

# PAQUETE TECNOLÓGICO PARA EL MONITOREO AMBIENTAL EN INVERNADEROS CON EL USO DE HARDWARE Y SOFTWARE LIBRE

## Technological Package for Monitoring Greenhouse Environment Using Open Hardware and Software

Oziel Lugo Espinosa<sup>1</sup>, Gerardo Alexis Villavicencio Pérez<sup>1</sup> y Samantha Aurora Díaz Luna<sup>2</sup>

### RESUMEN

El monitoreo ambiental en invernaderos, en particular en México, representa un alto costo de inversión para su adopción, por lo que en ocasiones, el productor opta por omitir esta infraestructura tecnológica. Esta condición suprime las ventajas del monitoreo y control climático del invernadero, lo cual repercute en la cantidad y calidad de la producción. En el presente trabajo se presenta el desarrollo de un paquete tecnológico de bajo costo para el monitoreo ambiental de invernaderos. El paquete se basa en el uso de software y hardware libres y considera la construcción y adaptación de sensores para medir las variables climatológicas dentro y fuera de un invernadero, la construcción y adaptación de interfaces electrónicas para capturar los valores de los sensores y el desarrollo de software para la interpretación de los datos. Como plataformas de software y hardware libres se utilizaron Java y Arduino, respectivamente. Se comparó los sensores desarrollados contra sensores comerciales en condiciones climatológicas iguales y se obtuvo los mismos datos con una diferencia notable en el tiempo de reacción de los sensores desarrollados debido al mayor peso por los materiales utilizados en su construcción.

**Palabras clave:** *agrometeorología, automatización de invernadero, arduino, java.*

<sup>1</sup> Centro Universitario UAEM Texcoco. Av. Jardín Zumpango s/n, Fracc. El Tejocote. 56259 Texcoco, México.

\* Autor responsable (ozieluz@hotmail.com)

<sup>2</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

Recibido: agosto de 2013. Aceptado: noviembre de 2013.  
Publicado como nota de investigación en  
Terra Latinoamericana 32: 77-84.

### SUMMARY

Monitoring greenhouse environments in Mexico has high investment costs and, for its adoption, producers often choose to omit this technological infrastructure and, thus, do not benefit from the advantages of climate monitoring and control, which affect production quantity and quality. This paper presents the development of a package of low-cost technology for monitoring greenhouse environment. The package is based on the use of free software and hardware and considers the construction and adaptation of sensors for measuring meteorological variables inside and outside a greenhouse, the construction and adaptation of electronic interfaces to capture sensors readings and the development of software for interpreting data. Java and Arduino were used as free software and hardware platforms, respectively. Sensors were compared against commercial sensors developed in the same climatic conditions, and the same data were obtained. However, there was a notable difference in the action time of the sensor developed due to the weight increased by materials used in its construction.

**Index words:** *agrometeorology, greenhouse automation, arduino, java.*

### INTRODUCCIÓN

La automatización en invernaderos en México se traduce en la compra de tecnología extranjera cuyo costo es elevado para el promedio de los productores del país, por lo que la mayoría de estas personas optan por invertir en la infraestructura propia del mismo pero dejan a un lado el uso de la tecnología para monitorear y controlar el clima dentro del invernadero, esto genera como resultado una menor cantidad y calidad de la producción a la esperada. La tecnología para

controlar y monitorear un invernadero se basa en el uso de sensores, en algunos casos es necesario la utilización de un software especializado para interpretar y almacenar las señales del sensor, cabe destacar que el costo de las licencias de software para operar los programas también es elevado.

Según la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2010) la agricultura protegida (AP) es un sistema de producción realizado bajo diversas estructuras para proteger cultivos al minimizar las restricciones y efectos que imponen los fenómenos climáticos; este sistema tiene como característica básica la protección contra los riesgos inherentes de la producción agrícola al aire libre. La producción de cultivos en invernaderos es una forma de producción que va en aumento dado que se cuenta con la ventaja de establecer una valla de separación entre el cultivo y el ambiente externo. Los modelos de invernaderos, sustratos para hidroponía, soluciones nutritivas, labores culturales y sistemas de control automático del extranjero se han aplicado en México, aún cuando no siempre son las soluciones más adecuadas a las condiciones nacionales. En el campo de la automatización se ha generado también una dependencia tecnológica por el nulo desarrollo de equipos nacionales. Si bien es cierto que la gran mayoría de los invernaderos mexicanos carecen de sistemas de control automático, también es cierto que la tendencia es a incrementar su uso, por los beneficios que estos representan en el sistema de producción.

