

## SECTORIZACIÓN E INSTRUMENTACIÓN DEL ÁREA DE CULTIVO PARA PRODUCCIÓN MASIVA DE *solanum lycopersicum* EN AMBIENTES PROTEGIDOS.

Gamero Inda, E\*, Godínez García, F.G., Avilés Lugo, E., Martínez Rivera, J.A., Guerrero Rivera, R.  
Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Durango  
Maestría en Ingeniería, Felipe Pescador 1830 ote. Durango, Dgo. 34080  
Tel: 618-8172303, e-mail: [egamero@itdurango.edu.mx](mailto:egamero@itdurango.edu.mx)

### RESUMEN.

En este trabajo se presenta una alternativa para el mejoramiento de las condiciones de cultivo para la producción masiva de *solanum lycopersicum* (tomate) en ambientes protegidos de un área de cultivo relativamente grande. Esta alternativa consiste en diseñar un sistema inalámbrico basado en radio frecuencia (RF), (no WI-FI), que no requiere internet en el sitio de cultivo y que permita la transmisión de datos a distancias hasta de cuatro kilómetros, del sistema de instrumentación para las diferentes variables de interés del área del cultivo protegido, y enviados hasta un servidor que reciba tales datos y los almacene para un posterior procesamiento. Además se propone un esquema de sectorización del área de cultivo del tomate que permite una mejor distribución de los módulos de medición de las variables para lograr un mejor conocimiento de las condiciones del microclima de la instalación del cultivo protegido (Invernadero). Las instalaciones en donde se probó este sistema son de la empresa *Cultivos del Guadiana el Ángel S.C. de R.L. de C.V.* y se encuentran ubicada en el municipio de Durango, en el estado de Durango, México.

Palabras Clave: Instrumentación, Transmisión de Datos, Radio Frecuencia, Invernadero.

### ABSTRACT.

This paper presents an alternative for the improvement of the cultivation conditions for the mass production of *solanum lycopersicum* (tomato) in protected environments of a relatively large-scale cultivation area. This alternative consists to use a wireless system based on radio frequency, (not WI-FI), which does not require Internet at the cultivation site and allows the transmission of data at distances up to four kilometers, from the instrumentation system for the different variables taken from the protected crop area, and sent to a server that receives the data and stores it for further processing. It also proposes a scheme of sectorization of the tomato crop that allows a better distribution of the modules of measurement of the variables to achieve a better knowledge of the conditions of the microclimate in the installation of the protected crop (Greenhouse). The facilities where this system was tested are from the company *Cultivos del Guadiana el Ángel S.C. de R.L. de C.V.* and they are located in the municipality of Durango, in the state of Durango, México.

Keywords: Instrumentation, Data Transmission, Radio Frequency, Greenhouse.

### 1. INTRODUCCIÓN

Sobre el cultivo de tomate en ambientes protegidos se han escrito y publicado un sinnúmero de artículos, ensayos y libros [1], [2], [3], [4], [5], [7], [9], sobre la manera de medir, transmitir y

almacenar los valores medidos de las variables del microclima, sin embargo es escasa la información, datos y procedimientos que le permitan específicamente a los productores aumentar la cantidad de cosecha y su calidad con una relación baja de costo. Existen trabajos en donde se proponen esquemas de uso de redes inalámbricas para la interconexión de sensores para la transmisión de datos a un servidor utilizando para ello elementos de Radio Frecuencia (RF) con norma IEEE 802.15.6. [8], los cuales han mostrado una manera efectiva para la implementación de topologías de redes inalámbricas, sin embargo estas topologías cuentan con un rango de alcance muy corto y desde nuestro punto de vista siguen siendo poco prácticas para algunos productores agrícolas. Este trabajo muestra una opción diferente, que consiste en sintetizar un sistema de instrumentación modular multivariable con comunicación inalámbrica, basada en radios móviles personales (PMR) de dos vías con un ancho de banda de 462-467 MHz en Ultra Alta Frecuencia (UHF) y con una potencia máxima de hasta 0.5 watts, lo cual permite su uso sin ningún tipo de licencia o permiso. Este esquema permite que no se utilice un enlace para internet en el sitio de cultivo, y además es posible concentrar los datos de medición en un servidor alejado físicamente del invernadero, hasta cuatro kilómetros, para su posterior manejo estadístico que le permitirán al productor tomar una serie de decisiones que al final le generen una mejora en las condiciones de cultivo y por consiguiente un aumento de producción y de calidad en la instalación protegida. La propuesta consiste de dos partes, la primera es el diseño y desarrollo del sistema modular de instrumentación para las siguientes variables: Temperatura del aire interno del invernadero (Ta), humedad relativa del aire interno (Ha), humedad del suelo de cultivo (Hs), cantidad de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y pH del suelo de cultivo y la segunda parte es el diseño e implementación del sistema de transmisión inalámbrica de los datos hacia un servidor remoto para su adquisición y procesamiento posterior. Una característica muy importante del sistema propuesto es el hecho de que los medidores y el sistema de enlace inalámbrico constan de partes que a pesar de ser de última generación tecnológica son de uso comercial y de bajo costo, lo que facilita el mantenimiento y servicio del sistema de instrumentación multivariable completo. La sectorización del invernadero es necesaria debido al volumen de aire de la instalación protegida, las temperaturas y humedades dentro de la misma no son homogéneas y se tiene además una estratificación

