

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**TEC**

---

Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería Electrónica

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN NODO TRANSMISOR  
UNISENSORIAL ENERGETICAMENTE AUTÓNOMO PARA ZONAS CON CLIMAS  
TROPICALES**

**INFORME DE PROYECTO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO  
DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA CON EL GRADO ACADÉMICO DE  
LICENCIATURA**

**KARLA SOFÍA OBANDO HERNÁNDEZ**

**CARTAGO, 2012**

# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

## ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA

### PROYECTO DE GRADUACIÓN

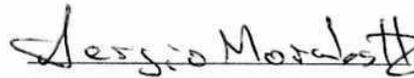
#### TRIBUNAL EVALUADOR

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.

#### Miembros del Tribunal



Ing. Nestor Hernández Hostaller.  
Profesor Lector



Ing. Sergio Morales Hernández.  
Profesor Lector



Dr. Carlos Meza Benavidez  
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, Viernes 22 de junio de 2012.

## DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente 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 total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, junio 2012

Karla Obando H.

Karla Sofía Obando Hernández

Céd: 304330943

## **Resumen**

Actualmente el cambio climático, debido a la contaminación y la actividad humana, afecta de manera directa el ambiente, por tanto es de gran importancia desarrollar aplicaciones para el bienestar, control y monitoreo del medio ambiente, el Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESLAB) es un laboratorio de investigación perteneciente a la Escuela de Ingeniería en Electrónica, situado en el Campus Central del Instituto Tecnológico de Costa Rica, cuyo objetivo es desarrollar sistemas electrónicos para potenciar la sostenibilidad de procesos, entornos o sistemas físicos.

Este informe plantea el uso de nodos autónomos para el cuidado del proceso fotosintético de las plantas en cuanto a exposición de radiación solar se refiere, haciendo uso de las favorecedoras condiciones climáticas con las que se cuenta en las zonas tropicales.

Finalmente se propone el uso de un nodo transmisor energéticamente autónomo el cual posibilita el conocimiento de la radiación solar incidente en los cultivos en estudio esto haciendo uso del panel fotovoltaico tanto como sensor como para la alimentación del mismo.

## **Palabras Clave**

Arduino UNO, Panel fotovoltaico, Radiación Solar.

## **Abstract**

Currently climate change due to pollution and human activity directly affects the environment, so it is of great importance to develop applications for the welfare, control and monitoring of the environment, the Electronic Systems Laboratory for Sustainability (SESLAB) is a research laboratory that belongs to the Electronics Engineering Department, located in the Central Campus of the Technological Institute of Costa Rica, which aims to develop electronic systems to enhance the sustainability of processes, environments or physical systems.

This report presents the use of autonomous nodes for the care of the photosynthetic process of plants in which sunlight exposure produces photoinhibition, among other things, making use of the climatic conditions that have the Tropical zones.

The article proposes the use of an autonomous energy transmitter node which enables the monitoring of the incident solar radiation in the crops in this study using the photovoltaic panel as power and as a sensor.

## **Key Words**

Arduino UNO, photovoltaic Panel, Solar Radiation.

## **Dedicatoria**

“A mis padres quienes me acompañaron y lucharon conmigo para alcanzar mi meta, gracias por brindarme su apoyo, fortaleza, paciencia, sabiduría y amor a lo largo de los años.”

## **Agradecimientos**

A Dios...

Por darme vida y salud para llegar al final de mi carrera Universitaria.

A mi familia...

Por ser mi fortaleza y mí ejemplo a seguir.

A mis amigos, compañeros y profesores...

Por formar parte de una gran aventura, los llevare siempre en mi corazón.

## Tabla de contenido

Resumen.....	4
Palabras Clave.....	4
Abstract .....	5
Key Words .....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimientos .....	7
Índice de figuras.....	10
Índice de tablas.....	11
1. Introducción .....	12
1.1 Problema existente e importancia de la solución .....	12
1.2 Síntesis del problema .....	13
1.3 Solución seleccionada .....	13
1.3.1 Diseño del sistema prototipo de nodo transmisor unisensorial energéticamente autónomo para zonas con clima tropical .....	13
1.3.2 Diseño del sistema acondicionador de señal para alimentación del nodo transmisor.	14
1.3.3 Diseño del sistema de recepción de datos .....	14
2. Objetivos .....	16
2.1 Objetivo general .....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
3. Marco teórico .....	17
3.1 Radiación Solar .....	17
3.2 La fotosíntesis .....	18
3.3 Fotoinhibición .....	21
3.4 Sistemas de monitorización en la agricultura.....	21
3.5 Plataforma Arduino .....	22
3.6 Serial Peripheral Interface (SPI).....	23
3.7 Panel Fotovoltaico.....	23
4. Procedimiento Metodológico .....	25
5. Descripción detallada de la solución .....	27
5.1 Diseño del sistema prototipo de nodo transmisor unisensorial energéticamente autónomo para zonas con clima tropical.....	27
5.1.1 Descripción del Hardware .....	28
5.1.2 Descripción del Software .....	35
5.2 Diseño del sistema de recepción de datos .....	39

5.2.1	Descripción del Hardware .....	39
5.2.2	Descripción de software .....	43
5.3	Rediseño de la etapa de acondicionamiento de potencia y adquisición de información ...	46
6.	Análisis de resultados.....	49
6.1	Resultados experimentales .....	49
6.1.1	Sistema de comunicación .....	49
6.1.2	Perfil de consumo energético para el nodo transmisor.....	53
6.1.3	Funcionamiento del panel fotovoltaico .....	58
6.1.4	Sistema de acondicionamiento de potencia.....	60
6.2	Análisis de resultados.....	60
7.	Conclusiones y recomendaciones.....	62
7.1	Conclusiones .....	62
7.2	Recomendaciones.....	63
8.	Bibliografía .....	64
9.	Anexos.....	66
9.1	Anexo 1 .....	67
	Mediciones con luz artificial y el panel fotovoltaico a utilizar. ....	67
9.2	Anexo 2 .....	69
	Mediciones con radiación real y el panel fotovoltaico utilizado.....	69

## Índice de figuras

Ilustración 1.1 Diagrama de primer nivel: Nodo transmisor.....	14
Ilustración 1.2 Diagrama de primer nivel: Nodo receptor.....	15
Ilustración 3.1 Espectro de radiación visible y longitudes de onda asociadas. ....	17
Ilustración 3.2 Fotosíntesis: Diagrama general. ....	18
Ilustración 3.3 LilyPad Arduino.....	22
Ilustración 5.1 Diagrama de primer nivel sistema a implementar.....	27
Ilustración 5.2 Diagrama de segundo nivel para el nodo prototipo transmisor unisensorial energéticamente autónomo.....	27
Ilustración 5.3 Microcontrolador ATmega328P. ....	29
Ilustración 5.4 Conexiones básicas del microcontrolador ATmega328P.....	29
Ilustración 5.5 Transceptor nRF24L01. ....	30
Ilustración 5.6 Diagrama esquemático del transceptor nRF24L01. ....	31
Ilustración 5.7 Panel fotovoltaico a utilizar.....	32
Ilustración 5.8 Sistema de Unidad de Medida.....	32
Ilustración 5.9 Etapa de acondicionamiento de potencia y adquisición de información.....	35
Ilustración 5.10 Diagrama de flujo nodo transmisor.....	36
Ilustración 5.11 Diagrama de segundo nivel para el nodo prototipo receptor.....	39
Ilustración 5.12 Arduino UNO.....	40
Ilustración 5.13 Fotografía del microcontrolador ATmega328P y la placa de desarrollo Arduino UNO. ....	41
Ilustración 5.14 Cable conector USB 2.0 A-B. ....	41
Ilustración 5.15 Ubicación de los pines del microcontrolador a utilizar por el transceptor nRF24L01. ....	42
Ilustración 5.16 Diagrama de flujo nodo receptor.....	44
Ilustración 5.17 Diagrama de pines del regulador de tensión variable.....	46
Ilustración 5.18 Diagrama de conexión para el regulador de tensión variable. ....	47
Ilustración 5.19 Etapa de acondicionamiento de potencia y adquisición de información.....	48
Ilustración 6.1 Escogencia del periférico donde se encuentra conectado el nodo transmisor y abrir el monitor serial.....	49
Ilustración 6.2 Vista del monitor serial para el nodo transmisor.....	49
Ilustración 6.3 Descripción de la conexión u selección del periférico, nodo receptor. ....	50
Ilustración 6.4 Configuración del puerto y vista del monitor serial, nodo receptor. ....	50
Ilustración 6.5 Visualización monitor serial transmisor.....	51
Ilustración 6.6 Visualización monitor serial receptor. ....	51
Ilustración 6.7 Pasos a seguir para capturar el texto en .txt .....	52
Ilustración 6.8 Visualización de los datos almacenados en un archivo .txt .....	52
Ilustración 6.9 Vista lateral del nodo transmisor.....	53
Ilustración 6.10 Vista lateral del nodo transceptor.....	53
Ilustración 6.11 Vista superior del nodo transmisor y la etapa de acondicionamiento de señal implementado.....	60

## Índice de tablas

Tabla 3-1. Factores que afectan la fotosíntesis.....	20
Tabla 4-1. Primer Paquete de trabajo .....	25
Tabla 4-2. Segundo Paquete de trabajo .....	25
Tabla 4-3. Tercer Paquete de trabajo .....	26
Tabla 4-4. Cuarto Paquete de trabajo .....	26
Tabla 4-5. Quinto Paquete de trabajo .....	26
Tabla 5-1 Características teóricas de potencia del microcontrolador ATmega328P.....	28
Tabla 5-2 Características teóricas de potencia del transceptor nRF24L01 .....	30
Tabla 6-1 Mediciones de potencia para el microcontrolador ATmega328P.....	54
Tabla 6-2 Mediciones de potencia para el transceptor nRF24L01.....	55
Tabla 6-3 Mediciones de potencia para el nodo transmisor.....	56
Tabla 6-4 Mediciones de tensión y corriente en el circuito de la ilustración 5.10 .....	60
Tabla 9-1 Mediciones con luz artificial y panel fotovoltaico a utilizar.....	67
Tabla 9-2 Mediciones con radiación real y el panel fotovoltaico. ....	69

## **1. Introducción**

### **1.1 Problema existente e importancia de la solución**

Costa Rica posee riquezas en sus suelos y gran cantidad de ríos con características favorecedoras para el desarrollo de bosques, en los cuales encontramos numerosas especies de flora y fauna, según indica el Instituto Nacional de Biodiversidad (INBio), con sólo 51.100 km<sup>2</sup> de superficie terrestre (0,03% de la mundial) y 589.000 km<sup>2</sup> de mar territorial, Costa Rica es considerado uno de los 20 países con mayor biodiversidad del mundo. Las más de 500.000 especies que se supone se encuentran en este pequeño territorio representan cerca del 4% del total de las especies estimadas a nivel mundial.<sup>1</sup>

Actualmente el cambio climático, debido a la contaminación y la actividad humana, afecta de manera directa el ambiente por tanto, con motivo de salvaguardar la riqueza natural de nuestro país, se cuenta con 25% del territorio nacional bajo alguna categoría de protección y continúa en aumento, hoy en día el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) está a cargo de 11 áreas de conservación a lo largo del país y a estas se le suman las reservas privadas dedicadas al ecoturismo y a la investigación. A pesar de los recursos invertidos por el gobierno de Costa Rica en materia de conservación no se cuenta con los recursos económicos y tecnológicos necesarios para mantener un buen sistema de vigilancia de dichas zonas.

Se hace necesario dotar a las zonas boscosas con difícil acceso de nuestro país de herramientas tecnológicas para la protección de sus cultivos, las cuales mantengan una monitorización y control eficiente de información importante ya sea temperatura, nivel de precipitaciones, humedad, CO<sup>2</sup>, radiación solar, etc.

---

<sup>1</sup> Información obtenida del sitio web del Instituto Nacional de Biodiversidad: [http://www.inbio.ac.cr/es/biod/bio\\_biodiver.htm](http://www.inbio.ac.cr/es/biod/bio_biodiver.htm)

## **1.2 Síntesis del problema**

¿Es posible desarrollar nodos de monitorización energéticamente autónomos para zonas con clima tropical?

## **1.3 Solución seleccionada**

Se implementará un nodo prototipo de monitorización el cual se encargará de supervisar a distancia la radiación solar presente en la zona en estudio.

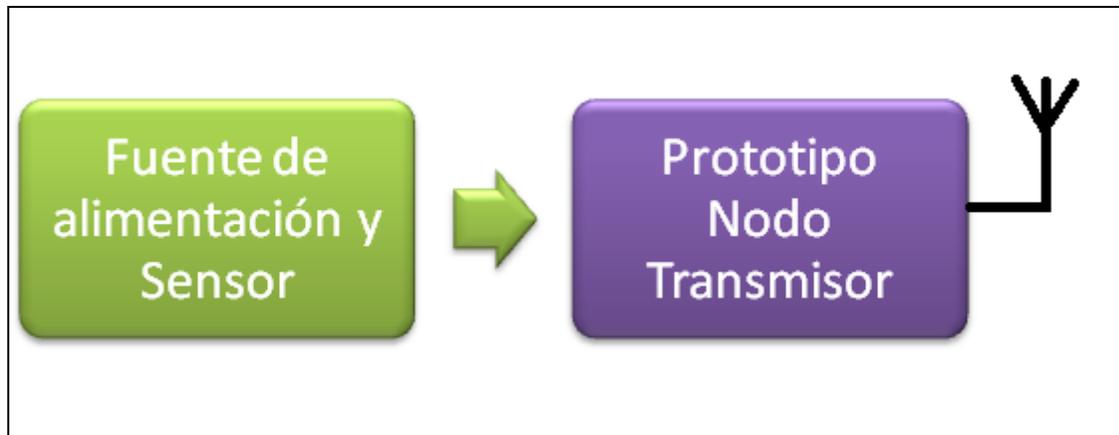
### **1.3.1 Diseño del sistema prototipo de nodo transmisor unisensorial energéticamente autónomo para zonas con clima tropical**

El prototipo de nodo transmisor unisensorial energéticamente autónomo se encargará de enviar información acerca de distintas variables físicas tales como: temperatura, humedad, radiación solar, CO<sub>2</sub>, etc. Para ejemplificar su funcionamiento se determina la radiación solar como la variable física a estudiar en el ambiente de las zonas con clima tropical en Costa Rica, la misma se enviará de manera inalámbrica, esto, entre otras cosas, para monitorizar de qué manera se ven afectados los cultivos debido a la exposición a diferentes niveles de radiación solar.

Restricciones y requerimientos del nodo transmisor prototipo:

- Bajo consumo energético
- Tamaño reducido
- Utilizar un panel fotovoltaico como alimentación y como sensor de radiación solar.

A continuación se presenta en la ilustración 1.1 un diagrama de primer nivel del sistema transmisor a implementar.



**Ilustración 1.1** Diagrama de primer nivel: Nodo transmisor.

El nodo transmisor será capaz de brindar una medida de radiación solar cada vez que el usuario lo desee, siempre y cuando el panel fotovoltaico se encuentre en funcionamiento.

