

Sistema de adquisición de datos meteorológicos en tiempo real con PLC*

Acquisition system in real-time meteorological data with PLC

Ricardo Guzmán Luna¹, Abel Quevedo Nolasco^{1§}, Leonardo Tijerina Chávez¹ y Martiniano Castro Popoca¹

¹Programa de Hidrociencias-Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco, km 35.5, C. P. 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. [§]Autor para correspondencia: anolasco@colpos.mx.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un sistema de adquisición de datos meteorológicos en tiempo real utilizando un controlador lógico programable (PLC) como una alternativa dentro de las estaciones meteorológicas comerciales. Para sensar la: temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, precipitación, velocidad y dirección del viento, se usaron sensores comerciales, durante 2013, para probar la estación, en la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. El sistema se compone de un PLC (modelo CX1020, marca Beckhoff), una Laptop donde se instaló una aplicación de monitoreo en tiempo real que se desarrolló en Visual Basic 2010 Express y la base de datos en MySQL para almacenar la información, que se puede usar para fines diversos. La interacción entre el PLC y la aplicación de monitoreo se realizó mediante comunicación inalámbrica Wi-Fi. Se usaron los programas TwinCAT System Manager (para la configuración del hardware) y TwinCAT PLC Control (para la programación del PLC). Se evaluó el funcionamiento del sistema al realizar comparaciones de las lecturas obtenidas de los sensores, contra instrumentos de referencia y sensores de una estación meteorológica Campbell Scientific. Los resultados indican que es factible el uso del PLC en la implementación de estaciones meteorológicas.

Abstract

The objective of this work was to develop a system of acquisition of meteorological data in real time, using a programmable logic controller (PLC) as an alternative within the commercial weather stations. For sensing the air temperature, relative humidity, solar radiation, precipitation, wind speed and direction, commercial sensors were used during 2013, to test the station, in the meteorological station of the Graduate College, Campus Montecillo. The system consists of a PLC (CX1020 model, make Beckhoff), a laptop where an application for real-time monitoring that was developed in Visual Basic 2010 Express and the database MySQL was installed to store information, which can be used for several purposes. The interaction between the PLC and the application of monitoring was performed using wireless communication Wi-Fi. TwinCAT System Manager programs were used (for configuring the hardware) and TwinCAT PLC Control (for programming the PLC). The system operation was evaluated to make comparisons of sensor readings obtained against reference instruments and sensors of a meteorological station Campbell Scientific. The results indicate that it is feasible to use the PLC in the implementation of meteorological stations.

Keywords: automatic stations, meteorology, real time sensors.

* Recibido: junio de 2015
Aceptado: octubre de 2015

Palabras clave: estaciones automáticas, meteorología, sensores, tiempo real.

Introducción

El clima y el tiempo atmosférico afectan en forma directa el entorno del ser humano, ya que intervienen en diversos aspectos tales como biológicos, sociales y económicos. Por un lado el clima permite conocer el promedio a largo plazo de los elementos del tiempo atmosférico, y este último por su parte, permite conocer el comportamiento atmosférico a corto plazo (uno o varios días). De ahí la importancia de su estudio para contar con información representativa que pueda ayudar en el desarrollo de diversas actividades tales como: desarrollo urbano, agricultura, ganadería, transporte, salud, esparcimiento, prevención de desastres, pronóstico del tiempo, calentamiento global y cambio climático, entre otros.

A continuación se definen algunos conceptos básicos, por ejemplo según Ahrens *et al.* (2012) la meteorología (del griego *meteoros* "alto en el cielo" y *logos* tratado) es la ciencia interdisciplinaria que estudia el estado del tiempo, el medio atmosférico, los fenómenos allí producidos y las leyes que lo rigen, y la cual hace uso la estación meteorológica como instrumento de medición de los elementos meteorológicos. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) define al elemento meteorológico como una variable atmosférica o fenómeno que caracteriza el estado del tiempo en un lugar específico y en un tiempo dado (temperatura del aire, presión, viento, humedad, tormentas, nieblas, ciclones o anticiclones, etc.). La temperatura se define como una magnitud física que caracteriza el movimiento medio de las moléculas en un cuerpo (WMO, 1992).

La humedad relativa como "la razón expresada en porcentaje, entre la presión de vapor observada y la tensión del vapor saturante a la misma temperatura y presión" (WMO, 1998). La precipitación como el producto líquido o sólido de la condensación del vapor de agua que cae de las nubes o el aire y se deposita en suelo, incluye nieve, escarcha, precipitación de la neblina y el rocío (WMO, 2008).

La radiación solar es la energía en forma de ondas electromagnéticas proveniente del sol y que recibe la tierra. La presión atmosférica es la fuerza que se ejerce por unidad de

Introduction

Climate and weather directly affect the environment of the human being, involved in various aspects such as biological, social and economic. On the one hand, climate allows to know the long-term average of the elements of weather, and the latter in turn, allows to know the atmospheric behaviour in the short term (one to several days). Hence, the importance of studying to have representative information that could help in the development of various activities such as urban development, agriculture, transportation, health, recreation, prevention of disasters, weather, global warming and climate change, among others.

Some basic concepts are defined, for example according to Ahrens *et al.* (2012), meteorology (Greek *meteors* "high in the sky" and *logos* "study" is the interdisciplinary science for studying weather, the atmospheric environment, the phenomena produced there and the laws that govern it, and which uses the weather station as an instrument for measuring the weather elements. The World Meteorological Organization (WMO) defines a weather element as an atmospheric variable or phenomenon that characterizes the weather in a specific place and at any certain time (air temperature, pressure, wind, humidity, storms, fog, cyclones and anticyclones, etc.). The temperature is defined as a physical quantity that characterizes the movement of molecules through a body (WMO, 1992).