de las mismas. Al final se presentan resultados de la operación del sistema.

## PRIMERA PARTE:

### 2. SISTEMA MODULAR DE INSTRUMENTACIÓN

#### 2.1. Temperatura del Aire del Invernadero ( $T_a$ ).

La temperatura del aire en el interior de un invernadero es una de las dos principales variables de interés cuando se trata de controlar las condiciones del microclima de un invernadero. En tal sentido, para este proyecto se propone para la implementación del medidor de la temperatura interior del aire del invernadero un sistema digital de instrumentación basado en el PIC ATMEGA 2560, utilizando como sensor el elemento DHT-22. El medidor está construido usando como característica principal un sistema de modulación de ancho de pulso (PWM), que prácticamente puede manejar cambios de temperatura mínimos y sin perder información en la transmisión de los datos hacia el servidor lejano del sitio de medición. El diagrama de bloques del medidor se presenta en la figura 1.

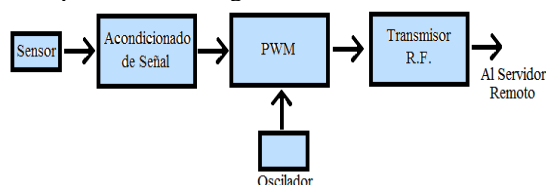


Figura 1. Diagrama de Bloques de los Medidores

#### 2.2. Humedad del suelo de cultivo.

Para el medidor de humedad en el suelo de cultivo, se utiliza el mismo esquema que el medidor de temperatura, es decir, el PWM como elemento del medidor, pero con la obvia diferencia del sensor utilizado, que en este caso es un sensor capacitivo (Soil Moisture Sensor V1.2). La ventaja de utilizar este tipo de sensor es que evitamos casi totalmente la corrosión del sensor al estar en contacto con el suelo de cultivo húmedo.

##### Descripción del sensor de humedad capacitivo:

Se trata de un capacitor de placas planas paralelas separadas por un dieléctrico. Las placas planas paralelas están construidas en acrílico con una cara cubierta por una película de cobre. El dieléctrico es una placa de policarbonato compacto [10]. Esta estructura permite enfatizar la capacitancia parásita que se genera en los bordes del sensor con el objeto de que las líneas de campo eléctrico pasen por el suelo que lo rodea. Esto genera prácticamente dos capacitores en paralelo, cuyas capacitancias se suman. Uno de los capacitores, (el del sensor) tiene capacitancia constante  $C_c$  cuyo valor es:  $C_c = \epsilon_0 \epsilon_r A/d$ ; donde  $\epsilon_0$  es la constante dieléctrica del vacío;  $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica relativa del policarbonato;  $A$  es el área de cada placa y  $d$  es la distancia entre placas o espesor del dieléctrico. El otro capacitor es la capacitancia de borde que se forma a lo largo de todo el perímetro de la estructura de placas planas paralelas. La constante dieléctrica relativa de este capacitor es la del suelo, por

el que pasan las líneas del campo eléctrico, la que varía según la cantidad de agua que contenga. Por lo tanto se trata de una capacitancia variable  $C_v(H)$  cuyo valor depende de la humedad volumétrica ( $H$ ) del suelo que rodea el sensor. La capacitancia total  $C$  es:  $C = C_c + C_v(H)$

#### 2.3. Humedad Relativa del aire del invernadero.

Para la humedad relativa del aire se utilizó un sensor comercial, el DHT-22, que es de uso general y de características idóneas para el propósito de este proyecto. La configuración base del medidor es la misma del de la figura 1.