Arduino es una plataforma denominada open hardware que reúne en una pequeña placa de circuito impreso (PCB) los componentes necesarios para conectarse con el mundo exterior y hacer funcionar un microcontrolador Atmega. Actualmente hay varios modelos de sistemas Arduino que van cambiando de microcontrolador, siendo los primeros el Atmega8 y el Atmega168. Al ser Open-Hardware, tanto su diseño como su distribución son libres, es decir, puede utilizarse sin inconvenientes para desarrollar cualquier tipo de proyecto sin tener que adquirir ningún tipo de licencia. Esta plataforma es el dispositivo electrónico que se encarga de recolectar las lecturas de los sensores (que se describen a continuación), así como de procesar los datos, enviarlos a una salida de visualización predeterminada y tomar acciones de control si así se requiere. Cabe destacar que es

posible manejar señales analógicas y digitales. La posibilidad de integrar sensores digitales y analógicos, hace posible la construcción de sensores propios o adaptación de otros para obtener resultados comparables a sensores comerciales pero a un costo menor, con calidad y con la capacidad de calibración de acuerdo a las condiciones locales.

En el presente trabajo se describe un paquete tecnológico de bajo costo con materiales disponibles en el mercado nacional; este paquete contempla la construcción de sensores propios, adaptación de sensores comerciales para la lectura de datos, despliegue de información en una pantalla LCD genérica y el desarrollo de software para la interpretación de datos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sensores Fuera del Invernadero (Dirección y Velocidad del Viento)

Arduino integra su propia interfaz de desarrollo para la programación del microcontrolador, la compilación del programa y la transferencia del código hacia el microchip. El código fuente para la lectura de los sensores y el despliegue de información a través de una pantalla LCD, se encuentran disponibles en el sitio web <http://paquetetecnologico.freeiz.com>.

Un sensor es un dispositivo que produce una señal en respuesta a una detección o medida de una propiedad (Kalpakjian y Schmid, 2002), como por ejemplo, velocidad y posición, que presentan sensor de detección de velocidad (anemómetro) y de dirección (veleta).

En el presente trabajo la veleta que se construyó es un sensor, que consta de una placa plana vertical de lámina, unida a un rodamiento de bicicleta que permite girar de manera libre y con un señalador que marca la dirección del viento. En la parte electrónica del dispositivo, se utilizó la adaptación de 8 sensores magnéticos de efecto Hall de tipo analógico con número de componente UGN3503, todos éstos montados en una placa fenólica que permite la conexión entre ellos. El procedimiento para el desarrollo del circuito se basa en la metodología que señala Pareja (2009), la cual involucra el uso del software PCB Wizard para el diseño de las pistas que interconectan cada componente electrónico

y para la transferencia del diseño, generado en la computadora, a la placa fenólica.

El anemómetro al igual que la veleta, hace uso del mismo tipo de material para la construcción de su estructura, pero en este dispositivo, la parte central del mecanismo está dada por el uso de tres cazoletas que permiten la captura del aire y su posterior giro del dispositivo. La parte electrónica consta de un sólo sensor de efecto Hall de tipo digital con número de componente DN6851A, este sensor está montado sobre una placa fenólica.

### Sensores Dentro del Invernadero (Luz, Humedad Relativa y Temperatura)

Para determinar la luz incidente dentro del invernadero se utilizó una adaptación simple de una fotorresistencia que tiene como número de componente 9P5-1L, este elemento es de tipo analógico. Cuando se añade suficiente energía, por cualquier medio, a un material, los electrones de valencia escapan de sus átomos y se convierten en electrones libres. Por definición, un hueco es la ausencia de un electrón; por lo tanto, por cada electrón libre que se crea, se crea también un hueco libre. La energía necesaria para ello es del orden de entre 0.2 y 3 eV, dependiendo del material (Cuadro 1), por lo tanto, una radiación de longitud de onda entre 400 y 6000 nm es adecuada. Este fenómeno es la base del funcionamiento de todos los fotoconductores de una

**Cuadro 1. Intervalo de energía óptica para varios materiales fotodetectores.**

Elemento	Símbolo	Intervalo de energía a 300 K, en eV
Sulfuro de cadmio	CdS	2.4
Fosfuro de galio	GaP	2.2
Seleniuro de cadmio	CdSe	1.7
Arseniuro de galio	GaAs	1.4
Silicio	Si	1.1
Germanio	Ge	0.7
Arseniuro de indio	InAs	0.43
Sulfuro de plomo	PbS	0.37
Telururo de plomo	PbTe	0.29
Seleniuro de plomo	PbSe	0.26
Antimoniuro de indio	InSb	0.23

