

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Monitoreo remoto con red de sensores, para el sistema de calentamiento por colectores solares de la piscina del TEC

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Luis Carlos Espinoza Ortiz
201095991

Cartago
4 de mayo de 2018

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

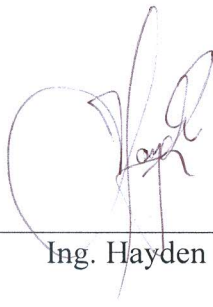
PROYECTO DE GRADUACIÓN

ACTA DE APROBACIÓN

Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado Monitoreo remoto con red de sensores, para el sistema de calentamiento por colectores solares de la piscina del TEC , realizado por Luis Carlos Espinoza Ortiz y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador



Ing. Hayden Phillips Brenes

Profesor lector

TEC | Tecnológico
de Costa Rica
Ingeniería Electrónica



Ing. Carlos Segura Quirós

Profesor lector



Ing. William Marin Moreno

Profesor asesor

Cartago, 04 de mayo, 2018

Declaratoria de Autenticidad

Declaro que el presente documento llamado Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, he utilizado y aplicado literatura relacionada al tema así como la utilización de conocimientos propios. En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Luis Carlos Espinoza Ortiz

Guanacaste, 4 de mayo de 2018

Cédula: 503780839

Resumen

El presente documento contiene los pasos llevados a cabo para el desarrollo del sistema de monitoreo con red de sensores aplicado al sistema de calentamiento de una piscina por medio de colectores solares. Desde la caracterización de sensores para diseñar los circuitos acondicionadores de señal que le permitirán a los microcontroladores a capturar la información de cada sensor. Esta información se empaquetara para poder transmitirla de manera inalámbrica por radiofrecuencia a un nodo principal que tomara estos datos y los compara con un modelo dinámico que calculara la temperatura teórica de las tuberías que se compara con la medición del sensor de temperatura físico. Estos datos serán almacenados en un servidor transmitidos por medio de Wi-Fi.

Palabras clave: RF, WiFi, Temperatura, Radiación.

Abstract

This document contain steps to develop a sensor network monitor system applied to the heat up pool system through solar thermal collector. The steps began with sensor's characterization to design a signal conditioner that allow the microcontroller capture the data from the sensor. This will be packet so it can be transmitted using radio-frequency in a wireless way to the main node that it takes data and contrast it with a dynamic model which calculate a theoretical temperature from the pipes and can be compare it with the information captured from the sensor. This data will be transmitted through Wi-Fi to a server.

Keywords: RF, WiFi, Temperatura, Radiación.

*Escucha el consejo, y recibe la corrección,
para que seas sabio en tu vejez.
Muchos pensamientos hay
en el corazón del hombre;
Mas el consejo de Jehová
permanecerá.
Proverbios 19:20-21*

Agradecimientos

Agradezco primero a Dios por permitirme llegar hasta la culminación de este trabajo, mas cuando pensaba que no podía más en varios momentos de la carrera, a mi mamá por enseñarme a ser esforzado para salir adelante y por estar ahí apoyándome, mis hermanos por creer en mí, mi Tío Joaquín por estar ahí siempre apoyando a distancia en los momentos críticos de todo este camino. A Michelle Arauz por su paciencia, apoyo, comprensión y por estar presente durante los momentos difíciles de esta etapa, gracias por ser esa compañera de traspasadas.

A mis amigos, compañeros y personas que conocí en el camino que de alguna u otra forma ayudaron a hacer esto realidad. En especial a Christian Calvo, Omar Vargas, Luis Castillo, Ariel Madrigal, Carlos Alfaro, Juan Carlos, Génesis Guevara, Elías Cruz, Jhonnson Badilla, Jonathan Ramos.

Al personal en el Laboratorio que tuvo su aporte en la realización de este proyecto y al profesor Dr.Ing.Carlos Meza Benavides por la confianza en mi para desarrollar este proyecto.

Índice general

Índice de figuras	iii
Índice de tablas	iv
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Restricciones	4
1.4 Supuestos del proyecto	4
1.5 Contribuciones de la tesis	4
1.6 Estructura	4
2 Colectores Solares	5
2.1 Antecedentes	5
2.2 Colectores Solares	6
2.2.1 Funcionamiento	7
2.3 Transferencia de energía	7
2.3.1 Balance de energía para sistemas de flujo estacionario	7
2.3.2 Transferencia de calor por convección	7
2.3.3 Radiación	8
3 Diseño Propuesto	9
3.1 Descripción General	9
3.2 Sistema Electrónico	10
3.3 Sensores	10
3.3.1 Detectores de temperatura resistivo (RTD)	11
3.3.2 Piranómetro	13
3.3.3 Sensor de temperatura semiconductor	14
3.3.4 Termistor	15
3.4 Microcontroladores	16
3.4.1 Feather M0 RFM69HCW Packet Radio	16
3.4.2 Linkit Smart 7688 Duo	17
3.5 Acondicionamiento de Señal	17
3.5.1 Sensor RTD	17
3.5.2 Piranómetro	20

3.5.3	Termistor	22
3.5.4	Diseños para circuito impreso	23
3.6	Sistema de Comunicación	27
3.6.1	Nodos	27
3.6.2	Sensor de temperatura en las tuberías	27
3.6.3	Sensor de temperatura y radiación	28
3.6.4	Sensor de temperatura y humedad	29
3.6.5	Diseño de comunicación	29
3.7	Modelo dinámico del sistema	36
4	Resultados y análisis del sistema de monitoreo	38
4.1	Acondicionamiento de señal	38
4.1.1	Detectores de temperatura resistivo (RTD)	38
4.1.2	Sensor de Radiación	41
4.1.3	Termistor	44
4.2	Sistema de comunicación	47
4.2.1	Resultados	49
4.3	Modelo dinámico del sistema	52
5	Conclusiones y recomendaciones	55
5.1	Conclusiones	55
5.2	Recomendaciones	56
	Bibliografía	57
A	Sensor Tuberías	59
A.1	Datos sensor en tuberías	59
B	Diagrama de pines	62
B.1	Linkit Smart 7688 Duo	62
B.2	Feather M0 Radio with RFM69 radio packet	63
B.3	Sensor HIH7120-021-001CT-ND	64

Índice de figuras

3.1	Esquema de ubicación de los diferentes parámetros a medir en el sistema de monitoreo. [1]	10
3.2	Diagrama de la solución propuesta para el sistema de monitoreo.	10
3.3	Sensor detector de temperatura por resistencia [2]	11
3.4	Lineas de tendencia según la clase de sensor RTD [3]	12
3.5	Tabla de resistencia de un sensor PT1000. [4]	13
3.6	Sensor Radiación [5]	13
3.7	Sensor de temperatura HIH7000 [6]	14
3.8	Microcontrolador Feather M0 con modulo radio RFM69HCW. [7]	16
3.9	Microcontrolador Feather M0 con modulo radio RFM69HCW. [7]	17
3.10	Esquema circuito puente Wheatstone. [8]	18
3.11	Esquema circuito puente Wheatstone.	18
3.12	Circuito Amplificador No inversor. [9]	21
3.13	Circuito Amplificador No inversor realizado en Multisim.	21
3.14	Esquema de conexión para nodo 1 realizado en Eagle.	23
3.15	Diseño de circuito impreso para nodo 1 realizado en Eagle	24
3.16	Esquema de conexión para nodo 2 realizado en Eagle.	24
3.17	Diseño de circuito impreso para nodo 2 realizado en Eagle	25
3.18	Esquema de conexión para nodo 3 realizado en Eagle.	25
3.19	Diseño de circuito impreso para nodo 3 realizado en Eagle	26
3.20	Topología de red en estrella inalámbrica.	27
3.21	Cuarto de maquinas, piscina del TEC.	28
3.22	Diagrama de flujo del código ejemplo para transmisión.	32
3.23	Diagrama de flujo del código ejemplo para recepción.	32
3.24	Diagrama de flujo del código en los nodos.	33
3.25	Diagrama de flujo para el HUB.	35
3.26	Diagrama de flujo de recepción y transmisión de datos al servidor.	35
4.1	Comportamiento de la resistencia con respecto a la temperatura del sensor RTD.	41
4.2	Comportamiento de la tensión con respecto a la resistencia del sensor RTD.	41
4.3	Irradiancia medida en tensión con respecto a iluminancia.	43
4.4	Irradiancia medida en tensión con respecto al tiempo.	43
4.5	Resistencia del potenciómetro con respecto a tensión en el sensor.	44
4.6	Resistencia del potenciómetro con respecto a temperatura en el sensor.	47
4.7	Estacionamiento contiguo al CIVCO en el TEC.	50
4.8	Datos enviados a la pagina de Thingspeak.	51
4.9	Interior edificio CIVCO en el TEC.	52

