

ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA TELE MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN EL ALMACENAMIENTO DE GRANOS

Gerardo Cázarez Ayala

Instituto Tecnológico de Los Mochis
gcazare2000@yahoo.com

Antonio Rodríguez Beltrán

Instituto Tecnológico de Los Mochis
ant_rdgz@hotmail.com

Hugo Castillo Meza

Instituto Tecnológico de Los Mochis
hcastillo74@gmail.com

Sócrates Lugo Zavala

Instituto Tecnológico de Los Mochis
socrates.lugo@gmail.com

Miguel Enrique Ramírez Montenegro

Instituto Tecnológico de Los Mochis
miguel_e_ramirez_m@hotmail.com

Jaime Fonseca Beltrán

Instituto Tecnológico de Los Mochis
jfonsecab@hotmail.com

David Martínez López

soydml@yahoo.com.mx

Resumen

El presente trabajo describe el diseño e implementación de un sistema de entrada-salida distribuido, enfocado en el monitoreo de variables en silos para el

almacenamiento de granos como una alternativa a los sistemas de monitoreo tradicionales. El sistema está basado en el protocolo de comunicación inalámbrico Digimesh, el cual permite de operar en topologías de redes en malla. Asimismo, el sistema implementa un arreglo de sensores digitales de temperatura, para el monitoreo de esta variable en el interior del silo y es capaz de detectar zonas o sectores dentro del mismo, donde ocurran cambios repentinos en la temperatura del aire entre los granos y activar el sistema de aireación. Para esto, se utiliza el sensor digital DS18B20, que opera mediante bus 1-Wire, haciendo posible un arreglo de sensores de temperatura en línea de hasta 128, logrando cubrir las necesidades de cualquier silo para el almacenamiento de granos.

El sistema consta de dos tarjetas electrónicas, la primera de ellas actúa como unidad de adquisición de datos y se basa en un microcontrolador ATmega 32U4 con bootloader Arduino. La segunda, actúa como unidad de control central y está basada en un microcomputador Raspberry PI modelo B.

El sistema actúa de manera completamente automático, procesa la información y actúa el sistema de aireación o refrigeración del silo en función de la temperatura y humedad en el ambiente exterior, para mantener la temperatura y humedad dentro del mismo en los niveles óptimos, evitando el desarrollo de micro-organismos e insectos y salvaguardando la integridad de los granos almacenados.

Palabra(s) clave(s): Adquisición de datos, digimesh, e/s distribuida.

1. Introducción

La principal actividad económica en estado de Sinaloa es la agricultura, siendo las hortalizas como el tomate, papa, calabaza y chiles algunos de los principales productos que se producen en la región. De igual manera, los granos como el maíz, frijol y trigo ocupan una gran cantidad de la tierra cultivable en Sinaloa y tan solo en el caso del maíz se cultivan un poco más de 5.5 millones de toneladas en el ciclo de otoño-invierno cada año [1], logrando con esto posicionar al estado de Sinaloa con el título de *el granero de México*, por ser el principal

productor de granos en el país. Por otro lado, la capacidad de almacenamiento de los granos cosechados es inferior a la capacidad de cultivo tan solo de maíz y sin considerar los cultivos de otros granos como: trigo, frijol y sorgo. El principal método utilizado para el almacenamiento de la cosecha de maíz y otros granos en la región y en todo el país es en base a silos verticales metálicos o de concreto, los cuales son de diversas capacidades que van hasta 80,000 toneladas de maíz, diámetros de unos cuantos metros hasta decenas de metros y alturas de los silos que superan los 50 metros.

De acuerdo a datos de la SAGARPA y las asociaciones de agricultores en el estado de Sinaloa, la capacidad de almacenamiento instalada en el estado es suficiente para la producción esperada de maíz en 2015-2016, misma que se espera supere los 6 millones de toneladas. Sin embargo, existen diversa problemática que se presenta en el manejo y cuidado del grano posterior a la cosecha, entre estas se encuentran: generación de moho, desarrollo de microorganismos en el grano, proliferación de insectos en las cosechas almacenadas y hasta problemas con roedores, entre otras. La mayoría de estas situaciones se deben principalmente al mal manejo y cuidado de las cosechas, siendo la causa principal los altos niveles alcanzados de humedad y temperatura en el aire alrededor de los granos almacenados en un silo.

El silo de almacenamiento

El silo metálico para almacenamiento de granos, es una estructura cilíndrica de diámetro y alturas diversas. Su capacidad de almacenamiento fluctúa entre unos cuantos cientos hasta decenas de miles de toneladas de granos. La capacidad de almacenamiento del silo se maneja en metros cúbicos (m^3) y su capacidad en toneladas se determina en función de la densidad del grano del cultivo del cual se trate, como pudiera ser maíz, trigo y frijol entre otros. En la tabla 1, se incluyen datos sobre las densidades típicas de los principales productos agrícolas y granos almacenados a granel en silos [2] y la humedad recomendada.

Tabla 1 Densidades de granos y humedad recomendada.

Producto	Densidad kg/m ³	Humedad recomendada
Maíz	680-720	13%
Frijol	750-850	15%
Sorgo	670-760	12.5%
Trigo	750-840	13%
Cebada	550-690	14%
Avena	500-540	14%

Afectación de temperatura y humedad

Como se mencionó anteriormente, el contenido de oxígeno, humedad y temperatura elevadas en los granos son las causas principales en la afectación de los granos almacenados. Esto puede contribuir de manera determinante para acelerar o retrasar los fenómenos de transformación bioquímica en el origen de su degradación. Se debe recordar que las cosechas o granos, son complejos agroecosistemas por la serie de interacciones producidas entre: luz, oxígeno, humedad, temperaturas y agentes bióticos (hongos e insectos que repercuten en la calidad del grano). En este sentido, los granos respiran, es decir, se produce energía y humedad, la cual tiende a acumularse en el propio lugar de la generación y conlleva el desarrollo de focos de calentamiento. Siendo esto, el primer indicio de un proceso degenerativo del grano almacenado.

