

# **CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE TEMPERATURA DE SUELO Y NIVEL DE MANTO FREÁTICO PARA APLICACIONES EN BOMBAS DE CALOR DE FUENTES TERRESTRES**

*CONSTRUCTION OF A SYSTEM FOR THE ACQUISITION OF SOIL TEMPERATURE AND GROUND FLOOR LEVEL FOR APPLICATIONS IN HEAT PUMPS FROM GROUND SOURCES*

**Marco Antonio Hernández Hernández**

Universidad Autónoma del Carmen, México  
*mahernandez@pampano.unacar.mx*

**Walter Ariel Silva Martínez**

Universidad Autónoma del Carmen, México  
*wsilva@pampano.unacar.mx*

**José Luis Vázquez Avila**

Universidad Autónoma del Carmen, México  
*javazquez@pampano.unacar.mx*

**Leonardo Palemon Arcos**

Universidad Autónoma del Carmen, México  
*lpalemon@pampano.unacar.mx*

**Miguel Ángel Zepeda Solano**

Universidad Autónoma del Carmen, México  
*190017@mail.unacar.mx*

**Recepción:** 29/octubre/2020

**Aceptación:** 3/diciembre/2020

## **Resumen**

Las bombas de calor de fuente terrestre son sistemas renovables y amigables con el medio ambiente que utilizan la energía subterránea superficial para lograr la calefacción y refrigeración de espacios con el fin de brindar comodidad térmica. En el presente trabajo se presenta la implementación de un sistema de adquisición de datos de nivel freático y temperatura del subsuelo para aplicaciones en bombas de calor de fuentes terrestres. Se han hecho investigaciones sobre el suelo para conocer sus características térmicas en diferentes ciudades de México, sin embargo, no se han hecho estas investigaciones en la zona de Ciudad del Carmen

Campeche. Se utilizaron sondas de temperatura Dallas ds18b20 y un sensor de distancia ultrasónico HC-SR04. Para la transmisión y recepción inalámbrica se utilizó el transceptor NRF24L01. El sistema de lectura de sensores-transmisión y el sistema de recepción-adquisición de datos fue implementado con el microcontrolador Atmega328p en una tarjeta de desarrollo de prototipos Arduino uno. El sistema de lectura y transmisión de datos fue del tipo autónomo alimentado por un panel solar de 12 voltios y 450 mah de tipo mono cristalino. Se utilizó una batería de plomo-ácido de 12 voltios. La adquisición de datos del receptor a una computadora personal fue a través del puerto USB, utilizando el software Processing, el cual almacena los datos cada hora en una hoja de cálculo. Los datos fueron recibidos y almacenados adecuadamente, de igual forma el sistema de energía fotovoltaica funcionó ininterrumpidamente.

**Palabras Clave:** Arduino, sensor de nivel de agua, Sensores de temperatura.

### **Abstract**

*Ground Source Heat Pumps are environmentally friendly, renewable systems that use surface underground energy to achieve space heating and cooling for thermal comfort. In this work, the implementation of a temperature and water table data acquisition system for applications in Ground Source Heat Pump is presented. Investigations have been made on the soil to know its thermal characteristics in different cities of Mexico; however these investigations have not been done in the Ciudad del Carmen Campeche area. Dallas ds18b20 temperature probes and an HC-SR04 ultrasonic distance sensor were used. For wireless transmission and reception, the NRF24L01 transceiver was used. The sensor reading-transmission system and the data reception-acquisition system were implemented with the Atmega328p microcontroller on an Arduino Uno prototype development board. The data transmission and reading system was of the autonomous type, powered by a 12 V, 450 mah mono-crystalline type solar cell. A 12 volts lead-acid battery was used. The acquisition of data from the receiver to the pc was through the USB port, using the software processing, which stores the data every hour in a spreadsheet. The acquisition of data from the receiver to a personal computer was through the*

*usb port, using processing software, which stores the data every hour in a spreadsheet. The data was received and stored properly, in the same way the photovoltaic energy system worked without interruption.*

**Keywords:** *Arduino, CNC, GRBL, lineal interpolation, Self-leveling.*

## **1. Introducción**

Las bombas de calor de fuente terrestre (GSHP, por sus siglas en inglés) son sistemas renovables y amigables con el medio ambiente que utilizan la energía subterránea superficial para lograr la calefacción y refrigeración de espacios con el fin de brindar comodidad térmica. El sistema funciona haciendo circular una solución a base de agua en circuitos de energía hechos de tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE), para transferir energía térmica entre las superestructuras (edificios) y el suelo [Rao, 2019].