- B.1 Diagrama de pines Linkit Smart 7688 Duo. [10] 62
- B.2 Diagrama de pines Feather M0 Radio with RFM69 radio packet.[11] 63
- B.3 Sensor de temperatura y humedad relativa. [6] 64

Índice de tablas

- 1.1 Comparación de costos de operación mensual, tomado de [1]. 2
- 2.1 Datos técnicos de colector solar Heliocol HC 40 6
- 3.1 Rango de operación de los sensores de temperatura de diferentes materiales. 11
- 3.2 Datos técnicos sensor PT1000 del laboratorio. [2] 12
- 3.3 Desviaciones permisibles para sensores de platino Clase A y B. [3] 12
- 3.4 Datos técnicos del sensor de irradiación [5]. 14
- 3.5 Datos técnicos sensor humedad/temperatura.[6] 15
- 3.6 Conexión de sensor de temperatura con Linkit Smart 7688 Duo 28
- 3.7 Conexión de módulo RFM69HCW con Linkit Smart 7688 Duo 28
- 3.8 Conexión de CAS en Nodo 2 con Feather 29
- 3.9 Conexión Feather con módulo RFM69HCW 29
- 3.10 Conexión Feather con sensor de temperatura y humedad relativa 29
- 4.1 Datos de resistencia con respecto a la temperatura del sensor PT1000 medidos a 24.2°C en el laboratorio. 39
- 4.2 Datos de tensión con respecto a la resistencia del sensor PT1000 40
- 4.3 Datos medidos del sensor de radiación y valores de iluminancia con un luxómetro. . . 42
- 4.4 Resultados del acondicionador simulados para el termistor en las tuberías. 45
- 4.5 Resultados de medición manual en las tuberías y su respectiva temperatura. 46
- 4.6 Resultados de temperatura calculadas del CAS con el microcontrolador. 46
- 4.7 Resultados razón de transferencia de calor en la piscina. 53
- 4.8 Error en la temperatura calculada para la superficie en el colector. 53
- A.1 Datos de temperatura, resistencia y tensión para el sensor GL-235.[12] 59
- A.1 Datos de temperatura, resistencia y tensión para el sensor GL-235.[12] 60
- A.1 Datos de temperatura, resistencia y tensión para el sensor GL-235.[12] 61

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

La ejecución de un plan piloto en el año 2015 por el Instituto Tecnológico de Costa Rica llamado Sostenibilidad TEC, busca utilizar nuevas tecnologías que permitan un uso eficiente de la energía y recursos disponibles como agua, electricidad y combustibles. La innovación en los proyectos de este plan permite que no solo en el TEC puedan realizarse, sino escalarlo a otras instituciones o empresas, con esto se destacan tres elementos de Sostenibilidad TEC según [12]:

- Alcanzar ser carbono neutral por medio de aplicaciones de energía renovable.
- Campus como laboratorio vivo, donde se realicen experimentos que permitan a los estudiantes acercarse a iniciativas de energía limpia.
- Promover en el país la sostenibilidad energética utilizando el conocimiento recabado.

El proyecto de construcción del techo para la piscina del TEC, tiene instalados colectores solares térmicos planos para mantener la temperatura del agua en determinado rango. Estos colectores o captadores solares son dispositivos que capturan la radiación solar para calentar el agua o aire; existen de baja y alta temperatura, los primeros pueden aplicarse a sistemas domésticos de calefacción y agua caliente sanitaria y los de alta temperatura para generar energía eléctrica. Los colectores planos, por lo general se utilizan para agua caliente sanitaria, calefacción solar y también climatización de piscinas [13].

Otra característica de estos colectores planos es que pueden ubicarse fácilmente en el techo sin importar las irregularidades que este contenga para ser apoyados. Por lo que el sistema que contiene las tuberías, bomba, filtro y válvulas permiten que el agua fluya de la piscina hacia los colectores y estos pasen la energía radiada del sol en forma de calor y nuevamente a la piscina [1].

Según [1] se diseña el sistema de calentamiento con una expectativa de temperatura de operación entre 25°C y 28°C, donde esta última temperatura es considerada como incómoda para los usuarios en la piscina. Por esta razón nace la necesidad de implementar el sistema de calentamiento, otorgar condiciones óptimas para sus usuarios en las clases y entrenamientos de natación respectivos. Adicionalmente el ahorro en costos que produce realizar todo esto con energía solar que se puede observar en la tabla 1.1. Siguiendo el informe, el ahorro por calentamiento solar es muy significativo después de los 11.6 meses de la inversión.

Dentro de todo el sistema instalado para el calentamiento del agua de la piscina no se incluye un sistema de monitoreo, esto porque la empresa no ofrece este producto. Además, que para efectos

Tipo de Calentamiento	Para área de 312.5 m ²
Solar	\$ 101
Eléctrico	\$ 2826
Gas	\$ 5853

Tabla 1.1: Comparación de costos de operación mensual, tomado de [1].

de garantía y políticas de la empresa no se le puede hacer ninguna modificación al sistema instalado, por esta razón y por la necesidad de implementar este sistema de monitoreo para contar con información que indique si el sistema de calentamiento funciona correctamente. Sin embargo, la empresa si dejó instalados sensores de temperatura en las tuberías que estarán en el cuarto de máquinas de la piscina.

De este modo el laboratorio de sistemas electrónicos para sostenibilidad puede utilizar estos sensores para implementar el monitoreo y comunicación para el sistema de calentamiento de la piscina en el campus, conocer las temperaturas que circulan por las tuberías, además de otros sensores de temperatura, uno en el techo junto a uno de radiación, y uno para la temperatura ambiente en la piscina. De esta manera se puede verificar y evaluar el rendimiento del sistema de calentamiento por medio de los datos recolectados en los servidores a los que será enviado que puede ser útil para el personal de mantenimiento ante alguna anomalía.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Desarrollar un sistema de monitoreo remoto utilizando hardware de bajo consumo de potencia que permita verificar el sistema de calentamiento de la piscina del Instituto Tecnológico de Costa Rica sede en Cartago.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar el acondicionador de señal para cada nodo, que permita obtener la información de temperatura.
- Desarrollar el protocolo de comunicación entre el nodo maestro y los nodos esclavo, para recopilar los datos que se enviarán por Wi-Fi a la base de datos.
- Implementar un modelo dinámico que correlacione la temperatura en las tuberías con respecto a la radiación recibida en el techo y demás valores de temperatura para verificar el funcionamiento del sistema de calentamiento.

1.3 Restricciones

1. La instrumentación utilizada esta dada para implementar el sistema.
2. Para el modelo se utilizan coeficientes de propiedades térmicas de colector solar Heliocol de la misma marca que los instalados en el techo de la piscina.
3. Los parámetros de la piscina utilizados para la estimación del modelo dinámico se consideran constantes como la densidad del agua a $1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ y el caudal de la tubería.