Es posible determinar la influencia directa de altos niveles de humedad y temperatura en los granos almacenados sobre el ritmo de desarrollo de los insectos y microorganismos como: el moho, bacterias y levaduras. Mismos que dañan de forma dramática los granos. Asimismo, se afecta severamente el proceso de germinación precoz de los granos.

En la tabla 2, se ilustra el comportamiento de los granos almacenados, la afectación de los periodos de almacenamiento y buena conservación debido a los contenidos de humedad de los granos y el nivel de temperatura en el aire intergranular (entre granos).

Como puede observarse en la figura 1 se ilustra las curvas características para el almacenamiento y conservación segura de los granos en silos metálicos. En esta gráfica se interrelacionan la temperatura y la humedad intergranular y se destaca

que a menores niveles de humedad es posible conservar las cosechas a mayores temperaturas.

Tabla 2 Periodo de almacenamiento seguro en días.

DURACION DE ALMACENAMIENTO SEGURO EN SILO METALICO DE LOS GRANOS (DIAS).						
TEMPERATURA INTERGRANULAR						
HUM	5°	10°	15°	20°	25°	30°C
13 %				180	115	90
14 %			160	100	50	30
15 %			100	50	30	15
16 %		130	50	30	20	8
17 %		65	35	22	12	5
18 %	130	40	25	17	8	2
19 %	70	30	17	12	5	0
20 %	45	22	15	8		
21 %	30	17	11	7		
22 %	23	13	8	6		
23 %	17	10	7	5		
24 %	13	8	4	4		
25 %	10	3	6	3		

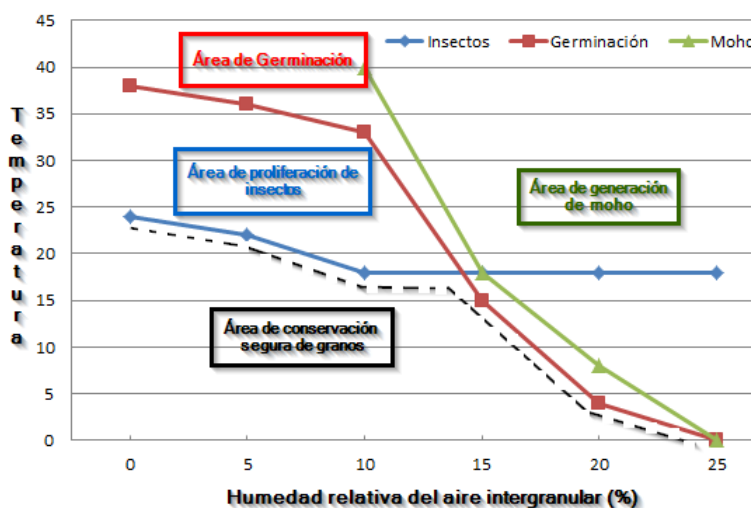


Figura 1 Gráfica para la conservación de los granos.

Antecedentes Tecnológicos

En la actualidad, existen en el mercado una diversidad de sistemas enfocados al monitoreo de la temperatura en los sistemas de almacenamiento de granos. La

gran mayoría de ellos se basa en una estructura de tres elementos básicos: sensor de temperatura, unidad de adquisición de datos y cuarto de supervisión. Entre los elementos sensores más utilizados se destacan la termocopla y termistores NTC, mediante los cuales se mide la variable y se transmite a una unidad de adquisición de datos, donde se normaliza y representa la medida en unidades de temperatura, para su posterior procesamiento en las etapas de control y manejo de alarmas. Una vez procesada la información de los sensores, estas unidades de adquisición de datos tienen la capacidad de transmitir dicha información al cuarto de supervisión en la planta, en el cual se pueden realizar tareas de procesamiento gráfico, estadístico, control, manejo de alarmas y compartir dicha información a través de Internet.

Entre esta gran variedad de sistemas sobresalen *MyTemp* e *IEA SI-61-2K7*, dos de los sistemas de monitoreo de temperatura más populares en el mercado, ambos presentan una estructura típica de controlador lógico programable, modular y expansible, con soporte de hasta siete módulos de expansión para la adquisición de datos con capacidad de hasta 256 canales (termocoplas tipo "T") cada uno, módulos de relevadores opcionales, interface eléctrica RS-485 a 2 hilos, protocolo de comunicación serial Profibus L2-DP configurable, con soporte para comunicación estándar Modbus ASCII, con las cuales es posible implementar una red de hasta 254 unidades de adquisición de datos.

Básicamente, estos sistemas realizan un rastreo de datos en intervalos programables desde cada 8.5 hasta 1440 minutos, según convenga al usuario y los datos son enviados a cuarto de supervisión para su procesamiento, representación gráfica y almacenamiento.

En cuanto a la interfaz gráfica para el operador, típicamente está conformada por plataformas SCADA tales como *Womderware In-Touch*, *US-DATA Factory Link*, *Intellution FIX*, *NI Lookout*, *Industrial LabVIEW* o cualquier otro software desarrollado a la medida que soporte el driver de comunicación MODBUS ASCII o RTU, mediante los cuales el desarrollador podrá implementar interfaces graficas intuitivas, fáciles de operar y con gran capacidad de realismo.

