



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

INSTITUTO DE INGENIERÍA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES-JURIQUILLA

**Diseño de sistema de
instrumentación para medir
comportamiento térmico de
intercambiadores de calor aire-
tierra**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero en Energías Renovables

P R E S E N T A

Carmona Flores Emilio

DIRECTOR DE TESIS/ASESOR DE ARTÍCULO

Dr. Jorge Alejandro Wong Loya

Temixco, Mor., a 2 de diciembre de 2022





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



OF/IER/LIER/145/2022
ASUNTO: Notificación de jurado y
fecha para examen profesional.

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
Presente

Por medio de la presente le informo que el día viernes 2 de diciembre de 2022, a las 16:00 h, en el Instituto de Energías Renovables, el C. EMILIO CARMONA FLORES, con número de cuenta 417031491 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación del trabajo de tesis y examen profesional titulado:

“Diseño de sistema de instrumentación para medir comportamiento térmico de intercambiadores de calor aire-tierra”

Debido a que el alumno ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

PRESIDENTE: DRA. HEIDI ISABEL VILLAFÁN VIDALES
VOCAL: DR. ALEJANDRO VARGAS CASILLAS
SECRETARIO: DR. JORGE ALEJANDRO WONG LOYA
SUPLENTE: DR. GUILLERMO BARRIOS DEL VALLE
SUPLENTE: DRA. NADIA MARÍA SALGADO HERRERA

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
“Por mi raza hablará el espíritu”
Temixco, Mor., a 24 de noviembre de 2022

Dr. Jorge Alejandro Wong Loya
Coordinador de la LIER
IER-UNAM

JAWL´mfp



Priv. Xochicalco s/n,
Col. Centro,
62580 Temixco, Morelos, México
T. 01 (777) 362 00 90
(52) 55 56 22 97 00

ier.unam.mx

A mi Familia y amigos

Agradecimientos

Al IER y a la UNAM, por la formación espectacular que me fue concebida.

A mi familia y amigos, que a pesar de la distancia me dieron el apoyo y la fuerza necesaria para no rendirme en este camino.

A mi Tutor y amigo el Dr. Jorge Alejandro Wong Loya que me introdujo al mundo de la geotermia y me invitó a participar en el proyecto que originó este trabajo.

A mis amigos y compañeros de la LIER por todos los momentos que influyeron en mi formación para obtener las habilidades que me permitirán desarrollar proyectos cada vez mas interesantes.

A los martinianos que se volvieron mis hermanos en Temixco los cuales siempre llevare en mi corazón aun con las distancias físicas.

A todos mis profesores de la LIER porque con todos aprendí valiosas lecciones que aplicar tanto en lo personal como en lo profesional.

Agradecimientos especiales al proyecto PAPIME PE108917 por la beca que se me otorgó para la realización de este trabajo.

Este trabajo no seria posible sin ustedes.
Desde lo mas profundo de mi corazón, gracias.

Resumen

El calentamiento global es uno de los problemas más grandes que enfrenta la humanidad y para combatirlo el uso de fuentes renovables de energía y nuevas tecnologías es de vital importancia. Los intercambiadores de calor aire-tierra aprovechan el gradiente de temperatura de la Tierra para calentar o refrigerar espacios según las necesidades de la región donde se utilicen. Esto se traduce a un gran ahorro de energía utilizada por los equipos de refrigeración y calefacción convencionales. En este trabajo se diseñó, construyó e instaló un prototipo de adquisidor de datos basado en software y hardware libre que podría reducir los costos asociados al estudio de las condiciones de temperatura en el suelo donde se deseen instalar intercambiadores de calor, lo que haría mas asequible su implementación. Debido a que las fechas en que el prototipo desarrollado coincidió con el inicio de la pandemia del COVID-19 surgieron problemas que afectaron de manera negativa los resultados. Sin embargo se logró obtener información suficiente para hacer evaluar los sensores utilizados y se determinó que pueden funcionar de manera confiable para medir la temperatura del suelo pero no para medir las condiciones del aire circulando por las tuberías. A la vez se propusieron diversos trabajos a futuro que ampliarían las funciones del prototipo realizado.

Índice general

Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XI
1. Introducción	1
1.1. Presentación	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Motivación	3
1.5. Estructura de la tesis	3
2. Marco teórico	5
2.1. Energía geotérmica	5
2.2. Intercambiadores de calor aire-tierra	6
2.3. Temperatura estabilizada del suelo	8
2.4. Adquisidores de datos	9
2.5. Hardware y software libre	9
2.6. Internet de las cosas (IoT)	11
2.7. Thingsboard	12
2.8. Arduino	13
2.8.1. Tarjeta Arduino Mega 2560	13
2.8.2. Módulo Wi-Fi ESP8266	16
2.8.3. Tarjeta ProtoShield Mega	16
2.8.4. Módulo XCSOURCE wemos 18650 batería Shield V3	16
2.8.5. Sensores de temperatura DS18B20	17
3. Proceso de diseño del prototipo	19
3.1. Etapas del diseño	19
3.2. Definición de las características del prototipo	19
3.3. Sensores de temperatura	20
3.3.1. Termopares	20
3.3.2. Sensor de temperatura digital DS18B20	21
3.4. Pruebas adicionales	23

ÍNDICE GENERAL

3.4.1. Sensor de Humedad y Temperatura BME 280	24
3.4.2. Sensor de diferencia de presión MLXV7002DP	26
3.5. Protoshield Mega y placa de circuito impresa (PCB)	27
3.6. Diseño de la carcasa	28
3.7. Preparación de la prueba de campo	29
3.7.1. Diseño del intercambiador y distribución de los sensores	29
3.7.2. Instalación de los sensores	31
3.7.3. Instalación del intercambiador de calor	31
3.7.4. Condiciones de operación del intercambiador de calor	33
4. Resultados	35
4.1. Resultados de la calibración	35
4.2. Resultados de la prueba de campo	45
5. Conclusiones	55
A. Manual para geotermia	57
B. Códigos Arduino	71
Bibliografía	81

Índice de figuras

2.1. Sistema de Intercambiador de calor aire-tierra. fuente: [Perovic et al., 2012]	6
2.2. Sistema de intercambiador de calor aire- tierra en conjunto a una bomba de calor. fuente: [Perovic et al., 2012]	7
2.3. Variación de la temperatura del suelo a lo largo del año a distintas profundidades. Fuente: [Perovic et al., 2012]	8
2.4. Diagrama IoT. Fuente: [SensorGO, 2019]	11
2.5. Ejemplo de una interfase thingsboard. Fuente: Obtenida de instalación propia de thingsboard	12
2.6. Pinout de tarjeta Arduino Mega. fuente: [Arduino, 2018]	14
2.7. Módulo Wi-Fi ESP8266.	16
2.8. ProtoShield.	16
2.9. Módulo XCSOURCE wemos 18650.	17
2.10. Sensor digital de temperatura DS18B20.	17
3.1. Placa Shield SEN 3007	21
3.2. Pruebas con multiples tarjetas SEN 30007	21
3.3. Cámara de temperatura constante	22
3.4. Encapsulamiento de los sensores DS18B20	22
3.5. Prueba de montaje de sensores a la tubería	23
3.6. Imagen recuperada de: [LastMinuteEngineers]	24
3.7. Pruebas con 4 sensores BME280 simultáneos.	25
3.8. Esquema para futura prueba con sensores BME280.	25
3.9. Sensores tubo Pitot.	26
3.10. Sección de tubería para pruebas	27
3.11. Vista inferior de la tarjeta shield.	27
3.12. Vista superior de la tarjeta shield	28
3.13. Diseño de PCB	28
3.14. Carcasa diseñada	29
3.15. Distribución de los sensores de temperatura conectados al adquisidor (marcados como AX) y al prototipo (marcados como TX)	30
3.16. Instalación de los sensores DS18B20	31
3.17. Fotografía de los sensores instalados en el intercambiador de calor	32
3.18. Fotografías del intercambiador de calor durante su instalación	32

ÍNDICE DE FIGURAS

4.1. Experimento 1 de ambiente a 0°C.	36
4.2. Experimento 2 de 0°C a 5°C	36
4.3. Experimento 3 de 5°C a 10°C.	36
4.4. Experimento 4 de 10°C a 15°C	37
4.5. Experimento 5 de 15°C a 20°C.. . . .	37
4.6. Experimento 6 de 20°C a 25°C.	37
4.7. Experimento 7 de 25°C a 30°C.	38
4.8. Experimento 8 de 30°C a 35°C.	38
4.9. Experimento 9 de 35°C a 40°C	38
4.10. Experimento 10 de 40°C a 45°C	39
4.11. Experimento 11 de 45°C a 50°C.	39
4.12. Experimento 1 de ambiente a 0°C.	40
4.13. Experimento 2 de 0°C a 5°C.	40
4.14. Experimento 3 de 5°C a 10°C.	40
4.15. Experimento 4 de 10°C a 15°C.	41
4.16. Experimento 5 de 15°C a 20°C.	41
4.17. Experimento 6 de 20°C a 25°C.	41
4.18. Experimento 7 de 25°C a 30°C.	42
4.19. Experimento 8 de 30°C a 35°C.	42
4.20. Experimento 9 de 35°C a 40°C.	42
4.21. Experimento 10 de 40°C a 45°C.	43
4.22. Experimento 11 de 45°C a 50°C.	43
4.23. Sensores durante las primeras 21 horas del experimento.	46
4.24. Sensores durante las primeras 72 horas del experimento.	47
4.25. Sensores durante 37 días de monitoreo.	48
4.26. Temperaturas del Adquisidor.	49
4.27. Temperaturas al interior de la tubería.	50
4.28. Temperaturas al exterior de la tubería.	51
4.29. Regresión lineal para el sensor T3.	52
4.30. Regresión lineal para el sensor T4.	53

Índice de tablas

2.1. Fuente:Elaboración propia a partir de [Arduino, 2018]	15
4.1. Temperaturas promedio por sensor y experimento.	44
4.2. Desviacion estandar por sensor y experimento.	44
4.3. Relación entre sensores cada experimento.	44
4.4. Errores detectados de cada sensor para distintos periodos.	48

Introducción

1.1. Presentación

El calentamiento global es uno de los problemas más grandes que enfrenta la humanidad y combatirlo es de vital importancia para la continuación de la vida como la conocemos.

Cada vez se crean más y mejores alternativas para combatir el cambio climático entre ellas se encuentra el aprovechamiento de las energías renovables que normalmente se explotan a gran escala para satisfacer necesidades energéticas de grandes ciudades o industrias sin embargo, hay un potencial para la explotación a pequeña escala. Por ejemplo con la energía geotérmica es posible aprovechar el calor de la Tierra para regular las condiciones de temperatura en diversos espacios ahorrando energía en el proceso mediante la utilización de intercambiadores de calor aire-tierra.

Los intercambiadores de calor aire-tierra son sistemas de tubos enterrados por los cuales se circula aire para así enfriar (en verano) o calentar (en invierno) este fluido y posteriormente introducirlo en un espacio para disminuir o aumentar la temperatura de acuerdo a las necesidades. Para diseñar, instalar y operar de manera eficiente uno de estos sistemas es necesario realizar un estudio de las temperaturas del subsuelo y ambiente en el lugar de aplicación y así determinar las características de los equipos a instalar. Con el fin de realizar el estudio mencionado se requiere la utilización de equipos adquirentes de datos los cuales son los encargados de obtener y almacenar la información recopilada por sensores, en este caso es necesario utilizar sensores de temperatura para medir las condiciones durante un periodo no menor a 1 año en el sitio donde se quiera instalar un sistema de intercambiadores de calor. Debido a lo anterior los equipos adquirentes de datos pueden pasar largos periodos de tiempo sin supervisión y en ciertos lugares esto puede suponer un riesgo de robo o de mal funcionamiento antes de obtener los datos necesarios para el estudio, esto sumado a que estos equipos tienen un alto costo (> \$70,000) representan un primer obstáculo para la implementación masiva de sistemas de intercambiadores de calor.

Debido a lo anterior surge la necesidad de crear alternativas confiables, robustas y asequibles para realizar las mediciones de temperatura y realizar el estudio previo, disminuyendo el costo de implementar intercambiadores de calor aire-tierra y tal vez así propiciar su uso.

1.2. Planteamiento del problema

Los sistemas intercambiadores de calor aire-tierra aprovechan el gradiente de temperatura que existe entre el ambiente y el suelo a distintas profundidades funcionando de manera similar a una bomba de calor geotérmica intercambiando calor del aire circulante con el suelo y finalmente llegando al espacio que se desea acondicionar, fungiendo como un sistema de refrigeración durante el verano y como un calefactor en invierno. [Perovic et al., 2012]

Sin embargo, como se mencionó, para el diseño e instalación de estos sistemas un estudio de las temperaturas del ambiente y suelo a distintas profundidades en el lugar son esenciales y el equipo necesario para dicho estudio debe funcionar de manera ininterrumpida durante un periodo no menor a 1 año. Lo anterior debido a que se busca encontrar la profundidad óptima del suelo donde la temperatura se mantiene constante a lo largo del año sin que sea afectada por los cambios de temperatura en la superficie. La temperatura a dicha profundidad será mayor a la temperatura promedio en invierno y menor a la temperatura promedio en verano, permitiendo así al sistema funcionar de manera correcta. Además tanto para el estudio previo como para la etapa de funcionamiento de los sistemas el poder monitorear y controlar de manera remota las condiciones sería de gran utilidad como, por ejemplo fijando una temperatura objetivo al interior del espacio que deseamos acondicionar y permitir al sistema apagarse de manera automática para aumentar el ahorro de energía mientras se mantiene una temperatura de confort. Por lo anterior es imperativo el uso de un adquisidor de datos confiable y robusto en conjunto con un sistema de control sin embargo, el alto costo de los adquisidores de datos comerciales (> \$70,000 sin considerar un sistema de control) es un obstáculo importante para la instalación de estos sistemas de manera masiva.

Con el avance del software y hardware libre hoy en día es posible diseñar y probar una gran variedad de sensores y sistemas de bajo costo para cumplir con tareas específicas, por lo que sería viable diseñar un equipo que cumpla con la función de adquisidor de datos y sistema de control, basado en estas tecnologías que pueda reemplazar el uso de un equipo comercial con un nivel de confiabilidad aceptable y a un costo que haga más asequible su implementación.

1.3. Objetivos

Este trabajo tiene por objetivo principal el diseño y elaboración de un prototipo de sistema adquisidor de datos para medir las temperaturas del subsuelo basado en Arduino con la capacidad de funcionar de manera ininterrumpida por un periodo no menor a 1 año en condiciones de intemperie, enviando datos de manera periódica a un servidor de internet de las cosas (IoT) donde los datos puedan ser aprovechados y cuyo costo sea significativamente menor (> \$10,000) a los equipos adquisidores de datos convencionales.

Otro objetivo importante es el de probar que proyectos basados en software y hardware libre pueden ofrecer alternativas asequibles a equipos comerciales especializados y que el prototipo resultante de este trabajo y todos los archivos derivados del mismo estén disponibles de manera libre y pueda ser replicado y mejorado para otras aplicaciones.

1.4. Motivación

Desde que el ser humano adoptó su estilo de vida sedentario, ha modificado constantemente el ambiente para alcanzar su confort, siendo notable el uso de equipos de calefacción y refrigeración los cuales requieren de una considerable cantidad de energía para funcionar, en los años recientes con el aumento de la población la energía requerida para alcanzar dicho confort también ha ido en aumento. A su vez parte importante de dicha energía es producida de fuentes fósiles las cuales son finitas y altamente contaminantes por lo que su uso ha propiciado una crisis ambiental que de no ser atendida puede significar el final de la vida humana en el planeta.

Por todo lo anterior es necesario tomar acciones que disminuyan el impacto que tiene la actividad humana en el ambiente como por ejemplo aumentar el uso de fuentes renovables de energía, implementar tecnologías para el ahorro de energía, cambiar hábitos de consumo, métodos de producción entre otras. Sin embargo, no es sencillo cambiar de manera abrupta la manera en que vivimos o exigir cambios en el sistema capitalista en que el actualmente vivimos, por lo que empezar con soluciones puntuales y que sean replicables a gran escala es un paso importante para afrontar este problema.

Un ejemplo de estas soluciones sería el propiciar el uso de sistemas de acondicionamiento de espacios que consuman menos energía que los actuales, como los sistemas de intercambiadores de calor aire-tierra. Actualmente una barrera importante para implementar dichos sistemas son el alto costo asociado a los equipos y estudio previo para el diseño e instalación, por lo que una fuerte motivación para este trabajo es disminuir los costos mediante la implementación de equipos basados en software y hardware libre.

El prototipo de adquisidor de datos que se quiere obtener al final de este trabajo se utilizará para medir la temperatura del subsuelo, almacenar los datos y posteriormente comparar los datos obtenidos con un equipo comercial. además es importante también contar con un equipo que pueda monitorear y controlar el correcto funcionamiento de los sistemas, lo cual no es posible con los adquirentes de datos comerciales ya que funciones adicionales requieren comprar otros equipos. Con un prototipo que pueda cumplir ambas funciones a un menor costo del actual podría impulsar la implementación de estos sistemas, lo cual es otra motivación de este trabajo.

1.5. Estructura de la tesis

Este trabajo esta dividido en 4 capítulos, en el primero se describen de manera breve algunos conceptos, equipos y plataformas que son esenciales para la realización del prototipo. En el segundo se muestran las distintas etapas del diseño del prototipo, así como las pruebas que se realizaron con el mismo. En el tercero se discuten los resultados obtenidos y se comparan con los obtenidos por un equipo comercial. Finalmente, en el cuarto se comparten las conclusiones y trabajos a realizar en un futuro.

