

## Diseño de Instrumentación para el Monitoreo de Instalaciones Solares Fotovoltaicas

### Instrumentation Design for Monitoring Solar Photovoltaic Installations

Edilberto Polanía Puentes<sup>1</sup>, Armando Losada Medina<sup>2</sup> y Félix Alejandro Sánchez<sup>3</sup>

#### Resumen

Este trabajo consiste en presentar el diseño y la implementación de un instrumento que ayude al diagnóstico de una instalación solar fotovoltaica y a la medición de las características atmosféricas que le afecten. El instrumento está compuesto por 3 elementos: la primera, es una estación que trabaja en exteriores y es alimentada con paneles solares, la segunda es una terminal, de interacción con el usuario donde se graban los datos, y por último un programa de administración, el cual permitirá el registro y visualización de los datos en un computador.

*Palabras clave:* Variables eléctricas; instalación solar fotovoltaica; panel solar; programa de administración.

#### Abstract

This work presents the design and implementation of an instrument to help the diagnosis and measuring of atmospheric variables that affects a photovoltaic solar installation. The instrument consist of three modules: the first, is a station that works in outdoors and powered with solar panels, the second is a terminal with data store where user operating the station, and the third is a manage software which allows register and display data in a PC

*Keywords:* Electrical variables; solar photovoltaic installation; solar panel; management software.

---

<sup>1</sup> Ingeniero Electrónico, Docente Universidad Surcolombiana - Neiva. Av. Pastrana - Carrera 1. edilberto.polania@usco.edu.co  
Director del Semillero de Energías Alternativas, SEA - USCO. sea.usco@gmail.com

<sup>2</sup> Ingeniero Electrónica, Universidad Surcolombiana - Neiva. Av. Pastrana - Carrera 1. armando\_los@hotmail.com  
Miembro del Semillero de Energías Alternativas, SEA - USCO.

<sup>3</sup> Ingeniero Electrónica, Universidad Surcolombiana - Neiva. Av. Pastrana - Carrera 1. felixalejandrosb@gmail.com  
Miembro del Semillero de Energías Alternativas, SEA - USCO.

## 1. Introducción

En los inicios del semillero de Energías Alternativas de la Universidad Surcolombiana, SEA-USCO, éste se propuso realizar diferentes investigaciones que le permitiera registrar y aprovechar los recursos naturales que goza el departamento del Huila, mediante una búsqueda de información relacionada con mapas de radiación solar, encontró que los datos proporcionados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, resultaron ser insuficientes para los propósitos del semillero, específicamente las investigaciones relacionadas con la energía solar fotovoltaica, a la vez que los datos suministrados se han calculado con base en otras variables indirectas al sol (IDEAM, 2004).

El curso normal de las diferentes propuestas investigativas fue interrumpido debido a la carencia de datos meteorológicos específicos para realizar estudios de eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en zonas determinadas del departamento del Huila, por lo que se planteó la necesidad de obtener una base de datos que agrupe las variables climáticas pertinentes en el correcto funcionamiento de estos sistemas, tomando como ejemplo diferentes iniciativas y proyectos realizados a nivel mundial, como la actividad realizada en el año 2008 en Chile llamada "Midiendo la Radiación en mi País", proyecto llevado a cabo por el Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile (-Profísica-), el Observatorio Europeo Austral (-ESO-), el Núcleo Milenio de Magnetismo Básico y Aplicado, y el Programa EXPLORA CONICYT (Universidad de Santiago de Chile, 2008).

El empleo de un instrumento de medición meteorológica resultará imprescindible para la labor de realizar un mapa de radiación solar de la ciudad de Neiva y posteriormente de la región del Huila, por lo que el semillero toma la decisión de empezar el proyecto con el nombre código de UDADAS (Unidad De Adquisición de Datos Atmosféricos y Solares), descartando la adquisición de un instrumento comercial por su elevado costo, ausencia de mediciones de variables eléctricas, dudosa garantía de funcionamiento y necesidades específica de la región.

El diseño del instrumento permitirá no solo ser utilizado en procesos académicos o investigativos, sino que su diseño permite ser empleado en estudios de prefactibilidad, los cuales determinarán qué región es adecuada para la realización de instalaciones solares, además de proveer datos para el mantenimiento preventivo y correctivo de las mismas.

