

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Desarrollo de algoritmo de software para comunicación
eficiente y de bajo consumo de potencia en red de
sensores inalámbricos

Informe de Graduación para optar por el título de Ingeniero
en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Marco Antonio Vásquez Espinoza

Cartago, 2012

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica

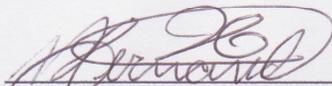
**PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Marco Antonio Vásquez Espinoza

Nombre del proyecto: Desarrollo de algoritmo de software para comunicación eficiente y de bajo consumo de potencia en red de sensores inalámbricos

Miembros del Tribunal



Ing. Nestor Hernández
Profesor lector



Dr. Carlos Meza Benavides
Profesor lector



Ing. Marvin Hernández Cisneros
Profesor asesor

Los miembros de este tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 25 de junio de 2012

Declaro que el presente anteproyecto de graduación ha sido realizado en su totalidad por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad por el contenido de este anteproyecto de graduación.

Cartago, 25 de Junio de 2012



Marco Antonio Vásquez Espinoza
Ced. 2 - 0595 - 0732

RESUMEN

El control de maduración y tamaño del plátano es uno de los retos más importantes de las empresas exportadoras del fruto a los diferentes mercados del mundo, debido a ello nos hemos dado a la tarea de implementar un sistema electrónico, autosuficiente y de muy bajo consumo energético que muestre las diferentes variables del fruto, como lo es el tamaño y temperatura del mismo pero de forma inalámbrica. Además, al ser un sistema alimentado por una batería de litio y no depender de la red eléctrica se ha incorporado un monitoreo constante del nivel de batería en el dispositivo para asegurar el continuo estado del sistema.

La placa utilizada para realizar la implementación del proyecto se llama Waspote y cuenta con las características necesarias para sensar las variables, además posee transmisión inalámbrica de datos y batería de litio recargable.

Palabras clave: Waspote, consumo energético, Libelium, sensores inalámbricos, Zigbee

ABSTRACT

The control of maturity and size of the banana is one of the most important challenges of fruit export companies to different markets of the world, due to this we have given it the task of implementing an electronic, self-sufficient and very low energy consumption showing the different variables of the fruit, as is the size and temperature but wirelessly. Moreover, being a system powered by a lithium battery and not rely on the power grid has incorporated a constant monitoring of battery level on the device to ensure continuous system state.

The plate used for the implementation of the project is called Waspote and has the features needed to sense the variables, it also has wireless data transmission and rechargeable lithium battery.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres, hermano y novia, gracias a ellos por su ayuda, compañía, esfuerzo e incondicional apoyo para sacar adelante esta carrera.

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a todas las personas que me han ayudado en el desarrollo e investigación de este proyecto, en especial al profesor Ing Marvin Hernández por haber confiado en mí para desarrollar este tan importante proyecto. A mi familia, compañeros y mis amigos quienes siempre me brindaron incondicional apoyo, confianza y respaldo.

Para todos,

Gracias.

INDICE GENERAL

Capítulo 1:	Introducción.....	1
1.1	Problema existente e importancia de su solución.....	2
1.2	Solución seleccionada.....	2
Capítulo 2:	Meta y Objetivos.....	4
2.1	Meta.....	4
2.2	Objetivo general.....	4
2.3	Objetivos específicos.....	4
Capítulo 3:	Marco teórico.....	5
3.1	Descripción del sistema	5
3.1.1	Diagrama de bloques del primer nivel.....	5
3.1.2	Diagrama de bloques del segundo nivel.....	5
3.1.3	Diagrama de bloques del tercer nivel.....	6
3.1.4	Plataforma Waspnote.....	6
3.1.4.1	Consumo energético de Waspnote.....	9
3.1.5	Plátano de exportación.....	10
3.1.5.1	Índice de Maduración del plátano.....	11
3.1.5.2	Características de Tamaño y Peso.....	12
Capítulo 4:	Procedimiento metodológico.....	13
4.1	Reconocimiento y definición del problema.....	13
4.2	Obtención y análisis de información.....	13
4.3	Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución	13
4.4	Implementación de la solución.....	14
4.5	Reevaluación y rediseño.....	15
Capítulo 5:	Descripción detallada de la solución	16
5.1	Análisis de soluciones y selección final.....	16
5.2.	Descripción del hardware.....	16
5.3.	Descripción del software.....	18
5.3.1	Configuración de tiempo.....	19

5.3.2 Configuración de red.....	21
5.3.3 Configuración de transmisión de datos.....	22
5.3.4 Software para el sensor de dendrómetro.....	23
5.3.5 Configuración modo Hibernar	27
Capítulo 6: Análisis de Resultados.....	31
6.1 Resultados.....	31
6.2 Análisis	40
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones.....	45
Bibliografía.....	47

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1	Diagrama bloques primer nivel	5
Figura 3.2	Diagrama bloques segundo nivel.....	5
Figura 3.3	Diagrama bloques tercer nivel.....	6
Figura 3.4	Embebido Wasmote.....	7
Figura 3.5	Diagrama del sistema de alimentación.....	8
Figura 5.1	XBee ZigBee	17
Figura 5.2	Diagrama del sistema Acondicionador de dendrómetro.....	18
Figura 5.3	IDE de programación del Wasmote.....	19
Figura 5.4	Conectores del Sensor I/O de la placa Wasmote.....	24
Figura 5.5	Descripción de pines del Sensor I/O.....	24
Figura 5.6	Jumpers del Wasmote.....	28
Figura 5.7	Diagrama de estados del paso de Encendido a Hibernar.....	29
Figura 6.1	Circuito acondicionador de señal.....	31
Figura 6.2	Planta sensor dendrómetro	31
Figura 6.3	Gráfica diámetro Wasmote versus diámetro real.....	32
Figura 6.4	Gráfica tensión de salida versus diámetro Wasmote.....	33
Figura 6.5	Wasmote en funcionamiento.....	33
Figura 6.6	Niveles de voltaje de batería configurables teóricos.....	34
Figura 6.7	Grafica de nivel de energía respecto a nivel de tensión ..	35
Figura 6.8	Nivel de tensión respecto a cantidad de días	37
Figura 6.9	Configuración del Gateway receptor	39
Figura 6.10	Recepción de datos en el Gateway a 400 metros del nodo transmisor 1	40

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Consumo de potencia del Waspote de acuerdo al modo.....	10
Tabla 5.1	Características básicas del ZigBee.....	17
Tabla 6.1	Valores de diámetro de acuerdo a salida de tensión de potenciómetro	32
Tabla 6.2	Ecuación característica de diámetro versus valor real.....	32
Tabla 6.3	Rango máximo de distancia transmitida por día.....	34
Tabla 6.4	Porcentaje de batería versus nivel de tensión.....	35
Tabla 6.5	Consumo de energía por día.....	36
Tabla 6.6	Consumo de energía en modo continuo de transmisión.....	38

Capítulo 1: Introducción

La mayoría de las empresas presentan problemas en las líneas de producción, debido a una mala supervisión y control de las diferentes variables que comprenden un sistema de muestreo.

El control de maduración y tamaño del plátano es uno de los retos de las empresas exportadoras del fruto a los diferentes mercados del mundo, pero especialmente a Estados Unidos donde se dirige la mayoría de las ventas. Al exportar productos comestibles a este país la primera institución encargada para el control sanitario es *Animal and Plant Health Inspection Service* conocida como APHIS la cual pertenece al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y una vez en los puertos son revisados por inspectores de Plant Protection and Quarantine, pero esto no termina acá, pues también la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos regula las tolerancias y límites permisibles de los residuos químicos o pesticidas en los productos. Es indudable que todo esto implica costos y procesos de tiempo adicionales para este tipo de exportación. Por lo tanto, encontrar el punto perfecto para el corte del racimo de plátanos se convierte en el aspecto más importante para la exportación, tomando en cuenta la maduración de dicho fruto que transcurre en su traslado. Para el mercado estadounidense se valora de acuerdo a Índice de Madurez, éste debe ser verde intenso, tamaño aproximado a 22 cm, edad a partir de la floración entre nueve a doce semanas, un calibre entre 1,56 y 1,94 de pulgada cuadrada.

El proyecto se desarrollará utilizando el modulo Waspmote desarrollado por Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L, que consiste en un dispositivo sensorial inalámbrico que envía señales a un Gateway, sobre el tamaño y temperatura del fruto y otras variables del sistema como nivel de batería del sistema y cual dispositivo envía las señales, pero esto logrando la máxima eficiencia de consumo de potencia en la transmisión de estas características,

esto con el fin de supervisar de manera correcta la producción del plátano para esta industria.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

Debido al poco control que han presentado las empresas exportadoras de plátano en referente a maduración, tamaño y temperatura del fruto, se han demostrado una serie de problemas entorno al manejo inadecuado de estas variables, implicando costos y pérdidas económicas elevadas para los productores, entonces el proyecto busca poder observar estas características mediante una plataforma que las mida y muestre periódicamente, de acuerdo al crecimiento pero con un consumo de potencia muy bajo.

1.2 Solución seleccionada

Para poder abordar este problema se utiliza una plataforma desarrollada Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L, la cual por sus características se considera una placa idónea para la puesta en marcha del diseño de ingeniería, pues esta cuenta con entradas analógicas en las cuales podemos conectar los sensores a utilizar, un alcance de transmisión inalámbrica bastante superior respecto a otros sistemas *smart metering* existentes en el mercado que cuentan con alcance limitado y con dependencia de la red eléctrica, lo que conlleva a que si en algún momento el suministro de corriente falla, el dispositivo deja de funcionar y con ello no envía señales de alertas y alarmas.

La utilización de Waspnote que incorpora un sistema de alimentación por medio de baterías y consumo de potencia muy bajo en diferentes modos de programación, convierte a Waspnote en un sistema muy fiable para redes sensoriales inalámbricas y en operación a grandes espacios de terreno donde no exista suministro de corriente eléctrica.

Se utiliza como lenguaje de programación C++, además Waspmode cuenta con una IDE con característica API Open Source para poder programar

en alto nivel, presenta protocolos de comunicación digitales muy eficientes para la programación como lo es la Programación Inalámbrica, nos referimos a ello como Programming Over the Air conocido como sistema OTA, esto se ha venido usando en los últimos años para la programación y reprogramación de dispositivos móviles. Además, permite la actualización, cambio de versiones y recuperación de cualquier dispositivo que quedara en suspensión sin acceso físico al mismo.

El enfoque del proyecto es meramente de automatización de un proceso altamente eficiente en la producción de plátano, esto se logra mediante la creación de un modelo matemático que permita mostrar la respuesta ante perturbaciones físicas y químicas que ocurren en la maduración del plátano en un determinado periodo de tiempo pero sin depender del suministro de red eléctrica nacional.

Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1 Meta

Disminuir en un 90% el consumo de potencia de la red sensorial que muestrea las características de tamaño y temperatura en el plátano de exportación.