Marco teórico

2.1. Energía geotérmica

La energía geotérmica es una fuente renovable de energía proveniente del calor interno de la Tierra generado por diversas fuentes como lo son: los movimientos diferenciales entre las capas que constituyen la Tierra, el calor latente de cristalización del núcleo externo y la desintegración de isótopos radiactivos.

Se puede aprovechar esta fuente de energía de distintas maneras dependiendo de la temperatura del yacimiento en cuestión. La energía geotérmica de alta entalpía (mayor a 150 °C) se usa para la generación de electricidad y la geotermia de media (90 a 150 °C) y baja entalpía (menor de 90 °C), para diversas actividades conocidas como usos directos. Algunas aplicaciones de usos directos son: acondicionamiento de espacios, acuicultura, agricultura, secado de madera, invernaderos y bombas de calor geotérmicas.[IDAE and IGME, 2008, Luna and Ismael, 2019]

Para este trabajo nos interesa particularmente el acondicionamiento de espacios con intercambiadores de calor aire-tierra y las bombas de calor geotérmicas. Ambas aplicaciones están estrechamente relacionadas requiriendo de la tierra como sumidero de calor. Su implementación requiere de un estudio de la temperatura del suelo previo a su instalación para hacer un dimensionamiento correcto de los equipos para conformar el sistema y también de medición de condiciones durante su funcionamiento para poder encender, apagar o regular el sistema de acuerdo a las necesidades.

Las partes que conforman un sistema de intercambiadores de calor aire-tierra son: tubería de entrada que se encuentra en contacto con el aire exterior, turbina encargada de la circulación de aire, arreglo de tuberías enterradas (pueden haber distintas configuraciones en serie o paralelo) y la tubería de salida que se encuentra al interior del espacio que se quiere acondicionar.

2.2. Intercambiadores de calor aire-tierra

Los intercambiadores de calor aire-tierra son sistemas que permiten el acondicionamiento de espacios mediante la circulación de aire por un circuito de tubos enterrados en el suelo, dichos tubos pueden estar en distintas configuraciones (en serio o paralelo ver Figura 2.1) y esto permite proveer de enfriamiento (en verano) y calefacción (en invierno) de acuerdo a las necesidades de confort térmico en distintos espacios, con un bajo consumo eléctrico comparado con tecnologías convencionales tales como aires acondicionados y calefactores. [Georgina Izquierdo et al., 2020] [Luna and Ismael, 2019]

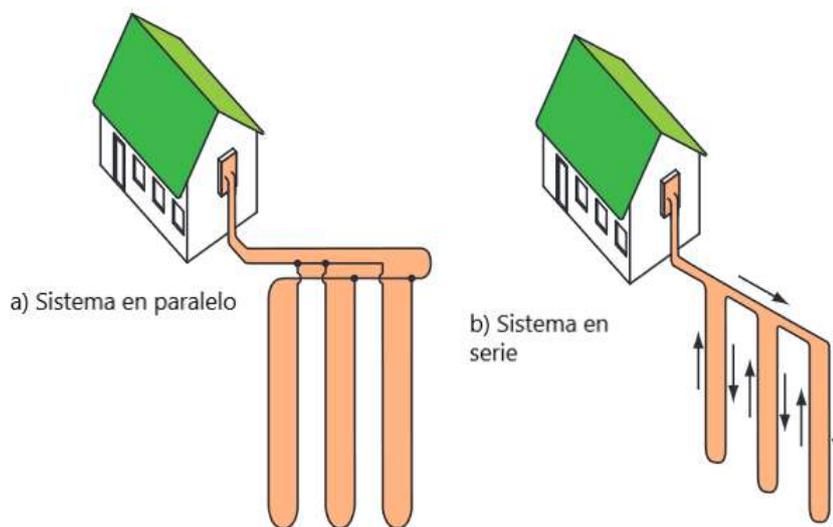


Figura 2.1: Sistema de Intercambiador de calor aire-tierra.

fuelle: [Perovic et al., 2012]

Estos sistemas intercambiadores de calor pueden funcionar de manera simple circulando aire entre el exterior e interior cediendo el calor directamente al espacio en cuestión como en la Figura 2.1 o convertir el sistema en una bomba de calor geotérmica (BCG) al agregar una bomba de calor es posible utilizar fluidos distintos al aire y entregar o ceder el calor a distintos espacios aumentando el desempeño del sistema (ver Figura 2.2).

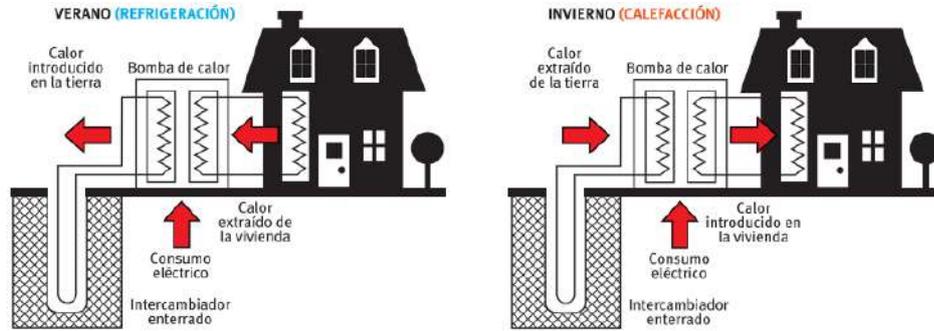


Figura 2.2: Sistema de intercambiador de calor aire- tierra en conjunto a una bomba de calor.

fuelle: [Perovic et al., 2012]

2.3. Temperatura estabilizada del suelo

La atmósfera y la superficie de la Tierra intercambian energía constantemente tratando de llegar a un equilibrio térmico. A medida que se incrementa la profundidad las capas de tierra actúan como un aislante térmico que evita que la temperatura se vea afectada por los cambios de temperatura en la superficie. Lo que implica que a partir de una cierta profundidad la temperatura se mantiene prácticamente constante.

La profundidad donde se alcanza dicha temperatura variará dependiendo de las características del suelo tales como: conductividad, densidad y calor específico. (ver Figura 2.3). [Perovic et al., 2012]

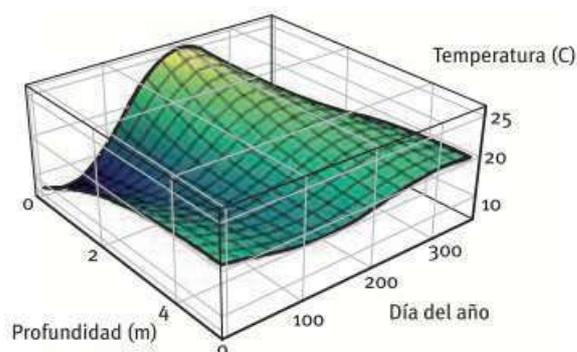


Figura 2.3: Variación de la temperatura del suelo a lo largo del año a distintas profundidades.

Fuente: [Perovic et al., 2012]

Es necesario determinar la profundidad donde la temperatura se mantiene prácticamente constante ya que es la profundidad mínima para instalar los circuitos de tubería por los cuales circulara el aire de un sistema intercambiador de calor. Ya que esta temperatura estará por debajo de la promedio en verano y por encima del promedio en invierno, permitiendo así la doble funcionalidad de este sistema. Para esta tarea es necesario medir la temperatura del suelo a distintas profundidades a lo largo de un año mediante la implementación de sensores y adquirentes de datos. Conocer la profundidad y la temperatura es de vital importancia ya que, con base en estos datos, se definen el grosor, tamaño y configuración de las tuberías a utilizar y es posible hacer estimaciones de las temperaturas que alcanzara el aire al circular por dichas tuberías determinando así, las características del sistema que sera instalado en una ubicación específica.

2.4. Adquisidores de datos

Los adquisidores de datos o "Data Loggers" son equipos electrónicos que permiten traducir y almacenar datos. Estos instrumentos son usados para monitorear diferentes variables físicas como lo son temperatura, presión y humedad, a lo largo de un periodo de tiempo determinado sin apenas esfuerzo, ya que una vez debidamente configurados los adquisidores de datos no necesitan ninguna atención. [instruments, 2020]

La mayoría de estos equipos utiliza software o interfaces propietarias del fabricante para configurar el registro de datos, lo que limita de cierta manera el rango de aplicación de un determinado equipo. [Logers Data, 2018]

Estos equipos son capaces de medir señales eléctricas generadas por diversos tipos de sensores y en algunas ocasiones traducir dichas señales en variables medidas por los sensores para su almacenamiento en la memoria interna del dispositivo para su posterior análisis sin embargo, su diseño y software propietario los hacen costosos a la hora de compararlos con alternativas de software y hardware libre.

2.5. Hardware y software libre

El hardware de fuentes abiertas (OSHW en ingles) o hardware libre es aquel cuyo diseño es publicado para que cualquier persona pueda estudiar, modificar, distribuir, materializar y vender, tanto el original como objetos basados en el diseño original. [Open Source Hardware Association, 2010]

Aunque la anterior definición esté limitada a los componentes físicos, cuenta con su complemento. El software libre que es aquel que respeta a los usuarios y la comunidad, con el cual se tiene la libertad de ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, modificar y mejorar el software. [Free Software Foundation, 2001]

Tanto para el Hardware y Software libre existen distintas licencias que deben ir asociadas a los códigos, librerías y diseños para que los proyectos sean oficialmente libres, algunos ejemplos de licencias compatibles son:

- en Software libre [Free Software Foundation, 2003]
 - Licencia Pública General de GNU (GPL)
 - Licencia Pública General Reducida de GNU (LGPL)
 - Licencia Completamente Permisiva de GNU
- En Hardware Libre [Open Source Harware Association, 2014]
 - Creative Commons Attribution (CC BY)

2. MARCO TEÓRICO

- Creative Commons Attribution-ShareAlike (CC BY-SA)
- Creative Commons Public Domain Dedication (CC0)

Aunque todas las licencias para hardware y software libre tienen como objetivo común permitir el acceso libre a los archivos, cada una tiene distintos requisitos y objetivos específicos. Tomando en cuenta lo anterior se decidió que el diseño final y todos los archivos y códigos generados para el desarrollo de este trabajo serán publicados y distribuidos de manera libre pero sin una licencia formal. Sin embargo como trabajo a futuro se estudiara y seleccionara una licencia compatible con los movimientos de software y hardware libre para la correcta integración de este proyecto en la comunidad libre.

2.6. Internet de las cosas (IoT)

Internet de las Cosas o IoT por sus siglas en inglés (Internet of Things) incluye cualquier objeto o "cosa" que pueda conectarse a una red de internet, equipadas con sensores, software y otras tecnologías que les permiten transmitir y recibir datos hacia y desde otras cosas. [Cuauhtémoc, 2021, SAP SE, 2021]

Se podría decir que el internet de las cosas es una red de dispositivos interconectados entre si y al internet permitiendo una integración de distintos sensores y equipos, así como monitorear y controlar dispositivos sin necesidad de intervención física, lo que representa una gran oportunidad para la implementación de proyectos en zonas remotas o de difícil acceso sin tener que asistir de manera recurrente para extraer los datos (ver Figura 2.4).



Figura 2.4: Diagrama IoT.

Fuente: [SensorGO, 2019]

Gracias a la existencia del hardware y software libre el internet de las cosas se manifiesta de manera recurrente en servidores "hágalo usted mismo" para elaborar una gran cantidad de proyectos de pequeña y mediana escala, abriendo las puertas, siendo un ejemplo los servidores de Thingsboard.

2.7. Thingsboard

Thingsboard es una plataforma de Internet de las cosas de código abierto que permite el rápido desarrollo, administración y escalamiento de proyectos. Provee la libertad de implementar servidores completamente independientes "hagalo usted mismo" a la vez que ofrece servicios comerciales administrados por ellos mismos. [The ThingsBoard Authors, 2021]

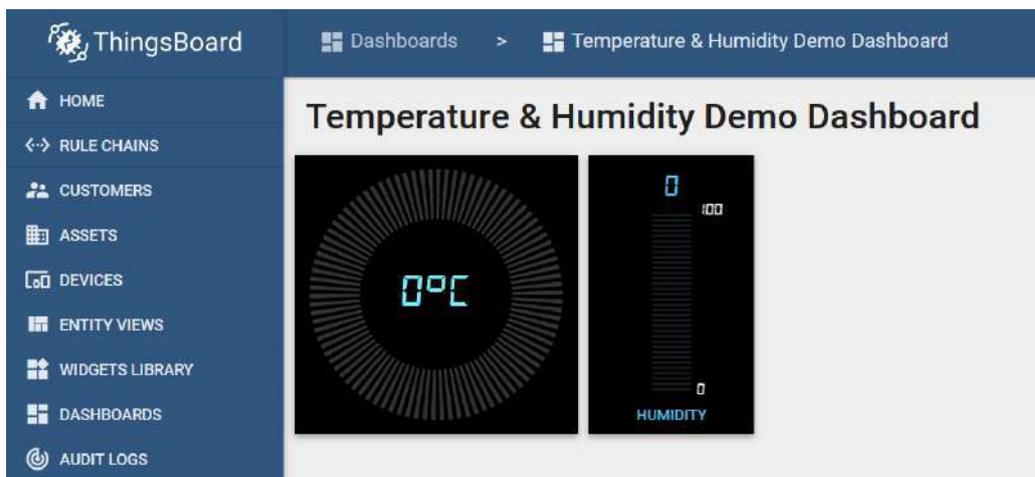


Figura 2.5: Ejemplo de una interfase thingsboard.

Fuente: Obtenida de instalación propia de thingsboard

Thingsboard es el servidor IoT que se eligió para este proyecto debido a que a la fecha de inicio de este proyecto, el IER-UNAM ya contaba con un servidor activo que facilitó la realización de múltiples pruebas. Además cuenta con una multitud de plantillas pre diseñadas que permiten una alta personalización en la manera que se manejan y visualizan los datos en tiempo real (ver Figura 2.5) lo que facilitó el monitoreo del prototipo realizado.

Cabe resaltar que para la primera prueba de este prototipo se utilizó thingsboard únicamente para el almacenamiento y recuperación de los datos sin embargo, a futuro se planean diseñar interfaces para controlar el encendido y la velocidad en que el sistema de intercambiadores de calor funciona en un determinado momento.

2.8. Arduino

Arduino es una plataforma de creación de hardware y software libre, lo que implica que los diseños y códigos generados son de libre copia, distribución y modificación para cualquier usuario. Las tarjetas Arduino pueden recibir y enviar señales para integrar diversos sensores y componentes siendo utilizadas como el cerebro en miles de proyectos que van desde el nivel más básico en un pasatiempo hasta la elaboración de instrumentos científicos complejos. [Arduino, 2018]

Entre las múltiples razones para elegir Arduino como plataforma para este proyecto en particular, destacan los bajos costos y la extensiva cantidad de librerías y códigos creados por los usuarios alrededor del mundo que han probado una multitud de dispositivos. Lo que permite revisar proyectos realizados por otros usuarios y utilizar los fragmentos pertinentes de sus códigos y diseños para integrarlos en un nuevo proyecto como el planteado en este trabajo.

Como se mencionó anteriormente el prototipo que se realizara para este trabajo debe medir temperatura por un periodo no menor a 1 año y para lograrlo se desea implementar conectividad Wi-Fi para así enviar los datos a un servidor, para esto a continuación se presentan los componentes que fueron seleccionados.

2.8.1. Tarjeta Arduino Mega 2560

La tarjeta Arduino UNO es el modelo más popular para la elaboración de proyectos sencillos sin embargo, se eligió la tarjeta Arduino Mega 2560 (ver Figura 2.6) ya que cuenta con una mayor cantidad de pines digitales y analógicos, así como mayor memoria y potencia de cálculo que podría aprovecharse en un futuro para integrar una mayor cantidad de dispositivos y sensores. Además mientras el Arduino UNO cuenta con 1 canal de comunicación serial, el Arduino Mega cuenta con 4, lo que permite que puede enviar y transmitir información de manera simultánea con hasta 4 dispositivos, estos canales adicionales son de utilidad para integrar un módulo Wi-Fi en el prototipo sin afectar la comunicación con la computadora utilizada para su configuración a la vez que permite flexibilidad a un futuro agregar otros módulos que requieran dichos canales como por ejemplo: un módulo Bluetooth, gps o gsm.

2. MARCO TEÓRICO

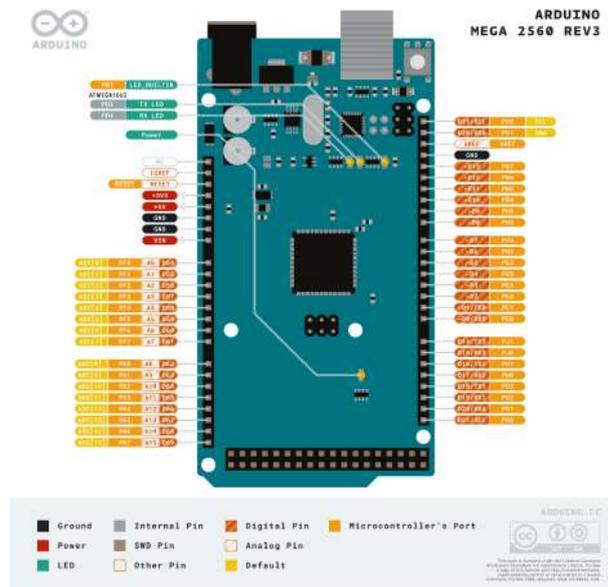


Figura 2.6: Pinout de tarjeta Arduino Mega. fuente: [Arduino, 2018]

Las especificaciones completas de esta tarjeta se encuentran en la tabla 2.1.

