paquetes de datos en tramas más pequeñas. Es por eso que este protocolo de comunicación emplea encabezados o headers que se encargan del trabajo complejo que conlleva fragmentar y reensamblar los paquetes para su envío o recepción. El encabezado se envía dentro de los mismos datos a transmitir siguiendo la estructura denominada API (Application Programming Interface) (Figura 7).

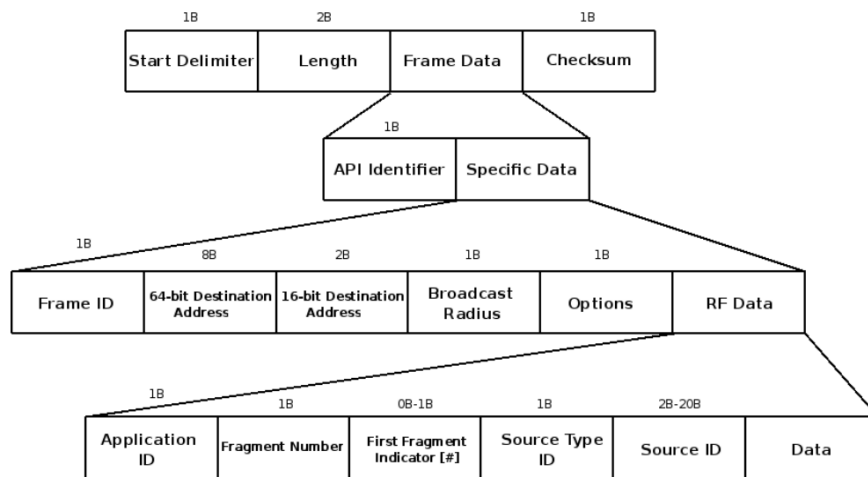


Figura 7. Estructura de la trama API. Fuente: Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. (2012).

En el modo de operación API se extienden las posibilidades de interacción de un host determinado con las capacidades de networking del módulo Xbee, por ejemplo, permite configurar módulos remotos desde la capa de aplicación del host solicitante. Este modo es más complejo, pero el uso de frames o tramas con cabeceras asegura la entrega de los datos. La composición principal de los frames es la siguiente:

- Start delimiter: Todas las tramas empiezan con el valor hexadecimal 0x7E para indicar el inicio de la trama.
- Length (2 bytes): Número de bytes de la trama sin incluir el checksum. Se divide en dos partes: MSB (most significant byte) y LSB (less significant byte).
- Frame Data: Se incluye el API identifier (un valor único que identifica la función de la trama).
- cmd-Data: Datos a ser transmitidos.
- Checksum: Suma de verificación para identificar posibles errores en la trama que se ha enviado.

Por ejemplo, si se quisiera enviar el valor “100” en formato ASCII (para el carácter 1 esto sería 31 en valor hexadecimal, para “0” ”0” sería 30 30 y para el Carriage Return sería 5D) a un nodo con dirección 0x0002 (dirección de destino de 16 bytes) la trama contendría la información mostrada en la Tabla 6.

Tabla 6. Trama API para el envío de los caracteres ASCII "100". Fuente: Elaboración propia.

Nombre del Campo	Valor
Delimiter	7E
Length	00
API Identifier	01
FrameID	01
16 Destination Address	0002
Options	00
RF Data	313030D
Checksum	5D
Packet	7E 00 09 01 01 00 02 00 31 30 30 0D 5D

EL paquete resultante para ser transmitido sería: “7E 00 09 01 01 00 02 00 31 30 30 0D 5D”. Existen varios tipos de tramas API y cada una ofrece distintas prestaciones: comandos de configuración, transmisión de datos, reconocimiento de mensajes, etc.

Direccionamiento

Unicast

La transmisión unicast es un tipo de comunicación que permite la entrega confiable de datos entre dos nodos de la red, ya que utiliza un paquete de confirmación de recepción de información conocido como Acknowledge o ACK, así como una serie de retransmisiones en caso de que no se haya confirmado la recepción de la información por el nodo destinatario. De esta manera se garantiza que la información se reciba siempre que exista un enlace entre dos nodos, ya sea directamente o mediante nodos intermediarios.

Broadcast

En algunas situaciones, es necesario enviar información no solo de un nodo a otro en específico, sino a todos los nodos de la red, para lo cual es recomendable usar la transmisión Broadcast. En este tipo de transmisión, todos los nodos de una red reciben y retransmiten la información recibida. En este tipo de transmisión, no se utiliza ningún tipo de paquete de confirmación de recepción, por lo cual, se repite la transmisión múltiples veces para asegurar que sea escuchado por algún nodo vecino. Esto implica que los restantes nodos deben retransmitir la misma cantidad de veces en toda la red hasta que el nodo más lejano del transmisor reciba los datos.

La implementación de este protocolo es una de las mayores innovaciones de este sistema, ya que permite, con las características descritas, crear una red homogénea de dispositivos sin jerarquías que puedan interactuar dentro de una red específica, evadiendo así la necesidad de un control centralizado que se encargue de tareas complejas como lo es la administración de la red. En grupos de individuos de fauna silvestre con movimientos impredecibles, el uso de este protocolo permite mantener a un conjunto de nodos en operación sin la necesidad de ser supervisado.

Selección del hardware

La selección del hardware se realizó con base en los requerimientos del sistema, los cuales son, la potencia de transmisión, el sensor de posicionamiento, la unidad de control/procesado de datos y la transmisión multipunto mediante redes inalámbricas de sensores.

Microcontrolador

El microcontrolador es un circuito integrado programable que nos permite efectuar determinadas tareas, como controlar el funcionamiento de otros componentes electrónicos o recibir, procesar, y enviar datos mediante sus puertos de comunicación.

Se compone de diferentes elementos que cumplen una tareas específicas, entre los que destacan, la unidad central de procesamiento, la memoria RAM, la memoria del programa, los puertos de entrada y salida, el convertidor analógico a digital, oscilador etc.

Para las necesidades de este proyecto se eligió el microcontrolador Atmega 328p (Figura 8) perteneciente a la compañía Atmel. El microcontrolador Atmega 328p es un microchip de alto performance y bajo consumo de energía con arquitectura RISC de 8 bits. Dispone de una memoria flash de 32 KB, una memoria SRAM de 2 KB y una memoria EEPROM de 1 KB, 23 pines de entrada/salida de propósito general, 32 registros de propósito general, interrupciones internas y externas, puerto de comunicación SPI, UART e I2C, y funciona entre 1.8 y 5.5 Volts.

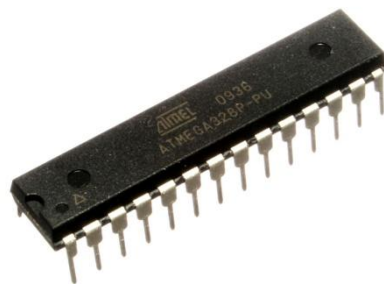


Figura 8. Microcontrolador Atmega 328p de 8 bits. Fuente: ATmega328/P Complete Datasheet

La razón principal para la elección de este microcontrolador es la capacidad para programarlo mediante el entorno de desarrollo integrado (IDE) utilizando la plataforma Arduino UNO, lo cual facilita ampliamente el desarrollo del prototipo. Arduino es una plataforma electrónica de hardware abierto (open source) basada en la arquitectura de los microcontroladores AVR de ATMEL, la plataforma Arduino UNO en específico utiliza el microcontrolador Atmega 328p. Esta plataforma tiene 14 pines digitales de entrada/salida de los cuales 6 pueden ser configurados como salidas analógicas PWM, 6 entradas analógicas, un reloj de frecuencia a 16MHz, conector USB, powerjack, pin programador ICSP y botón de reset. Arduino puede tomar información del entorno de toda una gama de sensores a través de estos pines de entrada y puede afectar el medio a

- GND: Pines a tierra (ground).
- IOREF: Proporciona la tensión a la que está referenciado el microcontrolador.
- Conector Jack hembra (2.1mm): permite la alimentación de la tarjeta.

Cada uno de los 14 pines digitales que posee puede ser utilizado como entrada/salida mediante las funciones relativas a su estado, trabajan a 5V con un suministro máximo de corriente de 40mA y poseen una resistencia interna de pull-up, además diversos pines tienen funciones especializadas entre los que destacan:

- Serial RX (0) y TX (1): Usados para recibir y transmitir datos serie TTL.
- Interrupciones 2 y 3: Pueden ser configurados mediante la función apropiada para capturar interrupciones tanto por flanco de subida como de bajada.
- PWM 3, 5, 6, 9, 10 y 11: Proveen mediante función una tensión de salida con resolución de 8 bits.
- SPI 10(SS), 11(MOSI), 12(MISO), 13(SCK): Permiten la gestión y comunicación de periféricos mediante comunicación SPI.
- LED 13: Led soldado en la placa.

Posee además 2 pines analógicos de funciones especializadas que permiten la comunicación I2C:

- A4 (SDA)
- A5 (SCL)

Así como otros pines analógicos son AREF que es el voltaje de referencia de los pines analógicos y RESET que mediante un flanco de bajada provoca el reset del microcontrolador.

La plataforma Arduino se programa mediante el uso de un lenguaje propio basado en el lenguaje de alto nivel Processing. La inclusión de múltiples librerías para distintos periféricos y protocolos de comunicación hacen de esta plataforma un recurso ideal para desarrollar los prototipos de los nodos del sistema.

Módulo GPS

El receptor GPS (Global Positioning System) es un dispositivo que nos permite obtener la posición en la superficie terrestre. El módulo GPS utilizado en este sistema es el Adafruit Ultimate GPS (Figura 10) que cuenta con un Chipset Mediatek MTK3339. Sus principales características son:

- Sensibilidad de -165 dBm
- Tasa de refresco de hasta 10 Hz
- 66 canales (hasta 22 satélites)
- Voltaje de operación de 3.3 a 5V
- Bajo consumo de energía (20 mA)
- Antena interna y opción de antena externa (conector u.FL)
- Precisión >3 m.

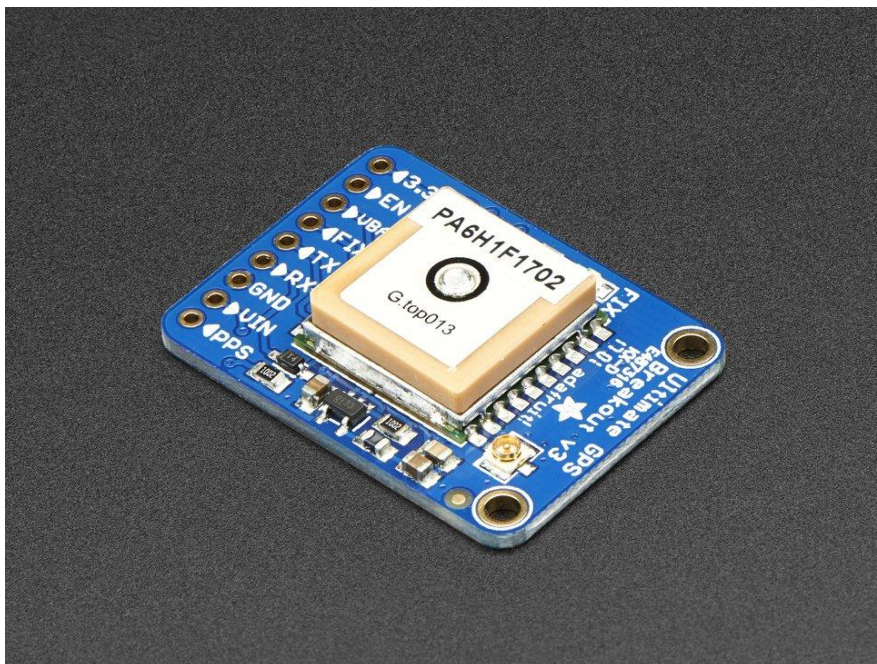


Figura 10. Adafruit Ultimate GPS Breakout GlobalTop GPS Standalone Module.

Fuente: GlobalTop GPS Standalone Datasheet

Módulo MicroSD

La memoria flash del microcontrolador es de apenas 32 KB (5 de los cuáles son usados por el bootloader de la plataforma Arduino uno), lo cual limita la cantidad de datos procedentes del módulo GPS que puedan ser guardados. Debido a esto se optó por utilizar almacenamiento externo mediante el uso de tarjetas MicroSD. Las tarjetas MicroSD (Secure Digital) son una solución efectiva para ampliar la capacidad de almacenamiento de los nodos ya que pueden proporcionar más capacidad de almacenamiento.

Existen cuatro estándares diferentes de tarjetas SD, las dos más comunes son Standard (hasta 4GB) y High Capacity o SDHC (hasta 32GB), los cuáles varían en capacidad y velocidad de escritura y lectura de datos. Para este proyecto se utilizarán la versión Standard o SD dado que la cantidad de datos esperados no supera la capacidad de la tarjeta con menor capacidad.

Los datos en las tarjetas SD están organizados típicamente como un sistema de archivos FAT 12/16. En el caso de las tarjetas con capacidad mayor a 4 GB se utiliza el formato de archivos FAT 32. Las tarjetas tienen un arreglo de memoria flash que controla la escritura, lectura, borrado etc. Los datos son transferidos entre la memoria y el host, en este caso el microcontrolador, a través de bloques de datos de 512 bytes.

La comunicación se lleva a cabo al enviar comandos y recibir respuestas desde la tarjeta. Un comando válido para una SD card consiste en 48 bits como se muestra en la Tabla 7. Consisten de un bit de inicio puesto a 0 y 1 seguidos de un número de comando de 6 bits y su respectivo argumento de 32 bits. Los restantes 8 bits son conformados por un Cyclic Redundancy Check (CRC) code y un bit de parada 1. Como en la mayoría de las comunicaciones, este código es usado para verificar la integridad del comando recibido.

Tabla 7. Comandos para establecer comunicación con la tarjeta SD. Fuente: Elaboración propia

47	46	45 ... 40	39 ... 8	7 ... 1	0
0	1	Número de Comando	Argumento	CRC	1

El módulo elegido es el MicroSD card breakout board de Adafruit Industries mostrado en la Figura 11, ya que este módulo cuenta con su propio regulador de voltaje de alimentación lo que le permite operar en un rango de entre 3 a 5 Volts, siendo un intervalo de operación compatible con el resto de los componentes. La comunicación con el microcontrolador se realiza mediante SPI.

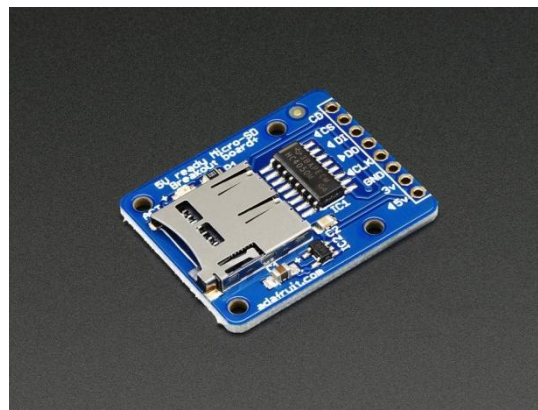


Figura 11. Módulo Micro SD card breakout. Fuente: www.adafruit.com

Reloj de tiempo real

La sincronización entre los dispositivos del sistema es de suma importancia para el correcto funcionamiento de la red, por lo que para llevar el conteo del tiempo se optó por incorporar un reloj de tiempo real. Este reloj permite al microcontrolador establecer intervalos de activación del sensor, comunicación inalámbrica, recepción de datos, y del mismo modo, mantener periodos de bajo consumo de energía entre los dispositivos del sistema por intervalos predeterminados. Para suplir esta función, se seleccionó el RTC DS3231 embebido en el módulo ZS-042 (Figura 12).



Figura 12. Módulo ZS-042. Fuente: www.arduino.cc

El DS3231 es un reloj en tiempo real de alta exactitud ya que cuenta con un oscilador de cristal con compensación de temperatura. Mantiene el registro de segundos, minutos, horas, día de la semana, mes y año. La fecha es ajustada automáticamente a final de mes para meses con menos de 31 días, incluyendo las correcciones para año bisiesto. La característica principal por la que se eligió este modelo en particular son las 2 alarmas programables que le permiten generar interrupciones a una hora y/o fecha programada. El DS3231 se comunica con el microcontrolador a través del bus I2C, tiene un bajo consumo de energía y posee además respaldo mediante una batería.

Transmisor

El radio transmisor Xbee es el módulo más importante del sistema de nodos, ya que es el encargado de recibir y transmitir los datos, los módulos soportan una variedad de protocolos de comunicación inalámbrica ya que fueron especialmente diseñados para ser implementados en redes inalámbricas de sensores. Al usar el protocolo de comunicación DigiMesh (que tienen como base el estándar IEEE 802.15.4) reducen significativamente la complejidad de las transmisiones de datos en la red. Además de la capacidad de estos módulos de comunicarse con los microcontroladores, tienen pines específicos que pueden hacerlos funcionar sin la necesidad de estos en casos particulares, ocuparse de las tareas propias de la comunicación por radio, y realizar operaciones con un nivel de lógica muy básico. Un módulo puede funcionar por sí solo para medir y transmitir directamente variables de periféricos que no necesiten del procesamiento de los datos, por ejemplo: magnitudes de un sensor de luminosidad. Gracias a sus pines de salida, puede interactuar con periféricos simples como motores o switches. Existen dos modelos de radiotransmisores que pueden ser usados para este

trabajo los cuales son: El radiotransmisor Xbee S3B 900HP y el Xbee 2.4 (mostrados en la Figura 13).