1.4 Supuestos del proyecto

1. Se espera que la irradiancia en el lugar no supere los $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$.
2. El valor mínimo de temperatura a medir es de 10°C en las tuberías.
3. Hay acceso a la red eléctrica para alimentar el sistema electrónico.
4. La temperatura mínima medida en el techo es de 25°C .

1.5 Contribuciones de la tesis

Desarrollar este proyecto permite a la institución contar con un sistema de monitoreo donde de forma inalámbrica se puedan medir parámetros que permitan realizar un contraste teórico de la temperatura con la que el agua esta fluyendo en la piscina del TEC, y realizar un historial de todos estos parámetros en el servidor al que son enviados los datos. Esto permite medir el rendimiento del sistema de calentamiento por medio de colectores solares y comparar con sistemas que funcionan con electricidad o gas para climatizar las piscinas.

1.6 Estructura

En el capítulo 2 contiene la información con respecto a los colectores solares e información de los antecedentes de la piscina. El capítulo 3 se muestra un diagrama del diseño propuesto y que contiene las secciones dedicadas a los sensores en la sección 3.3, los microcontroladores sección 3.4, el diseño de los acondicionadores de señal en la sección 3.5, el diseño de la comunicación en la sección 3.6 y por ultimo el modelo teórico en la sección 3.7. Para finalizar los resultados de cada etapa del proyecto en 4 para culminar con las conclusiones y recomendaciones del proyecto en el capítulo 5.

Capítulo 2

Colectores Solares

2.1 Antecedentes

El calentamiento de agua por medio de energía solar es una aplicación común y puede utilizarse en piscinas que se encuentran a la intemperie o bajo techo, principalmente en aquellas piscinas comunitarias. El costo de instalaciones termo-solares para piscinas posee cierto nivel de accesibilidad económica por la posibilidad de omitir el uso de acumuladores o intercambiadores, por tanto el agua pasa directamente por los captadores, obteniendo una temperatura máxima de los 30 C. Este aspecto de economía contrarresta el hecho de que el área de captación pueda llegar a muy ser amplia.

Los captadores empleados para este tipo de aplicación, suelen no ser rígidos por los materiales empleados en su manufactura (polipropileno o polietileno) y por ello deben contar con una estructura de soporte, sin embargo existe también la posibilidad de apoyarlos directamente en el techo o cubierta, sin importar en gran medida sus irregularidades o el perfil del tejado.

Una vez instalado el sistema y para el buen rendimiento de los captadores es requerido que exista un caudal considerable a través de ellos (del orden de 300 L/h por cada metro cuadrado de captador), aunque podría eventualmente ser menor dependiendo del tamaño de la instalación, a pesar de que nunca por debajo de los 15 L/h por m^2 , esto con el fin de que el gradiente en los captadores sea menor.

Existen también otros factores a tomar en cuenta. Entre ellos se encuentra la colocación del filtro, siempre debe situarse entre la bomba y los captadores, además el flujo deberá ir desde la bomba hasta los captadores (con la finalidad de evitar sobrepresiones para los captadores por el filtro). Se puede mencionar también el control que debe existir para evitar que el agua circule en el caso de que su temperatura sea superior a la de los colectores o bien que la temperatura del agua esté muy cercana a los 30°C (estipulada anteriormente como la temperatura límite permisible). Por ejemplo en caso de que la piscina alcance altas temperaturas, como 27°C, la cual resulta suficiente para generar incomodidad a los usuarios más activos de la piscina, es recomendable mantener el flujo de agua a través de los captadores durante la noche para procurar cierto enfriamiento del agua.

Los primeros pasos para implementar un sistema de esta índole es imperante realizar el dimensionamiento del sistema que obedecerá a las condiciones de los meses con las condiciones más desfavorables dependiendo de las expectativas de funcionamiento para el sistema, esto puede garantizar el funcionamiento continuo y estable del sistema a lo largo del año, para zonas tropicales como Costa Rica. Dentro de este dimensionamiento se debe tomar en cuenta las pérdidas por radiación (tendencia hacia el equilibrio térmico con respecto a la atmósfera, durante la noche), convección (contacto de la superficie del agua con el viento) aunque en ocasiones este contacto puede conferir energía en lugar de tomarla del agua y conducción (tendencia al equilibrio térmico entre el agua y

Tabla 2.1: Datos técnicos de colector solar Heliocol HC 40

Tamaño nominal	4'x10.5'
Ancho	120 cm
Longitud	323 cm
Área	3.88 m ²
Diámetro colector	5.08 cm
Peso (seco)	8.5 kg
Capacidad en volumen	12 L
Presión de operación	90 psi
Presión de rotura	270 psi
Flujo recomendado	4 gpm

las paredes de la piscina). Pueden contemplarse también y dependiendo de las características de la piscina (bajo techo o la intemperie) el contrarrestar las pérdidas sufridas durante la noche [1]

2.2 Colectores Solares

Los colectores solares son una forma de poder climatizar con energía limpia las piscinas, duchas y aguas sanitarias. Se aprovecha la energía radiada por el sol para calentar el agua que pasa por la tubería en conectada al colector, y las temperaturas dependen del material que se utilice y la aplicación a la que es destinada. Los de temperaturas baja se utilizan en sistemas domésticos y agua caliente sanitaria, los de alta se les utiliza para la generación de energía eléctrica, estos utilizan espejos reflectantes. Existen diferentes métodos: [13]

- Colector termosifónico: utiliza el método de convección natural para el calentamiento del agua, no requiere bombeo.
- Colector de placa plana: se limita al uso de agua caliente sanitaria, calefacción y para climatizar las piscinas.
- Colector de vacío: funcionan mejor que los de placa plana, por lo que si falla el calentamiento en estas, usar las de vacío.
- Colector de polipropileno: su uso es para piscinas y por el material prolonga el uso del agua a lo largo del año.
- Colector cilindro parabólico: se usa industrialmente en centrales térmicas, permiten altas temperaturas del fluido caloportador que hace girar turbinas eléctricas.

EL colector a utilizar es un colector Heliocol HC 40 que contiene los siguientes datos técnicos contenidos en la tabla 2.1. Este colector es de tipo plano con material de polipropileno que tienen la ventaja que se pueden colocar en superficies que son irregulares.

Estos son una versión económica ya que están en el rango de los colectores planos pero que no están protegidos por una caja rectangular que por lo general tiene un vidrio. Esta característica hace que se deba abarcar una mayor área para que sea efectivo su función.

2.2.1 Funcionamiento

Su funcionamiento se basa en el efecto invernadero, para la placa plana con protección de vidrio, cuando recibe la radiación del sol, esta incide en el vidrio y se va acumulando calor dentro de la caja que contiene al colector. El vidrio permite que pasen ciertas longitudes de onda, es decir se comporta como filtro dejando pasar la luz visible, y la poca radiación que emite la placa colectora no traspasa nuevamente el vidrio y así logra acumular el calor dentro de la caja a temperaturas hasta mayores a la exterior, con este calor acumulado el liquido que pasa por la placa se calienta. [14].

El colector sin la protección de vidrio recibe directamente la radiación solar, por lo que el material donde circula el fluido se calienta con el calor que capta el colector. Este colector es menos eficiente que el de protección de vidrio pero se puede mejorar si aumenta su área de uso.

2.3 Transferencia de energía

Este concepto dice que la energía de una masa se puede transferir a otra por calor Q y trabajo W . La interacción energética donde existe una diferencia de temperatura se le conoce como calor, y contrariamente sucede el trabajo.