#### 2.4. Bióxido de Carbono ( $CO_2$ ) en el aire del invernadero.

Para la medición del  $CO_2$  se utiliza el sensor MH-Z19, que es un sensor inteligente por radiación infrarroja no dispersiva que cuenta con dos tipos de salidas, una por PWM (Pulse Width Modulation) con un rango de hasta 2000 ppm (partes por millón) y otra serial por puerto UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) con rango hasta 5000 ppm. La calibración del sensor se realizó utilizando aire fresco en los alrededores del invernadero tomando en cuenta como base cero las 390 ppm, el cual es un valor estándar aceptado de manera general que está dentro del rango de valores de concentración de  $CO_2$  del aire libre en el campo y el promedio en una ciudad (700 ppm). Este tipo de calibración es el más adecuado para cuando el sensor es utilizado en invernaderos ya que el sensor este sujeto a un constante cambio de niveles de  $CO_2$  por efecto de la respiración de las plantas dentro del invernadero. Debido a que el comportamiento de los gases depende de la temperatura y de la presión, se utilizó la ecuación (1) para el cálculo de la concentración de  $CO_2$  para de ésta manera ajustar los valores del sensor a las condiciones de presión atmosférica al nivel promedio del municipio de Durango en donde se localiza el invernadero.

$$\rho(t, p) = \rho(25^\circ C, 1013hPa) * \frac{p}{1013} * \frac{298}{(273 + t)} \quad (1)$$

Dónde:  $\rho$  = Concentración del gas en ppm.

$p$  = Presión ambiental (hPa).

$t$  = Temperatura ambiente en °C.

#### 2.5. pH del suelo de cultivo.

El pH del suelo en general aporta información importante en diversos aspectos de la edafología. Uno de los aspectos más importantes y de interés para nosotros en este trabajo se deriva del hecho de que las plantas solo pueden absorber los minerales que estén disueltos en agua y la solubilidad de los minerales se modifica de acuerdo al nivel de pH en el suelo, por lo que un pH inadecuado en el suelo de cultivo llega a afectar el proceso fisiológico de absorción de los nutrientes por parte del sistema radical de las plantas y con ello se perturba el crecimiento normal y sano. El sistema de medición para el pH del suelo utiliza un

electrodo E-201C, y un acondicionador de señal 4502-C que tiene una salida análoga proporcional al valor de pH. Para la medición del pH del suelo fue necesario desarrollar unos pozos en áreas específicas del invernadero con el fin de obtener una solución líquida representativa del suelo en el cual poder medir el pH del suelo.

## SEGUNDA PARTE

### 3. SECTORIZACIÓN DEL ÁREA DE CULTIVO.

El área de cultivo del invernadero es de casi 10,000 m<sup>2</sup> con una forma rectangular de 95 x 105 metros. El volumen estimado de aire del invernadero es de aproximadamente 70,000 m<sup>3</sup>, lo cual representa un problema a resolver al momento de querer medir y luego controlar ya sea la temperatura o la humedad del invernadero, debido a la no homogeneidad de tales variables como consecuencia de la estratificación de las capas de aire en el volumen de la instalación y las relaciones no lineales de las diversas variables presentes en el microclima. Ver figura 2.



Figura 2. Vista del interior del invernadero

Con el fin de disminuir la problemática de la medición de esas variables, se propone la sectorización del área de cultivo en 10 sectores de aproximadamente 1,000 m<sup>2</sup> cada uno y colocar un módulo de medición de las variables de interés cada dos sectores, para que se transmitan los datos de las mediciones a un servidor remoto para su posterior procesamiento.

