

## SISTEMA DISTRIBUIDO INALÁMBRICO PARA LA SUPERVISIÓN DE SILOS PARA EL ALMACENAMIENTO DE GRANOS

Cázares Ayala Gerardo, Rodríguez Beltrán Antonio, Ramírez Montenegro Miguel, Lugo Zavala Sócrates, Castillo Meza Hugo, Fonseca Beltrán Jaime, Cota Arredondo Eduardo.

Instituto Tecnológico de Los Mochis

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Blvd. Juan de Dios Batiz Paredes y 20 de Noviembre s/n, Sector Centro, c.p. 81259, Los Mochis, Sinaloa.

Tel. +52 (668) 8125858 ext. 247

e-mail: [gcazares2000@yahoo.com](mailto:gcazares2000@yahoo.com), [hcastillo74@gmail.com](mailto:hcastillo74@gmail.com), [miguel\\_e\\_ramirez\\_m@hotmail.com](mailto:miguel_e_ramirez_m@hotmail.com)

### 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 un protocolo de comunicación inalámbrico; Digimesh y es capaz de operar en topologías de redes en malla. Asimismo, el sistema implementa un arreglo de sensores de temperatura para el monitoreo de esta variable en el interior del silo y es capaz de detectar zonas o sectores dentro del silo con cambios repentinos en la temperatura del aire entre los granos y activar el sistema de aireación. Para esto, se utiliza el sensor digital DS18B20, el cual opera mediante bus 1-Wire, haciendo posible un arreglo de sensores de temperatura en línea de hasta 128, logrando cubrir las necesidades para cualquier silo para el almacenamiento de granos.

El sistema consta de dos tarjetas electrónicas, donde 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.

Palabras claves: Adquisición de Datos, E/S distribuida, Digimesh.

### ABSTRACT.

This paper tries to describe the design and implementation of a distributed I/O system focus in the grain house variables monitoring as an alternative to the traditional monitoring systems in the grain storage applications. The system is based in a wireless communication protocol; Digimesh and is able to operate in complex topologies networks like mesh. In the same way, the system implemented a temperature sensor array for monitoring of this variable in all the inside area of the grain house and is capable of detect areas with suddenly change of the air temperature between the grains and active the dry-aeration system, contributing with this to low the temperature and humidity of the grains in the grain house.

With this objective, the DS18B20 digital thermometer sensor is used, being possible a temperature sensors array up to 128 units, achieving to cover the needs of any grain house.

The system is based in two electronics boards where the first one act likes as data acquisition unit and is based in ATmega 32U4 microcontroller with Arduino bootloader. The second electronic

board of the system act as a central control unit and is based in a Raspberry PI model B microcomputer.

The system act in completely automatic way, process the information to manipulate the dry-aeration or refrigeration system of the grain house, all that in function of the temperature and humidity of the environment with the objective of keep the temperature and humidity inside the grain house in appropriate values, avoiding with this the development of microorganism and insects and safeguard the integrity of the storage grains.

Keywords: Data Acquisition, distributed I/O, Digimesh.

### 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 el estado de Sinaloa el título el *granero de México* por ser el principal productos 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 metálicos verticales o de concreto, los cuales son de diversas capacidades que van hasta 80,000 toneladas de maíz, diámetros entre 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. Sin embargo, existe diversas problemáticas que se presentan en el manejo y cuidado de los granos posterior a la cosecha, entre los cuales 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 el silo.

### 1.1. 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%

### 1.2. Afectación de temperatura y humedad.

Como se mencionó anteriormente, el contenido de oxígeno, humedad y temperatura elevadas en los granos son las dos 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). En México, la SAGARPA, se establece el contenido de humedad de 13%, como base-máximo en el

proceso de recepción de las cosechas en los centros de acopio y almacenamiento. El cual se aplica en las zonas agrícolas del país. Cabe destacar que de excederse este límite, la cosecha entregada deberá ingresar al proceso de secado artificial previo a su almacenamiento. De igual forma, para este nivel de humedad del grano y almacenado a una temperatura de  $20^\circ C$  se alcanza el considerado como máximo periodo de almacenamiento de 180 días. Si consideramos que las cosechas de granos típicamente son industrializadas para elaboración de diferentes productos como harina de maíz, trigo, alimento para el ganado, etc. y difícilmente se excede este periodo de almacenamiento.