The relative humidity as "the reason expressed in percentage, between the observed pressure steam saturation voltage at the same temperature and pressure steam" (WMO, 1998). The precipitation as liquid or solid condensation of water vapour falling from clouds or the air and deposited on the ground product includes snow, sleet, rain mist and dew (WMO, 2008).

Solar radiation is the energy in the form of electromagnetic waves from the sun and the earth receives. Atmospheric pressure is the force exerted per unit area, as a result of the weight of the atmosphere above the measuring point (WMO, 2008). Mozarrela (1972) defined the wind like a three-dimensional vector quantity with small random fluctuations in space and time, superimposed on a larger scale organized flow, and secondly Günter (2002) defines it as "the compensation of differences in atmospheric pressure between two points".

superficie como resultado del peso de la atmósfera por encima del punto de medición (WMO, 2008). Mozarrela (1972) define el viento como una cantidad vectorial tridimensional con pequeñas fluctuaciones aleatorias en espacio y tiempo superpuesto a un flujo organizado a mayor escala, y por otro lado Günter (2002) lo define como “la compensación de las diferencias de presión atmosférica entre dos puntos”.

En México, se depende principalmente de estaciones meteorológicas de manufacturación extranjera, por lo que resulta necesario el desarrollar sistemas competitivos aprovechando nuevas tecnologías y así contar con la capacidad de desarrollo e implementación a nuevos requerimientos, siendo el PLC una de esas alternativas tecnológicas y que se implementó en el presente trabajo.

Respecto a las funciones con que debe contar una estación meteorológica deben tener 1) sensores meteorológicos que proporcionen una señal electrónica; 2) electrónica para convertir la señal del sensor a un valor digital; 3) medios de almacenamiento para respaldo en sitio; y 4) hardware de telecomunicaciones para transmisión de la información, de manera preferente (Tanner, 1990).

El controlador lógico programable (PLC) se define como un sistema electrónico operado digitalmente, diseñado para uso en un entorno industrial, el cual usa una memoria programable para el almacenamiento de instrucciones para implementar funciones específicas tales como lógicas, secuenciales, temporización, conteo y aritméticas, para controlar a través de entradas y salidas, digitales o analógicas, varios tipos de máquinas o procesos (NEMA, 2005). Los componentes típicos en un sistema PLC son: procesador, memoria, fuente de alimentación, sección de interfaz de entrada/salida, interfaz de comunicación, y el dispositivo de programación (Boltón, 2009). La Figura 1 muestra el arreglo básico.

El PLC es capaz de trabajar tanto con señales digitales como analógicas, siendo las primeras variables con dos niveles bien diferenciados que representan los estados lógicos “falso” y “verdadero” y que solo los PLC’s trabajan con 0 V cd y 24 V cd respectivamente. Por otro lado las señales analógicas son variables que varían en el tiempo en forma análoga a alguna variable física, que transportan información e incluyen cantidades físicas tales como voltaje, corriente e intensidad (Ambardar, 2002).

In Mexico, it mainly depends on meteorological stations of foreign manufacturing, making it necessary to develop competitive systems taking advantage of new technologies and thus have the ability to develop and implement new requirements, with the PLC one of those technological alternatives that were implemented in this paper.

Regarding functions that should have a weather station must have 1) meteorological sensors to provide an electronic signal; 2) electronics to convert the sensor signal to a digital value; 3) storage media for backup site; and 4) telecommunications hardware for data transmission, preferably (Tanner, 1990).

The programmable logic controller (PLC) is defined as a digitally operated electronic system designed for the use in an industrial environment, which uses a programmable memory for storing instructions to implement specific functions such as logic, sequence, timing, counting and arithmetic to control through inputs and outputs, digital or analogue, various types of machines or processes (NEMA, 2005). Typical components in a system PLC are: processor, memory, power supply section input/output communication interface, and the device programming (Boltón, 2009). Figure 1 shows the basic arrangement.

The PLC is able to work with both digital and analogue signals, with the first variable with two distinct levels representing the "false" and "true" logic states and that only the PLC's work with 0 V dc and 24 V dc respectively. Moreover the analogue signals are variables that vary with time in a manner analogous to a physical variable that carry information and include physical quantities such as voltage, current and intensity (Ambardar, 2002).

Regarding the classification of the PLC's stand mainly two criteria, the first criterions is according to their structure, divided into compact and modular, where the compact has all elements integrated into a main module, while the modular contains your items individually and together make up the controller. The second criterion for classification is according to its processing power. They are classified into low, medium and high end, where the low range comprises a maximum of 128 inputs/outputs and up to 4K instruction; the average range comprises

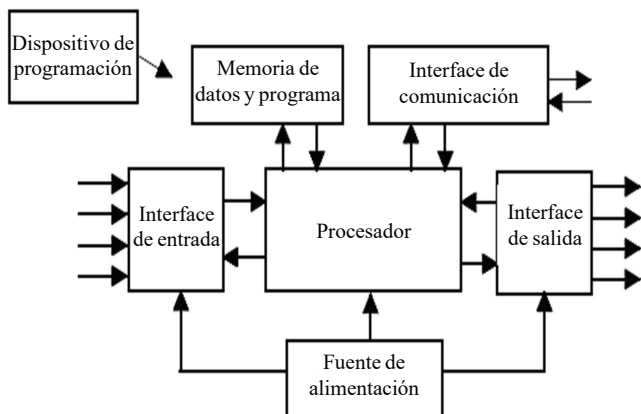


Figura 1. Estructura básica de controlador lógico programable (PLC).

Figure 1. Basic structure of a programmable logic controller (PLC).