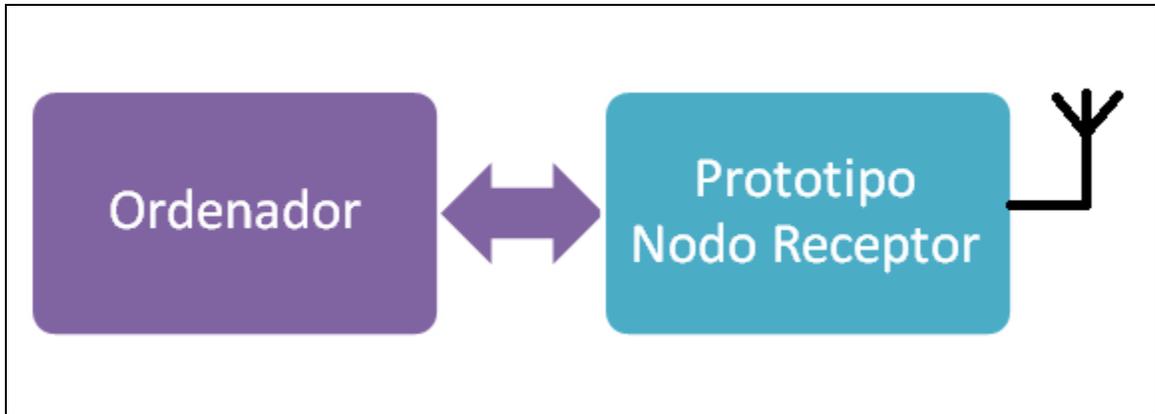
### **1.3.2 Diseño del sistema acondicionador de señal para alimentación del nodo transmisor.**

El sistema debe contar con una fuente de energía renovable, la cual suministre al nodo prototipo la energía necesaria para su buen funcionamiento, como requerimiento del proyecto dicha fuente de energía será un panel fotovoltaico, asimismo se contará con un sistema capaz de acondicionar la señal y suministrarla al prototipo de nodo transmisor para que este logre llevar a cabo todas sus funciones sin necesidad de energía eléctrica convencional.

### **1.3.3 Diseño del sistema de recepción de datos**

El prototipo de nodo receptor se encarga de controlar el nodo transmisor prototipo de tal manera que el usuario es capaz de establecer la conexión cuando lo desee, al mismo tiempo que recibe y almacena los datos de monitorización enviados por el mismo, esto siempre y cuando el panel fotovoltaico se encuentre en funcionamiento.

A continuación se presenta en la ilustración 1.2 un diagrama de primer nivel del sistema receptor a implementar.



**Ilustración 1.2** Diagrama de primer nivel: Nodo receptor.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Desarrollar un prototipo de un nodo transmisor unisensorial energéticamente autónomo cuyo desempeño esté optimizado para condiciones climáticas del trópico.

### **2.2 Objetivos específicos**

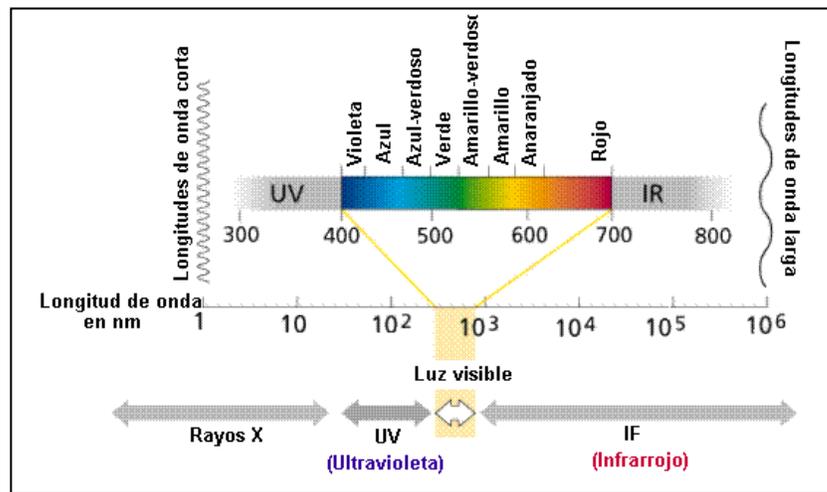
1. Diseño de un sistema de comunicación sincrónico el cual tenga un consumo de energía mínimo.
2. Determinar el perfil de consumo energético del sistema prototipo.
3. Seleccionar una fuente de energía en clima tropical para alimentar el nodo transmisor.
4. Diseñar un sistema de acondicionamiento de potencia para alimentar el nodo transmisor utilizando la fuente de energía previamente seleccionada.
5. Validar el sistema final.

### 3. Marco teórico

#### 3.1 Radiación Solar

Según el Diccionario de la Real Academia Española se define la palabra radiación como: “Energía ondulatoria o partículas materiales que se propagan a través del espacio.” (Real Academia Española, 2012). Por tanto haciendo uso de dicha definición podemos definir radiación solar como: Flujo de energía recibida desde el Sol en forma de ondas electromagnéticas. Según la frecuencia a la cual viajan dichas ondas electromagnéticas se dividen en:

- Luz visible
- Rayos infrarrojos
- Radiación ultravioleta



**Ilustración 3.1** Espectro de radiación visible y longitudes de onda asociadas.<sup>2</sup>

La luz es el principal factor para el desarrollo de las plantas, las mismas aprovechan a luz visible, situándose en la Ilustración 3.1 los colores del violeta (400nm) hasta el rojo (700nm), esto representa aproximadamente un 40% de la radiación solar. La radiación solar produce dos tipos de procesos importantes en las plantas como lo son los procesos energéticos (la fotosíntesis) y los procesos morfológicos.

<sup>2</sup>Ilustración tomada de: [http://www.euita.upv.es/varios/biologia/Temas/tema\\_11.htm](http://www.euita.upv.es/varios/biologia/Temas/tema_11.htm). Visitado el día Viernes 8 de junio de 2012.

### 3.2 La fotosíntesis

Según el Diccionario de la Real Academia Española se define fotosíntesis como: “Proceso metabólico específico de ciertas células de los organismos autótrofos, por el que se sintetizan sustancias orgánicas a partir de otras inorgánicas, utilizando la energía luminosa.” (Real Academia Española, 2012)

La fotosíntesis es un proceso fundamental para mantener la vida, según menciona la autora Elena Pérez-Urria Carril en su artículo “Fotosíntesis: Aspectos Básicos”, prácticamente toda la energía en la tierra proviene de la fotosíntesis, además, el aire en la actualidad posee un 21% de oxígeno, hecho que hace posible la vida de los organismos que utilizan el oxígeno para su sobrevivencia (Carril, 2009).

La fotosíntesis es un proceso físico – químico mediante el cual las plantas utilizan la luz como fuente de energía, de tal manera que transforman el  $\text{CO}_2$  en componentes orgánicos.

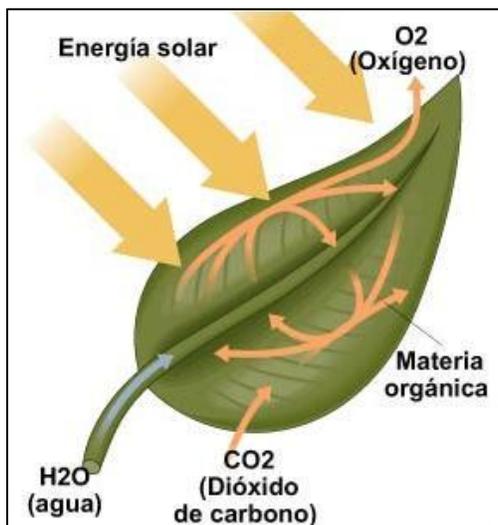
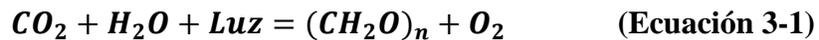


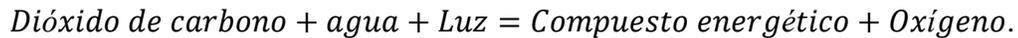
Ilustración 3.2 Fotosíntesis: Diagrama general.<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Tomado de: <http://www.educarchile.cl/Portal.Base/Web/VerContenido.aspx?ID=137270>. El día Viernes 8 de junio de 2012.

Es así como se describe la ecuación general de la fotosíntesis:



De tal manera que como se observa en la ecuación 3-1



A continuación se explicará brevemente el proceso de fotosíntesis:

Las plantas se constituyen básicamente de tres partes: la raíz, el tallo y las hojas. Todas estas partes participan en el proceso de la fotosíntesis de una manera específica. Las hojas captan la luz y el CO<sub>2</sub>, la raíz capta el agua y las sales minerales y el tallo se encarga de la unión de las hojas con la raíz.

Según A. Cristian Plaza en su artículo “*La Radiación Solar y su Efecto en los Cultivos*”, cuando la radiación solar incide a la tierra, puede suceder que se absorba, se refleje o pase a través del objeto, en el caso de las plantas, las hojas reflejan un 12% del espectro visible, un 80% de la infrarroja y un 2% de radiación ultravioleta (Plaza, 2007). Esto justifica el color de la pigmentación de la planta, los pigmentos son sustancias que son capaces de absorber la radiación, de tal manera que color del mismo se encuentra determinado por la longitud de onda no absorbida. En el caso de las plantas los pigmentos presentes son la clorofila y los carotenoides. La clorofila absorbe la luz violeta, azul y roja por tanto su color es verde y los carotenoides absorben la energía que la clorofila no es capaz, azul y verde, por tanto su coloración es amarilla, anaranjada o roja.

Durante el invierno las plantas dejan de producir clorofila debido a las condiciones del tiempo por tanto los colores de los carotenoides se hacen visibles.

Para la recolección de la luz, las plantas cuentan con aproximadamente 300 moléculas de clorofila acumuladas en unos complejos recolectores de luz denominado complejos antena. Una vez que la energía es absorbida por los complejos antena esta es transportada hacia un centro de reacción el cual está constituido por moléculas de clorofila A recolectoras y proteínas, aquí es donde se inicia el proceso de flujo de electrones, el sistema transportador de electrones se basa en moléculas adheridas a la membrana tilacoide.

Durante las reacciones redox los vegetales se guían al proceso final el cual es la fabricación de materia orgánica como la glucosa y el agua.

La planta utiliza la glucosa producida en el proceso para su desarrollo y crecimiento o bien puede almacenarla en forma de almidón. La glucosa por su parte es de gran importancia ya que constituye la fuente de alimentación de los herbívoros.

La fotosíntesis se ve afectada por diversas condiciones tanto ambientales como propias de la planta, a continuación se mencionan las principales:

**Tabla 3-1.** Factores que afectan la fotosíntesis<sup>4</sup>.

<b>Factores Ambientales</b>	<b>Factores Internos</b>
Concentración de CO <sub>2</sub> en la atmosfera	Tipo de planta
Radiación solar	Densidad de los estomas
Disponibilidad del agua	Área foliar
Temperatura	Edad de las hojas
	Niveles hormonales

Los factores mencionados en la tabla 3-1 dependen unos de otros, de tal manera que existe una fuerte relación entre ellos. Si se produce un aumento en la radiación solar, se ve afectado de igual manera la temperatura presente en el ambiente y por tanto la humedad. Es así como la radiación solar se convierte en un punto muy importante del proceso fotosintético, si bien es un factor necesario para su realización, un exceso o falta de radiación solar podría resultar estresante para la planta.

---

<sup>4</sup> Tomado del artículo “La Fotosíntesis” autor desconocido disponible en su versión digital en: [http://www.euita.upv.es/variados/biologia/Temas/tema\\_11.htm#Iluminaci%C3%B3n%20y%20Fotos%C3%ADntesis%20Neta..](http://www.euita.upv.es/variados/biologia/Temas/tema_11.htm#Iluminaci%C3%B3n%20y%20Fotos%C3%ADntesis%20Neta..) El día Viernes 8de junio de 2012.

### **3.3 Fotoinhibición**

Citando al autor Fánor Casierra-Posada en su artículo “*Fotoinhibición: Respuesta fisiológica de los vegetales al estrés por exceso de luz. Una revisión*” pagina 2: “El término fotoinhibición (PI) fue definido originalmente por Kok en 1956, como una reducción en la actividad fotosintética que ocurre como consecuencia de un exceso de iluminación (Yordanov y Veleikova, 2000).” (FánorCarsierra-Posada, 2007)

Las plantas muestran los síntomas de fotoinhibición dependiendo del nivel de exposición a radiación solar, si se da un exceso de radiación es posible que se produzca una reducción en la tasa de fotosíntesis, este tipo de fotoinhibición es denominada fotoinhibición crónica y se debe a la fijación de carbono y produce como consecuencia una reducción en la producción de biomasa, lo cual podría poner en peligro la sobrevivencia de las plantas.

### **3.4 Sistemas de monitorización en la agricultura.**

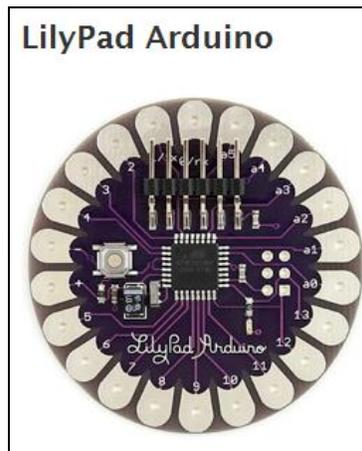
Para monitorización y control de la agricultura se realiza actualmente con redes de sensores inalámbricos esto permite la toma de decisiones de manera inmediata de tal forma que los cultivos no se vean afectados. Las redes de sensores están formadas por pequeños nodos que recopilan información sobre variables físicas importantes en el proceso y las envían de manera inalámbrica hacia un nodo master el cual toma las decisiones y las medidas a realizar sobre el sistema.

Los nodos tienen su vida útil limitada al uso de una batería, por tanto la misma se afectada cuando la batería deja de funcionar, se debe buscar prolongar la vida de las redes de sensores para así no afectar procesos importantes de cultivo o cuidado de especies por el fallo de nodos de las redes de transmisión.

### 3.5 Plataforma Arduino

Arduino es una plataforma de software libre y fácil uso, que cuenta con numerosas entradas tanto analógicas como digitales, con un entorno de desarrollo basado en Processing y un entorno de programación basado en Wiring. Se detallan algunos arduinos disponibles en el mercado:

- Arduino Duemilanove
- Arduino Mini Pro
- Arduino Pro
- Arduino Mini
- Arduino Fio
- LilyPad Arduino
- Arduino BT
- Arduino Mega
- Arduino Nano
- Arduino Diecimila



**Ilustración 3.3** LilyPad Arduino.

Fotografía para fines ilustrativos.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Ilustración tomada de: <http://arduino.cc/es/Main/ArduinoBoardLilyPad> el día Lunes 19 de junio de 2012.

### 3.6 Serial Peripheral Interface (SPI)

Es un estándar de comunicaciones el cual necesita de tres líneas para su buen funcionamiento, dichas líneas transmiten información en una sola dirección, los nombres de las mismas son:

- **Línea de reloj (SCLK)** es generada por el maestro y sincroniza la transferencia de datos.
- **Línea MOSI (Master Out Slave In)** transporta los datos del maestro hacia el esclavo.
- **Línea MISO (Master In Slave Out)** transporta los datos del esclavo hacia el maestro.

El inicio en la transferencia o recepción es marcado por el maestro, de la misma manera que la señal de reloj para la sincronización. Se utilizan registros de desplazamiento de 8 bits para la transmisión de datos. Para la transmisión/recepción de datos, el maestro utiliza la señal Slave Select (SS) para realizar la escogencia del esclavo con el cual desea realizar la transmisión/recepción. Solamente puede comunicarse con un esclavo a la vez (los otros se encuentran en alta impedancia).

Tipo de comunicación: full dúplex, esto quiere decir que los dispositivos conectados al bus pueden actuar como transmisor o receptor al mismo tiempo.

### 3.7 Panel Fotovoltaico

La energía solar fotovoltaica es aquella donde se transforma la energía solar en energía eléctrica. Esta transformación la llevan a cabo los paneles o módulos fotovoltaicos. Este tipo de energía se puede utilizar para aplicaciones domesticas, pero también para aplicaciones en lugares con difícil acceso a la red eléctrica convencional.

Los paneles fotovoltaicos los cuales son los encargados de la transformación de la energía, son placas rectangulares las cuales poseen un conjunto de celdas fotovoltaicas. Dichas celdas fotovoltaicas captan la luz incidente y la transforman a corriente eléctrica.