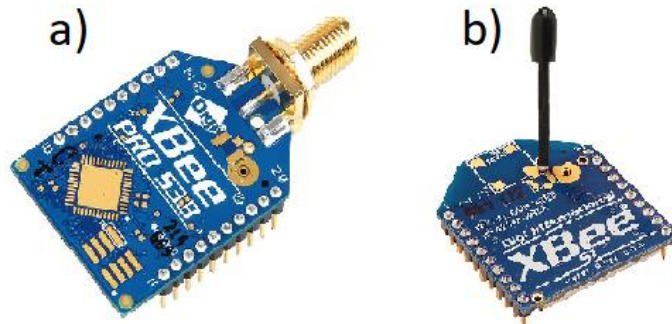


Figura 13. Módulo Xbee. a) Xbee S3B 900HP. b) Xbee 2.4 Fuente:

<http://www.digi.com/>

Los radios Xbee trabajan con un voltaje de operación de 3,3 voltios y aunque incorporan hasta 20 pines para distintas operaciones como reinicio o modo de bajo consumo, pueden funcionar con sólo 4 de sus pines principales: alimentación, tierra, y entrada y salida de datos. En la tabla 8 se nombran las características principales del los dos tipos de módulos Xbee que pueden ser utilizados para este sistema.

Tabla 8. Características principales del Xbee 900 HP y DigiMesh 2.4. Fuente:

www.Digi.com

Características	XBee-PRO 900HP	XBee DigiMesh 2.4
Procesador	ADF7023 transceiver, Cortex-M3 EFM32G230 @ 28 MHz	Silicon Labs EM357 SoC

Banda de frecuencias	de	902 a 928 MHz	2.4 GHz
Opciones de antena	de	Wire, U.FL y RPSMA	Through-Hole: PCB Antenna, U.FL Connector, RPSMA Connector, or Integrated Wire; SMT: RF Pad, PCB Antenna, or U.FL Connector
Performance			
Tasa de transferencia RF	de	10 Kbps o 200 Kbps	250 Kbps
Rango Interiores/ambiente urbano		10 Kbps: hasta 2000 ft (610 m); 200 Kbps: hasta 1000 ft (305 m)	250 Kbps, 60 m
Exterior con línea de vista		10 Kbps: 9 miles (14 km); 200 Kbps: 4 miles (6.5 km) (con	250 Kbps, 1200 m

	antena dipolo de 2.1 dB de ganancia)	
Potencia de transmisión	hasta 24 dBm (250 mW)	3.1 mW (+5 dBm)
Sensibilidad de recepción	-101 dBm @ 200 Kbps, - 110 dBm @ 10 Kbps	-100 dBm
Características		
Interface de datos	UART, SPI	UART, SPI
GPIO	hasta 15 Digital I/O, 4 entradas 10- bit ADC, 2 salidas PWM	hasta 15 Digital I/O
Topologías de red	DigiMesh, Repetidor, Punto a punto, Punto	DigiMesh

	a multipunto, Peer-to-Peer (P2P)	
Alimentación		
Voltaje	2.1 to 3.6 V	2.1 to 3.6 V
Corriente en modo transmisión	215 mA	33 mA
Corriente en modo recepción	29 mA	28 mA
Corriente en modo Sleep	2.5 μ A	< 1 μ A

Para programar los módulos XBee se debe cargar el firmware deseado y modificar el valor de los distintos parámetros que determinan su comportamiento. Para ello se utiliza un software distribuido por Digi denominado X-CTU.

Gracias al protocolo DigiMesh los radios XBee pueden hacer uso de dos modos de funcionamiento, denominados modos AT y API. La Tabla 9 muestra la distribución de los pines en el encapsulado del radio.

Tabla 9. Descripción de los pines del radio Xbee. Fuente: Elaboración Propia.

Características	XBee-PRO 900HP	XBee DigiMesh 2.4
Procesador	ADF7023 transceiver, Cortex-M3 EFM32G230 @ 28 MHz	Silicon Labs EM357 SoC
Banda de frecuencias	902 a 928 MHz	2.4 GHz
Opciones de antena	Wire, U.FL y RPSMA	Through-Hole: PCB Antenna, U.FL Connector, RPSMA Connector, or Integrated Wire; SMT: RF Pad, PCB Antenna, or U.FL Connector
Performance		
Tasa de transferencia RF	10 Kbps o 200 Kbps	250 Kbps
Rango Interiores/ambiente urbano	10 Kbps: hasta to 2000 ft (610 m); 200 Kbps: hasta 1000 ft (305 m)	250 Kbps, 60 m
Exterior con línea de vista	10 Kbps: 9 miles (14 km); 200 Kbps: 4	250 Kbps, 1200 m

	miles (6.5 km) (con antena dipolo de 2.1 dB de ganancia)	
Potencia de transmisión	hasta 24 dBm (250 mW)	3.1 mW (+5 dBm)
Sensibilidad de recepción	-101 dBm @ 200 Kbps, -110 dBm @ 10 Kbps	-100 dBm
Características		
Interface de datos	UART, SPI	UART, SPI
GPIO	hasta 15 Digital I/O, 4 entradas 10-bit ADC, 2 salidas PWM	hasta 15 Digital I/O
Topologías de red	DigiMesh, Repetidor, Punto a punto, Punto a multipunto, Peer-to-Peer (P2P)	DigiMesh
Alimentación		

Voltaje	2.1 to 3.6 V	2.1 to 3.6 V
Corriente en modo transmisión	215 mA	33 mA
Corriente en modo recepción	29 mA	28 mA
Corriente en modo Sleep	2.5 μ A	< 1 μ A

Cada módulo Xbee se comunica a través de los protocolos UART, por lo que cualquier dispositivo con interface UART pueden ser conectado directamente a los pines del módulo Xbee manteniendo una comunicación directa con un nodo similar (Figura 14).

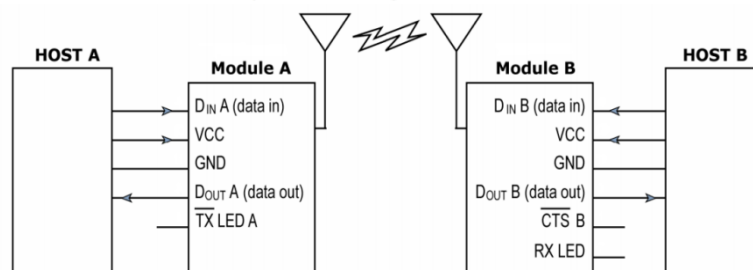


Figura 14. Diagrama de comunicación entre dos nodos conectados directamente mediante UART. Fuente: Product Data sheet Digi International.

El módulo Xbee soporta también comunicación mediante SPI en modo esclavo (Slave), en la cual se recibe la señal de reloj y los datos desde el Maestro, en este caso un microcontrolador. Para esta comunicación se requieren de la configuración de los siguientes parámetros en el módulo Xbee:

- SPI_MOSI (Master Out, Slave In)
- SPI_MISO (Master In, Slave Out)

- SPI_SCLK (Serial Clock)
- SPI_SSEL (Slave Select)
- SPI_ATTN (Attention)

Las radios XBee presentan 5 modos de operación; Idle, Recieve, Transmit, Sleep y Command (Figura 15). Cuando los datos seriales son recibidos, el módulo RF cambiará el modo de operación e intentará transmitir los datos según el diagrama de flujos de la Figura 16. La dirección de destino (Destination address) determinará hacia qué nodos se enviará la información. Cuando no se está transmitiendo datos, el módulo RF está en modo Recieve o de recepción. En el modo Command, se pueden ingresar comandos AT al módulo Xbee para configurar, ajustar o modificar parámetros como la dirección de destino, así como su modo de operación entre otras características. El modo Sleep hace posible que el módulo Xbee entre en un estado de bajo consumo de energía cuando no se encuentra en uso. Cuando el módulo no está transmitiendo, recibiendo, ahorrando energía o en modo de comandos, entonces se encuentra en el modo Idle.

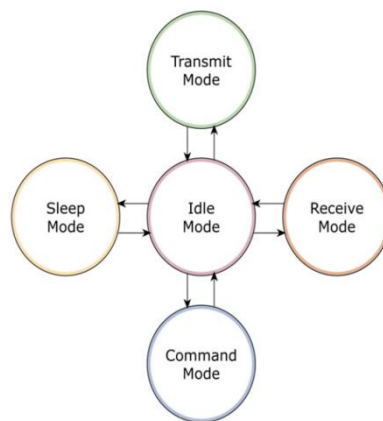


Figura 15. Modos de operación del Xbee. Fuente: Product Data sheet Digi International.

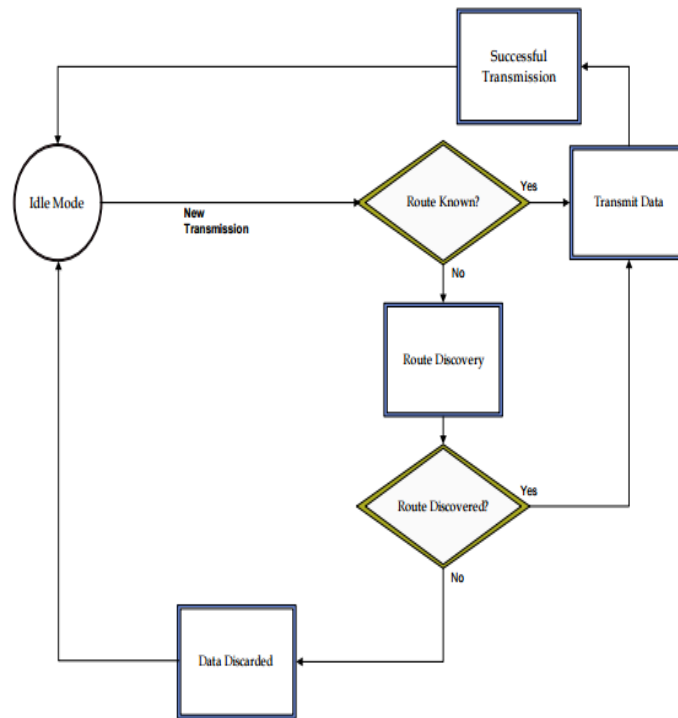


Figura 16. Diagrama de flujos de la transmisión. Fuente: Product Data sheet Digi International.

Los radios Xbee tienen las características necesarias para un buen desempeño dados los requerimientos del sistema a desarrollar. Los niveles de consumo de energía y potencia de transmisión son idóneos para ser implementados en los prototipos de nodos. Además, El protocolo DigiMesh los hace adecuados para una transmisión confiable en ambientes con obstrucciones en el medio y topologías de red variables debidas principalmente al movimiento continuo de los individuos portadores.

Sparkfun Xbee Explorer Regulated

Los niveles lógicos del módulo XBee son 3.3V para un 1 lógico y 0V para 0 lógico, por tal motivo es necesario regular el voltaje para no dañar el transmisor. Para esta tarea se escogió el módulo regulador XBee Explorer Regulated (Figura 17) fabricado por SparkFun Electronics, especialmente diseñado para ser compatible con la disposición mecánica de los XBee. El módulo regula el voltaje de alimentación entrante a 3.3V, acondiciona la señal y permite la visualizar las operaciones de envío y recepción mediante leds indicadores de actividad.

Gracias a este módulo, es posible operar los dos modelos del transmisor en el hardware del nodo a niveles seguros, incluso en modelos con antenas diferentes, permitiéndonos operar el sistema en diferentes configuraciones de frecuencias y potencia de transmisión.

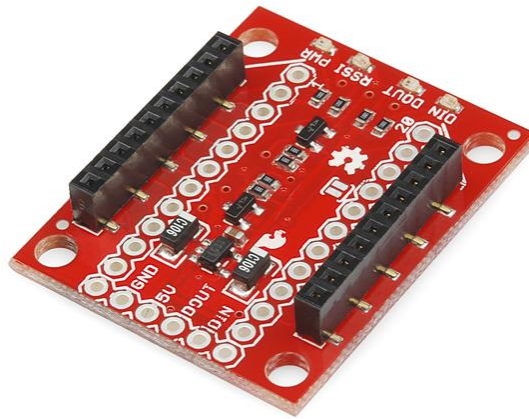


Figura 17. Módulo Sparkfun Xbee Explorer Regulated Fuente:

<https://www.sparkfun.com/>

MOSFET

El MOSFET (Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) es un transistor que puede ser utilizado para conmutar corrientes elevadas en un circuito electrónico. Consta de 3 terminales denominadas: Gate, Source y Drain. La inclusión de un MOSFET en el diseño del nodo se debe a la necesidad de mantener estados de bajo consumo de energía. Para ello se hizo uso de los modos de corte y saturación del MOSFET IRL510 (Figura 18) haciéndolo funcionar como un switch. Este modelo de MOSFET es de tipo N y funciona con niveles lógicos (entre 3V y 5V). La corriente principal para alimentar a los componentes del circuito pasa entre Source y Drain, mientras que el control de esta corriente se obtiene aplicando una tensión sobre el terminal Gate haciéndola funcionar como un switch que nos permite encender o apagar el circuito. La tensión aplicada en Gate es proporcionada por un pin del microcontrolador, con esto se logra controlar el encendido o apagado del resto de componentes del nodo a voluntad.

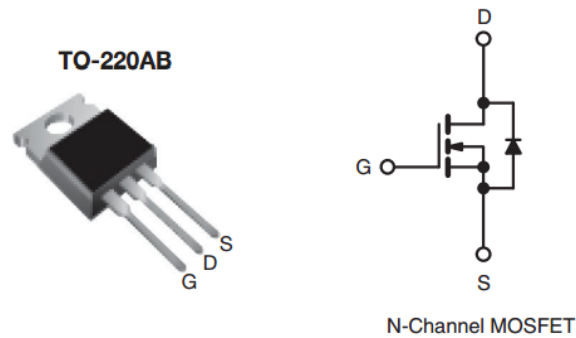


Figura 18. MOSFET IRL510. Fuente: Data Sheet IRL510 Vishay Siliconix

Fuente de energía

Una de las razones para emplear un voltaje tolerable de entre 3.3 y 5.5 Volts en todos los componentes es la fácil implementación de una fuente de energía mediante un arreglo en serie de baterías AA a 1.5V como se muestra en la Figura 19. Usando 4 de estas baterías se alcanza un voltaje de aproximadamente 6V.

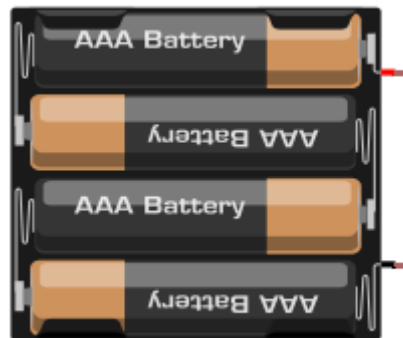


Figura 19. Arreglo de 4 baterías AA en serie. Fuente: <http://www.instructables.com>

Para proteger a esta fuente de energía, se añade un diodo 1N4001 (Figura 20) en serie con el arreglo de baterías. El 1N4001 es un diodo rectificador de silicio que permite el paso de corriente en una sola dirección. Su incorporación en el circuito protege a la fuente de energía de un posible corto circuito debido a que no permite la circulación de la corriente en dirección opuesta. Cuando el circuito es energizado, se produce una caída de voltaje de 0.7 voltios entre el ánodo y el cátodo del diodo, logrando así un voltaje menor a 5.5V, y permitiendo la operación del circuito electrónico del nodo en niveles seguros.



Figura 20. Diodo 1N4001. Fuente: Data Sheet 1N4001 Vishay General Semiconductor

Diseño

Para el desarrollo de los nodos, se interconectaron los diferentes dispositivos mediante los protocolos de comunicación descritos para formar un solo circuito. Este circuito se divide en dos partes que rigen su funcionamiento: La etapa de control y la etapa principal.

Etapa de control

La etapa de control desarrollada permite mantener el control del encendido y apagado de la etapa principal (GPS, SD card, Xbee). Lo conforman el microcontrolador Atmega 328P-PU, el MOSFET IRL510 y el módulo ZS-042.

Para su diseño se ha recurrido a una configuración básica del microcontrolador, contando solamente con un cristal de cuarzo de 16 MHz y dos capacitores cerámicos de 22 nF. El cristal de cuarzo en combinación con los capacitores forma un circuito oscilador, el cuál inyecta al microcontrolador una señal cuadrada de alta frecuencia que se utiliza para sincronizar las operaciones del sistema. Los diagramas de conexión del microcontrolador se muestran en la Figura 21.

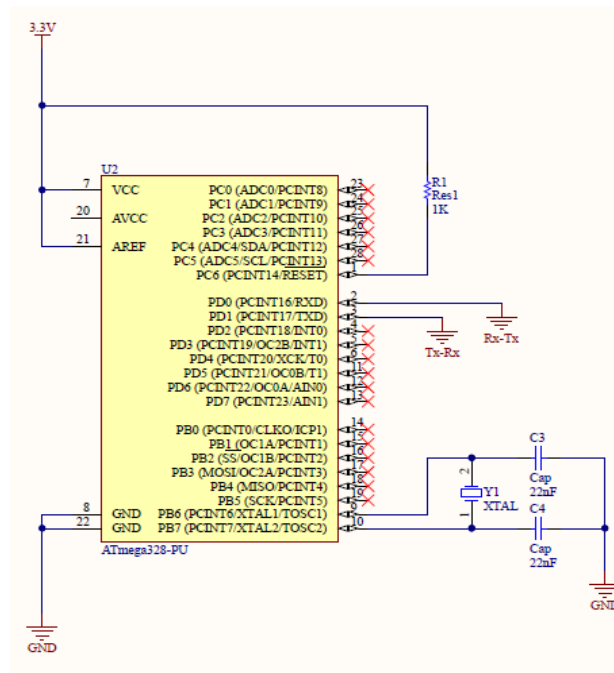


Figura 21. Diagrama de conexión mínima del microcontrolador. Fuente: Elaboración propia.

Durante la operación normal, el reloj de tiempo real despierta al microcontrolador de su estado de bajo consumo en intervalos predefinidos mediante las alarmas del RTC establecidas en el código del microcontrolador, posteriormente el microcontrolador activa una salida en alto nivel hacia el transistor, el cual permite circular la energía hacia los demás componentes del nodo (etapa principal). De este modo se logra encender y apagar el resto de los componentes, aislándolos completamente del circuito de alimentación y logrando un ahorro sustancial de energía.