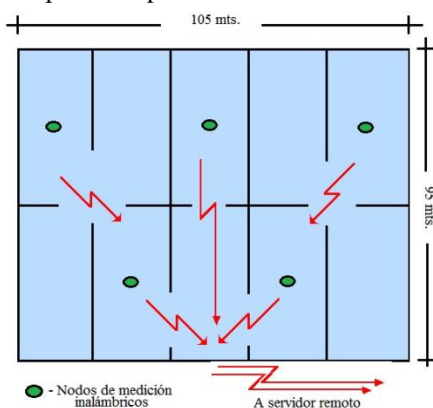


Figura 3. Sectorización y Ubicación de los Nodos de Medición

El esquema propuesto para la sectorización se presenta en la figura 3, en donde se muestra la topología en estrella de la red inalámbrica que enlaza entre sí a los diferentes módulos de

medición con el nodo transmisor y de ahí al servidor remoto. Además este esquema permite mediante el análisis de los datos de medición realizar un estudio acerca de los gradientes de temperatura y humedad dentro del volumen de aire, con el fin de aportar información para obtener una mejora en los métodos de control del invernadero

#### 3.1. Enlace Inalámbrico de Radio Frecuencia.

Para la implementación de la topología de la red inalámbrica, se utilizaron radios móviles personales (RMP) con un ancho de banda de 462-467 MHz en Ultra Alta Frecuencia (UHF) y con una potencia máxima de hasta 0.5 watts. Estos RMP se modificaron y se acondicionaron para colocarlos en los nodos de medición. Se utiliza un transmisor por cada nodo y de cada transmisor se utiliza la banda de audio en donde se canalizan las diferentes frecuencias de los medidores de las variables. A los medidores se le asignó una frecuencia específica del PWM de 1,000 Hz. Los niveles de voltaje para canalizar las señales son los de la Tabla 1.

Tabla 1. Niveles de Voltaje para cada Canal del Medidor

Variable	Nivel
Humedad Aire	0.2V -1V
Temperatura Aire	1.1V.-2V.
CO <sub>2</sub>	2.1V.-3V.
Humedad Suelo	3.1V.-4V.

Para cada nodo se le asignó un periodo de un segundo para la medición de las variables y un periodo de muestreo para cada nodo de 4 segundos (Figura 4).

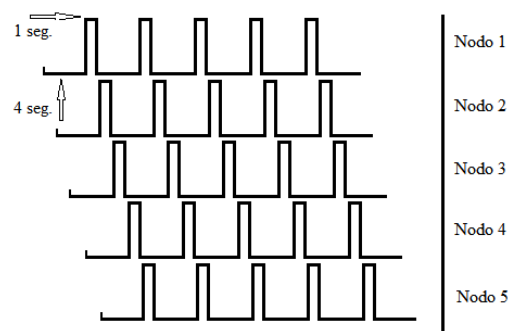


Figura 4. Periodos de Muestreo para los Medidores de la Red.

Los datos se transmiten de los nodos al servidor remoto donde se almacenan en la base de datos diseñada para este propósito

## 4. SÍNTESIS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

El aspecto principal de la integración del sistema es la interfaz entre el módulo de medición y el sistema RMP, el cual se manejó de la siguiente manera: En la figura 5 se observa el diagrama esquemático de la interfaz entre los módulos de medición y el sistema de transmisión de datos a través de los RMP. La interfaz funciona por medio del CI cd4017 el cual controla de manera secuencial las bases de los transistores 2N2222 y el colector de



cada uno de ellos se conecta con un sensor. Cada sensor transmite una señal analógica con diferente nivel de voltaje durante un segundo y todas las señales pasan a través de una resistencia de 1 KΩ como limitador de corriente. Ésta señal pasa al conmutador que transforma la señal de directa a una señal pulsada de 1 KHz y ésta a su vez se inyecta al micrófono del radio emisor.

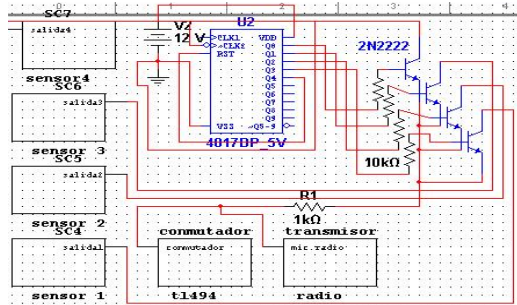


Figura 5. Esquemático de la interfaz para los RMP.

En la figura 6 se observa la parte del diagrama en LabVIEW®, que funciona como el selector del nivel de voltaje en la recepción de la señal de RF proveniente del módulo de medición. Básicamente son comparadores configurados en un solo rango de voltaje, el cual está asignado según la tabla 1.