2. Desarrollo

Este proyecto consta de diversas etapas en su desarrollo. En estas, se diseñaron las tarjetas de adquisición de datos y la tarjeta de interface para la comunicación inalámbrica y el monitoreo de las variables de temperatura del aire y humedad relativa del ambiente. Esto con la finalidad de determinar si es apropiado el activar el sistema de aireación para insuflar aire seco al interior del silo y con esto disminuir la humedad y la temperatura dentro del mismo.

Arreglo de sensores en el silo

El sistema de monitoreo y adquisición de datos en el silo para almacenamiento de granos, se basa en un arreglo de sensores digitales de temperatura DS18B20 [3], mismos que se comunican a través de una interface digital a un solo cable, este es conocido como protocolo de comunicación 1-Wire.

Se diseñó un arreglo de sensores de temperatura interconectados en paralelo al bus de comunicación. Cada arreglo de sensores está predispuesto en líneas, en las cuales cada sensor se encuentra posicionado a una distancia de 4 metros y se cubre la altura total del silo de granos según se requiera.

De igual manera, se instalan diversas líneas de sensores con las mismas características, las cuales deberán cubrir la totalidad del espacio de almacenamiento en el silo, respetando las distancias entre sensores que deberán ser de entre 4 o 5 metros lineales en sentido vertical y entre 5 y 6 metros en dirección horizontal, lo cual representa para cada sensor en el arreglo total de sensores en el interior del silo un volumen máximo de 150 metros cúbicos. En la figura 2 se ilustra la estructura general de un silo para el almacenamiento de granos, maíz en este caso. En la misma, se destacan los arreglos de sensores de temperatura digitales, posicionados de forma vertical desde la parte superior del silo y cubriendo hasta la parte inferior del mismo. Dichas líneas de sensores son interpuestas a distancias horizontales máximas de 6 metros de otras líneas. El número de sensores por línea estará establecido por la altura del silo, siendo típico entre 30 y 40 metros de altura y el número de líneas de sensores por el diámetro o base del silo, siendo 25 metros de diámetro una medida típica.

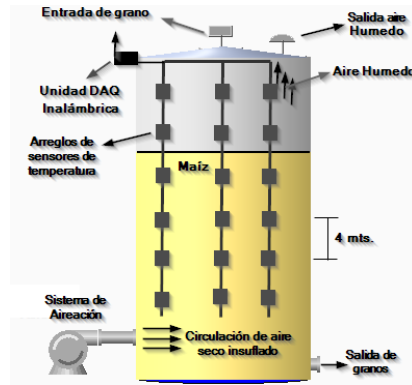


Figura 2 Estructura silo para almacenamiento de granos.

En la figura 2, se ilustra la ubicación del arreglo de líneas de sensores de temperatura superpuesto en un silo.

Esta propuesta, al igual que los sistemas tradicionales, no contempla el monitoreo de la variable humedad en el interior del silo. Debido a la existencia de polvo e impurezas entre los granos, es difícil la medición de dicha variable, ya que cualquier sensor de humedad relativa típico, presentaría lecturas erróneas o se saturaría por acción del polvo e impurezas. En los centros de acopio, la humedad se mide de forma periódica cada 30-60 días mediante sondas especiales basados en el principio de conductividad o capacitancia. Lo anterior con la finalidad de corroborar el comportamiento indicado por el sistema de medición de temperatura y su correlación con la humedad en el interior del silo.

Unidad de adquisición de datos

Se diseñó e implementó un sistema para la adquisición de datos y control, la cual está basada en una tarjeta electrónica con un microcontrolador ATmega 32U4 [4] con bootloader *Arduino* pre-cargado [5].

La función principal del sistema de adquisición de datos es la de controlar el arreglo de sensores de temperatura que se instala en el interior del silo, procesar la información y transmitirla a la tarjeta de control central del sistema. Para esto, hace uso de una interfaz de comunicación inalámbrica basada en protocolo Digimesh y el módulo de comunicación Xbee Serie 1, mediante los cuales se

implementa el sistema de control distribuido para la automatización y control del almacenamiento de granos en silos.

Dicha tarjeta desarrollada cuenta con las siguientes características:

- 1 Interfaz de comunicación USB para programación.
- 1 Socket para Módulo de comunicación inalámbrica.
- 6 canales análogos con precisión de 10 bits.
- 6 entradas-salidas digitales.
- 2 salidas PWM de 10 bits para control.
- 1 Interfaz de comunicación serial RS-485 half dúplex.
- Salidas de voltaje acondicionado 5v y 3.3 V.

En la figura 3 se ilustra el diseño PCB de la interfaz para la adquisición de datos y control implementada y se destaca el microcontrolador base de la tarjeta y el socket para instalación del módulo de comunicación inalámbrica, típicamente Xbee Digimesh [6], mismo que pudiera ser cualquier otro con factor de forma Xbee. Esta tarjeta es similar en características generales a *Arduino Fio* a excepción de que *Arduino Fio* está basada en un microcontrolador ATmega 328P, corre a 8Mhz, maneja niveles lógicos de 3.3 volts y la organización del pinout de la tarjeta es diferente al sistema propuesto.