2.2 Objetivo general

Diseñar un algoritmo de software para una red sensorial que permita identificar el diámetro del plátano de acuerdo a su maduración pero con el mínimo consumo de potencia.

2.3 Objetivos específicos

1. Determinar las características de funcionamiento de Waspote que inciden en el consumo de potencia del sistema.
2. Desarrollar un software para un circuito electrónico basado en Waspote para la adquisición y muestreo periódico de datos de la medición de frutos.
3. Formular un modelo matemático basado en a las mediciones de salida de los sensores inalámbricos y la respuesta de consumo de potencia.

Capítulo 3: Marco teórico

En el presente capítulo se tratarán las principales características y fundamentos relacionados con el problema a abordar. Se muestra las particularidades básicas del sistema de Wasp mote como los aspectos electrónicos que toman en cuenta para la selección y el desarrollo del proyecto.

3.1 Descripción del sistema

3.1.1. Diagrama de bloques del primer nivel

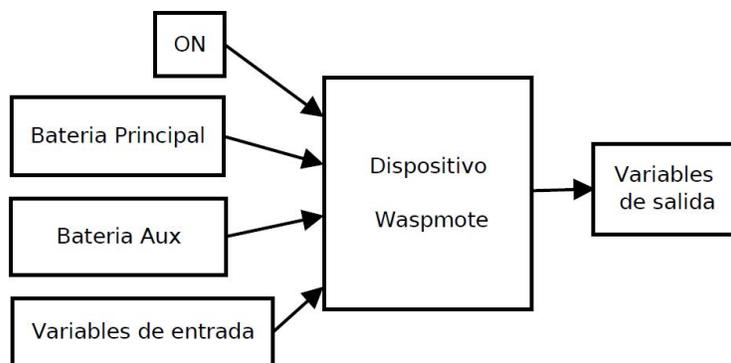


Figura 3.1 Diagrama bloques primer nivel

3.1.2. Diagrama de bloques del segundo nivel

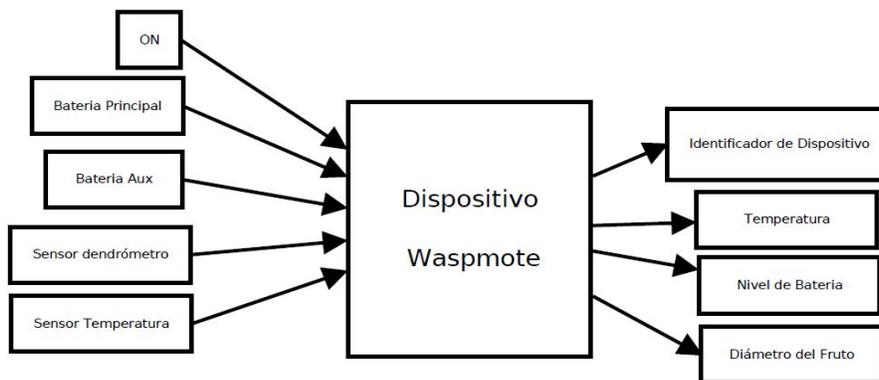


Figura 3.2 Diagrama bloques segundo nivel

3.1.3. Diagrama de bloques del tercer nivel

En la siguiente imagen se aprecia el diagrama de bloques de interconexión entre los principales módulos del Waspote,

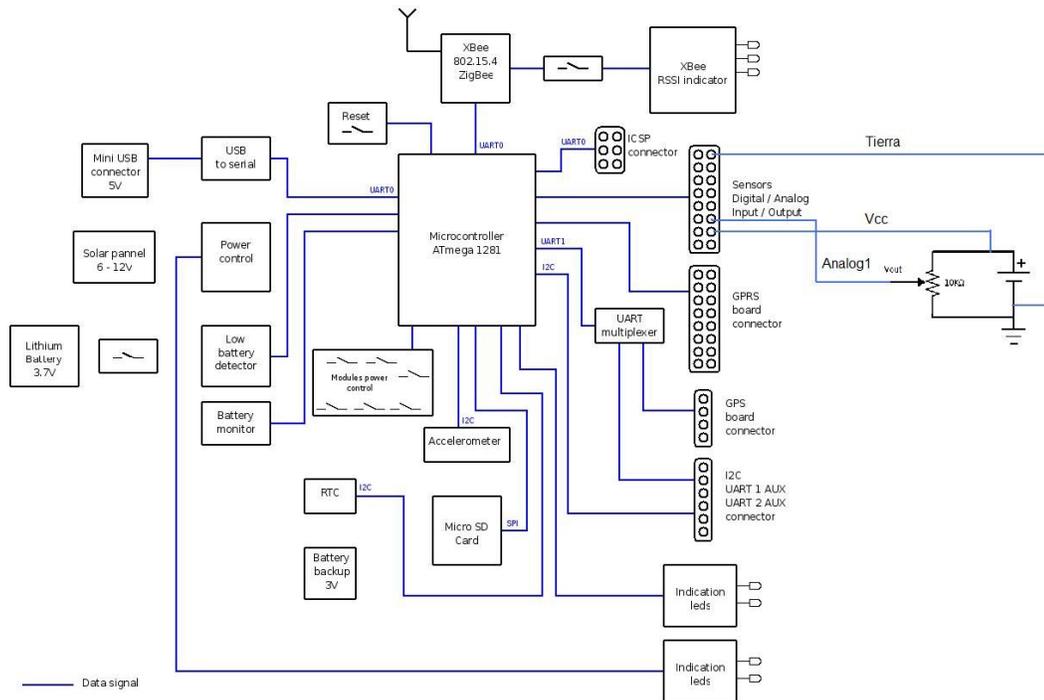


Figura 3.3 Diagrama bloques tercer nivel [2]

3.1.4. Plataforma Waspote

El dispositivo Waspote es un dispositivo sensorial desarrollado por Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L, esta placa puede medir varios tipos de sensores tanto analógicos como digitales que se le conectan en sus entradas, se pueden mencionar algunas de las aplicaciones principales en las cuales se utiliza este, la medición de corriente eléctrica, peso de materiales, flujo de agua, distancias, desplazamiento de objetos, entre otros más. Las características de la plataforma Waspote son ilimitadas en cuanto a posibles aplicaciones, pues amplían y posibilitan la monitorización de diferentes

parámetros en muchos lugares, tanto interiores como exteriores. La figura 3.4 se observa el dispositivo.

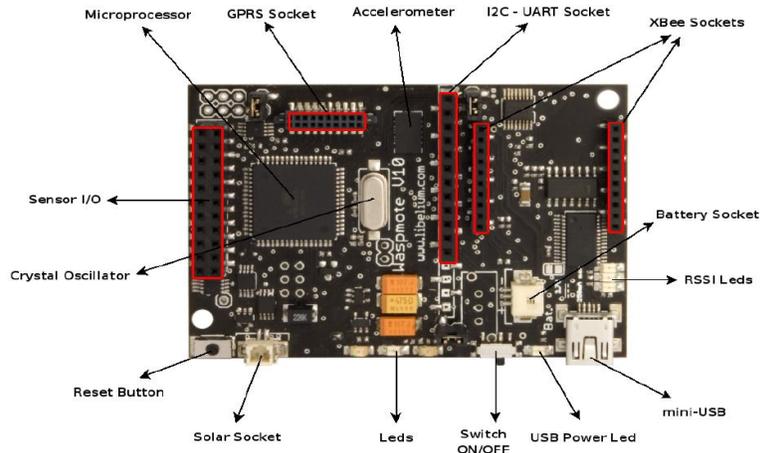


Figura 3.4 Embebido Waspote [2]

Características eléctricas del Waspote

Tensión de batería mínima de funcionamiento 3.3 V y máxima de 4,2V

Tensión de carga USB 5 V

Tensión de carga placa solar 6 - 12 V

Corriente de carga de batería por USB 100 mA (max)

Corriente de carga de batería por placa solar 280 mA (max)

Waspote logra una comunicación con otros dispositivos externos mediante puertos de entrada/salida que tiene disponibles. Los dispositivos Waspote se pueden comunicar con cualquier tipo de sensor, componente o módulo electrónico siempre y cuando se tomen en cuenta las especificaciones técnicas requeridas para cada puerto.

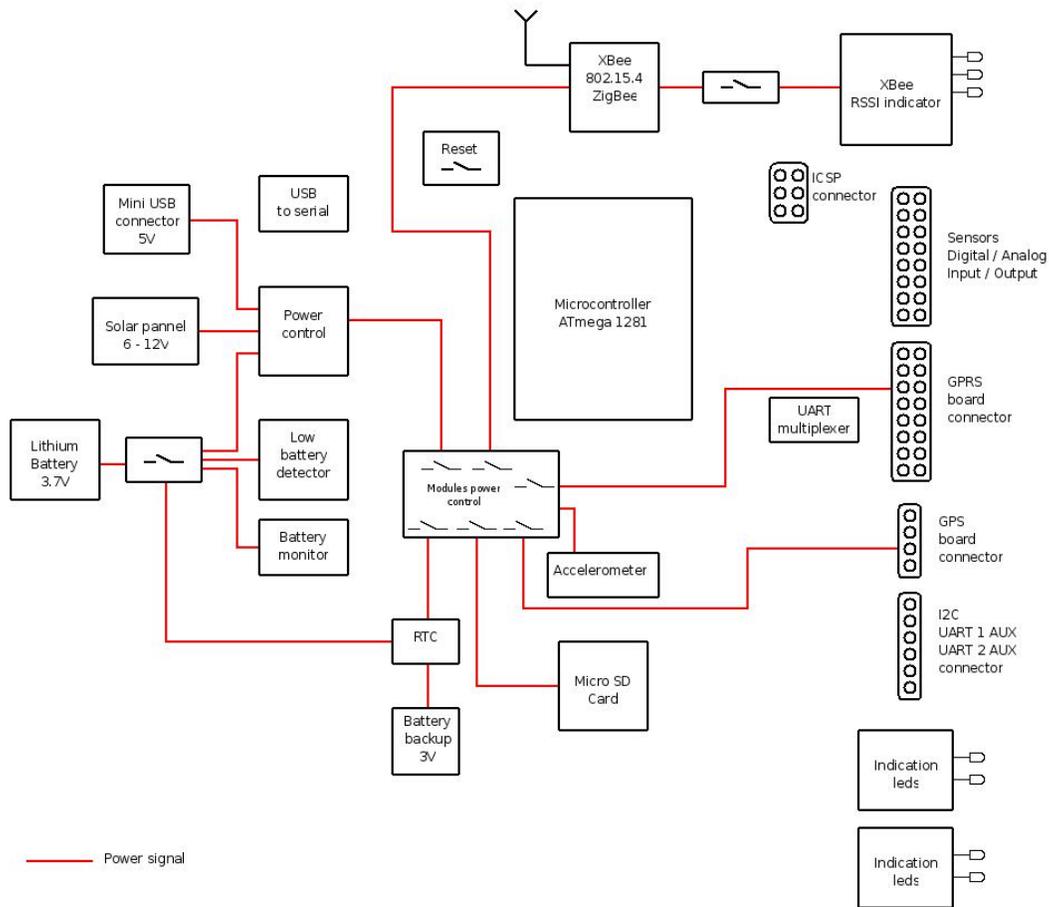


Figura 3.5 Diagrama del sistema de alimentación [2]

La plataforma cuenta con un integrado de reloj de tiempo real llamado RTC (Real Time Clock), lo cual mantiene informado al sistema del momento del tiempo en el que este se encuentra, se ve en la figura 3.5 que dicho RTC esta siempre conectado a la alimentación del sistema sin importar si este esta en estado apagado este continua con la batería de backup o auxiliar. Esto permite programar al Wasmote para realizar todo tipo de tareas de acuerdo a un tiempo específico, se puede programar alarmas en el RTC especificando día/hora/minuto/segundo. La programación y control del RTC se hace a través del bus de datos I2C. Esto nos permite tener un control total acerca de cuándo pretendemos que se despierte el dispositivo para capturar los valores y con ello realizar todas las acciones que se le programan, por ello podemos contar con un máximo ahorro de energía ya sea en modo **Deep Sleep** e **Hibernate**.