El material más utilizado en celdas fotovoltaicas es el Silicio, el cual se presenta de manera abundante en la arena.

A continuación se muestra la ecuación característica del panel fotovoltaico:

$$I = I_L - I_D \left[ e^{\frac{V+R_s I}{a}} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_s} \quad \text{(Ecuación 3-2)}$$

Siendo  $a = \frac{mKT}{q} N_s$ , m es el coeficiente de recombinación de la célula ( $1 < m < 3$ ), K es la constante de Boltzmann ( $1.38 * 10^{-23} \frac{J}{K}$ ); q es la carga del electrón ( $1.6 * 10^{-19}$ ), T es la temperatura en Kelvin y  $N_s$  es el número de celdas del módulo.

Por otra parte la corriente de polarización inversa viene dado por:  $I_D = I_L e^{\frac{V_{oc}}{a}}$  y la resistencia en serie por:  $R_s = \frac{a * \ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_L}\right) - V_{mp} + V_{oc}}{I_{mp}}$

$$P_M = V_{oc} * I_{sc} \quad \text{(Ecuación 3-3)}$$

$$P = V * I \quad \text{(Ecuación 3-4)}$$

$$\eta = \frac{P_M}{G * A_c} \quad \text{(Ecuación 3-5)}$$

#### 4. Procedimiento Metodológico

Para cumplir con los objetivos planteados se formulan los siguientes paquetes de trabajo:

**Tabla 4-1.** Primer Paquete de trabajo

---

Paquete de trabajo: Sistema de comunicación síncrono
Objetivo: Diseño de un sistema de comunicación sincrónico cual tenga un consumo de energía mínimo.
1. Realizar investigaciones bibliográficas sobre los diversos protocolos de comunicación síncrona.
2. Realizar investigaciones bibliográficas para seleccionar los componentes a utilizar en el sistema de comunicación seleccionado.
3. Diseñar el sistema de comunicación basándose en las investigaciones realizadas.

---

**Tabla 4-2.** Segundo Paquete de trabajo

---

Paquete de trabajo: Perfil de consumo.
Objetivo: Determinar el perfil de consumo energético del sistema prototipo.
1. Determinar los requerimientos energéticos del sistema prototipo.
2. Ensamblaje del prototipo funcional del nodo prototipo transmisor.

---

**Tabla 4-3.** Tercer Paquete de trabajo

---

Paquete de trabajo: Sistema de captación de energía.
Objetivo: Seleccionar posibles fuentes de energía en clima tropical para alimentar el nodo transmisor.
1. Realizar investigaciones bibliográficas acerca de los procesos químicos y físicos existentes que tengan capacidad de producir energía.
2. Escoger la fuente de energía más adecuada para el prototipo.

---

**Tabla 4-4.** Cuarto Paquete de trabajo

---

Paquete de trabajo: Sistema de acondicionamiento de potencia.
Objetivo: Diseñar un sistema de acondicionamiento de potencia para alimentar el nodo transmisor utilizando la fuente de energía previamente seleccionada.
1. Realizar investigaciones bibliográficas sobre la posibilidad de almacenamiento de energía y seleccionar la más adecuada para el sistema.
2. Ensamblaje del prototipo funcional del sistema de acondicionamiento de potencia

---

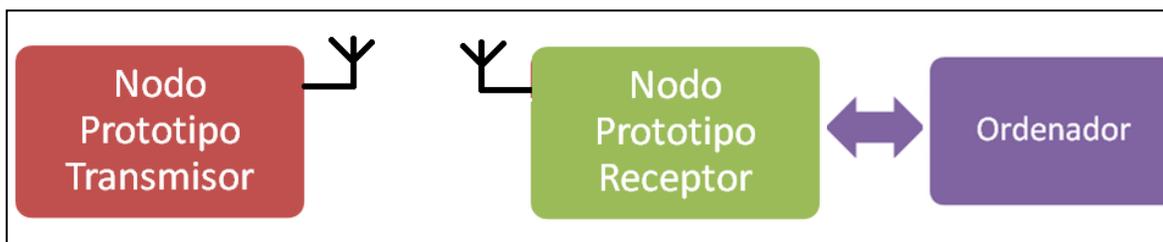
**Tabla 4-5.** Quinto Paquete de trabajo

---

Paquete de trabajo: Validación del sistema final.
Objetivo: Validar el sistema final.
1. Realizar pruebas funcionales al sistema de comunicación final.

---

## 5. Descripción detallada de la solución



**Ilustración 5.1** Diagrama de primer nivel sistema a implementar.

### 5.1 Diseño del sistema prototipo de nodo transmisor unisensorial energéticamente autónomo para zonas con clima tropical

Como se mencionó de manera breve en el capítulo 1, el prototipo de nodo transmisor unisensorial energéticamente autónomo se encarga del envío de información referente a la radiación solar presente en la zona en estudio, esto se realiza de manera inalámbrica hacia un nodo receptor. A continuación se presenta el diagrama de segundo nivel del nodo.



**Ilustración 5.2** Diagrama de segundo nivel para el nodo prototipo transmisor unisensorial energéticamente autónomo.

Con la ilustración 5.2 se muestra el esquema general del nodo transmisor prototipo en él se puede observar que tanto el sensor como el transceptor están controlados por el microcontrolador el cual se convierte en la etapa de administración del nodo prototipo.

### 5.1.1 Descripción del Hardware

- *El Microcontrolador*

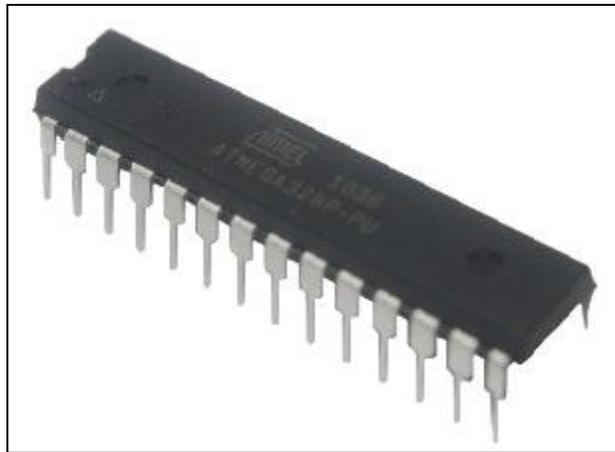
El dispositivo recibe un comando enviado por el nodo receptor, lo analiza y dependiendo del comando que determine genera señales eléctricas dirigidas hacia el transceptor haciendo uso de la interfaz SPI del microcontrolador y este la envía de manera inalámbrica de vuelta al nodo receptor.

Para el diseño del nodo transmisor se realizó una investigación sobre las características de potencia en los microcontroladores existentes en el mercado, se seleccionó el microcontrolador ATmega328P el cual es un microcontrolador de alto rendimiento y bajo consumo con 32KBytes de memoria programable tipo Flash, 1Kbyte de memoria EEPROM y 2KBytes de SRAM interna. Posee una retención de datos a 20 años a 85°C y 100 años a 25°C. Cuenta con 2 contadores/temporizadores de 8 bits los cuales cuentan con modo de comparación y modo de captura, así mismo posee un contador/temporizador de 16 bits también con modos de comparación y captura, 6 canales de PWM, 8 canales con ADC de 10 bits, interfaz de comunicación USART, SPI, I2C y diversos modos de reducción de consumo en actividad. Su rango de tensión de entrada para operación va de 1.8V a 5.5V (Atmel Corporation, 2012) .A demás de contar con todas estas características favorecedoras para el desarrollo del proyecto cabe mencionar que el microcontrolador ATmega328P se encuentra en el mercado a un bajo costo.

De la hoja de especificaciones técnicas del componente se obtiene la siguiente información referente a la potencia consumida por el dispositivo en modo activo.

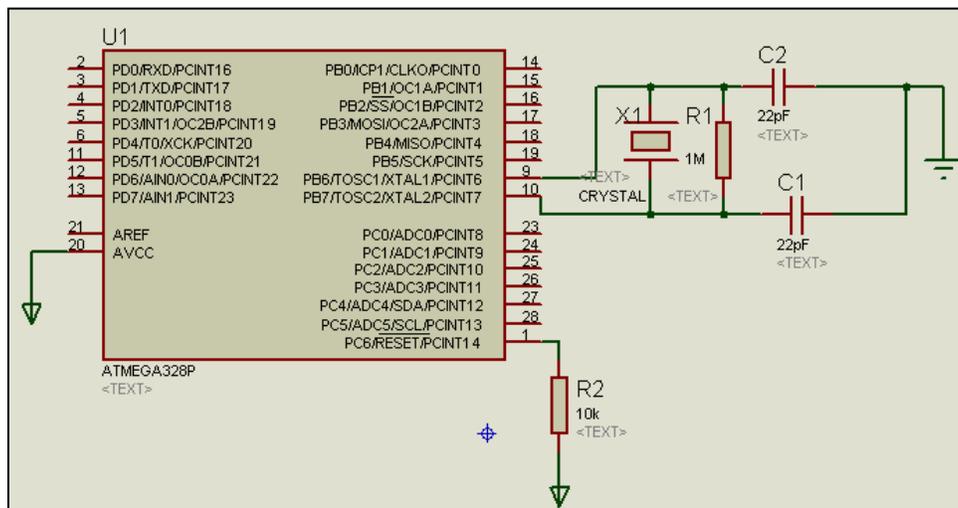
**Tabla 5-1** Características teóricas de potencia del microcontrolador ATmega328P

Tensión (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Costo por unidad (\$)
5	12-14	60-70	2.50



**Ilustración 5.3** Microcontrolador ATmega328P.<sup>6</sup>

Las conexiones básicas del microcontrolador se encuentran en la siguiente ilustración, cabe mencionar que el cristal utilizado como master clock en la aplicación es de 10MHz.



**Ilustración 5.4** Conexiones básicas del microcontrolador ATmega328P.

Ilustración generada con el software Proteus 7 Professional.

<sup>6</sup> Ilustración tomada del sitio web <http://www.rocketcream.com/shop/atmega328-with-arduino-bootloader> el día Sábado 9 de junio de 2012

- *El Transceptor*

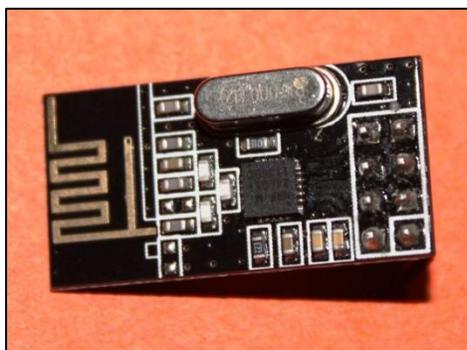
El dispositivo tiene la capacidad de enviar información vía inalámbrica hacia el nodo receptor y recibir información desde el mismo, esto haciendo uso de la interfaz SPI del microcontrolador.

Para la realización de la tarea correspondiente se recurre a la utilización del transceptor nRF24L01 cuya banda de operación es ISM 2.4GHz, su funcionamiento es de ultra baja potencia cuyo rango de entrada de tensión va desde 1.9V a 3.6V, maneja los paquetes de envío de forma automática, sus entradas toleran tensiones de hasta 5V lo cual lo hace completamente compatible con el microcontrolador Atmega 328P, su alcance de transmisión en espacios abiertos según lo indica la hoja de especificaciones técnicas es de 20-30 metros sin interferencia.

De la hoja de especificaciones técnicas del componente se obtiene la siguiente información referente al consumo de potencia del dispositivo en modo activo.

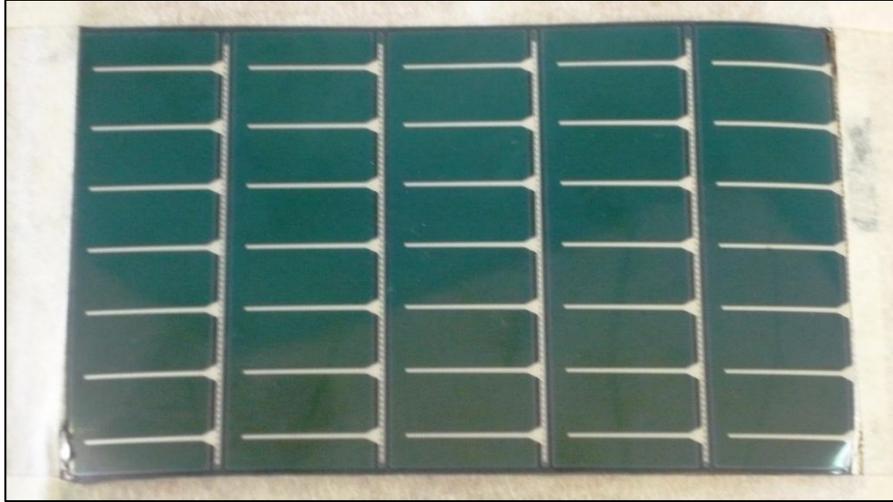
**Tabla 5-2** Características teóricas de potencia del transceptor nRF24L01

Tensión (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Costo por unidad (\$)
3	12.3	36.9	5.99



**Ilustración 5.5** Transceptor nRF24L01.





**Ilustración 5.7** Panel fotovoltaico a utilizar.

Para realizar pruebas y mantener condiciones reproducibles, se utilizó un proyector de filminas portátil de la marca 3M cuya lámpara auxiliar entrega una radiación  $792 \frac{W}{m^2}$  y un SMU (Sistema de Unidad de Medida) de la casa Keithley, en específico el modelo 2636A el cual es utilizado como herramienta de caracterización con ayuda del software ACS Basic Edition para la caracterización de semiconductores. Las mediciones fueron realizadas a una temperatura ambiente de  $26.3^{\circ}C$ .

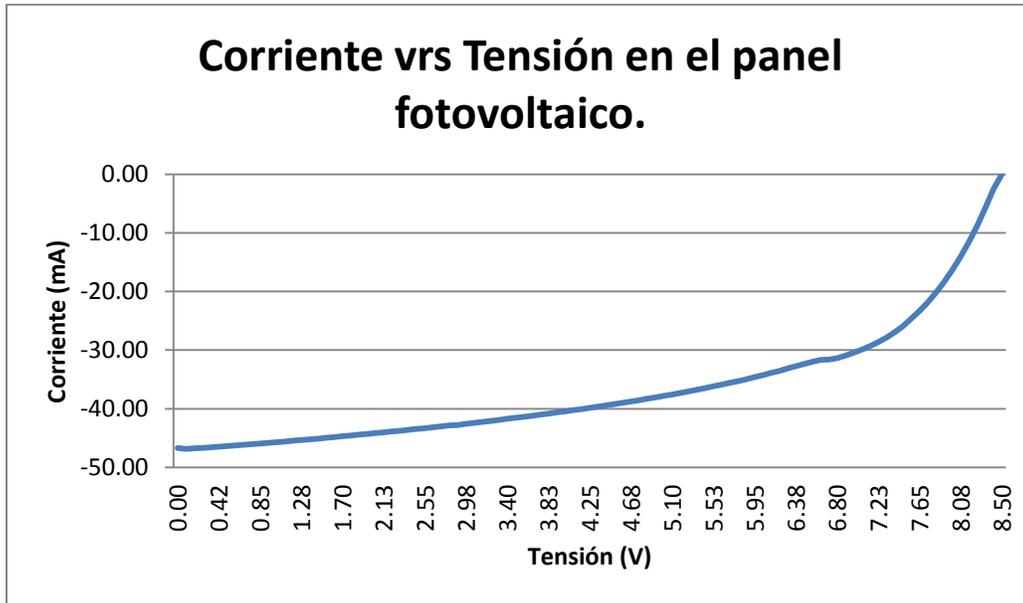


**Ilustración 5.8** Sistema de Unidad de Medida.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> Tomada del sitio web [http://www.metricstest.com/product\\_info.jsp?mfgmdl=KEI%202636%28R%29](http://www.metricstest.com/product_info.jsp?mfgmdl=KEI%202636%28R%29) el día sábado 9 de junio de 2012

En el gráfico 5-1, se muestra la curva característica obtenida para el panel fotovoltaico a utilizar durante el proyecto, como se mencionó anteriormente las condiciones de ensayo fueron  $G= 792 \frac{W}{m^2}$   $T=26.3^{\circ}C$ .