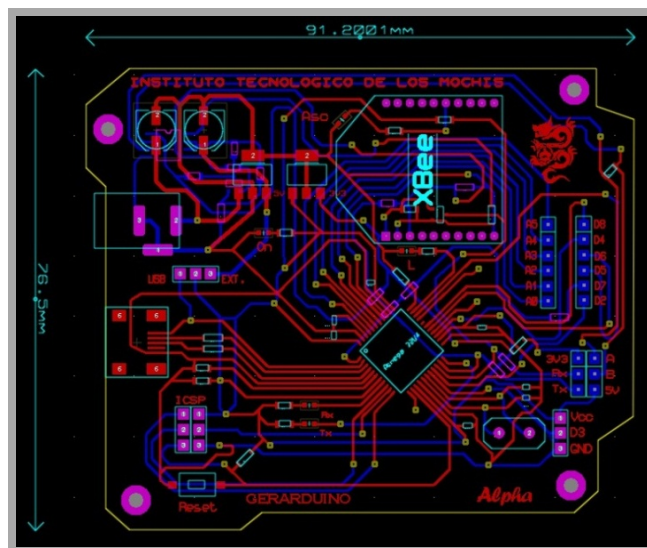


Figura 3 PCB tarjeta para adquisición de datos y control.

En la figura 4 se ilustra la tarjeta de adquisición de datos y control completamente terminada. Se destaca, el microcontrolador ATmega 32U4 instalado y el módulo de comunicación inalámbrica Xbee en la parte superior. Aquí se destaca la interface USB micro de la tarjeta requerida para efectos de programación de la misma. Cabe mencionar que esta tiene como función básica en el sistema de monitoreo y control de temperatura y humedad en el silo la toma de datos del arreglo de sensores digitales y de ser necesario puede actuar como unidad de control.



Figura 4 Unidad de adquisición y control.

En su función como sistema de adquisición de datos, adquiere los datos de los sensores de temperatura DS18B20 y determina los valores promedio por nivel del silo, es decir, un nivel equivale del silo equivale a el promedio de los sensores de todas las líneas que se encuentran en la misma altura. Una vez determinados los valores de temperatura medios de cada uno de los niveles, estos son transmitidos de forma inalámbrica a la *Unidad Central* del sistema, la cual se basa en un microcomputador Raspberry PI [7, 8].

Cuando la tarjeta electrónica se encuentra actuando como unidad de control, se hace uso de una salida digital con una interfaz de potencia para actuar el sistema de aireación. El sistema de aireación se basa en un ventilador y motor trifásico de 30 amperes. Este sistema, es el encargado de insuflar aire seco (con humedad

menor al 60%¹) del exterior al interior del silo. Este aire insuflado a presión, viaja a través de los granos de maíz, expulsando el aire intergranular húmedo hacia la parte superior del silo y posteriormente expulsándolo a través de una escotilla de salida. Todo esto sucederá, solamente si la humedad exterior ambiental es menor de 60%¹. Es durante las noches, cuando se presenta esta condición. De otra manera, se estaría agregando humedad del exterior al interior del silo.

La unidad de adquisición de datos opera de forma particular en cinco modos de operación básicos, en los cuales desarrolla las diferentes tareas requeridas en el sistema. En la figura 5, se observa un diagrama de flujo de estados el cual describe la funcionalidad de esta unidad.

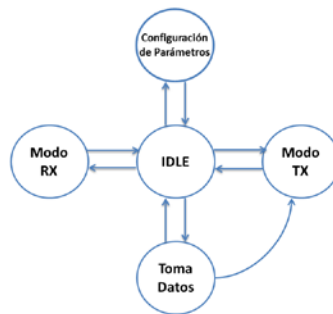


Figura 5 Diagrama de flujo.

El estado de No Operación (IDLE), es el estado en el cual la unidad DAQ se encontrará todo momento en el cual no realiza tarea alguna, solo se encuentra en espera de que ocurra algún evento para atenderlo. Cabe destacar que no se encuentra en algún estado de ahorro de energía o dormido, por las características de la aplicación. En el estado de configuración de parámetros se lleva a cabo el establecimiento de los parámetros para el procesamiento de los datos como lo es establecimiento de los intervalos de muestreo de sensores y de transmisión de datos a la unidad de control central, entre otros.

Modo de recepción, es el estado en el cual se reciben y procesan los paquetes de información que llegan a través del enlace inalámbrico y son decodificados en función de la diferentes comandos establecidos para el muestreo de datos,

¹ SAGARPA establece 70% de humedad relativa del aire como máximo para activar aireación en el Silo de almacenaje. En la zona costera del norte de Sinaloa, la mayoría de los centros de acopio y almacenaje operan con el 60% como límite por motivos de seguridad.

establecimiento de intervalos de envío de la información a la unidad de control central u órdenes de muestreo de datos en demanda, entre otros.

Al modo de toma de datos se accede mediante dos eventos: por evento del intervalo de muestreo o por comando de muestreo en demanda. El primero de ellos se basa en un temporizador el cual dispara el evento y se accede a la adquisición de los datos y al procesamiento de la información. En el segundo caso, se debe a un comando que se recibe desde la unidad de control central y obliga a la unidad DAQ a la toma de datos y transmisión de los mismos.

El modo de transmisión de la unidad se accede mediante dos eventos: el intervalo de transmisión de datos establecido y por un comando de toma de datos en demanda. El primero de ellos puede ser igual en tiempo al establecido en el intervalo de muestreo periódico. Un comando de muestreo en demanda obliga a una transmisión de los datos de forma inmediata.

Unidad de control central

El sistema distribuido inalámbrico cuenta con una tarjeta de control central, cuya funciones básicas en el sistema son: concentrar la información del estado de la temperatura en el interior de los silos para el almacenamiento de granos, realizar las acciones de control, generar los comandos o secuencias de activación de los sistemas de aireación para ser enviados a las unidades de control en particular y atender las necesidades de requerimientos de información de las aplicaciones clientes que soliciten información del proceso a través de enlaces Ethernet.