Tabla 2. Periodo de almacenamiento seguro en días  
 DURACION DE ALMACENAMIENTO SEGURO EN SILO METALICO DE LOS GRANOS (DIAS).

	TEMPERATURA INTERGRANULAR					
HUM	$5^\circ C$	$10^\circ C$	$15^\circ C$	$20^\circ C$	$25^\circ C$	$30^\circ C$
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		

Como se puede observar 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. De lo cual se deduce, que el tiempo de almacenamiento y la conservación de su calidad están estrechamente correlacionados con los contenidos de humedad y temperatura de la masa de granos. En este sentido, un incremento de temperatura en cualquier sector del silo de almacenamiento corresponde a una mayor actividad microbiana, lo cual puede llegar a afectar de forma considerable al grano.

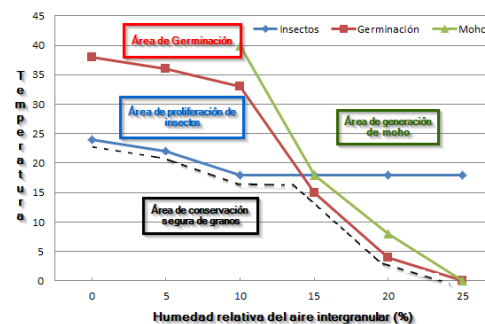


Figura 1. Gráfica para la conservación de los granos.

Este comportamiento interrelaciona las variables de temperatura del grano y humedad intergranular.

Se destacan 4 zonas principales, en la cual, es posible llevar a cabo una buena conservación de las cosechas. Además, aquellas en donde se favorece la proliferación de insectos, moho e inclusive la germinación de los granos almacenados.

La parte baja de la línea punteada, es el área de conservación segura. En esta, se correlacionan la humedad y temperatura intergranular en niveles bajos. Por otro lado, la parte superior a cualquiera de las otras curvas, demarca el área en las cuales es probable la proliferación de insectos, generación de moho y hasta germinación de las semillas.

## 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.

### 2.1. 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 se comunican a través de una interface digital a un solo cable, este es conocido como protocolo de comunicación 1-Wire.

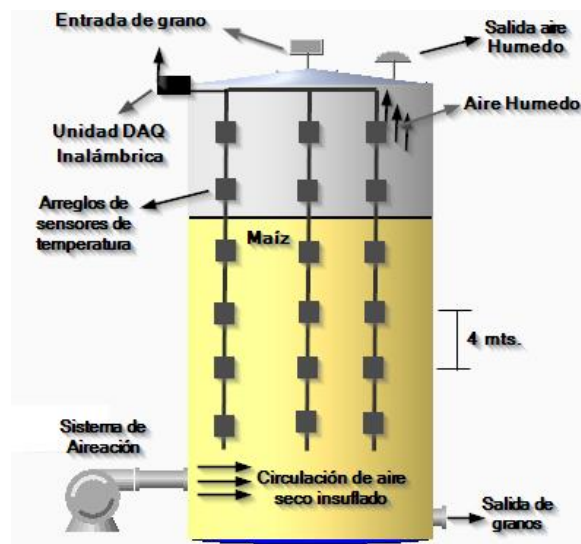


Figura 2. Estructura silo para almacenamiento de granos

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 distancia 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 ella, 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 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.

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.

### 2.2. Unidad DAQ (Data Acquisition).

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].