Esto evitaría la construcción de instalaciones de forma empírica otorgando los estudios necesarios que permita predecir y resolver problemas para la implementación de este tipo de proyectos, registrando en dichos sistemas sus valores para evitar que trabajen fuera de sus parámetros nominales, lo cual aceleraría su deterioro causando el acortamiento de la vida útil del sistema, pérdidas económicas y una mala imagen por parte de los inversionistas sobre dichas tecnologías de energías alternativas; la ausencia de un elemento que monitoree un sistema instalado, generalmente se debe a que estos dispositivos incrementan los costos a la hora de realizar una instalación, lo cual se pretende solucionar al ofrecer un instrumento amigable con presupuestos reducidos.

## 2. Metodología, Diseño y Fabricación.

El propósito de este proyecto fue elaborar un dispositivo capaz de medir y registrar variables climatológicas y eléctricas provenientes de las instalaciones solares fotovoltaicas (Letraherido, 2009), por lo que fue necesario determinar una serie de pasos a seguir para concluir con éxito el proyecto, dentro de los cuales se destaca el estudio de las variables físicas que interactúan positiva o negativamente sobre una instalación fotovoltaica solar, como la radiación solar global y reflejada (PMOD/WRC, 2012), humedad relativa, temperatura ambiente y de la superficie del panel.

La radiación solar se mide con diferentes instrumentos como el pirheliómetro y el piranómetro (AEMET, 2010), afecta positivamente la instalación pues es la fuente directa de energía que se obtiene de los paneles solares, por lo que se deduce que entre mayor radiación haya en la zona donde se encuentre la instalación, habrá una mejor producción de energía para diferentes usos.

La humedad relativa y la temperatura ambiente afectan negativamente la vida útil y el rendimiento de un panel solar (UNIA, 2011). La humedad presente en el ambiente puede introducirse dentro del panel deteriorando el material semiconductor del mismo acortando la vida útil del panel. Una alta temperatura altera la producción de energía en esta tecnología ya que por su naturaleza semiconductor, al calentarse disminuye la liberación de corriente reduciendo su eficiencia, lo cual puede resultar inconveniente en algunas regiones del país donde la alta radiación solar viene asociada inexorablemente con ambientes de alta temperatura. Para este proyecto no se tuvieron en cuenta otros factores como el viento y las partículas perjudiciales que éste podría arrastrar a la zona de la instalación.

Se añadió la medición las variables eléctricas como voltaje, corriente y potencia eléctrica producidas por todo el sistema fotovoltaico (Argañaraz, 2003). La determinación de la cantidad de energía producida es una variable necesaria para asegurar la vida útil de los mismos y empleada como elemento de garantía del éxito de una instalación solar fotovoltaica, pues permitiría concluir si dicha instalación está operando correctamente o se encuentra por debajo de las cotas de producción que se esperaban al momento en que se realizaron los diseños y estudios de prefactibilidad.

El diagrama de bloques (Figura 1) del instrumento permite observar generalmente qué circuitos serán necesarios para el desarrollo del proyecto.

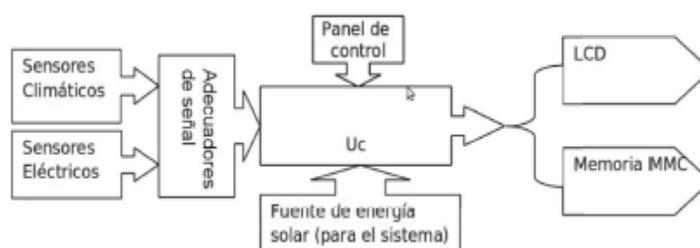


Fig. 1. Diagramas de bloques del instrumento

No obstante, el instrumento se compone de dos unidades físicas llamadas Módulo Estación y Módulo Administrador (Figura 2), donde la primera unidad es la estación meteorológica y medidor de variables eléctricas en sí, mientras que la segunda unidad es la herramienta donde el usuario controlará la operación de la Estación a su vez que almacena y visualiza los datos provenientes de la misma. Ambos Módulos pueden comunicarse de forma alámbrica (Cable telefónico cobre 4 hilos con conector RJ11) o inalámbrica (Zigbee Xbee-PRO S1) según las necesidades del usuario que use el instrumento, ambas formas no pueden emplearse al mismo tiempo pues al momento de realizar la implementación de los circuitos no se tenía a disposición el componente Zigbee por lo que la comunicación se hizo temporalmente por cable, hasta que adquirió dicho componente y se preparó el circuito para la comunicación inalámbrica sin retirar el anterior medio de comunicación