En cuanto a la clasificación de los PLC's sobresalen principalmente dos criterios, el primer criterio es de acuerdo a su estructura, se dividen en compacto y modular, donde el compacto posee todos sus elementos integrados en un módulo principal, mientras que el modular contiene a sus elementos de forma individual y que unidos conforman el controlador. El segundo criterio de clasificación es de acuerdo a su capacidad de procesamiento. Se clasifican en gama baja, media y alta, en donde la gama baja comprende un máximo de 128 entradas/salidas y hasta 4K de instrucciones; la gama media comprende un máximo de 512 entradas/salidas y hasta 16 K de instrucciones; y por último la gama alta que soporta más de 512 entradas/salidas y más de 16K instrucciones (Peña, 2003). Según estos criterios el PLC CX1020 que se utilizó en el presente proyecto es del tipo modular y de gama alta de acuerdo a sus características (Beckhoff, 2013).

Materiales y métodos

Para el diseño y construcción del sistema de adquisición se utilizó un controlador lógico programable (PLC - Programmer Logic Controller) CX1020 y módulos de entrada digital y analógica marca Beckhoff; fuente de alimentación de 24 Vcd marca Weidmüller; sensor de radiación solar modelo LI-200 marca LICOR; sensor de temperatura del aire y humedad relativa modelo HO2NVSTA1 marca Veris; pluviómetro TE525 marca Campbell Scientific; sensor de velocidad del viento modelo 03101 y sensor de dirección del viento modelo 03301, ambos marca Campbell Scientific.

a maximum of 512 inputs/outputs and up to 16 K instructions; and finally high-end, that supports more than 512 inputs/outputs and 16K instructions (Peña, 2003). According to these criteria, the CX1020 PLC that was used in this project is the modular high-end and according to their characteristics (Beckhoff, 2013).

Materials and methods

For the design and construction of the acquisition system, we used a programmable logic controller (PLC - Programmer Logic Controller) CX1020 and digital and analogue input modules Beckhoff brand; power supply 24 Vdc, Weidmüller brand; solar radiation sensor LI-200 model brand LICOR; Sensor of air temperature and relative humidity, HO2NVSTA1 model, Veris brand; Campbell Scientific TE525 gauge mark; speed sensor Model 03101 and Model 03301 wind direction wind sensor, both Campbell Scientific brand.

We built a slotted aluminium structure, on which the meteorological sensors and control cabinet with IP65 water protection were mounted (according to IEC 60529, 2001-2002). Inside the cabinet, the components were installed: PLC, power supply, digital and analogue cards inputs, thermo-magnetic switch and some other ancillary components, such as terminals, din rail for mounting elements, channelling chute for wiring and connectors for outer wires (Figure 2 and 3).

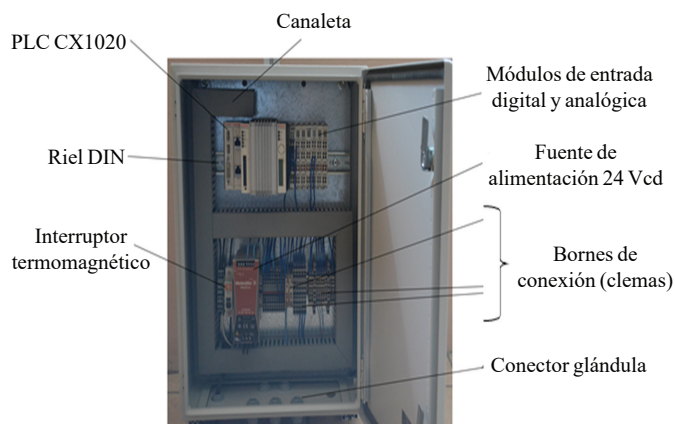


Figura 2. Componentes en gabinete de control (vista interna).
Figure 2. Components in the control cabinet (internal view).

Se construyó una estructura de aluminio ranurado, sobre la que se montaron los sensores meteorológicos y el gabinete de control con protección contra agua IP65 (de acuerdo a IEC 60529, 2001-2002). Dentro del gabinete se instalaron los componentes como: PLC, fuente de alimentación, tarjetas de entradas digitales y analógicas, interruptor termo-magnético y algunos otros componentes complementarios como clemas (bornes de conexión), riel din para montaje de elementos, canaleta para canalización de cableado y conectores glándula para canalización a exterior (Figura 2 y 3).

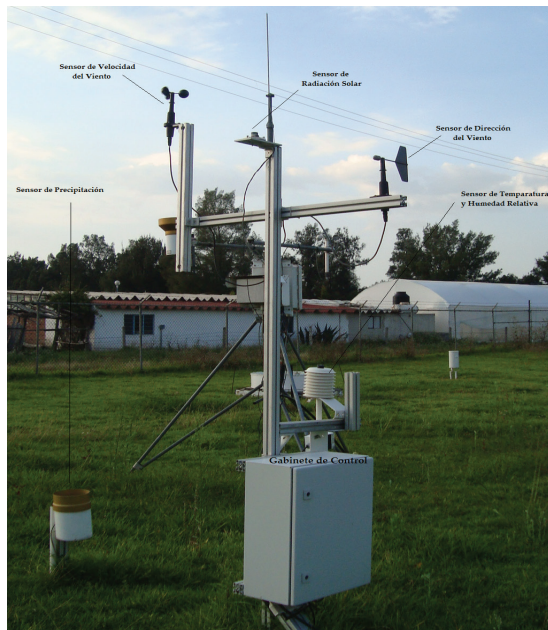


Figura 3. Estación meteorológica automática con base en PLC (vista externa).

Figure 3. Automatic weather station based on PLC (external view).

Para la comunicación entre el PLC y los módulos de entrada se utilizó el EtherCAT, el cual es un protocolo que utiliza un "EtherType" oficialmente asignado dentro de la trama de Ethernet (Ethercat, 2013), que trabaja sobre redes Ethernet y donde el EtherType es un campo de dos octetos dentro de la trama Ethernet que se utiliza para indicar la naturaleza del protocolo cliente (IEE 802.3, 2005). Se contó también con un punto de acceso inalámbrico marca TP-Link para realizar una conexión a distancia desde una computadora central, donde se ejecutó una aplicación de monitoreo en tiempo real de los valores leídos y que cuenta con una base de datos MySQL para su almacenamiento y posterior consulta (Figura 4).