Con respecto a las interrupciones que son enviadas al microcontrolador las cuales indican que debe atender otra la tarea que este realizando para atender a un evento que acaba de suceder, una vez que pasen liberan al microcontrolador de tener que estar tomando en cuenta a los sensores y que sean ellos los que avisen a Waspote cuando se alcanza una interrupción. Dicho dispositivo cuenta con Interrupciones Sincronías que se programan mediante timers. Estas se programan cuándo se requieren de acuerdo a un tiempo. Hay dos tipos de alarmas por temporizador las cuales son **periódicas** que se especifican en un momento concreto, en un tiempo futuro y por otro lado tenemos las **relativas** que se programan teniendo en consideración el tiempo actual y de acuerdo a este sumarle a cuando queremos que la interrupción se ejecute.

3.1.4.1 Consumo energético de Waspote

El dispositivo Waspote cuenta con cuatro modos de funcionamiento para la parte energética.

- **ON:** Este es el modo normal de funcionamiento de la placa. El consumo de potencia en este estado corresponde a 9mA.
- **Sleep:** En este modo el programa principal se detiene, el microcontrolador cambia a un estado de latencia, y en la cual también puede ser despertado por interrupciones asíncronas o síncronas producidas por el Watchdog del sistema. El consumo de potencia para este modo es de 62µA.
- **Deep Sleep:** Al igual que en el modo Sleep el programa principal se detiene, el microcontrolador cambia a un estado de latencia y en la cual también puede ser despertado por interrupciones asíncronas o síncronas producidas por el RTC. El consumo es de 62µA.
- **Hibernate:** Para este modo el programa principal se detiene, el microcontrolador y todos los módulos del dispositivo Waspote quedan en completa desconexión. Para volver a activar el dispositivo una alarma es programada antes en el RTC. Como todo queda desconectado de la

batería principal el dispositivo pasa a ser alimentado por una batería auxiliar de la que consume 0,7 μ A.

Tabla 3.1 Consumo de potencia del Waspote de acuerdo al modo

Modo	Consumo	Procesador	Ciclo	Interrupciones
ON	9mA	ON	-	Síncronas y Asíncronas
Sleep	62 μ A	ON	32ms - 8s	Síncrona (Watchdog) y Asíncronas
Deep Sleep	62 μ A	ON	8s - min/horas/días	Síncrona (RTC) y Asíncronas
Hibernate	0,7 μ A	OFF	8s - min/horas/días	Síncrona (RTC)

Para lograr encontrar el estado de “Hibernate” es comprobar que el bandera correspondiente se ha activado para lograra la interrupción.

3.1.5 Plátano de exportación

Al ser Estados Unidos el principal comprador de plátano de Costa Rica exige ciertos requerimientos respecto a la calidad del fruto los cuales se muestran a continuación;

- Deben ser enteros
- Firmes, no deben presentar deshidratación o algún tipo de suavidad.
- Si la presentación de los plátanos es en dedos, deberán estar sueltos y haber dejado al menos 2.5 cm de longitud entre el pedúnculo en el punto de inserción.

- Formados adecuada, los plátanos muy curvos no pasan.
- Sin grietas o heridas que puedan de alguna forma alcanzar la pulpa;
- No se envían plátanos con alteraciones, golpes, grietas, heridas o rajaduras que provoquen el deterioro del producto.
- Limpios, se debe de realizar una limpieza exhaustiva para eliminar residuos de grasa, tierra, residuos visibles de agroquímicos, entre otros.
- La humedad debe estar en límites adecuados para la exportación.
- Libres de olores y sabores diferentes.
- Separado de microorganismos, insectos y hongos.
- Con un grado de madurez adecuado.
- El plátano debe presentar un desarrollo adecuado y un estado que les permita soportar la manipulación, el transporte y la temperatura de acuerdo al lugar de destino a las exigencias comerciales.

Como todos sabemos los requerimientos de color en el plátano varía según el mercado al cual se pretende enviar al igual que su uso final, pero para el caso de los Estados Unidos se envía un plátano que llegue al mercado mayorista con un color verde intenso.

3.1.5.1 Índice de Maduración del plátano

La característica conocida como índice de madurez depende del producto requerido el cual se demanda y el plátano de importación no es la excepción y tiene un punto idóneo. La condición para el plátano que se envía a Estados Unidos se debe de cosechar hasta un máximo de verde intenso. Por lo general, se solicita un grado mínimo de madurez ajustado por un color claro tres cuartos y con un tamaño de 22 cm por dedo. Es de suma importante que se verifique este grado mínimo, además este grado de madurez final para el producto depende de la madurez fisiológica original del plátano que se trata. En conclusión, para Estados Unidos a partir de la fecha de floración el fruto debe contar con una edad entre 9 y 12 semanas y también un calibre entre 3,96 y 4,93 centímetros cuadrados.

3.1.5.2 Características de Tamaño y Peso

Para realizar la exportación de plátano a los Estados Unidos se diferencian dos tipos de frutos según su tamaño y peso, se muestran los denominados como "Premium" y plátanos Número Dos, estos se categorizan típicamente por el tamaño en cuanto a su longitud respecto a la medida de punta hasta la pulpa. Para el plátano Premium se mide en promedio como diez pulgadas y para el plátano conocido como plátano número Dos que mide en promedio ocho punto cinco pulgadas de longitud.

Otro aspecto de importancia para este tipo de plátano es el calibre mínimo para que se pueda realizar la exportación y este se establece en 17 como la medida de 3.9 cm, el calibre máximo es de 27 medida en centímetros de 4.7.

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Debido a una necesidad planteada por el profesor Marvin Hernández respecto a la poca poca supervisión que tiene el plátano de exportación, en cuanto a su crecimiento y condiciones de temperatura, nos damos a la tarea de encontrar un dispositivo sensorial e inalámbrico pero con consumo de potencia muy bajo como característica principal y que logre monitorizar de forma eficiente estas variables, además de que no dependa del suministro de corriente de forma permanente.

4.2 Obtención y análisis de información

Toda la información sobre las restricciones de la planta a desarrollar respecto al consumo de energía, se realizó mediante mediciones sobre el crecimiento del fruto con la placa y características del clima en donde se desarrolla, además de investigación que se le realizó al dispositivo Waspote sobre sus especificaciones, dicho embebido lo encontramos en los laboratorios de electrónica SesLab del Instituto Tecnológico de Costa Rica al igual que algunos documentos sobre modos de utilización. Se realizó un análisis sobre Waspote en la página de Internet del fabricante donde se exponen informes técnicos y guías de utilización y desarrollo.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Cuando se va desarrollando el proyecto van apareciendo nuevas formas de presentar la solución más adecuada, nos ponemos a pensar en alarmas sonoras para cuando ya esta de corte el plátano o inclusive alarmas visuales como lo son encendido de luces que indiquen que el periodo ya esta concluido, sin embargo no podemos agregar nada al sistema que no sea el reporte de las condiciones necesarias al Gateway principal pues cada aspecto que se agregue representa consumo de potencia que va en detrimento de nuestro

objetivo principal que es el mínimo consumo de energía por parte de la planta seleccionada. Pero estas pueden ser agregadas en el Gateway cuando este valore el tamaño ya llevo al limite.

Cada una de las etapas se fueron simulando para observar cual presentaba un menor consumo de energía y que cumpla con las especificaciones de los objetivos, por lo tanto algunas partes interesantes como mostrar el tiempo actual del sistema cuando se envía datos, grabar en memoria en tamaño del plátano por día, o a lo mejor agregar un GPS que muestre la zona en que se encuentre monitoreando no son viables para un sistema que tiene que estar 12 semanas aproximadamente a la intemperie y con una batería de litio como único medio aprovisionador de energía.

4.4 Implementación de la solución

Para abordar el proyecto es necesario contar con los componentes que requiere la planta, pero cada uno de estos se requirió de investigación previa sobre características de los dispositivos electrónicos y tipos de sensores a utilizar y el avance del proyecto es consecuencia directa de una serie de pasos que se muestran a continuación,

- Se realizó una investigación sobre las características del plátano de exportación para identificar el tipo de sistema a evaluar, refiérase al aspecto físico donde se implementara la planta y cuales son los aspectos más relevantes; como índice de maduración, humedad, temperatura y ambiente de trabajo en el cual estará expuesto el diseño.
- Posteriormente se analizó cuáles son los sensores que más se ajustan a la planta, tomando en cuenta factores como temperatura de operación, humedad, costo, consumo de potencia entre otros, para lograr de manera exitosa la solución del mismo.
- Se mide la respuesta de los sensores para así modelar el sistema que define la planta y realizar el acondicionador de señal de modo programable.

- Una vez completados los pasos anteriores se procede a conseguir los materiales necesarios que intervienen en el desarrollo del proyecto, como lo es el módulo Wasmote y los diferentes sensores a utilizar en el sistema.
- Trabajar en el diseño del software que va ser implementado en el Wasmote es la etapa consecuente al desarrollo del proyecto.
- Hacer pruebas de muestreo con el primer avance del proyecto, para analizar su impacto en el consumo de potencia y las mediciones de los datos que son enviados al exterior.
- Finalmente se depura el programa ante posibles errores, para proceder a la instalación de manera definitiva de la planta.