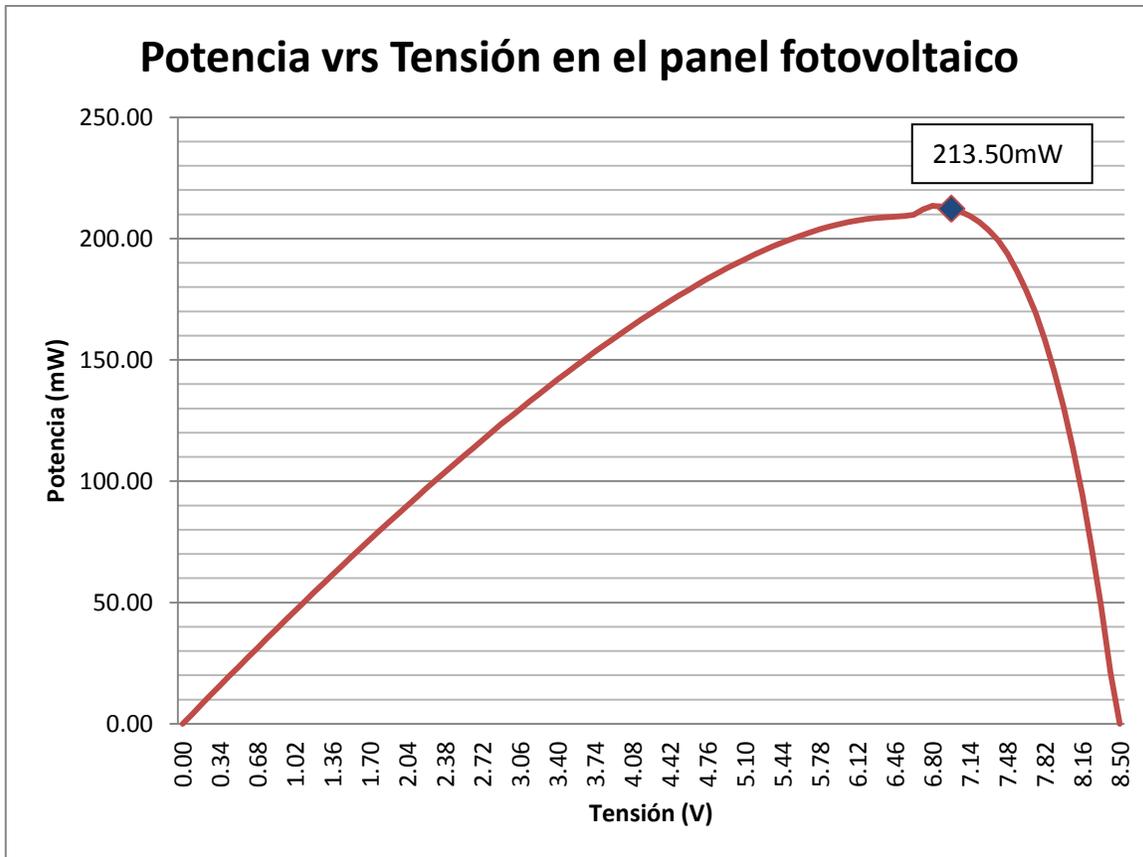
**Gráfico 5-1** Corriente eléctrica de salida en función de la tensión de salida del panel fotovoltaico a utilizar.

Del gráfico 5-1 se obtiene la siguiente información referente a corriente de corto circuito y tensión de circuito abierto:

- $I_{SC} = 46.71mA$
- $V_{OC} = 8.5V$

Partiendo de estos datos obtenidos de la curva característica y la ecuación 3-3 se puede calcular la potencia máxima del panel fotovoltaico de silicio bajo la siguiente ecuación.

$$P_M = 397.04mW$$



**Gráfico 5-2** Potencia de salida en función de la tensión del panel fotovoltaico a utilizar.

Del gráfico 5-2 se obtiene el punto de máxima potencia (presentado como un rombo azul en el gráfico), el cual se define como el punto donde el producto de la intensidad de corriente y la tensión es máximo. Haciendo uso de la ecuación 3-4 y los datos de la tabla 9-1 adjuntos en el anexo 1 se obtiene:

$$P = 6.80045127869 * 0.0313949100673 = 213.499556312mW$$

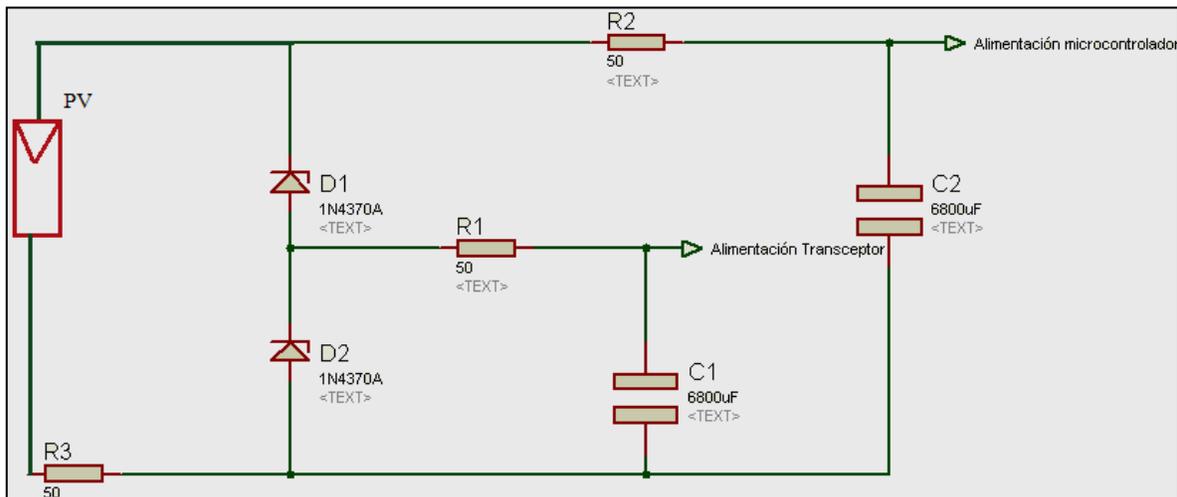
Como se puede observar el punto de máxima potencia se da cuando el panel fotovoltaico genera 6.8 V aproximadamente.

Por último haciendo uso de la ecuación 3-5 se logra calcular la eficiencia del panel en cuestión:

$$\eta = \frac{425mW}{792 \frac{W}{m^2} * 0.00730m^2} = 0.073509 = 7.35\%$$

- **Etapa de acondicionamiento de potencia y adquisición de información**

Para adaptar el panel fotovoltaico al nodo transmisor se hace uso del siguiente diseño.



**Ilustración 5.9** Etapa de acondicionamiento de potencia y adquisición de información.

En la ilustración 5.9 se observa que la resistencia R3 de 50 Ohm se utiliza a manera de sensor de radiación solar, debido a que por ella circula la totalidad de la corriente generada por el panel en el momento de la medición.

Excluyendo el costo del panel fotovoltaico, se aproxima el costo del nodo transmisor en \$10.

### 5.1.2 Descripción del Software

Para el nodo transmisor se generó un código haciendo uso de la herramienta Arduino Alpha 0023.

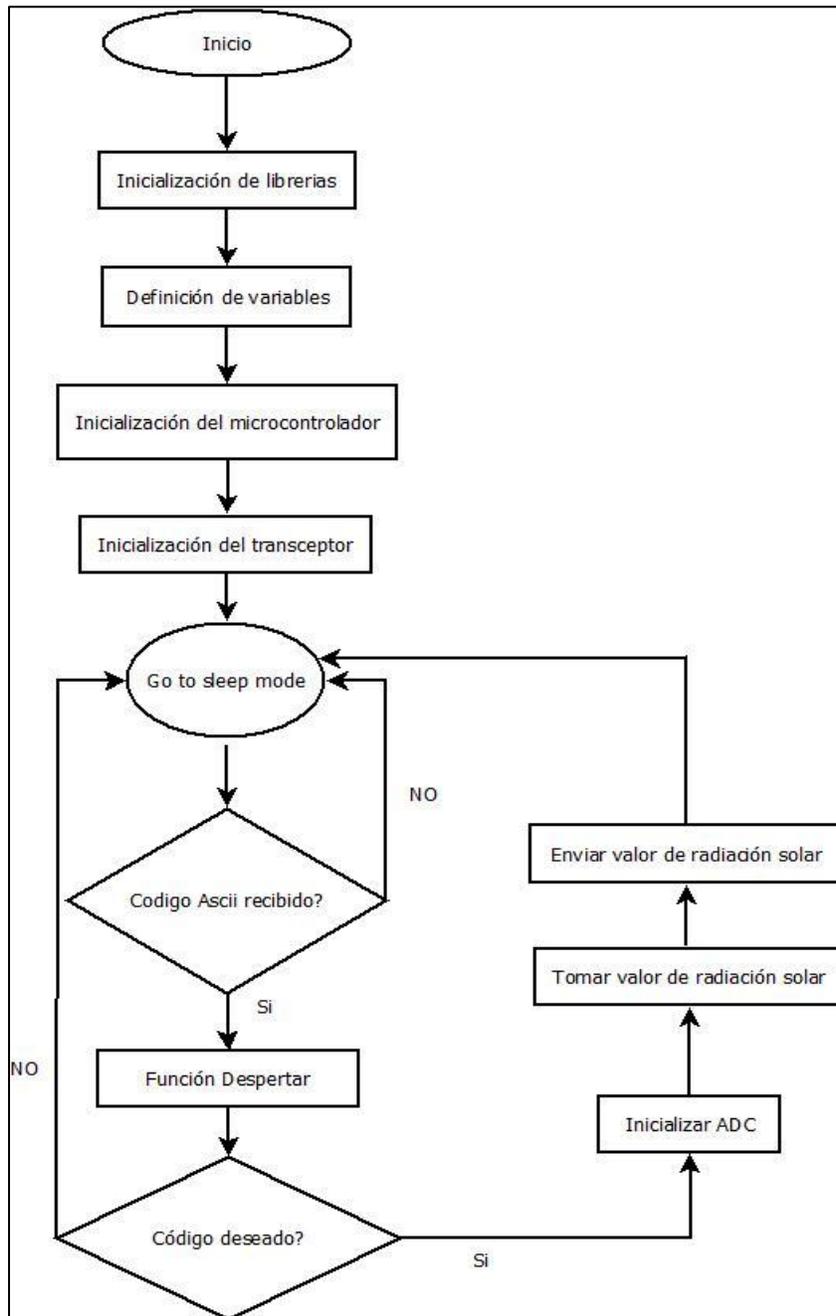
- **Principio de funcionamiento**

Se requiere de la creación de un protocolo de comunicación el cual logre establecer contacto entre el nodo transmisor y el nodo receptor, de tal manera que una vez recibido un código en específico, el nodo inicie su funcionamiento.

Para establecer conexión con el nodo receptor un código ascii específico debe ser recibido, este código despertará al nodo transmisor e iniciará la lectura del sensor de

radiación solar, una vez concluida la lectura el dato será enviado vía inalámbrica al nodo receptor.

Se muestran los diagramas de flujo del programa incluido en el nodo transmisor prototipo.



**Ilustración 5.10**Diagrama de flujo nodo transmisor.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Diagrama de flujo generado con la herramienta Dia.

- ***Inicialización de librerías***

Se realiza un llamado a las librerías por utilizar, las cuales son:

- SPI.h
- Mirf.h
- nRF24L01.h
- MirfHardwareSpiDriver.h
- avr/sleep.h

- ***Definición de variables***

En esta sección del programa se definen las variables a utilizar, dichas variables mantendrán los valores de radiación solar medidas.

SensorValue = Variable de tipo entero la cual almacena el valor leído el convertidor analógico digital, proveniente del sensor de radiación solar.

OutputValue = Variable de tipo entero, la cual almacena el valor mapeado entre 0 y 255 (3V). Este valor es enviado vía inalámbrica al nodo receptor.

Data= Es una variable extendida para almacenar los valores provenientes del receptor.

- ***Inicialización del microcontrolador y el transceptor***

De manera inicial se define el baud rate en 9600 baudios. Luego se realiza la configuración de la interfaz SPI, y se inicializan los pines a utilizar los cuales son:

- CE: pin 14
- CSN: pin 13
- MOSI: pin 17
- MISO: pin 18
- SCK: pin 19

Posteriormente se configura el nombre del nodo, y se establece la longitud de carga, el cual es un tipo de variable extendida (unsigned long), cabe mencionar que la longitud de la carga debe ser igual tanto para el transmisor como para el receptor.

Por último se enciende el transceptor y se activa el modo inactivo (sleep mode) en el nodo.

- ***Función “To Sleep”***

La función “To sleep” coloca el microcontrolador en modo de reposo. El microcontrolador deja el estado de reposo en el momento que se genera un cambio en la línea de entrada de datos provenientes del receptor.

- ***Código ascii recibido y activación del nodo transmisor***

Si es detectado un envío del receptor hacia el transmisor, el mismo activa el nodo transmisor y se almacena una variable (Data).

- ***Código deseado***

La variable donde fue almacenado el código ascii enviado por el receptor (Data) es comparada con un valor estándar el cual fue predeterminado para el nodo (9, en el caso del nodo transmisor prototipo).

- ***Inicializa ADC y toma de la medición de radiación solar***

Una vez comparada la variable “data”, si esta es “9” como es lo deseado, se configura el puerto A0 como entrada analógica e inmediatamente se toma la medición del valor de radiación solar proveniente del sensor y se mapea a un rango de 0 a 255 tomando como 255 una caída de 3V en la tensión del sensor.

- ***Envía valor de radiación***

Para el envío del valor obtenido ya mapeado del sensor, es necesario primero indicar el nombre del nodo al cual deseo enviar la información, una vez hecho esto se procede a enviar los datos. Se debe realizar una espera hasta comprobar que el registro donde se almacena el dato a enviar este vacío, una vez que esto sucede se comprueba que el valor fue enviado en su totalidad.

## 5.2 Diseño del sistema de recepción de datos

El prototipo de nodo receptor se encarga de la recepción y el almacenamiento de los datos enviados vía inalámbrica del nodo prototipo transmisor. Seguidamente se muestra el diagrama de segundo nivel del nodo.



**Ilustración 5.11** Diagrama de segundo nivel para el nodo prototipo receptor.

En la ilustración 5.11 el esquema general del nodo receptor, en el se puede observar que el microcontrolador es capaz de controlar el flujo de información tanto entre el ordenador y el transceptor como viceversa, por tanto se convierte nuevamente en la etapa de administración del nodo receptor.

### 5.2.1 Descripción del Hardware

- *El Microcontrolador*

El microcontrolador funciona como punto de conexión entre el ordenador y el nodo transmisor. Para mantener la administración del flujo de información, el microcontrolador recibe comandos enviados por el ordenador, los analiza y dependiendo del comando recibido se realiza o no la solicitud de envío de datos desde el transmisor. De igual manera que en el nodo transmisor prototipo, la señal eléctrica para la solicitud del envío de información desde el transmisor es realizada por medio de una generación de un conjunto de señales eléctricas las cuales, haciendo uso de la interfaz de comunicación SPI, se envían de manera inalámbrica al nodo transmisor haciendo uso del transceptor nRF24L01.

Debido a las características favorables del microcontrolador ATmega328P para el desarrollo del proyecto en cuanto a consumo de potencia y rendimiento, se decide que el mismo modelo de microcontrolador será utilizado para el proceso de recepción de los datos. Ubicándolo sobre una plataforma Arduino UNO.