Etapa principal

La etapa principal es la parte más importante del proyecto, ya que lo componen el módulo de almacenamiento, el módulo GPS y el módulo de transmisión inalámbrica. Para el transmisor no ha requerido ningún circuito adicional ya que el módulo Sparkfun Xbee Explorer Regulated que contiene al Xbee cuenta con su propio regulador de voltaje, lo que permite operar en un margen entre 3V y 5V. La conexión de los pines de alimentación y comunicación pueden realizarse directamente entre la salida del la alimentación del nodo, el microcontrolador y el transmisor (Xbee) a través de comunicación serial como se muestra en la Figura 22. Esto nos permite tener una línea de comunicación directa entre el microcontrolador y el radio, de este modo todo lo que

ingrese por el pin de entrada es transmitido por el radio y todo lo que es recibido en el radio es enviado al microcontrolador por el pin de salida.

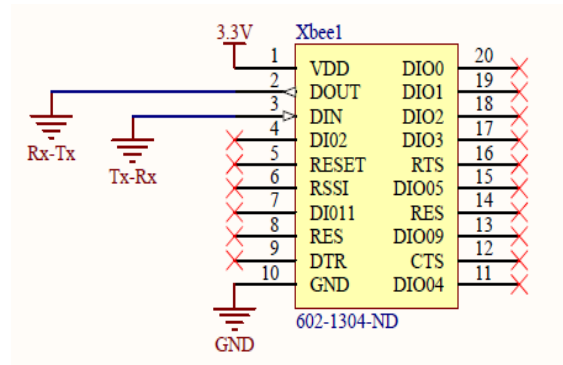


Figura 22. Diagrama de conexión del transmisor. Fuente: Elaboración propia

La interfaz de la comunicación con el GPS se realiza mediante comunicación serial entre el microcontrolador y el módulo Adafruit Ultimate GPS Breakout como se muestra en la Figura 23. Este módulo incorpora su propio regulador de voltaje de ultrabajo margen, por lo que se le puede suministrar de 3v a 5v sin afectar su funcionamiento.

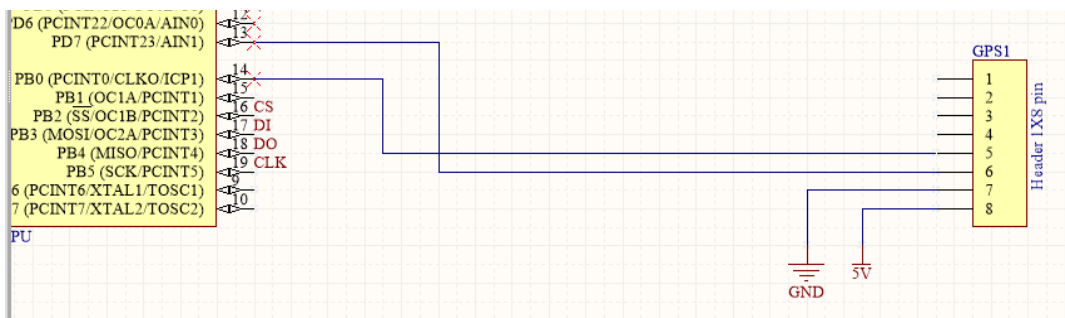


Figura 23. Diagrama de conexión mínima del GPS con el microcontrolador. Fuente: Elaboración propia.

Este módulo GPS funciona con un consumo de 25 mA en modo de adquisición de señal y 20 mA en modo tracking. Cuando es energizado, inicia la transmisión de los datos a través de su puerto serial. La trama de datos enviada estará en el formato NMEA, a un baud rate especificado según se requiera. Para poder recibir esta información en el microcontrolador, se debe conectar a los pines destinados a comunicación serial, Rx para recepción y Tx para transmisión. El chipset del GPS contiene un procesador que es el responsable de la interfaz del usuario, realiza todo los cálculos y las configuraciones de hardware necesarias como en el caso de las antenas externas. El chipset también

permite realizar configuraciones específicas de funcionamiento a través del microcontrolador como lo son el update rate, baud rate, la selección de los tipos de tramas NMEA, etc. La comunicación entre el microcontrolador y el GPS es especialmente útil en este caso por lo que el diseño del circuito se realizó teniendo en cuenta una comunicación bidireccional.

El modelo de chipset utilizado permite el modo de inicio Warm start, el cual almacena los datos de la localización de los satélites en su memoria volátil cuando existe alguna interrupción de energía, permitiendo así un menor periodo de adquisición de señal cuando se energiza nuevamente. Esta funcionalidad es muy útil en sistemas en donde el consumo de energía debe reducirse al mínimo, el módulo utilizado incluye una batería de respaldo que permite utilizar esta funcionalidad incluso al desconectar el módulo del suministro de energía.

Como se ha mencionado anteriormente, las tarjetas MicroSD son dispositivos flash de almacenamiento extraíbles, el bajo costo, tamaño hacen de la tarjeta MicroSD el dispositivo idóneo para el almacenamiento de la información en el nodo. Para conectar la tarjeta SD con el microcontrolador se utilizó la conexión mediante SPI como se muestra en la figura 24.

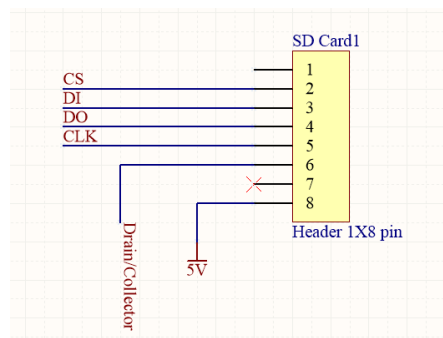


Figura 24. Diagrama de conexión del Módulo microSD. Fuente: Elaboración propia.

El diagrama completo de todas las partes involucradas en el nodo se muestra en la figura 25, las dos etapas son montadas en el mismo circuito.

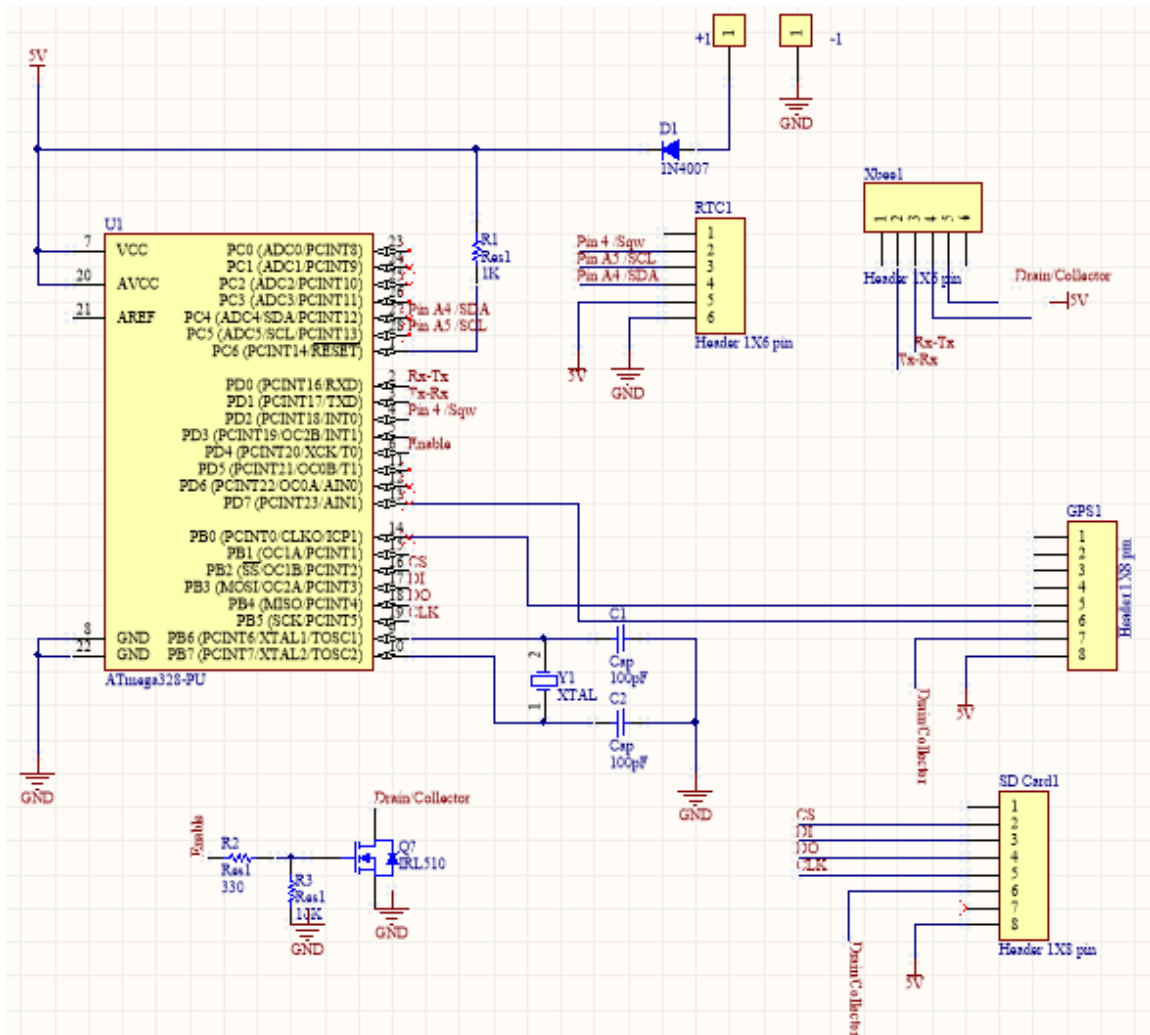


Figura 25. Diagrama de conexión del circuito completo. Fuente: Elaboración propia.

Construcción

Para la realización de los diseños del hardware de los nodos se ha empleado el software especializado en diseño de circuitos impresos Altium Designer 15.0.14. El prototipo del nodo fue fabricado a doble capa y utilizando una película fotosensible para grabar el circuito en la placa de cobre. La disposición de los módulos se hizo en relación a su tamaño y la disponibilidad de los pines del microcontrolador. Las dos capas del circuito impreso de la placa fabricada se muestran en la figura 26 y 27.

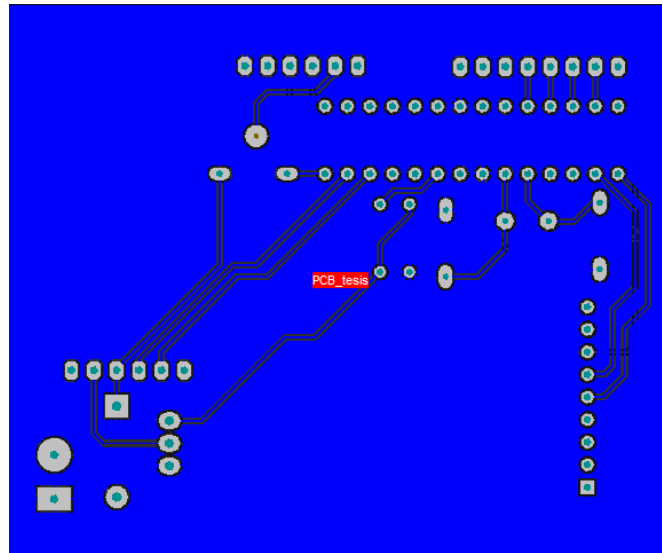


Figura 26. Capa Bottom Layer del layout del circuito impreso. Fuente: Elaboración propia.

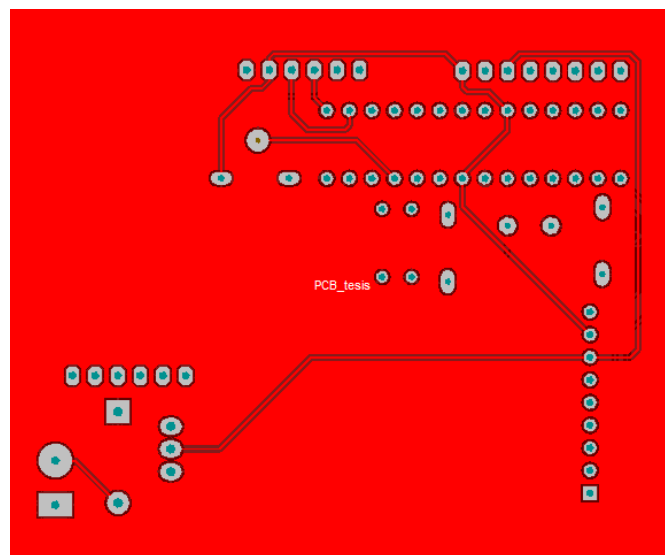


Figura 27. Capa Top Layer del layout del circuito impreso. Fuente: Elaboración propia.

En las Figura 28 se puede observar el nodo construido que irá montado en el collar que usen los individuos sometidos a monitoreo.

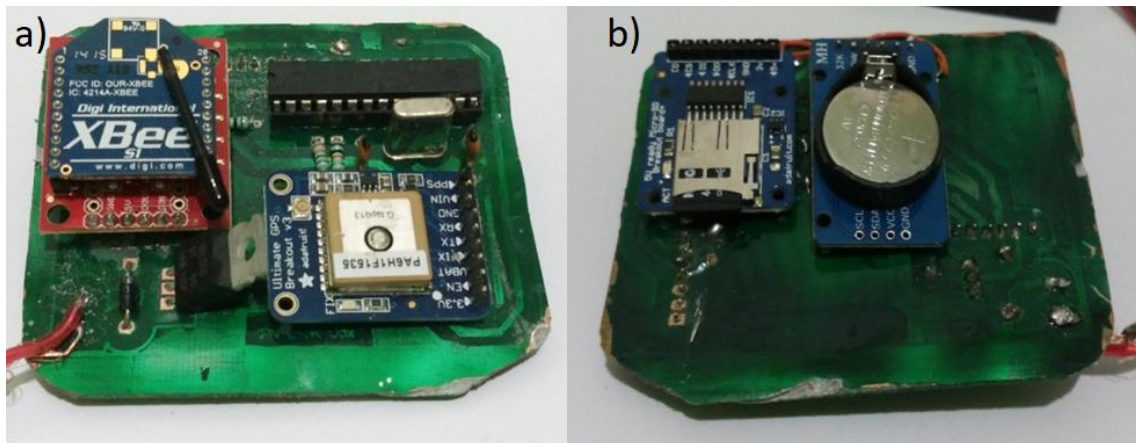


Figura 28. Placa del circuito del nodo. A) Vista superior. b) Vista inferior. Fuente: Elaboración propia.

Pruebas del sistema

La comunicación entre los módulos XBee se realiza en el aire, por lo que la calidad de la señal inalámbrica puede verse afectada por factores como: Absorción o reflejo de ondas, problemas de visibilidad directa, orientación y ubicación de la antena, etc. El software XCTU de Digi International provee una herramienta para evaluar el rango real y la calidad del enlace entre dos radios Xbee en la misma red, denominado Range Test.

Para valorar el funcionamiento del sistema de nodos construidos y sus capacidades de comunicación, se realizó una prueba de rango en dos frecuencias de transmisión, así como cuatro pruebas en distintos escenarios y en ambientes diferentes.

Pruebas del rango de cobertura

Durante una prueba de rango, el software XCTU envía paquetes de datos desde un módulo XBee local (conectado a una computadora) hacia un módulo remoto, y espera a que el módulo remoto haga eco de la información hacia el módulo local. XCTU cuenta el número de paquetes enviados y recibidos por el módulo local y mide la intensidad de la señal de ambos lados como un valor RSSI (Received Signal Strength Indicator). Cada paquete enviado desde el XBee local debe ser recibido de nuevo como un eco por el mismo XBee local para que la transmisión pueda considerarse exitosa.

El rango de alcance de las dos frecuencias fue puesto a prueba en una comunicación directa entre dos nodos. Durante dos minutos fueron enviados consecutivamente paquetes de 50 bytes hacia el nodo receptor para medir los niveles de recepción y la tasa

de éxito de transmisión. La prueba de rango en 2.4 GHz se realizó entre dos radios colocados a 40 metros de separación, mientras que para el modelo de 900 MHz la distancia de la prueba fue de 400 metros. Ambas distancias corresponden a la distancia máxima en la que el enlace se mantenía estable.

Escenario 1: Comunicación punto a punto

La prueba del primer escenario consistió en una comunicación entre dos nodos usando los modelos de radiotransmisores que operan en la frecuencia de 900 MHz. El primer nodo fue programado para enviar los datos de su ubicación obtenidos mediante el GPS a intervalos de dos segundos hacia el segundo nodo. Este segundo nodo fue configurado como receptor con la finalidad de captar la señal proveniente del primer nodo y guardar los datos recibidos en la tarjeta MicroSD de su módulo de almacenamiento. El nodo receptor se colocó dentro del edificio de Posgrado del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, mientras que con el primer nodo transmitiendo la posición a intervalos de dos segundos, se realizó un recorrido en la periferia de las instalaciones. Con esto se simuló una comunicación punto a punto a una vía, ya que, el tipo de comunicación más sencillo que se puede realizar en el sistema de nodos es una comunicación directa entre dos nodos vecinos como se muestra en la figura 29.

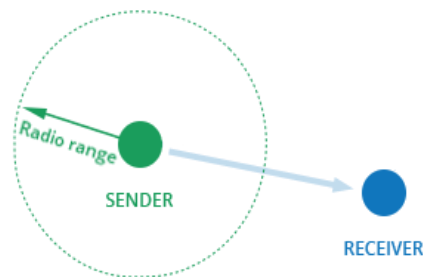


Figura 29. Comunicación punto a punto entre dos nodos vecinos. Fuente: Product Datasheet Digi International.