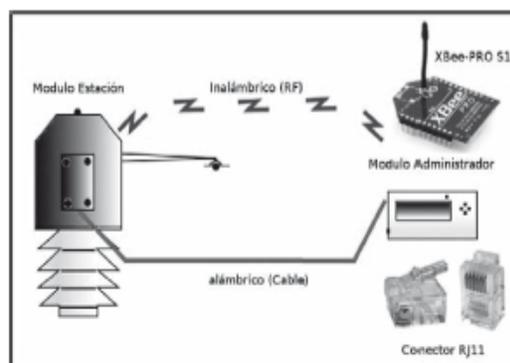


Fig. 2. Unidades físicas del instrumento y medios de comunicación

El siguiente paso fue el diseño de la electrónica necesaria para la captura de las señales medidas, teniendo como objetivo desarrollar una circuitería robusta que garantice un margen de precisión necesaria para asegurar la fidelidad del funcionamiento del instrumento, no solo en la sensorica del mismo sino en la electrónica de potencia (Rashid, 1995) donde el instrumento será conectado a la instalación solar fotovoltaica, el cual debe soportar la potencia y poseer protecciones al momento de realizar la conexión eléctrica. Se tuvo en cuenta que el equipo no podría depender de la red eléctrica convencional para su funcionamiento, pues se esperaba que este equipo puede ser instalado en zonas que carecen de este servicio público, por lo que se diseñó una fuente de energía eléctrica que aproveche la energía solar de un pequeño sistema fotovoltaico para alimentar dicho instrumento. Su diseño permite el abandono por parte del operario del mismo al momento de realizar las medidas, pues resiste agrestes condiciones medioambientales y posee una gran capacidad de almacenamiento de datos, lo cual ahorra en costos de mantenimiento y visitas periódicas regulares para la toma de los mismos. El núcleo del anterior módulo reside en unidades microcontroladas que dirigen distintos bloques principales, los cuales destacan la unidad sensorica y la unidad de comunicación alámbrica/inalámbrica con el Administrador.

En cuanto al módulo Administrador, destaca la unidad de Gestión de la Memoria MMC SD CARD, la unidad de microprocesamiento, visualización, comunicación Alámbrica/Inalámbrica con la Estación y la unidad de comunicación USB. Fué elevada la dificultad al momento de implementar la unidad de Gestión de la Memoria MMC SD CARD no solo al gran número de requisitos técnicos (SanDisk, 2004) a tener en cuenta para operar un medio de almacenamiento de este tipo, como el tipo de tarjeta, capacidad y velocidad, sino a la baja tensión que requería para trabajar, la cual era diferente al voltaje nominal del resto de circuitos por lo que fue necesario realizar una adaptación del voltaje y tener presente que esta modificación no afectara la implementación del protocolo de comunicación de la tarjeta de memoria (ChaN, 2010).

Como herramientas de desarrollo del diseño electrónico se emplearon el simulador electrónico Proteus y el compilador en lenguaje C para microcontroladores CSS PICC, dada las capacidades que tiene estos programas en cuanto al desarrollo y simulación de circuitos microcontrolados (García, 2008).

La interacción con el usuario es vital para realizar análisis a los datos obtenidos y poder emplearlos en determinados usos, por lo que siempre se buscó el método más adecuado para la recepción de los datos generados por el instrumento junto con el software necesario para visualizarlos en un ordenador, prefiriendo el empleo de herramientas libres, como el IDE QT Creator, LibUSB y complementos creados por otros desarrolladores de software, que contribuyan al ambiente académico sin olvidar los beneficios de las herramientas licenciadas.

### 3. Resultados.

La apariencia física (Figura 3) del módulo Estación es voluminosa, con un cuerpo conformado por dos partes diferenciadas por el color. En la sección blanca reside el sensor de humedad relativa y temperatura ambiente, dentro de un circuito de refrigeración forzosa provisto por un ventilador; el color blanco se usa para reflejar la mayor cantidad de radiación posible, evitando que altere las medidas obtenidas por el sensor anteriormente mencionado. En la sección negra reside los demás circuitos de este módulo, destacándose los sensores de radiación, el sensor de temperatura interna, la cajilla de conexión al circuito de la instalación fotovoltaica, la batería de energización en situaciones de emergencia, entre otros. Los sensores de radiación solar necesitan absorber la mayor cantidad de radiación posible, por lo que esta sección del módulo esta pintada de negro.