Entonces al calor se le llama energía térmica y a la transferencia de esta energía transferencia de calor. Al calor transferido se le denota por Q y a la cantidad de calor transferida por unidad de tiempo razón de transferencia de calor se denota por \dot{Q} . Existen mecanismos para transferir el calor, por conducción, convección y radiación que se verán a continuación.[15]

2.3.1 Balance de energía para sistemas de flujo estacionario

En aplicaciones como calentadores de agua, radiadores de automóvil, se da el flujo de masa hacia adentro y afuera de un sistema. Es decir, para un sistema de estos, la energía que entra es la misma que sale para el flujo estacionario. La razón de transferencia de masa hacia dentro del volumen de control debe ser igual a la velocidad de flujo de masa hacia afuera [15], entonces:

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal} = \dot{m} \quad (2.1)$$

El balance estacionario de flujo se reduce cuando no se tiene interacción de trabajo y la energía cinética y potencial son despreciables, así se tiene la ecuación 2.2:

$$\dot{Q} = \dot{m}h\Delta T = \dot{m}C_p\Delta T \quad (2.2)$$

Donde: C_p : es el calor específico.

h : es el coeficiente de transferencia de calor.

ΔT : es la diferencia de temperaturas entre la salida y la entrada del sistema.

2.3.2 Transferencia de calor por convección

Este tipo de transferencia se da entre una superficie solida y un liquido o gas adyacente en movimiento. Ente mas rápido es el movimiento de un fluido, mayor la transferencia de calor por convección. Si no hay movimiento la transferencia se realiza por conducción. Existen dos tipos de convección, la natural que es cuando el movimiento del fluido es causado por las diferencias de densidad debido a la diferencia de temperatura de ese fluido. Y la forzada es cuando el movimiento se debe a una fuerza que obliga al fluido a pasar por la superficie. [15]

La ecuación 2.3 es como se define la convección:

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty)[W] \quad (2.3)$$

- h : coeficiente de transferencia de calor por convección en $[W/m^2\text{°C}]$.
- A : Área superficial por la cual se da la transferencia de calor.
- T_s : temperatura de la superficie.
- T_∞ : temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie.

2.3.3 Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas. Se diferencia de los dos mecanismos anteriores por no existir un medio interventor. Es la transferencia mas rápida, y la manera en que la energía del sol llega a la tierra. [15]

La ley de Stefan-Boltzmann establece la razón máxima de radiación que puede emitir una superficie que se ve en la ecuación 2.5:

$$\dot{Q}_{emitida} = \epsilon\sigma A_s T_s^4 [W] \quad (2.4)$$

- ϵ : es la emisividad de la superficie cuyo valor va de $0 < \epsilon < 1$.
- $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 K^4]$ constante de Stefan-Boltzmann.

También se cuenta con un coeficiente para la absortividad α . Segun Kirchoff la emisividad y absortividad de una superficie a una temperatura son iguales, la siguiente ecuación muestra esta igualdad

$$\dot{Q}_{absortividad} = \alpha \dot{Q}_{incidente} [W] \quad (2.5)$$

Capítulo 3

Diseño Propuesto

3.1 Descripción General

Para realizar el proyecto fue necesario caracterizar 2 de los 4 sensores establecidos para ser los nodos en el sistema de comunicación los otros 2 sensores restantes en sus hojas de datos contienen la información del parámetro de salida que se capturará en el microcontrolador. Los sensores por caracterizar son los que serán ubicados en el techo de la piscina de la institución, los otros son uno de temperatura y humedad que tiene salida digital por el protocolo I^2C , y el sensor ubicado en las tuberías que trae la información de salida de tensión con su respectiva temperatura asociada.

Para caracterizar los sensores y poder asociar sus valores al parámetro respectivo a medir se revisaron sus hojas de datos para tomar un punto de partida, como el tipo de sensor de temperatura que es del tipo RTD de dos cables, autoadhesivo para superficies, y su rango de operación para conocer los límites a los que puede ser expuesto.

El segundo sensor es el piranómetro el cual tiene una salida de tensión en milivoltios que viene en la hoja de datos que también incluye a su equivalente en irradiancia en $[W/m^2]$, conociendo este valor se puede hacer las mediciones respectivas a este sensor para conocer su comportamiento. Esta medición se comparará con valores de iluminancia (Lux).

Con estos puntos de partida se puede investigar como pasar de una medición de resistencia a obtener una salida de tensión utilizando circuitos conocidos para la medición de RTD, que permitan realizar la conversión de manera precisa al dimensionar sus componentes. Para la radiación, se tomarán mediciones de un día soleado en un intervalo de 2 horas para ver la irradiancia que recibe el sensor en un día normal.

Luego de tomar las muestras de los sensores se obtienen sus líneas de tendencia con software de cálculo. Se podrá obtener una ecuación que podrá ser utilizada como código para interpretar lo que se obtiene de los circuitos acondicionadores.

La figura 3.1 permite ver la localización de los distintos parámetros que se miden en la piscina, así de esta forma localizar los nodos que se presentan en el sistema a implementar.

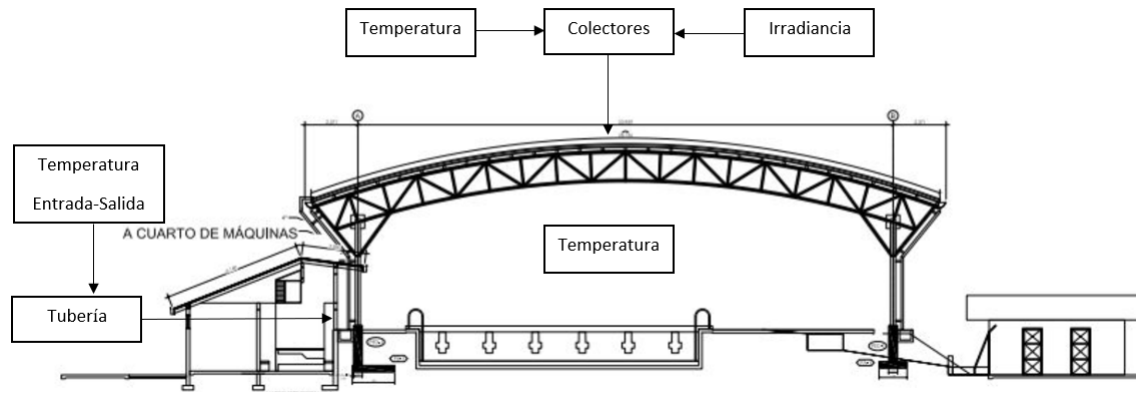


Figura 3.1: Esquema de ubicación de los diferentes parámetros a medir en el sistema de monitoreo. [1]

3.2 Sistema Electrónico

La figura 3.2 es la propuesta de solución presentada para implementar el sistema de monitoreo. El desarrollo de cada etapa se puede ver a continuación en las siguientes secciones de este capítulo, que concierne a toda la electrónica aplicada en el proyecto.

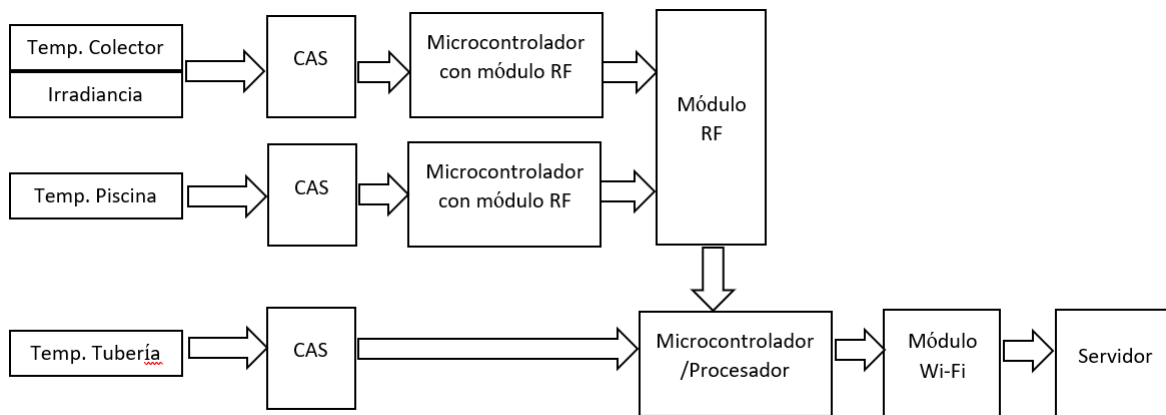


Figura 3.2: Diagrama de la solución propuesta para el sistema de monitoreo.