Escenario 2: Comunicación mediante Bridge

Para probar la capacidad de los nodos de retransmitir la información recibida hacia nodos aledaños se probó un segundo escenario con tres nodos, igualmente usando los modelos de radiotransmisores que operan en la frecuencia de 900 MHz. Cada uno fue

configurado de acuerdo con las tres funciones que puede realizar un nodo cualquiera del sistema: Transmitir, repetir y recibir.

Similar a la primera prueba, se estableció comunicación entre un nodo transmisor y un nodo receptor en el área que cubre el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca. Sin embargo, para esta prueba los nodos se posicionaron alejados entre sí, es decir, fuera de su rango de recepción para evitar que pudieran comunicarse directamente. Un tercer nodo (nodo repetidor) fue colocado en el centro del área, de tal manera que pudiera comunicarse con el nodo receptor posicionado en el extremo norte de esta misma área. El nodo transmisor emitió su posición a intervalos de 2 segundos mientras se realizaba un recorrido en la periferia de las instalaciones de manera similar a la prueba anterior, pero aumentando el área del recorrido hacia zonas sin cobertura del nodo receptor, y usando al nodo repetidor como un puente de comunicación como se muestra en la figura (Figura 30).

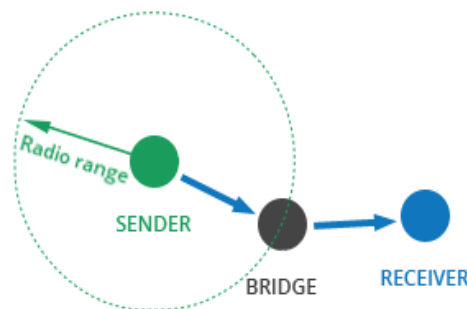


Figura 30. Comunicación entre dos nodos sin cobertura mutua mediante bridge. Fuente: Product Datasheet Digi International.

Escenario 3: Comunicación en red Mesh

La tercera prueba consistió en la creación de una red Mesh con cinco nodos, realizado en el Parque Nacional Benito Juárez. En esta prueba, cuatro nodos fueron colocados a las distancias máximas de cobertura entre ellos simulando un grupo de individuos estacionarios. Uno de estos nodos fue configurado como un nodo maestro que guardaba la información recibida en su módulo de almacenamiento mientras que los otros tres sirvieron para enviar la información recibida hacia el nodo maestro.

El quinto nodo fue configurado para muestrear su posición a intervalos de dos segundos guardándolos inmediatamente en su módulo de almacenamiento. Con este nodo se

realizó un recorrido por la periferia de la cobertura de los demás nodos y en zonas más alejadas de los extremos, simulando el movimiento de un individuo dentro de la red creada. Concluido el recorrido y una vez dentro de la cobertura de la red de los 4 nodos estacionarios, el quinto nodo realizó la transmisión de las posiciones que había muestreado y que se encontraban resguardadas en su módulo de almacenamiento. El tipo de comunicación simulado en esta prueba es una comunicación en una red Mesh (Figura 31), en la cual la información es enviada hacia el nodo más cercano, para ser procesada y retransmitida hacia a los nodos aledaños, repitiéndose está transmisión hasta llegar al nodo receptor.

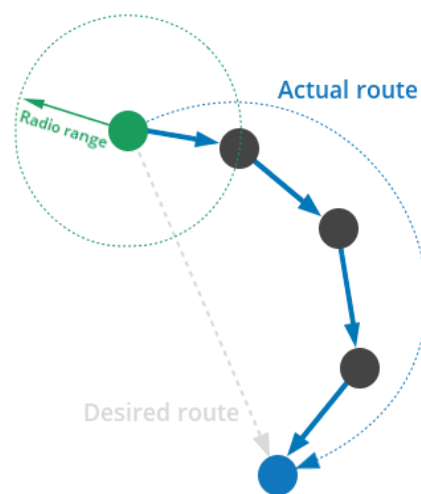


Figura 31. Comunicación entre dos nodos mediante la red Mesh. Fuente: Product Datasheet Digi International.

Escenario 4: Prueba en ganado caprino

Para valorar la capacidad del sistema en un entorno más realista, tres nodos fueron puestos a prueba en condiciones parecidas a un escenario real de monitoreo de fauna silvestre, en un paraje localizado a 1540 metros de altitud y a 1.9 kilómetros de la comunidad de San Pedro Cajonos, distrito de Villa Alta, Oaxaca.

Los tres nodos fueron encapsulados y aislados en resina poliéster para protegerlos de la humedad y la intemperie, posteriormente fueron montados sobre correas de cuero de cinco centímetros de ancho. El hardware de las dos etapas del nodo se colocó en la parte superior de la correa para mantener al GPS libre de obstáculos, mientras que la fuente de energía, se sujetó en la parte inferior con la intención de usarlo como contrapeso y mantener el collar en la posición deseada. Los collares contruidos fueron sujetos

alrededor de los cuellos de tres individuos de una población de ganado caprino de 34 miembros como se muestra en la Figura 32.



Figura 32. Collar sujeto a un individuo del grupo monitoreado. Fuente: Elaboración propia.

Los nodos fueron configurados para una muestra de la posición cada segundo durante 3 minutos consecutivos y posteriormente entrar en modo de bajo consumo por los siguientes 7 minutos, con esto se lograron intervalos de 10 minutos entre muestreos.

El inicio de actividad de muestreo de los nodos fue programado a las 12 horas GTM -6 (Greenwich Mean Time) finalizando a las 19 horas. Este intervalo de actividad se estableció para que pudiera coincidir con las horas de forrajeo del ganado, los cuales eran pastoreados en un área de hasta dos kilómetros cuadrados de extensión para posteriormente ser resguardados. Las ventanas de transmisión de los datos muestreados hacia los demás nodos, fueron programadas en turnos de 1 hora de separación entre eventos a partir de la finalización del tiempo de actividad de muestreos. Las ventanas de recepción de los nodos restantes se hicieron coincidir con las ventanas de transmisión del nodo en turno.

El primer nodo transmitió la información de las posiciones obtenidas durante sus intervalos de muestreo a las 20 horas, en ese mismo instante, los nodos restantes mantuvieron una ventana de recepción de 10 minutos creando un respaldo de la información que recibieron desde el primer nodo. Posterior a esta ventana los nodos

entraron nuevamente en suspensión hasta las 21 horas, momento en que el segundo nodo entro en modo de transmisión y los restantes nodos en recepción, de igual manera respaldando los datos del nodo transmisor en sus módulos de almacenamiento. A las 22 horas el tercer nodo entro en transmisión y los restantes nodos en recepción, finalizando de esta manera con las ventanas de transmisión-recepción y entrando en modo de suspensión hasta las 12 horas del siguiente día, es decir, la siguiente ventana de muestreo. Esta prueba se realizó durante 3 días consecutivos dejando al sistema operar de manera autónoma, realizando chequeos rutinarios en las ventanas de transmisión para corroborar que no existieran fallas mayores en los nodos

Resultados

Rango de cobertura

Las pruebas de rango demostraron la superioridad de la frecuencia de 900 MHz frente a la frecuencia de 2.4 GHz. A 2.4 GHz se tuvo una tasa de éxito del 74% en las transmisiones de los paquetes de información, con una recepción de -75dBm como se muestra en la Figura 33.

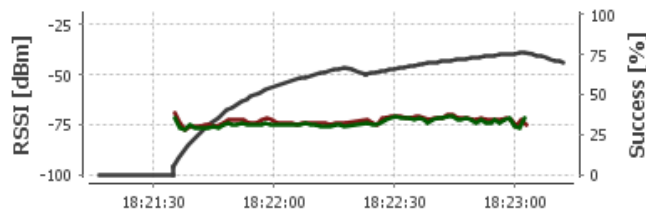


Figura 33. Prueba de rango a 2.4 GHz. Fuente: Elaboración propia.

La frecuencia de 900 MHz tuvo un rendimiento superior en el rango de cobertura, llegando a una tasa del 100% de las transmisiones. La calidad de la señal se mantuvo en niveles de -60 dBm lo que refleja la excelente potencia de transmisión y ganancia de las antenas externas como se muestra en la Figura 34.



Figura 34. Prueba de rango a 900 MHz. Fuente: Elaboración propia.

Comunicación punto a punto

Las pruebas de comunicación punto a punto en el primer escenario, demostraron la capacidad de enviar información desde un nodo transmisor hacia un nodo receptor. Las localizaciones (señalados en color rojo) que lograron llegar al nodo receptor (señalado en color amarillo) durante el recorrido se muestran en la figura 35.

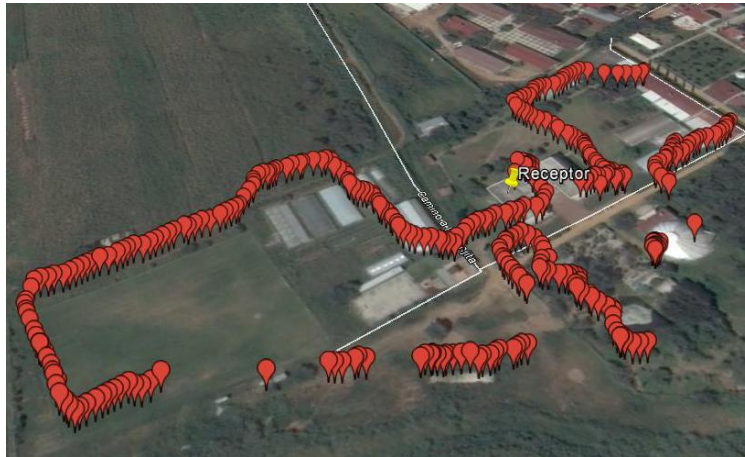


Figura 35. Mapa de cobertura de la transmisión entre un nodo receptor y un nodo transmisor. Fuente: Elaboración propia.

Comunicación mediante Bridge

Al insertar un tercer nodo (nodo repetidor) entre estos dos nodos para el segundo escenario, se logró ampliar la cobertura. Gracias a las capacidades del protocolo de comunicación DigiMesh, el nodo transmisor logró enviar la información de las posiciones (señalados en color rojo) a los dos nodos restantes, de los cuales solo se tenía cobertura con uno de ellos (repetidor), mientras que el segundo (receptor) estaba fuera de alcance. Sin embargo al estar el nodo repetidor en comunicación con el nodo intermedio, la comunicación logró establecerse como lo ilustra la Figura 36.



Figura 36. Mapa de cobertura de la transmisión entre tres nodos mediante bridge.
Fuente: Elaboración propia.

El GPS demostró una margen de error mínimo durante un recorrido por las instalaciones del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca obteniendo la posición y enviando la información mediante el Xbee hacia el destino final.

Comunicación en red Mesh

Para el tercer escenario, los cuatro nodos involucrados en la red de nodos fijos compartían entre sí la información de las ubicaciones de un quinto nodo transmisor, creando una base de datos en un nodo maestro. La información sobre estas ubicaciones (latitud, longitud, fecha y hora) permitieron elaborar un mapa detallado de las rutas que trazó el nodo móvil y que se ilustran en la Figura 37.

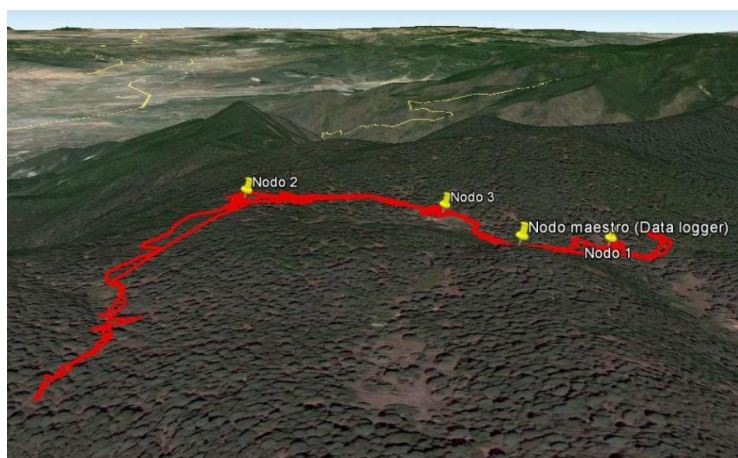


Figura 37. Pruebas de red Mesh. Fuente: Elaboración propia.

Prueba en ganado caprino

En el cuarto escenario, el sistema de nodos realizó el muestreo según se había programado. Posterior a los 3 días de pruebas, los collares fueron recuperados para analizar los datos recabados. Las rutas que recorrieron los 3 individuos durante el primer día se muestran en la Figura 38. La tonalidad y transición de los colores representa el tiempo transcurrido durante el monitoreo.

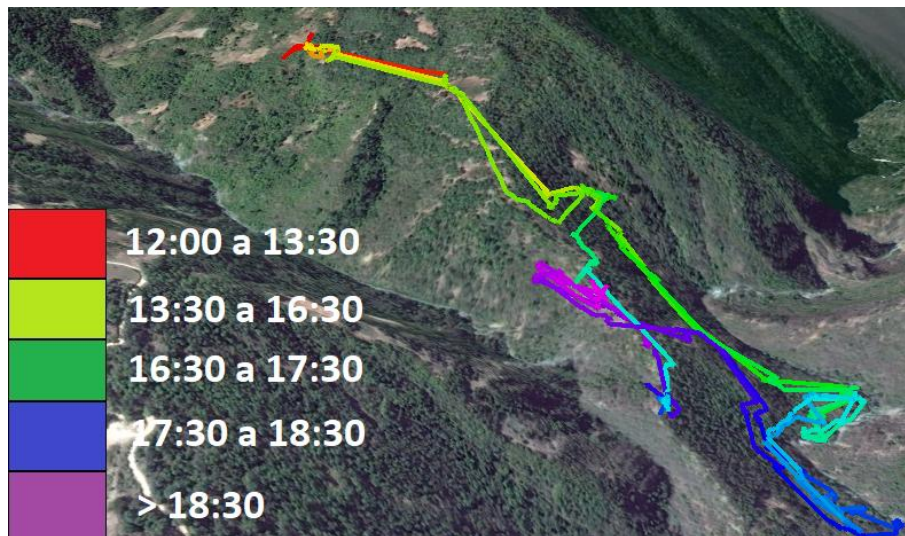


Figura 38. Ruta recorrida por los individuos durante el primer día. Fuente: Elaboración propia.

Para el segundo día, el tercer nodo no logró completar el muestreo programado debido a la descarga de las baterías o a alguna falla en el suministro de energía, posiblemente por el deterioro de la protección del nodo. La información presentada en la figura 39 de las rutas recorrida por los nodos durante este día es incompleta, ya que no se tienen registros del tercer nodo después de las 15:20 p.m debido a la falla descrita.

Conclusiones

La presente tesis tuvo como objetivo el diseño y la construcción de un sistema telemétrico para el monitoreo de fauna silvestre, lo cual obedece a las necesidades para el seguimiento del movimiento de poblaciones de individuos de manera simultánea y automatizada.

Para cumplir con los objetivos, se implementó hardware específico para el diseño y la construcción del circuito electrónico, incluyendo los módulos GPS, de almacenamiento y de transmisión inalámbrica. Los nodos resultantes pueden ser portados mediante collares por lo individuos de una población que se desee estudiar.

La incorporación del protocolo de comunicación DigiMesh para redes inalámbricas de sensores, permitió que los nodos fueran capaces de comunicarse entre sí, formando el sistema de monitoreo planteado y manteniendo intervalos sincronizados de muestreo seguidos de estados bajo consumo de energía para prolongar la autonomía.

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas se puede concluir que este sistema permite la transmisión y recepción de información de manera inalámbrica, aunque las distancias de cobertura y la calidad del radioenlace pueden variar dependiendo de la frecuencia utilizada, siendo la frecuencia más baja la de mayor cobertura y la de mayor frecuencia la de mejor manejo del consumo de energía.

Las pruebas para la simulación de los distintos escenarios de comunicación demostraron la capacidad del sistema de compartir la información de las ubicaciones recabadas en cada nodo hacia los restantes nodos en comunicaciones directas (mediante un enlace ente dos nodos) o indirectas (a través de nodos intermediarios), permitiendo el intercambio de los datos en toda la red tal como se había planteado, incluso en entornos realistas.

La información obtenida a través de este sistema puede ser de gran utilidad para investigaciones que impliquen el monitoreo del movimiento de grupos de fauna silvestre en lugares en donde el despliegue de infraestructura de monitoreo no sea viable, gracias a que los nodos desarrollados son capaces de funcionar de forma automatizada formando una red Mesh y aumentando el área de cobertura de las transmisiones hacia cualquier área en la que se encuentren nodos aledaños.