El diseño de un nuevo sistema de bomba de calor de fuente de tierra de circuito cerrado (GSHP) requiere que se tengan en cuenta tres aspectos relevantes, que incluyen:

- Clima y ubicación del edificio.
- Características del edificio: uso del edificio, tamaño y nivel de aislamiento.
- Condiciones del suelo, incluido el perfil de temperatura del suelo.

Este tipo de sistemas energéticos ha despertado el interés de numerosos investigadores alrededor del mundo en estos últimos años. Sin embargo, los intentos de aprovechar el sistema de energía de baja entalpía son aún escasos. Los sistemas de climatización a partir de geotermia de baja entalpía en viviendas están muy desarrollados en el norte de EE.UU., Canadá, Japón, Austria, Suiza, Grecia, Australia y Europa, pero existen pocos antecedentes en Latinoamérica.

En trabajos anteriores se generaron modelos de temperatura a partir de Sondeos Superficiales de Temperatura (SST) y Sensores Remotos (SR), con imágenes Landsat 8 TIRS [Matiz, 2019] usando la temperatura del aire e imágenes satelitales para después procesar la información con estimaciones de correlación. El uso de sensores de circuitos integrados sensores de temperatura es de uso común

actualmente, se han utilizado principalmente para aplicaciones de agricultura y medición ambiental [Cuihong, 2011].

En este proyecto se toman las bases de estudios anteriores de los investigadores para buscar el gradiente de temperatura adecuada a mayor profundidad del suelo que pudiera ser 18 a 20 °C, tomando en cuenta sus recomendaciones. En la isla de Ciudad del Carmen, Campeche, el nivel freático se encuentra en 0.20 y 1.40 metros del suelo, siendo esto adecuado para implementar y la extracción de energía térmica.

En el presente trabajo se diseñó un sistema de sensores de temperatura del suelo y nivel freático para estudiar las condiciones del suelo. Los avances en telecomunicaciones están permitiendo una transmisión más rápida y fácil de datos detectados en todo el mundo. Los sensores de suelo se han vuelto más pequeños, más resistentes, más rápidos, más precisos, más eficientes en energía, inalámbricos y más inteligentes [Viscarra, 2010]. Pueden ser dispositivos de mano individuales o montados en vehículos para dispositivos móviles [Adamchuck, 2004], también pueden ser de operación autónoma usando energía solar [Manderson, 2013].

El sistema de medición presentado en el actual trabajo será de tipo autónomo y alimentado por energía solar, los datos serán transmitidos inalámbricamente a una estación conectada a un pc, los datos serán registrados en una hoja de cálculo, almacenando magnitudes y la fecha y hora de adquisición.

## **2. Métodos**

El sistema está formado por:

- Arreglo de sensores de temperatura y de distancia.
- Tarjeta de lectura de sensores y envío de datos
- Tarjeta de recepción de datos y adquisición.
- Componente fotovoltaico para alimentar la Tarjeta de lectura de sensores y envío de datos
- Computadora personal para almacenar datos en una hoja de cálculo electrónica.

## **Arreglo de los sensores de temperatura y el sensor de distancia**

Se construyó un arreglo de 7 sensores de temperatura Dallas DS18B20 conectados a 50 cm de distancia entre sí. El DS18B20 es un sensor de temperatura en el cual se lleva la conversión analógica a digital dentro del encapsulado, facilitando el resultado de dicha conversión a través de una interfaz digital llamada: un hilo (1-wire en inglés). El DS18B20 tiene en un rango de -55 a 125 °C. El error del sensor es diferente según la temperatura a la que está operando. Para temperaturas entre -10 y 85 °C existe un error de  $\pm 0.5$  °C. Para el resto de las temperaturas entre -55 y 125 °C el error es de  $\pm 2$  °C.