La unidad de control central, se basa en un microcomputador Raspberry PI modelo B, la cual es una computadora de tamaño reducido y altas prestaciones operando bajo una distribución ligera del sistema operativo Linux. Así mismo, se diseñó e implementó una tarjeta electrónica cuya función básica es la de actuar como interface de sensores y entradas-salidas para la Raspberry PI. Esta tarjeta desarrollada fue basada en un microcontrolador ATmega 32U4 con bootloader Arduino y contiene sensor de humedad relativa del aire, sensor de temperatura y un sinfín de entradas análogas, entradas-salidas digitales para manipulación de

sensores y actuadores si es el caso. Lo anterior con motivos de centralizar las funciones de alto nivel al computador Raspberry y la interface con sensores ambientales, actuadores e interface de comunicación inalámbrica a la tarjeta interfaz desarrollada.

Cabe destacar, que esta tarjeta de interfaz forma parte de lo que llamamos *Unidad de Control Central* en conjunto con la Raspberry PI y la comunicación entre las dos se lleva a cabo por medio de una conexión serial I²C, actuando la Raspberry como Maestro y la tarjeta basada en Arduino como Esclavo.

En la figura 6 se ilustra la tarjeta de interfaz de la unidad de control central y destacan el microcontrolador en el cual se basa, el sensor de humedad y temperatura ambiental, socket del módulo de comunicación e interfaces de entradas-salidas digitales y entradas análogas.

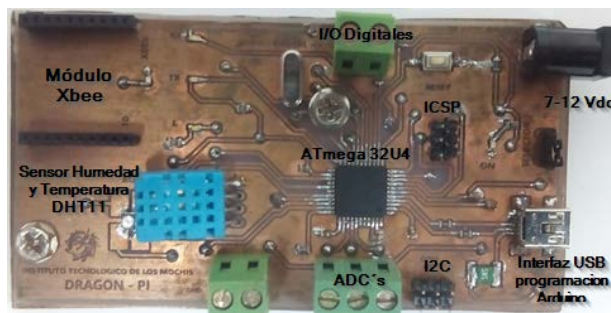


Figura 6 Tarjeta Interfaz Unidad de Control Central.

En la figura 7, se muestra la unidad de control central, constituida por la tarjeta Raspberry PI y la tarjeta de interfaz desarrollada.

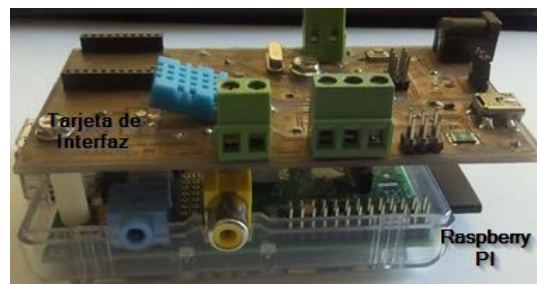


Figura 7 Unidad de Control Central.

En esta unidad de control central, la tarjeta Raspberry es la unidad maestra y es la encargada de concentrar toda la información de estado de las variables en los

silos de almacenamiento de granos, se comunica con la unidades de adquisición de datos a través de un módulo de comunicación inalámbrica en el socket Xbee dispuesto en la tarjeta interfaz, en esta misma tarjeta, se cuenta con un sensor DHT11 para medir la temperatura y humedad relativa del medio ambiente y es en base a la humedad exterior del silo como se determina activar el sistema de aireación, es decir, el sistema se activa solamente si la condiciones de temperatura en el interior del silo lo requiere, si y solo si la humedad del ambiente exterior es menor del 60%. Lo anterior para evitar ingresar aire húmedo al interior del silo y afectar la calidad del grano almacenado.

Cabe destacar que la tarjeta de control central puede concentrar la información de múltiples unidades de adquisición de datos, donde cada una de ellas, adquiere los datos de un silo en particular, por lo cual, el sistema puede monitorear y controlar una batería o conjunto de silos para el almacenamiento de granos dispuestos en el área geográfica de la aplicación.

De igual manera, la unidad central, tiene la capacidad operar de forma automática monitoreando el estado de los silos y generando las secuencias de control para activar los sistemas de aireación del silo que así lo requiera. También, es capaz de permitir el monitoreo y la supervisión remota del proceso a través de enlaces Ethernet desde aplicaciones cliente desarrolladas con tal motivo.

En la figura 8 se ilustra el sistema de control distribuido, aplicado en una batería de silos para el almacenamiento de granos, se destacan las unidades de adquisición de datos DAQ inalámbrica, la unidad de control inalámbrica y la unidad de control central basada en la Raspberry PI, las cuales se comunican a través de la red inalámbrica basada en Digimesh. Una vez los datos son concentrados en la unidad de control central, estos están disponibles para las aplicaciones clientes a través de Ethernet o WiFi en la Raspberry.

En la figura 9 se ilustra un diagrama de flujo que describe en forma general la funcionalidad del software desarrollado para operar en la unidad de control central. Básicamente, la unidad de control central opera en un ciclo infinito al cual se entra una vez que es determinada la existencia de unidades de adquisición de datos en la red Digimesh. Para esto, al iniciar operaciones la unidad central establece los

parámetros por defecto del sistema de monitoreo de temperatura, tales como periodo de muestreo de datos de las unidades de adquisición de datos, intervalo de envío de paquetes de información a la unidad central, modos de operación de las unidades DAQ entre otros. Posteriormente lleva a cabo el procedimiento de descubrimiento de unidades DAQ en la red, para esto, transmite un paquete de descubrimiento de nodos en la red (comando 20), mismo que interpretado por la totalidad de unidades presentes en la red, quienes responden con paquete de muestreo de datos genérico. De no encontrarse elementos en la red, la unidad central continúa intentando descubrir nodos en la red.