Referencias

- Aplin, L., Farine, D., Morand-Ferron, J. y Sheldon, B. (2012). Social networks predict patch discovery in a wild population of songbirds. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1745), pp.4199-4205.
- Blake, S., I. Douglas-Hamilton y W. B. Karesh. (2001). GPS telemetry of forest elephants in Central Africa: results of a preliminary study. *African Journal of Ecology* 2, 178-186.
- Brännäs, E., H. Lundqvist, E. Prentice, M. Schmitz, K. Brännäs, y B. S. Wiklund. (1994). Use of the passive integrated transponder (PIT) in a fish identification and monitoring system for fish behavioral studies. *Transactions of the American Fisheries Society* 3, 395-401.
- Cooke, S. J., J.D. Midwood, J. D. Thiem, P. Klimley, M. C. Lucas, E. B. Thorstad y B. C.C. Ebner. (2013). Tracking animals in freshwater with electronic tags: past, present and future. *Animal Biotelemetry* 5.
- Costa, D., y Guedes, L. (2010). The Coverage Problem in Video-Based Wireless Sensor Networks: A Survey. *Sensors*, 10(9), 8215-8247. <http://dx.doi.org/10.3390/s100908215>
- Dyo, V., Yousef, K., Ellwood, S., Macdonald, D., Markham, A., y Mascolo, C. et al. (2010). Evolution and sustainability of a wildlife monitoring sensor network. *Proceedings Of The 8Th ACM Conference On Embedded Networked Sensor Systems - Sensys '10*. <http://dx.doi.org/10.1145/1869983.1869997>
- Egevang, C., Stenhouse, I., Phillips, R., Petersen, A., Fox, J. y Silk, J. (2010). Tracking of Arctic terns *Sterna paradisaea* reveals longest animal migration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(5), pp.2078-2081.
- Fancy, S. G., L. F. Pank, D. C. Douglas, C. H. Curby y G. W. Garner. (1988). *Satellite telemetry: a new tool for wildlife research and management* Washington, D.C.: U.S. Fish and Wildlife Service.
- Fuller, T. K. (1991). Effect of snow depth on wolf activity and prey selection in north central Minnesota. *Canadian Journal of Zoology* 2, 283-287.
- Garcia-Sanchez, A., Garcia-Sanchez, F., Losilla, F., Kulakowski, P., Garcia-Haro, J., y Rodríguez, A. et al. (2010). Wireless Sensor Network Deployment for Monitoring Wildlife Passages. *Sensors*, 10(8), 7236-7262. <http://dx.doi.org/10.3390/s100807236>

- Gibbons, J. y Andrews, K. (2004). PIT Tagging: Simple Technology at Its Best. *BioScience*, 54(5), p.447.
- Gibbons, W. J. y K. M. Andrews. (2004). PIT tagging: simple technology at its best. *Bioscience* 5, 447-454.
- Handcock, R., Swain, D., Bishop-Hurley, G., Patison, K., Wark, T., Valencia, P., Corke, P. y O'Neill, C. (2009). Monitoring Animal Behaviour and Environmental Interactions Using Wireless Sensor Networks, GPS Collars and Satellite Remote Sensing. *Sensors*, 9(5), pp.3586-3603.
- Harper, S. J., y G. O. Batzli. (1996). Monitoring use of runways by voles with passive integrated transponders. *Journal of Mammalogy*, 364-369.
- Hart, K., Cherkiss, M., Smith, B., Mazzotti, F., Fujisaki, I., Snow, R. y Dorcas, M. (2015). Home range, habitat use, and movement patterns of non-native Burmese pythons in Everglades National Park, Florida, USA. *Animal Biotelemetry*, 3(1).
- Heezen, K. L., y J. R. Tester. (1967). Evaluation of radio-tracking by triangulation with special reference to deer movements. *The Journal of Wildlife Management*, 124-141.
- Ji, W., White, P. y Clout, M. (2005). Contact rates between possums revealed by proximity data loggers. *Journal of Applied Ecology*, 42(3), pp.595-604.
- Krakauer, D. (1995). Groups confuse predators by exploiting perceptual bottlenecks: a connectionist model of the confusion effect. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 36(6), pp.421-429.
- LeMunyan, C. D., W. White, E. Nyberg y J. J. Christian. (1959). Design of a miniature radio transmitter for use in animal studies. *The Journal of Wildlife Management*, 107-110.
- Mate, B. R., R. Gisiner y J. Mobley. (1998). Local and migratory movements of Hawaiian humpback whales tracked by satellite telemetry. *Canadian Journal of Zoology* 5, 863-868.
- Mech, L. (1967). Telemetry as a Technique in the Study of Predation. *The Journal of Wildlife Management*, 31(3), pp.492-496.
- Mennill, D. J., S. M. Doucet, K. A. A. Ward, D. F. Maynard, B. Otis y J. M. Burt. (2012). A novel digital telemetry system for tracking wild animals: a field

test for studying mate choice in a lekking tropical bird. *Methods in Ecology and Evolution* 4, 663-672.

- Merrill, S. B. y L. D. Mech. (2003). The usefulness of GPS telemetry to study wolf circadian and social activity. *Wildlife Society Bulletin*, 947-960.
- Milinski, M. y Heller, R. (1978). Influence of a predator on the optimal foraging behaviour of sticklebacks (*Gasterosteus aculeatus* L.). *Nature*, 275(5681), pp.642-644.
- Nakandala, M., Namasivayam, S., Chandima, D., y Udawatta, L. (2014). Detecting wild elephants via WSN for early warning system. 7Th International Conference On Information And Automation For Sustainability. <http://dx.doi.org/10.1109/iciafs.2014.7069632>
- Ramos-Fernández, G. y Morales, J. (2014). Unraveling fission-fusion dynamics: how subgroup properties and dyadic interactions influence individual decisions. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 68(8), pp.1225-1235.
- Singh, R., y Asutkar, G. (2015). Survey on various wireless sensor network techniques for monitoring activities of wild animals. 2015 International Conference On Innovations In Information, Embedded And Communication Systems (ICIIECS). <http://dx.doi.org/10.1109/iciiecs.2015.7192979>
- Sundell, J., I. Kojola y I. Hanski. (2006). A new GPS-GSM-based method to study behavior of brown bears. *Wildlife Society Bulletin* 2, 446-450.
- Viani, F., Rocca, P., Lizzi, L., Rocca, M., Benedetti, G., y Massa, A. (2011). WSN-based early alert system for preventing wildlife-vehicle collisions in Alps regions. 2011 IEEE-APS Topical Conference On Antennas And Propagation In Wireless Communications. <http://dx.doi.org/10.1109/apwc.2011.6046747>
- Weimerskirch, H., M. Salamolard, F. Sarrazin y P. Jouventin. (1993). Foraging strategy of wandering albatrosses through the breeding season: a study using satellite telemetry. *The Auk*, 110(2). 325-342.
- Wey, T., Blumstein, D., Shen, W. y Jordán, F. (2008). Social network analysis of animal behaviour: a promising tool for the study of sociality. *Animal Behaviour*, 75(2), pp.333-344.
- Wittemyer, G., Douglas-Hamilton, I. y Getz, W. (2005). The socioecology of elephants: analysis of the processes creating multitiered social structures. *Animal Behaviour*, 69(6), pp.1357-1371.

Glosario

- Acknowledge o ACK: Paquete de reconocimiento.
- Actuador: Dispositivo capaz de transformar energía eléctrica en la activación de un proceso.
- Amperio: Unidad de intensidad de corriente eléctrica.
- API: Interfaz de programación de aplicaciones o Application Programming Interface.
- AREF: Analog voltage reference o referencia a voltaje análogo.
- ARGOS: El Advanced Research and Global Observation Satellite es un sistema de Seguimiento mundial y monitoreo ambiental por satélite
- ASCII: El American Standard Code for Information Interchange es un código estándar estadounidense para el intercambio de información.
- Baud Rate: la tasa de baudios es el número de unidades de señal por segundo.
- Bit: Binary digit o bit es un dígito del sistema de numeración binario.
- Broadcast: transmisión de información donde un nodo emisor envía información a una multitud de nodos receptores de manera simultánea, sin necesidad de reproducir la misma transmisión nodo por nodo.
- Bus de datos: Canal que transfiere datos entre los componentes de un sistema electrónico.
- Byte: 8 bits consecutivos.
- Capacitor: dispositivo pasivo, utilizado en electricidad y electrónica, capaz de almacenar energía sustentando un campo eléctrico.
- Carácter: unidad de información que corresponde a una unidad o símbolo.
- Carriage Return: es uno de los caracteres de control de la codificación ASCII, Unicode, o EBCDIC que hace que se mueva el cursor a la primera posición de una línea.
- Checksum: Operación que tiene como propósito principal detectar cambios accidentales en una secuencia de datos al hacer una comprobación inicial y otra final en cada transmisión.
- Chipset: Circuitos integrados que se encuentran montados en una tarjeta principal y que determinan el desempeño general de la misma.
- Conector u.FL: Conector RF miniatura para señales de altas frecuencias

- Punto-multipunto: Conexión o topología de red que permite la comunicación de un transmisor hacia varios receptores.
- Conversor AC/DC o Convertidor analógico a digital): circuito electrónico encargado de convertir las señales analógicas en digitales o viceversa.
- Corriente: Movimiento de cargas eléctricas a través de un conductor.
- Cristal de cuarzo: Cristal vibratorio de material piezoeléctrico que crea una señal eléctrica con una frecuencia precisa.
- CRC: La verificación por redundancia cíclica o Cyclic Redundancy Check es un código de detección de errores usado frecuentemente en redes digitales y en dispositivos de almacenamiento para detectar cambios accidentales en los datos.
- Data Logger: Dispositivo electrónico que registra datos en el tiempo o en relación a la ubicación por medio de instrumentos y sensores propios o conectados externamente.
- Datasheet: Documento que resume el funcionamiento y otras características de un componente electrónico.
- Datos Binarios: Datos en sistema numérico binario en el que los números se representan utilizando solamente dos cifras: cero y uno.
- dBm: unidad de medida de potencia expresada en decibelios (dB) relativa a un milivatio (mW).
- DigiMesh: Protocolo de comunicación inalámbrica desarrollado por Digi International.
- Diodo: Dispositivo electrónico de dos electrodos por el que circula la corriente en un solo sentido.
- Doppler Shift: Cambio de frecuencia aparente de una onda producida por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador.
- EEPROM: Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (ROM programable y borrable eléctricamente) es un tipo de memoria ROM que puede ser programada, borrada y reprogramada eléctricamente.
- FAT 12/16: Tabla de asignación de archivos o File Allocation Table
- Firmware: Bloque de instrucciones de máquina para propósitos específicos grabado en una memoria de lectura/escritura y que establece la lógica de más bajo nivel que controla los circuitos electrónicos de un dispositivo.
- Flanco de subida: Flanco generado al pasar de un estado alto a bajo o viceversa.
- Frame: Bloque fijo de datos transmitidos como una sola entidad.

- Frecuencia: Número de ciclos de un fenómeno periódico realizados en una unidad de tiempo determinada.
- Ganancia de la antena: Relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica a igualdad de distancias y potencias entregadas a la antena
- Geolocalización: capacidad para obtener la ubicación geográfica real de un objeto
- GPIO: El General Purpose Input/Output o Entrada/Salida de Propósito General es un pin genérico en un chip cuyo comportamiento se puede programar por el usuario.
- GPS: El Global Positioning System o sistema de posicionamiento global es un sistema de navegación que permite determinar la posición de un objeto en el espacio terrestre.
- Ground o Tierra: Conexión entre un circuito eléctrico y una referencia de voltaje con potencial cero.
- GSM: Global System For Mobile Communications
- GTM: El tiempo medio de Greenwich o Greenwich Mean Time es un estándar de tiempo.
- Hardware: Conjunto de elementos físicos o materiales que constituyen una computadora o un sistema informático.
- Hexadecimal: Sistema de numeración posicional que tiene como base el número 16.
- Host: término usado en informática para referirse a las computadoras conectadas a una red y que proveen y utilizan servicios de ella.
- I2C: El Inter-Integrated Circuit es un bus de dos hilos con interfaz serie diseñado por Philips.
- ICSP: In-Circuit Serial Programming es una tecnología que posibilita la reprogramación de los microcontroladores sin que sea necesaria la remoción de éstos de su circuito de aplicación.
- IDE: el Integrated Development Environment es un aplicación informática que proporciona servicios integrales para facilitar el desarrollo de software.
- IOREF: Pin de la placa Arduino que provee de una voltaje de referencia en la cual opera el microcontrolador.

- Jerarquía Master-Slave: Modelo de comunicación en donde un dispositivo tiene control unidireccional sobre uno o más dispositivos.
- Led: light-emitting diode o diodo emisor de luz.
- LSB (less significant byte): En electrónica digital el less significant byte o bit menos significativo es el bit que de acuerdo a su posición en una trama, tiene el menor valor.
- mA: Unidad de intensidad eléctrica que equivale a la milésima parte de un amperio.
- MAC: El Medium Access Control es un conjunto de mecanismos y protocolos de comunicaciones a través de los cuales varios dispositivos en una red se ponen de acuerdo para compartir un medio de transmisión común.
- Memoria del programa: Memoria en donde se almacenan las instrucciones del programa de control.
- Memoria flash: Memoria derivada de la memoria EEPROM la cual permite la lectura y escritura de múltiples posiciones de memoria en la misma operación.
- Memoria RAM: Random Access Memory o Memoria de acceso aleatorio
- Micro SD: Formato de tarjeta de memoria flash más pequeña que la mini SD desarrollada por SanDisk.
- Microcontrolador: Circuito integrado programable capaz de ejecutar órdenes grabadas en su memoria.
- Modo Bridge: Modo Bridge o Modo Puente es un modo que permite a un dispositivo funcionar como una interconexión de redes locales.
- MOSFET (Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor): un transistor utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas.
- MSB (most significant byte): En electrónica digital el most significant bit o bit más significativo es el bit que de acuerdo a su posición en una trama, tiene el mayor valor.
- MTK NMEA Packet (National Marine Electronics Association sentences): Protocolo propietario de MediaTek, Inc., que permite al chipset MTK3339 obtener los datos de las tramas NMEA (National Marine Electronics Association sentences).
- mW: Unida de de medida de potencia equivalente a un milésimo de watt.
- nF: nanofaradio, unidad de capacidad eléctrica del Sistema Internacional de Unidades.
- Nodo: Dispositivo direccionable conectado a una red.

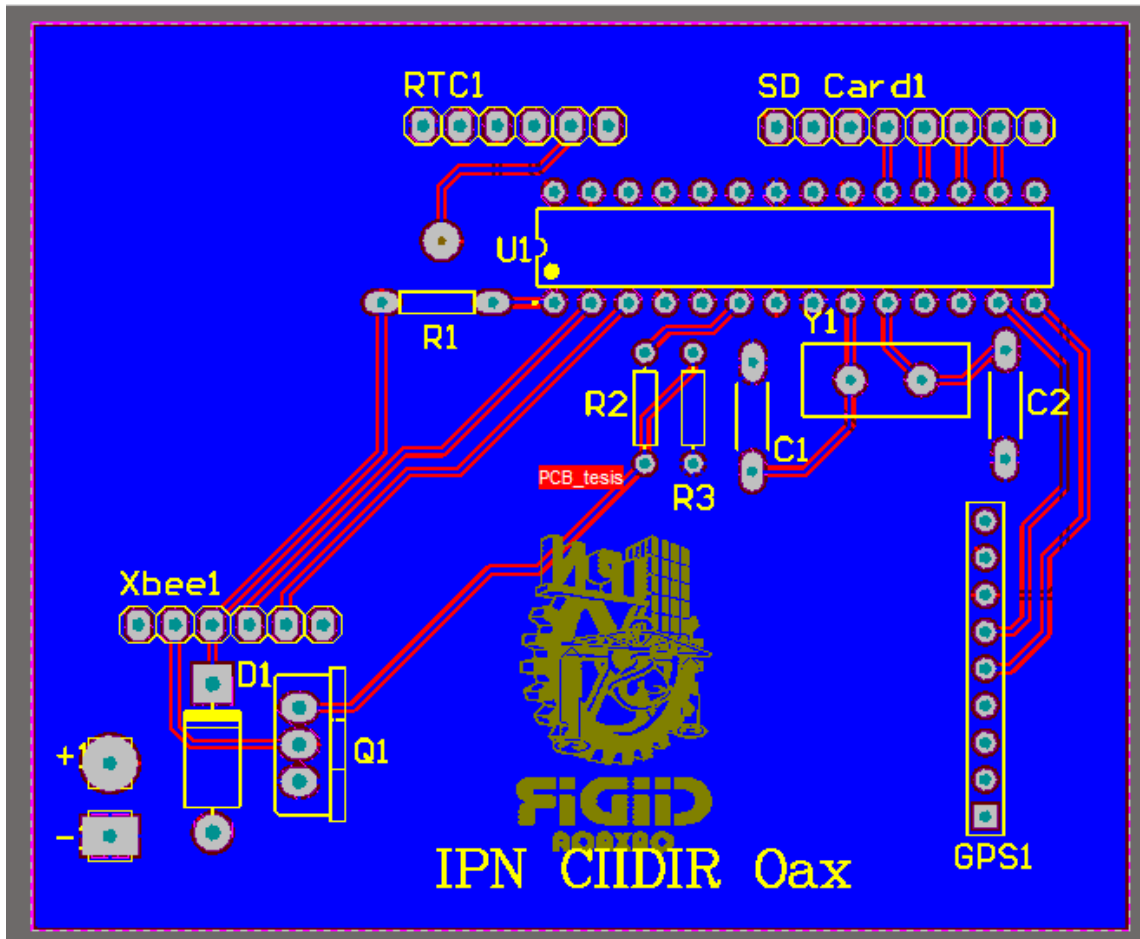
- Open source: Software o hardware distribuido y desarrollado libremente.
- Oscilador: Circuito que genera la señal de reloj en un microcontrolador.
- Periféricos: Dispositivos auxiliares e independientes conectados a una unidad central de procesamiento.
- PIT: Passive Integrated Transponder
- Placa de circuito impreso: Superficie constituida por caminos, pistas o buses de material conductor laminadas sobre una base no conductora utilizada para conectar eléctricamente diferentes dispositivos electrónicos
- Powerjack: Conector para alimentación de circuitos eléctricos.
- Processing: Lenguaje de programación y entorno de desarrollo integrado de código abierto basado en Java
- Protocolos de comunicación: Conjunto de reglas y normas que permiten que dos o más entidades se comuniquen entre ellos para transmitir información.
- PWM: Pulse-width modulation o modulación por ancho de pulsos es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía.
- Radiotransmisor: dispositivo electrónico que mediante una antena irradia ondas electromagnéticas que contienen información.
- Red Mesh: La topología de red Mesh o malla es una topología de red en la que cada nodo está conectado a todos los nodos lo que permite llevar los mensajes de un nodo a otro por distintos caminos.
- Registros de memoria: Registros de alta velocidad y poca capacidad que permiten guardar y acceder a valores muy usados.
- Relaciones parent child: Sistema de gestión que almacena la información en una estructura jerárquica en donde un nodo padre puede tener varios nodos hijo.
- Reloj de tiempo real o RTC: El Real-time clock es un circuito integrado, que permite llevar el registro del tiempo con precisión.
- Resistencias pull-up: Resistencia conectada entre una señal y una tensión de alimentación positiva para asegurar que la señal sea un nivel lógico válido si dispositivos externos se desconectan.
- RF: Radiofrecuencia
- RFID: Identificación por radiofrecuencia.