Fig. 3. Vista exterior del módulo Estación y sus sensores.

El módulo Administrador tiene una apariencia física compacta y portátil (Figura 4), destaca el chasis transparente del módulo con el fin de poder observar los componentes internos.



Fig.4. Vista exterior del módulo Administrador.

Los módulos Estación (Tabla 1) y Administrador (Tabla 2) poseen sus propias especificaciones técnicas, que muestran las capacidades del instrumento y algunas características que son imprescindibles para la adecuada operación del mismo.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del módulo Estación

AUTONOMÍA ACTIVO	26 HORAS
AUTONOMÍA DORMIDO	66 HORAS
VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN EXT	15-30 VDC
CORRIENTE DE ALIMENTACIÓN EXT	1-2 ADC
VOLTAJE DE MEDICIÓN MAX	200 VDC
CORRIENTE DE MEDICIÓN MAX	60 ADC
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	0-80 °C
SENSOR DE RADIACIÓN SOLAR G MAX	2000W/m <sup>2</sup>
SENSOR DE RADIACIÓN SOLAR R MAX	1300W/m <sup>2</sup>
BATERÍA	12 VDC/4 AH
OPERA A LA INTEMPERIE	SI

Tabla 2. Especificaciones técnicas del módulo Administrador

VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN EXT	15 VDC
CORRIENTE DE ALIMENTACIÓN EXT	1 ADC
CONEXIÓN PC	USB
TIPO Y CAPACIDAD DE MEMORIA	MMC/SD CARD 2GB
BATERÍA	2X9VDC
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	20-50 °C
OPERA A LA INTEMPERIE	NO

La instalación y realización de las pruebas inició en el mes de Junio del 2012, el cual el módulo Estación fue energizado con dos paneles solares de pequeña potencia (30Wp). Este fue instalado sobre el techo de la residencia de uno de los investigadores en la ciudad de Neiva (Figura 5).



Fig. 5. Módulo Estación operando, SEA-USCO

Estas pruebas se realizaron para verificar la fidelidad y estabilidad del sistema, el cual quedó demostrado en los registros de los datos almacenados, 77 días aproximadamente de continuo funcionamiento y con un muestreo de cada 10 segundos. Las graficas obtenidas se agrupan en variables comunes como la grafica de las radiaciones global y reflejada (Figura 6) donde se aprecia los cambios entre el día y la noche, graficas del punto de rocío, humedad relativa y voltaje de la batería (Figura 7) y graficas de las diferentes temperaturas (Figura 8) que el instrumento puede registrar. Todas las graficas corresponden a las medidas obtenidas durante de los primeros dos días de funcionamiento del sistema 11 y 12 de Junio 2012.

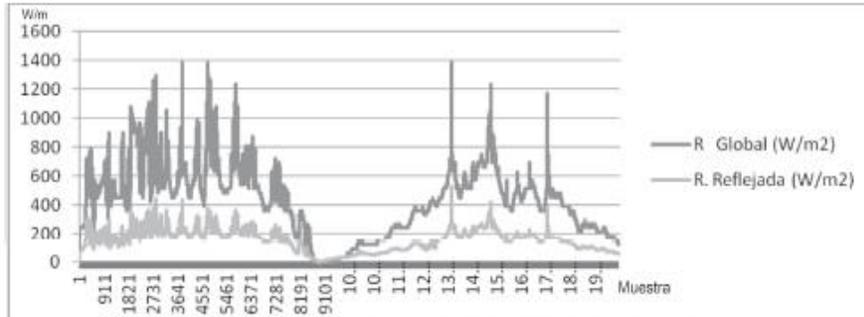


Fig. 6. Graficas de Radiación solar global y reflejada VS número de muestras.