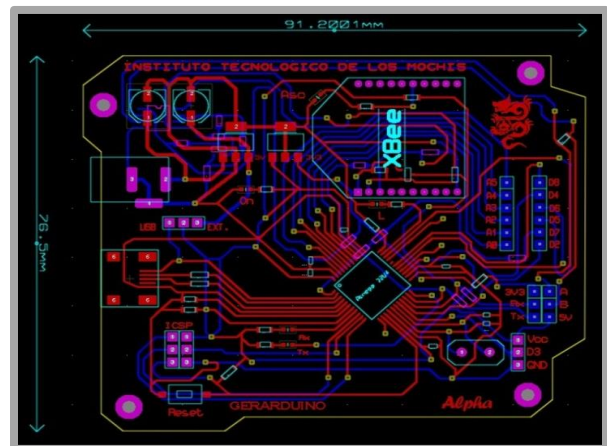


Figura 3. PCB tarjeta para adquisición de datos y control.



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 3.3v

En la figura 3 se ilustra el diseño PCB de la interfaz para la adquisición de datos y control implementada y se destacan el microcontrolador base de la tarjeta y el socket para instalación del módulo de comunicación inalámbrica, típicamente Xbee Digimesh [6], pero el cual 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.

En la figura 4 se ilustra la tarjeta de adquisición de datos y control completamente terminada. Se destacan, 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.

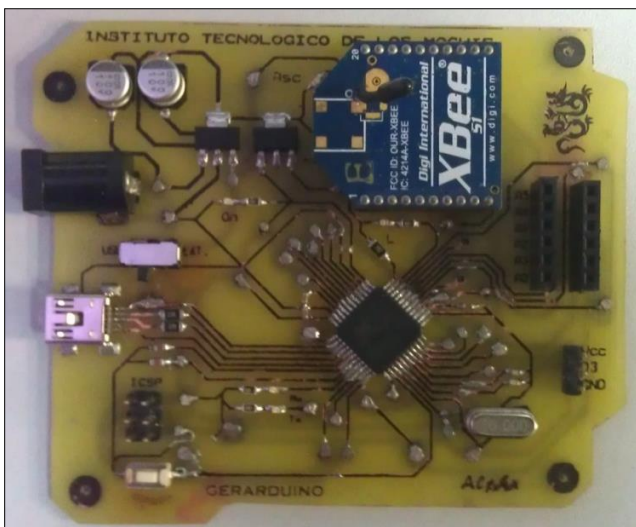


Figura 4. Unidad de adquisición y control

Cabe mencionar que esta interfaz realiza dos (2) funciones básicas en el sistema de monitoreo y control de temperatura y humedad en el silo de almacenamiento de granos: 1.- Adquisición de los datos del arreglo de sensores de temperatura y 2.- La manipulación del actuador o sistema de aireación.

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%<sup>1</sup>) 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%<sup>1</sup>. Es durante las noches, cuando se presenta esta condición. De otra manera, se estaría agregando humedad del exterior al interior del silo.

### 2.3. 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.

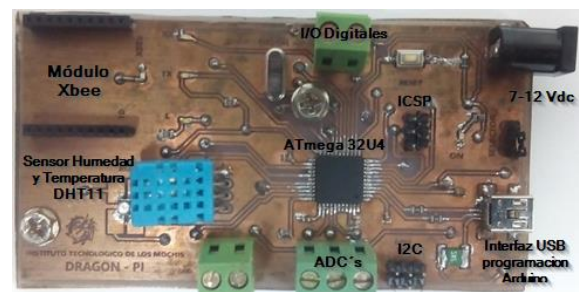


Figura 5. Tarjeta Interfaz Unidad de Control Central

<sup>1</sup> 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.

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 sinnúmero de entradas analógicas, 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 I<sup>2</sup>C, actuando la Raspberry como Maestro y la tarjeta basada en Arduino como Esclavo.

En la figura 5 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 analógicas.

En la figura 6, se muestra la unidad de control central, constituida por la tarjeta Raspberry PI y la tarjeta de interfaz desarrollada.



Figura 6. 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 las 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 de 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 7 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.