Se utilizó el Software "TwinCAT System Manager" para configurar los módulos de entrada digital y analógica, así como establecer el protocolo de comunicación Ethercat entre

The EtherCAT, which is a protocol that uses a "EtherType" officially assigned within the frame of Ethernet (EtherCAT, 2013), which works on Ethernet networks and where the EtherType is used for communication between the PLC and input modules, in a field of two octets within the Ethernet frame that is used to indicate the nature of the client protocol (IEEE 802.3, 2005). Also with a wireless access point, TP-Link for a remote connection from a central computer, where an application for real-time monitoring of values read it ran and that has a MySQL database for storage and later reference (Figure 4).

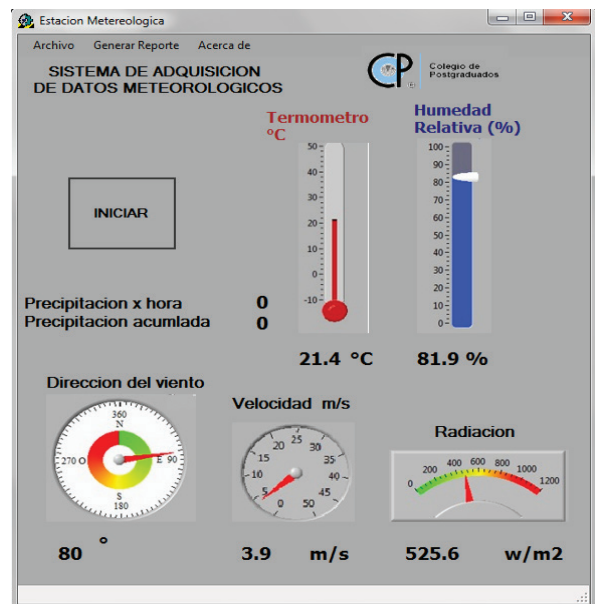


Figura 4. Cuadro de diálogo de la aplicación de monitoreo en tiempo real.

Figure 4. Dialog frame of the implementing real-time monitoring.

The Software "TwinCAT System Manager" is used to configure the digital and analogue input modules and establish the communication protocol between the PLC Ethercat CX1020 and the aforementioned modules, also to set the link between the hardware and the user program. The "TwinCAT PLC Control" software code for implementing the program, which was published with the programming language "Structured Text" (ST-Structure Text) operating under the IEC 61131-3 (John, 2010 was also used; IEC, 2013). The application of real-time monitoring was performed with Visual Basic Express 2010 software and communication between the PLC program and this application was made by the ADS specification Beckhoff, through a component that is installed in Visual Basic Express 2010. The Figure 5 shows an overview of the information flow.

el PLC CX1020 y los módulos mencionados, así mismo para configurar el enlace entre el hardware y el programa de usuario. También se utilizó el software “TwinCAT PLC Control” para la realización del código de programa, el cual se editó con el lenguaje de programación “texto estructurado” (ST-Structure Text) que funciona bajo la norma IEC 61131-3 (John, 2010; IEC, 2013). La aplicación de monitoreo en tiempo real se realizó con el software Visual Basic Express 2010 y la comunicación entre el programa de PLC y esta aplicación se realizó por medio de la especificación ADS de Beckhoff, por medio de un componente que se instaló en Visual Basic Express 2010. La Figura 5 muestra un esquema general del flujo de información.

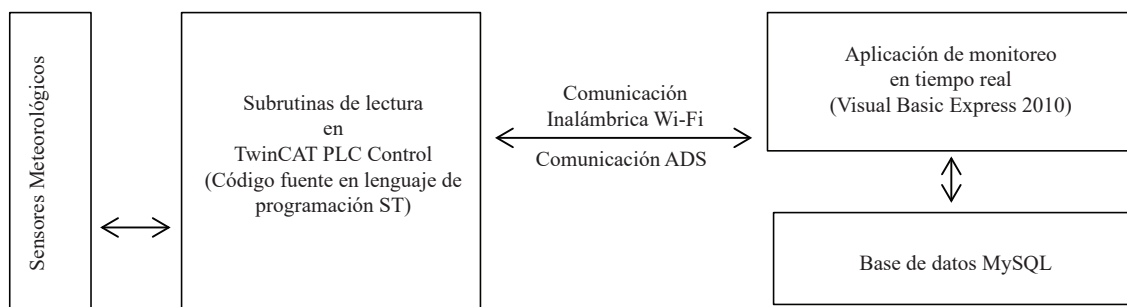


Figura 5. Diagrama del flujo de información.
Figure 5. Diagram of information flow.

Resultados y discusión

El desarrollo del sistema de adquisición de datos meteorológicas una vez que se concluyó, se probó al sensar diferentes variables atmosféricas con los sensores correspondientes. Se registraron los datos de 2013 en la base de datos MySQL; asimismo, se registraron las lecturas de los instrumentos de referencia, y posteriormente se realizó la comparativa. Es necesario, indicar que dicha comparativa sólo indica que tan similares o diferentes son los sensores que se comparan, dado que el sistema de adquisición de datos funcionó al sensar y enviar los datos.

Temperatura: este caso se compararon las lecturas del sensor HO2NVSTA1 contra la temperatura del psicrómetro ventilado tipo Assman. Se tomaron lecturas durante cuatro días, a cada hora, entre las horas comprendidas de 9:00 am a 3:00 pm y la información obtenida se ajustó a una regresión lineal, donde se obtuvo el modelo mostrado en la Figura 6. Se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2=0.9583$ que indica que existe una buena relación entre las mediciones de los sensores.

Results and discussion

The development of the system of acquisition of meteorological data once concluded was tested at different atmospheric sensing variables with the corresponding sensors. 2013 data were recorded in the MySQL database; also readings reference instruments were recorded, and then the comparison was made. It is necessary to indicate that this comparison only shows how similar or different sensors are being compared, because the data acquisition system worked when sensing and sending data.