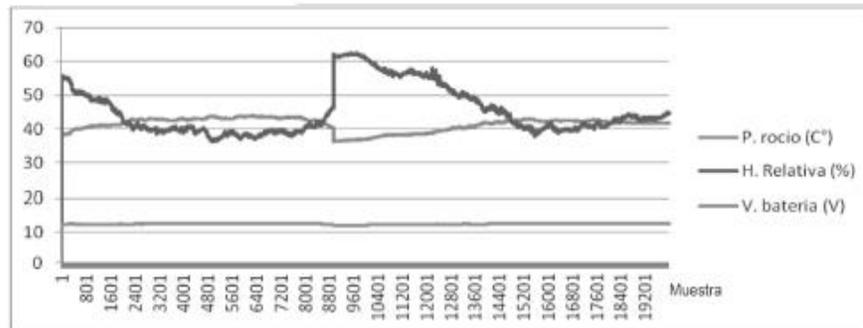


Fig. 7. Graficas del punto de rocío, humedad relativa y voltaje de batería VS número de muestras.

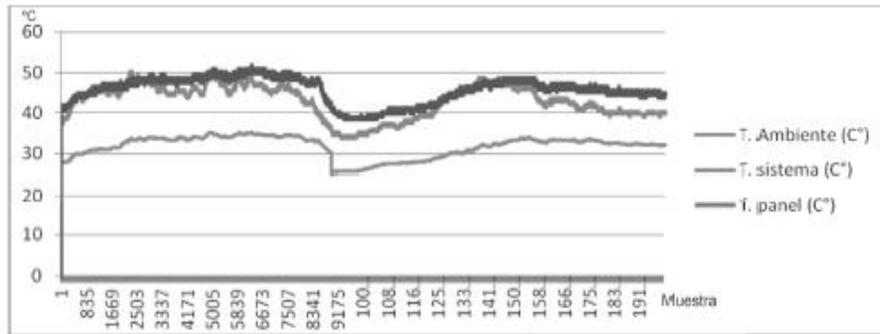


Fig. 8. Graficas de la temperatura ambiente, del sistema y del panel solar VS número de muestras.

Se llevó a cabo un contraste de los datos del instrumento UDADAS con los datos proporcionados por el instrumento meteorológico Davis (Figura 9), ubicado en las instalaciones del Tecnoparque Nodo Neiva (SENA – Regional Huila) para corroborar la precisión obtenida, mediante pruebas realizadas en ambientes abiertos y cerrados durante el transcurso de la realización del proyecto, enfocándose durante el periodo de tiempo que el instrumento UDADAS fue puesto a prueba a la intemperie.



Fig. 9. Estación meteorológica Davis, durante las pruebas en ambiente cerrado.

Los datos obtenidos por el instrumento Davis no fueron uniformes en cuanto a la cantidad de días registrados, debido a problemas en el fluido eléctrico que energiza el controlador portátil e inconvenientes internos en el Tecnoparque, sin embargo, los datos obtenidos son suficientes para afirmar que el instrumento UDADAS es preciso. Es necesario resaltar las diferencias entre las escalas, las horas del día y el formato de representación, lo que aparentan diferencias en las muestras representativas de la radiación solar directa tomadas durante los días 11,12 y 13 de junio del 2012 (Figura 10).

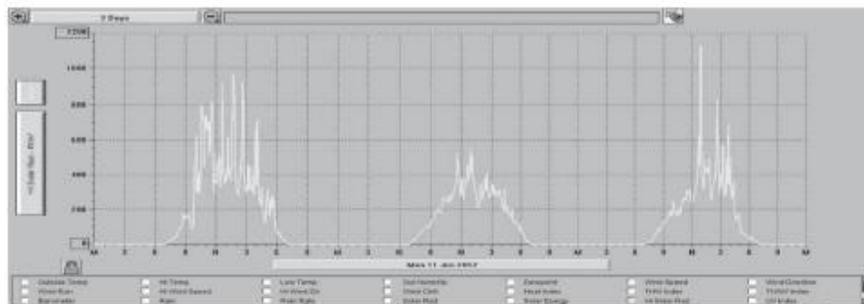


Fig. 10. Grafica de radiación solar directa provista por la Estación Davis

El programa en Labview (Figura 11) fue realizado únicamente con propósitos de verificación del funcionamiento del software, sin embargo, ofrece un ambiente completamente operativo para el usuario que desea controlar la estación. La elaboración del programa fué sencilla respecto a la interfaz gráfica y algunos de los bloques constructivos del programa, pues labview ya ofrece una serie de herramientas que facilitan la programación gráfica por parte del diseñador. No se puede decir lo mismo del bloque USB el cual fue complicado de realizar, pues el bloque USB que ofrece Labview por defecto, no solucionaba nuestras necesidades específicas de comunicación, por lo que se realizaron ajustes personalizados empleando este bloque básico en un conjunto de funciones para suplir nuestras necesidades comunicativas.