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (limite)	6-20V
Pines digitales (I/O)	54 (15 con capacidad de salida PWM)
Pines analógicos de entradas	16
Corriente DC máxima por pin (I/O)	20 mA
Corriente DC máxima por el pin 3.3V	50 mA
Memoria flash	256 KB de los cuales 8 KB son usados por el bootloader
Memoria SRAM	8 KB
Memoria EEPROM	4 KB
Velocidad de Reloj	16 MHz
largo	101.52 mm
ancho	53.3 mm
Peso	37 g

Tabla 2.1: Fuente:Elaboración propia a partir de [Arduino, 2018]

2.8.2. Módulo Wi-Fi ESP8266

Este módulo es un microcontrolador que integra una antena Wi-Fi y que puede funcionar de manera independiente o en conjunto con otras tarjetas Arduino y es de relativo bajo consumo eléctrico, haciéndolo perfecto para establecer la comunicación entre el Arduino y la plataforma ThingsBoard donde se almacenaran los datos.



Figura 2.7: Módulo Wi-Fi ESP8266.

2.8.3. Tarjeta ProtoShield Mega

Esta tarjeta o Shield tiene el mismo factor de forma que un Arduino mega y cuenta con pines que se alinean para facilitar el prototipado y diseño de PCB estilo shield, por lo que es ideal para este proyecto



Figura 2.8: ProtoShield.

2.8.4. Módulo XCSOURCE wemos 18650 batería Shield V3

Este módulo permite la utilización de una batería de litio tipo 18650 para fungir como una fuente de energía ininterrumpida, su uso permitirá que el prototipo continúe funcionando en caso de una desconexión accidental, mantenimiento, sin perder los datos ni configuración en el dispositivo. La duración aproximada del respaldo eléctrico es de 1 hora sin embargo puede ser escalable y considerar un tiempo mayor para futuros prototipos.



Figura 2.9: Módulo XCSOURCE wemos 18650.

2.8.5. Sensores de temperatura DS18B20

El DS18B20 es un sensor digital de temperatura que utiliza el protocolo 1-Wire para comunicarse. Este protocolo necesita solo un pin de datos para comunicarse y permite conectar más de un sensor en el mismo pin. Son ideales para medir cambios graduales de temperatura como los del suelo, ambiente y líquidos, sin embargo, son catalogados como sensores “lentos” y por lo tanto se recomienda no utilizarlos para detectar cambios rápidos de temperaturas como la de una ráfaga de viento.



Figura 2.10: Sensor digital de temperatura DS18B20.

Proceso de diseño del prototipo

3.1. Etapas del diseño

El diseño de este dispositivo implicó principalmente 3 etapas: la definición de las características del prototipo, selección de los componentes electrónicos, diseño de la placa de circuito y el diseño de la carcasa. Dichas etapas se describen en las secciones siguientes.

3.2. Definición de las características del prototipo

Para el diseño de cualquier dispositivo es importante delimitar las características que debe tener durante su funcionamiento y basarse en éstas para la selección de componentes y posterior elaboración. Para definir las características del prototipo a realizar se analizaron las limitaciones con las que cuentan los adquirentes de datos comerciales así como la cantidad y calidad de los datos necesarios para realizar los estudios previos de los intercambiadores de calor aire-tierra, obteniendo las siguientes características para el prototipo:

- Capacidad para medir temperatura en al menos 10 puntos distintos y con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ o mejor.
- Capacidad para medir temperatura con intervalos de tiempo largos, por lo que la velocidad de medición no será un factor.
- Resistencia a los elementos como polvo y lluvia.
- Contar con un sistema de energía de respaldo para evitar pérdida de datos.
- Capacidad de encender o apagar equipos de manera automática de acuerdo a las condiciones medidas, o de manera manual por el usuario a través de internet.
- Adquisición de datos y envío de los mismos a través de internet.

3. PROCESO DE DISEÑO DEL PROTOTIPO

- Contar con un costo significativamente menor que un equipo adquisidor de datos comercial (ahorro mayor a 60%).
-

Para cumplir con las características anteriores, fue necesario probar distintos sensores y evaluar ventajas y desventajas de los mismos para lograr cumplir las características mencionadas anteriormente.

A continuación se describe el proceso de selección para cada componente del prototipo.

3.3. Sensores de temperatura

Para la medición de la temperatura se consideraron 2 alternativas principales: termopares y sensores digitales.

En el caso de los termopares es necesario un circuito especializado externo al Arduino debido a que los cambios de voltaje generados por un termopar son muy pequeños ($< 1mV$) para que el Arduino los detecte sin embargo, cuentan con ventajas como: tiempo respuesta prácticamente inmediato, medición precisa que (± 0.1 °C de acuerdo al tipo de termopar) y por su reducido tamaño pueden instalarse con facilidad.

Por el otro lado los sensores digitales no requieren de circuitos adicionales, facilitando su integración con Arduino mediante pines digitales, y los hay de diversas precisiones muy aceptables para lo requerido en este trabajo. Con la desventaja de tener tiempos de respuesta más largos y ser significativamente más grandes que un termopar, lo que dificultaría su instalación para ciertas aplicaciones.

3.3.1. Termopares

Para probar termopares se usaron 4 placas shields modelo SEN-30007 (ver Figura 3.1) con 4 canales para conectar termopares tipo T cada una y con una resolución de 0.015625 °C y una exactitud de ± 0.7 °C de acuerdo con su ficha técnica, al estar diseñadas para utilizarse únicamente 1 placa por Arduino. Tras un proceso de calibración, diversas pruebas y adecuaciones (ver Figura 3.2), se lograron conectar hasta 3 tarjetas para un total de 12 termopares sin comprometer la precisión o el tiempo de respuesta de las mediciones sin embargo, el tamaño conjunto de estas tarjetas y su costo (aproximadamente \$ 1500 C/u) hizo que se optara por explorar otras alternativas.

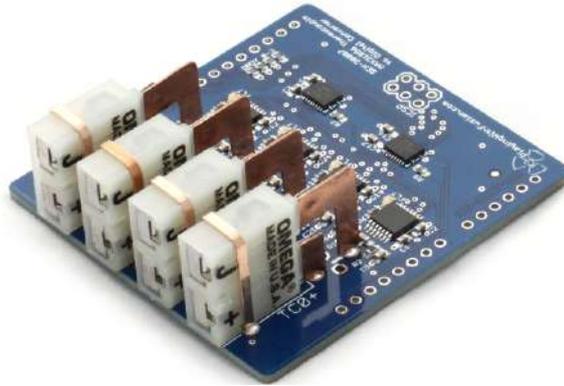


Figura 3.1: Placa Shield SEN 3007



Figura 3.2: Pruebas con multiples tarjetas SEN 30007

3.3.2. Sensor de temperatura digital DS18B20

Para probar sensores digitales, se optó por el DS18B20 el cual cuenta con una resolución de $0.0625\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una exactitud de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ de acuerdo a su ficha técnica. Entre las ventajas de este sensor sobre el módulo SEN 30007 destacan su costo (aproximadamente \$60 por sensor) y su simplicidad de conexión (pueden conectarse múltiples sensores en serie y conectar un solo juego de cables al equipo adquiredor de datos).

Una desventaja importante es que estos sensores tienden a detectar los cambios de temperatura de manera lenta comparados con un termopar debido a la gran masa térmica y la conversión digital de la temperatura (aproximadamente 1 segundo por cada sensor) por lo anterior no es posible medir cambios "instantáneos" en la temperatura con estos sensores. Sin embargo, ya que estos sensores serán utilizados para la medición de temperaturas del suelo y en un

3. PROCESO DE DISEÑO DEL PROTOTIPO

ambiente húmedo (Temixco, Morelos) y que además dichas mediciones serán por intervalos de tiempo largos, no es necesario medir con rapidez, por lo que se espera que estas desventajas no representen un impedimento para la utilización de este tipo de sensores en el prototipo.



Figura 3.3: Cámara de temperatura constante

Tras elegir estos sensores y con ayuda de diversos programas compartidos bajo código abierto, se identificó y calibró cada sensor de manera individual con ayuda de una cámara de temperatura constante de la marca AMETEK (modelo: PTC 125) facilitada por el IER UNAM (ver Figura 3.3). Debido a que estos sensores serian enterrados para medir la temperatura en conjunto con termopares fijados a una tubería de PVC, se pensó en encapsular los sensores (ver Figura 3.4) con la doble intención de protegerlos y fijarlos a la tubería de manera confiable (ver Figura 3.5)

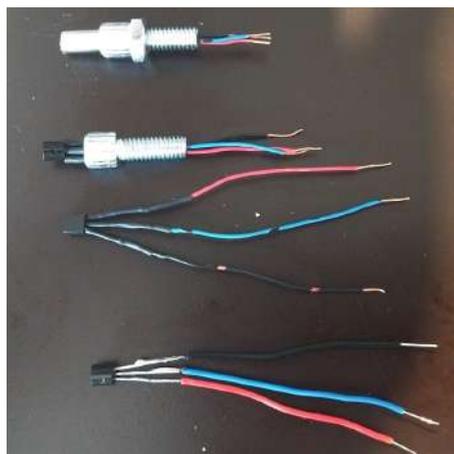


Figura 3.4: Encapsulamiento de los sensores DS18B20



Figura 3.5: Prueba de montaje de sensores a la tubería

3.4. Pruebas adicionales

De acuerdo a las características deseadas del dispositivo el sensor DS18B20 cumple con las necesidades inmediatas para este proyecto (definidas al principio de este capítulo), destacando sobre todo en la función como sonda de temperatura del suelo. Sin embargo, dicho sensor tiene sus limitaciones a la hora de monitorear en tiempo real la temperatura del aire circulando por el sistema intercambiador de calor y como a futuro se planea hacer un sistema de control y de monitoreo de las condiciones de un intercambiador de calor, es importante considerar medir otras variables.

Por lo anterior se propuso buscar y probar sensores que permitiesen monitorear temperatura,

3. PROCESO DE DISEÑO DEL PROTOTIPO

humedad, y velocidad del aire que circularía por el sistema, a continuación se detallan los sensores seleccionados para dicha tarea.

3.4.1. Sensor de Humedad y Temperatura BME 280

Se buscó una alternativa para monitorear los cambios instantáneos de las condiciones del aire que circularía por los intercambiadores de calor, y para eso se probaron sensores digitales de humedad y temperatura BME 280 (ver Figura 3.6), este sensor al contar con una masa térmica intermedia entre los termopares y los DS18B20 permite mejorar significativamente el tiempo en que los sensores detectan a los cambios de temperatura y por lo tanto reflejar la realidad de manera mas precisa.

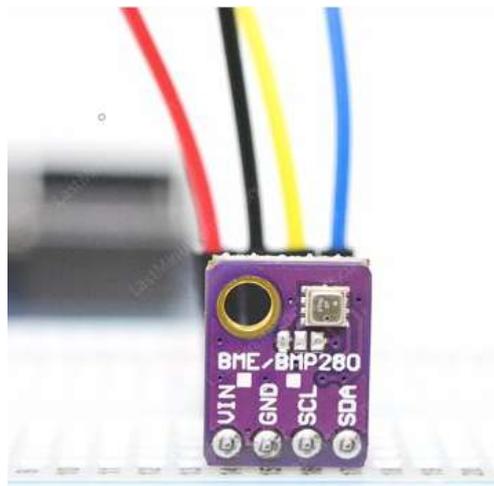


Figura 3.6: Imagen recuperada de: [LastMinuteEngineers]

Una desventaja importante frente al DS18B20 y la razón para no utilizar estos sensores como parte de la sonda de temperatura es la cantidad de cableado necesario para cada sensor y la dificultad de fijar estos sensores de manera segura a la tubería utilizada (ver Figura 3.7)

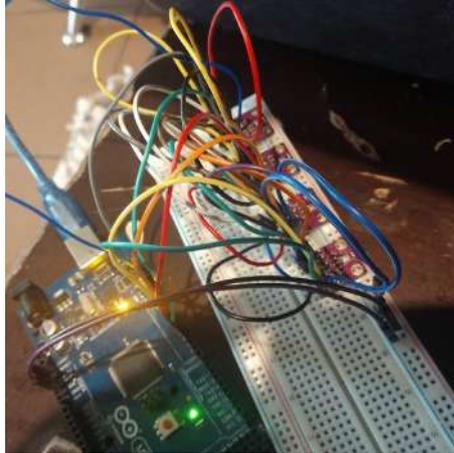


Figura 3.7: Pruebas con 4 sensores BME280 simultáneos.

Se hicieron pruebas para comprobar la funcionalidad de múltiples sensores de manera simultánea y confiable y se lograron conectar hasta 3 de ellos sin problemas, con lo que podrían instalarse en la entrada (P1), salida (P3) y en el punto más profundo del sistema de intercambiadores (P2) (ver Figura 3.8), en esos mismos 3 puntos de interés es donde se instalarían el resto de sensores.

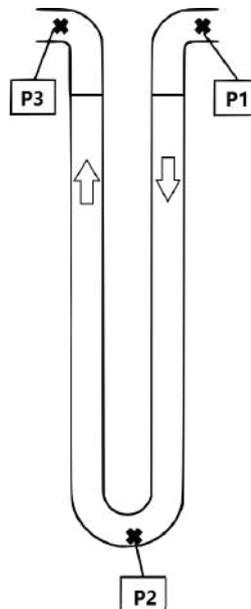


Figura 3.8: Esquema para futura prueba con sensores BME280.

A pesar de las pruebas realizadas la implementación de estos sensores y su comparación con los DS18B20 será para un trabajo futuro.

3.4.2. Sensor de diferencia de presión MLXV7002DP

Finalmente, para monitorear del flujo de aire en el sistema, se probaron sensores de presión diferencial que se utilizan para medir la velocidad del aire circulante en los intercambiadores de calor. A diferencia de los sensores de temperatura, la selección de este sensor fue complicada ya que cualquier sensor tendría que instalarse en el centro de la tubería y dependiendo de su tamaño y geometría podría impactar de manera significativa en la eficacia de los sistemas intercambiadores de calor se encontró un artículo que detalla uso del sensor MLXV7002DP en conjunto con tubos de Pitot (ver Figura 3.9) para medición de velocidad en tuberías [Joshua, 2019] y se decidió probar dicho sensor para este proyecto.



Figura 3.9: Sensores tubo Pitot.

Utilizando ventiladores y tubería de PVC se realizaron pruebas preliminares que indicaron que los sensores podrían cumplir con las necesidades del proyecto. Se diseñó y preparó una sección de tubería con todos los sensores: 3 DS18B20, 1 BME280 y 1 MLXV7002DP (ver Figura 3.10). Sin embargo, la emergencia sanitaria de 2020 hizo imperativa la instalación inmediata del sistema intercambiador de calor, por lo que se decidió implementar únicamente los sensores DS18B20, ya que su proceso de prueba y calibración estaba terminado y eran los únicos que se podían instalar de manera inmediata sin alterar el sistema de tuberías que estaba listo para enterrarse al sitio de pruebas.



Figura 3.10: Sección de tubería para pruebas

3.5. Protoshield Mega y placa de circuito impresa (PCB)

Para la tarjeta donde se conectaron los sensores se utilizó un protoshield mega, debido a que comparte las dimensiones físicas del Arduino Mega y facilita en gran medida la distribución de conectores necesarias para conectar distintos sensores. Se optó por utilizar terminales tipo HEADER hembra para todos los sensores en lugar de soldar los sensores directamente a la placa, para facilitar la calibración, prueba o remplazo de los mismos. El módulo Wi-Fi y una resistencia de $4.7\text{ K } \Omega$ fueron los únicos componentes soldados directamente a la placa debido a que no es necesaria su calibración o cambio. (ver Figuras 3.11 y 3.12)

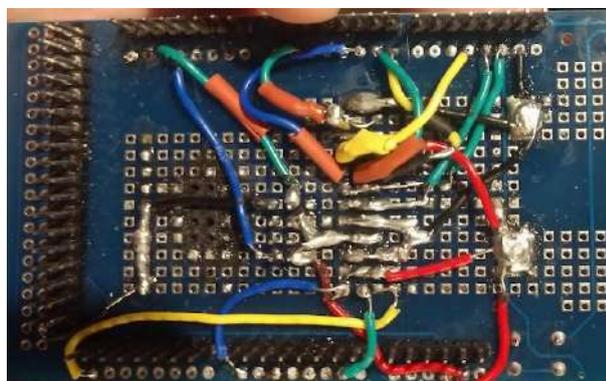


Figura 3.11: Vista inferior de la tarjeta shield.

3. PROCESO DE DISEÑO DEL PROTOTIPO

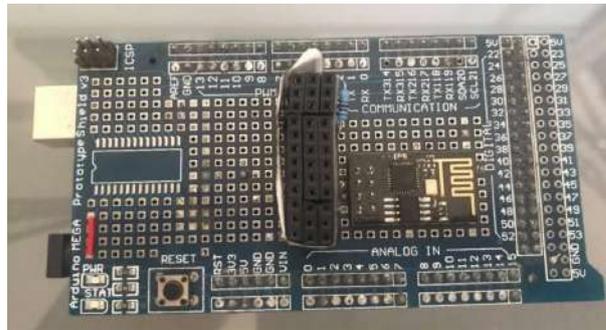


Figura 3.12: Vista superior de la tarjeta shield

Tras la prueba de la tarjeta prototipo se diseñó una PCB que sería enviada para fabricar (ver Figura 3.13), este diseño se hizo con la intención de aumentar la confiabilidad del prototipo así como para facilitar su replicabilidad a futuro.