4.5 Reevaluación y rediseño

Es posible agregar nuevas mejoras al sistema que permita mayor eficiencia para el control de las variables de diámetro del fruto con un sensor preciso y que valore el tamaño de varios plátanos del mismo racimo, además de un muestreador de temperatura tanto del lugar como del racimo. Se puede agregar un panel solar económico al sistema que permita realizar un abastecimiento constante de la batería que suple de potencia a la placa, para que cuando se corte el racimo de plátanos no sea necesario cargar la batería o sustituirla por otra cargada.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

5.1 Análisis de soluciones y selección final

A pesar de que existen muchas placas de embebidos que podemos trabajar para realizar el monitoreo de variables analógicas y enviarlas a través de protocolos de red, se escoge como punto de partida el dispositivo Wasmote, la cual no solo integra estas funcionalidades sino que además se le pueden agregar baterías para el uso independiente de suministro de energía continuo e incorpora además otra batería auxiliar de tres voltios similar a las utilizadas por los relojes comunes, lo que permite agregar controladores de tiempo e incluso seleccionar interrupciones sincrónicas periódicas para el monitoreo de variables de acuerdo a tiempos especificados por el usuario. Por lo tanto, se considera la placa Wasmote de Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. como la más idónea por sus características para la solución más eficiente y económica para esta necesidad.

5.2. Descripción del hardware

El dispositivo de Wasmote integra los módulos XBee de Digi para comunicación en bandas de frecuencia libre conocidas como ISMB (Industrial Scientific Medical Band). Además, los módulos de Xbee se comunican con el microcontrolador ATmega1281 utilizando la UART_0 a una velocidad de 38400bps, velocidad de comunicación igual a la que realiza con los además sensores inalámbricos e incluso con el Gateway principal.

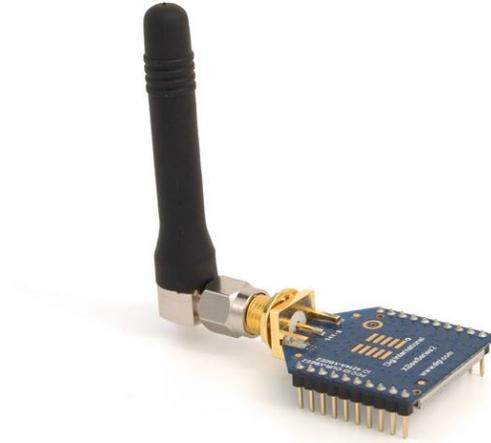


Figura 5.1 XBee ZigBee

Como se conoce que la antena ZigBee S1 de Digi International se sustenta en la capa de enlace de IEEE 802.15.4 que define el nivel físico y el nivel de enlace (capa MAC), además el ZigBee cumplen con el estándar **ZigBee-PRO v2007** que define hasta la capa de aplicación, permitiendo gestionar al completo una red como la que se trabaja en el presente proyecto.

El modulo de ZigBee utilizado en el proyecto es el XBee-ZB cuyas características de potencia, frecuencia y entre otros podemos observar en la siguiente tabla.

Tabla 5.1 Características básicas del ZigBee

Módulo	Frecuencia	Potencia Transmisión	Sensibilidad	Número de Canales	Distancia
XBee-ZB	2,40 – 2,48GHz	2mW	-96dBm	16	500m
XBee-ZB-PRO	2,40 – 2,48GHz	50mW	-102dBm	13	7000m

Con respecto al sensor dendrómetro utilizado para la aplicación, consiste básicamente en un potenciómetro el cual modelamos su entrada analógica mediante un acondicionador de señal pero implementado directamente en el software y no físicamente. A continuación, se muestra como se implementa el circuito cuyo propósito aparte de la simplicidad es el consumo de potencia por los componentes electrónicos que se podrían utilizar, a más componentes más consumo de potencia de acuerdo al procesamiento que se ejecuta en un circuito más complejo.

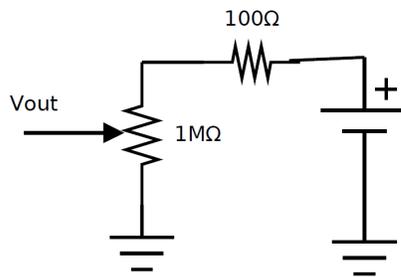


Figura 5.2 Diagrama del sistema Acondicionador de dendrómetro

La función del dendrómetro que realiza el potenciómetro consta de una serie de engranes que giran a como va creciendo el fruto, por lo tanto esa diferencia de tensión entre las terminales del resistor variable representa en nuestro acondicionador de señal un tamaño del fruto.

5.3. Descripción del software

Para lograr una mejor explicación respecto a la descripción del software se explicará por módulos, cada uno incluye características de funcionamiento, código y variables necesarias que se tomaron en cuenta para su desarrollo. Es importante recordar que la programación de la placa se realiza utilizando un IDE desarrollado por la misma empresa distribuidora y es una aplicación JAVA y como lenguaje de programación C++. La programación cuenta con dos secciones una conocida como Setup y otra como Loop.

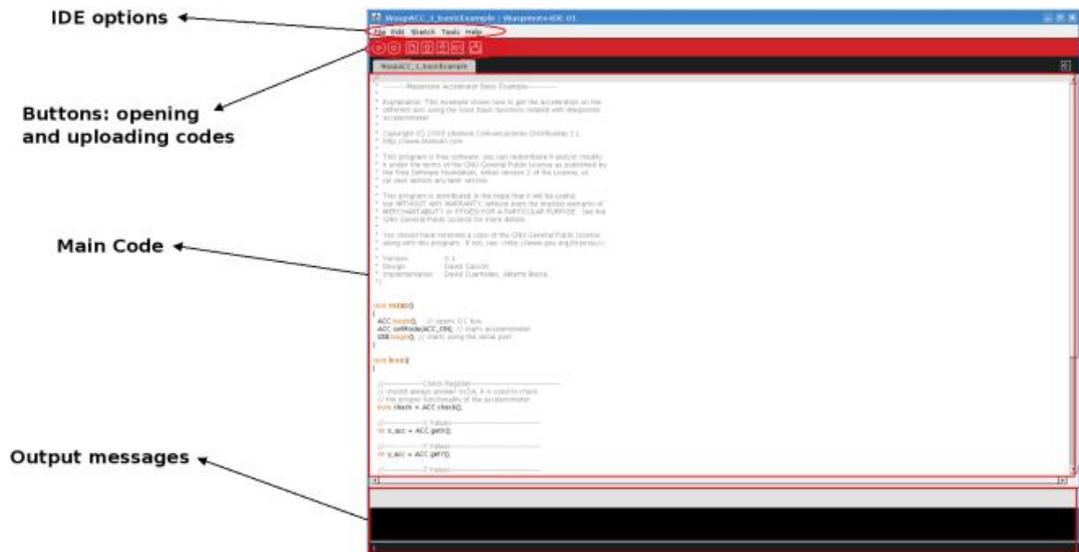


Figura 5.3 IDE de programación del Waspmote [2]

5.3.1 Configuración de tiempo

La plataforma escogida Waspmote cuenta con un reloj de tiempo real conocido como RTC (Real Time Clock), el cual mantiene informado al sistema del momento temporal en el que se encuentra. Esto permite programar al dispositivo para realizar acciones relativas en el tiempo tales como alarmas de acuerdo a un tiempo específico o del día presente a un tiempo especificando día/hora/minuto/segundo.

Con el RTC se logra tener un control total respecto a cuándo queremos que se despierte el sistema para captar valores o realizar las acciones programadas para tal propósito. Por lo tanto, nos permite tener a Waspmote en un funcionamiento máximo ahorro energético ya sea en estado de *Deep Sleep* o *Hibernate* y lograr que se despierte en el momento que nos interese de acuerdo a una tarea específica y siendo la configuración del tiempo un aspecto muy importante para el proyecto en curso.

Una de las principales ventajas para el proyecto es que el RTC del Waspote cuenta con dos fuentes de alimentación que proporcionan de energía, las cuales son la batería principal que es la de litio y la batería auxiliar. Cuando el dispositivo está conectado y en operación normal el RTC se alimenta por medio de la batería principal. Pero para certificar que se mantiene siempre con la hora correcta ya sea cuando la batería principal se descarga completamente o hay algún cambio de batería principal se hace uso de la batería auxiliar que alimenta al RTC.

Una vez habilitado la función del RTC que involucra tiempo o alarmas temporales se inicializa el bus de comunicaciones para el procesador I2C para que lea las variables de tiempo, fecha y variables correspondientes.

Código en Setup:

```
{  
    RTC.ON(); // Inicia el RTC y bus I2C y lee valores iniciales  
}
```

Una vez inicializado el RTC del microcontrolador realizamos la configuración del tiempo y fecha en el dispositivo pero solo lo ejecutamos una vez en el algoritmo para que quede configurado siempre y cuando no desconectemos la batería auxiliar. Las variables del registro RTC que se configuran son día, mes, año, día de la semana (de 1 a 7, 1 como domingo y 7 sábado), hora, minutos y segundos. Cada una de estas variables es almacenada y son cargadas al registro separadas por dos puntos.

Código en Loop:

```
{  
    RTC.setTime("04:05:12:06:18:53:00"); // Configuración fecha y hora  
}
```

5.3.2 Configuración de red

Para la configuración de una red con la utilización de los XBee-ZB es necesario primeramente abrir el UART y algunos switches. El Baut rate utilizado por la librería y definido por default es 38400bps, pero también se ajusta algunos parámetros como tipo de protocolo a 802.15.4, frecuencia del sistema a 2,4GHz y modelo como NORMAL que se refiere al uso de una antena es de XBee-ZB que trabaja a 2 mW y no PRO.

Código en Setup:

```
{  
  xbeeZB.ON();  
  xbee802.init (XBEE_802_15_4,FREQ2_4G,NORMAL); // configura de red  
}
```

Ahora para la creación de la red en el Waspote es necesaria la configuración de ciertos parámetros, los cuales son: el identificador de red conocido como PANID que en nuestro caso corresponde a 0x1134, el canal de 0x0B y clave de la seguridad. Una vez establecidos estas variables las grabamos en la antena XBee mediante la instrucción writeValues, esto debe de cumplirse para todos los dispositivos de la red para que se puedan comunicar entre ellos, al igual que en el Gateway.

```
void red(){  
  
  // Escoger canal : channel 0x0B  
  xbee802.setChannel(0x0B);  
  
  // Escoger un PANID : PANID=0x1134
```

```

xbee802.setPAN(PANID);

// Habilitar seguridad : KEY="PLATANO"

xbee802.encryptionMode(1);

//enviar la contraseña de red xbee802.setLinkKey(KEY);

xbee802.writeValues();

delay(1000);

}

```

5.3.3 Configuración de transmisión de datos

Este modulo se explica el funcionamiento de como enviamos de manera inalámbrica los datos que proporcionan los sensores sobre las características de tamaño, batería, temperatura y número de dispositivo.

Código:

```

void transmitir (){

char enviar [100]; // palabra enviar como un arreglo de 100 caracteres

printf (enviar,"%dB%c%c",data,'\r','\n');

xbee802.send("0013A2004069165B",enviar);

delay(1000); // una vez enviado esperamos 1ms para continuar

}

```

Para poder enviar información a los demás dispositivos de la red es necesario crear una variable la cual llamaremos “enviar” que corresponde a un arreglo el cual va a almacenar los datos que enviaremos de forma inalámbrica en la red. La forma de enviar los datos de un Wasmote a otro es por medio de la instrucción `printf(enviar,"%d%c%c",data,'\r','\n');` la utilización de `%d` lo que

realiza es convertir las variables de manera decimal en una cadena de caracteres guardados en enviar.