3.3 Sensores

Los sensores de temperatura tienen una gran cantidad de usos en la industria, alimentos, climatización, dispositivos médicos, en el sector automotriz entre otras áreas donde sea de suma importancia tener conocimiento la cantidad de calor en determinado lugar, o un rango considerado seguro para las aplicaciones en las que se vea implementado el sensor. Entre los tipos de sensores de temperatura que existen, están los de contacto y sin contacto para clasificarlos en dos grupos. Los de contacto pueden ser termopares, termistores, detectores de temperatura resistivos (RTD) y por semiconductor que son los circuitos integrados preparados para esta función. El otro tipo es el que se encarga de calcular a partir de la radiación térmica de alguna fuente para poder determinar la temperatura como los sensores infrarrojos.[16]

En este documento los sensores que se presentan, ya fueron escogidos para su utilización en el diseño de los acondicionadores de señal a realizar.



Figura 3.3: Sensor detector de temperatura por resistencia [2]

3.3.1 Detectores de temperatura resistivo (RTD)

Los sensores detectores de temperatura resistivos o RTD por sus siglas en ingles, se basan en el cambio de valor de su resistencia en función de la temperatura medida. Se componen de material semiconductor como platino, cobre, níquel, siendo el platino el que brinda la mayor precisión y estabilidad. Estos producen un cambio lineal de forma positiva en la resistencia con la temperatura. La tabla 3.1 muestra los diferentes rangos de temperatura en los que operan los sensores de estos materiales mencionados [17].

Tabla 3.1: Rango de operación de los sensores de temperatura de diferentes materiales.

Material	Rango de temperatura	Variación (%/°C a 25°C)
Platino	-200 a +850	0.39
Níquel	-80 a +320	0.67
Cobre	-200 a +260	0.38

La resistencia del material que se utilice se puede modelar con la siguiente ecuación para obtener la temperatura en grados Celsius:

$$R_t = R_o(1 + \alpha t)[\Omega]$$

R_o : Resistencia eléctrica a 0°C.

R_t : Resistencia eléctrica a t °C.

α : coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica.

El sensor RTD de la figura 3.3 es un PT1000, es decir que se compone de platino con una resistencia de 1000[Ω] a 0°C, el cual se encuentra entre los sensores de mayor precisión, estabilidad y mayor rango de temperaturas [18]. Los detalles del sensor se muestran en la tabla 3.2 [2].

Según [3] los RTD se pueden clasificar según las desviaciones permitidas para estos sensores de platino, la tabla 3.3 muestra las clases en las que se clasifican, similarmente esta información se puede apreciar de forma visual en la figura 3.4.

Tabla 3.2: Datos técnicos sensor PT1000 del laboratorio. [2]

Rango de medición	-20°C a +150°C
Tolerancia	$\pm 0.8^\circ\text{C}$ de -20°C +100°C
Diseño	Sensor autoadhesivo de superficies de dos cables
Ancho	50 mm
Largo	100 mm
Conexión de cable	3 m cable de cobre, aislamiento de silicona, extremos expuestos, resistente a los rayos UV
Longitud máxima del cable	20m

Tabla 3.3: Desviaciones permisibles para sensores de platino Clase A y B. [3]

Mediciones de temperatura	Desviaciones permitidas			
	A		B	
	Ω	$^\circ\text{C}$	Ω	$^\circ\text{C}$
-200	± 0.24	± 0.55	± 0.56	± 1.3
-100	± 0.14	± 0.35	± 0.32	± 0.8
0	± 0.06	± 0.15	± 0.12	± 0.3
100	± 0.13	± 0.35	± 0.30	± 0.8
200	± 0.20	± 0.55	± 0.48	± 1.3
300	± 0.27	± 0.75	± 0.64	± 1.8
400	± 0.33	± 0.95	± 0.79	± 2.3
500	± 0.38	± 1.15	± 0.93	± 2.8
600	± 0.43	± 1.35	± 1.06	± 3.3
650	± 0.46	± 1.45	± 1.13	± 3.6
700	-	-		± 3.8
800	-	-		± 4.3
850	-	-		± 4.6

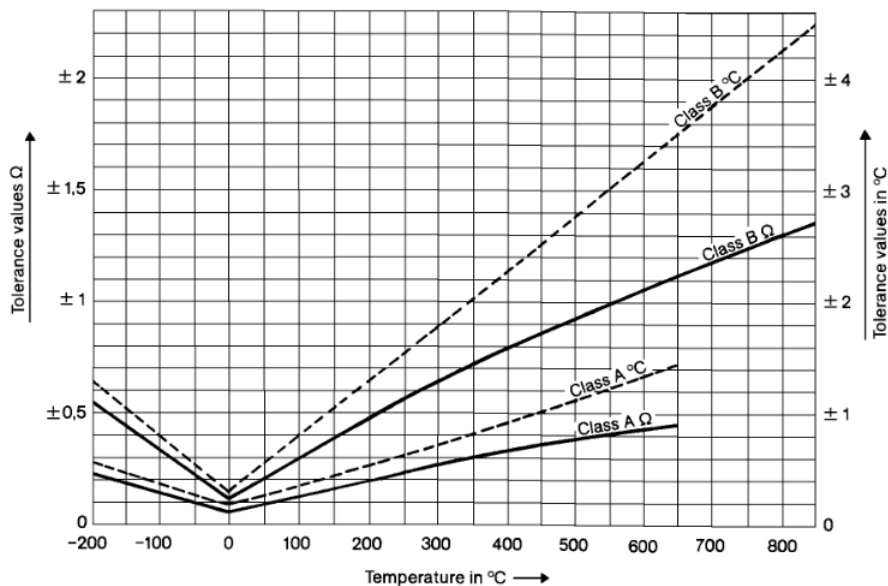


Figura 3.4: Líneas de tendencia según la clase de sensor RTD [3]

Una gráfica de resistencia típica de un sensor PT1000 se muestra en la figura 3.5, la cual serían los valores esperados de una caracterización de un sensor de este tipo

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
-80	683,25	687,27	691,29	695,3	699,31	703,32	707,33	711,34	715,34	719,34	723,35
-70	723,35	727,35	731,34	735,34	739,34	743,33	747,32	751,32	755,3	759,29	763,28
-60	763,28	767,26	771,25	775,23	779,21	783,19	787,17	791,14	795,12	799,09	803,06
-50	803,06	807,03	811	814,97	818,94	822,9	826,87	830,83	834,79	838,75	842,71
-40	842,71	846,66	850,62	854,57	858,53	862,48	866,43	870,38	874,33	878,27	882,22
-30	882,22	886,16	890,1	894,04	897,99	901,92	905,86	909,8	913,73	917,67	921,6
-20	921,6	925,53	929,46	933,39	937,32	941,24	945,17	949,09	953,02	956,94	960,86
-10	960,86	964,78	968,7	972,61	976,53	980,44	984,36	988,27	992,18	996,09	1000
0	1000	1003,9	1007,8	1011,7	1015,6	1019,5	1023,4	1027,3	1031,2	1035,1	1039
10	1039	1042,9	1046,8	1050,7	1054,6	1058,5	1062,4	1066,3	1070,2	1074	1077,9
20	1077,9	1081,8	1085,7	1089,6	1093,5	1097,3	1101,2	1105,1	1109	1112,9	1116,7
30	1116,7	1120,6	1124,5	1128,3	1132,2	1136,1	1140	1143,8	1147,7	1151,5	1155,4
40	1155,4	1159,3	1163,1	1167	1170,8	1174,7	1178,6	1182,4	1186,3	1190,1	1194
50	1194	1197,8	1201,7	1205,5	1209,4	1213,2	1217,1	1220,9	1224,7	1228,6	1232,4
60	1232,4	1236,3	1240,1	1243,9	1247,8	1251,6	1255,4	1259,3	1263,1	1266,9	1270,8
70	1270,8	1274,6	1278,4	1282,2	1286,1	1289,9	1293,7	1297,5	1301,3	1305,2	1309
80	1309	1312,8	1316,6	1320,4	1324,2	1328	1331,8	1335,7	1339,5	1343,3	1347,1
90	1347,1	1350,9	1354,7	1358,5	1362,3	1366,1	1369,9	1373,7	1377,5	1381,3	1385,1