Fuente: [http://www.itlalaguna.edu.mx/Academico/Carreras/electronica/opteca/OPTOPDF2\\_archivos/UNIDAD2TEMA1.pdf](http://www.itlalaguna.edu.mx/Academico/Carreras/electronica/opteca/OPTOPDF2_archivos/UNIDAD2TEMA1.pdf).

pieza. En agrometeorología, en vez del flujo luminoso o potencia luminosa percibida (por el ojo humano), lo que interesa es el flujo radiante como irradiancia ( $Wm^{-2}$ ), ya sea de todo el espectro electromagnético desde el punto de vista del balance de energía, o bien, de la parte del espectro correspondiente a la radiación fotosintéticamente activa PAR (400-700 nm) desde el punto de vista del aprovechamiento de la luz por las plantas.

Para medir la humedad y temperatura existen diferentes alternativas de bajo costo disponibles en el mercado, se eligió el sensor con número de componente HMZ-433A1; tanto el sensor de temperatura como el sensor de humedad se localizan montados en una sola placa con resistencias y elementos electrónicos necesarios para obtener el dato requerido de manera directa.

Los datos que se obtienen de estos sensores tienen que ser procesados, en este caso por la plataforma Arduino para poder tener datos significativos para el usuario, por lo que es necesario aplicar a los datos obtenidos por los sensores, las siguientes fórmulas de acuerdo al fabricante DFRobot (<http://www.dfrobot.com/index.php>):

$$Humedad = \frac{X * 5}{\frac{3.3}{10.2}}$$

$$Val = 1024 - X$$

$$R = \frac{54 * Val}{1024 - Val}$$

$$\ln R = \log (R)$$

$$\ln R^2 = \log (\ln R)^3$$

$$Temperatura = \frac{1}{(0.00237531) + (0.00024632 * \ln R) + (0.00000028 * \ln R^2)} - 273$$

donde: X es el valor obtenido por el sensor y Val representa el valor entero máximo que tiene un puerto analógico con una resolución de 10 bits, esto significa que se convertirá tensiones de voltaje entre 0 y 5 voltios a un número entero entre 0 y 1024.

## Despliegue de Información

Los materiales necesarios para la visualización de datos son: una pantalla LCD genérica con conector RCA (cuya función principal es la transferencia de datos de video desde Arduino a la pantalla), cinco interruptores que tienen como destino el despliegue de cada uno de los valores de los sensores. Para la parte correspondiente al circuito electrónico se utilizan una serie de resistencias eléctricas con distintos valores (1K OHM y 470 OHM), cada una de ellas montadas a una placa fenólica.

El código fuente necesario para Arduino utiliza librerías extras, en este caso TvOut cuyo objetivo es el de crear video compuesto en el micro controlador Atmega2560, esta librería cuenta con salidas en formato PAL y NTSC con una resolución de 128 96 por defecto; la versión más reciente es la TvOut-Beta1.0. Como complemento de TvOut se utiliza otra librería llamada TvOut-fonts, que controla los tipos de fuentes (tipos de letras), además de que disminuye el uso de memoria en Arduino. Ambas librerías se encuentran disponibles desde diciembre del 2010 en la página oficial (<https://code.google.com/p/arduino-tvout/downloads/list>).

## Software para el Procesamiento de Datos

Este programa computacional forma parte del paquete tecnológico y se creó en el lenguaje de programación Java utilizando el entorno de desarrollo integrado libre NetBeans IDE, el cual se puede descargar de su página oficial de forma gratuita (<https://netbeans.org/>), así mismo es necesario instalar previamente en el equipo de cómputo el JDK (Java Development Kit) disponible desde la página oficial (<http://www.oracle.com/technetwork/es/java/javase/downloads>).