El sensor de temperatura DS18B20 se puede encontrar en diversas formas, entre las cuales se destacan 2 que son bastante comunes:

- El encapsulado TO-92 (usado comúnmente en transistores).
- El sensor tipo sumergible, que es fabricado por terceros utilizando sensores en encapsulado TO-92 colocados dentro de una cubierta impermeable de acero inoxidable. En el presente trabajo se utilizó el tipo sumergible que se muestra en la figura 1.



Figura 1 Sensor de temperatura Dallas DS18B20.

Se utilizaron 4 secciones de tubo de policloruro de vinilo (Polyvinyl chloride, pvc por sus siglas en inglés) de 2 pulgadas para interconectar los sensores de temperatura, el tubo se enterró a dos metros de profundidad en el suelo, dejando 1 metro sobresaliendo, como se puede ver en las figuras 2 y 3.

Se utilizó el sensor HC-SR04 es un sensor de distancia de bajo costo que utiliza ultrasonido para determinar la distancia de un objeto en un rango de 2 a 450 cm. El

sensor HC-SR04 posee dos transductores: un emisor y un receptor piezoeléctricos, además de la electrónica necesaria para su operación.



Figura 2 Arreglo de sensores.

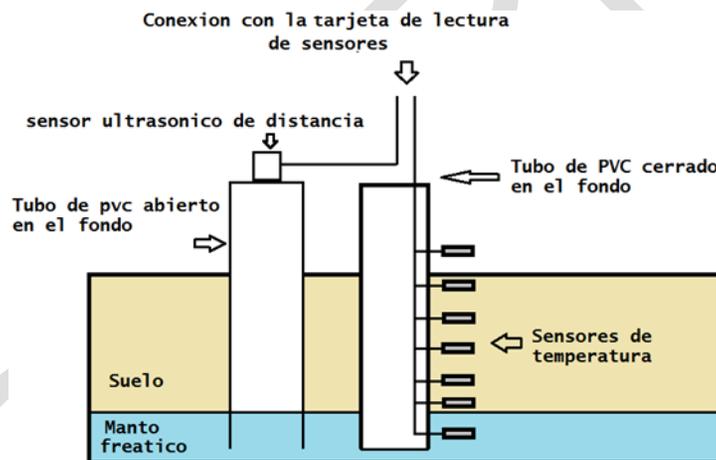


Figura 3 Diagrama a bloques del arreglo de sensores.

El funcionamiento del sensor es el siguiente: el emisor piezoeléctrico emite 8 pulsos de ultrasonido(40 kHz) luego de recibir la orden en el pin TRIG, las ondas de sonido viajan en el aire y rebotan al encontrar un objeto, el sonido de rebote es detectado por el receptor piezoeléctrico, luego el pin ECHO cambia a Alto (5 V) por un tiempo igual al que demoró la onda desde que fue emitida hasta que fue detectada, el tiempo del pulso ECO es medido por el microcontrolador y así se puede calcular la distancia al objeto. El funcionamiento del sensor no se ve afectado por la luz solar o material de color negro (aunque los materiales blandos acústicamente como tela

o lana pueden llegar a ser difíciles de detectar). En la figura 2 se puede observar el arreglo físico de los sensores. Por otro lado, en la figura 3 se puede observar el diagrama de bloques del arreglo de sensores.

### **Tarjeta de lectura de sensores y envío de datos**

Se construyó una tarjeta de circuito impreso para interconectar los sensores con la tarjeta de desarrollo de prototipos Arduino y con el transceptor NRF24L01 (Figura 4). Los datos de los sensores de temperatura son interrogados por la tarjeta Arduino a través del protocolo 1-wire, el cual le asigna a cada uno de los sensores una dirección hexadecimal única, la información viaja multiplexada a través de un bus de un solo hilo y se conecta al pin 7 de Arduino. La información del sensor de distancia ultrasónico es leída por el Arduino y convertida a centímetros, la cual es la distancia entre el nivel de agua freático y la superficie del suelo a estudiar. La información de todos los sensores se envía a través del transceptor inalámbrico NRF24L01



Figura 4 Tarjeta de lectura de sensores y envío de datos.