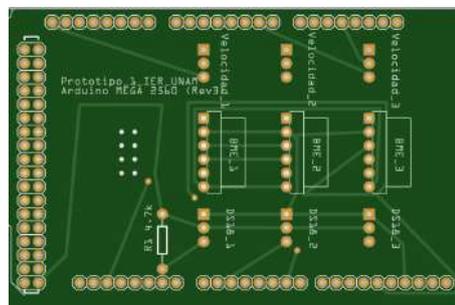


Figura 3.13: Diseño de PCB

3.6. Diseño de la carcasa

La carcasa fue elaborada con impresión 3D en material PLA (ácido poliláctico) ya que es una herramienta bastante accesible y muy utilizada para prototipos de bajo costo como el de este proyecto. Se diseñó una carcasa rectangular sencilla con el espacio suficiente para acomodar el Arduino Mega, el sistema de respaldo y todos los conectores. La caja cuenta con

4 orificios para colocar tornillos en el montaje, además tiene un espacio lateral para instalar un pasacables impermeable por donde se conectarían todos los sensores sin arriesgar el los componentes del prototipo. (ver Figura 3.14)

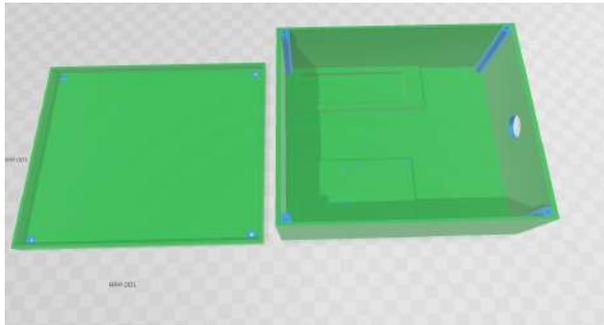


Figura 3.14: Carcasa diseñada

3.7. Preparación de la prueba de campo

3.7.1. Diseño del intercambiador y distribución de los sensores

Para la instalación de prueba del prototipo se preparo un intercambiador de calor aire-tierra con un total de 9 termopares instalados y conectados a un equipo adquisidor de datos convencional, originalmente se planeaba instalar 9 sensores digitales del prototipo en las mismas ubicaciones sin embargo, debido a la emergencia sanitaria la instalación y prueba del prototipo fue apresurada y no pudieron validarse sensores adicionales a los 7 de las pruebas anteriores (ver figura 3.3) por lo que se optó por excluir mediciones a la entrada y salida del intercambiador. La anterior decisión se tomó ya que agregar sensores posteriormente a las entradas de la tubería no requiere de extraer el intercambiador ni detener su funcionamiento.

En la siguiente figura 3.15 se puede apreciar como sería la instalación del intercambiador y los sensores instalados siendo los puntos marcados con AX los asociados al adquisidor de datos y TX los asociados al prototipo.

3. PROCESO DE DISEÑO DEL PROTOTIPO

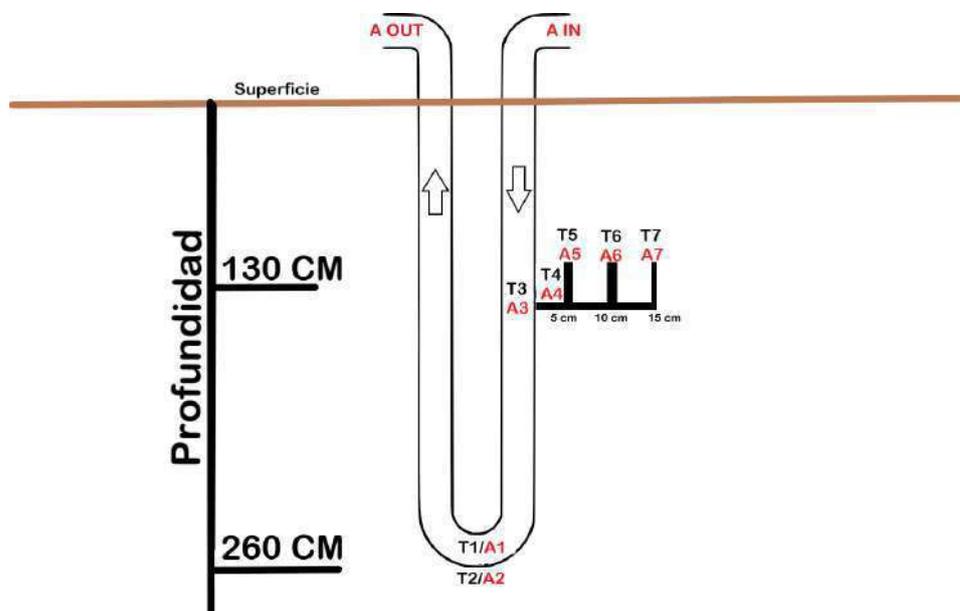


Figura 3.15: Distribución de los sensores de temperatura conectados al adquirente (marcados como AX) y al prototipo (marcados como TX)

En conjunto a la figura 3.15 las mediciones de los sensores son las siguientes (tomando en cuenta que para cada número hay 2 sensores A y T):

- Sensor 1: Temperatura del aire al interior de la tubería en el punto más profundo del intercambiador a 2.6 metros.
- Sensor 2: Temperatura de la tubería y tierra al exterior en el punto más profundo del intercambiador a 2.6 metros.
- Sensor 3: Temperatura del aire al interior de la tubería a una profundidad de 1.3 metros.
- Sensor 4: Temperatura de la tubería y tierra al exterior a una profundidad de 1.3 metros.
- Sensor 5: Temperatura de la tierra a 5 centímetros de la tubería y a una profundidad de 1.3 metros.
- Sensor 6: Temperatura de la tierra a 10 centímetros de la tubería y a una profundidad de 1.3 metros.
- Sensor 7: Temperatura de la tierra a 15 centímetros de la tubería y a una profundidad de 1.3 metros.

3.7.2. Instalación de los sensores

Por la falta de tiempo mencionada en lugar de encapsular los sensores como se había planeado (ver figura 3.4) se utilizó un barniz como aislante en las conexiones y cada sensor del prototipo fue instalado lo mas próximo posible a un termopar conectado al adquisidor de datos para su posterior comparación (ver figura 3.16).



Figura 3.16: Instalación de los sensores DS18B20

3.7.3. Instalación del intercambiador de calor

Con los sensores instalados (ver figura 3.17) el intercambiador de calor fue llevado al espacio previamente excavado para su instalación en la parte trasera de la dirección del IER-UNAM (ver figura 3.18). Es importante recalcar que la instalación de este intercambiador de calor estaba pensada para agregar

3. PROCESO DE DISEÑO DEL PROTOTIPO

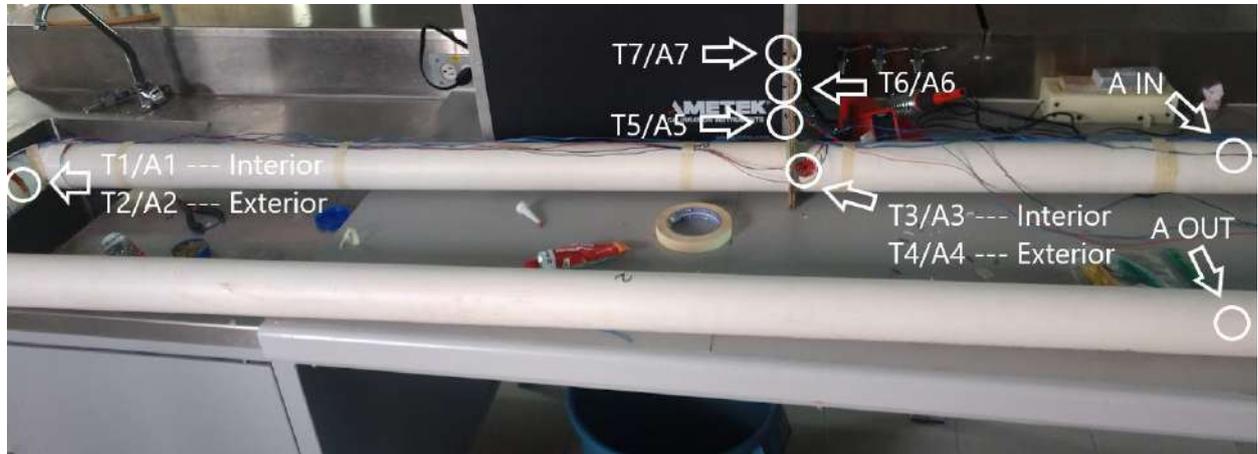


Figura 3.17: Fotografía de los sensores instalados en el intercambiador de calor



Figura 3.18: Fotografías del intercambiador de calor durante su instalación

3.7.4. Condiciones de operación del intercambiador de calor

La turbina que circuló el aire en el intercambiador de calor aire-tierra (ver figura 3.18) tuvo un horario fijo de funcionamiento de 9 a 18 horas todos los días que el prototipo estuvo en funcionamiento. Con lo que se espera notar cambios importantes en las temperaturas medidas alrededor de dichas horas.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de las pruebas con los sensores DS18B20 durante su calibración e instalación (recordando que para la instalación de prueba solo pudieron integrarse estos sensores por la emergencia sanitaria).

4.1. Resultados de la calibración

Para la calibración se conectaron al prototipo 7 sensores DS18B20 midiendo la temperatura cada 2.75 segundos (cantidad mínima de tiempo necesario para la lectura) y se utilizaron intervalos de 5 °C empezando en 0 °C hasta los 50 °C. Para alcanzar la temperatura inicial, se encendió el equipo AMETEK y se dejó llegar desde la temperatura ambiente hasta los 0 °C.

En la figura 4.1 se puede observar que la temperatura ambiente al inicio era de 30 °C y que al equipo le tomó aproximadamente 10 minutos al equipo alcanzar la temperatura designada de 0 °C. Es importante destacar que al inicio y final de la gráfica las líneas de todos los sensores están sobrepuestas, y se separan durante en el intervalo de tiempo en que la temperatura esta variando, ya que no todos los sensores están en contacto con las paredes de la cámara de temperatura controlada. A su vez existe un tiempo de retraso entre algunos sensores ya que están mas alejados de las paredes de la cámara, esto es de esperarse debido a que como se mencionó estos sensores no cambian su temperatura de manera inmediata.

Para los 10 intervalos de temperaturas se obtuvieron las figuras de la 4.2 la 4.11 y se puede observa que el comportamiento de retraso entre sensores se repitió para los 10 experimentos (siempre siendo 5 °C de diferencia), cada uno durando aproximadamente 10 minutos.

4. RESULTADOS

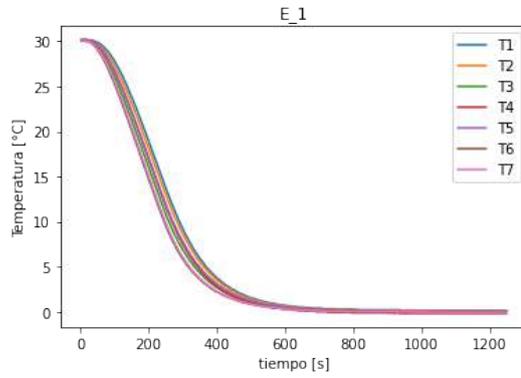


Figura 4.1: Experimento 1 de ambiente a 0°C.

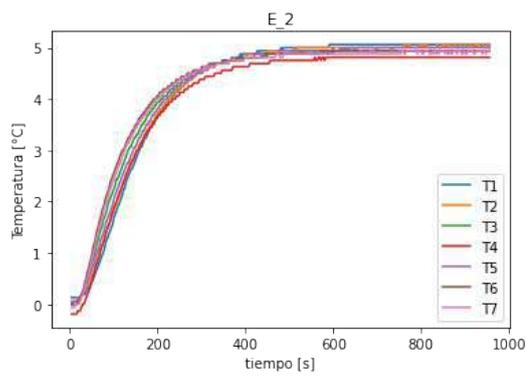


Figura 4.2: Experimento 2 de 0°C a 5°C .

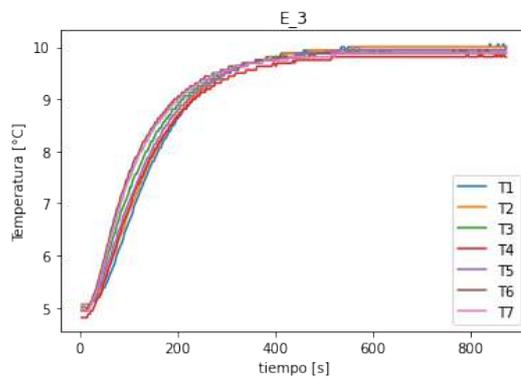


Figura 4.3: Experimento 3 de 5°C a 10°C.

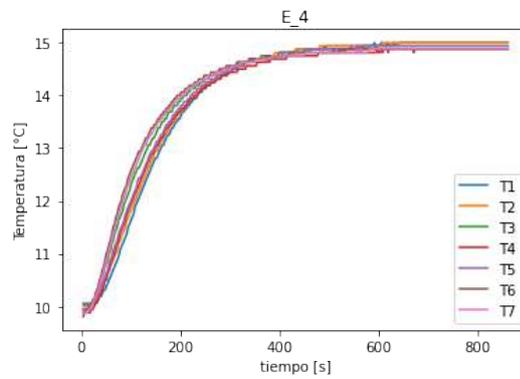


Figura 4.4: Experimento 4 de 10°C a 15°C

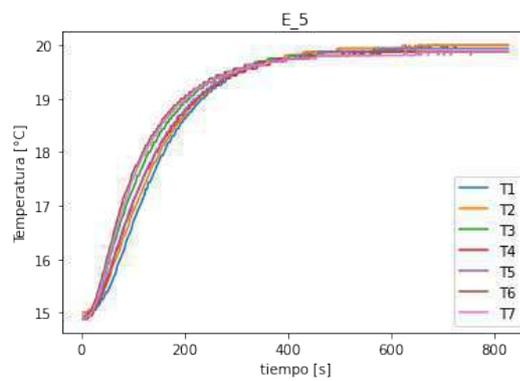


Figura 4.5: Experimento 5 de 15°C a 20°C..

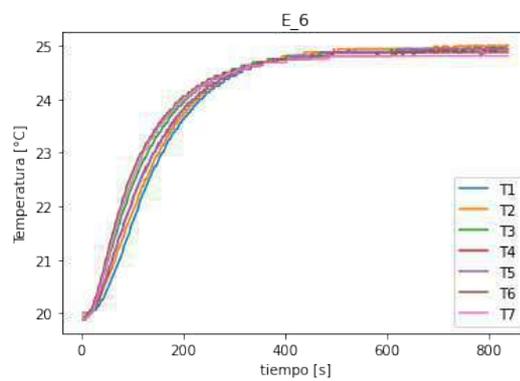


Figura 4.6: Experimento 6 de 20°C a 25°C.

4. RESULTADOS

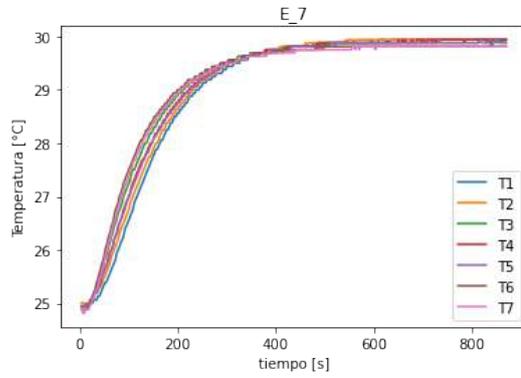


Figura 4.7: Experimento 7 de 25°C a 30°C.

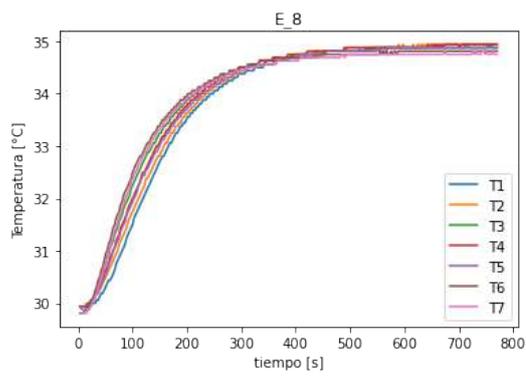


Figura 4.8: Experimento 8 de 30°C a 35°C.

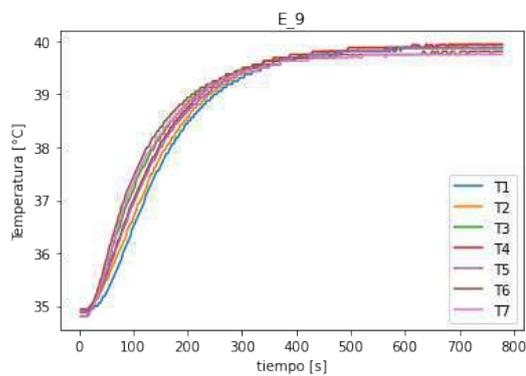


Figura 4.9: Experimento 9 de 35°C a 40°C.