Arduino UNO además de contar con las características ya mencionadas del microcontrolador ATmega328P cuenta con una conexión USB, un conector de alimentación, un botón de reinicio y una cabecera ICSP (In-Circuit Serial Programming). Además cuenta con un convertidos USB- Serial de la casa Atmel denominado Atmega16U2. Por otra parte la plataforma Arduino UNO acepta tensiones de entrada en el rango de 5 a 12V. (Arduino, 2012)



**Ilustración 5.12** Arduino UNO.<sup>10</sup>

De igual manera la plataforma Arduino UNO es compatible al transceptor nRF24L01 esto debido a que la placa cuenta con un regulador de 3.3V el cual suministra la alimentación al transceptor. Este regulador de tensión posee un consumo de corriente de 50mA. (Arduino, 2012)

A continuación se muestra una ilustración del microcontrolador y la placa de desarrollo arduino utilizado. Además mencionar que el cristal utilizado como master clock en la aplicación es de 16MHz.

<sup>10</sup> Ilustración tomada de: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno> consultado el día Sábado 9 de junio de 2012



**Ilustración 5.13** Fotografía del microcontrolador ATmega328P y la placa de desarrollo Arduino UNO.

- *Comunicación con el ordenador*

Arduino logra comunicarse con el ordenador por medio de la comunicación serial y su convertidor ATmega16U2 el cual hace posible la visualización de los datos en el puerto virtual COM. De la misma manera no se hace necesario un programador externo, esto debido a que la plataforma cuenta con el protocolo STK500.

La conexión entre el ordenador y la plataforma Arduino se realiza por medio de un cable conector USB 2.0 A-B como el que se muestra en la siguiente ilustración, de esta misma manera se realiza la alimentación de la plataforma arduino esto debido a que el puerto USB entrega 5V que pueden ser utilizados para dicho propósito.



**Ilustración 5.14** Cable conector USB 2.0 A-B.<sup>11</sup>

---

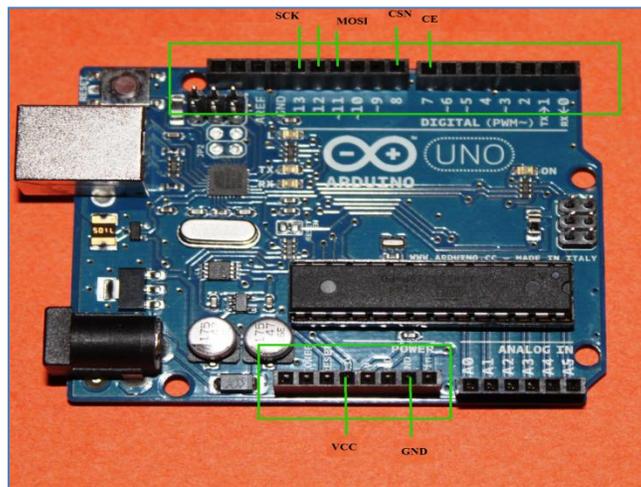
<sup>11</sup> Ilustración tomada de: <http://www.theroyalhk.com/usb.html>. Consultado el día Sábado 9 de junio de 2012

Para proteger el ordenador de sobrecorrientes la plataforma Arduino UNO cuenta con un fusible el cual protege los puertos USB, en este, si se sobrepasan 500mA el fusible interrumpe la conexión hasta que el mismo sea eliminado.

- *El transceptor*

Realiza las mismas funciones que en el nodo transmisor prototipo. Debido a que el nodo receptor se encuentra colocado en la plataforma Arduino UNO, los pines a utilizar se mapean a los puertos de salida para comodidad, observar ilustración 5.14. Los pines a utilizar son:

- 14 (CE) se mapea al puerto 8
- 13(CSN) se mapea al puerto 7
- 17 (MOSI) se mapea al puerto 11
- 18 (MISO) se mapea al puerto 12
- 19 (SCK) se mapea al puerto 13



**Ilustración 5.15** Ubicación de los pines del microcontrolador a utilizar por el transceptor nRF24L01.

Por medio de estos pines realiza tanto su configuración como el envío y recepción de datos.

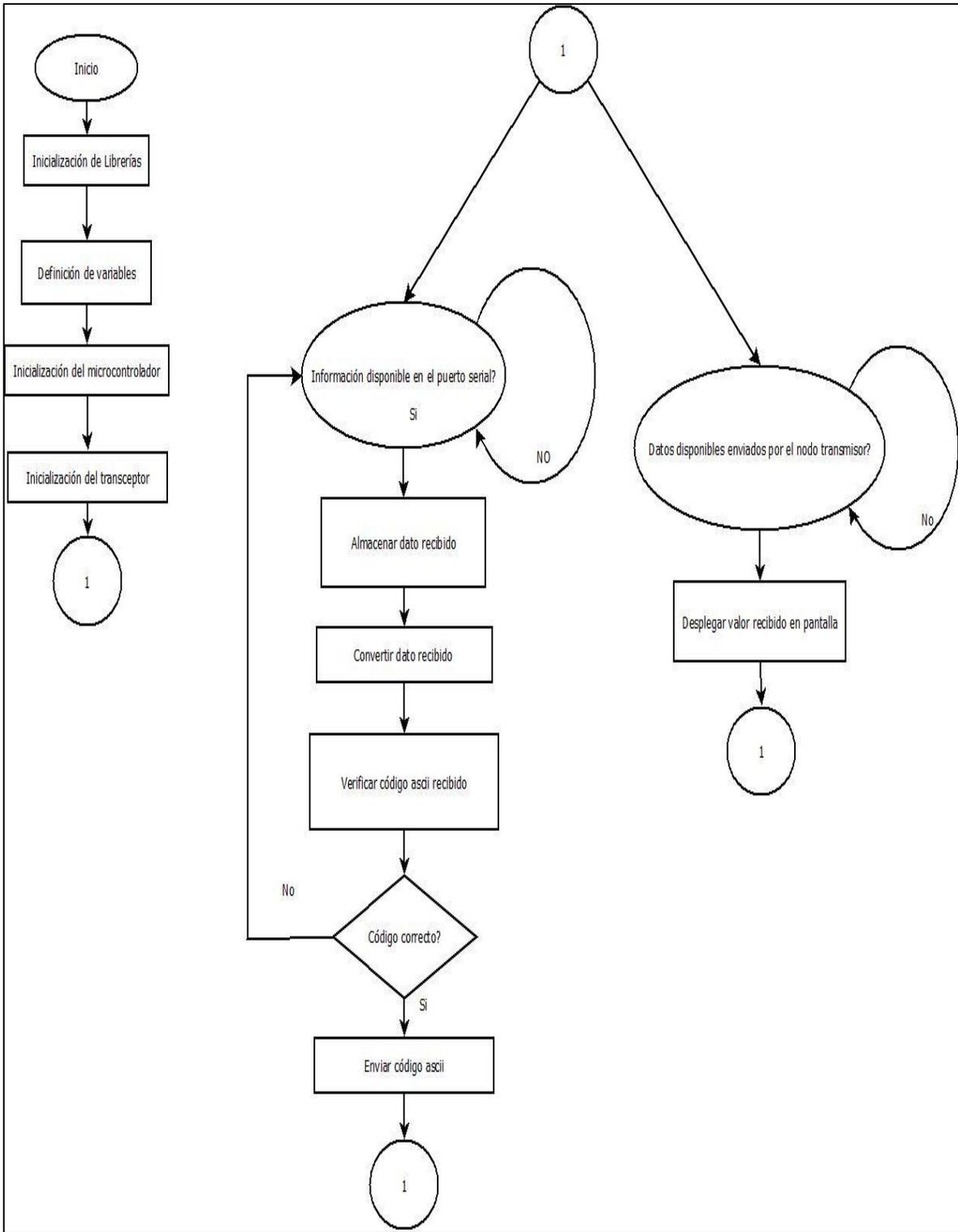
### 5.2.2 Descripción de software

De igual manera que para el nodo transmisor, para el nodo receptor se generó un código haciendo uso de la herramienta Arduino Alpha 0023.

- *Principio de funcionamiento*

Al igual que con el nodo transmisor prototipo, se requiere que ambos nodos conozcan el protocolo establecido para la solicitud de envío de información. En este caso, una vez que el usuario digite en el ordenador el código ascii necesario para el establecimiento de comunicación, el mismo será enviado de manera inalámbrica al transmisor para que este envíe como respuesta al nodo receptor el valor de la radiación solar presente en ese instante en el lugar en estudio.

En la ilustración 5.16 se muestran los diagramas de flujo del programa incluido en el nodo transmisor prototipo.



**Ilustración 5.16** Diagrama de flujo nodo receptor.<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Diagrama de flujo generado con la herramienta Dia.

- ***Inicialización de librerías***

Se realiza un llamado a las librerías por utilizar, las cuales son las mismas que en el caso del nodo transmisor prototipo expresadas en la [sección 5.1.2](#), a excepción de la librería `avr/sleep.h` debido a que el nodo receptor no tiene la necesidad de ahorro de energía, por tanto no se utilizarán sus funciones.

- ***Definición de variables***

En esta sección del programa se definen las variables a utilizar, dichas variables mantendrán tanto los valores de radiación solar enviados por el transmisor como los valores de código ascii digitados por el usuario para la monitorización.

Data = Variable de tipo entero la cual almacena el valor de radiación solar entrante enviado por el nodo transmisor.

Codigo = Variable de tipo entero, la cual almacena el valor enviado por el usuario desde el ordenador como código de monitorización. Este valor es enviado vía inalámbrica al nodo transmisor para activar su funcionamiento.

- ***Inicialización del microcontrolador y el transceptor***

Se realizan las mismas funciones mencionadas en la [sección 5.1.2](#), con excepción de la activación del modo inactivo del nodo, ya que el nodo receptor no tiene la necesidad de trabajar en ahorro de energía.

De manera instantánea el punto de conexión espera la presencia de alguna actividad tanto de la entrada serial (procedente del ordenador), como de la línea de entrada de la interfaz SPI proveniente del transceptor.

- ***Código disponible en el puerto serial***

Si es manifestada la presencia de algún código ascii en la entrada del puerto serial, el mismo se almacena en una variable (código), si el valor recibido es numérico, se procede a convertirlo en tipo entero y posteriormente es comparado con el valor estándar (predeterminado como 9). Si el código entrante es válido, se indica el nombre del nodo a recibir dicho código y se inicia el envío del mismo, de igual manera se hace necesario

realizar una espera, hasta comprobar que el registro de almacenamiento del dato a enviar este vacío, una vez sucedido, se comprueba que el código fue enviado en su totalidad debido a que el nodo se lo indica al usuario por medio de un mensaje en pantalla ("Código de monitorización enviado"). De manera contraria, si el código digitado por el usuario no es el correcto, el sistema se coloca automáticamente en espera de la llegada de un nuevo código desde el ordenador.

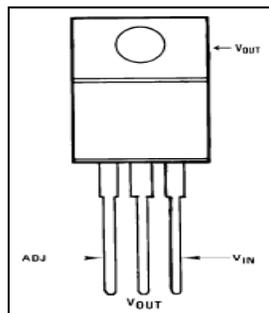
- ***Datos disponibles procedentes del nodo transmisor***

Si es manifestada la presencia de algún dato proveniente del nodo transmisor, el mismo se almacena en una variable (Data), la cual es enviada de manera automática al ordenador para su visualización y almacenamiento.

### **5.3 Rediseño de la etapa de acondicionamiento de potencia y adquisición de información**

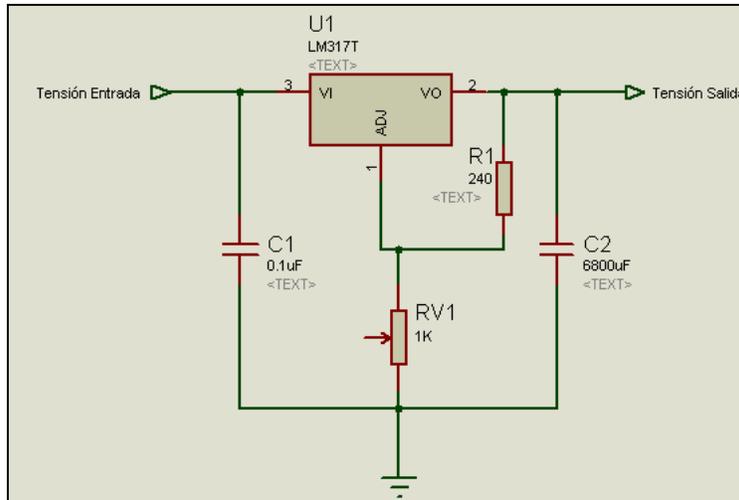
Para adaptar el panel fotovoltaico al nodo transmisor prototipo se utilizó un regulador de tensión variable LM317 el cual tiene la capacidad de suministrar 1.5A cuyo rango de salida en tensión se encuentra entre 1.2V a 37V. Este dispositivo soporta temperaturas de hasta 125°C (National Semiconductor, 1996).

A continuación se muestran la distribución de pines del regulador de tensión variable y la configuración utilizada para el desarrollo del proyecto.



**Ilustración 5.17** Diagrama de pines del regulador de tensión variable.<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Ilustración tomada de la hoja de especificaciones técnicas del dispositivo, disponible en versión digital en: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS009063.PDF>. Consultado el día sábado 9 de junio de 2012.

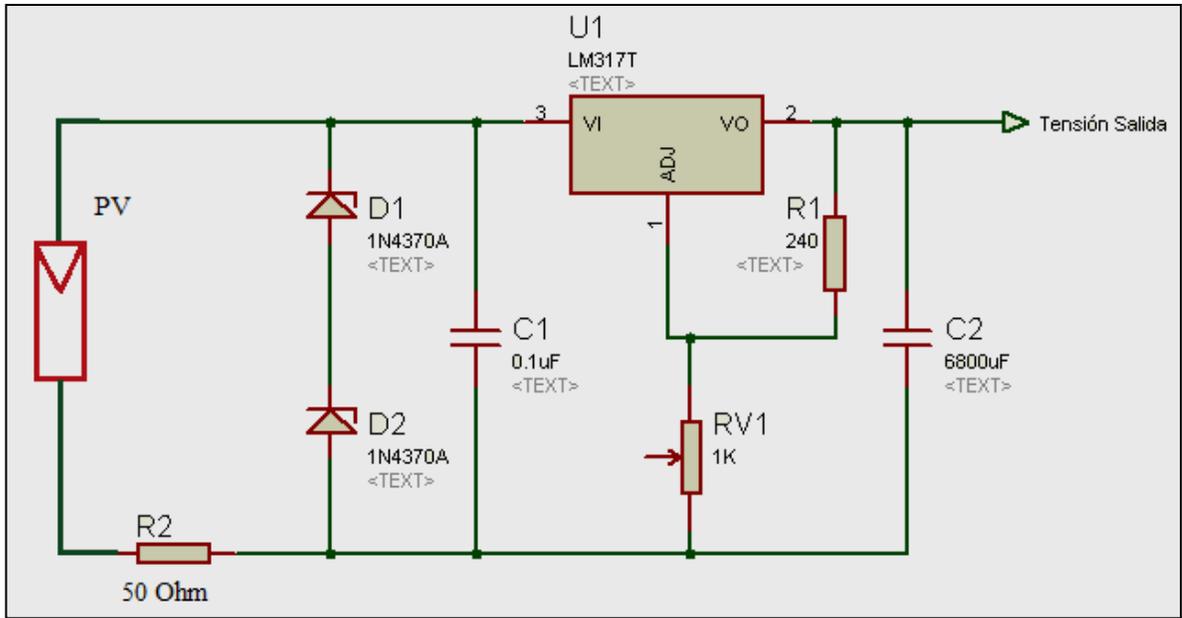


**Ilustración 5.18** Diagrama de conexión para el regulador de tensión variable.

Ilustración generada con el software Proteus 7 Professional.