Una vez almacenada la variable en el arreglo procedemos a enviar los datos y para ello utilizamos la instrucción `Xbee802.send("0013A2004069165B", enviar)`; esta cuenta de dos parte, la primera es la dirección MAC de receptor Gateway para nuestro caso o también puede ser la de otro nodo transmisor receptor y finalmente de la palabra enviar que son los datos almacenados que se transmitirán de manera inalámbrica por la red.

5.3.4 Software para el sensor de dendrómetro

Para esta implementación de software necesitamos configurar varios parámetros los cuales usaremos como entradas y salidas de la placa, tanto analógicas como digitales. Acá se estableció como fuente de poder para nuestro sensor una de las salidas de tensión de la placa que nos proporciona una estado como alto de 5V lo cual es adecuado para alimentar el circuito y realizar la tarea seleccionada del dendrómetro, para lograr la activación de este Pin se realiza con la instrucción `pinMode(SENS_PW_5V, OUTPUT)`; que la establece como salida de 5V y `digitalWrite(SENS_PW_5V, HIGH)` para mantenerla siempre como un estado de tensión alto. Además de un pin de entrada analógico como la salida del sensor que reporta el diámetro del plátano de acuerdo a su crecimiento. La asignación de este PIN se realiza mediante la siguiente forma, se utiliza la instrucción `pinMode(ANALOG1, INPUT)`.

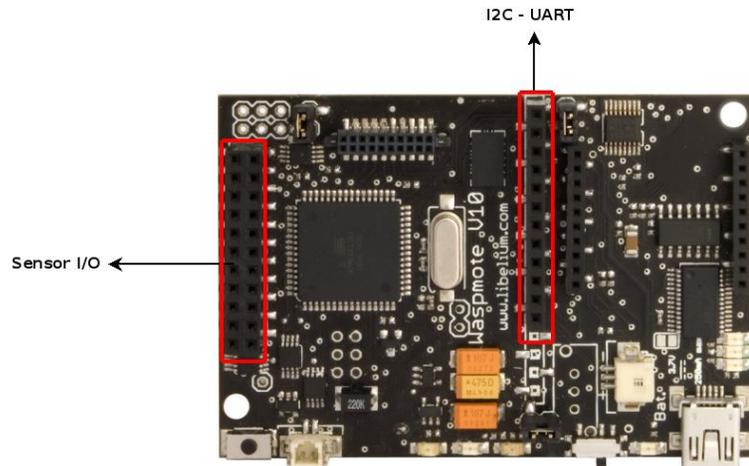


Figura 5.4 Conectores del Sensor I/O de la placa Waspote [2]

DIGITAL8	▪	▪	GND
DIGITAL6	▪	▪	DIGITAL7
DIGITAL4	▪	▪	DIGITAL5
DIGITAL2	▪	▪	DIGITAL3
RESERVED	▪	▪	DIGITAL1
ANALOG6	▪	▪	ANALOG7
ANALOG4	▪	▪	ANALOG5
ANALOG2	▪	▪	ANALOG3
SENSOR POWER	▪	▪	ANALOG1
GPS POWER	▪	▪	5V SENSOR POWER
SDA	▪	▪	SCL

Figura 5.5 Descripción de pines del Sensor I/O [2]

Código:

```
{
    pinMode(SENS_PW_5V, OUTPUT);
    digitalWrite(SENS_PW_5V, HIGH);
    pinMode(ANALOG1, INPUT);
}
```

Una vez obtenido el valor analógico del sensor de dendrómetro que corresponde a la diferencia de tensión, es enviada al PIN ANALOG 1, cuyo pin ya fue asignado como una entrada analógica. Aunque el valor que corresponde a la salida analógica es de 1 a 1024 el cual es mapeado y asignado de un valor posible entre 1 y 50 que posteriormente acondicionaremos como milímetros del diámetro del plátano, para ello utilizamos la forma de `Utils.map(tam,0,1024,1,50);`

```
void tamano(){
```

```
    int bateria=0;    // variable que almacena el estado de la batería
    int temperatura=0; // variable que almacena la temperatura
    int identificador = 1;
```

```
    int tam = 0; //aqui hay un dato de 0 a 1023
    int real = 0; //almacenamos el valor de 1mm de diametro a 50mm
    int acondicionado = 0;
```

```
    bateria = PWR.getBatteryLevel(); // almacenamos un posible dato de
                                     // 0% a 100%
```

```
    temperatura = RTC.getTemperature(); // captura la temperatura
```

```
    tam = analogRead(ANALOG1); // En tam almacenamos el valor de
                                // ANALOG 1
```

```
    real = Utils.map(tam,0,1024,1,50); // mapeamos a un valor previamente
                                        // ajustado con el sensor y el valor
                                        // real que andamos buscando
```

```
    acondicionado = 0.51 * real + 26.11; // Ecu. Característica para
                                           // acondicionar el circuito
```

```

if (real < 25) // como el sensor se va colocar como un mínimo de
               // tamaño a una platano con un diametro de 25mm lo
               //tomamos como base para que no inicie en cero
{

    sprintf(envio,"Dispositivo #%d Bat: %d Temp: %d Diametro mm: %d
%c%c%c%c%c \n", identificador,bateria,temperatura,15,'\r','\n');

    xbee802.send("0013A2004069165B",envio); //MAC ADDRESS DEL
RECEPTOR GATEWAY
    delay(1000);
    // envio dos veces para asegurar la transmisión
    xbee802.send("0013A2004069165B",envio); //MAC ADDRESS DEL
RECEPTOR GATEWAY
    delay(1000);

}

else if (real > 48)
{

    sprintf(envio,"LISTO Dispositivo #%d Bat: %d Temp: %d Diametro mm:
%d %c%c%c%c%c \n", identificador,bateria,temperatura,real,'\r','\n');

    xbee802.send("0013A2004069165B",envio); //MAC ADDRESS DEL
RECEPTOR GATEWAY
    delay(1000);
    // envio dos veces para asegurar la transmisión
    xbee802.send("0013A2004069165B",envio); //MAC ADDRESS DEL
RECEPTOR GATEWAY
    delay(1000);

}
else

```

```

{

    sprintf(envio,"Dispositivo #%d Bat: %d Temp: %d Diametro mm: %d
%c%c%c%c \n", identificador,bateria,temperatura,real,'\r','\n');

    xbee802.send("0013A2004069165B",envio); //MAC ADDRESS DEL
RECEPTOR GATEWAY
    delay(1000);
    // envio dos veces para asegurar la transmisión

    xbee802.send("0013A2004069165B",envio); //MAC ADDRESS DEL
RECEPTOR GATEWAY
    delay(1000);

}

```

5.3.5 Configuración modo Hibernar

Para lograr explicar como funciona el modo de hibernar es necesario conocer la ubicación del Jumper Hibernar en la placa de Waspote para que no cause confusión cuando realizamos la activación de dicha función, la figura 5.6 se muestra en la parte inferior de la placa. Para el correcto funcionamiento del modo Hibernar es imprescindible quitar este Jumper durante el comienzo del programa por primera vez y no antes de la ejecución pues sin este Jumper no se puede realizar ningún tipo de programación.

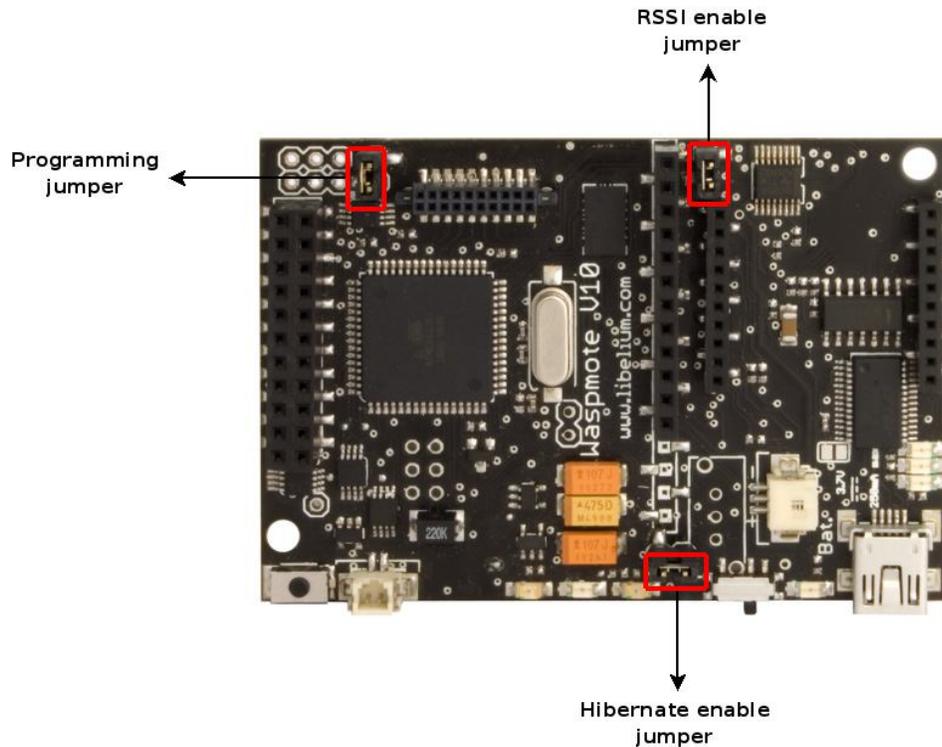


Figura 5.6 Jumpers del Waspmote [2]

El modo de hibernar que lo que busca es el mínimo consumo de energía por parte del sistema, funciona de la siguiente forma: cuando la interrupción de Hibernar es alcanzada el programa principal que se está ejecutando se detiene, al igual que el microcontrolador y todos los módulos, al pasar a este estado el dispositivo queda en total desconexión por parte de la batería principal del sistema y pasa a ser alimentado por la batería auxiliar con un consumo de energía de $0,7 \mu\text{A}$, dicha alimentación es para el RTC que es el único bloque que queda en conexión y que fue programado previamente a una fecha, día y hora específico que nos es importante se despierte.

Una vez alcanzada el tiempo establecido para la siguiente habilitación el micro es encendido y se ejecuta el programa desde su inicio. Para ello, es necesario comprobar si la bandera de interrupción fue alcanzada.

A continuación, se muestra los estados alcanzados antes y después de alcanzar la rutina de Hibernar.