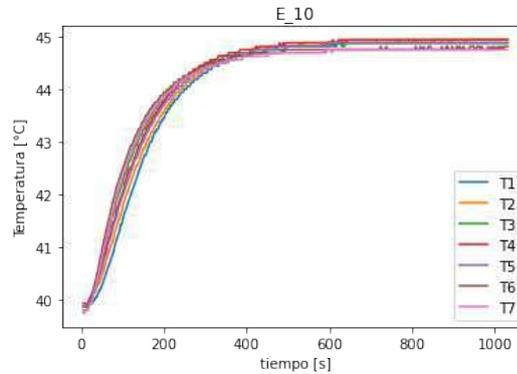


Figura 4.10: Experimento 10 de 40°C a 45°C .

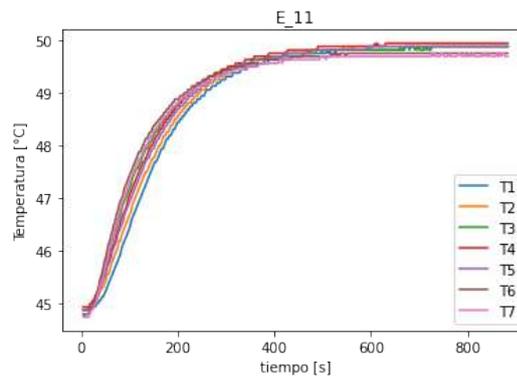


Figura 4.11: Experimento 11 de 45°C a 50°C.

Para evaluar los sensores, la cámara de temperatura constante contaba con un display informando la temperatura y su variación, por lo que cada vez que se cambió la temperatura y el equipo alcanzaba una variación de ± 0.1 °C se cronometraron 5 minutos para obtener suficientes mediciones de la temperatura deseada y poder observar el comportamiento de los sensores, de lo anterior se compararon las últimas 90 mediciones de los sensores en los 11 experimentos y se obtuvieron las gráficas de la figura 4.12 hasta la 4.22.

4. RESULTADOS

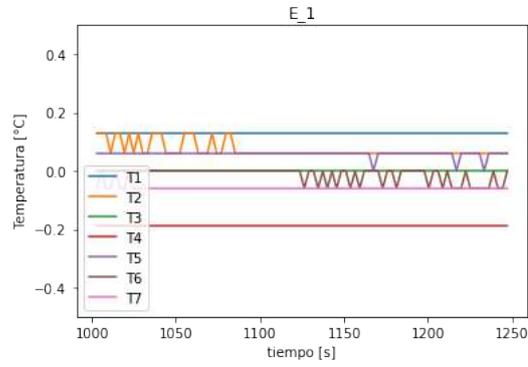


Figura 4.12: Experimento 1 de ambiente a 0°C.

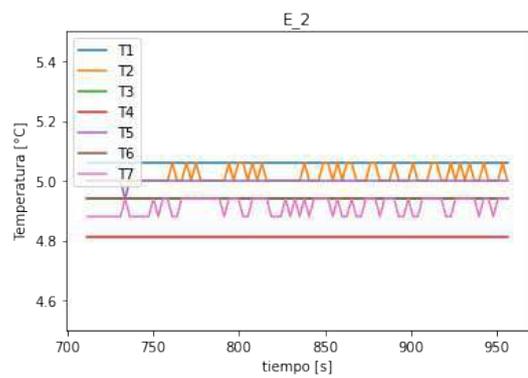


Figura 4.13: Experimento 2 de 0°C a 5°C.

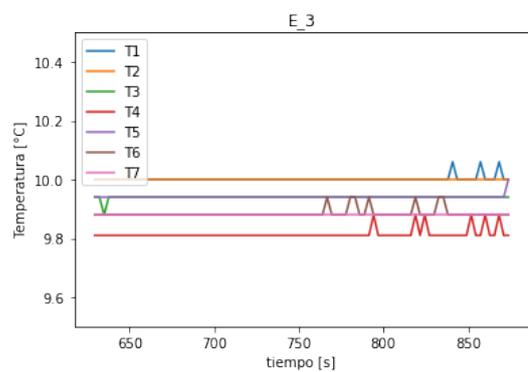


Figura 4.14: Experimento 3 de 5°C a 10°C.

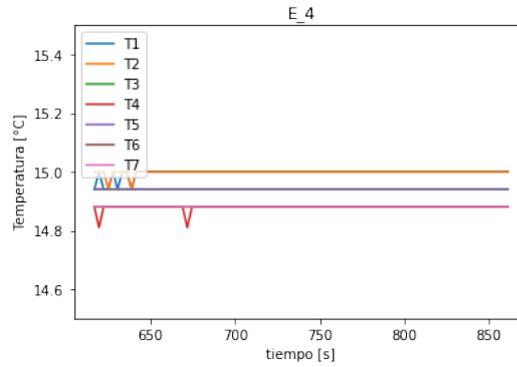


Figura 4.15: Experimento 4 de 10°C a 15°C.

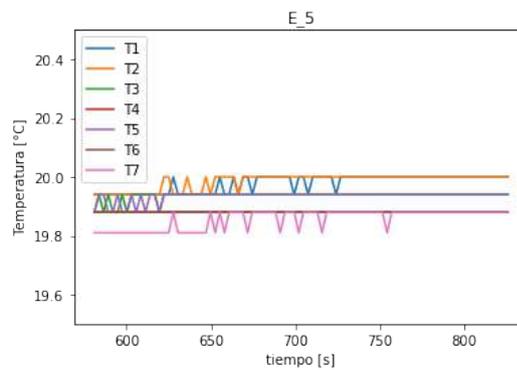


Figura 4.16: Experimento 5 de 15°C a 20°C.

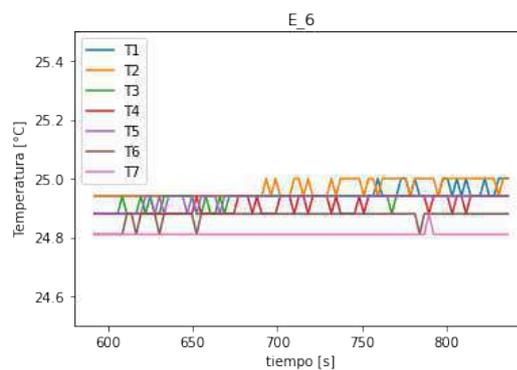


Figura 4.17: Experimento 6 de 20°C a 25°C.

4. RESULTADOS

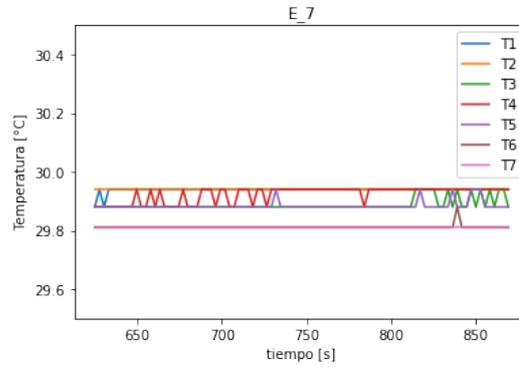


Figura 4.18: Experimento 7 de 25°C a 30°C.

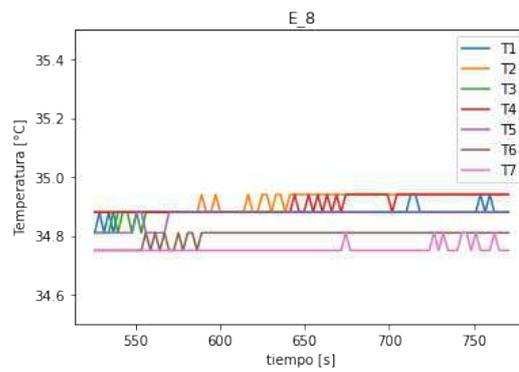


Figura 4.19: Experimento 8 de 30°C a 35°C.

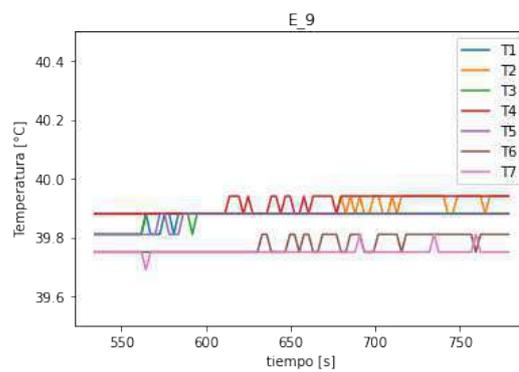
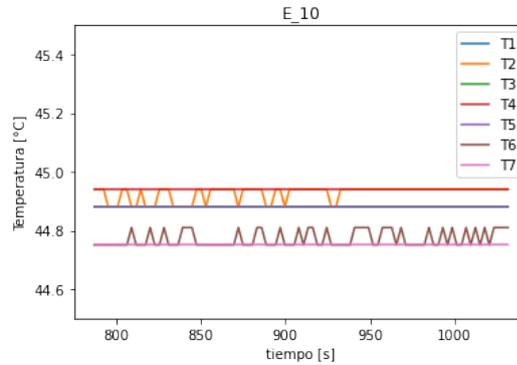
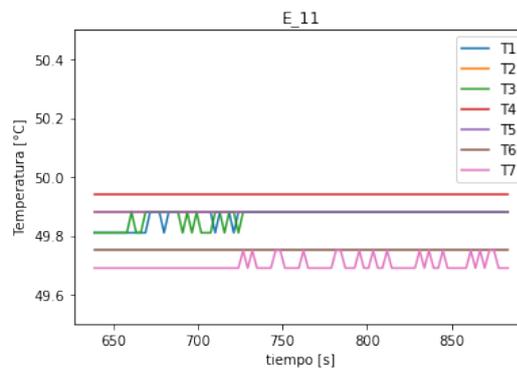


Figura 4.20: Experimento 9 de 35°C a 40°C.

**Figura 4.21:** Experimento 10 de 40°C a 45°C.**Figura 4.22:** Experimento 11 de 45°C a 50°C.

Podemos observar de las gráficas anteriores que los sensores presentan variaciones muy pequeñas (resolución de $0.0625\text{ }^{\circ}\text{C}$), y se puede apreciar que en cada experimento son distintos los sensores que se acercan más a la temperatura real, sin que un sensor tienda a sobrestimar o subestimar la temperatura de manera consistente en todos los experimentos, para facilitar el análisis se calcularon los promedios de cada sensor y su desviación estándar para cada experimento y a su vez el promedio y desviación de los sensores como un conjunto para cada experimento, obteniendo las siguientes tablas como resultado:

4. RESULTADOS

Tabla 4.1: Temperaturas promedio por sensor y experimento.

Sensores	Experimentos										
	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	E 8	E 9	E 10	E 11
T1	0.130 °C	5.060 °C	10.002 °C	14.997 °C	19.978 °C	24.948 °C	29.939 °C	34.880 °C	39.868 °C	44.880 °C	49.868 °C
T2	0.072 °C	5.017 °C	10.000 °C	14.999 °C	19.985 °C	24.965 °C	29.940 °C	34.917 °C	39.898 °C	44.927 °C	49.880 °C
T3	0.000 °C	4.940 °C	9.939 °C	14.940 °C	19.936 °C	24.928 °C	29.888 °C	34.875 °C	39.871 °C	44.880 °C	49.867 °C
T4	-0.190 °C	4.810 °C	9.815 °C	14.878 °C	19.880 °C	24.909 °C	29.923 °C	34.907 °C	39.914 °C	44.940 °C	49.940 °C
T5	0.058 °C	4.999 °C	9.941 °C	14.940 °C	19.935 °C	24.929 °C	29.884 °C	34.869 °C	39.867 °C	44.880 °C	49.880 °C
T6	-0.013 °C	4.940 °C	9.885 °C	14.880 °C	19.880 °C	24.871 °C	29.811 °C	34.799 °C	39.777 °C	44.771 °C	49.750 °C
T7	-0.058 °C	4.914 °C	9.880 °C	14.880 °C	19.856 °C	24.811 °C	29.810 °C	34.755 °C	39.751 °C	44.750 °C	49.701 °C

De la tabla 4.1 se resaltó en verde el valor mas cercano a la temperatura real y en rojo el mas alejado para cada experimento, donde podemos observar que los valores promedio nunca se alejaron mas de 0.3 °C a la temperatura real (valor que es menor a la precisión de $\pm 0.5^\circ\text{C}$), a simple vista las diferencias de temperatura son despreciables y de acuerdo con la tabla 4.2 (se resaltó con rojo la mayor desviación y con verde la menor para cada experimento) ningún sensor tuvo una desviación estándar superior a $\pm 0.03^\circ\text{C}$ (valor que es menor a la resolución de 0.0625°C) por lo anterior se concluyó que cualquier curva de calibración que se pudiera implementar sería ineficaz para mejorar la confianza en las temperaturas reportadas, ya que estas pruebas demuestran que por si mismos los sensores cumplen con la precisión requerida del proyecto ($\pm 0.5^\circ\text{C}$).

Tabla 4.2: Desviacion estandar por sensor y experimento.

Sensores	Experimentos										
	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	E 8	E 9	E 10	E 11
T1	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.011^\circ\text{C}$	$\pm 0.014^\circ\text{C}$	$\pm 0.029^\circ\text{C}$	$\pm 0.021^\circ\text{C}$	$\pm 0.009^\circ\text{C}$	$\pm 0.018^\circ\text{C}$	$\pm 0.026^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.026^\circ\text{C}$
T2	$\pm 0.027^\circ\text{C}$	$\pm 0.027^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.009^\circ\text{C}$	$\pm 0.026^\circ\text{C}$	$\pm 0.030^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.029^\circ\text{C}$	$\pm 0.028^\circ\text{C}$	$\pm 0.025^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$
T3	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.006^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.015^\circ\text{C}$	$\pm 0.024^\circ\text{C}$	$\pm 0.021^\circ\text{C}$	$\pm 0.019^\circ\text{C}$	$\pm 0.024^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.028^\circ\text{C}$
T4	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.018^\circ\text{C}$	$\pm 0.010^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.030^\circ\text{C}$	$\pm 0.027^\circ\text{C}$	$\pm 0.030^\circ\text{C}$	$\pm 0.030^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$
T5	$\pm 0.011^\circ\text{C}$	$\pm 0.006^\circ\text{C}$	$\pm 0.006^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.017^\circ\text{C}$	$\pm 0.023^\circ\text{C}$	$\pm 0.015^\circ\text{C}$	$\pm 0.026^\circ\text{C}$	$\pm 0.028^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$
T6	$\pm 0.025^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.016^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.023^\circ\text{C}$	$\pm 0.007^\circ\text{C}$	$\pm 0.024^\circ\text{C}$	$\pm 0.030^\circ\text{C}$	$\pm 0.029^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$
T7	$\pm 0.011^\circ\text{C}$	$\pm 0.030^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.033^\circ\text{C}$	$\pm 0.007^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.016^\circ\text{C}$	$\pm 0.013^\circ\text{C}$	$\pm 0.000^\circ\text{C}$	$\pm 0.024^\circ\text{C}$

Tabla 4.3: Relación entre sensores cada experimento.

Sensores	Experimentos										
	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	E 8	E 9	E 10	E 11
Promedio	0.000 °C	4.954 °C	9.923 °C	14.931 °C	19.921 °C	24.909 °C	29.885 °C	34.857 °C	39.849 °C	44.861 °C	49.841 °C
Desviacion estandar	$\pm 0.096^\circ\text{C}$	$\pm 0.076^\circ\text{C}$	$\pm 0.063^\circ\text{C}$	$\pm 0.049^\circ\text{C}$	$\pm 0.047^\circ\text{C}$	$\pm 0.049^\circ\text{C}$	$\pm 0.051^\circ\text{C}$	$\pm 0.055^\circ\text{C}$	$\pm 0.057^\circ\text{C}$	$\pm 0.068^\circ\text{C}$	$\pm 0.077^\circ\text{C}$

También fue un punto importante evaluar la temperatura promedio de todos los sensores para cada experimento, ya que al instalarse como una sonda de temperatura la idea es instalar 3 sensores para cada profundidad del suelo obteniendo un promedio y desviación estándar para

cada experimento, con lo que se generó la tabla 4.3 como en las anteriores esta resaltado en verde el promedio mas cercano al valor real y la desviación estándar de menor amplitud y en rojo los peores valores. De esta tabla podemos observar que la desviación estándar de los sensores es ligeramente mayor que cuando se comparan los sensores por separado sin embargo, que el valor sea menor a 0.1 °C permite predecir que en caso de que un sensor falle a una determinada profundidad los otros 2 sensores seguirán registrando valores muy similares, permitiendo diferenciar el sensor dañado y así potencialmente prevenir una falla en la recopilación y análisis de datos.

4.2. Resultados de la prueba de campo

Para los resultados de la prueba de campo se recuperaron los datos de la plataforma de thingsboard implementada en el IER-UNAM. Para realizar esta descarga existen distintas alternativas, en este trabajo se utilizó una libreta de Jupyter Notebook para conectarse de manera directa. Sin embargo, también existen alternativas como el paquetes instalable encontrado en la siguiente liga: <https://github.com/AltamarMx/iertools> dicha herramienta fue desarrollada en el IER-UNAM.