El transceptor NRF24L01 utiliza la banda de 2,4 GHz y puede operar con velocidades de transmisión de 250 kbps hasta 2 Mbps. Si se usa en espacios abiertos y, con menor velocidad de transmisión, su alcance puede llegar hasta los 100 metros. Para mayores distancias, hasta 1,000 metros, existen módulos provistos con una antena externa en lugar de una antena trazada sobre la misma

placa, como se observa en la figura 4. El consumo de este módulo es de alrededor de 12 mA durante la transmisión, un valor menor al de un LED encendido. El voltaje de operación del módulo es de 1.9 a 3.6 V, los demás pines toleran la lógica de 5 V, por lo que podemos conectarlo sin problemas a un Arduino sin necesidad de un convertidor de niveles lógicos. El diagrama a bloques de la tarjeta de lectura de sensores y envío de datos se puede observar en la figura 5.

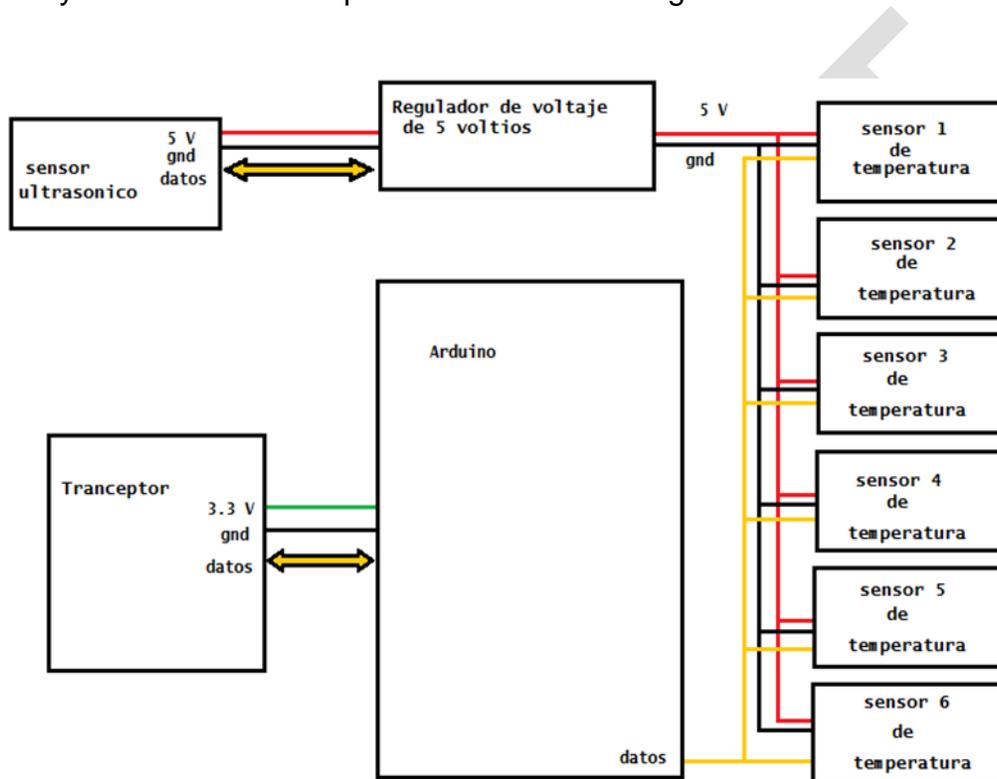


Figura 5 Diagrama a bloques de la tarjeta de lectura de sensores y envío de datos.

### Tarjeta de recepción de datos y adquisición

Se construyó una tarjeta de circuito impreso para interconectar la tarjeta Arduino con el transceptor inalámbrico y la computadora personal como se puede ver en las figuras 6 y 7. El transceptor inalámbrico NRF24L01 recibe los datos de la tarjeta de lectura de sensores, posteriormente los datos son enviados a la tarjeta Arduino y esta los envía por el protocolo serial USB hacia la computadora personal. La conexión USB además de servir de comunicación de datos, también se utiliza para alimentar la tarjeta de recepción de datos y adquisición con 5 voltios. El tamaño de la tarjeta es de 10 cm de largo por 15 cm de ancho.

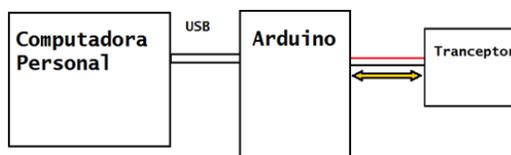


Figura 6 Diagrama de la tarjeta de adquisición de datos.