Figura 3.5: Tabla de resistencia de un sensor PT1000. [4]

3.3.2 Piranómetro

El material del que esta hecho se utiliza en las celdas solares o sistemas fotovoltaicos, son módulos contruidos de silicio cristalino de alta eficiencia muy utilizados comercialmente [19]. La tabla 3.4 muestra los datos técnicos del sensor a utilizar.

Este sensor capta la radiación emitida por el sol, según [20] la irradiancia se define como la “densidad de potencia de la radiación incidente sobre una superficie”, es como la energía incide sobre una superficie por unidad de área [W/m^2]. Además, la salida se da en tensión, indicado en la tabla 3.4.



Figura 3.6: Sensor Radiación [5]

Tabla 3.4: Datos técnicos del sensor de irradiación [5].

Medición de voltaje	Aprox. 70[mV] at 1000[W/m ²]
Tolerancia	5% promedio anual
Temp ambiente permisible	-40°C a +85°C
Diseño	Soporta diferentes condiciones climáticas en un perfil de aluminio en forma de Z
Altura	40 mm
Ancho	40 mm
Longitud	110 mm
Conexión de cable	3 m cable de cobre, aislamiento de silicio, extremos expuestos, resistente a los rayos UV
Máxima longitud del cable	30 m

3.3.3 Sensor de temperatura semiconductor

Este tipo de sensor es fabricado de manera similar a otros tipos de dispositivos como los microprocesadores, en obleas de silicio. Estos dispositivos comparten características como salidas lineales, bajo costo, exactitud cuándo se ha calibrado, el rango de temperatura va entre -40°C a +120°C, rango relativamente pequeño. Un aspecto a tomar en cuenta en estos sensores es que su construcción carece de un buen manejo térmico. Los contactos con superficies exteriores pueden provocar oscilaciones lo que evita que se pueda usar con eficacia, por lo que son más adecuados para aplicaciones dentro del equipo debido a esta desventaja. [21]

El sensor serie HIH7000 mostrado en la figura 3.7 tiene un 3% de precisión de humedad relativa. Este concepto lo define [22] como “el porcentaje de saturación de un volumen específico de aire a una temperatura específica”, esto depende de la temperatura y la presión. La precisión de la temperatura es de 0.5°C según la hoja de datos de [6] que se muestra a continuación en la tabla 3.5.



Figura 3.7: Sensor de temperatura HIH7000 [6]

Tabla 3.5: Datos técnicos sensor humedad/temperatura.[6]

Rango de operación de temperatura	Encendido	-40 a 100°C
Rango de operación de humedad	Encendido	0 a 100%RH
Rango alimentación de tensión Humedad/Temp.	V_{DD}	2.3 a 5.5V _{dc}
Rango de humedad compensado	5 a 50°C	20 a 80%RH
Rango de temperatura compensado	-	5 a 50°C
Precisión	25°C aumentando RH	3%RH
Resolución	14 bit resolución ADC	0.04%RH
Corriente en suspensión	-	0.6 típico, máx. 1[μ A]
Alimentación de corriente	I ² C	0.65 típico, máx. 1[mA]
	SPI	0.75 típico, máx. 1[mA]
Tensión salida bajo nivel	$I_{OL} = 2.8[mA]min$	Max 20%
Tensión salida alto nivel	$I_{OH} = -2.8[mA]min$	Min 80%
Tensión entrada bajo nivel	-	Max 20%
Tensión entrada alto nivel	-	Min 80%
Resistencia Pull-Up		
I ² C	R _p	2.2[k Ω]
SPI	R _{ss}	10[k Ω]
Tiempo de encendido	14 bit TH y 14 bit resolución de humedad	50 – 60[ms]

3.3.4 Termistor

Este sensor es un semiconductor que cambia su resistencia con la temperatura, pero que a diferencia de los RTD que son lineales y su resistencia aumenta con la temperatura, estos reducen su resistencia. Además, no tienen esa linealidad que caracteriza a los RTD, y los cambios de la resistencia por grado de temperatura es mayor [23]. El sensor a utilizar es uno instalado en un sistema de calentamiento para piscina que ya trae su tabla de valores que permite analizar su comportamiento para poder capturar esta información en un microcontrolador. La tabla A.1 muestra los valores a partir de 0°C hasta 60°C tomados de la hoja de datos del sensor GL-235 [24].

3.4 Microcontroladores

3.4.1 Feather M0 RFM69HCW Packet Radio

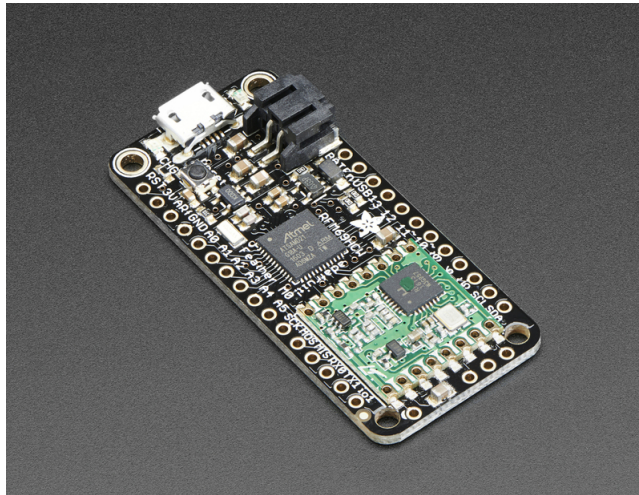


Figura 3.8: Microcontrolador Feather M0 con modulo radio RFM69HCW. [7]

Este microcontrolador contiene un modulo de radio RFM69HCW capaz de generar frecuencias de 433 [MHz] y 915 [MHz] y lograr largas distancias utilizando una lógica de 3.3[V]. Esta característica le permite funcionar a bajo consumo con respecto a otros microcontroladores con módulos de Wi-Fi y Bluetooth que tienden a consumir mayor potencia para funcionar y realizar las comunicaciones. Tiene incluido un puerto para conectar una batería externa y un puerto USB para propósitos de programación, un campo para poder adherirle un conector uFL para conectar una antena y darle mayor alcance al radio.