Gracias a pruebas realizadas anteriormente con termopares se esperaba que el barniz ofreciera un aislamiento total después de 3 días de secado, mientras que los termopares contaron con ese tiempo, los sensores DS18B20 tuvieron 24 horas antes de su instalación, ya que era el último día con el acceso garantizado a las instalaciones del IER-UNAM, lamentablemente 8 horas después se presentó lluvia, lo que ocasionó que pasadas 21.5 horas los sensores empezaron a presentar fallos en la lectura de la temperatura. (ver Figuras 4.23 y 4.24)

4. RESULTADOS

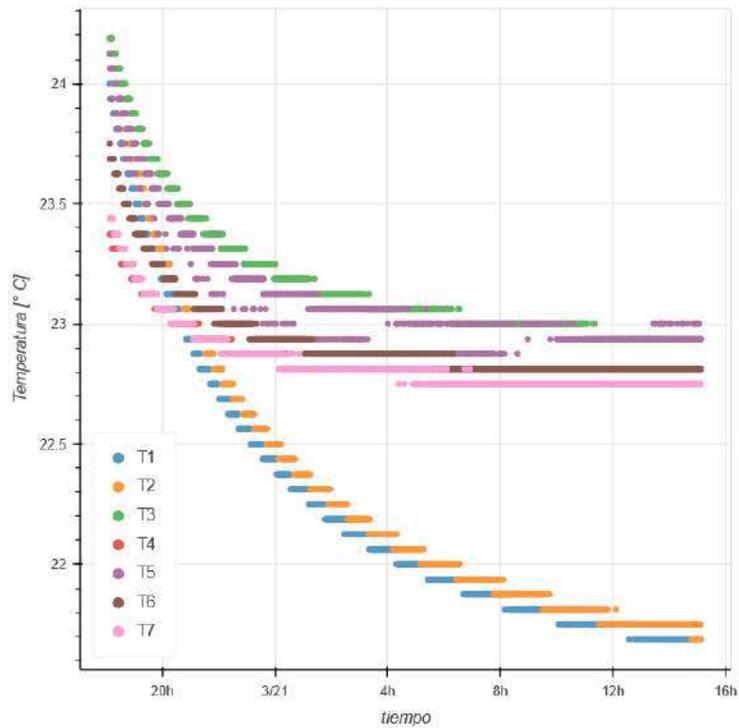


Figura 4.23: Sensores durante las primeras 21 horas del experimento.

Como se puede ver en la figura 4.23 los sensores estaban disminuyendo su temperatura a medida que entraban en equilibrio térmico con el suelo removido, y a lo largo de las horas se observa como los sensores 1 y 2 se separan del resto ya que estaban instalados en la parte mas profunda sin embargo, en la figura 4.24 podemos ver como la mayoría de los sensores registraron comportamientos muy extraños y aparentemente aleatorios en las mediciones de temperatura, y a su vez se registraron repetidamente los mismos valores hasta el punto de formar líneas horizontales en la gráfica, estos últimos valores (-127°C y 85°C) son los reportados por el sensor DS18B20 como parte de su programación. -127°C nos indica que el sensor esta totalmente desconectado, mientras que 85°C indica una desconexión parcial mientras se realiza la medición de temperatura. La presencia tan prominente de estos errores nos indicó que el agua de las lluvias causó un problemas importantes en el cableado de los sensores.

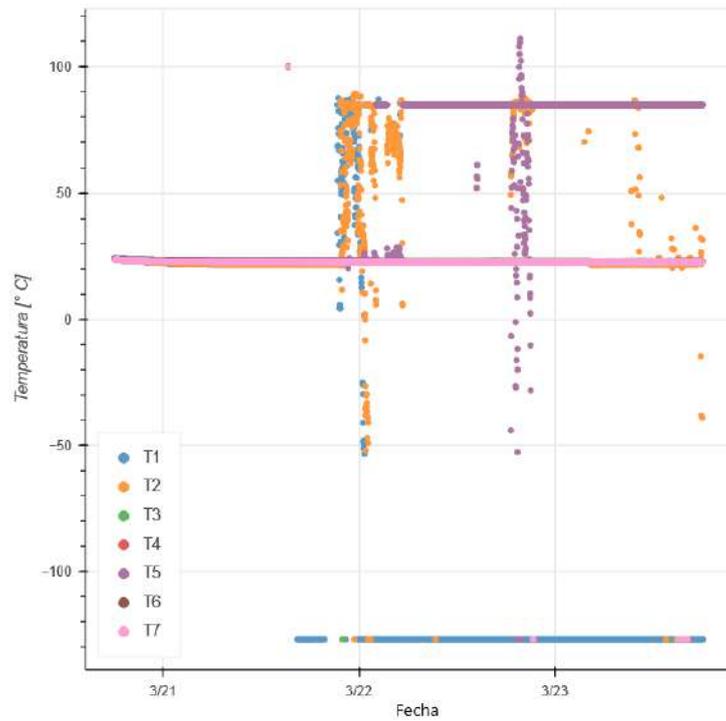


Figura 4.24: Sensores durante las primeras 72 horas del experimento.

A pesar del incidente, como se puede observar en la figura 4.25, hubo sensores como T3 y T4 que se mantuvieron funcionando de manera correcta durante gran parte del tiempo monitoreado (37 días) especialmente entre los días 1 y 12 de abril, por lo que se decidió evaluar la cantidad de errores que presentó cada sensor y evaluar si los datos de T3 y T4 son aceptables.

4. RESULTADOS

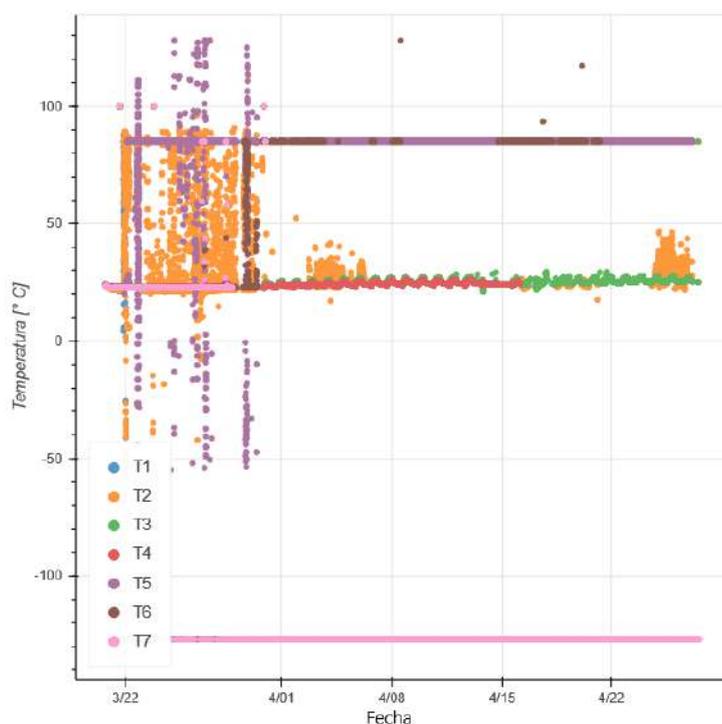


Figura 4.25: Sensores durante 37 días de monitoreo.

Tabla 4.4: Errores detectados de cada sensor para distintos periodos.

Periodo	Del 20 de marzo al 27 de abril		Del 1 al 12 de abril		Del 2 al 8 de abril	
Datos totales del periodo	52870		15425		8416	
Sensores	Errores de desconexión	Porcentaje	Errores de desconexión	Porcentaje	Errores de desconexión	Porcentaje
T1	51278	97.0%	15425	100.0%	8416	100.0%
T2	38528	72.9%	14276	92.6%	7268	86.4%
T3	10073	19.1%	1594	10.3%	42	0.5%
T4	19538	37.0%	382	2.5%	39	0.5%
T5	50489	95.5%	15425	100.0%	8416	100.0%
T6	41050	77.6%	15424	100.0%	8416	100.0%
T7	42054	79.5%	15425	100.0%	8416	100.0%

En la tabla 4.4 se resaltaron en rojo los sensores con el mayor porcentaje de errores registrados y en verde con el menor (para cada periodo). Podemos observar que exceptuando a T3 y T4, todos los sensores presentaron fallas durante la totalidad o la mayor parte del experimento, durante esta revisión se encontró que entre los días 2 y 8 de abril, los sensores T3 y T4 presentaron errores menos del 1% del tiempo, mientras el resto de los sensores presentaron errores en el 100%, exceptuando a T2 que presentó 86.4% con estos porcentajes se concluyó que los datos recopilados por T3 y T4 en este periodo de tiempo podrían ser aceptables y se evaluó el

prototipo comparando los datos de estos sensores "funcionales" con los datos del adquisidor de datos instalados en los mismos puntos y periodo de tiempo. Para esto es importante resaltar que el adquisidor fue programado para tomar datos cada 10 minutos mientras el prototipo enviaba datos cada 1 minuto, y por lo tanto solo se aislaron los datos del prototipo que coincidían con el horario de las mediciones del adquisidor.

Para analizar los resultados tanto del adquisidor como del prototipo, se generaron las figuras 4.26 a la 4.30, siendo A3 y T3 los sensores que miden la temperatura al interior del intercambiador, mientras que A4 y T4 miden la temperatura exterior directamente en contacto con la tubería y el suelo alrededor.

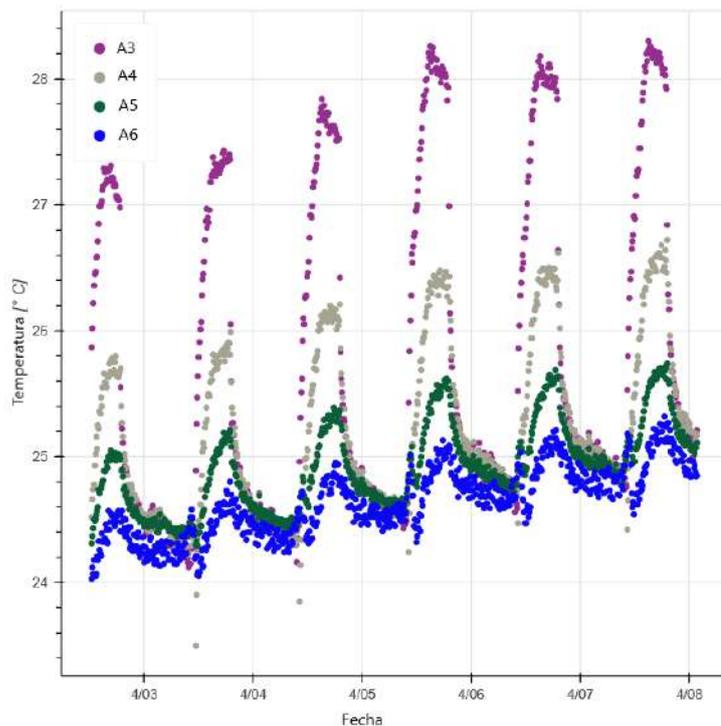


Figura 4.26: Temperaturas del Adquisidor.

Debido a que el adquisidor de datos es el equipo de referencia, primero se analizaron los datos obtenidos de él, se graficarían los sensores A3 hasta A7 ya que son los sensores ubicados en la misma profundidad que T3 y T4 sin embargo, A7 por algún error desconocido no fue registrado por el adquisidor de datos en la figura 4.26 podemos observar las curvas de temperatura que se forman cada día para cada sensor debido al ciclo de día y noche cada fecha marcada en el eje X de la gráfica representa las 00:00 horas del mismo. con esto podemos notar

4. RESULTADOS

que la temperatura máxima alcanzada por cada sensor es cercana a las 20:00 horas de cada día esto debido al horario en que el aire deja de circular por la tubería, también es notable que la temperatura continua disminuyendo hasta que se circula aire nuevamente, alrededor de las 10:00 horas, a su vez es importante resaltar también que a pesar de que los sensores A4, A5 y A6 están en el exterior y a solo unos centímetros de distancia, presentan diferencias de temperatura importantes entre sí (alrededor de 1°C de máximo a máximo) y a medida de que se alejan los sensores de la tubería la temperatura presenta una menor variación a lo largo del día (A6 presentando diferencias menores a 1°C entre máximo y mínimo diario). La visibilidad de estos fenómenos en los datos es un indicativo de que los sensores funcionaron correctamente.

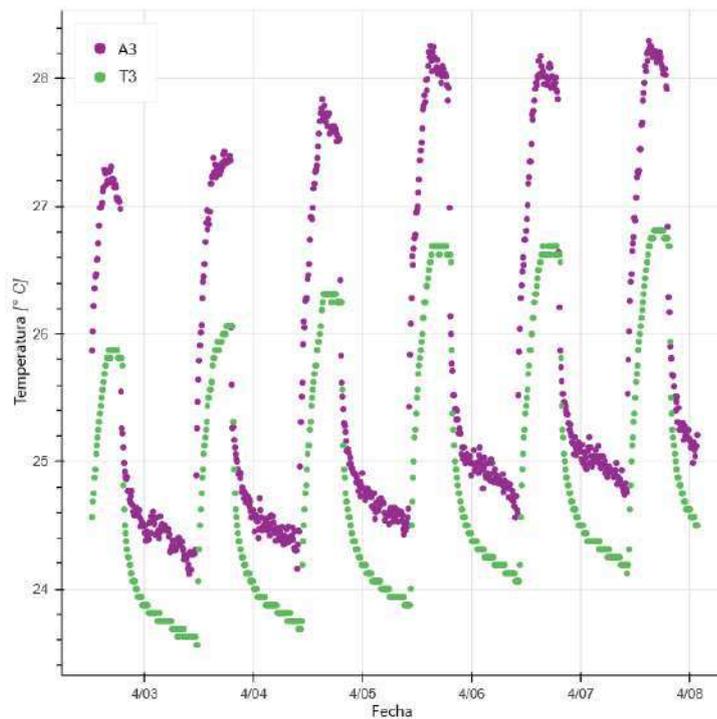


Figura 4.27: Temperaturas al interior de la tubería.

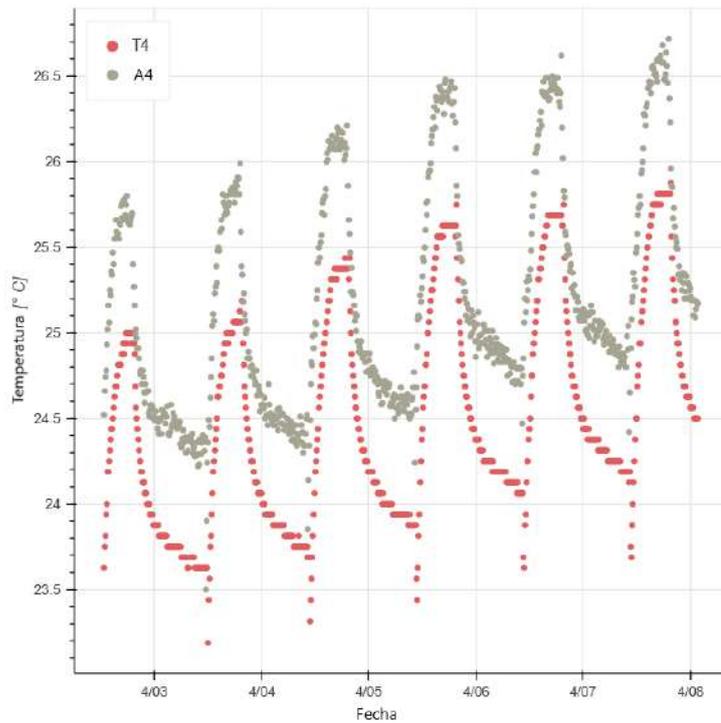


Figura 4.28: Temperaturas al exterior de la tubería.

En las figuras 4.27 y 4.28 podemos observar como T3 y T4 siguen comportamientos muy similares a su contraparte y se superponen sus valores en varias ocasiones sin embargo, en las temperaturas mínimas y máximas el prototipo tendió a subestimar los valores (diferencias de hasta 1.4 °C) en dichos puntos en relación a los sensores del adquisidor. A primera vista esto pareciera indicar que el prototipo y sus sensores funcionaron de la manera esperada con una desviación en su exactitud, para analizar con mayor detalle se aislaron los pares de sensores a comparar y se realizaron regresiones lineales obteniendo las figuras 4.29 y 4.30.

4. RESULTADOS

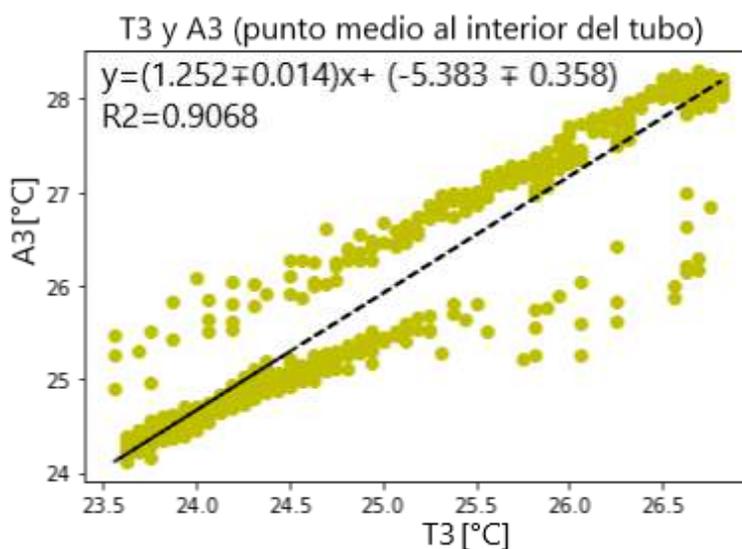


Figura 4.29: Regresión lineal para el sensor T3.

De las regresiones lineales se obtuvieron ecuaciones del tipo: $y = mx + b$ y un coeficiente de determinación R^2 donde el resultado ideal sería $m=1$, $R^2 = 1$ y $-0.5 < b < 0.5$, entre mas cercanos sean dichos valores mejor sería el ajuste y se podría determinar si las pruebas del prototipo y los sensores fueron exitosas.