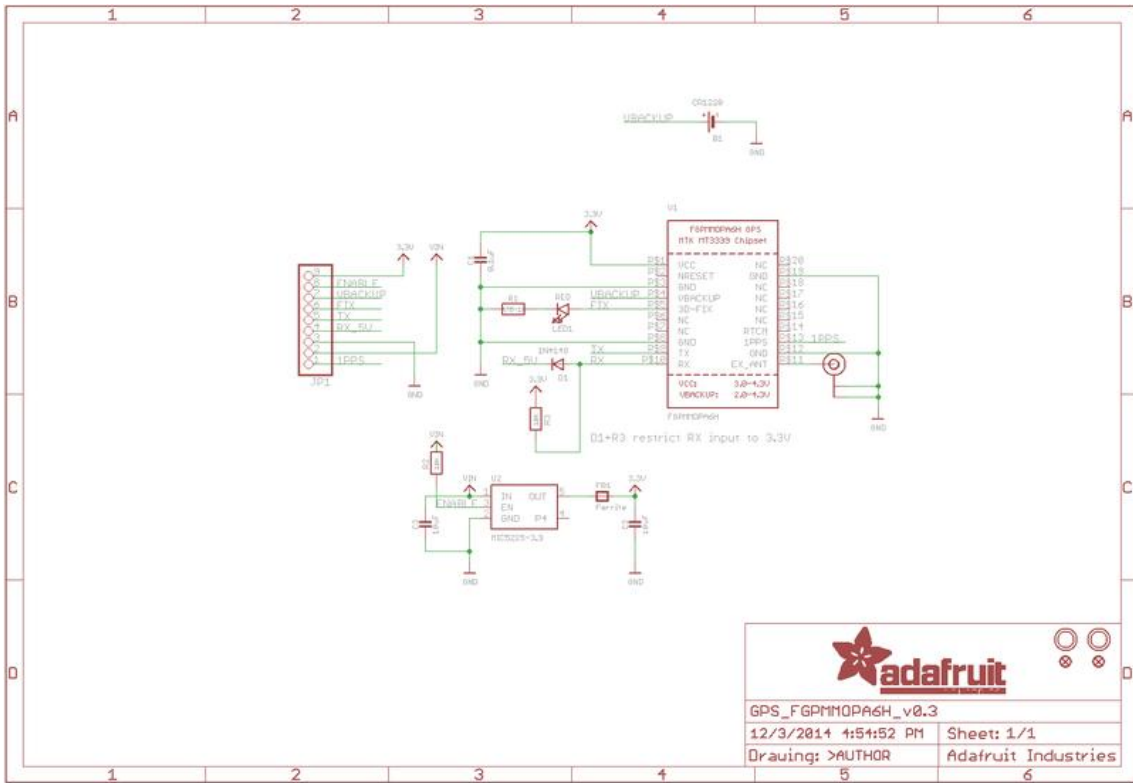
- RISC: El Reduced Instruction Set Computer es el diseño de CPU generalmente utilizado en microprocesadores.
- RMC: El Recommended Minimum es un tipo de sentencia NMEA
- RPSMA: Reverse polarity SMA (RP-SMA o RSMA) es una variación del conector SMA (SubMiniature version A) utilizado en comunicaciones de alta frecuencia.
- RSSI: Received Signal Strength Indicator o Identificador de potencia de señal recibida.
- SD card: SD (Secure Digital) card es un formato de tarjeta de memoria para dispositivos portátiles.
- SDHC: El Secure Digital High Capacity es un formato de tarjeta de memoria flash.
- Sensibilidad al borde: Sensibilidad que tienen los circuitos eléctricos de ser activados durante el paso de un estado alto a bajo o viceversa.
- SHF (Super High Frequency)
- SPI: El Serial Peripheral Interface es una transmisión bidireccional de datos síncrona a tres hilos basada en la jerarquía Master-Slave que permite altas velocidades de transmisión.
- SRAM: Static Random Access Memory o memoria estática de acceso aleatorio
- Topología de red: Disposición física de una red de dispositivos.
- TTL: Transistor-transistor logic o lógica transistor a transistor es una tecnología de construcción de circuitos electrónicos digitales.
- UART: Transmisor / Receptor Asíncrono Universal
- Volt: Unidad derivada del Sistema Internacional para el potencial eléctrico, la fuerza electromotriz y la tensión eléctrica.
- Wireless Sensor Networks: Red inalámbrica de sensores que permite el monitoreo de un entorno.
- Zigbee: Especificación de un conjunto de protocolos de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal.

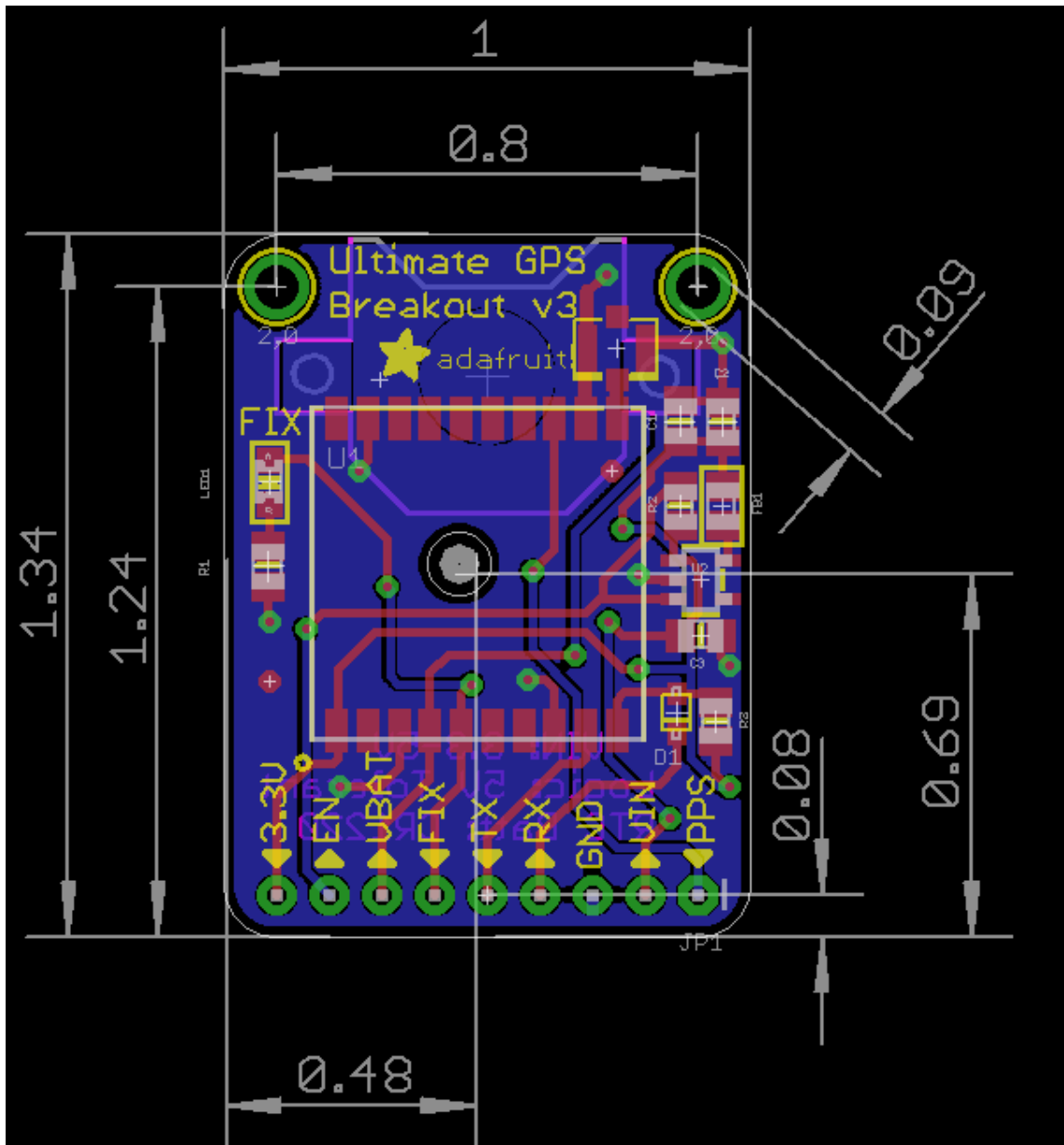
Anexos

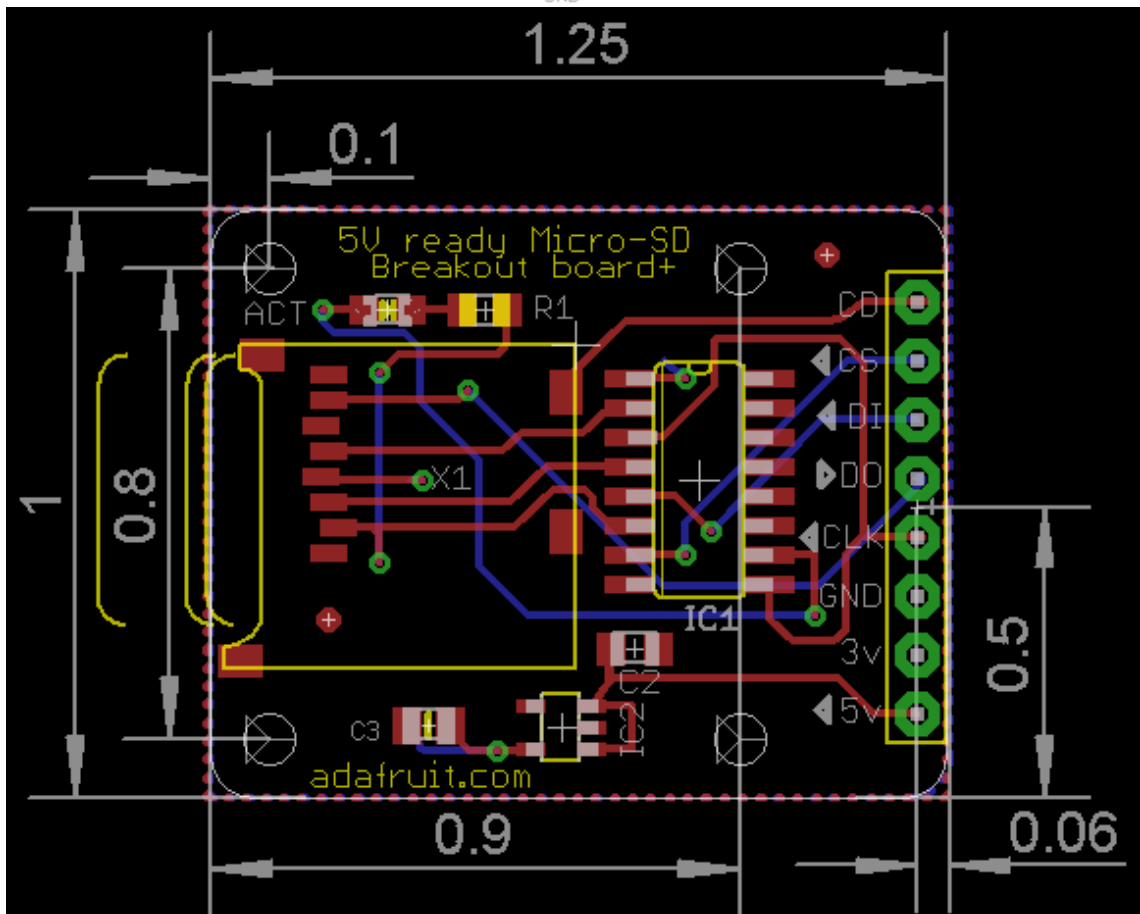
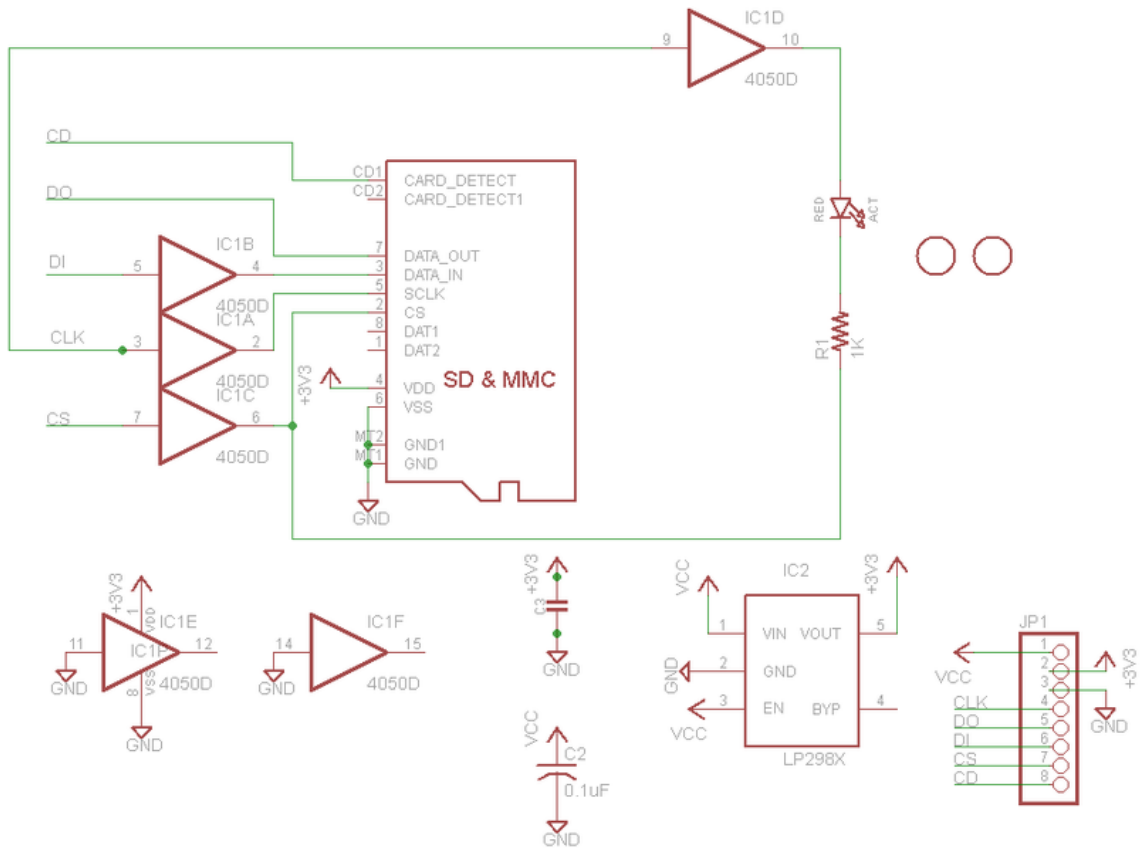
Anexos

Circuitos esquemáticos









Código fuente del Firmware

```
/*
 * Ejemplo del código para los nodos
 * Código para el nodo 3
 */
#include "GPS.h"
#include <DS3231.h>
#include <avr/sleep.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>

#define N "3"

SoftwareSerial mySerial(8, 7);
GPS myGPS(&mySerial);
#define GPSCOM

#ifndef cbi
#define cbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit))
#endif

DS3231 clock;
RTCDatetime dt;

#define system_start 12

#define system_stop 23

#define rxInt 15

uint8_t alarmSet = 0;

uint8_t interval_time= 5;

boolean start=true;

int logNum=0;

int logRes=180;

int counter =0;

char filename[12];

int reminder=0;

int updt=0;

String logName="";

char incomingByte = 0;

int tHour=0;
int tMinute=0;
```

```

int tSecond=0;

void alarm(){}

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

  pinMode (4, OUTPUT);
  digitalWrite (4, HIGH);
  delay(2000);

  ADCSRA = ADCSRA & B01111111;
  ACSR = B10000000;
  DIDR0 = DIDR0 | B00111111;

  pinMode (5, OUTPUT);
  digitalWrite (5, LOW);
  pinMode (6, OUTPUT);
  digitalWrite (6, LOW);
  pinMode (9, OUTPUT);
  digitalWrite (9, LOW);

  clock.begin();
  clock.armAlarm1(false);
  clock.clearAlarm1();
  clock.enableOutput(false);
  pinMode(2, INPUT_PULLUP);

  #if defined(__AVR_ATmega168__) || defined(__AVR_ATmega8__) || defined(__AVR_ATmega328P__)
    cbi(PORTC, 4);
    cbi(PORTC, 5);
  #else
    cbi(PORTD, 0);
    cbi(PORTD, 1);
  #endif

  pinMode(10, OUTPUT);

  dt = clock.getDateTime();
  tHour= dt.hour;
  tMinute= dt.minute;
  tSecond=dt.second;

  Serial.print(dt.hour); Serial.print(":");
  Serial.print(dt.minute); Serial.print(":");
  Serial.print(dt.second);

  Serial.print(F(" SysStrt "));
  Serial.print(N);

  firstInit();

  if (!SD.begin(10)) {
    Serial.print(F(" SD failure!"));
    return;
  }
}

```

```

Serial.flush();
}

void loop(){
  Serial.print(" ");
  Serial.print(N);
  Serial.flush();

  off();

  sleepNow();

  delay(2000);

  dt = clock.getDateTime();
  tHour= dt.hour;
  tMinute= dt.minute;
  tSecond=dt.second;

  if( tHour >= system_stop){
    Serial.print(F(" >= system_stop"));
    delay(2000);
    resetUntil(system_start);
  }

  else if( tHour > system_stop){
    Serial.print(F(" tHour > system_stop"));
    resetUntil(system_start);
  }

  else if( (tHour < system_start) ){
    Serial.print(F(" tHour < system_start"));
    resetUntil(system_start);
  }

  else if((tHour==21) && (tMinute==0)){

    on();

    tHour++;
    resetUntil(tHour);

    Serial.print(F(" Tx "));
    Serial.print(N);
    Serial.println(tHour);

    sending();

    counter=logNum;
  }

  else if((tHour>= 19) && (tMinute==0)){

    on();