Todas estas características pueden ser utilizadas programando en Arduino IDE, ya que similar al Arduino Zero comparten el procesador ATSAMD21G18 ARM Cortex M0, solo se debe tomar en cuenta los pines que utiliza el radio para usar sus funciones dentro del ambiente de programación. El módulo de radio no esta hecho para mandar mucha información como en vídeo o audio, sino que son paquetes de poco tamaño y permitir un largo alcance. Este utiliza el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface) para hacer funcionar el radio, tiene la función de encriptar la información por AES-128, y permite realizar red multipunto. [7]

3.4.2 Linkit Smart 7688 Duo

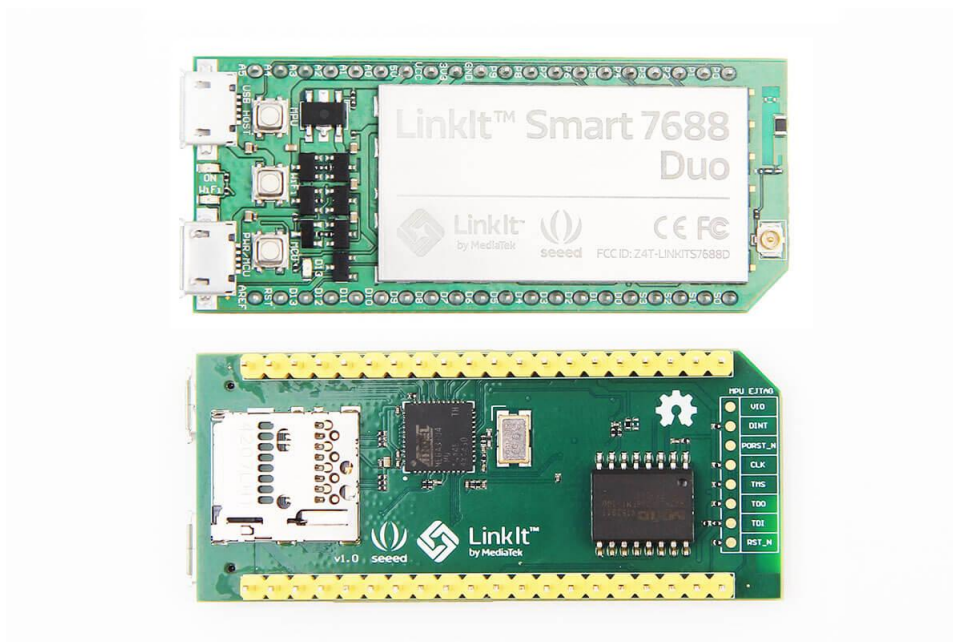


Figura 3.9: Microcontrolador Feather M0 con modulo radio RFM69HCW. [7]

El Linkit además de ser un microcontrolador ATmega32U4 también tiene una parte que lo controla, un procesador dedicado Mediatek MT7688AN con el que se pueden acceder al módulo Wi-Fi que le permite tener la función de transmitir de manera inalámbrica. Esta forma dual de microcontrolador y procesador permite utilizarlo en muchas aplicaciones como IoT (Internet of Things), además puede utilizarse el ambiente de programación Arduino debido a su compatibilidad con las bibliotecas de Arduino Yun que le permiten tener control tanto del microcontrolador como de funciones del procesador al realizar un puente entre estos dos para transferirse la información. También puede utilizarse Linux para realizar la programación directa en Python en el procesador o capturar la información del microcontrolador utilizando el puerto UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) para comunicar el microcontrolador y el procesador. La cantidad de pines también es una ventaja porque permite tener a disposición puertos digitales, analógicos, SPI e I^2C , los cuales permiten la conexión de múltiples módulos.

3.5 Acondicionamiento de Señal

3.5.1 Sensor RTD

Medir este sensor se puede realizar de forma sencilla porque su salida es de dos cables, además, debido a su característica de comportarse como una resistencia eléctrica variable, permite que al conectar un multímetro a sus extremos se obtenga la resistencia equivalente a la temperatura en la que se encuentre la superficie en contacto con el sensor, este último aspecto se debe tomar en cuenta a la hora de hacer las respectivas mediciones.

Como la medición directa que se realiza al conectarlo al multímetro se obtiene la medición de resistencia del sensor, ya que es de tipo pasivo y no requiere alimentación externa, para poder enviar esta medición al microcontrolador de forma analógica.

Adicionalmente para la medición de la temperatura se hace uso de una cámara termográfica junto

con el multímetro y para aumentar la temperatura se utiliza un dispositivo de calentamiento por aire (secadora). Dado que el sensor es un PT1000, se conoce de este tipo de dispositivo que su resistencia es $1000[\Omega]$ cuando la temperatura es 0 grados Celsius, además que por su precisión la resistencia no varía mucho por grado de temperatura. Esta última característica hace necesario que el circuito acondicionador tenga mucha precisión al capturar los diferentes valores de resistencia. De esta forma un circuito que permite calcular de manera precisa la resistencia de un sensor, es el puente Wheatstone que consta de 4 resistencias donde una de ellas es el sensor que se comporta como una resistencia más en la configuración. El circuito se basa en el equilibrio que forman las resistencias de cada rama, es decir $R_1 = R_2$ y $R_3 = R_x$ siendo esta última el equivalente al sensor RTD que se ve en la figura 3.10. Con el circuito en equilibrio de la imagen los puntos A y B la tensión es nula y no existe corriente, por lo tanto, si el sensor cambia su resistencia empieza a correr una corriente I_G como esta ilustrado y puede medirse la resistencia que tendrá una tensión asociada que se pasa por un amplificador de instrumentación de precisión para capturar la diferencia de tensión entre los terminales A y B.

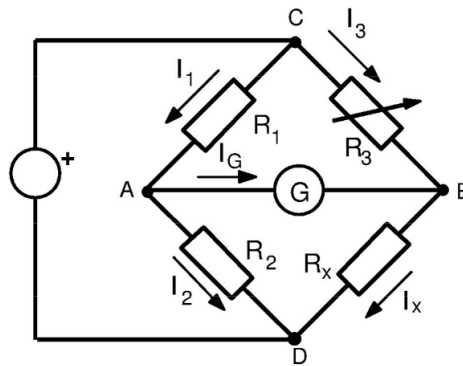


Figura 3.10: Esquema circuito puente Wheatstone. [8]

Para el diseño del puente Wheatstone se utiliza la figura 3.11 como circuito para poder medir el sensor RTD.

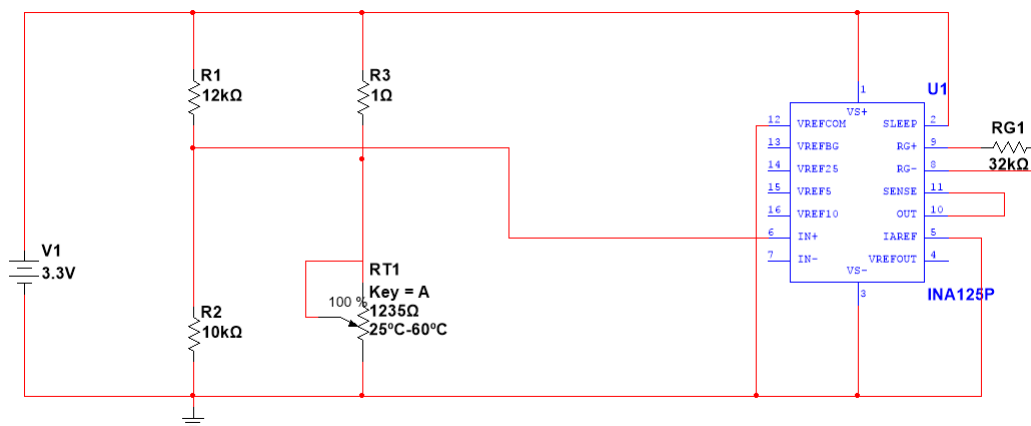


Figura 3.11: Esquema circuito puente Wheatstone.