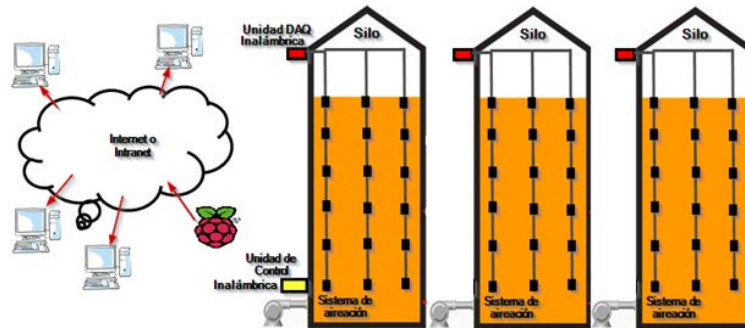


Figura 8 Sistema de control distribuido múltiples silos.

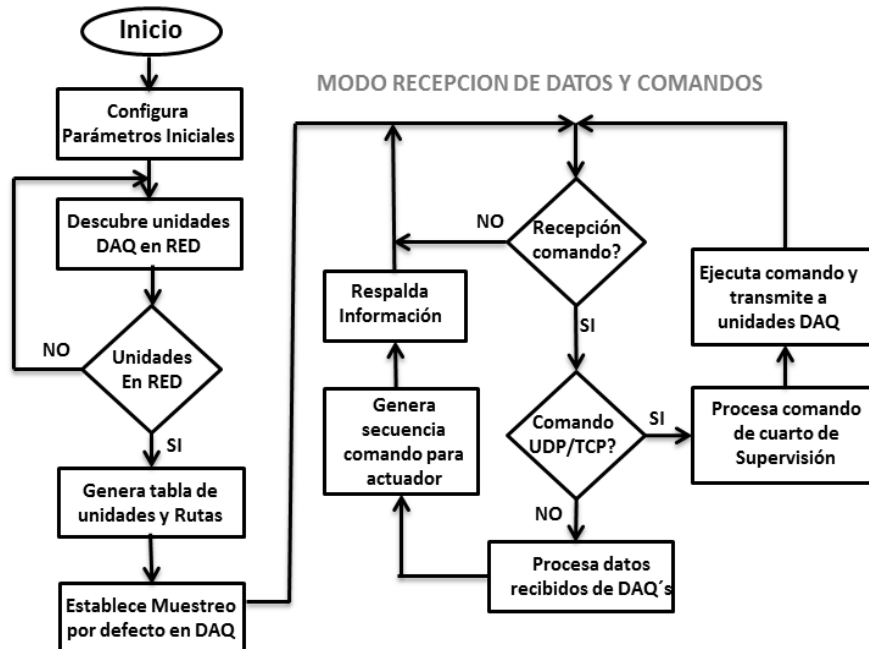


Figura 9 Diagrama flujo funcional de unidad de control central.

Una vez descubierta la red, genera tabla de unidades presentes en la red y establece las rutas críticas de ser necesarias.

Posterior a esto, la unidad central entra al modo de recepción, el cual consiste en un ciclo infinito, donde espera la recepción de comandos desde el cuarto de supervisión a través de enlaces UDP/TCP, o paquetes de información provenientes de las unidades DAQ por medio de su interfaz inalámbrica Digimesh.

Protocolo de comunicación

Las unidades central y de adquisición de datos y control en el sistema se comunican a través de la red inalámbrica y hacen uso de un protocolo de comunicación basado en secuencias en símbolos ASCII. En la ecuación 1, se describe el formato general del protocolo de comunicación diseñado para que la unidad central (Raspberry PI) envíe comandos u órdenes sobre tareas a realizar las unidades de adquisición de datos y control.

$$\begin{array}{ccccccc} 1 & 1 & 1-3 & 2 & & N & \\ \text{byte} & \text{byte} & & & & \text{bytes} & \\ \langle \text{Marca Inicio} \rangle & \langle \text{Tamaño} \rangle & \langle \text{sil} \rangle & \langle \text{CMD} \rangle & \langle \text{ARGUMENTOS} \rangle & & \end{array} \quad (1)$$

En las ecuaciones 2 y 3 se describe la respuesta a un comando de toma de muestras enviado por la unidad central a una unidad de adquisición de datos y control.

$$\begin{array}{cccccccc} 1 & 1 & 1-3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ \langle \text{M} \rangle & \langle \text{T} \rangle & \langle \text{sil} \rangle & \langle \text{TN1} \rangle & \langle \text{TN2} \rangle & \langle \text{TN3} \rangle & \langle \text{TN4} \rangle & \langle \text{TN n} \rangle \end{array} \quad (2)$$

$$\sim \text{S1/25.6/26.0/26.5/26.0/26.5/27.0/26.0} \quad (3)$$

Cabe destacar que la marca de inicio del paquete denotado en las ecuaciones 1 y 2 como M, es fija es representada por el símbolo tilde (~). Asimismo, el byte correspondiente al campo de tamaño es el símbolo ASCII que corresponda al número de caracteres en la secuencia, contados a partir del número de la unidad y hasta el fin de la secuencia y es mediante este, la manera de proporcionar a las unidades de control y adquisición de datos un mecanismo para determinar la cantidad de bytes a leer en el buffer de recepción serial.