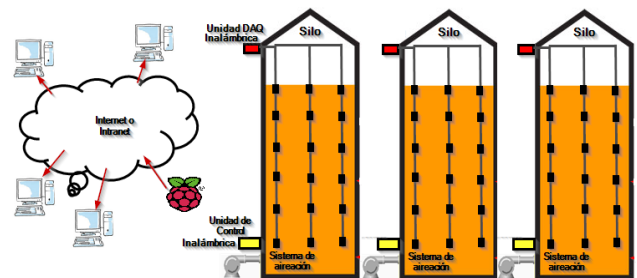


Figura 7. Sistema de control distribuido

## 2.4. 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.

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.

$$\begin{matrix} 1 & \text{byte} & 1 & \text{byte} & 1-3 & 2 & N & \text{bytes} \\ \text{<Marca Inicio>} & \text{<Tamaño>} & \text{<silo>} & \text{<CMD>} & \text{<ARGUMENTOS>} \end{matrix} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 1-3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ \text{<M>} & \text{<T>} & \text{<silo>} & \text{<TN1>} & \text{<TN2>} & \text{<TN3>} & \text{<TN4>} & \text{<TN n>} \end{matrix} \quad \text{Ec. 2}$$

$$\text{~\$1/25.6/26.0/26.5/26.0/26.5/27.0/26.0} \quad \text{Ec. 3}$$

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 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 protocolo de comunicación.

Descripción del comando	Código Comando	Secuencia ASCII
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 2.423GHz), 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.

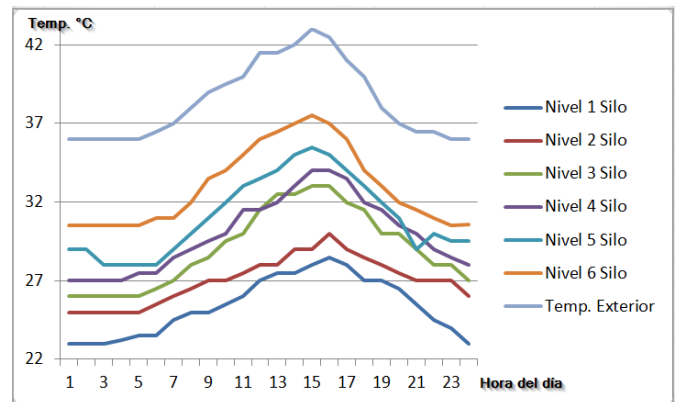


Figura 7.- Lecturas de Temp. Promedio por hora/nivel en silo.

### 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[9][10][11]. 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.

## 5. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] SAGARPA, *Almacenamiento y conservación de granos y semillas*, Subsecretaría 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*, Universidad Autónoma de Chapingo, México, 2009.
  - [3] Maxim Integrated, “*DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*” Rev.: 042208, Maxim Press, 2008. Ultimo acceso 24/06/2015, <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
  - [4] Atmel Corporation, “*ATmega 32U4 microcontroller Datasheet*”, Atmel Press, USA, 2015. Ultimo acceso: 24/06/2015, [http://www.atmel.com/Images/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32U4\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32U4_Datasheet.pdf).
  - [5] Massimo Banzi, “*Introducción a Arduino*”, ORELLY-ANAYA, España, 2012.
  - [6] Digi International Inc., *XBee®/XBee-PRO® DigiMesh™ 2.4 RF Modules Datasheet*, Digi International Inc., 2010
  - [7] Maik Schmidt, “*Raspberry PI, A quick-Start Guide, Second Edition*”, USA, Pragmatic Programmers. LLC, 2014.
  - [8] Simon Monk, “*Programming the Raspberry Pi, Getting Started with Python*”, USA, McGraw-Hill, 2013.
  - [9] F. L. Lewis, “*Wireless Sensor Networks*”, *Smart Environments: Technologies, Protocols and Applications*, New York, ed. D. J. Cook and S. K. Das, John Wiley, 2004.
  - [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.
- E. Doebling, “*Measurement systems: application and design.*” New York, McGraw Hill, 1976.772p.