Fue necesario agregar lo siguiente:

- Dos diodos zener de 2.4V: Con la finalidad de ubicar la tensión del panel fotovoltaico en su región lineal en la cual el comportamiento del panel no se ve afectado por la temperatura, por tanto la radiación solar podrá ser medida sin tener la influencia de la temperatura presente en los resultados.
- Una resistencia de 50 Ohm: con el fin de poder utilizar dicha resistencia como sensor de radiación solar, debido a que por ella fluye toda la corriente generada por el panel en ese instante.



**Ilustración 5.19** Etapa de acondicionamiento de potencia y adquisición de información.

Ilustración generada con el software Proteus 7 Professional.

## 6. Análisis de resultados

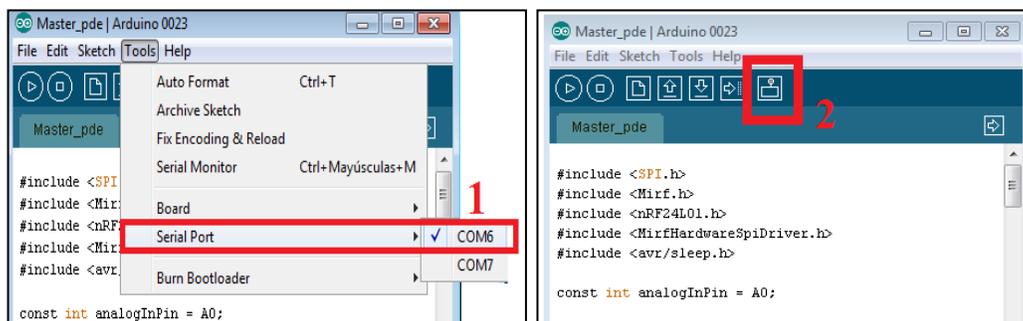
### 6.1 Resultados experimentales

#### 6.1.1 Sistema de comunicación

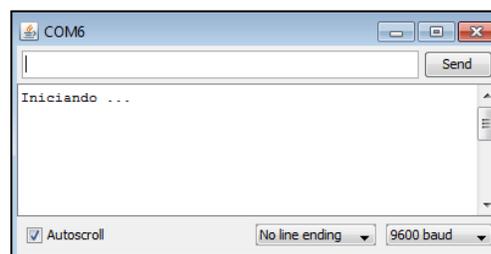
De manera inicial se realiza la programación de los microcontrolador Atmega 328P según lo planteado en la [sección 5.1.2](#) y [5.2.2](#) haciendo uso de ambas plataformas Arduino UNO.

Para realizar las pruebas iniciales se hizo uso del software Hyperterminal Private Edition, versión 6.3 para ejecutar el despliegue de información del nodo receptor, así como del monitor serial de Arduino 0023 para ejecutar el despliegue de información del nodo transmisor.

Se muestra el procedimiento a seguir para lograr observar el despliegue de los datos del nodo transmisor:



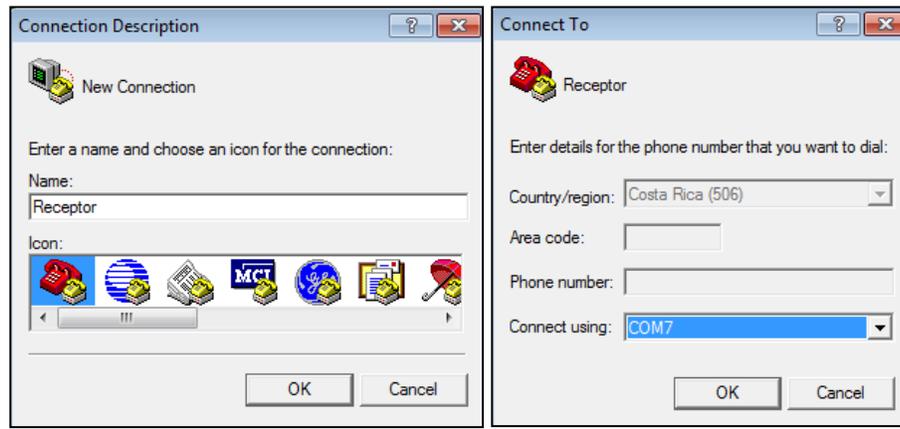
**Ilustración 6.1** Escogencia del periférico donde se encuentra conectado el nodo transmisor y abrir el monitor serial.



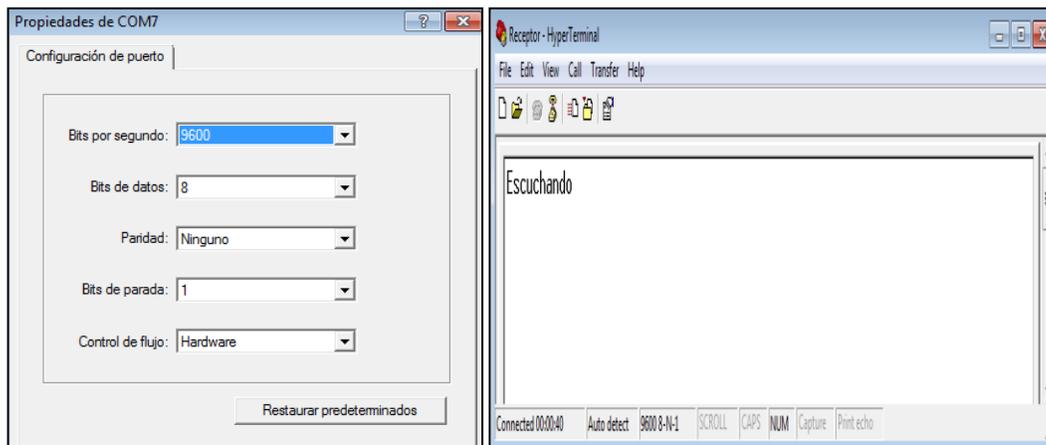
**Ilustración 6.2** Vista del monitor serial para el nodo transmisor.

Como se observa en la Ilustración 6.1 el primer paso realizado para el establecimiento de comunicación entre el ordenador y el nodo transmisor es seleccionar el puerto periférico en el cual se encuentra ubicado el nodo transmisor (COM6) , seguidamente se eligió la opción de monitor serial para observar el proceso del nodo, el cual se presenta en la ilustración 6.2.

Procedimiento a seguir para lograr observar el despliegue de los datos del nodo receptor:



**Ilustración 6.3** Descripción de la conexión u selección del periférico, nodo receptor.



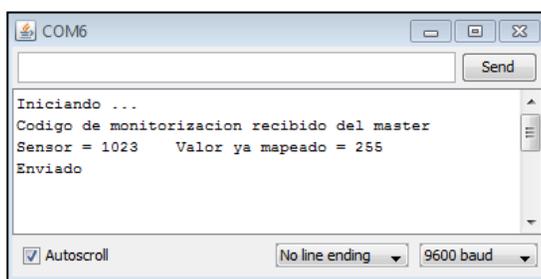
**Ilustración 6.4** Configuración del puerto y vista del monitor serial, nodo receptor.

Como se observa en la ilustración 6.3 de manera inicial se seleccionó el nombre de la conexión, seguidamente se elige el periférico en el cual se encuentra ubicado el nodo receptor, luego en la ilustración 6.4 se configuran las propiedades del puerto, el cual debe

trabajar a 9600 baudios como se mencionó en la etapa de diseño de software y es posible observar el monitor serial para el nodo receptor.

Cabe mencionar que el software Hyperterminal se encuentra incluido en ordenadores con el sistema operativo Windows XP y versiones anteriores, por el contrario en ordenadores con Windows Vista o superiores debe ser instalado por separado.

Una vez que se tienen ambos monitores seriales, se observan tanto el envío como la recepción del valor de radiación solar presente en el ambiente en estudio como se detalla en las siguientes ilustraciones.

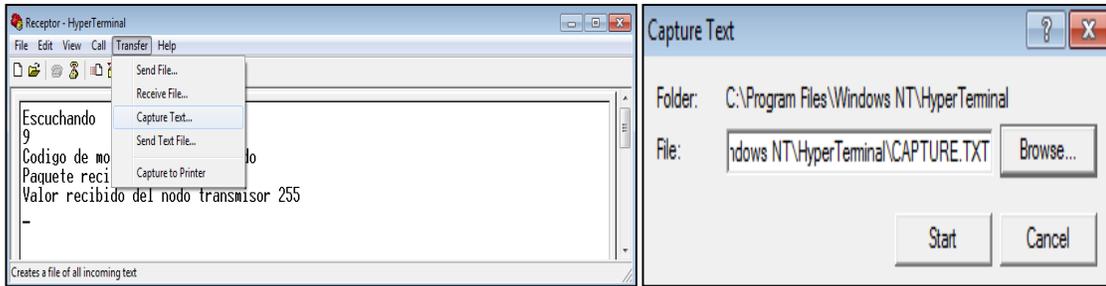


**Ilustración 6.5** Visualización monitor serial transmisor.

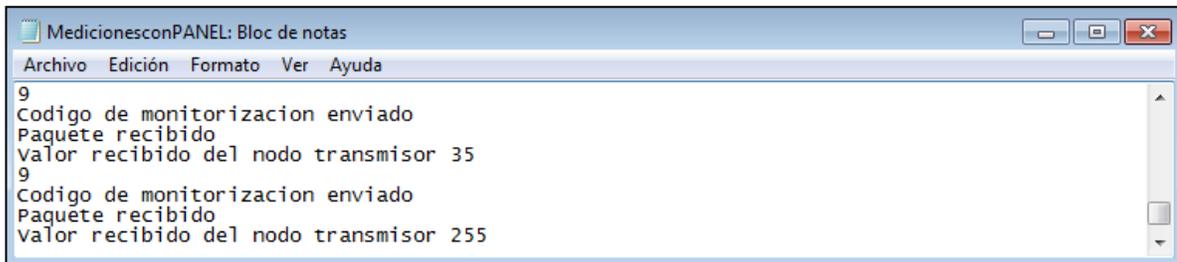


**Ilustración 6.6** Visualización monitor serial receptor.

Para mantener un control de las mediciones realizadas, se configura la captura de los datos en un archivo de tipo texto de la siguiente manera:



**Ilustración 6.7** Pasos a seguir para capturar el texto en .txt

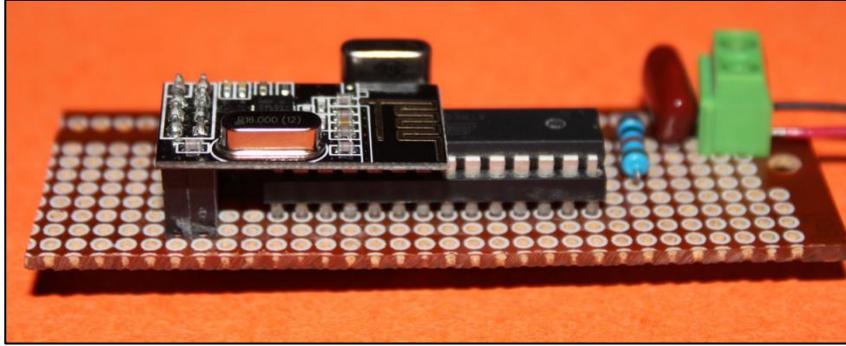


**Ilustración 6.8** Visualización de los datos almacenados en un archivo .txt

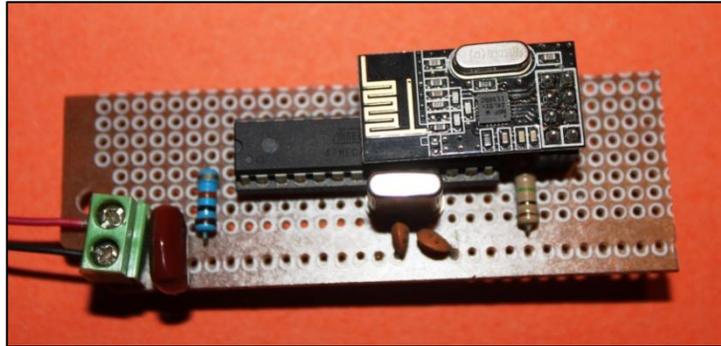
En la ilustración 6.7 se detalla que para realizar la captura de las mediciones, es necesario seleccionar la opción “*Transfer*” seguido por “*Capture text*”, seguidamente se debe ubicar en el equipo el archivo en el cual se desea almacenar la información (debe ser un archivo de texto .txt) y por ultimo seleccionar la opción iniciar. Cabe mencionar que el archivo de tipo texto creado se verá modificado cada vez que se realice esta acción, manteniendo las mediciones realizadas con anterioridad y agregando las nuevas.

Se realizan mediciones de alcance a dicha configuración de nodos con una radiación solar en el ambiente de  $935 \frac{W}{m^2}$  y una temperatura de  $29.3^{\circ}C$  obteniéndose como resultado una distancia de 13.35 m con obstáculos e interferencias, mientras que a línea vista posee un alcance de 22m.

Una vez verificado el buen funcionamiento de la comunicación, se procedió a extraer el microcontrolador del nodo transmisor de la plataforma Arduino UNO y colocarlo de manera individual en una tarjeta perforada. Seguidamente una fotografía del microcontrolador junto con su circuitería periférica.



**Ilustración 6.9** Vista lateral del nodo transmisor.



**Ilustración 6.10** Vista lateral del nodo transceptor.

### **6.1.2 Perfil de consumo energético para el nodo transmisor**

Al nodo transmisor presentado en la ilustración 6.10 se le realizaron mediciones para determinar su perfil de consumo energético.

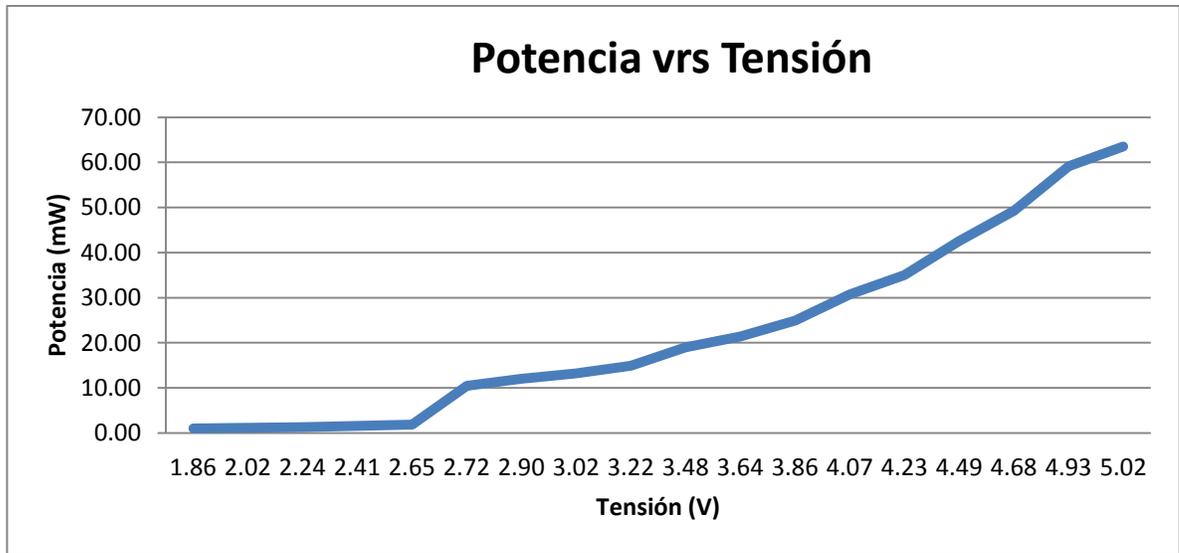
De manera inicial, se fija una tensión de 3V en el transceptor para realizar variaciones de tensión en el microcontrolador, a continuación los resultados:

**Tabla 6-1** Mediciones de potencia para el microcontrolador ATmega328P.

<b>Tension</b>	<b>Corriente (mA)</b>	<b>Potencia (mW)</b>	<b>Funcionamiento</b>
1.86	0.56	1.04	No trasmite
2.02	0.56	1.13	No trasmite
2.24	0.59	1.32	No trasmite
2.41	0.64	1.54	No trasmite
2.65	0.71	1.88	No trasmite
2.72	3.84	10.44	Transmite
2.90	4.15	12.03	Transmite
3.02	4.37	13.20	Transmite
3.22	4.63	14.89	Transmite
3.48	5.46	19.01	Transmite
3.64	5.88	21.39	Transmite
3.86	6.46	24.95	Transmite
4.07	7.54	30.69	Transmite
4.23	8.27	34.99	Transmite
4.49	9.48	42.55	Transmite
4.68	10.53	49.25	Transmite
4.93	12.01	59.17	Transmite
5.02	12.66	63.50	Transmite

El inicio de funcionamiento para el nodo transmisor se da cuando el mismo llega al límite de 2.7V bajo un consumo de corriente de 3.84mA según lo indicado en la tabla 6-1.