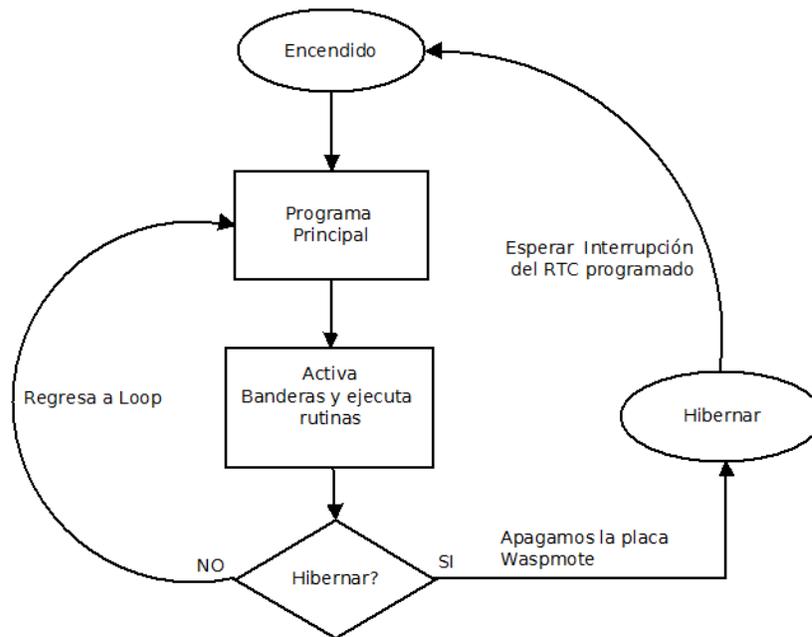


Figura 5.7 Diagrama de estados del paso de Encendido a Hibernar

Código para habilitar modo hibernar:

```

{
  // Revisa si esta habilitado la función hibernar
  PWR.ifHibernate();
}

void loop()
{
  // Configuramos el Waspnote para Hibernate despertando una vez por día
  // Este modo es de la forma DD:HH:MM:SS y asignamos cada día

```

```
PWR.hibernate("01:00:00:00",RTC_OFFSET,RTC_ALM1_MODE2);
```

```
// Si la función Hibernate es capturada se ejecutan las banderas
```

```
// asociadas a dicha interrupción
```

```
if( intFlag & HIB_INT )
```

```
{
```

```
    hibernar(); // buscamos la función de Hibernar en el código
```

```
}
```

```
}
```

```
void hibernar()
```

```
{
```

```
// parpadeo de leds 1ms para mostrar que va entrar en función hibernar
```

```
Utils.blinkLEDs(1000);
```

```
// habilitamos la interrupción de hibernar a la placa
```

```
intFlag &= ~(HIB_INT);
```

```
}
```

Capítulo 6: Análisis de Resultados

6.1 Resultados

A continuación, se muestra el circuito que se utiliza para el sensor de dendrómetro, el cual que nos simula el comportamiento del crecimiento del plátano.

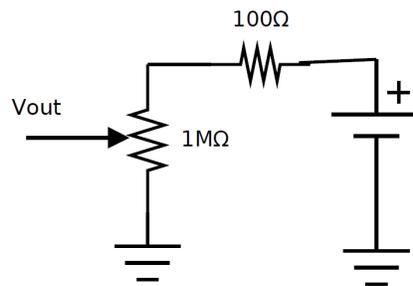


Figura 6.1 Circuito acondicionador de señal

Imagen que muestra el funcionamiento del sensor dendrómetro más económico y eficiente seleccionado para el proyecto.

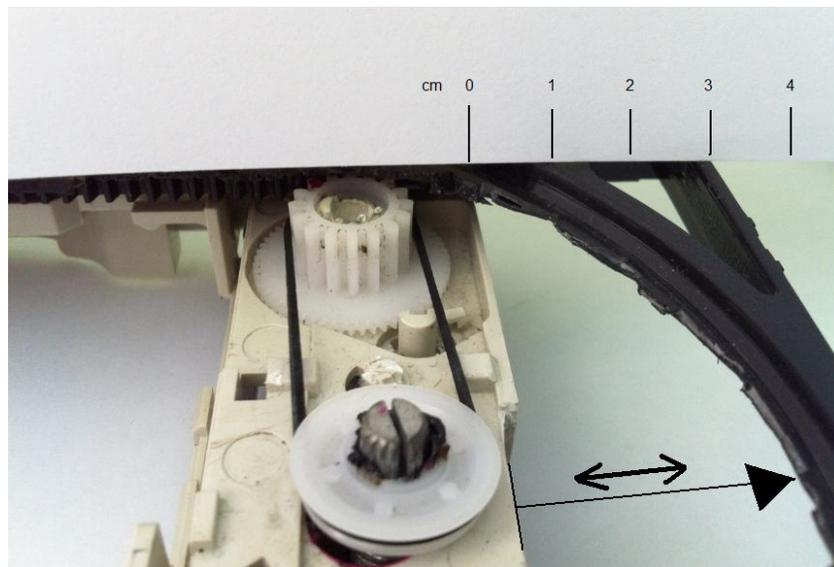


Figura 6.2 Planta sensor dendrómetro

Tabla 6.1 Valores de diámetro de acuerdo a salida de tensión del potenciómetro

Diámetro salida del Waspnote (mm)	Valor real (mm)	Tensión salida del Sensor
2	25	0,06
5	28	0,31
8	30	0,51
12	33	0,78
16	37	1,07
20	36	1,39
23	38	1,58
27	40	1,86
32	43	2,27
37	45	2,62
42	48	2,93
47	49	3,28
49	50	3,55

Tabla 6.2 Ecuación característica de diámetro versus valor real

Ecuación característica	$y = mx + b$
Intersección eje (b)	26,11
Porcentaje de error %	1,21
Pendiente (m)	0,51
Ecuación final	$y = 0,51 * x + 26,11$

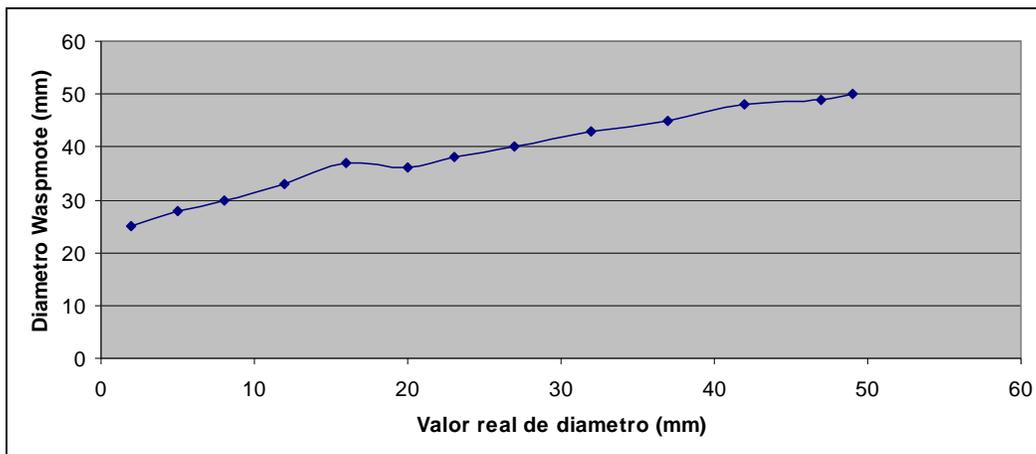


Figura 6.3 Gráfica diámetro waspmote versus diámetro real

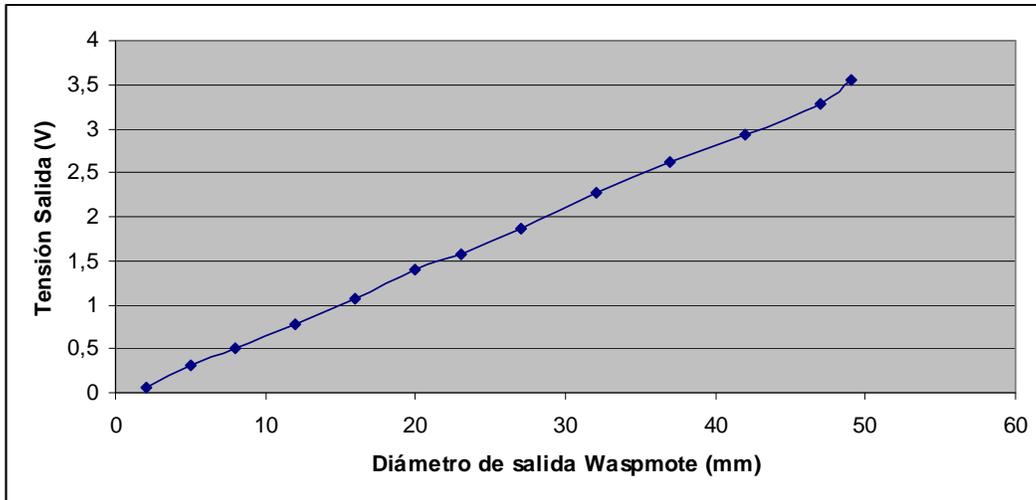


Figura 6.4 Gráfica tensión de salida versus diámetro Waspote

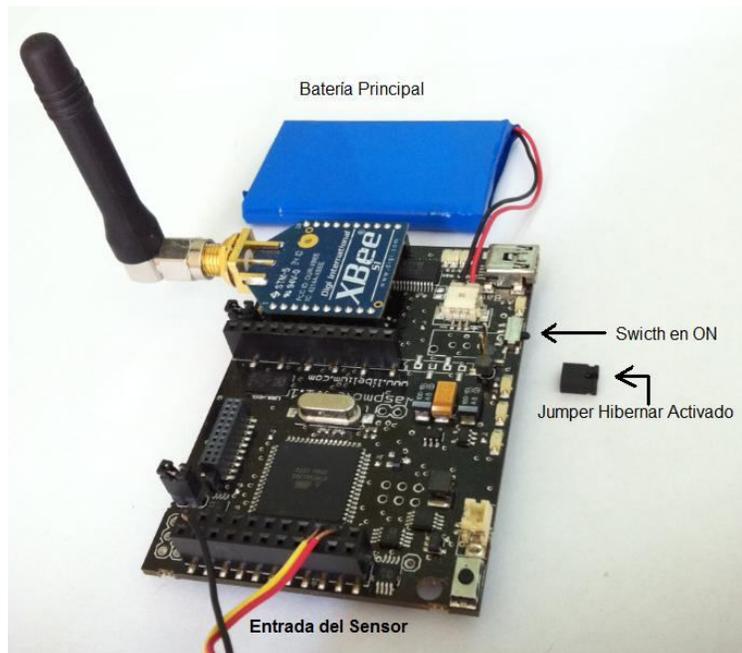


Figura 6.5 Waspote en funcionamiento

Tabla 6.3 Rango máximo de distancia transmitida por día

Día	Distancia transmitida (m)
1	452
2	415
3	445
4	378
5	432
6	476
7	434

El rango de valores del umbral de la batería principal que puede ser configurado desde los 3.4V hasta los 2.95V, en la siguiente imagen se muestra los valores de descarga configurables de fabricación