Temperature: compared to readings of the HO2NVSTA1 sensor against Assman psychrometer ventilated type. Readings for four days, were taken every hour, between the hours ranging from 9:00 am to 3:00 pm and the information obtained was adjusted to a linear regression, where the model shown in Figure 6 was obtained was obtained a determination coefficient $R^2=0.9583$ indicating that there is a good relationship between the sensor measurements.

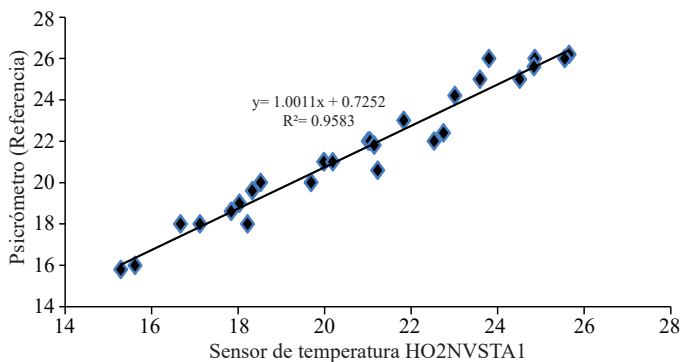


Figura 6. Relación entre en la temperatura de sensor (H02NVST1) y el termómetro seco del psicrómetro.

Figure 6. Relationship between the temperature sensor (H02NVST1) and dry thermometer of the psychrometer.

Se planteó la prueba de hipótesis $H_0: b_1=0$ y $H_a: b_1 \neq 0$ (donde b_1 es la pendiente según modelo $y=b_0+b_1x$). H_0 supone que la pendiente de la recta de la regresión lineal es igual a cero, o lo que es lo mismo, que las dos variables están incorrelacionadas. Se obtuvo (Cuadro 1) que el valor- $p= 1.81E-19 <$ nivel de significación (0.05) por lo tanto se rechazó la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que establece que la pendiente $b_1 \neq 0$ y por ende existe correlación.

Stating the hypothesis testing $H_0: b_1=0$ y $H_a: b_1 \neq 0$ (where b_1 is the slope depending on model $y= b_0 + b_1x$). H_0 . H_0 means that the slope of the linear regression line is zero, or that the two variables are in-correlated. Obtaining (Table 1) that the value- $p= 1.81E-19 <$ significance level (0.05), therefore the null hypothesis is rejected and the alternative hypothesis is accepted that sets the slope $b_1 \neq 0$ and therefore there correlation.

Cuadro 1. Regresión lineal de medición de temperatura.

Table 1. Linear regression of temperature measurement.

Estadísticas de la regresión						
Coeficiente de correlación múltiple	0.97893989					
Coeficiente de determinación R ²	0.95832331					
R ² ajustado	0.95672036					
Error típico	0.64438725					
Observaciones	28					
Análisis de varianza						
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión	1	248.248178	248.248178	597.849946	1.81E-19	
Residuos	26	10.7961081	0.41523493			
Total	27	259.044286				
	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	0.72520456	0.86093646	0.84234388	0.40727752	-1.04447568	2.4948848
Variable X 1	1.00110538	0.04094338	24.4509703	1.81E-19	0.91694506	1.08526571

Así también se realizó una prueba t (Cuadro 2) y se planteó la prueba de hipótesis $H_0: \mu_1= \mu_2$ y $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$ (donde μ_1 y μ_2 son las medias de las muestras). H_0 supone que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las muestras de temperatura. Se obtuvo que $|t_{calculada}|= 0.9138 <$ $t_{tablas}= 2.0048$ y que el valor- $p= 0.3648 >$ 0.05, por lo tanto se acepta la hipótesis nula y se afirma que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las muestras para un nivel de significancia $\alpha= 0.05$.

Also making a t-test (Table 2), establishing the hypothesis $H_0: \mu_1= \mu_2$ and $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$ (where μ_1 and μ_2 are the sample means). H_0 assumes no statistically significant between the mean temperature difference samples. It was found that $|t_{calculada}|= 0.9138 <$ $t_{tables}= 2.0048$ and that the value- $p= 0.3648 >$ 0.05, therefore the null hypothesis is accepted and affirmed that there is no statistically significant difference between the mean of the samples for a level of significance $\alpha= 0.05$.

Cuadro 2. Prueba t para medición de temperatura.
Table 2. t test for temperature measurement.

	Sensor estación	Sensor referencia
Media	20.81607143	21.56428571
Varianza	9.174083995	9.594232804
Observaciones	28	28
Varianza agrupada	9.384158399	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	54	
Estadístico t	-0.913886683	
P(T<=t) una cola	0.182419501	
Valor crítico de t (una cola)	1.673564906	
P(T<=t) dos colas	0.364839001	
Valor crítico de t (dos colas)	2.004879288	

Humedad relativa: se compararon las lecturas del sensor HO2NVSTA1 contra la humedad que se calculó a partir de la temperatura de los termómetros del bulbo seco y húmedo del psicrómetro ventilado tipo Assman, con su corrección de la tensión de vapor de agua por la presión atmosférica (Herrera *et al.*, 2012). El modelo de ajuste se muestra en la Figura 7. Se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2=0.8352$ que indica que existe una relación aceptable entre las dos mediciones.

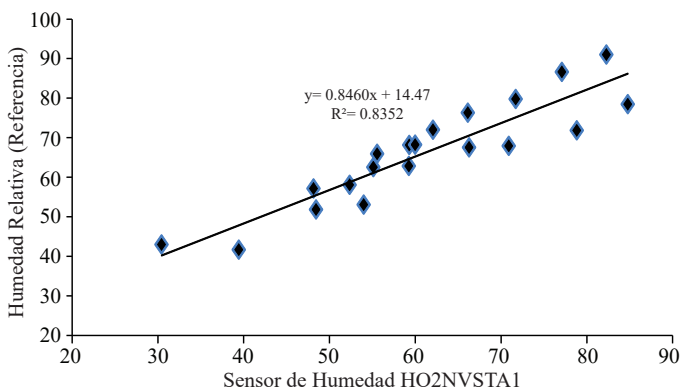


Figura 7. Relación entre la radiación de sensor (HO2NVST1) y el actinógrafo.