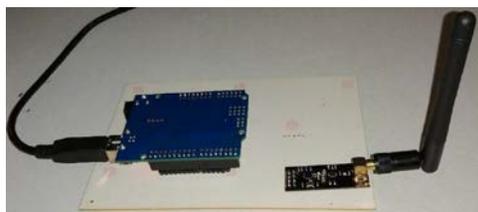


Figura 7 Tarjeta de adquisición de datos.

### **Alimentación de la tarjeta de lectura de sensores y envío de datos**

La Tarjeta de lectura de sensores y envío de datos se alimenta con los siguientes componentes:

- Panel solar fotovoltaico.
- Controlador de carga solar.
- Batería de plomo ácido de 12 voltios.

Los paneles fotovoltaicos o placas fotovoltaicas están formados por numerosas celdas que convierten la luz en electricidad. Las celdas a veces son llamadas células fotovoltaicas. Estas celdas dependen del efecto fotovoltaico por el cual la energía lumínica produce cargas positiva y negativa en dos semiconductores próximos de diferente tipo, produciendo así un campo eléctrico capaz de generar una corriente. Los materiales para celdas solares suelen ser silicio cristalino o arseniuro de galio. Los cristales de arseniuro de galio se fabrican especialmente para uso fotovoltaico, mientras que los cristales de silicio están disponibles en lingotes normalizados, más baratos, producidos principalmente para el consumo de la industria microelectrónica. El silicio policristalino tiene una menor eficacia de conversión, pero también menor coste. Las células de silicio monocristalino están constituidas por un único cristal de silicio. Este tipo de células presenta un color azul oscuro uniforme, como se puede ver en la figura 8.



Figura 8 Panel solar fotovoltaico.

Un regulador de carga solar se coloca entre el panel fotovoltaico y el banco de baterías y básicamente se encarga de controlar el flujo de energía que circula entre ambos equipos (Figura 9). El control del flujo de energía se realiza mediante el control de los parámetros de Intensidad (I) y Voltaje (V) al que se inyecta en la batería. Este flujo de energía depende del estado de carga de las baterías y de la energía generada por el campo fotovoltaico. El regulador de carga solar controla constantemente el estado de carga de las baterías para hacer el llenado óptimo y así alargar su vida útil.

El acumulador de plomo, también denominada de ácido-plomo es un tipo de batería muy común en vehículos convencionales, para arranque, aunque también se utilizan como fuente de energía de tracción de vehículos eléctricos. Suele proporcionar una tensión de 6 V, 12 V u otro múltiplo de 2, ya que la tensión que suministra cada celda es de 2 V. Pueden suministrar unas intensidades de corriente relativamente grandes, lo que las hacen ideales para los motores de arranque. Aunque su utilización y forma más conocida es la batería de automóvil, este acumulador tiene muchas aplicaciones. La batería usada en el presente trabajo es de 12 voltios y 4 ah. El componente interconectado para la alimentación proporciona voltaje continuo de 12 voltios procedente de una batería de electrolito de plomo-acido de 12 voltios 4 ah, esta batería es cargada por un panel solar de 12 voltios 400 mah, la carga está controlada por un circuito de modulación por ancho de pulso (Pulse Width Modulation, PWM, por sus siglas en inglés) comercial de carga de baterías con paneles solares. Un bosquejo del sistema de alimentación es mostrado en figura 9.



Figura 9 Sistema de carga solar.

### Almacenamiento de los datos en una hoja de cálculo electrónica

Se utilizó una computadora personal con sistema operativo Windows 10 de 32 bit. El procesador es el Intel Core I3 de 3.3 GHz. Se utilizó el IDE Processing [Processing, 2020] (Figura 10) para ejecutar un programa que lee la información del puerto serial USB para posteriormente guardarlo en una hoja de cálculo de Excel de Microsoft office 2007 [Microsoft, 2020]. Se utilizó Processing para el algoritmo de recepción de datos.

Se implementaron tres algoritmos para el sistema:

- Algoritmo de lectura de sensores y envío de datos.
- Algoritmo de recepción de datos y envío a la computadora personal.
- Algoritmo de recepción de datos y guardado de información en hoja de cálculo.