En la figura 4.29 podemos observar la regresión lineal entre T3 y A3 que obtuvo la ecuación: $y = (1.252 \pm 0.014)x + (-5.383 \pm 0.358)$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9068$, basándonos únicamente en el valor de R^2 el modelo obtenido debería ser confiable para que los datos de nuestro prototipo se ajusten a los del adquisidor sin embargo, al observar la figura 4.29 podemos notar que hay una gran cantidad de puntos con valores en los que el modelo tanto subestimando como sobrestimando el valor real, considerando que los valores $m=1.252$ y $b=-5.383$ se alejan bastante de los valores ideales, este sensor no es confiable para sustituir a A3.

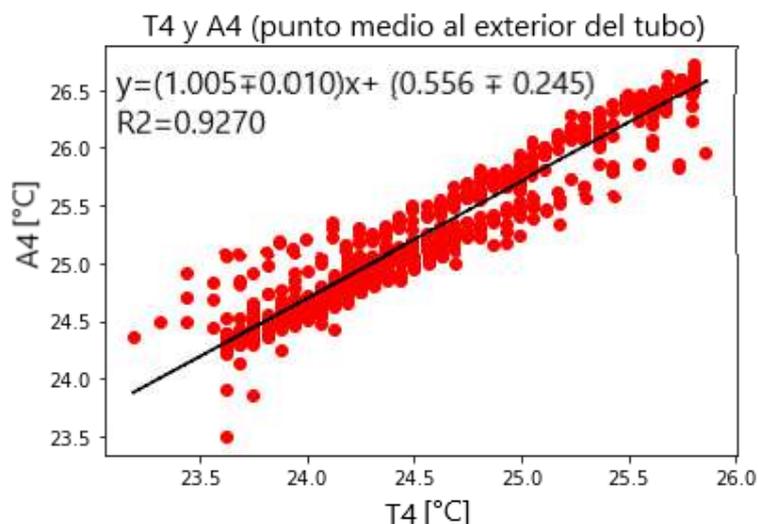


Figura 4.30: Regresión lineal para el sensor T4.

En el caso de T4 como se puede observar en la figura 4.30 se obtuvo la ecuación: $y = (1.005 \pm 0.010)x + (0.556 \pm 0.245)$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9270$, estos valores están considerablemente cercanos a los resultados ideales y en la gráfica podemos observar una mayor coincidencia entre los datos reales y el modelo. Esto podría significar que el sensor T4 podría sustituir a A4 con una exactitud cercana a $\pm 0.5^\circ$ que cumpliría con el objetivo de este proyecto sin embargo, es importante aclarar la razón de que T3 no funcionó mientras T4 sí.

T3 y A3 al estar instalados al interior de la tubería estaban en contacto con la pared de esta y con el aire circulante es posible que mientras A3 era capaz de cambiar su temperatura con el aire circulante por su reducido tamaño y masa térmica, el sensor T3 únicamente podía detectar cambios de temperatura en la pared de la tubería, los cuales serían menos pronunciados y generando una gran diferencia de temperatura entre ambos sensores. Esta hipótesis es respaldada por el hecho de que las diferencias más pronunciadas entre ambos sensores ($> 1^\circ\text{C}$) se presentan durante los horarios en que circula aire por la tubería y las menores diferencias ($\approx 0.5^\circ\text{C}$) en el resto del tiempo, esto en conjunto a los resultados del sensor T4 indican un grado de éxito en el prototipo, ya que los sensores DS18B20 parecieran ser suficientes para monitorear las condiciones del suelo sin embargo, son incapaces de medir adecuadamente la temperatura del aire al interior del intercambiador de calor, por lo que valdría la pena continuar con las pruebas de este prototipo con otros sensores complementarios como el BME 280 para dicha tarea.

Capítulo 5

Conclusiones

Durante la realización de este proyecto se consiguió diseñar, construir y probar un dispositivo basado en software y hardware libre para la medición de temperatura que en un futuro podría representar una alternativa más asequible en comparación con los adquisidores de datos comerciales, a la vez que se podrían ampliar estos sistemas con control a distancia de dispositivos monitoreados (a través del internet de las cosas). A pesar de que las pruebas del prototipo sufrieron por los contratiempos de la emergencia sanitaria y las fallas por la lluvia, los datos que se rescataron fueron determinantes para mostrar el potencial de este tipo de dispositivos. A la vez es importante resaltar que el sistema intercambiador de calor instalado a la par del prototipo (el cual fue diseñado por un trabajo separado) funcionó de manera exitosa logrando reducir la temperatura del espacio hasta 4 °C.

Es importante resaltar que se aprendió de manera considerable de las fallas que se presentaron, siendo el ejemplo más importante que a pesar de que la carcasa y el prototipo en general soportaron los elementos y cumplieron enviando la información de manera continua durante la prueba los sensores no fueron capaces de resistir. Debido a esto es importante probar la idea original de encapsular y fijar los sensores o utilizar la versión de fábrica previamente aislada. A la vez se comprobó que los sensores DS18B20 son inadecuados para medir la temperatura del aire en un sistema intercambiador de calor sin embargo, como una sonda de temperatura del subsuelo son más que suficientes y en conjunto con otros sensores podría diseñarse un sistema de monitoreo y control que cumpla con los objetivos planteados al inicio de este proyecto.

A pesar de que solo se cumplieron parcialmente los objetivos de este proyecto, el prototipo en su estado actual será implementado en el IER-UNAM como una sonda de temperatura para la materia de GEOTERMIA y se creó un manual de usuario que permitirá a los alumnos desarrollar prácticas en esta materia y posiblemente inspirarse en el desarrollo de más dispositivos similares al planteado.

Como trabajo a futuro se plantea diseñar y probar las ideas discutidas sobre los sensores BME y de tubos de pitot para monitorear las condiciones de operación del sistema de intercambiadores de calor, así como implementar el sistema de control que encienda y apague la turbina que controla la circulación del aire en el sistema y tener un mayor control en el acondicionamiento del espacio.

Además es importante continuar con el camino de que el prototipo presentado en el traba-

5. CONCLUSIONES

jo cuente con una licencia y repositorio que cumpla los criterios de una licencia de software y hardware libre apropiados, provisionalmente los archivos pueden encontrarse en el siguiente enlace:<https://github.com/Vasili-CLN/Sonda-Termica-Intercambiadores-de-Calor>. Finalmente, un trabajo a futuro interesante sería reinstalar el prototipo por un año para sondear las condiciones de temperatura del suelo a distintas profundidades y contrastar los datos obtenidos con los del estudio previo que fue realizado para dimensionar el sistema de intercambiador de calor que se utilizó para este trabajo y reafirmar la viabilidad de reemplazar un adquisidor de datos con un prototipo como el desarrollado en este trabajo.

Apéndice A

Manual para geotermia



Manual de prototipo: Adquisidor de datos basado en Arduino

Imagen del prototipo



Figura 1: Adquisidor de datos basado en Arduino

Descripción general del prototipo

El adquisidor de datos mostrado en la Figura 1 está diseñado con la intención de sustituir un equipo comercial en la tarea de medir la temperatura a través de sensores. A su vez, se diseñó una carcasa que ofrece protección ante los elementos para facilitar su instalación en distintas ubicaciones.



Figura 2: Vista interior del adquisidor de datos

Los datos de temperatura obtenidos serán de utilidad para dimensionar e instalar sistemas de intercambiadores de calor tierra-aire. En la fase de operación de dichos sistemas y con adaptaciones menores, el prototipo puede expandir su funcionamiento a monitorear y/o controlar las condiciones de los sistemas intercambiadores de calor.



Instrumentación y calibración del prototipo

Para poder programar y utilizar el dispositivo de manera correcta es necesario contar con los siguientes materiales:

- Una computadora con Arduino IDE, conexión a internet y un programa para correr código python .
- Credenciales de acceso a un servidor con ThingsBoard donde se almacenarán los datos.
- Acceso a un baño térmico o equipo similar para calibración de los sensores de temperatura.

Una vez se cuente con la computadora es necesario instalar las siguientes librerías en Arduino IDE:

Librería	Autor
BlueDot BME280 Library	BlueDot
DallasTemperature	Miles Burton, Tim Bewsome, Et al.
OneWire	Jim Studt, Tom Pollard, Et al.
WifiEsp	bportaluri
Thingsboard	Thingsboard Team
PubSubCliente	Nick O'Leary
arduinohttpCliente	Arduino
arduinoJson	Benoit Blanchon

Tabla 1: Librerías utilizadas

Junto con este manual se entregan un total de 5 programas esenciales para configurar e instalar la sonda, en forma de comentarios, cada uno contiene sus respectivas instrucciones y consideraciones.

A continuación, se describe la preparación del prototipo y brevemente el papel que tienen los programas anexos:

Primeramente se debe determinar la cantidad de sensores de temperatura (DS18B20) que se utilizarán y conectarlos todos al mismo tiempo en las terminales de tornillo correspondientes de la sonda (ver figura 3), posteriormente se debe desconectar la entrada usb señalada con el número 2 en la figura anterior, conectarlo a la computadora y cargar el programa "01-nombrador-de-sensores-ds18b20", el cual contabilizará e identificará los sensores de manera individual, este programa y los siguientes 2 nos generarán líneas de código e instrucciones en la terminal de arduino IDE que deberemos seguir para configurar completamente el dispositivo.



Figura 3: Guía de conexiones

En este punto el equipo tiene identificados todos los sensores y sin importar las veces que sean desconectados, reordenados o utilizados para otras pruebas, sin embargo, es necesario etiquetarlos físicamente para facilitar la calibración e instalación de los sensores, para esto se debe cargar el programa "02-Definicion-ds18" y podremos ver cada 3 segundos en la terminal de arduino IDE el número y la temperaturas que miden todos los sensores configurados anteriormente, podremos tomar los sensores con nuestros dedos individualmente, observar el número del sensor afectado y etiquetarlo de manera correspondiente con un pedazo de cinta y papel.



Posteriormente para la calibración continuaremos utilizando las temperaturas que el programa 02 nos provee. Se recomienda utilizar un baño térmico (ver figura 4), al menos 3 temperaturas conocidas y la función de regresión lineal en Excel para obtener la ecuación de cada sensor, sin embargo, se puede optar por una metodología distinta a consideración del usuario.



Figura 4: Proceso de calibración.

Una vez obtenidas las ecuaciones en formato $y = mx + b$ se debe cargar el programa "03-Monitoreo-Sonda" e introducir los valores encontrados de m y b para cada sensor en las líneas de código correspondiente (ver figura 5), una vez que agregamos todas las líneas de código generadas anteriormente en su respectivo lugar (ver figura 6), el prototipo está listo para desconectarse de la computadora e instalarse.



```
PARTE 1 DEL CODIGO
-----
char coma=34;
float m_sensor_1=1;
float b_sensor_1=0;
float T1;
float m_sensor_2=1;
float b_sensor_2=0;
float T2;
```

Valores de m

Valores de b

Figura 5: Ejemplo de líneas generadas por el programa 02.

```
-----CODIGO GENERADO POR PROGRAMA 01-----
uint8_t sensor1[8] = { 0x26, 0x02, 0xC5, 0x03, 0x00, 0x00, 0x00, 0x1E};
uint8_t sensor2[8] = { 0x26, 0xE9, 0xA2, 0x07, 0x00, 0x00, 0x00, 0x1E};
int Nsensors=2;
//-----
char coma=34;
float m_sensor_1=1;
float b_sensor_1=0;
float T1;
float m_sensor_2=1;
float b_sensor_2=0;
float T2;
//
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  //Serial es la comunicación WiFi
  Serial.println("Iniciando todo el programa");
  Serial3.begin(9600);
  InitWiFi();
  client.setServer( thingsboardServer, 1883 );
  lastSend = 0;
  //Inicia la comunicación Serial
  sensors.begin(); //Inicia los sensores de temperatura ds18b20
  Serial.println("Sensores Inicializados");
  inicio=0;
}
//-----PARTE 2 DEL CODIGO GENERADO POR PROGRAMA 02-----//
void RequestTemperatures()
{
  sensors.requestTemperatures();
  T1=m_sensor_1*sensors.getTempC(sensor1) + b_sensor_1;
  Serial.println(&String) "T1="+ T1 + "°C";
  tb.sendTelemetryFloat("T1", T1);
}
```

Figura 6: Ejemplo del programa 03 terminado y listo para operar.



Utilizando de referencia la figura 3 el cable usb debe volver a su lugar inicial, el interruptor señalado con el número 3 debe pasar de OFF a ON y el cable al exterior de la carcasa se enchufa a un contacto regular de corriente alterna, hay tres indicadores LED que nos permiten saber si todo está conectado correctamente (ver figura 7) una vez confirmado esto se puede atornillar la tapadera y colocar el equipo en el lugar más conveniente, la batería de respaldo permitirá desconectar la carcasa y cambiar el equipo de posición sin preocuparse por perder datos.



Figura 7: Indicadores de funcionamiento.



Una vez instalado el equipo los datos pueden ser revisados directamente en ThingsBoard o a través del programa "04-importacion-datos" el cual debe ser ejecutado en python, siguiendo las instrucciones de dicho programa podremos obtener en formato CSV los datos de los sensores que deseemos y podremos generar gráficas para fechas específicas (ver figura 8).

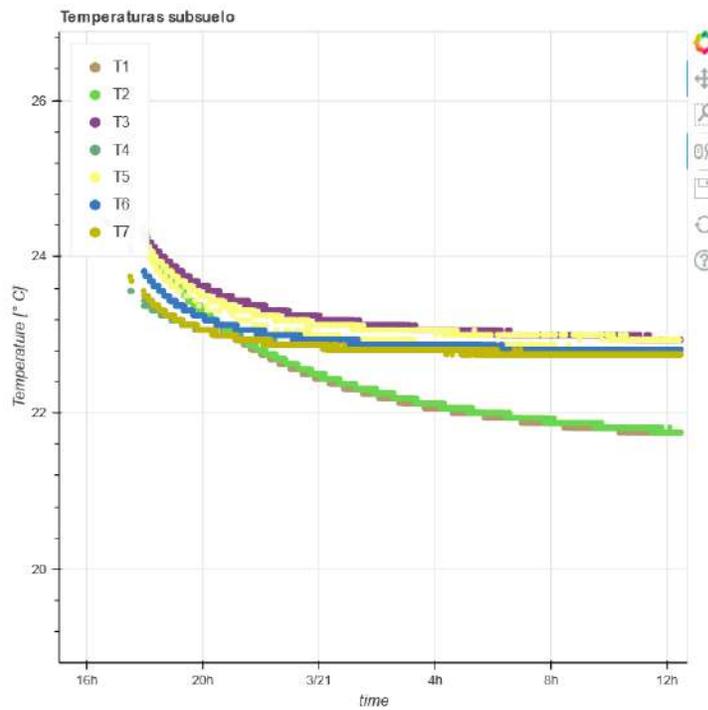


Figura 8: Datos de temperatura obtenidos con el prototipo.



Precauciones y recomendaciones

Es importante señalar que los programas 02 y 03 se limitarán a presentar errores si las líneas de código generadas por el programa 01 no son correctamente copiadas (ver figura 9).

Siempre que se inicie la operación del prototipo es necesario constatar que se están enviando los datos correctamente al servidor Thingsboard, la primera revisión se recomienda esperar 10 minutos después de conectar el equipo, en caso de no tener respuesta en el servidor es necesario volver a correr el programa 03 y leer con atención la terminal de arduino IDE para identificar algún posible error de conexión con la red wifi o servidor de ThingsBoard.

Posteriormente se recomienda vigilar los datos recibidos durante la primera semana de instalación, si después de esta semana no se detecta un comportamiento anormal en los datos se puede considerar una instalación exitosa, en caso contrario es necesario revisar las conexiones de los sensores al equipo y el aislamiento de los mismos.

En caso de la primera lluvia desde la instalación del prototipo es necesario esperar por lo menos 2 semanas y revisar nuevamente los datos, ya que con la humedad podrían fallar los sensores si no fueron correctamente aisladas las conexiones.

```
for (int i = 0; i < Nsensores; i++)  
'Nsensores' was not declared in this scope  
sensors  
exit status 1  
'Nsensores' was not declared in this scope
```

Figura 9: Error por falta de código.



Descripción de las partes del prototipo

Tarjeta Arduino Mega 2560

Placa principal seleccionada debido a su costo, amplia compatibilidad con módulos (todos los compatibles con Arduino UNO) y canales de comunicación (4 RX y 4 TX).



Figura 10: Tarjeta Arduino Mega 2560.

Módulo WIFI ESP8266

Tarjeta de comunicación wifi confiable para establecer comunicación entre los sensores y el servidor ThingsBoard donde se almacenarán los datos.



Figura 11: Módulo WIFI ESP8266.

Tarjeta ProtoShield

Tarjeta utilizada para concentrar los componentes a modo de prueba y obtener un diseño para un pcb final.

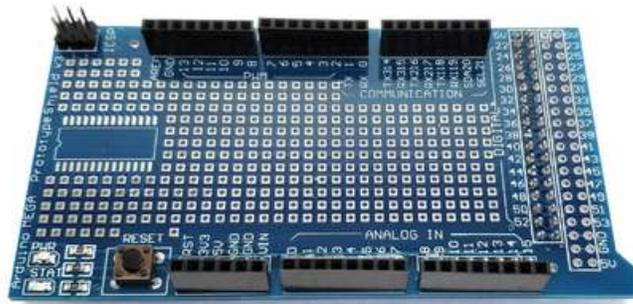


Figura 12: ProtoShield.