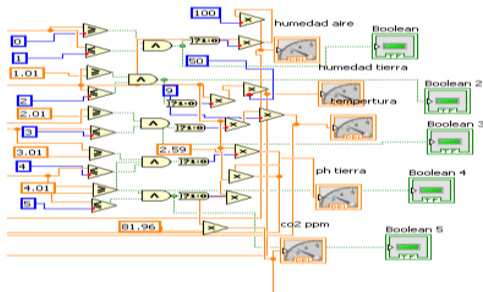


Figura 6. Selector de Nivel y Acondicionador de Señal.

En la misma figura se ven los acondicionadores de señal para que el rango de medida concuerde con el valor real de cada variable. La alimentación del sistema completo, se implementó con un sistema basado en un pequeño panel solar para una pila recargable de 12 volts/7.2 Ah con soporte y control para su uso durante las horas de obscuridad. El diseño de este sistema de alimentación es de 5 volts con circuito de potencia basado en un PWM para todo el sistema de medición y se asegura un mantenimiento mínimo con un funcionamiento continuo para más de 3 años.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se presentan resultados en cuanto a la medición de las variables más importantes del microclima del invernadero

### 5.1. Mediciones Preliminares.

Para las pruebas de los medidores se planteó realizar mediciones *in situ* (figura 7) con un módulo en el invernadero para verificar las condiciones reales a las cuales estarían expuestos los medidores.



Figura 7. Colocación de un módulo de medición en el invernadero para mediciones *in situ*.

El *set-up* para la recepción de la señal de RF con los datos en las oficinas de la empresa se muestra en la figura 8.

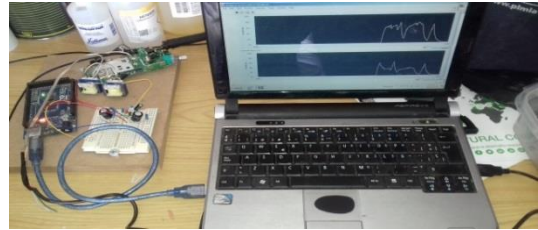


Figura 8. Módulo de recepción de la señal en oficina de la empresa.

Para estas pruebas se seleccionaron las siguientes variables del microclima: Temperatura del aire, humedad del aire y humedad del suelo. Estas pruebas se realizaron en el mes de Marzo y ya se tenían condiciones de alta temperatura en el exterior del invernadero. En la figura 9 se muestra la gráfica en tiempo real de la medición de la temperatura del aire interno del invernadero.

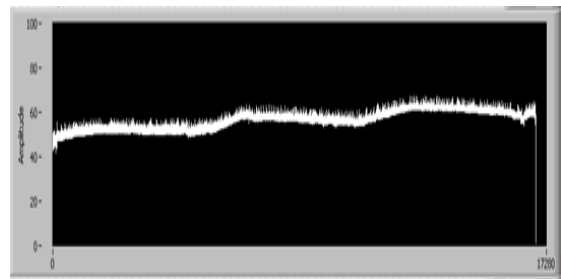


Figura 9. Curva de temperatura ambiente del invernadero.

Las mediciones se llevaron a cabo durante ocho horas y media, a partir de las 13:00 hrs. y se puede observar como la curva llega a un máximo de 62° alrededor de las 18:00 hrs. y luego se observa la tendencia a la disminución cuando el sol comienza a ocultarse.

La figura 10 muestra la gráfica generada por los datos de la humedad relativa del aire, que se almacenaron en la base de datos del sistema. En esta gráfica se observan las mismas tendencias que con la temperatura ambiente, lo cual es congruente. La cola descendente que se observa al final de la gráfica se debe al corte de energía en el sistema de medición al finalizar en lapso de tiempo establecido para las mediciones.