Basado en la tabla 6.1 se generó el siguiente gráfico donde se muestra el comportamiento de la potencia respecto la tensión en el microcontrolador Atmega 328P.



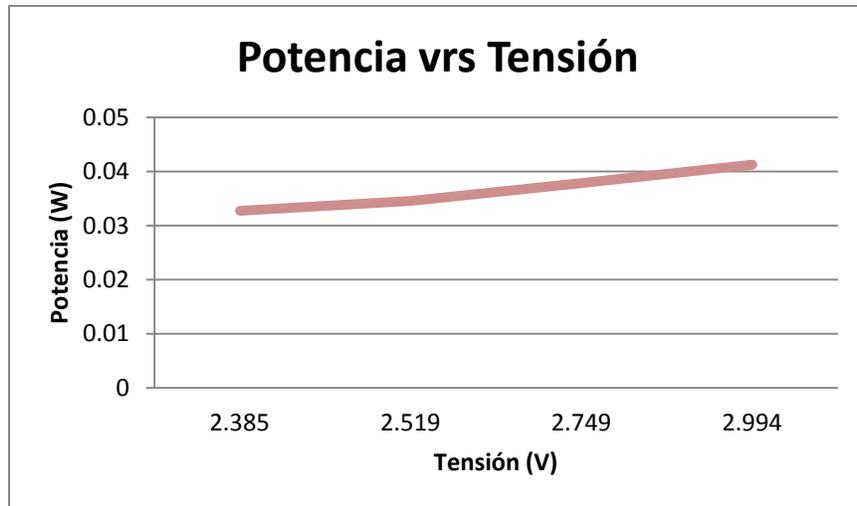
**Gráfico 6-1** Gráfico potencia vrs tensión para el microcontrolador ATmega328P en el nodo transmisor.

Posteriormente se coloca en el microcontrolador ATmega 328P una tensión fija de 2.7V (determinado de acuerdo con la tabla 6-1 como punto crítico en el inicio de funcionamiento de microcontrolador) y se procede a determinar el perfil de consumo energético del transceptor nRF24L01, los resultados se presentan en la tabla 6-2.

**Tabla 6-2** Mediciones de potencia para el transceptor nRF24L01.

Tensión (V)	Corriente(mA)	Potencia (mW)
2.385	13.7	32.74605
2.519	13.7	34.56068
2.749	13.8	37.85373
2.994	13.8	41.25732

Basándose en la información obtenida de la tabla 6-2 se generó el siguiente gráfico donde se presenta el comportamiento de potencia respecto a la tensión aplicada para el transceptor del nodo transmisor.



**Gráfico 6-2** Potencia vrs tensión para el transceptor nRF24L01 en el nodo transmisor.

El inicio de funcionamiento para transceptor se da cuando el mismo llega al límite de 2.38V bajo un consumo de corriente de 13.7 mA según lo indicado en la tabla 6-2.

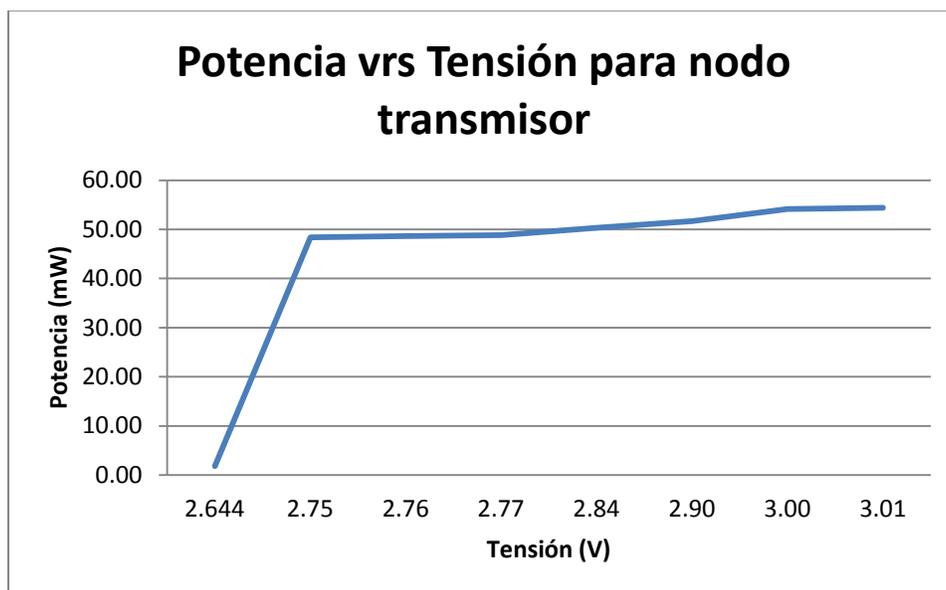
Por último se realizaron mediciones para determinar el comportamiento del nodo transmisor conjunto, las mismas se muestran en la tabla 6-3.

**Tabla 6-3** Mediciones de potencia para el nodo transmisor.

Tension (V)	Corriente (mA)	potencia (mW)	Funcionamiento
0	0	0	No trasmite
0.2	0	0	No trasmite
0.428	0	0	No trasmite
0.656	0	0	No trasmite
0.857	0.00	0.00	No trasmite
1.03	0.01	0.01	No trasmite
1.222	0.03	0.04	No trasmite
1.435	0.06	0.08	No trasmite
1.618	0.41	0.66	No trasmite
1.894	0.49	0.92	No trasmite
2.05	0.52	1.07	No trasmite
2.27	0.55	1.24	No trasmite
2.412	0.61	1.47	No trasmite
2.644	0.68	1.79	No trasmite
2.75	17.58	48.36	Transmite
2.76	17.61	48.66	Transmite

2.77	17.63	48.85	Transmite
2.84	17.74	50.35	Transmite
2.90	17.82	51.71	Transmite
3.00	18.08	54.17	Transmite
3.01	18.11	54.42	Transmite

Basado en la tabla 6-3 se generó el siguiente gráfico donde se presenta el comportamiento de potencia respecto a la tensión aplicada para el nodo transmisor.



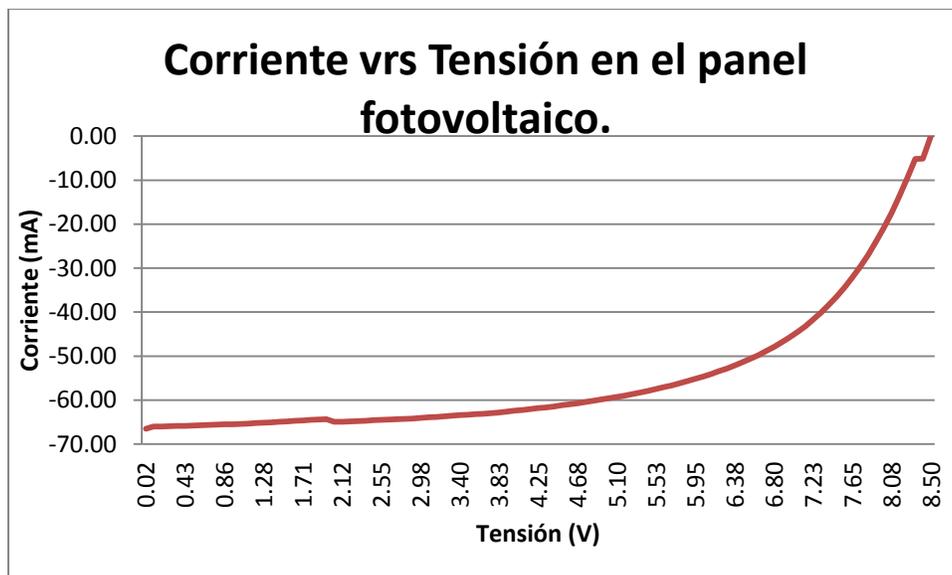
**Gráfico 6-3** Potencia vrs tensión para el nodo transmisor.

Del gráfico 6-3 se observa que el nodo inicia su funcionamiento a los 2.75V bajo un consumo de corriente de 17.6mA.

### 6.1.3 Funcionamiento del panel fotovoltaico

Con el fin de corroborar las características del panel fotovoltaico usado, se realizaron nuevamente pruebas con el SMU (Sistema de Unidad de Medida) de la casa Keithley disponible en el laboratorio (modelo 2636A) a diferencia que en esta ocasión se utilizó la radiación solar real, en el momento de la medición se registró una radiación de  $1000 \frac{W}{m^2}$  y una temperatura de  $30^{\circ}C$

En el gráfico 6-4, se observa la curva característica obtenida para el panel fotovoltaico utilizado, como se mencionó las condiciones de ensayo fueron  $G= 1000 \frac{W}{m^2}$   $T=30^{\circ}C$ .



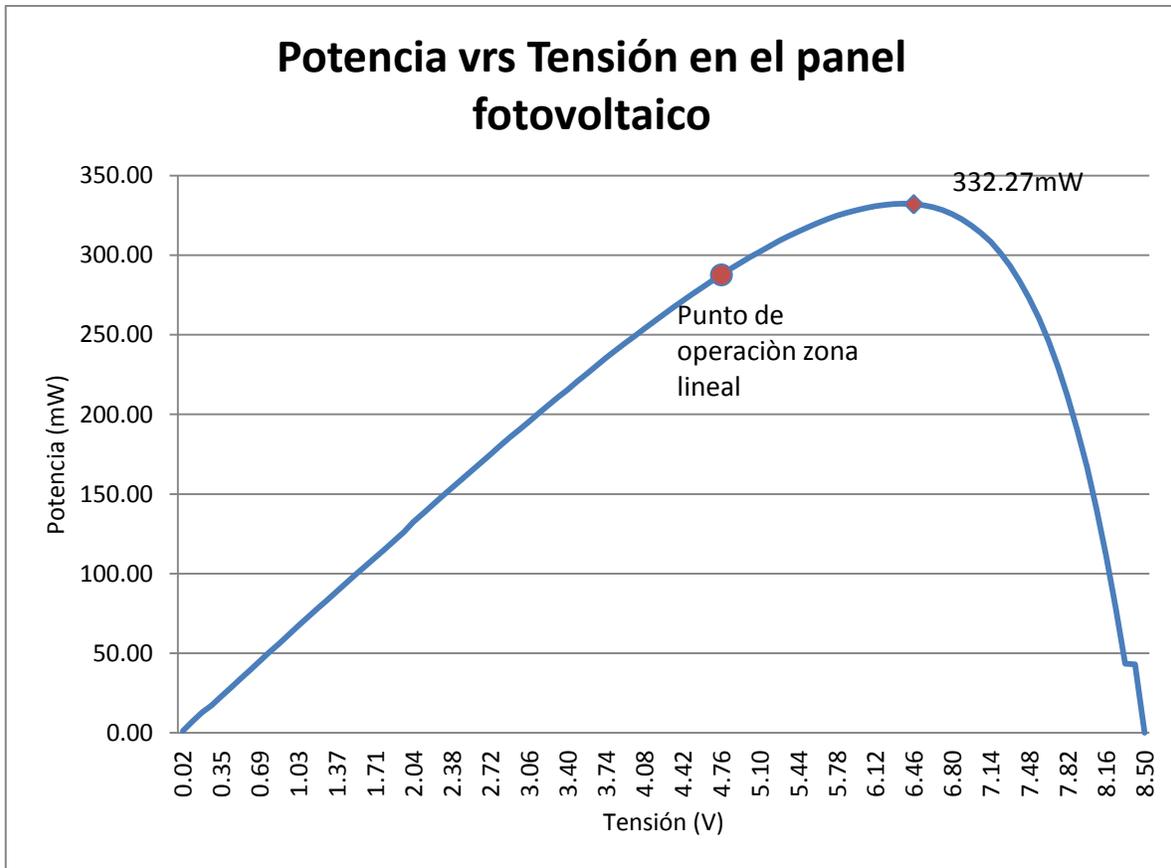
**Gráfico 6-4** Corriente eléctrica de salida en función de la tensión de salida del panel fotovoltaico.

Del gráfico 6-4 se determina la siguiente información referente a corriente de corto circuito y tensión de circuito abierto:

- $I_{SC} = 66.51mA$
- $V_{OC} = 8.50011V$

Partiendo de estos datos obtenidos de la curva característica y la ecuación 3-3 se puede calcular la potencia máxima del panel fotovoltaico de silicio bajo la siguiente ecuación.

$$P_M = 565.39mW$$



**Gráfico 6-5** Potencia de salida en función de la tensión del panel fotovoltaico.

En el gráfico 6-5 se observa el punto de máxima potencia (ilustrado a través de un rombo color rojo). Haciendo uso de la ecuación 3-4 y los datos de la tabla 9-2 adjuntos en el anexo 2 se obtiene:

$$P = 6.375310421 * 0.052118946 = 332.27 \text{ mW}$$

Se determina que el punto de máxima potencia se da cuando el panel fotovoltaico genera 6 V aproximadamente.

Por último haciendo uso de la ecuación 3-5 se logra calcular la eficiencia del panel:

$$\eta = \frac{565.39 \text{ mW}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 0.00730 \text{ m}^2} = 0.077451 = 7.74\%$$

#### 6.1.4 Sistema de acondicionamiento de potencia.

Se ubica el sistema en la zona de operación lineal del panel fotovoltaico con ayuda de los diodos zener, su valor se determina con ayuda de la grafica 6-5, en esta se muestra dicho valor con un círculo rojo y cuyo valor es 4.8V.

Se realizan mediciones al circuito de la ilustración 5.10 y se adquiere lo siguiente:

Tabla 6-4 Mediciones de tensión y corriente en el circuito de la ilustración 5.10

	Corriente (mA)		Tensión (V)
Panel	35.2	Panel	6.9
Diodos zener	28.6	Diodos zener	5.2
R3	35.2	R3	1.76
C1	0.006	C1	2.6
C2	6.68	C2	4.8

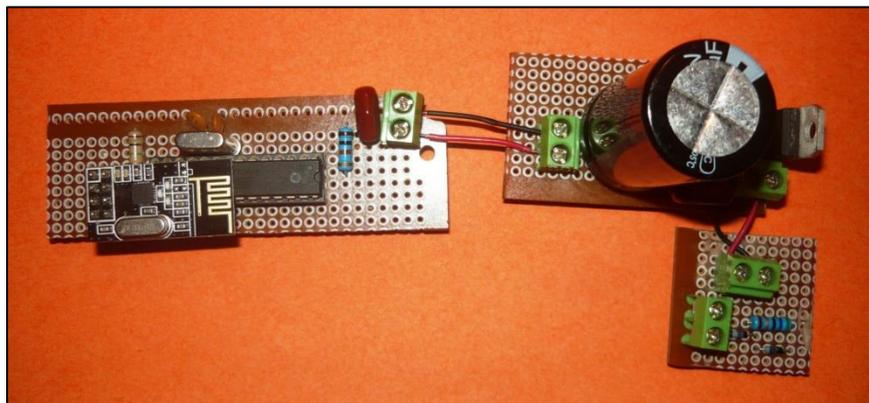


Ilustración 6.11 Vista superior del nodo transmisor y la etapa de acondicionamiento de señal implementado.