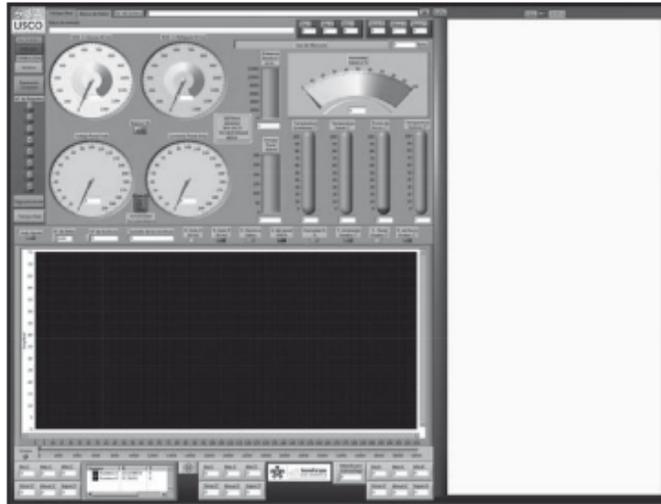


Fig. 11. Programa Estación, panel frontal desarrollado en Labview

El programa en lenguaje C++ se desarrolla en el IDE Qt Creator (Figura 12) el cual destaca la rapidez con que se realiza la comunicación USB y la facilidad para usar la Librería LibUSB, permitiendo al programa comunicarse con la Estación en el sistema operativo GNU/Linux junto con la elaboración de una sección de diagnóstico que permite detectar cualquier problema ocurrido en la comunicación USB. En contraste con el programa anterior, fué complicada la realización de la interfaz gráfica y el aprendizaje de los distintos complementos usados para ofrecer una adecuada visualización al usuario, lo que ha causado que el programa permanezca en una fase de desarrollo permanente hasta lograr una versión académica estable, pues el programa solo visualiza los datos en modo Texto y modo gráfico instantáneo mas no en un modo que se asemeje al Osciloscopio.

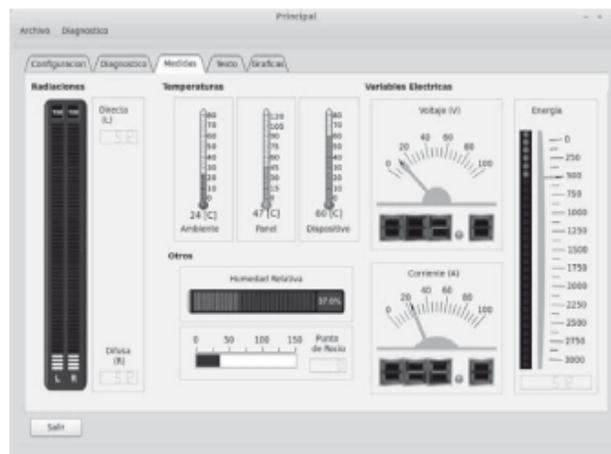


Fig. 12. Programa Estación desarrollada en QtCreator 2.4.1

#### 4. Conclusiones

El desarrollo de los sensores representó un gran reto debido a la poca información disponible, por lo que fue necesario recurrir a la ingeniería inversa y a métodos experimentales de ensayo y error, los cuales arrojaron un diseño de un circuito que permitiera cuantificar eléctricamente la radiación solar, lo que demuestra que Colombia está en la capacidad de desarrollar sus propios dispositivos que pueden ser implementados para solucionar problemas complejos adaptados a las necesidades específicas del país; las demás variables fueron obtenidas con sensores existentes en el mercado electrónico sin realizar profundos procesos de adaptación por lo que no se mencionan junto a la radiación solar.

El muestreo del sistema completo puede llevar a un nuevo nivel el estudio de la meteorología, impulsado por el poder de cómputo de los ordenadores actuales y a los registros anuales con un muestreo muy pequeño para observar con más precisión las variaciones del clima.