Modulo XCSOURCE wemos 18650 batería Shield V3

Es el módulo encargado de suministrar un suministro continuo de energía al módulo en caso de que haya una desconexión por falla, mantenimiento o reubicación del módulo sin necesidad de perder datos.



Figura 13: Modulo XCSOURCE wemos 18650.

Sensores de temperatura DS18B20

El DS18B20 es un sensor digital de temperatura que utiliza el protocolo 1-Wire para comunicarse, este protocolo necesita solo un pin de datos para comunicarse y permite conectar más de un sensor en el mismo bus. Estos sensores nos permiten conectar por lo menos 100 simultáneamente sin ningún problema e identificarlos individualmente utilizando 1 solo cable hacia nuestra tarjeta Arduino son ideales para medir cambios graduales de temperatura como los del suelo, ambiente y líquidos, sin embargo, son catalogados como sensores “lentos” y por lo tanto se recomienda no utilizarlos para medir temperaturas instantáneas como la de una ráfaga de viento.



Figura 14: DS18B20.

Apéndice B

Códigos Arduino

```

59 int inicio;
60 void setup() {
61     Serial.begin(9600);
62     //Serial1 es la comunicaci n wifi
63     Serial.println("Iniciando todo el programa");
64     Serial1.begin(9600);
65     InitWiFi();
66     client.setServer( thingsboardServer, 1883 );
67     lastSend = 0;
68     //Inicia la comunicaci n Serial
69
70     sensors.begin(); //inicia los sensores de temperatura ds18b20
71     Serial.println("Sensores iniciados");
72     inicio=0;
73 }
74
75 void loop() {
76     //revisi n del modulo wifi
77     status = WiFi.status();
78     if ( status != WLCONNECTED) {
79         while ( status != WLCONNECTED) {
80             Serial.print("Attempting to connect to WPA SSID: ");
81             Serial.println(WIFLAP);
82             // Connect to WPA/WPA2 network
83             status = WiFi.begin(WIFLAP, WIFLPASSWORD);
84             delay(500);
85         }
86         Serial.println("Connected to AP");
87     }
88
89     if ( !client.connected() ) {
90         reconnect();
91     }
92
93     if ( inicio==0)
94     {
95         tb.sendTelemetryFloat("T1", 100);
96         tb.sendTelemetryFloat("T2", 100);
97         tb.sendTelemetryFloat("T3", 100);
98         tb.sendTelemetryFloat("T4", 100);
99         tb.sendTelemetryFloat("T5", 100);
100        tb.sendTelemetryFloat("T6", 100);
101        tb.sendTelemetryFloat("T7", 100);
102        Serial.println("Se envio la se al para iniciar");
103    }
104    if(inicio==1)
105    {
106        temperatura_1();
107        tb.sendTelemetryFloat("T1", T1);
108        tb.sendTelemetryFloat("T2", T2);
109        tb.sendTelemetryFloat("T3", T3);
110        tb.sendTelemetryFloat("T4", T4);
111        tb.sendTelemetryFloat("T5", T5);
112        tb.sendTelemetryFloat("T6", T6);
113        tb.sendTelemetryFloat("T7", T7);
114        Serial.println("Se enviaron todos los datos...");
115    }
116    inicio=1;
117    delay(60000);
118
119 } //Aqui termina el ciclo infinito del arduino
120
121
122
123
124 void InitWiFi()
125 {
126     // initialize serial for ESP module
127     // initialize ESP module
128     WiFi.init(&Serial1);

```


2. Códigos para manual de Geotermia

2.1. Código para identificar y nombrar sensores

```
1 #include <OneWire.h>
2 #include <DallasTemperature.h>
3 // Data wire is plugged into port 2 on the Arduino
4 #define ONE_WIRE_BUS 2
5 // Setup a oneWire instance to communicate with any OneWire devices
6 OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
7 // Pass our oneWire reference to Dallas Temperature.
8 DallasTemperature sensors(&oneWire);
9 // variable to hold device addresses
10 DeviceAddress Thermometer;
11
12 int deviceCount = 0;
13
14 void setup(void)
15 {
16     // start serial port
17     Serial.begin(9600);
18
19     // Start up the library
20     sensors.begin();
21
22     // locate devices on the bus
23     Serial.println("Detectando sensores...");
24     Serial.print("Se encontraron: ");
25     deviceCount = sensors.getDeviceCount();
26     Serial.print(deviceCount, DEC);
27     Serial.println(" sensores.");
28     Serial.println("");
29     if(deviceCount > 0)
30     {
31         Serial.println("Las siguientes lineas deben ser copiadas al siguiente programa en la
32             linea se alada como: CODIGO GENERADO POR PROGRAMA 01");
33     }
34     else
35     {
36         Serial.println("No se detectaron dispositivos, revise las conexiones!!");
37     }
38     for (int i = 0; i < deviceCount; i++)
39     {
40         Serial.print("uint8_t sensor");
41         Serial.print(i+1);
42         Serial.print("[8] = { ");
43         sensors.getAddress(Thermometer, i);
44         printAddress(Thermometer);
45     }
46     Serial.println( (String) "Int Nsensores=" + deviceCount + ";" );
47 }
48 void loop(void)
49 {}
50
51 void printAddress(DeviceAddress deviceAddress)
52 {
53     for (uint8_t i = 0; i < 8; i++)
54     {
55         Serial.print("0x");
56         if (deviceAddress[i] < 0x10) Serial.print("0");
57         Serial.print(deviceAddress[i], HEX);
58         if (i < 7) Serial.print(", ");
59     }
60     Serial.println("}");
61 }
```

Listing 2: nombrador de sensores ds18b20

2.2. Código para agregar curva de calibración a sensores

```
1 //-----//Las líneas provenientes del código 01 deben ser colocadas
2 //-----// en el comentario después de las librerías indicado con múltiples
3
4 //Librerías y definiciones necesarias para el programa
5 #include <OneWire.h>
6 #include <DallasTemperature.h>
7 #define ONE_WIRE_BUS 2
8 OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
9 DallasTemperature sensors(&oneWire);
10 float tempC;
11 int conteo;
12 char coma=34;
13
14 //-----CODIGO GENERADO POR PROGRAMA
15 //-----//
16
17 //
18
19 void setup(void)
20 {
21   Serial.begin(9600);
22   sensors.begin();
23   conteo=1;
24   Serial.println("\n \n \n");
25   Serial.println("Bienvenido al programa para identificar y calibrar los sensores! \n");
26   ;
27   delay(2000);
28   Serial.println("\n Se requiere obtener la ecuación en formato (y = m x + b) para cada
29   sensor,");
30   Serial.println("Si ya terminaste con tu calibración, rellena tus resultados para m y
31   b, los valores iniciales son m=1 y b=0 para fines demostrativos");
32   Serial.println("... agrega las siguientes líneas en el programa 03 en el lugar indicado
33   ... \n \n \n");
34   delay(4000);
35   Serial.println("PARTE 1 DEL CODIGO \n-----");
36
37   Serial.println("char coma=34;");
38
39   for (int i = 0; i < Nsensores; i++)
40   {
41     Serial.println( (String) "float m_sensor_" + (i+1) + "=1;");
42     Serial.println( (String) "float b_sensor_" + (i+1) + "=0;");
43     Serial.println( (String) "float T" + (i+1) + ";");
44   }
45   Serial.println("\n \n \n");
46
47   Serial.println("PARTE 2 DEL CODIGO \n ----- \n ");
48   delay(4000);
49
50   Serial.println("void MedirTemperaturas ()");
51   Serial.println("{}");
52   Serial.println("sensors.requestTemperatures();");
53   for (int i = 0; i < Nsensores; i++)
54   {
55     Serial.println( (String) "T" + (i+1) + "=m_sensor_" + (i+1)+ "*sensors.getTempC(
56     sensor" + (i+1) + ") + b_sensor_" + (i+1)+ ";");
57     Serial.println((String) "Serial.print((String) " + coma + "T" + (i+1) + "=" + coma
58     + "+ T" + (i+1) + " + " + coma + " C " + coma + ");");
59     Serial.println( (String) "tb.sendTelemetryFloat(" + coma + "T" + (i+1)+ coma + ", T"
60     + (i+1) + "); \n" );
61   }
62
63   Serial.println("{}\n");
64   Serial.println("----- \n \\AQUI ACABAN LAS LINEAS QUE DEBEN
65   COPIARSE \n \n \n");
66   delay(4000);
```

```

59
60 Serial.println("en 20 segundos se empezaran a mostrar las temperaturas de los
    sensores");
61 delay(20000);
62 }
63
64 void loop(void)
65 {
66 //Se toma la medicion de todos los sensores
67 sensors.requestTemperatures();
68 Serial.println( (String) "Medic ion:" + (conteo) );
69 Serial.println("-----");
70 for (int i = 0; i < Nsensores; i++)
71 {
72 tempC = sensors.getTempCByIndex(i);
73 Serial.println( (String) "Sensor: " + (i+1) + ": " + tempC + " C " );
74 }
75
76 Serial.println("-----");
77 delay(3000);
78 conteo=conteo+1;
79 }

```

Listing 3: Calibrador de sensores

2.3. Codigo para agregar los sensores a thingsboard

```

1 uint8_t sensor1[8] = { 0x28, 0x8A, 0xC9, 0x03, 0x00, 0x00, 0x80, 0xEE};
2 uint8_t sensor2[8] = { 0x28, 0xE9, 0xA2, 0x07, 0x00, 0x00, 0x80, 0x1B};
3 int Nsensores=2;
4
5 char coma=34;
6 float m_sensor_1=1;
7 float b_sensor_1=0;
8 float T1;
9 float m_sensor_2=1;
10 float b_sensor_2=0;
11 float T2;
12
13
14
15 //-----Aquí se detallan todas las librerías, revisa todos
    los guines para encontrar donde pegar las líneas de código correctas
    //-----
16 /*
17 Código para la elaboración de la tesis de Licenciatura de Emilio Carmona Flores
18 a continuación se presentan todos las leyendas anexas de los códigos en los cuales
19 me
20 base para el funcionamiento de los diversos sensores usados:
21 */
22 //----- //librerías Necesarias para el funcionamiento del programa, no es
    necesario editar nada -----
23 #include <OneWire.h>
24 #include <DallasTemperature.h>
25 // Data wire is plugged into port 2 on the Arduino
26 #define ONE_WIRE_BUS 2
27 // Setup a oneWire instance to communicate with any OneWire devices
28 OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
29 // Pass our oneWire reference to Dallas Temperature.
30 DallasTemperature sensors(&oneWire);
31 //Librerías y definiciones necesarias para el módulo wifi
32 #include <WiFiEspClient.h>
33 #include <WiFiEsp.h>
34 #include <WiFiEspUdp.h>
35 #include <PubSubClient.h>
36 #include <ThingsBoard.h>
37 //-----Las siguientes 2 líneas son el nombre de la red NOMBRE DE
    LA RED WIFI Y CONTRASEA

```

```

37 #define WIFLAP "Carmona" //Nombre de la red
38 #define WIFLPASSWORD "Carmona222" //Contrase a de la red
39
40 //-----//EDITAR EL TOKEN Y EL SERVIDOR THINGSBOARD
    AL QUE SE ENVIARAN LOS DATOS
41
42 #define TOKEN "████████████████████" //TOKEN
43 char thingsboardServer[] = "██████████"; //DIRECCION DEL SERVIDOR
44 // Initialize the Ethernet client object
45 WiFiEspClient espClient;
46 PubSubClient client(espClient);
47 ThingsBoard tb(espClient);
48 int status = WLIDLE.STATUS;
49 unsigned long lastSend;
50 int imploc;
51 int inicio;
52
53 //-----CODIGO GENERADO POR PROGRAMA
    01-----//
54 //
55
56 //-----PARTE 1 DEL CODIGO GENERADO POR PROGRAMA
    02-----//
57 //
58
59 void setup() {
60     Serial.begin(9600);
61     //Serial1 es la comunicaci n wifi
62     Serial.println("Iniciando todo el programa");
63     Serial1.begin(9600);
64     InitWiFi();
65     client.setServer( thingsboardServer , 1883 );
66     lastSend = 0;
67     //Inicia la comunicaci n Serial
68     sensors.begin(); //inicia los sensores de temperatura ds18b20
69     Serial.println("Sensores iniciados");
70     inicio=0;
71 }
72 //-----PARTE 2 DEL CODIGO GENERADO POR PROGRAMA
    02-----//
73
74 //
75
76 void loop() {
77     //revisi n del modulo wifi
78     status = WiFi.status();
79     if ( status != WLCONNECTED) {
80         while ( status != WLCONNECTED) {
81             Serial.print("Attempting to connect to WPA SSID: ");
82             Serial.println(WIFLAP);
83             // Connect to WPA/WPA2 network
84             status = WiFi.begin(WIFLAP, WIFLPASSWORD);
85             delay(500);
86         }
87         Serial.println("Connected to AP");
88     }
89
90     if ( !client.connected() ) {
91         reconnect();
92     }
93
94     MedirTemperaturas();
95     delay(60000);
96 } //Aqui termina el ciclo infinito del arduino
97
98
99
100
101
102 void InitWiFi()

```

```

103 {
104 // initialize serial for ESP module
105 // initialize ESP module
106 WiFi.init(&Serial1);
107 // check for the presence of the shield
108 if (WiFi.status() == WL_NO_SHIELD) {
109     Serial.println("WiFi shield not present");
110     // don't continue
111     while (true);
112 }
113
114 Serial.println("Connecting to AP ...");
115 // attempt to connect to WiFi network
116 while ( status != WL_CONNECTED) {
117     Serial.print("Attempting to connect to WPA SSID: ");
118     Serial.println(WIFLAP);
119     // Connect to WPA/WPA2 network
120     status = WiFi.begin(WIFLAP, WIFLPASSWORD);
121     delay(500);
122 }
123 Serial.println("Connected to AP");
124 }
125
126 void reconnect() {
127 // Loop until we're reconnected
128 while (!client.connected()) {
129     Serial.print("Connecting to ThingsBoard node ...");
130     // Attempt to connect (clientId, username, password)
131     if ( client.connect( [REDACTED] ", TOKEN, NULL) ) {
132         Serial.println( "[DONE]" );
133     } else {
134         Serial.print( "[FAILED] [ rc = " );
135         Serial.print( client.state() );
136         Serial.println( " : retrying in 5 seconds]" );
137         // Wait 5 seconds before retrying
138         delay( 5000 );
139     }
140 }
141 }

```

Listing 4: Programa integrado a thingsboard

Bibliografía

- Arduino. What is Arduino? — Arduino, 2018. URL <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. 13, 14, 15
- Vélez Martínez Cuauhtémoc. Internet de las Cosas, 2021. URL <http://www.ii.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/CapsulasTI/Paginas/internetdelascosas.aspx>.
- Free Software Foundation. ¿Qué es el Software Libre? - Proyecto GNU - Free Software Foundation, 2001. URL <https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.es.html>.
- Free Software Foundation. Lista de licencias con comentarios, 2003.
- Montalvo Georgina Izquierdo, Pablo Mulás del Pozo, Juan Tonda Mazón, and Patricia Pérez Sabino. Eficiencia energética. 2020.
- IDAE and IGME. *De Geotermia*, volume 4. 2008. ISBN 9788496680357. URL http://www.igme.es/Geotermia/FicherosPDF/Manual_Geotermia_2,5.pdf.
- Herter instruments. Adquisidores de Datos, 2020. URL <https://herterinstruments.es/catalogo/registradores-de-datos/>.
- Hrisko Joshua. Arduino Pitot Tube Wind Speed and Airspeed Indicator - Theory and Experiments , feb 2019. URL <https://makersportal.com/blog/2019/02/06/arduino-pitot-tube-wind-speed-theory-and-experiment>.
- LastMinuteEngineers. bme 280. URL <https://lastminuteengineers.com/bme280-arduino-tutorial/>.
- Logers Data. Data Loggers, 2018. URL <https://datalogger.com.mx/>.
- Vicente Torres Luna and González Reyes Ismael. Bombas de calor Geotérmicas. *Revista Transición energética*, pages 285–287, 2019. URL <http://transicionenergetica.ineel.mx/Revista.mvc/CD1n1v2>.
- Open Source Hardware Association. Definition Open Source Hardware Association, 2010. URL <http://www.oshwa.org/definition/>.

BIBLIOGRAFÍA

Open Source Hardware Association. On creative commons and open source – open source hardware association, 5 2014. URL <https://www.oshwa.org/2014/05/21/cc-oshw/>.

Pablo Perovic, Carlos Trucco, Andrés Tálamo, Verónica Quiroga, Dolores Ramallo, Adriana Lacci, Alejandra Baungardner, and Federico Mohr. *Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE, 2012. URL <https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-diseno-de-sistemas-de-intercambio-geotermico-de-circuito-cerrado>.

SAP SE. ¿Qué es internet de las cosas? — Tecnología de IoT, 2021. URL <https://www.sap.com/latinamerica/insights/what-is-iot-internet-of-things.html>.

SensorGO. internet-de-las-cosas-iot - sensorgo, 2019. URL <https://sensorgo.mx/internet-de-las-cosas-iot/>.

The ThingsBoard Authors. What is ThingsBoard? — ThingsBoard Community Edition, 2021. URL <https://thingsboard.io/docs/getting-started-guides/what-is-thingsboard/>.