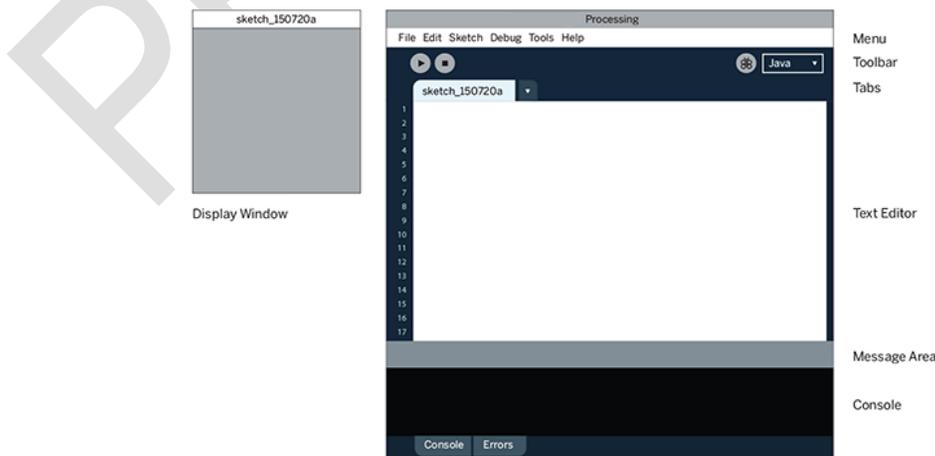


Figura 10 Ventana del Entorno de desarrollo integrado Processing.

El algoritmo de lectura de sensores y envío de datos interroga a los sensores y la información es enviada inalámbricamente a la siguiente etapa, se repite indefinidamente, como se observa en el diagrama de flujo de la figura 11.

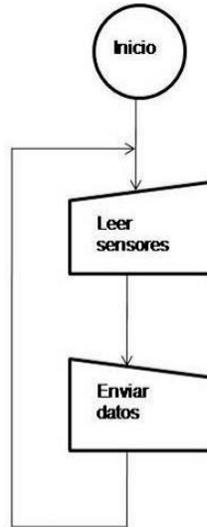


Figura 11 Algoritmo de lectura de sensores y envío de datos.

El Algoritmo de recepción de datos y envío a la computadora personal, recibe datos del transceptor inalámbrico, posteriormente los envía por el puerto USB hacia la computadora personal, se repite indefinidamente, como se puede observar en el diagrama de flujo de la figura 12.

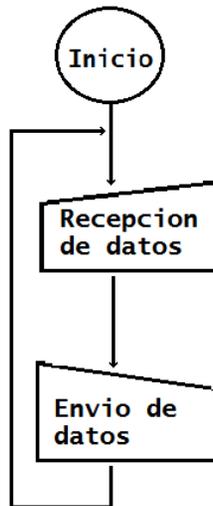


Figura 12 Algoritmo de recepción de datos y envío a la computadora personal.

El diagrama de flujo de la figura 13, muestra el comportamiento del algoritmo de recepción de datos, en el cual se guarda la información en una hoja de cálculo y los datos son recibidos a través del puerto USB. Después, pregunta la hora y fecha de la computadora personal. Posteriormente, compara si es la hora en punto, de ser así pregunta si el segundo es múltiplo de 7, de esa manera toma cada hora 7 mediciones de los 7 sensores de temperatura. Los datos obtenidos por el sensor de distancia son enviados hacia la hoja de cálculo con el dato de fecha y hora. La razón por la cual se tomaron 7 datos cada hora fue para hacer un promedio para minimizar errores de medición.