Para crear las gráficas con los datos de los sensores, se usa la librería JFreeChart que puede ser descargada de la página ([www.jfree.org/jfreechart](http://www.jfree.org/jfreechart)), ésta facilita la creación de gráficas de calidad profesional. Entre las principales características que posee esta librería es la capacidad de poder exportar las gráficas generadas a formatos de imagen como PNG y JPG. También se utiliza la librería POI (<http://poi.apache.org/download.html>) cuya función es la de permitir la visualización y exportación de los datos en

un formato de archivo Excel, lo que facilita al usuario el manejo de la información y procesos de información posteriores. Se cuenta con una memoria de tipo MicroSD genérica que almacena el archivo con cada uno de los datos que se generan por los sensores, este archivo se crea por medio de la plataforma Arduino haciendo uso del Shield Ethernet (placas o aditamentos que pueden ser conectadas encima de la placa Arduino extendiendo sus capacidades) y que incluye una ranura para memorias MicroSD.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema compuesto por los sensores desarrollados, Arduino como componente electrónico de interface entre la computadora y los sensores, el software con base en la plataforma Java para la interpretación de los datos y la pantalla LCD como alternativa de bajo costo para la representación visual de la información, genera una solución de bajo costo para crear procesos de automatización dentro de los invernaderos que ayuda a la toma de decisiones en beneficio de la cantidad y calidad de la producción. La Figura 1, muestra los componentes utilizados y su interconexión.

La construcción del software se basó en el enfoque Rapid Application Development (RAD) con el objetivo de construir un producto de alta calidad (Leffingwell, 2007). El uso del modelo de desarrollo rápido de aplicaciones RAD permite cambios al proyecto en tiempos cortos de desarrollo (McConnell, 1996). La Figura 2 muestra las pantallas principales del software para la interpretación de los datos, este programa puede ser descargado en el siguiente link:

([http://paquetetecnologico.freeiz.com/web\\_documents/software\\_para\\_interpretacion\\_de\\_datos.rar](http://paquetetecnologico.freeiz.com/web_documents/software_para_interpretacion_de_datos.rar)).

La plataforma Java un lenguaje de alto nivel que utiliza el enfoque de software libre, lo que se traduce en una disminución de costos por el uso de licencias de software. Los lenguajes de programación de computadora de alto y bajo nivel están diseñados para la comunicación entre un humano y una computadora a distintos niveles de abstracción. Un lenguaje de muy bajo nivel requeriría que un humano diera instrucciones directamente al hardware de la computadora, usando un lenguaje y estructura de hardware. En los lenguajes de alto nivel, las personas trabajan con herramientas complejas de lógica abstracta para escribir instrucciones

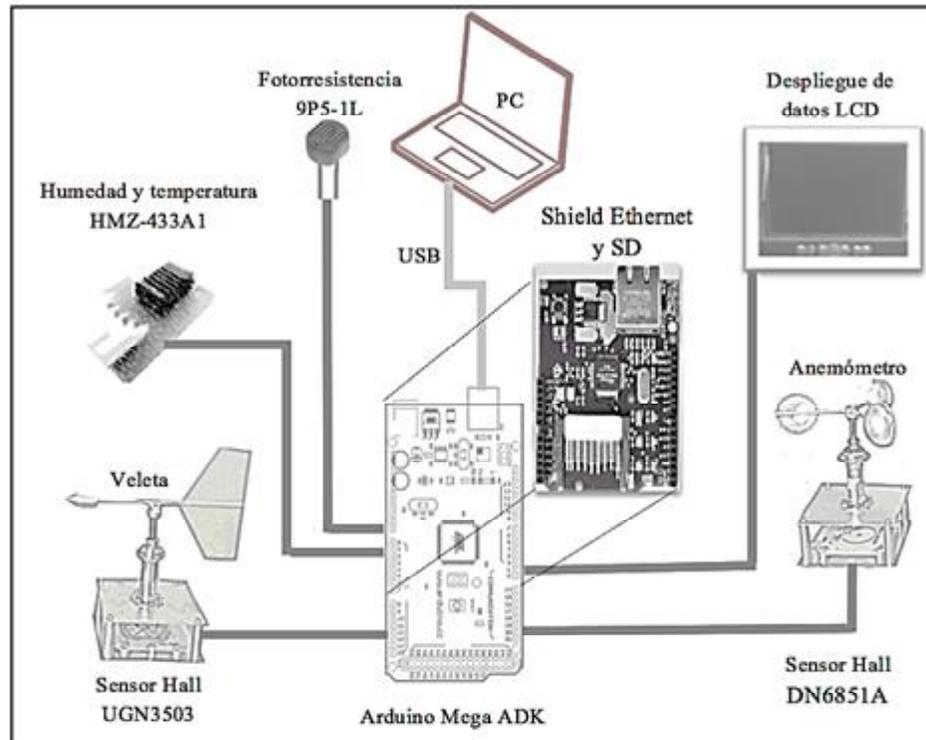


Figura 1. Resultado de la plataforma propuesta.

que un programa determinado debe traducir para la computadora. Java contiene librerías (rutinas de programación) que hacen posible la comunicación de la computadora con Arduino mediante el uso del puerto USB.