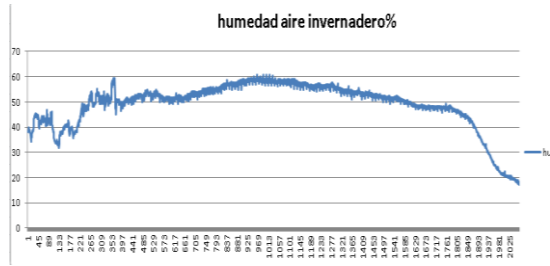


Figura 10. Curva de comportamiento de la humedad del aire interior del invernadero

En la figura 11 se presenta la curva de comportamiento de la humedad relativa del suelo de cultivo, la cual es de vital importancia para determinar las actividades de los operadores del invernadero en lo referente a la programación de la cantidad de agua para el riego del cultivo. Esta gráfica se obtuvo también de los datos almacenados a lo largo del periodo de medición establecido.

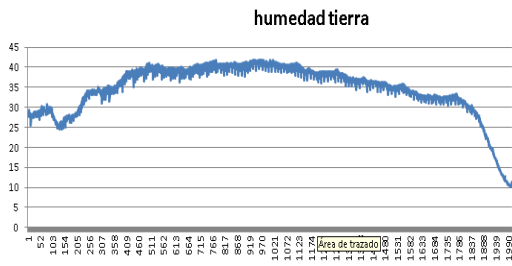


Figura 11. Curva de comportamiento de la humedad relativa del suelo del invernadero

## 6. CONCLUSIONES

En lo general el sistema cumplió con los objetivos planteados, sin embargo es necesario resaltar que en algunos aspectos se obtuvieron resultados por arriba de las expectativas iniciales, mientras que en otros aspectos hubo algunos problemas que han ralentizado el desarrollo del proyecto. Los aspectos positivos a resaltar sobre los resultados obtenidos son: a). La estabilidad y exactitud de las mediciones de todas las variables de manera individual, b). La exitosa transmisión inalámbrica de los datos individuales de las variables medidas vía RF a una distancia de más de un kilómetro y c). La sectorización, que arrojó resultados preliminares que permiten visualizar la no homogeneidad del microclima del invernadero y por lo tanto tener la posibilidad de realizar estudios para la desestratificación de las capas del

microclima con el respaldo matemáticos de los datos. Los aspectos en los que se continua trabajando para la optimización del sistema son: a). El programa del sistema presenta algunas inconsistencias en la canalización de los datos de las variables medidas a través de la señal portadora de RF utilizada en los RMP, b). La estructura de la base datos de las mediciones genera algunos problemas en los procedimientos para el análisis estadístico de los datos, por lo que se trabaja en una nueva estructura.

## 7. REFERENCIAS

- [1] - Rizo Erandy (2015), *Agricultura protegida, evolución y éxito en México*, Inforural , 6 julio, 2015, <https://www.inforural.com.mx/agricultura-prottegida-evolucion-y-exito-en-mexico/>
- [2] – Ocaña-Romo, César R.,(2015) *Crecimiento de Superficie de Invernaderos en México Hortalizas*, 4 de septiembre, 2015, <http://www.hortalizas.com/horticultura-prottegida/crecimiento-de-superficie-de-invernaderos-en-mexico/>
- [3] - *Guantes Ruiz, Jairo,(2006), El mercado de los invernaderos en México. Notas Sectoriales.*, Instituto Español de Comercio Exterior. Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en México. Enero de 2006.
- [4] - *Agricultura protegida, opción para fortalecer al campo en Durango*, <http://www.2000agro.com.mx/agriculturaprottegida/agricultura-prottegida-opcion-para-fortalecer-al-campo-en-durango/>
- [5] - Tiwari, G. (2003). *Greenhouse Technology for Controlled Environment*. Pangbourne, England: Alpha Science International Ltd.
- [6] - Nelson, P. (1998). *Greenhouse Operation and Management (5th ed.)*. Upper Saddle River, United States: Prentice Hall.
- [7] - Newman, S. E. (2013). *Sustainable Commercial Greenhouse Production*
- [8] – Ibayashi, H., et al, (2016). *A Reliable Wireless Control System for Tomato Hydroponics*, Sensors, 2016, 16, 644; doi: 10.3390/s16050644, [www.mdpi.com/journal/sensors](http://www.mdpi.com/journal/sensors).
- [9] - Zhang et al, (2007), *A wireless solution for greenhouse monitoring and control system based on ZigBee technology*, Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 8(10):1584-1587, ISSN 1673-565X
- [10] – Pallás Areny, R., *Sensores y Acondicionadores de Señal*, 4 ed., Alfaomega, Marcombo (2007).