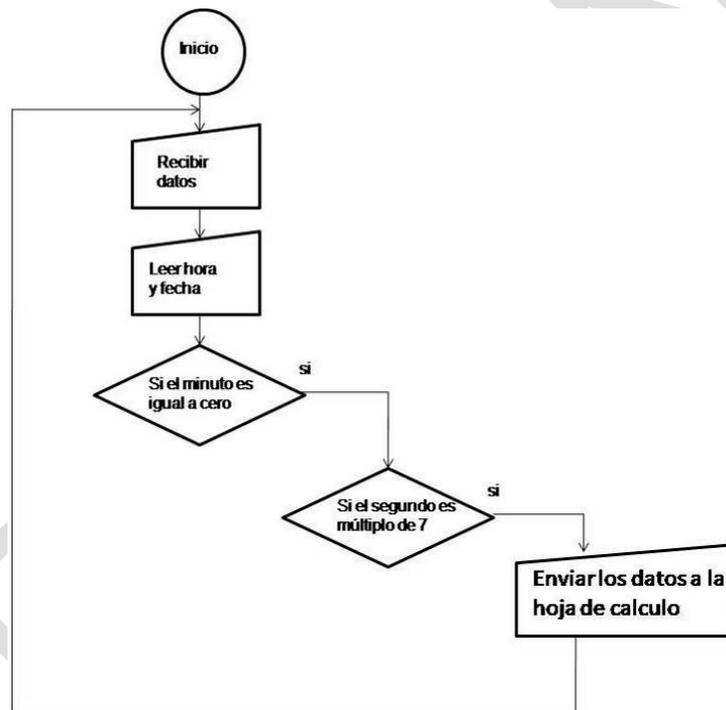


Figura 13 El Algoritmo de recepción de datos.

### 3. Resultados

En la presente sección se presentan los resultados del desempeño del sistema, así como las mediciones del mismo. En cuanto al desempeño del sistema de alimentación fotovoltaico se midió un voltaje de 13.5 voltios durante el día y de 12.5 voltios durante la noche. El alcance de transmisión recepción fue de 30 metros con obstáculos como paredes. Posteriormente el equipo se instaló en su provisión

definitiva y se realizaron las mediciones de temperatura y nivel de agua que se muestran en la figura 14.

En la figura 15 se puede observar las temperaturas medidas por los 7 sensores, los cuales están espaciados 50 cm de distancia entre sí. Se observa que la temperatura del sensor que se encuentra a 2 metros de profundidad (sensor 7) fue de 29.56 °C y la profundidad del sensor que se encuentra a 1 metro sobre el nivel del terreno (sensor 1) fue de 32.94 °C, la cual corresponde a la temperatura del ambiente. La distancia del manto freático con respecto del nivel del terreno fue de 40 cm.

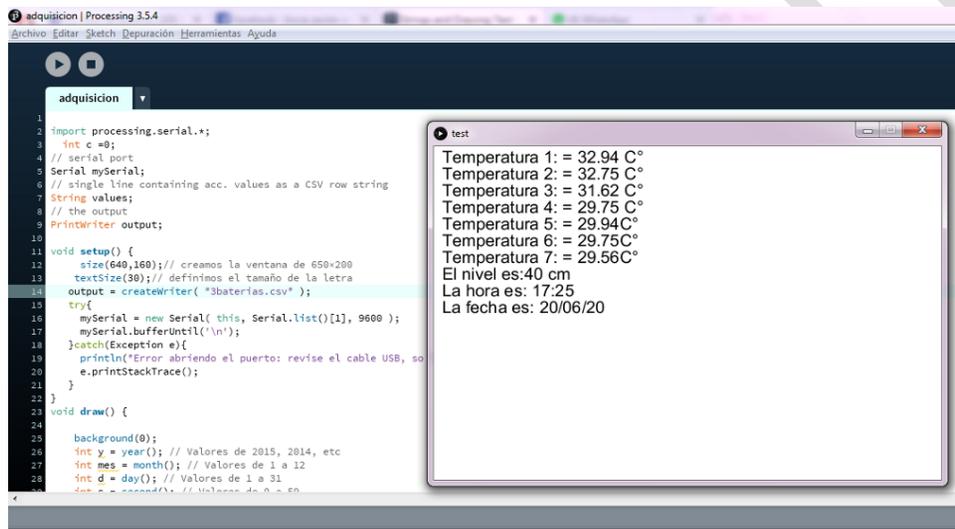


Figura 14 Interface de Processing con los datos recibidos.

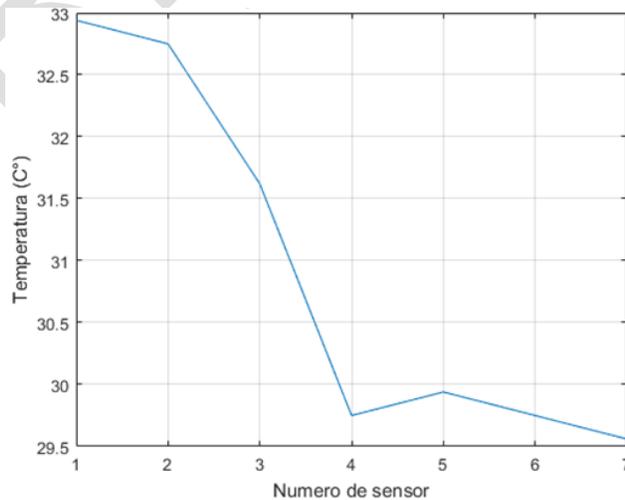


Figura 15 Grafica de la temperatura de los sensores.