El campo correspondiente a <sil> o unidad destino-origen, está determinado por 1 a 3 caracteres ASCII (tabla 3) y describe el origen o destino del paquete de datos, el cual puede tratarse de un comando a ser ejecutado en las unidades de control y adquisición o en su defecto de un paquete de datos muestreados en la unidad origen indicada en este campo.

Tabla 3 Códigos de comandos en protocolo de comunicación.

Descripción del comando	Código del Comando	Secuencia ASCII generada por el comando
Descubrimiento de nodos en red	<20>	<M><T><255>/<20> ~♣255/20
Muestreo de datos por demanda	<21>	<M><T><11>/<21> ~♣11/21
Muestreo Periódico	<22>	<M><T><11>/<22>/<30> ~■11/22/30
Respuesta a comando de muestreo de datos (por demanda y periódico)		<M> <T> <sil>/<TN1>/<TN n> ~←11/26.0/26.5/25.6/25.0/25.5
Set actuador	<23>	<M><T><11>/<23>/<2> ~•11/23/2
Reset actuador	<24>	<M><T><11>/<24>/<2> ~•11/24/2
Set PWM	<25>	<M><T><11>/<25>/<2>/<valor> ~♂11/25/2/100

3. Pruebas y resultados

El sistema de control distribuido inalámbrico fue sometido a diversas pruebas entre las cuales se destacan las pruebas de comunicación en la red inalámbrica y la prueba de adquisición de datos.

La primera de ellas comprendió en el sistema de datos instalado en un silo para el almacenamiento de maíz, en el cual se instaló una unidad de adquisición de datos con un arreglo de sensores de temperatura en 5 líneas con 6 sensores cada una de ellas. La prueba de comunicación consistió en tomar la muestra de datos del arreglo de los 30 sensores de temperatura y transmitirlos a la unidad de control central cada 2 minutos durante 48 horas continuas, lo cual llevó a un total de 1440 operaciones de comunicación de datos en la red inalámbrica Digimesh y almacenadas en archivo de texto con hora y fecha. Cabe destacar que de acuerdo a los registros de las operaciones de comunicación en la red la tasa de éxito fue del 100%, asimismo, en la cobertura de la red del sistema bajo prueba

coexistió con una red inalámbrica basada en WiFi configurada para operar en el canal 1(2.401 a 2.423 GHz), el cual incluye la frecuencia de trabajo configurada en la red de comunicación Digimesh Canal “C” (2.4155 a 2.4185 GHz). Lo anterior con la finalidad de determinar la robustez de la red de comunicación establecida entre la unidad DAQ, la unidad de control y la Unidad de control Central basada en Raspberry PI. En cuanto a la prueba de adquisición de datos, esta fue realizada en el interior del silo para el almacenamiento de granos completamente vacío y sellado y los valores promedio de temperatura obtenidos en cada nivel del silo presentaron una desviación de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ con respecto a las lecturas y registros del sistema de monitoreo tradicional basado en termo-coplas. Para esto, se determinó el valor promedio de todos los sensores en el silo que se encontraban a la misma altura en cada una de las líneas de sensores, por lo cual, se obtienen 6 niveles compuestos por 5 sensores DS18B20 que registran las temperaturas del silo a esa altura y el promedio de los valores de todos estos equivalen al valor registrado como promedio de temperatura del nivel. En la figura 10 se ilustran los resultados obtenidos de las temperaturas en un día.

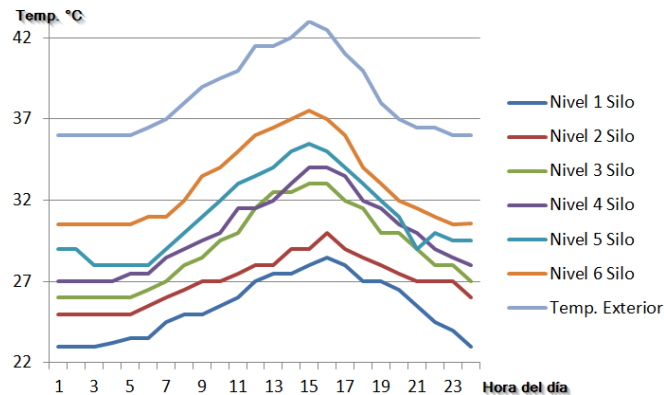


Figura 10 Lecturas de Temp. Promedio por hora/nivel en silo.

4. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas podemos apreciar que el sistema desarrollado cuenta con un grado de precisión aceptable y creemos que la desviación en los datos obtenidos de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ se deben principalmente al margen de error natural del sensor utilizado DS18B20, el cual,

al ser un sensor digital, carece de un mecanismo o método para ajuste y/o calibración. En cuanto a la tasa de éxito del 100% de la prueba de comunicación en la red inalámbrica, esta muestra el alto grado de confiabilidad de este tipo de redes y del protocolo de comunicación Digimesh. Cabe destacar, que en la prueba de comunicación en la red inalámbrica se propició la coexistencia de otra red inalámbrica en el mismo espectro de frecuencia, con la finalidad de que la prueba de comunicación se realizara bajo estrés y permitiera observar el grado de robustez de este tipo de redes, como en [9, 10, 11].