Figure 7. Relationship between relative humidity and estimated with the psychrometer Assman.

Se planteó la prueba de hipótesis $H_0: b_1=0$ y $H_a: b_1 \neq 0$. H_0 supone que las dos variables están incorrelacionadas. Se obtuvo (Cuadro 3) que el valor- $p=1.79E-08 <$ nivel de significación (0.05), por lo tanto se rechazó la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que establece que la pendiente $b_1 \neq 0$ y por consiguiente existe correlación entre las dos muestras.

Relative humidity: comparing the readings of the sensor HO2NVSTA1 against moisture calculated from the temperature on dry and wet bulbs thermometers of the ventilated Assman psychrometer with its correction voltage steam by the atmospheric pressure (Herrera *et al.*, 2012). The adjusting model is shown in Figure 7. Obtaining a determination coefficient $R^2=0.8352$, indicating that there is an acceptable ratio between both measurements.

Stating the test hypothesis $H_0: b_1=0$ y $H_a: b_1 \neq 0$. H_0 , which means that both variables are in-correlated. (Table 3) was obtained that the value- $p=1.79E-08 <$ significance level (0.05), so the null hypothesis is rejected and the alternative hypothesis is accepted that sets the slope $b_1 \neq 0$ and therefore A correlation between the two samples.

Also, a t-test (Table 4) was performed and, the test hypothesis was established $H_0: b_1=0$ y $H_a: b_1 \neq 0$. H_0 , which means that there is no statistically significant difference between the means of RH samples. It was found that $|t_{\text{calculated}}|=1.1797 < t_{\text{tables}}=2.0243$ and, that the value- $p=0.2454 > 0.05$, therefore the null hypothesis is accepted and affirmed that there is no statistically significant difference between the mean of the samples for a level of significance $\alpha=0.05$.

Radiation: the radiation sensor readings were compared against the bimetallic actinograph, Robitzsch type (Figure 8). From the actinograph's graph, the area under the curve

Cuadro 3. Regresión lineal de medición de humedad relativa.
Table 3. Linear regression of measuring relative humidity.

Estadísticas de la regresión						
Coeficiente de correlación múltiple	0.9139335					
Coeficiente de determinación R ²	0.83527444					
R ² ajustado	0.82612302					
Error típico	5.44274394					
Observaciones	20					
Análisis de varianza						
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión	1	2703.81217	2703.81217	91.272661	1.79E-08	
Residuos	18	533.222308	29.6234616			
Total	19	3237.03447				
	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	14.4760729	5.54630952	2.61003698	0.01772125	2.82370902	26.1284369
Variable X 1	0.84604331	0.08855687	9.55367265	1.79E-08	0.65999224	1.03209438

Asimismo, se realizó una prueba t (Cuadro 4) y se planteó la prueba de hipótesis $H_0: \mu_1 = \mu_2$ y $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$. H_0 que supone que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las muestras de humedad relativa. Se obtuvo que $|t_{calculada}| = 1.1797 < t_{tablas} = 2.0243$ y que el valor $-p = 0.2454 > 0.05$, por lo tanto se acepta la hipótesis nula y se afirma que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las muestras para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

for one-hour periods through an integrated leaf area was determined, then conversion was performed on cal/cm^2 from the conversion factor ($1 \text{ cm}^2 = 19.22 \text{ cal}/\text{cm}^2$), for finally turning W/m^2 ($1 \text{ cal}/\text{cm}^2 = 41868 \text{ W}/\text{m}^2$). Although both instruments work in different spectral range, the first in the global radiation and the second in the photosynthetically active radiation (PAR), both responses are related (determination coefficient $R^2 = 0.9815$).

Cuadro 4. Prueba t para medición de humedad relativa.
Table 4. t test for measurement of relative humidity.

	Sensor estación	Sensor referencia
Media	61.1035	66.17228031
Varianza	198.8097713	170.3702354
Observaciones	20	20
Varianza agrupada	184.5900034	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	38	
Estadístico t	-1.179775518	
$P(T \leq t)$ una cola	0.122711425	
Valor crítico de t (una cola)	1.68595446	
$P(T \leq t)$ dos colas	0.245422851	
Valor crítico de t (dos colas)	2.024394164	

Radiación: las lecturas del sensor de radiación se comparó contra el actinógrafo bimetálico tipo Robitzsch (Figura 8). A partir de la gráfica del actinógrafo se determinó el área bajo la curva para periodos de una hora por medio de un integrador de área foliar, y posteriormente se realizó conversión a cal/cm² a partir del factor de conversión (1 cm²= 19.22 cal/cm²), para finalmente convertir a W/m² (1 cal/cm²= 41868 W/m²). A pesar que ambos instrumentos trabajan en diferente rango del espectro, el primero dentro de la radiación global y el segundo dentro de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), ambas respuestas están relacionadas (coeficiente de determinación R²= 0.9815).

Se planteó la prueba de hipótesis H₀: b₁=0 y H_a: b₁≠0. H₀ que supone que las dos variables no presentan correlación. Se obtuvo (Cuadro 5) que el valor-p= 6.82E-11 < nivel de significación (0.05) por lo tanto se rechazó la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que establece que la pendiente b₁≠0 y por consiguiente existe correlación entre las dos muestras.

Cuadro 5. Regresión lineal de medición de radiación.
Table 5. Linear regression on radiation measurement.