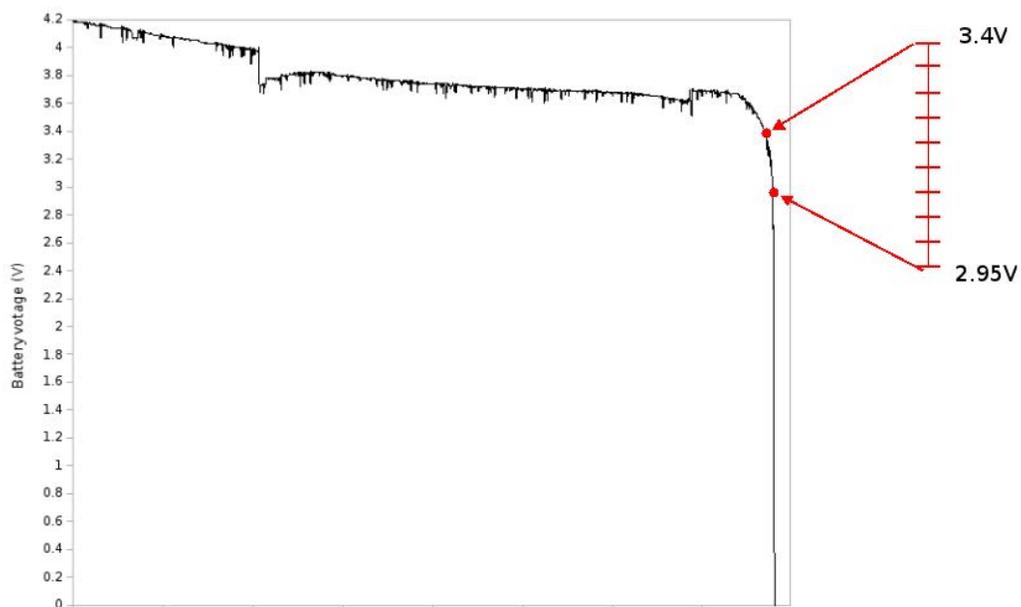


Figura 6.6 Niveles de voltaje de batería configurables teóricos [2]

Tabla 6.4 Porcentaje de batería versus nivel de tensión

Nivel de Batería %	Tensión Salida (V)
100	4,232
90	4,145
80	4,064
70	3,964
60	3,879
50	3,714
40	3,714
30	3,621
20	3,547
10	3,435
1	3,336

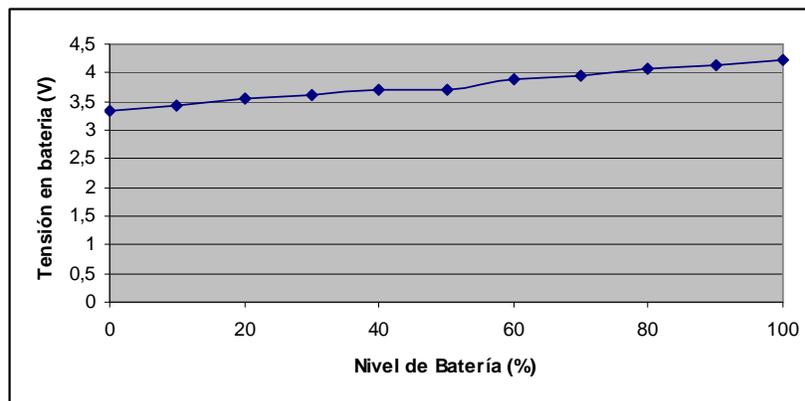


Figura 6.7 Grafica de nivel de energía respecto a nivel de tensión

Tabla 6.5 Consumo de energía por día

Día	Semana	Porcentaje de batería
1	1	91
2	1	91
3	1	91
4	1	91
5	2	90
6	2	90
7	2	90
8	2	90
9	3	90
10	3	90
11	3	90
12	3	90
13	4	90
14	4	89
15	4	89
16	4	89
17	5	89
18	5	89
19	5	89
20	5	89
21	6	89
22	6	89
23	6	89
24	6	88
25	7	88
26	7	88
27	7	88
28	7	88
29	8	88
30	8	88
31	8	88
32	8	88
33	9	88
34	9	88
35	9	87
36	9	87
37	10	87
38	10	87
39	10	87
40	10	87
41	11	87
42	11	87
43	11	87
44	11	87
45	12	86
46	12	86
47	12	86
48	12	86

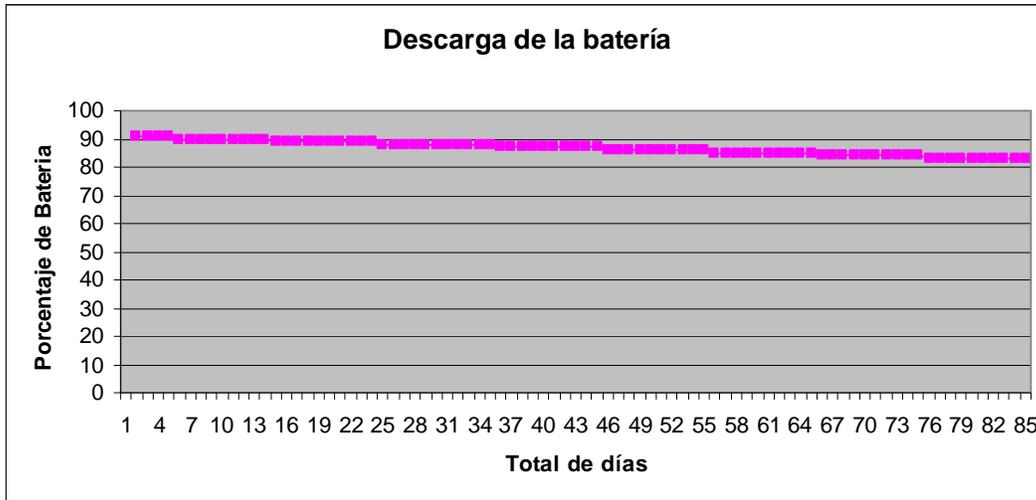


Figura 6.8 Nivel de tensión respecto a cantidad de días

Con el dispositivo encendido y enviando una trama cada segundo hasta lograr el desabastecimiento de energía de la batería principal se logran medir cuanto es la descarga por unidad de tiempo.

Tabla 6.6 Consumo de energía en modo continuo de transmisión.

Cantidad de tramas	Tiempo Minutos	Porcentaje de batería (%)	Tensión de salida (V)
300	5	90	4,145
1800	30	87	4,108
3600	60	84	4,085
5400	90	81	4,060
7200	120	78	4,030
9000	150	75	4,004
10800	180	71	3,979
12600	210	68	3,952
14400	240	65	3,923
16200	270	62	3,889
18000	300	59	3,871
19800	330	56	3,842
21600	360	52	3,819
23400	390	49	3,782
25200	420	46	3,755
27000	450	43	3,732
28800	480	40	3,704
30600	510	37	3,673
32400	540	34	3,657
34200	570	30	3,623
36000	600	27	3,584
37800	630	24	3,571
39600	660	21	3,547
41400	690	18	3,524
43200	720	15	3,493
45000	750	11	3,456
46800	780	8	3,432
48600	810	5	3,418
50400	840	2	3,383
50700	845	1	3,372
51000	850	1	3,379

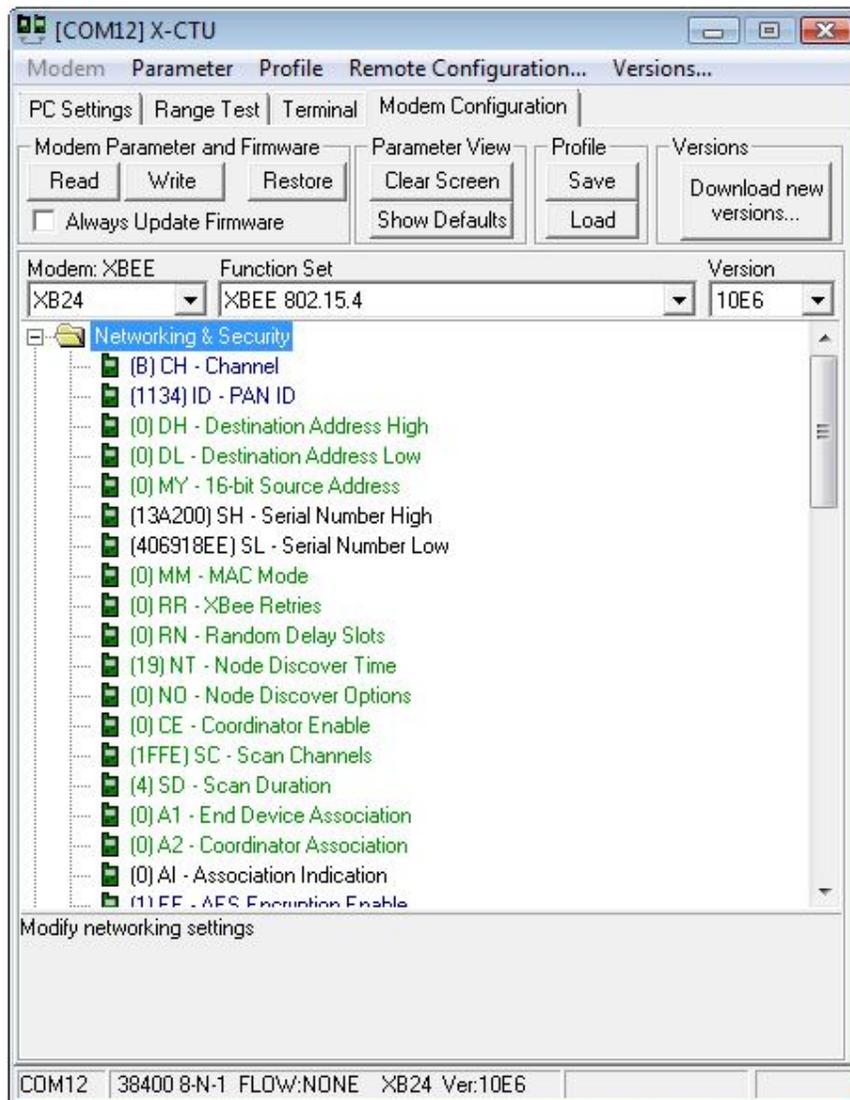


Figura 6.9 Configuración del Gateway receptor



Figura 6.10 Recepción de datos en el Gateway a 400 metros del nodo transmisor 1

6.2 Análisis

En el circuito de la figura 6.1 muestra la configuración de componentes electrónicos utilizados para realizar el sensor de dendrómetro, que nos permite mostrar el valor del crecimiento del plátano de acuerdo al valor de tensión de salida. Este esta compuesto de un potenciómetro de $1M\Omega$ y una resistencia de 100Ω , la función de la resistencia más pequeña es que cuando hacemos girar el potenciómetro a un nivel de cero la fuente de alimentación con tierra no

caiga a cero y produzca un corto circuito a la placa Waspote, puramente por seguridad.