En este sentido, el sistema alternativo propuesto lleva a cabo la misma tarea de monitoreo de temperatura que los sistemas tradicionales disponibles en el mercado, haciendo uso de la misma estructura de configuración de sensores dispuestos en cables acerados colgando desde el domo superior del silo, pero utilizando sensores de temperatura digitales en vez de termocoplas o termistores, los cuales cuentan con capacidad de comunicarse en red a través de un solo hilo de comunicación (1-Wire), más precisos, sin necesidad de calibrarse, más confiables y económicos. Este sistema utiliza una unidad de adquisición de datos basada en la plataforma Arduino, con la capacidad de operar en redes malladas y de manejar de forma eficiente un arreglo de sensores de hasta 128 a través de un solo hilo, suficientes para cubrir las necesidades de un silo de almacenamiento. Esto a diferencia de los sistemas tradicionales que requieren de un gran número de canales analógicos (uno por cada sensor, con precisión de 16 – 24bits) para adquirir la variable, además del tiempo y recursos requeridos para normalizar dichas medidas, lo cual en el sistema propuesto es completamente transparente para la unidad de adquisición, en el sentido de que al utilizar un sensor digital este transmite la información ya normalizada.

En cuanto a la estructura física de los sistemas tradicionales, basados en PLC, modulares y expansibles, se requiere utilizar gabinetes de protección para los módulos del CPU y canales analógicos y debido a su gran tamaño, estos gabinetes tradicionalmente se instalan en piso al pie del silo, estos sistemas tienen capacidad para manejar múltiples silos. Esta ubicación de la unidad de adquisición

de datos a larga distancia de los sensores, puede generar un inconveniente en la lectura de datos de alguno de los silos.

El sistema propuesto, está concebido para que la unidad de adquisición de datos sea ubicada en el domo superior del silo y una en cada uno de los silos, en el caso de múltiples silos en la planta, ya que por su pequeño tamaño permite ser montada dentro de un pequeño gabinete de protección lo más cercanamente posible del arreglo de sensores y por medio de su puerto de comunicación inalámbrica transmitir los datos a la unidad central y de control única en el sistema. El sistema incluye una unidad de control central y procesamiento de información, basada en un microcontrolador Raspberry Pi provista de comunicación inalámbrica, a través de la cual interactúa con las unidades de adquisición de datos, quienes transmiten los datos adquiridos para que sean procesados, representados de forma gráfica y almacenada según se desee.

Esta propuesta presenta múltiples características y beneficios respecto a los sistemas tradicionales en el mercado, entre los cuales destacan: tecnológicamente actualizado, comunicación inalámbrica y capacidad de operar en redes malladas, tamaño reducido, menor peso, unidades de adquisición de datos fáciles de ubicarse en puntos elevados, unidad central única para concentrar toda la información del sistema y enviarlo de forma segura a cuarto de control, mucho más económico, básicamente una fracción del costo de los sistemas tradicionales.

Finalmente, esperamos que con la implementación de este tipo de sistemas se permita optimizar la automatización y el monitoreo de los granos almacenados y conlleve a la reducción de los costos de operación en el cuidado de los granos almacenados en base a la inversión en el sistema de monitoreo y su mantenimiento, como por la detección temprana de incrementos de temperatura y humedad en el interior del silo. A pesar de que este el sistema aún se encuentra en una etapa de prueba y en su primer prototipo, se está trabajando en incrementar el grado de confiabilidad y robustez del sistema, con la finalidad de que en un futuro cercano sea posible su comercialización en las empresas en el ramo.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Almacenamiento y conservación de granos y semillas, SAGARPA, Subsecretaria de desarrollo rural. México. 2011.
- [2] H. Castro García, E. Paredes Hernández, Manual para el manejo de granos almacenados en silos metálicos y plagas en postcosecha. 2009. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- [3] DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Rev.: 042208, Maxim Integrated. <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Marzo 2016
- [4] ATmega 32U4 microcontroller Datasheet, Atmel Corporation. http://www.atmel.com/Images/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32U4_Datasheet.pdf. Marzo 2016.
- [5] Massimo Banzi, Introducción a Arduino. 2012. ORELLY-ANAYA. España.
- [6] XBee®/XBee-PRO® DigiMesh™ 2.4 RF Modules Datasheet. Digi International Inc. USA. 2010.
- [7] Maik Schmidt, Raspberry Pi, A quick-Start Guide. Second Edition. 2014. USA.
- [8] Simon Monk, Programming the Raspberry Pi, Getting Started with Python. 2013. USA. McGraw-Hill.
- [9] F. L. Lewis, Wireless Sensor Networks, Smart Environments: Technologies, Protocols and Applications. 2004. ed. D. J. Cook and S. K. Das, John Wiley. New York.
- [10] J. de D. Benítez, G. M. Gloza, E. O. Sosa, D. Godoy, “Conectividad WSN: Implementación de un Middleware WSN-IP-WWW”, XV Workshop de investigadores en ciencias de la computación. Paraná. 2013.
- [11] E. Doebeling, Measurement systems: application and design. 1976. McGraw Hill. New York. Pag. 772.

6. Autores

M.C. Gerardo Cázarez Ayala obtuvo su título de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Instituto Tecnológico de Chihuahua.

Antonio Rodríguez Beltrán obtuvo su título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por el Instituto Politécnico Nacional.

Hugo Castillo Meza obtuvo su título de Ingeniero en Electrónica y Sistema Automáticos de Control, en el Instituto Tecnológico de Mazatlán.

Sócrates Lugo Zavala obtuvo su título de Ingeniero en Electrónica en el Instituto Tecnológico de Los Mochis.

M.I.I. Miguel Enrique Ramírez Montenegro obtuvo su título de Maestría en Ingeniería Industrial con especialidad en automatización por el Instituto Tecnológico de Los Mochis.

Jaime Fonseca Beltrán obtuvo su título de Ingeniero Electrónico en Sistemas Digitales por el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez.

David Martínez López, alumno del noveno semestre de la carrera de Ingeniería en Electrónica del Instituto Tecnológico de Los Mochis.