La programación en Arduino se basa en un lenguaje propio de alto nivel que facilita la adaptación de sensores comerciales y desarrollados de acuerdo a las necesidades que se requieran, ya sea de lectura o escritura de información. Arduino también es software libre. El uso de la librería TVOut en Arduino, ofrece la posibilidad de emitir una señal de video PAL o NTSC, y permite conectar cualquier pantalla LCD, plasma o LED para visualizar los datos de los sensores.

Dadas las semejanzas de los lenguajes Java y Arduino, la curva de aprendizaje es suave y es posible generar productos tangibles de automatización en tiempos cortos de desarrollo.

La construcción propia de la veleta y anemómetro permiten medir las condiciones de velocidad y dirección del viento fuera del invernadero; estos dispositivos pueden ser empleados en procesos de automatización para el cierre y apertura de las ventilas del invernadero. Los sensores de luz, humedad

y temperatura dentro del invernadero ofrecen las condiciones climatológicas que imperan de manera interna en el invernadero.

El Cuadro 2 y 3 muestran las comparativas con los datos relevantes de los sensores desarrollados en el presente estudio contra sensores comerciales.

Uno de los componentes principales de los sensores comerciales es el aluminio anodizado. El aluminio anodizado es aquel aluminio que, luego de cierto tratamiento electrolítico, es recubierto con una capa que le brinda una mayor protección ante las amenazas del medio ambiente.

La elaboración y procesamiento del plástico ABS, es un plástico cuya elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes, como son las polioleofinas (polietileno, polipropileno). El acrónimo deriva de los tres monómeros utilizados para producirlo: acrilonitrilo, butadieno y estireno. Por estar constituido por tres monómeros diferentes se lo denomina terpolímero. Los bloques de acrilonitrilo proporcionan rigidez, resistencia a ataques químicos y estabilidad a alta temperatura así como dureza. Los bloques de butadieno, proporcionan tenacidad a cualquier temperatura. Esto es especialmente interesante para ambientes fríos, en los cuales otros



Figura 2. Software para el análisis e interpretación de los datos.

plásticos se vuelven quebradizos. El bloque de estireno aporta resistencia mecánica y rigidez. Este material se utiliza para la construcción de las aspas.

Estos materiales permiten la construcción de sensores con tiempos cortos de reacción ante cambios en las condiciones del viento ya que se trata de materiales ligeros y durables; sin embargo, la tecnología que se emplea para producir estos materiales aumenta el costo del producto final.

El acero inoxidable contiene una pequeña cantidad de cromo (el mínimo para conseguir propiedades

inoxidables es del 12%) añadido al acero común, esto genera un aspecto brillante y lo hace resistente a la suciedad y a la oxidación. Este material es el componente principal para la construcción de los sensores propios ya que a diferencia del aluminio, es más económico, fácil de adquirir, sin embargo, es más pesado. Dado que el acero inoxidable es resistente a la corrosión, soporta las condiciones climáticas dentro y fuera de un invernadero.

Una característica importante que no se encuentra reflejada en el Cuadro 2 y 3, es la precisión en

Cuadro 2. Comparativa de las principales propiedades de los anemómetros.

Propiedad	Anemómetro a 100R <sup>†</sup>	Anemómetro propio
Velocidad máxima	75 ms <sup>-1</sup>	60 ms <sup>-1</sup>
Altura	200 mm	250 mm
Diámetro	55 mm	100 mm
Peso	350 g	600 g
Materiales	Aluminio anodizado, acero inoxidable, plástico ABS para las partes expuestas	Acero inoxidable, baquelita para el montaje electrónico
Temperatura de funcionamiento	-30 °C a +50 °C	Sin información
Montaje	Sistema de sujeción por gravedad	Sistema de sujeción por gravedad
Velocidad de arranque	0.2 ms <sup>-1</sup>	1 ms <sup>-1</sup>
Datalogger	CR10/10X, \$17 500.00 pesos	Arduino Mega 2600, \$500.00 pesos
Costo aproximado del sensor	\$ 12 144.00 pesos	\$350.00 pesos

Fuente: Elaboración propia. <sup>†</sup> marca Vector Instrument North Wales.