Estadísticas de la regresión						
Coefficiente de correlación múltiple	0.99074832					
Coefficiente de determinación R ²	0.98158223					
R ² ajustado	0.97990789					
Error típico	149567.084					
Observaciones	13					
Análisis de varianza						
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión	1	1.31E+13	1.31E+13	586.249376	6.82E-11	
Residuos	11	2.46E+11	2.237E+10			
Total	12	1.34E+13				
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	73200.4785	74938.9141	0.97680196	0.34966039	-91738.9593	238139.916
Variable X 1	0.69174872	0.0285698	24.2125871	6.82E-11	0.62886702	0.75463042

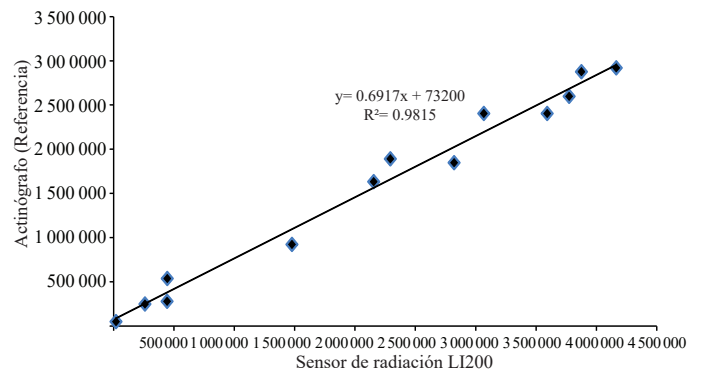


Figura 8. Relación entre humedad relativa y la estimada con el psicrómetro tipo “Asmman”.
Figure 8. Relationship between the radiation sensor (H02NVST1) and actinograph.

Stating the test hypothesis H₀: b₁=0 y H_a: b₁≠0. H₀, which means that both variables are not correlated at all. (Table 5) that the value-p= 6.82E-11 <significance level (0.05) therefore the null hypothesis is rejected and the alternative hypothesis states that the slope b₁≠0 and therefore accepted there was obtained correlation between both samples.

Precipitación: se midió la cantidad de lluvia precipitada en dos días con el sensor TE525 y el que utiliza la estación automática Campbell Scientific, obteniendo los valores similares (con una variación menor de 3%) que se indican en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Medición de lámina de precipitación.
Table 6. Measuring sheet precipitation.

Fecha	Lamina sensor Campbell mm	Lamina sensor TE525 estación mm
25/05/2013	3.5	3.5
26/05/2013	1.8	1.75

Dirección y velocidad del viento. En este caso no se compararon la magnitud y dirección del viento debido a que los sensores se configuran de manera diferente. Uno se configura para medir direcciones del viento de 0 a 355 grados (modelo 03301, de la estación automática con base en PLC) y el otro de 0 a 360 grados. En términos de velocidad instantánea del viento se obtuvo una variación en promedio de 0.2m/s de velocidad con respecto a la estación de referencia.

Así el desarrollo del sistema de adquisición de datos con base en PLC permite el sensado de las variables meteorológicas citadas además de transmitir las vía Wi-fi para su almacenamiento u otro uso.

Evaluación económica

Se realizó una comparativa económica entre la estación desarrollada contra una estación comercial Campbell Scientific, tomando sólo en cuenta los componentes para la medición de las mismas variables y monitoreo en tiempo real. El Cuadro 7 muestra el costo de la estación desarrollada con PLC (costo en pesos mexicanos), y el costo equivalente en Campbell Scientific fue de \$13 928 dólares americanos. Si se considera un precio del dólar igual a 13 pesos (octubre de 2013), se tiene un costo equivalente de \$181 064.00 pesos para la estación Campbell Scientific y de \$72 971.40 para la desarrollada con PLC, con lo que se tiene una diferencia de más de \$100 000.00 pesos, y con lo cual se concluye que el presente trabajo representa una alternativa económica a las estaciones automáticas comerciales.

Precipitation: the amount of precipitated rain was measured in two days with the TE525 sensor and automatic station using Campbell Scientific, obtaining similar values (with less variation of 3%) shown in Table 6.

Wind direction and speed. In this case, the magnitude and direction of the wind did not compare because the sensors are configured differently. One is configured to measure wind direction from 0 to 355 degree (model 03301, automatic station based on PLC) and the other from 0 to 360 degrees. In terms of instantaneous wind speed variation is obtained on average 0.2 m/s velocity relative to the reference station.

So the development of data acquisition system based on PLC allows sensing of meteorological variables besides quoted transmit via Wi-Fi for storage or other use.

Economic evaluation

An economic comparison was performed between the railway stations developed into a commercial Campbell Scientific, taking into account only the components for measuring the same variables and real-time monitoring. The Table 7 shows the cost of the station developed with PLC (cost in Mexican pesos), and Campbell Scientific equivalent cost was \$13 US \$928. If we consider a price equal dollar to 13 pesos (October 2013), it has an equivalent cost of \$181 064.00 pesos for Campbell Scientific station and \$72 971.40 for the developed PLC, which has a difference more than \$ 100 000.00 pesos, and thus we conclude that the present work represents an economical alternative to commercial automatic stations.

Conclusions

The developed acquisition system of meteorological data senses and records correctly, the readings of the weather elements: temperature, humidity, radiation, precipitation, wind speed and direction, which is an alternative to a weather station. The modular structure of the system hardware helps for an easy replacement of components in case of damage; also, the processing capacity cannot only perform functions of acquisition, but has the ability to perform other functions such as irrigation control calculating evapotranspiration, etc.

End of the English version



Cuadro 7. Precios de componentes de estación desarrollada con PLC.
Table 7. Prices of the station components developed with PLC.