El software en Labview obtuvo un bajo rendimiento en cuanto a la captura y procesamiento de datos de la estación. Es probable que la causa radique en lo limitado del código obtenido en Labview, el cual siempre se ajustará a los requerimientos de los creadores de este programa, además el código cerrado de algunos bloques de Labview impidió realizar modificaciones profundas para obtener un mejor rendimiento. Esto no demuestra que el software de Labview sea un producto inferior, simplemente demuestra que no satisface las necesidades específicas del proyecto y que es necesario usar hardware fabricado por National Instruments para obtener el mejor rendimiento con el software de Labview, con lo cual restringe o facilita el empleo de este producto según las necesidades de cada usuario.

El código fuente de cada programa fue una tarea compleja de realizar, mientras en Labview la interfaz gráfica y visualización fue fácil de realizar en contraste con la dificultad de instalar y configurar la interfaz gráfica en QT4, fue sencillo trabajar la librería USB en QT4 en alto contraste con la realización de este bloque constructivo empleado en Labview, el cual fue casi diseñado desde cero al encontrar bastante limitado el bloque USB que viene por defecto en este programa.

El software libre es la mejor opción para ambientes educativos donde se puede aprovechar su máximo potencial en la elaboración de proyectos de microelectrónica con interfaz para equipos de cómputo y que estén limitados por los costos o cuestiones legales de las licencias privativas. No se duda en ningún momento de las grandes prestaciones de los programas privativos, que en el campo de la ingeniería electrónica superan ampliamente al software libre, sin embargo, se pretende dar a conocer diferentes opciones en la creación de herramientas y soluciones que no impidan el desarrollo y ejecución final de un proyecto de grado además de resaltar los aportes que los estudiantes podrían hacer al software libre.

#### 5. Referencias Bibliográficas

1. Agencia Estatal de Meteorología, AEMET, 2010. [online]. Propiedad intelectual regulada en su artículo 10 del Real Decreto Legislativo 1/1.996 de 12 de abril de España (Ley de Propiedad Intelectual) URL:[[http://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/observacion/radiacion/Radiacion\\_Solar.pdf](http://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf)].
2. Argañaraz José Hugo. Universidad Nacional del Sur - departamento de ingeniería eléctrica y de computadora (Argentina). [online]. 2003. URL:[<http://www.ingelec.uns.edu.ar/lmei2773/docs/LME1-NC14-Medidas-Medicion%20de%20P-E-FP.PDF>].
3. ChaN, 2010. ELECTRONIC LIVES Manufacturing (Japon). [online]. Update: November 3., Copyright ©1997-2012. URL:[ [http://elm-chan.org/docs/mmc/mmc\\_e.html](http://elm-chan.org/docs/mmc/mmc_e.html)].
4. García Breijo, Eduardo, 2008. Compilador C CCS y simulador Proteus para Microcontroladores PIC Primera edición MARCOMBO, S.A. ISBN 9788426714954, pp 260.
5. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, 2004. ATLAS DE RADIACION Solar de Colombia, pp 22.
6. Letraherido. venator libris loci. [online]. Actualizado el 28/12/2009. URL:[<http://www.letraherido.com/13060305olytierra.htm>].
7. Physikalisches-Meteorologisches Observatorium Davos/ World Radiation Center (PMOD/WRC)(Suiza). [online]. Last updated 31.08.2012. URL:[<http://www.pmodwrc.ch/>].

8. Universidad de Santiago. Programa de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile.. [online]. 26 de Mayo de 2008 20:00. URL:[[http://www.explora.cl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1125:escolares-construyen-mapa-de-la-radiacion-solar-en-chile&catid=58:ano-2008](http://www.explora.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=1125:escolares-construyen-mapa-de-la-radiacion-solar-en-chile&catid=58:ano-2008)]
9. Rashid, Muhammad H, 1995. Electrónica de potencia Circuitos, dispositivos y aplicaciones segunda edición. Prentice Hall Hispanoamérica, S.A., IEEE. pp 721.
10. SanDisk Corporation, 2004. MANUAL TÉCNICO SanDisk SD Card Product Manual. Versión 2.2. pp 123.
11. Universidad Internacional de Andalucía, UNIA, 2011. [online] (España). Esta obra se publica bajo una licencia Creative Commons License. OpenCourseWare-UNIA. Unidad 6. Funcionamiento del módulo fotovoltaico en el campo. URL:[<http://ocw.unia.es/ciencias-de-la-ingenieria/tecnologia-de-celulas-y-modulos-fotovoltaicos/Materiales/unidad-6>].