```

```

tHour++;
resetUntil(tHour);

while (dt.minute<(rxInt)){

    recieve();
    dt = clock.getDateTime();
}
}

else if(start==false) {

    on();

    resetAlarm();

    nextLog();

    startLog();
}

else{

    Serial.print(N);
    Serial.println(F(" ERROR"));
}

}

void startLog(){

    for (int i=0;i<logRes;i++){

        logg();
    }

    logNum++;
}

void firstInit(){

    if( (tHour > system_stop) && (tMinute > rxInt) ){

        resetUntil(system_start);
        start=false;
    }

    else if( tHour >=system_stop){

        resetUntil(system_start);
        start=false;
    }

    else if( (tHour < system_start) ){

        resetUntil(system_start);

```



```

    start=false;
}

else {

    alarmSet=(dt.minute);
    resetAlarm();
    start=false;
}
}

void on(){

    pinMode (4, OUTPUT);
    digitalWrite (4, HIGH);

    pinMode (10, OUTPUT);
    pinMode (11, OUTPUT);
    pinMode (12, OUTPUT);
    pinMode (13, OUTPUT);

    delay(2000);

    SPI.begin();

    if (!SD.begin(10)) {
        Serial.println(F("Card failure!"));
        return;
    }

    #ifdef GPSCOM
        mySerial.begin(9600);
        delay(50);
        mySerial.println(F("$PMTK251,9600*17"));
        delay(50);
        mySerial.println(F("$PGCMD,33,0*6D"));
        delay(50);
        mySerial.println(F("$PMTK314,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0*29"));
        delay(50);
        mySerial.println(F("$PMTK300,1000,0,0,0*1C"));
        delay(50);
        mySerial.end();
    #endif

}

void off(){

    delay(500);

    digitalWrite (4,LOW);
    SPI.end() ;

    pinMode (10, INPUT);
    pinMode (11, INPUT);
    pinMode (12, INPUT);
    pinMode (13, INPUT);

```

```

}

void sleepNow() {
  set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_DOWN);
  sleep_enable();
  attachInterrupt(0,alarm, LOW);

  sleep_mode();

  sleep_disable();
  detachInterrupt(0);
}

void logg(){
  mySerial.begin(9600);

  while(!myGPS.newNMEAreceived()) {
    char c=myGPS.read();
  }

  myGPS.parse(myGPS.lastNMEA());

  if(myGPS.fix){

    File data = SD.open(filename, FILE_WRITE);

    data.print(myGPS.hour, DEC); data.print(':');
    data.print(myGPS.minute, DEC); data.print(':');
    data.print(myGPS.seconds, DEC);
    data.print(",");
    data.print(myGPS.latitudeDegrees, 6);
    data.print(",");
    data.println(myGPS.longitudeDegrees, 6);

    data.close();
  }

  else{
    Serial.print(F("error in node "));
    Serial.println(N);
  }

  mySerial.end();
}

void resetAlarm(){

  clock.clearAlarm1();

  if (start){

    uint8_t t = ((alarmSet/interval_time)+1)*interval_time;
    uint8_t tHolder= t;
    t=t-alarmSet;
    alarmSet=tHolder;

    if(alarmSet >= 60){

```

```

    alarmSet=0;
}

clock.setAlarm1(0, 0, alarmSet,0 , DS3231_MATCH_M_S);
Serial.print(N);
Serial.print(F(" init at minute: "));
Serial.print(alarmSet);
}
else{

alarmSet=alarmSet + (interval_time*2);
if(alarmSet >= 60){
    alarmSet=0;
}

clock.setAlarm1(0, 0, alarmSet,0 , DS3231_MATCH_M_S);
}
}

void nextLog(){

strcpy(filename, "N3-000.TXT");

for (int i = updt; i <= logNum; i++){

    filename[3] = '0' + i/100;
    reminder=i%100;
    filename[4] = '0' + reminder/10;
    filename[5] = '0' + reminder%10;

    if (! SD.exists(filename)) {
        updt=i;
        break;
    }
}
}

void sending(){

delay(3000);
strcpy(filename, "N3-000.TXT");
for (int i = counter; i < logNum; i++) {

    filename[3] = '0' + i/100;
    reminder=i%100;
    filename[4] = '0' + reminder/10;
    filename[5] = '0' + reminder%10;
    delay(500);
    File data = SD.open(filename);
    if (data) {
        Serial.print("$");
        Serial.print(filename);
        Serial.print("~");

        delay(500);

        byte clientBuf[64];

```



```

    data.print(incomingByte);
}

data.close();

logName="";
break;
}

else if(incomingByte!='\n') {
    logName+=incomingByte;
}

}

dt = clock.getDateTime();
if (dt.minute>=rxInt){
    break;
}
}
}
}

void resetUntil( uint8_t T){

    clock.clearAlarm1();

    clock.setAlarm1(0, T, 0,0 , DS3231_MATCH_H_M_S);

}

```

Datasheet de los componentes

Mosfet IRL510

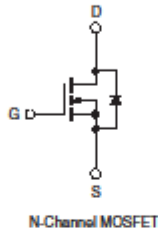
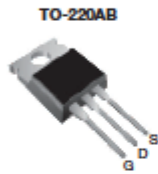


Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY	
V _{DS} (V)	100
R _{DS(on)} (Ω)	V _{GS} = 5.0 V 0.54
Q _g (Max.) (nC)	6.1
Q _{gs} (nC)	2.6
Q _{gd} (nC)	3.3
Configuration	Single

FEATURES

- Dynamic dV/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Logic-Level Gate Drive
- R_{DS(on)} Specified at V_{GS} = 4 V and 5 V
- 175 °C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC



DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220AB package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220AB contribute to its wide acceptance throughout the industry.

ORDERING INFORMATION	
Package	TO-220AB
Lead (Pb)-free	IRL510PbF SiHL510-E3
SnPb	IRL510 SiHL510

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T _C = 25 °C, unless otherwise noted)			
PARAMETER	SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage	V _{DS}	100	V
Gate-Source Voltage	V _{GS}	± 10	
Continuous Drain Current	V _{GS} at 5 V	T _C = 25 °C	5.6
		T _C = 100 °C	4.0
Pulsed Drain Current ^a	I _{DM}	18	A
Linear Derating Factor		0.29	W/°C
Single Pulse Avalanche Energy ^b	E _{AS}	100	mJ
Repetitive Avalanche Current ^a	I _{AR}	5.6	A
Repetitive Avalanche Energy ^a	E _{AR}	4.3	mJ
Maximum Power Dissipation	P _D	43	W
Peak Diode Recovery dV/dt ^c	dV/dt	5.5	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range	T _J , T _{stg}	- 55 to + 175	°C
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s	300 ^d	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw		10
			1.1

Notes

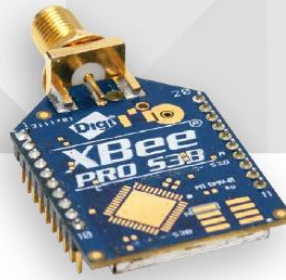
- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- V_{DS} = 25 V, starting T_J = 25 °C, L = 4.8 mH, R_θ = 25 Ω, I_{AS} = 5.6 A (see fig. 12).
- I_{sp} ≤ 5.6 A, di/dt ≤ 75 A/μs, V_{DD} ≤ V_{DS}, T_J ≤ 175 °C.
- 1.6 mm from case.

* Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

Xbee 900HP



LONG-RANGE 900 MHZ
OEM RF MODULE



XBEE-PRO® 900HP

Best-in-class range RF module features software-complete mesh or multipoint topologies with advanced sleep modes

XBee-PRO 900HP embedded modules provide best-in-class range wireless connectivity to devices. They take advantage of the DigiMesh® networking protocol, featuring dense network operation and support for sleeping routers, and are also available in a point-to-multipoint configuration. Supporting RF line-of-sight ranges up to 28 miles (with high-gain antennas), and data rates of up to 200 Kbps, these modules are ideal for extended-range applications requiring increased data throughput.

The XBee-PRO 900HP requires no programming and can be configured easily using Digi's free XCTU software or via a

simplified AT command set. XBee® modules are pre-certified for use in multiple countries, further reducing development costs and time to market.

The programmable version of the XBee-PRO 900HP module makes customizing long-range wireless applications easy. Programming directly on the module eliminates the need for a separate host processor. Because the wireless software is isolated, applications can be developed with no risk to RF performance, security or additional certifications.

BENEFITS

- Superior outdoor LOS range of up to 28 miles with high-gain antenna
- Over-the-air firmware updates via other XBee-PRO 900HP modules or Digi Device CloudSM
- Software-selectable channel mask for interference immunity
- Programmable versions of the XBee-PRO 900HP enable custom application development
 - 8-bit Freescale™ S08 microprocessor brings custom intelligence to the module
 - XBee-specific CodeWarrior® development tools for easy programming
- RF data rate up to 200 Kbps
- Patented channel selectivity algorithm allows for more dense networks

RELATED PRODUCTS



Gateways



Modules



Digi XLR PRO™

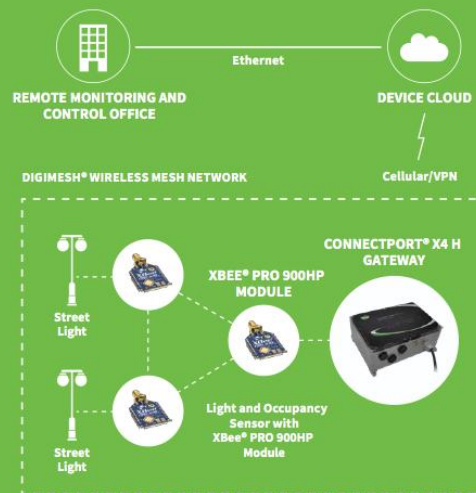


XCTU

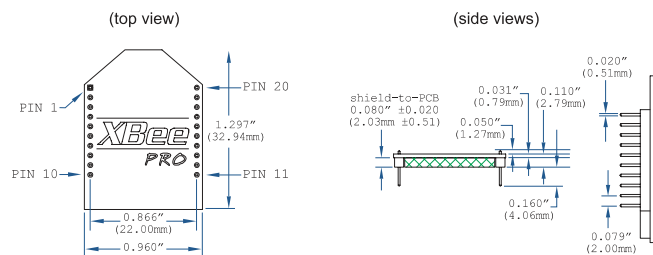


Development Kits

APPLICATION EXAMPLE



SPECIFICATIONS		XBee-PRO® 900HP	Programmable XBee-PRO® 900HP
HARDWARE			
PROCESSOR	ADF7023 transceiver, Cortex-M3 EFM32G230 @ 28 MHz; Programmable includes: Freescale MC9S08QE32		
FREQUENCY BAND	902 to 928 MHz, software selectable channel mask for interference immunity		
ANTENNA OPTIONS	Wire, U.FL and RPSMSA		
PERFORMANCE			
RF DATA RATE	10 Kbps or 200 Kbps		
INDOOR/URBAN RANGE	10 Kbps: up to 2000 ft (610 m); 200 Kbps: up to 1000 ft (305 m)		
OUTDOOR/ LINE-OF-SIGHT RANGE	10 Kbps: up to 9 miles (15.5 km); 200 Kbps: up to 4 miles (6.5 km) (with 2.1dB dipole antennas)		
TRANSMIT POWER	Up to 24 dBm (250 mW) software selectable		
RECEIVER SENSITIVITY	-101 dBm @ 200 Kbps, -110 dBm @ 10 Kbps		
FEATURES			
DATA INTERFACE	UART (3V), SPI		
GPIO	Up to 15 Digital I/O, 4 10-bit ADC inputs, 2 PWM outputs		
NETWORKING TOPOLOGIES	DigiMesh, Repeater, Point-to-Point, Point-to-Multipoint, Peer-to-Peer		
SPREAD SPECTRUM	FHSS (Software Selectable Channels)		
PROGRAMMABILITY			
MEMORY	N/A	32 KB Flash / 2 KB RAM	
CPU/CLOCK SPEED	N/A	HCS08 / Up to 50.33 MHz	
POWER			
SUPPLY VOLTAGE	2.1 to 3.6 VDC	2.4 to 3.6 VDC	
TRANSMIT CURRENT	215 mA	229 mA	
RECEIVE CURRENT	29 mA	44 mA	
SLEEP CURRENT	2.5 uA	3 uA	
REGULATORY APPROVALS			
FCC (USA)	MCQ-XB900HP		
IC (CANADA)	1846A-XB900HP		
C-TICK (AUSTRALIA)	Yes		
ANATEL (BRAZIL)	Yes		
IDA (SINGAPORE)	Yes		



PART NUMBERS	DESCRIPTION
XBP9B-DMWT-002	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 900 MHz, 250 mW, Wire Antenna, 200 Kbps
XBP9B-DMST-002	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 900 MHz, 250 mW, RPSMA, 200 Kbps
XBP9B-DMUT-002	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 900 MHz, 250 mW, U.FL, 200 Kbps
XBP9B-DPWT-001	XBee-PRO 900HP (S3B) Point2Multipoint, 900 MHz, 250 mW, Wire Antenna, 10 Kbps
XBP9B-DPST-001	XBee-PRO 900HP (S3B) Point2Multipoint, 900 MHz, 250 mW, RPSMA, 10 Kbps
XBP9B-DPUT-001	XBee-PRO 900HP (S3B) Point2Multipoint, 900 MHz, 250 mW, U.FL, 10 Kbps
XBP9B-DMWTB002	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 900 MHz, 250 mW, Wire Antenna, 200 Kbps, 32 K Programmable
XBP9B-DMSTB002	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 900 MHz, 250 mW, RPSMA, 200 Kbps, 32 K Programmable
XBP9B-DMUTB002	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 900 MHz, 250 mW, U.FL, 200 Kbps, 32 K Programmable
XBP9B-DMWT-022	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 920 MHz (Australia), 250 mW, Wire Antenna, 200 Kbps
XBP9B-DMST-022	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 920 MHz (Australia), 250 mW, RPSMA, 200 Kbps
XBP9B-DMUT-022	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 920 MHz (Australia), 250 mW, U.FL, 200 Kbps
XBP9B-DPWT-021	XBee-PRO 900HP (S3B) Point2Multipoint, 920 MHz (Australia), 250 mW, Wire Antenna, 10 Kbps
XBP9B-DPST-021	XBee-PRO 900HP (S3B) Point2Multipoint, 920 MHz (Australia), 250 mW, RPSMA, 10 Kbps
XBP9B-DPUT-021	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 920 MHz (Australia), 250 mW, Wire Antenna, 200 Kbps, 32K Programmable
XBP9B-DMSTB022	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 920 MHz (Australia), 250 mW, RPSMA, 200 Kbps, 32K Programmable
XBP9B-DMUTB022	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 920 MHz (Australia), 250 mW, U.FL, 200 Kbps, 32K Programmable
XBP9B-DMWT-012	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 905/920 MHz, 250 mW, Wire Antenna, 200 Kbps (Brazil)
XBP9B-DMST-012	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 905/920 MHz, 250 mW, RPSMA Antenna, 200 Kbps (Brazil)
XBP9B-DMUT-012	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 905/920 MHz, 250 mW, U.FL Antenna, 200 Kbps (Brazil)
XBP9B-DPWT-011	XBee-PRO 900HP (S3B) Point2Multipoint, 905/920 MHz, 250 mW, Wire Antenna, 10 Kbps (Brazil)
XBP9B-DPST-011	XBee-PRO 900HP (S3B) Point2Multipoint, 905/920 MHz, 250 mW, RPSMA Antenna, 10 Kbps (Brazil)
XBP9B-DPUT-011	XBee-PRO 900HP (S3B) Point2Multipoint, 905/920 MHz, 250 mW, U.FL Antenna, 10 Kbps (Brazil)
XBP9B-DMSTB012	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 905/920 MHz, 250 mW, RPSMA, 200 Kbps, 32K Programmable (Brazil)
XBP9B-DMUTB012	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 905/920 MHz, 250 mW, Wire Antenna, 200 Kbps, 32K Programmable (Brazil)
XBP9B-DMWT-042	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 920 MHz (Singapore), 250 mW, Wire Antenna, 200 Kbps
XBP9B-DMST-042	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 920 MHz (Singapore), 250 mW, RPSMA, 200 Kbps
XBP9B-DMUT-042	XBee-PRO 900HP (S3B) DigiMesh, 920 MHz (Singapore), 250 mW, U.FL, 200 Kbps
XBP9B-DPWT-041	XBee-PRO 900HP (S3B) Point2Multipoint, 920 MHz (Singapore), 250 mW, Wire Antenna, 10 Kbps
XBP9B-DPST-041	XBee-PRO 900HP (S3B) Point2Multipoint, 920 MHz (Singapore), 250 mW, RPSMA, 10 Kbps
XBP9B-DPUT-041	XBee-PRO 900HP (S3B) Point2Multipoint, 920 MHz (Singapore), 250 mW, U.FL, 10 Kbps
XKP9-DM-0	XBee-PRO 900HP S3B Dev Kit (Domestic)
XKP9-DMB0	XBee-Pro 900HP (S3B) Development Kit 32K Programmable
XKP9-DM-2	XBee-PRO 900HP S3B 920 MHz Dev Kit (Australia)
XKP9-DM-1	XBee-PRO 900HP S3B 920 MHz Dev Kit (Brazil)
XKP9-DM-4	XBee-PRO 900HP S3B 920 MHz Dev Kit (Singapore)

DIGI SERVICE AND SUPPORT / You can purchase with confidence knowing that Digi is always available to serve you with expert technical support and our industry leading warranty. For detailed information visit www.digi.com/support.

© 1996-2015 Digi International Inc. All rights reserved.
All trademarks are the property of their respective owners.