**Cuadro 3. Comparativa de las principales propiedades de las veletas.**

Propiedades	Veleta W200P <sup>†</sup>	Veleta propia
Velocidad máxima	75 ms <sup>-1</sup>	50 ms <sup>-1</sup>
Altura	270 mm	230 mm
Diámetro	55 mm	130 mm
Peso	350 g	530 g
Materiales	aluminio anodizado, acero inoxidable, plástico ABS para las partes expuestas	Acero inoxidable, baquelita para el montaje electrónico
Temperatura de funcionamiento	-50°C a +70 °C	Sin información
Montaje	Sistema de sujeción por gravedad	Sistema de sujeción por gravedad
Datalogger	CR10/10X, \$17 500.00 pesos	Arduino Mega 2600, \$500.00 pesos
Costo aproximado del sensor	\$ 12 953.00 pesos	\$550.00 pesos

Fuente: Elaboración propia. <sup>†</sup> marca Campbell Scientific.

la lectura de los sensores; los tiempos de reacción son mayores en los sensores comerciales debido al menor peso y mayor calidad de los materiales, pero una vez que se estabilizan los sensores desarrollados, se tiene la misma precisión de lectura que los sensores comerciales.

### CONCLUSIONES

- Con el desarrollo de plataformas electrónicas como Arduino, es posible el desarrollo de tecnología propia para la automatización de invernaderos en México, lo que representa un ahorro de costos en el desarrollo y adaptación de sensores electrónicos, con la gran ventaja de poder ser calibrados con las especificaciones de la región y construidos con materiales comunes y accesibles.
- Tecnologías para el control y monitoreo en invernaderos como FPGA o PLC, requieren de conocimientos especializados para su correcta programación y funcionamiento lo que ocasiona que se eleve el costo para implantarlos en invernaderos pequeños. La programación de Arduino puede realizarse con lenguajes de alto nivel donde cada día se parecen más al lenguaje natural; esto se traduce en una mayor facilidad para su programación y adaptación en sistemas de automatización. Es posible encontrar tutoriales y videos explicados a detalle disponibles de manera gratuita en Internet.
- El software libre permite el control de sensores que favorecen un ambiente controlado, que deriva en un mejor aprovechamiento de los recursos de energía,

agua y productos químicos en beneficio de la calidad y cantidad de la producción.

- El desarrollo de software ad-hoc para este paquete tecnológico (sensores y software propio) permite escalar el sistema con la integración de nuevas tecnologías de información como por ejemplo el monitoreo a través de Internet o el uso de dispositivos móviles.
- Los materiales de construcción utilizados en la elaboración de los sensores permitieron disminuir costos de producción pero se tradujeron en un tiempo de reacción menor en los sensores ante los cambios de las condiciones climatológicas, esto por el aumento del peso de los materiales.
- El conjunto, sensores-Arduino-software que aquí se presentó, permite evitar la dependencia de tecnología extranjera, disminuir costos, lo que permitiría adaptar procesos de automatización o ayudar en la toma de decisiones.

### LITERATURA CITADA

- Arduino home page. 2010. Is an open-source electronics prototyping platform based on flexible. <http://arduino.cc> (Consulta: abril 15, 2013).
- Java SE Technical Documentation. 2011. Java platform, standard edition (Java SE). <http://download.oracle.com/javase/index.html> (Consulta: julio 2, 2013).
- Kalpakjian, S. y S. R. Schmid. 2002. Manufactura, ingeniería y tecnología. Prentice Hall. México, D. F.
- Leffingwell, Dean. 2007. Scaling software agility: Best practices for large enterprises. Addison-Wesley Professional. Boston, MA, USA.
- McConnell, Steve. 1996. Rapid development: Taming wild software schedules. Press Books. New York, NY, USA.

Pareja, M. 2009. Diseño electrónico con aplicaciones libres o gratuita para el técnico en electrónica. Club Universitario. San vicente, Alicante, España.

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). Sitio Web. [www.sagarpa.com.mx](http://www.sagarpa.com.mx) (Consulta: febrero 10, 2013).

Tranductores fotoeléctricos. [http://www.itlalaguna.edu.mx/Academico/Carreras/electronica/opteca/OPTOPDF2\\_archivos/UNIDAD2TEMA1.pdf](http://www.itlalaguna.edu.mx/Academico/Carreras/electronica/opteca/OPTOPDF2_archivos/UNIDAD2TEMA1.pdf) (Consulta: octubre 6, 2013).