## **4. Discusión**

En el presente trabajo se presentó una medición única de temperaturas ambiente y de suelo, sin embargo, el sistema fue diseñado con el objetivo de tomar mediciones cada hora durante 365 días. Por lo tanto, debía poder funcionar de forma autónoma. Se observó que el sistema de alimentación fotovoltaico logró energizar el resto de los componentes durante un periodo de 24 horas manteniendo la batería cargada al máximo, por lo cual se puede afirmar que el sistema puede funcionar por periodos prolongados de manera autónoma. Los datos de temperatura muestran un descenso de la temperatura proporcional a la profundidad. La diferencia de temperaturas fue de 3.38 °C desde el sensor a un metro del nivel del suelo hasta el sensor a 2 metros de profundidad. Los datos de nivel de manto freático de 40 cm fueron con respecto a la superficie del terreno. La tarjeta de adquisición de datos recibió la información de los sensores y fue enviada a un archivo de hoja de cálculo de Microsoft Excel para el posterior procesamiento de la información.

## **5. Conclusiones**

El sistema de lectura de sensores de temperatura y de nivel freático funcionó como estaba planeado. El consumo del sistema es más elevado de lo necesario, debido a que se usó una placa de desarrollo Arduino UNO, en el mercado existen alternativas con la misma facilidad de implementación, pero con consumos eléctricos más bajos, lo cual será tomado en cuenta para posteriores trabajos. El sistema de recepción y adquisición funcionó bien, la interfaz en Processing fue fácil y rápida de implementar. En la única medición se encontró una diferencia de temperaturas de 3.38 C, en el futuro se planea implementar el sistema para realizar mediciones durante un año con el fin de determinar la viabilidad para implementar un sistema de bomba de calor de fuente terrestre. Otro trabajo a futuro será determinar la altura del terreno donde se implementaron las mediciones para poder caracterizar mejor los resultados obtenidos. Estos trabajos futuros serán posibles gracias a que se construyó un sistema funcional, de bajo mantenimiento con software y hardware de código abierto.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Adamchuk V. I., Upadhyaya S. K. et-al. *Comput. Electron. Agric.*, 44 (1), pp. 71-91, 2004.
- [2] Cuihong Liu, Wentao Ren, Benhua Zhang, Changyi Lv. The application of soil temperature measurement by LM35 temperature sensors, *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, 2011.
- [3] Dalla Santa G. et-al, An updated ground thermal properties database for GSHP applications *Geothermics*, vol. 85, May 2020.
- [4] Díaz Hernández Heidi Paola, Aguilar Castro Karla María, Macías Melo Edgar Vicente y Serrano-Arellano, (2017). Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-húmedo. *Revista del Desarrollo Tecnológico*. 1(2) 44-51.
- [5] Manderson A. and Hunt C., Currie L. D., Christensen C. L. (Eds.), *Accurate and Efficient Use of Nutrients on Farms*. Occasional Report, no. 26, Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University, Palmerston North, New Zealand, pp. 14, 2013.
- [6] Matiz León J. C., Rodríguez Rodríguez G., Alfaro Valero C., Modelos de temperatura del suelo a partir de sondeos superficiales y sensores remotos para el área geotérmica de Paipa, Boyacá-Colombia, *revbol*, vol. 4 no. 2, 2019.
- [7] Microsoft Office (2017): <https://www.office.com/>.
- [8] Processing, (2020): <https://processing.org/>.
- [9] Rao Martand Singh, Abubakar Kawuwa Sani, Tony Amis. An overview of ground-source heat pump technology, *Managing Global Warming An Interface of Technology and Human Issues*; Academic Press, pp. 455-485, 2019.
- [10] Viscarra Rossel R. A., McBratney A. B., Minasny B. (Eds.). *Proximal Soil Sensing*. Progress in Soil Science, Springer, Netherlands, 2010.