El sensor dendrómetro funciona con una serie de engranes que finalmente hacen girar el potenciómetro de nuestro circuito antes mencionado, a como aumenta el tamaño del fruto el valor de la tensión analógica aumenta esto como consecuencia directa del resistor variable que gira. Dicho funcionamiento se observa en la figura número 6.2.

La tabla 6.1 muestra punto por punto los valores de tensión de salida a variaciones de crecimiento del diámetro del fruto, por programación hemos seleccionado los valores mínimos de crecimiento del fruto para 25 milímetros que corresponde a un plátano a principios de crecimiento y tamaño en el cual ya le podemos instalar los sensores a los frutos sin ningún problema. El comportamiento es lineal de acuerdo a los datos de la tabla que se ven representados en la gráfica 6.4 que muestra la tensión de salida del sensor como directamente proporcional al crecimiento reportado por el Waspote. Sin embargo, este crecimiento no es el real del tamaño del plátano, por lo tanto, con los valores obtenidos nos damos a la tarea de linealizar la curva de la gráfica 6.3 que muestra valores de salida del Waspote comparados con el valor real medido con una regla y con ello obtenemos la ecuación característica de la tabla 6.2 y con ella la implementamos en el software para lograr que la salida del Waspote sea la real. Así se logra realizar el acondicionador de señal para la planta.

En la figura 6.5 se muestra la placa Waspote utilizada para realizar las pruebas de control y muestreo de los datos provenientes del sensor de dendrómetro, el cual se encuentra conectado a la patilla ANALOG1. Como podemos observar una vez encendida la placa es necesario retirar el Jumper para que se realicen las tareas programadas y lograr con ello que el sistema entre en estado de Hibernar que previamente le hemos configurado y así lograr el mayor ahorro energético.

Para el XBee ZigBee utilizado se logran distancias de transmisión muy buenas comparadas con los 500 metros que la hoja de datos especifica para la antena seleccionada. La tabla 6.3 muestra varias distancias de transmisión en las cuales se enviaron datos de manera muy exitosa para la placa Wasmote. El promedio de distancia de transmisión recibiendo las dos tramas es de 440 metros en campo abierto, temperatura de lugar 27 grados Celsius en alrededores del Instituto Tecnológico de Cartago.

Es necesario lograr una configuración de la antena XBee-ZB en el nodo Gateway o en todos los demás dispositivos de la misma manera que se realizó para nuestra placa de prueba, la utilización del programa X-CTU, el cual lee los valores configurados previamente en el Gateway, para nuestro caso el identificador de red conocido como PANID que corresponde a 0x1134, el canal de 0x0B y clave de la seguridad, una vez seleccionados estos valores seleccionamos el botón WRITE para configurar la antena del Gateway, esto lo podemos observar en la grafica 6.9.

Una vez realizadas las configuraciones tanto en los transmisores como receptores de ZigBee realizamos las pruebas para comprobar que la trama es enviada de la mejor forma y que los datos son fiables, por lo tanto, se pueden observar que los datos que corresponden a: quien envía, nivel de batería, temperatura y diámetro del plátano son recibidos por el Gateway.

Otra característica importante de la placa Wasmote es que cuenta con un sensor interno que mapea los niveles de batería crítica dentro de los cuales el sistema puede funcionar, dichos valores ajustados por el fabricante oscilan dentro del rango de 3.4 voltios a 2.95 voltios, por lo tanto pueden ser ajustados para lograr que el sistema transmita más tramas en un tiempo determinado. Por default el sistema viene ajustado para 3.3V y lo hemos ajustado a 3.1V. Con la función *PWR.setLowBatteryThreshold(3.1)* aparte de lograr un mejor

rendimiento del sistema también se logra un máximo ahorro energético en el sistema.

Para lograr visualizar cual es la tensión de salida en voltios cuando se habla de un nivel porcentual transmitido sobre el reporte de las condiciones de la placa, se observa en la tabla 6.4 donde podemos observar que a pesar de que el porcentaje ronda casi el cero la placa continua en funcionamiento normal, después de este valor y a pesar que la batería no se ha descargado por completo ya no esta en los valores mínimos para que el Waspote se encuentre encendido ni menos transmitiendo. La grafica 6.7 muestra claramente este comportamiento en donde a pesar de que estamos en cero porcentuales el valor de tensión de batería no es cero sino que es un valor no adecuado para mantener encendido el sistema, dicho valor es 3,3 V según las mediciones realizadas.

Finalmente mostramos la tabla 6.5 donde se observa el porcentaje de batería enviado una vez por día durante un periodo total de 84 días que corresponden a las 12 semanas promedio que tarda el plátano en llegar a ese punto idóneo para su corte. Las pruebas fueron realizadas todas las mañanas por un tiempo de 6 segundos, tiempo que se divide en: encendido, prueba de funcionamiento con la habilitación de un led, transmisión de dos tramas de 1 segundo por cada una para asegurar la correcta transmisión y la puesta en hibernar. Se puede asegurar sin ningún problema que el algoritmo de transmisión utilizado de una vez diariamente no causa el desabastecimiento de la energía en el sistema con el correcto funcionamiento de la implementación de la planta durante el periodo en cuestión. Por lo tanto, la solución más eficiente en consumo energético y de bajo costo queda expuesta.

Se realizo pruebas de envío de datos continuos de una trama cada segundo, y se comprobó que el dispositivo Waspote encendido con esa tarda 850 minutos (14 horas aproximadamente) encendido con la batería principal hasta lograr desabastecimiento y posterior de que esto deja de trabajar. Se puede observar en la tabla 6.6 cantidad de tramas enviadas, nivel de salida y

tensión de salida. Además, con los datos haciendo algunos cálculos para las 14 horas el consumo de potencia en modo constante de transmisión es de 0,77mV aproximadamente, entonces como necesitamos al menos 90 días (12 semanas) el sistema funcionando el consumo no puede ser mayor a 8,55mV por día que representa envío de tramas por máximo 9 minutos con 33 segundos diarios. Entonces para lograr un año enviando tramas es necesario limitar a 2 minutos con 33 segundos diarios como máximo y el resto del tiempo en modo hibernar.

Ahora, es importante lograr una correcta sincronía de tiempos en cuando esta habilitado el Gateway para ciertos lugares de la plantación, para que se envíen tramas por tiempos definidos a como este va recogiendo información en los diferentes puntos, lo importante a saber es que el Gateway receptor en la futura planta cuenta con abastecimiento de energía constante lo que asegura que cuando los nodos transmiten este siempre va encontrarse en estado de encendido y en espera.

La continuación de este proyecto es lograr sincronizar el Gateway con los diferentes nodos a como estos transmiten. Por ejemplo, los nodos del sector A de la plantación van a transmitir todos los días a una hora previamente establecida, los del sector B un tiempo después para que el Gateway logre el desplazamiento a este lugar y así sucesivamente hasta lograr al final del día el almacenamiento de todas las variables de todos los nodos en el Gateway y estos se encuentren disponibles para ser accedidos por los administradores de la planta. Además, de que el Gateway reporta cuales sectores ya están listos para el corte.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- Se comprobó que el sensor utilizado como dendrómetro es el idóneo pues es un circuito con pocos componentes electrónicos lo que limita a un menor consumo de energía para la planta.
- Se determinó que enviando solo los datos de interés por la red como ID del dispositivo, batería, temperatura y tamaño se logra un mayor ahorro energético que es proporcional a la sensibilidad de salida en dB.
- Se comprobó experimentalmente que el sistema diseñado e implementado permite determinar el crecimiento del plátano de una manera adecuada y cumpliendo con requerimientos mínimos de potencia.
- Se comprobó que hibernando el sistema durante un tiempo determinado y enviando solo lo necesario por la red se disminuye el consumo de potencia en más de un 90% que si lo hiciera en modo continuo.
- A pesar que el sistema cuenta con programación por aire no se puede realizar para nuestro caso pues cuando se habilita el Jumper de hibernar el sistema no permite la programación.

7.2 Recomendaciones

- Instalar al menos dos sensores dendrómetro por racimo para monitorizar el crecimiento del plátano de una manera más fiable, pues con solo un sensor no podemos garantizar la correcta medición.
- Se recomienda la instalación de paneles solares para lograr que el sistema sea autosuficiente y permita el reporte continuo de las características del fruto.

- Se puede aumentar la cantidad de envíos diarios a dos minutos al menos para asegurar una mejor transmisión sin que afecte de manera significativa el consumo de potencia.
- Se recomienda cambiar la frecuencia de transmisión de 13200bps a 2400bps para disminuir el consumo de potencia.

Bibliografía

1. S.f. Wasmote datasheet. Consultado el 17/3/2012. Recuperado de http://www.libelium.com/documentation/wasmote/wasmote-datasheet_eng.pdf Hoja de datos del dispositivo waspmote.
2. S.f. Wasmote Guía Técnica. Consultado el 17/3/2012. Recuperado de http://www.libelium.com/documentation/wasmote/wasmote-technical_guide_eng.pdf Guía técnica sobre el dispositivo waspmote.
3. S.f. Inicio rápido. Consultado el 17/3/2012. Recuperado de <http://www.libelium.com/development/wasmote/quickstart> Información acerca la utilización de Wasmote Environment.
4. S.f. Wasmote RTC programming guide. Consultado 17/3/2012. Recuperado de http://www.libelium.com/documentation/wasmote/wasmote-rtc-programming_guide.pdf Documento sobre el uso de aplicaciones con Reloj de tiempo real en el waspmote.
5. S.f. Wasmote 802.15.4 networking guide. Consultado 17/3/2012. Recuperado de http://www.libelium.com/documentation/wasmote/wasmote-802.15.4-networking_guide.pdf Documentación acerca de la creación de una red con dispositivos waspmotes.
6. S.f. Wasmote Power programming guide. Consultado 17/3/2012. Recuperado de http://www.libelium.com/documentation/wasmote/wasmote-power-programming_guide.pdf Documentación relacionada con energía y potencia para waspmotes.

7. Strembler, Ferrel G. Introducción a los sistemas de comunicación. México : Addison Wesley Iberoamericana, 1993.
8. Ogata, Katsuhiko. Sistemas de Control en Tiempo Discreto. Segunda edición. México : Prentice Hall, 1996
9. S.f. Guía para exportación de plátanos a Estados Unidos. Consultado 20/3/2012. Recuperado de www.iica.int.ni/Estudios_PDF/Export_Platano.pdf *Información sobre las características que se deben tomar en cuenta para exportar plátano a Estados Unidos*
10. Gottfried, Byron S. Programación en C. Segunda edición. Madrid : McGraw-Hill, 1997
11. Gutiérrez M. y Calvo N., **Normas de presentación de los informes de prácticas de especialidad, tesis, seminarios y otros del ITCR en formato digital**, Biblioteca José Figueres Ferrer, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Versión Febrero del 2004.