Cantidad	Descripción	Unidad	Costo Unitario	Subtotal	Subtotal
PLC y componentes					
1	PLC Beckhoff CX1020	pza.	\$28,150.00	\$28,150.00	
1	Módulo de alimentación CX1100-0004	pza.	\$3,800.00	\$3,800.00	
2	Módulo de entradas analógicas EL3102	pza.	\$2,700.00	\$5,400.00	
1	Módulo de entradas analógicas EL3312	pza.	\$3,288.00	\$3,288.00	
1	Módulo de entradas digitales EL1014	pza.	\$516.00	\$516.00	
1	Módulo de bus terminal EL9010	pza.	\$215.40	\$215.40	
1	Fuente de alimentación 24 Vcd 3Amp	pza.	\$1,250.00	\$1,250.00	
1	Regulador de voltaje uA7805	pza.	\$10.00	\$10.00	
1	Interruptor termomagnético 5 Amperes	pza.	\$120.00	\$120.00	
1	Punto de acceso inalámbrico TPLink	pza.	\$650.00	\$650.00	
					\$43,399.40
Software					
1	TwinCAT	pza.	Incluido en CX1020		
1	Visual Basic 2010	pza.	Gratuito		\$0.00
Sensores					
1	Sensor de temperatura y humedad	pza.	\$4 650.00	\$4 650.00	
1	Sensor de velocidad y dirección	pza.	\$11 591.00	\$11 591.00	
1	Sensor de radiación LI-200	pza.	\$3 216.00	\$3 216.00	
1	Sensor de precipitación TE525MM	pza.	\$7 490.00	\$7 490.00	
					\$26,947.00
Materiales					
1	Gabinete Rittal	pza.	\$550.00	\$550.00	
1	Canaleta	pza.	\$150.00	\$150.00	
1	Riel DIN	pza.	\$250.00	\$250.00	
15	Clemas	pza.	\$13.00	\$195.00	
10	Cable (cableado interno)	mts	\$8.00	\$80.00	
6	Conector glándula	pza.	\$25.00	\$150.00	
1	Soporte para estación	pza.	\$1 250.00	\$1 250.00	
					\$2 625.00
				Total	\$72 971.40

Conclusiones

El sistema de adquisición de datos meteorológicos que se desarrolló sensa y registra de manera correcta la lectura de los elementos meteorológicos: temperatura, humedad, radiación, precipitación, velocidad y dirección del viento, por lo que constituye una alternativa a una estación meteorológica. La estructura modular del hardware del sistema ayuda a un fácil reemplazo de componentes en caso de daño; asimismo, la capacidad de procesamiento permite no solo realizar funciones de adquisición, sino que posee la capacidad de realizar otras funciones como control de riego, cálculo de evapotranspiración, etc.

Literatura citada

- Ahrens, C. D.; Jackson, P. L. and Jackson, C. E. 2012. *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. First Canadian Edition. Canada: Nelson Education Ltd.
- Ambaradar A. 2002. *Procesamiento de señales analógicas y digitales*. Segunda Edición. México. Thompson Editores, S. A. de C. V. 15 p.
- Beckhoff. 2013. *Hardware documentation for CX1020 / CX1030 Embedded PC*. Disponible: http://download.beckhoff.com/download/Document/EPC/CX1020_HWen.pdf Consultado el 10 de Agosto de 2013.
- Bolton W. 2009. *Programmable logic controllers*. Fifth Edition. Oxford. Elsevier Newnes. 3-4 pp.
- Ethercat. 2013. <http://www.ethercat.org>. (consultado enero, 2013).
- Günter, D. R. 2002. *Meteorología: formaciones nubosas y otros fenómenos meteorológicos, situaciones meteorológicas generales, pronósticos del tiempo*. Barcelona. Ediciones Omega.

- Herrera, V.G.; Restrepo, L.A.; Quevedo, N.A.; Crespo, P.G. y Portocarrero, R.A. 2012. Manual Teórico práctico del observador meteorológico de superficie. México. Servicio Meteorológico Nacional. CONAGUA. 70-73 pp.
- IEC 60529. 2001-2002. Degrees of protection provided by enclosures (IP Code). Edition 2.1. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- IEC 61131-3. 2013. Programmable controllers - part 3. Programming languages. Ed. 3.0. International Electrotechnical Commission.
- IEEE Std 802.3. 2005. Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers. 37 p.
- John, K. H. and Tiegelkamp, M. 2010. IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems. 2nd Edition. Germany, Springer.
- Mazzarella, D. A. 1972. An inventory of specifications for wind-measuring instruments. Bulletin of American Meteorological Society. 860-871 pp.
- NEMA I. A. 2.1. 2005. Programmable Controllers - part 1. General information. National Electrical Manufacturers Association.
- Peña, J. D.; Gámiz, C. J.; Grau, S. A. y Martínez, G. H. 2003. Introducción a los autómatas programables. Primera Edición. Barcelona, Editorial UOC. 293 p.
- Quevedo, N. A. 2005. La información meteorológica en México. Reporte noviembre para AGROASEMEX. Colegio de Postgraduados.
- Quintas, I. 2000. Fuentes de datos meteorológicos. *In*: Memorias del 5 Congreso de Meteorología de CFE. 23 y 24 de marzo, Museo Tecnológico de CFE.
- Tanner, B. D. 1990. Remote sensing reviews. Vol. 5 (1). United Kingdom. Harwood Academic GmbH. 73 p.
- Tanner, B. D. 2001. Evolution of automated weather station technology through the 1980s and 1990s. *In*: automated weather stations for applications in agriculture and water resources management: current use and future perspectives. Hubbard, K. D. and Sivakumar, M. (Eds.). WMO publication (in press). High Plains Regional Climate Center, Nebraska. University of Nebraska - Lincoln.
- WMO. 1972. Measurement of temperature and humidity. WMO-No. 759. Geneva: World Meteorological Organization.
- WMO. 1998. Technical Regulations. Volume I. Geneva. World Meteorological Organization.
- WMO. 2008. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No.8. Ed. 2008. Geneva: World Meteorological Organization.