91002310
B1/915

DIGI INTERNATIONAL WORLDWIDE HQ
877-912-3444 / 952-912-3444 / www.digi.com

DIGI INTERNATIONAL FRANCE
+33-1-55-61-98-98 / www.digi.fr

DIGI INTERNATIONAL JAPAN
+81-3-5428-0261 / www.digi-intl.co.jp

DIGI INTERNATIONAL SINGAPORE
+65-6213-5380

DIGI INTERNATIONAL CHINA
+86-21-50492199 / www.digi.com.cn

WWW.DIGI.COM



Xbee 2.4



MESH NETWORKING
EMBEDDED RF
MODULES FOR OEMS



XBEE® DIGIMESH® 2.4

Embedded RF modules deliver wireless connectivity using the innovative and easy-to-deploy DigiMesh protocol

XBee and XBee-PRO DigiMesh 2.4 embedded RF modules provide wireless connectivity to electronic devices using a globally deployable 2.4 GHz transceiver. These modules use the DigiMesh networking protocol. This innovative, peer-to-peer mesh network offers users added network stability through self-healing, dense network operation and support for sleeping routers, extending the operational life of battery dependent networks.

XBee modules are ideal for low-power applications. XBee-PRO modules are power-amplified versions of XBee modules for extended-range applications. Products in the XBee family are easy to use, share a common hardware

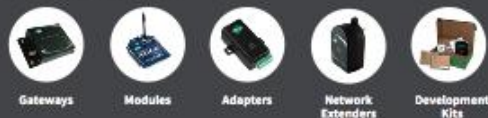
footprint, and are fully interoperable with other XBee products utilizing the same technology. They are available in a variety of different protocols to suit different applications, enabling users to substitute one XBee module for another with minimal development time and risk.

Digi's unsurpassed offering of XBee products provide users with seamless communication between devices. XBee adapters deliver wireless connectivity to electronic devices in wired networks. ConnectPort® X gateways enable users to access and configure remote devices in a network.

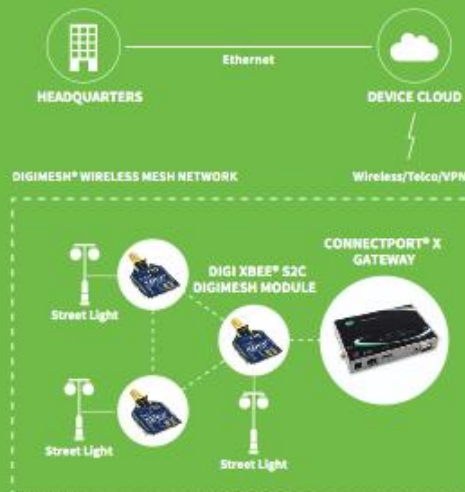
BENEFITS

- No configuration needed for out-of-the-box RF communications
- Common XBee footprint for a variety of RF modules
- Simple topology to deploy and grow
- 2.4 GHz for worldwide deployment
- Low-power XBee or extended-range XBee-PRO (pin/over-the-air compatible)
- Multiple antenna options
- Outdoor RF line-of-sight range up to 1 mile (1.6 km) with high-gain antennas
- DigiMesh peer-to-peer mesh networking protocol
 - Self-healing and discovery for network stability
 - Sleeping routers supported for long battery life

RELATED PRODUCTS

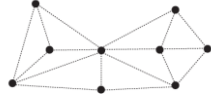


APPLICATION EXAMPLE

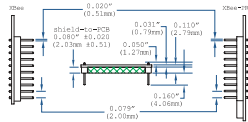


SPECIFICATIONS	Legacy XBee DigiMesh® 2.4	Legacy XBee-PRO DigiMesh® 2.4	Legacy XBee-PRO DigiMesh® 2.4 (Int'l)
PERFORMANCE			
RF DATA RATE	250 Kbps	250 Kbps	250 Kbps
INDOR/URBAN RANGE	100 ft (30 m)	300 ft (90 m)	200 ft (60 m)
OUTDOOR/RF LINE-OF-SIGHT RANGE	300 ft (90 m)	1 mile (1.6 km)	2500 ft (750 m)
TRANSMIT POWER	1 mW (+0 dBm)	63 mW (+18 dBm)	10 mW (+10 dBm)
RECEIVER SENSITIVITY (1% PER)	-92 dBm	-100 dBm	-100 dBm
FEATURES			
SERIAL DATA INTERFACE	3.3V CMOS serial UART	3.3V CMOS serial UART	3.3V CMOS serial UART
CONFIGURATION METHOD	AT & API	AT & API	AT & API
FREQUENCY BAND	2.4 GHz ISM	2.4 GHz ISM	2.4 GHz ISM
INTERFERENCE IMMUNITY	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
SERIAL DATA RATE	Up to 115.2 Kbps	Up to 115.2 Kbps	Up to 115.2 Kbps
ADC INPUTS	(6) 10-bit ADC inputs	(6) 10-bit ADC inputs	(6) 10-bit ADC inputs
DIGITAL I/O	13	13	13
ANTENNA OPTIONS	Chip, Wire Whip, U.FL, RPSMA	Chip, Wire Whip, U.FL, RPSMA	Chip, Wire Whip, U.FL, RPSMA
NETWORKING & SECURITY			
ENCRYPTION	128-bit AES	128-bit AES	128-bit AES
RELIABLE PACKET DELIVERY	Retries/Acknowledgments	Retries/Acknowledgments	Retries/Acknowledgments
ADDRESSING OPTIONS	PAN ID, channel, 64-bit address	PAN ID, channel, 64-bit address	PAN ID, channel, 64-bit address
CHANNELS	16	12	12
POWER REQUIREMENTS			
SUPPLY VOLTAGE	2.8 – 3.4VDC	2.8 – 3.4VDC	2.8 – 3.4VDC
TRANSMIT CURRENT	45 mA	250 mA (Wire, Chip, U.FL), 340 mA (RPSMA)	150 mA (Wire, Chip, U.FL), 180 mA (RPSMA)
RECEIVE CURRENT	50 mA	55 mA	55 mA
POWER-DOWN CURRENT	<50 uA	<50 uA	<50 uA
REGULATORY APPROVALS			
FCC (USA)	Yes	Yes	Yes
IC (CANADA)	Yes	Yes	Yes
ETSI (EUROPE)	Yes	No	Yes
C-TICK AUSTRALIA	Yes	Yes	Yes
TELEC (JAPAN)	Yes	No	Yes
ANATEL (BRAZIL)	Yes	Yes	Yes

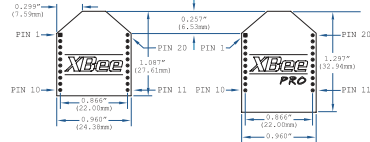
DigiMesh



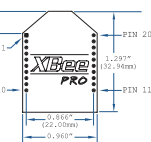
Side Views



Top View



Top View



PART NUMBERS	DESCRIPTION
XB24-DMDK	North American/International (except Japan) DigiMesh 2.4 Development Kit w/ 2 XBee and 2 XBee-PRO modules
XB24-DMDK-WJ	Japan DigiMesh 2.4 Development Kit w/ 2 XBee and 2 XBee-PRO modules (International)
XB24-DMUIT-250	XBee DigiMesh 2.4 low power module w/ U.FL connector
XB24-DMSIT-250	XBee DigiMesh 2.4 low power module w/ RPSMA connector
XB24-DMWIT-250	XBee DigiMesh 2.4 low power module w/ wire antenna
XB24-DMPIT-250	XBee DigiMesh 2.4 low-power module w/ PCB antenna
XBP24-DMSIT-250	XBee-PRO DigiMesh 2.4 extended range module w/ RPSMA connector
XBP24-DMSIT-250J	XBee-PRO DigiMesh 2.4 extended range module w/ RPSMA connector (International)
XBP24-DMWIT-250	XBee-PRO DigiMesh 2.4 extended range module w/ wire antenna
XBP24-DMWIT-250J	XBee-PRO DigiMesh 2.4 extended range module w/ wire antenna (International)
XBP24-DMUIT-250	XBee-PRO DigiMesh 2.4 extended range module w/ U.FL connector
XBP24-DMUIT-250J	XBee-PRO DigiMesh 2.4 extended range module w/ U.FL connector (International)
XBP24-DMPIT-250	XBee-PRO DigiMesh 2.4 extended range module w/ PCB antenna
XBP24-DMPIT-250J	XBee-PRO DigiMesh 2.4 extended range module w/ PCB antenna (International)

XBee S1 hardware will be obsoleted in 2017 in favor of XBee S2C or newer hardware.

FOR MORE INFORMATION
PLEASE VISIT WWW.DIGI.COM

DIGI SERVICE AND SUPPORT / You can purchase with confidence knowing that Digi is always available to serve you with expert technical support and our industry leading warranty. For detailed information visit www.digi.com/support.

© 1996-2016 Digi International Inc. All rights reserved.
All trademarks are the property of their respective owners.

91001486
C3/1016

DIGI INTERNATIONAL WORLDWIDE HQ
877-912-3444 / 952-912-3444 / www.digi.com

DIGI INTERNATIONAL FRANCE
+33-1-55-61-98-98 / www.digi.fr

DIGI INTERNATIONAL JAPAN
+81-3-5428-0261 / www.digi-intl.co.jp

DIGI INTERNATIONAL SINGAPORE
+65-6213-5380

DIGI INTERNATIONAL CHINA
+86-21-50492199 / www.digi.com.cn



Diodo 1N4001

Features

- Diffused Junction
- High Current Capability and Low Forward Voltage Drop
- Surge Overload Rating to 30A Peak
- Low Reverse Leakage Current
- Lead Free Finish, RoHS Compliant (Note 3)



Mechanical Data

- Case: DO-41
- Case Material: Molded Plastic. UL Flammability Classification Rating 94V-0
- Moisture Sensitivity: Level 1 per J-STD-020D
- Terminals: Finish - Bright Tin. Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Cathode Band
- Ordering Information: See Page 2
- Marking: Type Number
- Weight: 0.30 grams (Approximate)

Dim	DO-41 Plastic	
	Min	Max
A	25.40	—
B	4.06	5.21
C	0.71	0.864
D	2.00	2.72
All Dimensions in mm		

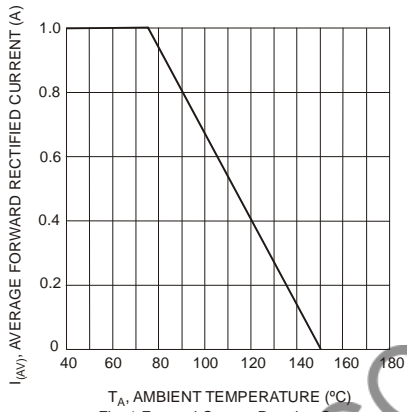
Maximum Ratings and Electrical Characteristics (@T_A = +25°C unless otherwise specified.)

Single phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.
For capacitive load, derate current by 20%.

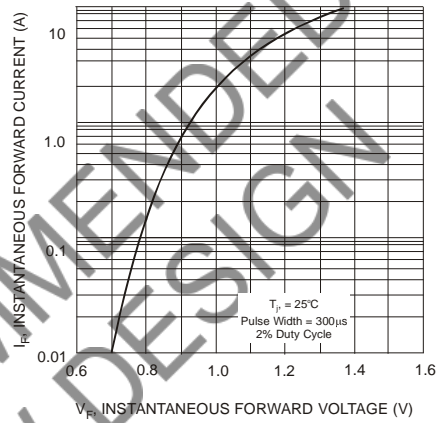
Characteristic	Symbol	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage	V _{RRM}	50	100	200	400	600	800	1000	V
Working Peak Reverse Voltage	V _{RWM}								
DC Blocking Voltage	V _R								
RMS Reverse Voltage	V _{R(RMS)}	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectified Output Current (Note 1) @ T _A = +75°C	I _O	1.0							A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms Single Half Sine-Wave Superimposed on Rated Load	I _{FSM}	30							A
Forward Voltage @ I _F = 1.0A	V _{FM}	1.0							V
Peak Reverse Current @ T _A = +25°C at Rated DC Blocking Voltage @ T _A = +100°C	I _{RM}	5.0							μA
Typical Junction Capacitance (Note 2)	C _J	15							pF
Typical Thermal Resistance Junction to Ambient	R _{θJA}	100							K/W
Maximum DC Blocking Voltage Temperature	T _A	+150							°C
Operating and Storage Temperature Range	T _J , T _{STG}	-65 to +150							°C

- Notes:
1. Leads maintained at ambient temperature at a distance of 9.5mm from the case.
 2. Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0V DC.
 3. EU Directive 2002/95/EC (RoHS). All applicable RoHS exemptions applied, see EU Directive 2002/95/EC Annex Notes.

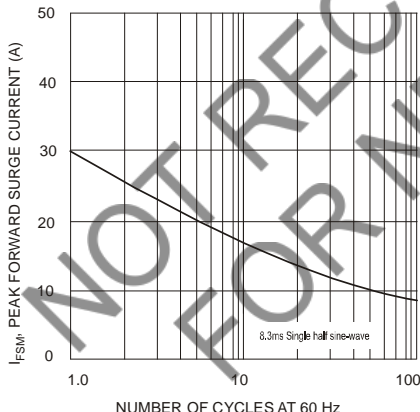
NOT RECOMMENDED FOR NEW DESIGN
USE S1A-S1M series



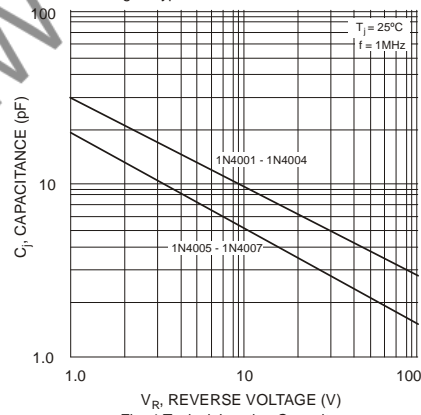
T_A, AMBIENT TEMPERATURE (°C)
Fig. 1 Forward Current Derating Curve



V_F, INSTANTANEOUS FORWARD VOLTAGE (V)
Fig. 2 Typical Forward Characteristics



I_{FSM}, PEAK FORWARD SURGE CURRENT (A)
NUMBER OF CYCLES AT 60 Hz
Fig. 3 Max Non-Repetitive Peak Fwd Surge Current



V_R, REVERSE VOLTAGE (V)
Fig. 4 Typical Junction Capacitance

Ordering Information (Note 4)

Device	Packaging	Shipping
1N4001-B	DO-41 Plastic	1K/Bulk
1N4001-T	DO-41 Plastic	5K/Tape & Reel, 13-inch
1N4002-B	DO-41 Plastic	1K/Bulk
1N4002-T	DO-41 Plastic	5K/Tape & Reel, 13-inch
1N4003-B	DO-41 Plastic	1K/Bulk
1N4003-T	DO-41 Plastic	5K/Tape & Reel, 13-inch
1N4004-B	DO-41 Plastic	1K/Bulk
1N4004-T	DO-41 Plastic	5K/Tape & Reel, 13-inch
1N4005-B	DO-41 Plastic	1K/Bulk
1N4005-T	DO-41 Plastic	5K/Tape & Reel, 13-inch
1N4006-B	DO-41 Plastic	1K/Bulk
1N4006-T	DO-41 Plastic	5K/Tape & Reel, 13-inch
1N4007-B	DO-41 Plastic	1K/Bulk
1N4007-T	DO-41 Plastic	5K/Tape & Reel, 13-inch

Note: 4. For packaging details, visit our website at <http://www.diodes.com/datasheets/ap02008.pdf>.



**NOT RECOMMENDED FOR NEW DESIGN
USE S1A-S1M series**

IMPORTANT NOTICE

DIODES INCORPORATED MAKES NO WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, WITH REGARDS TO THIS DOCUMENT, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE (AND THEIR EQUIVALENTS UNDER THE LAWS OF ANY JURISDICTION).

Diodes Incorporated and its subsidiaries reserve the right to make modifications, enhancements, improvements, corrections or other changes without further notice to this document and any product described herein. Diodes Incorporated does not assume any liability arising out of the application or use of this document or any product described herein; neither does Diodes Incorporated convey any license under its patent or trademark rights, nor the rights of others. Any Customer or user of this document or products described herein in such applications shall assume all risks of such use and will agree to hold Diodes Incorporated and all the companies whose products are represented on Diodes Incorporated website, harmless against all damages.

Diodes Incorporated does not warrant or accept any liability whatsoever in respect of any products purchased through unauthorized sales channel. Should Customers purchase or use Diodes Incorporated products for any unintended or unauthorized application, Customers shall indemnify and hold Diodes Incorporated and its representatives harmless against all claims, damages, expenses, and attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized application.

Products described herein may be covered by one or more United States, international or foreign patents pending. Product names and markings noted herein may also be covered by one or more United States, international or foreign trademarks.

This document is written in English but may be translated into multiple languages for reference. Only the English version of this document is the final and determinative format released by Diodes Incorporated.

LIFE SUPPORT

Diodes Incorporated products are specifically not authorized for use as critical components in life support devices or systems without the express written approval of the Chief Executive Officer of Diodes Incorporated. As used herein:

- A. Life support devices or systems are devices or systems which:
1. are intended to implant into the body, or
 2. support or sustain life and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling can be reasonably expected to result in significant injury to the user.
- B. A critical component is any component in a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or to affect its safety or effectiveness.

Customers represent that they have all necessary expertise in the safety and regulatory ramifications of their life support devices or systems, and acknowledge and agree that they are solely responsible for all legal, regulatory and safety-related requirements concerning their products and any use of Diodes Incorporated products in such safety-critical, life support devices or systems, notwithstanding any devices- or systems-related information or support that may be provided by Diodes Incorporated. Further, Customers must fully indemnify Diodes Incorporated and its representatives against any damages arising out of the use of Diodes Incorporated products in such safety-critical, life support devices or systems.

Copyright © 2014, Diodes Incorporated

www.diodes.com