## 6.2 Análisis de resultados

Las ilustraciones 6.5 y 6.6 permiten corroborar el funcionamiento del sistema de comunicación diseñado, en estas se demuestra que el valor enviado por el nodo receptor como código de monitorización es el número 9, así mismo queda evidenciado la aceptación del mismo por el nodo transmisor, el cual de manera inmediata envía el valor de radiación solar presente en el ambiente de estudio.

Si se comparan las tablas 5-1 y 6-1 se corrobora el consumo de corriente indicado por el fabricante para los microcontroladores. En el caso de los transceptores se comparan las tablas 5-2 y 6-2 en estas se determina una diferencia de 1.4mA de acuerdo a lo especificado por el fabricante.

Refiriéndose a la [sección 6.1.3](#) de resultados experimentales, queda en evidencia que los paneles fotovoltaicos sufren de pérdidas debido a los cambios de temperatura además de esto, su producción se ve disminuida de acuerdo a las condiciones climatológicas. Además se logra corroborar que el punto de máxima potencia se puede aproximar con la fórmula

$$P = 0.75 * V_{oc} \quad \text{(Ecuación 6-1)}$$

Una vez que comprobado el funcionamiento de todos los módulos de manera individual, se manifestó que a igual manera que con una alimentación regular (baterías), los nodos son capaces de comunicarse a una distancia de aproximadamente 13.35 m con obstáculos mientras que a línea vista 22m de distancia, esto haciendo uso de una fuente de energía renovable como lo es el panel fotovoltaico, esto corrobora lo indicado por la hoja de especificaciones técnicas (20-30m en espacios abiertos sin interferencia) . Además que el condensador encargado de la alimentación del nodo se mantiene realizando su carga siempre y cuando el nodo se encuentre en presencia de radiación solar, una vez que esto no ocurre, el mismo comienza su proceso de descarga, el cual concluye rápidamente. Utilizando esta aplicación, se solucionarían problemas de descarga en las baterías de los módulos convencionales, aunque siempre se contará con la posibilidad de fallas debido a la vida útil de los componentes: por ejemplo los condensadores y microcontroladores presentan una vida útil aproximada de acuerdo a la temperatura del ambiente donde operan, además se ven afectados incluso sin uso, por efecto de la corrosión y el envejecimiento.

## **7. Conclusiones y recomendaciones**

### **7.1 Conclusiones**

- El nodo transmisor prototipo unisensorial energéticamente autónomo requiere una potencia mínima para su operación de 48.36mW bajo una tensión de 2.75V
- El nodo prototipo tiene la capacidad de enviar mediciones de radiación solar hasta un máximo de distancia 22m en línea vista y 13.35m con obstáculos.
- El uso de diodos zener en la etapa de acondicionamiento de potencia permite ubicar el panel fotovoltaico en una zona lineal donde su generación no se ve afectada por las variaciones de temperatura en el ambiente en estudio.
- La utilización del sistema de comunicación inalámbrico permite la monitorización del ambiente en estudio sin necesidad de estar presente en el lugar, contando con acceso a un ordenador, en el cual los datos recopilados son almacenados y visualizados.
- Tener la posibilidad de almacenamiento de los datos de radiación solar permite al usuario realizar un análisis posterior y tomar medidas correctivas para que los cultivos se desarrollen en óptimas condiciones.

## 7.2 Recomendaciones

- Realizar mediciones para determinar la relación de potencia consumida versus distancia de transmisión.
- Estudiar que otras formas de visualización y captura de datos se pueden adaptar al proyecto.
- Dimensionar el condensador y su circuitería periférica de tal manera que se logre cumplir con el proceso de descarga lenta, se recomienda la utilización de un supercondensador para el almacenamiento de la carga, por sus características favorables de almacenamiento de energía y ciclos de carga y descarga.
- Para evitar el efecto de la corrosión en los componentes del nodo se recomienda un empaquetado de acrílico, el cual posee alta resistencia a golpes y permite el paso de los rayos incidentes, con un empaque de silicón para evitar el ingreso de humedad o gotas de lluvia presentes en el ambiente en estudio.
- Estudiar la posibilidad de formular un proyecto que integre el uso de energías alternativas al nodo tales como piezoeléctricos para el aprovechamiento de la temperatura del ambiente, la lluvia e incluso las vibraciones, energías generadas por el desequilibrio de pH entre los árboles y el suelo, etc.
- Con el fin de disminuir el tamaño del nodo prototipo se recomienda el uso del Arduino Pro Mini el cual cuenta con el controlador ATmega328 en montaje superficial.

## 8. Bibliografía

- [1] Atmel Corporation. “*ATmega328P Datasheet*”. (En línea). Consultado el día sábado 9 de junio de 2012. Disponible en <http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf>
- [2] Autor desconocido. “*Clima tropical*” (En línea). Consultado en octubre 2011. Disponible en [http://es.wikipedia.org/wiki/Clima\\_tropical](http://es.wikipedia.org/wiki/Clima_tropical)
- [3] Autor desconocido. “*La Fotosíntesis*” (En línea). Consultado en junio de 2012. Disponible en [http://www.euita.upv.es/varios/biologia/Temas/tema\\_11.htm#Iluminaci%C3%B3n%20y%20Fotos%C3%ADntesis%20Neta](http://www.euita.upv.es/varios/biologia/Temas/tema_11.htm#Iluminaci%C3%B3n%20y%20Fotos%C3%ADntesis%20Neta). Consultado el día Viernes 8 de junio de 2012.
- [4] Casierra-Posada Fánor. “*Fotoinhibición: Respuesta fisiológica de los vegetales al estrés por exceso de luz. Una revisión*”. (En línea). Consultado el día viernes 8 de junio de 2012. Disponible en [http://www.delsantek.cl/pdf/Fotoinhibicion\\_en\\_Vides.pdf](http://www.delsantek.cl/pdf/Fotoinhibicion_en_Vides.pdf)
- [5] Fernández Ferichola, Julio. “*Caracterización de módulos Fotovoltaicos con Dispositivo portátil*”. (En línea). Consultado el sábado 9 de junio de 2012. Disponible en [http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/6037/1/PFC\\_Julio\\_Fernandez\\_Ferichola.pdf](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/6037/1/PFC_Julio_Fernandez_Ferichola.pdf).
- [6] González M. Juan Miguel. 2011. “*Clima Tropical*” (En línea). Consultado en octubre 2011. Disponible en <http://www.astrociencia.com/2008/11/04/clima-tropical/>
- [7] Instituto Nacional de Biodiversidad. “*Biodiversidad en Costa Rica*” (En línea) Consultado en octubre 2011. Disponible en [http://www.inbio.ac.cr/es/biod/bio\\_biodiver.htm](http://www.inbio.ac.cr/es/biod/bio_biodiver.htm)
- [8] Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. “*Clima de Costa Rica y variabilidad climática*” (En línea). Consultado en octubre 2011. Disponible en <http://www.imn.ac.cr/educacion/CLIMA%20DE%20COSTA%20RICA.html>
- [9] National Semiconductor. “*LM117 / LM317A / LM317 3-Terminal Adjustable Regulator*” (En línea). Consultado el sábado 9 de junio de 2012. Disponible en: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS009063.PDF>
- [10] Nordic semiconductor. “*nRF24L01 Single Chip 2.4GHz Transceiver. Product Specification*” (En línea). Consultado el día sábado 9 de junio de 2012. Disponible en: <http://www.crcibernetica.com/2-4g-wireless-nrf24l01-module/>.
- [11] Pérez – Urria Carril Elena. “*Fotosíntesis: Aspectos Básicos*” (en línea). Consultado en junio 2012.
- [12] Plaza A. Cristian. “*La Radiación solar y su efecto en los cultivos*” (En Línea). Consultado el Sábado 8 de junio de 2012. Disponible en: [http://issuu.com/alkesita/docs/05\\_-\\_efecto\\_de\\_la\\_radiacion\\_solar\\_en\\_cultivos?mode=window&pageNumber=1](http://issuu.com/alkesita/docs/05_-_efecto_de_la_radiacion_solar_en_cultivos?mode=window&pageNumber=1)

[13] Reinoso Herminda, Tordable María del Carmen, Grosso Margarita. *“Desde la célula a la fotosíntesis en las plantas superiores”* (En línea). Consultado en junio 2012.

## 9. Anexos

## 9.1 Anexo 1

### Mediciones con luz artificial y el panel fotovoltaico a utilizar.

Las siguientes mediciones fueron realizadas con la unidad SMU para la caracterización del panel fotovoltaico haciendo uso de la luz auxiliar 3M. En base a estos datos fueron generados los gráficos 5.1 y 5.2.

**Tabla 9-1** Mediciones con luz artificial y panel fotovoltaico a utilizar.

Tensión (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)
0.00	-46.71	0.00
0.09	-46.85	3.98
0.17	-46.76	7.95
0.25	-46.68	11.90
0.34	-46.59	15.84
0.42	-46.49	19.76
0.51	-46.37	23.65
0.60	-46.26	27.53
0.68	-46.15	31.39
0.77	-46.03	35.22
0.85	-45.92	39.03
0.94	-45.81	42.83
1.02	-45.69	46.61
1.11	-45.58	50.37
1.19	-45.46	54.10
1.28	-45.35	57.82
1.36	-45.23	61.51
1.45	-45.10	65.17
1.53	-44.97	68.80
1.62	-44.84	72.42
1.70	-44.70	76.00
1.79	-44.57	79.56
1.87	-44.44	83.10
1.96	-44.30	86.60
2.04	-44.16	90.09
2.13	-44.02	93.55
2.21	-43.88	96.98
2.30	-43.73	100.38
2.38	-43.60	103.76
2.47	-43.45	107.13
2.55	-43.31	110.44
2.64	-43.16	113.75
2.72	-43.01	117.00
2.81	-42.85	120.22
2.89	-42.77	123.61
2.98	-42.54	126.57
3.06	-42.38	129.70
3.15	-42.22	132.80
3.23	-42.06	135.87
3.32	-41.90	138.90
3.40	-41.72	141.85
3.49	-41.55	144.81
3.57	-41.37	147.71
3.66	-41.19	150.56
3.74	-41.00	153.37
3.83	-40.82	156.14
3.91	-40.63	158.86
4.00	-40.43	161.55
4.08	-40.24	164.19
4.17	-40.04	166.79
4.25	-39.84	169.32
4.34	-39.62	171.79
4.42	-39.42	174.23
4.51	-39.20	176.61
4.59	-38.97	178.90
4.68	-38.76	181.21
4.76	-38.53	183.43
4.85	-38.30	185.57
4.93	-38.06	187.63
5.02	-37.80	189.59
5.10	-37.55	191.53
5.19	-37.29	193.37
5.27	-37.02	195.12
5.36	-36.75	196.82
5.44	-36.47	198.40

5.53	-36.18	199.91
5.61	-35.88	201.30
5.70	-35.58	202.67
5.78	-35.27	203.88
5.87	-34.94	204.96
5.95	-34.61	205.93
6.04	-34.27	206.81
6.12	-33.90	207.50
6.21	-33.54	208.11
6.29	-33.14	208.46
6.38	-32.75	208.83
6.46	-32.36	209.05
6.55	-31.97	209.27
6.63	-31.64	209.77
6.72	-31.58	212.08
6.80	-31.39	213.50
6.89	-30.97	213.22
6.97	-30.47	212.36

7.06	-29.93	211.16
7.14	-29.32	209.34
7.23	-28.62	206.82
7.31	-27.84	203.51
7.40	-26.95	199.33
7.48	-25.91	193.85
7.57	-24.66	186.55
7.65	-23.35	178.66
7.74	-21.89	169.33
7.82	-20.23	158.21
7.91	-18.37	145.27
7.99	-16.32	130.40
8.08	-14.04	113.37
8.16	-11.54	94.14
8.25	-8.76	72.22
8.33	-5.76	48.00
8.42	-2.49	20.99
8.50	0.00	0.00

## 9.2 Anexo 2

### Mediciones con radiación real y el panel fotovoltaico utilizado.

Se muestran las mediciones realizadas con la unidad SMU para la caracterización del panel fotovoltaico haciendo uso de la luz solar para su excitación. En base a estos datos fueron generados los gráficos 6.41 y 6.5

**Tabla 9-2** Mediciones con radiación real y el panel fotovoltaico.

Tensión (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)
0.02	-66.51	1.13
0.11	-66.02	7.19
0.19	-65.97	12.78
0.26	-65.94	17.22
0.35	-65.87	22.80
0.43	-65.84	28.38
0.52	-65.76	33.94
0.60	-65.69	39.48
0.69	-65.61	45.01
0.77	-65.57	50.55
0.86	-65.49	56.05
0.94	-65.46	61.58
1.03	-65.40	67.09
1.11	-65.31	72.54
1.20	-65.21	77.98
1.28	-65.14	83.42
1.37	-65.03	88.82
1.45	-64.91	94.17
1.54	-64.80	99.52
1.62	-64.68	104.83
1.71	-64.59	110.17
1.79	-64.46	115.43
1.88	-64.38	120.75
1.96	-64.30	126.07
2.04	-64.94	132.47
2.12	-64.88	137.86
2.21	-64.83	143.26
2.29	-64.77	148.64
2.38	-64.68	153.94

2.47	-64.57	159.17
2.55	-64.50	164.47
2.64	-64.39	169.68
2.72	-64.32	174.94
2.81	-64.25	180.24
2.89	-64.15	185.38
2.98	-64.03	190.49
3.06	-63.91	195.55
3.15	-63.79	200.63
3.23	-63.65	205.58
3.32	-63.52	210.57
3.40	-63.39	215.53
3.49	-63.29	220.56
3.57	-63.17	225.52
3.66	-63.07	230.54
3.74	-62.96	235.46
3.83	-62.79	240.17
3.91	-62.59	244.75
4.00	-62.40	249.30
4.08	-62.21	253.80
4.17	-62.01	258.28
4.25	-61.83	262.78
4.34	-61.62	267.14
4.42	-61.41	271.43
4.51	-61.16	275.55
4.59	-60.93	279.67
4.68	-60.68	283.71
4.76	-60.43	287.63
4.85	-60.17	291.52
4.93	-59.88	295.21

5.02	-59.56	298.73
5.10	-59.24	302.15
5.19	-58.95	305.66
5.27	-58.62	308.95
5.36	-58.27	312.03
5.44	-57.87	314.84
5.53	-57.46	317.48
5.61	-57.06	320.12
5.70	-56.63	322.53
5.78	-56.18	324.70
5.87	-55.68	326.57
5.95	-55.15	328.17
6.04	-54.61	329.58
6.12	-54.04	330.74
6.21	-53.44	331.61
6.29	-52.80	332.10
6.38	-52.12	332.27
6.46	-51.38	331.95
6.55	-50.63	331.36
6.63	-49.78	330.08
6.72	-48.89	328.31

6.80	-47.91	325.79
6.89	-46.85	322.60
6.97	-45.72	318.65
7.06	-44.49	313.89
7.14	-43.18	308.33
7.23	-41.72	301.45
7.31	-40.12	293.32
7.40	-38.38	283.86
7.48	-36.50	273.02
7.57	-34.43	260.46
7.65	-32.19	246.26
7.74	-29.72	229.90
7.82	-27.02	211.32
7.91	-24.09	190.41
7.99	-20.90	166.99
8.08	-17.41	140.59
8.16	-13.64	111.34
8.25	-9.56	78.82
8.33	-5.21	43.40
8.42	-5.11	43.04
8.50	0.00	0.00