En base a este circuito, los cálculos correspondientes se realizan aplicando divisores de tensión en los nodos V_1 entre la resistencia $R_1 - R_2$ y V_2 el nodo entre $R_3 - R_{RTD}$, entonces se tiene:

$$V_1 = \frac{R_2 V_s}{R_1 + R_2} \quad (3.1)$$

$$V_2 = \frac{R_{T1} V_s}{R_{T1} + R_2} \quad (3.2)$$

Con las ecuaciones 3.1 y 3.2 se obtiene una tensión diferencial que son lo que se medirán en el amplificador de instrumentación a utilizar, se realizan dos cálculos, uno cuando la resistencia R_{RT1} tiene su valor mínimo el cual equivale a la temperatura mínima en este caso, y cuando su valor es máximo. Para simplificar esto se hace muestran los cálculos para valores mínimos, es decir, se calculan los mínimos y máximos para los nodos mencionados. Entonces primero se calcula la tensión diferencial:

$$V_{diff} = V_2 - V_1 = V_{inmin} \quad (3.3)$$

Como se mencionó, se realizan estos mismos pasos para encontrar V_{inmax} con el valor máximo de R_{RT1} y se vuelve a calcular la ecuación 3.3.

Conociendo los valores de salida que se desean, se aplica la siguiente formula para la ganancia que permite calcular una resistencia de ganancia R_G y una tensión de referencia para el amplificador V_{ref} que toma los valores máximos de V_{out} y V_{in} :

$$A_v = \frac{V_{outmax} - V_{outmin}}{V_{inmax} - V_{inmin}} \quad (3.4)$$

$$V_{ref} = V_{out} - A_v V_{in} \quad (3.5)$$

Por utilizar amplificadores de instrumentación se debe utilizar la hoja de datos, una formula que es específico del componente, para el INA125P la formula de ganancia es:

$$A_v = 4 + \frac{60}{R_G} \quad (3.6)$$

Con la ecuación 3.6 se despeja el valor de R_G para poder finalizar el dimensionamiento de las resistencias en el circuito, que permiten tener una salida deseada, en este caso de 3.3V de salida máxima y mínima de 0.5V.

Esta salida del amplificador se mide para el rango de temperaturas que se estableció desde la temperatura ambiente a 25°C hasta 60°C para este sensor que se ubicará en el techo de la piscina, y con esto se puede realizar las muestras para obtener el comportamiento del sensor. La cantidad de muestras que se realizaron fue el cambio de tensión por grado Celsius para tener una relación proporcional entre ambos parámetros.

Luego de obtenidos los datos se procede a graficarlos lo que permite ver la linea de tendencia y el comportamiento del sensor, donde al mismo tiempo con ayuda del software de cálculo de Microsoft Excel se puede obtener la ecuación de esta tendencia con la cual queda asociado el valor de resistencia con la temperatura medida.

Como la entrada del microcontrolador es un pin analógico para la medición de tensión y su respectiva conversión a través del ADC, se procede a calcular las variaciones de tensión con respecto a ese valor de resistencia en el sensor para obtener otra lista de datos correlacionados entre si. Al graficar esos datos, se obtiene similarmente la linea de tendencia con su respectiva ecuación.

Primero se realiza la conversión a tensión del ADC del microcontrolador, el cual tiene una resolución de 12 bits (4096 en decimal) ver ecuación 3.7. Las dos ecuaciones se tornan importantes para relacionar los parámetros y sacar el factor común que es la resistencia entre ambas mediciones, al

tener el valor de tensión convertido según el ADC y la referencia. se igualan las ecuaciones para despejar el termino correspondiente a temperatura para su debido cálculo.

$$V_{conv} = \frac{V_m}{4095} * V_{REF} \quad (3.7)$$

V_{conv} : tensión convertido del ADC.

V_m : tensión medida por el pin del microcontrolador.

V_{REF} : tensión de referencia 3.3V.

4095: es el valor en decimal menos una unidad, de 12 bits

3.5.2 Piranómetro

El sensor tiene una salida de dos cables que al conectarse a un multímetro se puede medir la tensión asociada a la irradiancia que recibe. Como se desconoce si el sensor es lineal, se hacen pruebas con respecto a la iluminancia con un luxómetro para tener una referencia.

Al igual se sabe que el sensor cuando la irradiancia es equivalente a $1000[W/m^2]$ la tensión de salida es de 80.3[mV] específicamente para este dispositivo, entonces este valor se vuelve un punto de partida para las mediciones que se tomarán.

La preparación de la medición se realiza estableciendo una distancia de 90[cm] hacia una fuente de radiación, la cual se propone porque alrededor de esta distancia el valor medido por el piranómetro es casi 0[mV], un bombillo incandescente de 60[W]. La dinámica es empezar a tomar las mediciones a los 90 [cm] de distancia entre el sensor y la fuente, las muestras se toman cada 3[cm], además, en paralelo se toman las mediciones con el luxómetro para ir obteniendo los valores de Lux con los que se contrarrestarán las mediciones de radiación.

Cabe destacar que la medición se efectuó en una habitación en horas de la noche con una única entrada de luz por una ventana, igual en pruebas preliminares para medir el sensor y la radiación durante el día, que entraba a través de la ventana y a luz ambiente de la habitación sus efectos eran nulos la salida de tensión de los terminales convergían a 0[mV]. Similarmente ocurre cuando la luz de la habitación es encendida, específicamente porque la fuente no es incandescente sino luz blanca de bajo consumo.

Aun por estas razones se tomaron las mediciones con solo la fuente de radiación de 60[W], es decir, sin entrada de otra luz para tomar 33 muestras ya que se agregaron 3 muestras para poder llegar al valor de 80[mV] de medición en el piranómetro. Datos que se tabularon en Excel para obtener la línea de tendencia del sensor y la ecuación asociada.

Además de esta medición, se recurrió a realizar una medición de la radiación que recibe del sol para poder determinar los valores máximos y mínimos de un día normal. Esto se realiza durante las horas en las que se espera el sol emita mayor intensidad de radiación que andan alrededor de las 12 medio día. Por esto se decide realizar estas mediciones durante 2 horas con el muestreo cada 5 minutos dado que el luxómetro y el multímetro utilizados por el modo de conservación de batería que tienen programado se apagan. Estas dos horas fueron grabadas con la cámara de un teléfono para evitar inconsistencias en los tiempos.

Con las mediciones realizadas, debido a que el sensor ya tiene una salida de tensión, se opta por amplificar estos valores para que sean legibles para el ADC en el microcontrolador y evitar errores de lectura, conociendo que el límite de amplificación es de 3.3[V].

El amplificador que se utiliza es uno no inversor y se busca una ganancia donde la salida de tensión sea 3.3[V]. Entonces se tiene para un amplificador no inversor la ecuación 3.8

$$A_v = 1 + \frac{R_F}{R_i} \quad (3.8)$$

Se conoce que A_v como la ganancia del amplificador donde $A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ donde $V_{out} = 3.3V$ y $V_{in} = 80mV$, entonces el valor de ganancia es:

$$A_v = 41.25 \quad (3.9)$$

de esta forma se escoge un valor para $R_F = 22k\Omega$ y se calcula R_i despejando al ecuación 3.8 quedando de esta forma:

$$R_i = \frac{R_F}{A_v - 1} \quad (3.10)$$

$$R_i = 546\Omega \quad (3.11)$$

con estos valores se realiza el circuito correspondiente al amplificador no inversor mostrado en la figura 3.12, y en la figura 3.13 se muestra el circuito realizado en Multisim.

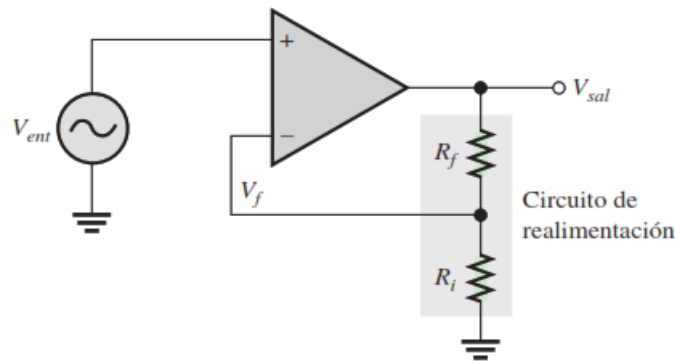


Figura 3.12: Circuito Amplificador No inversor. [9]

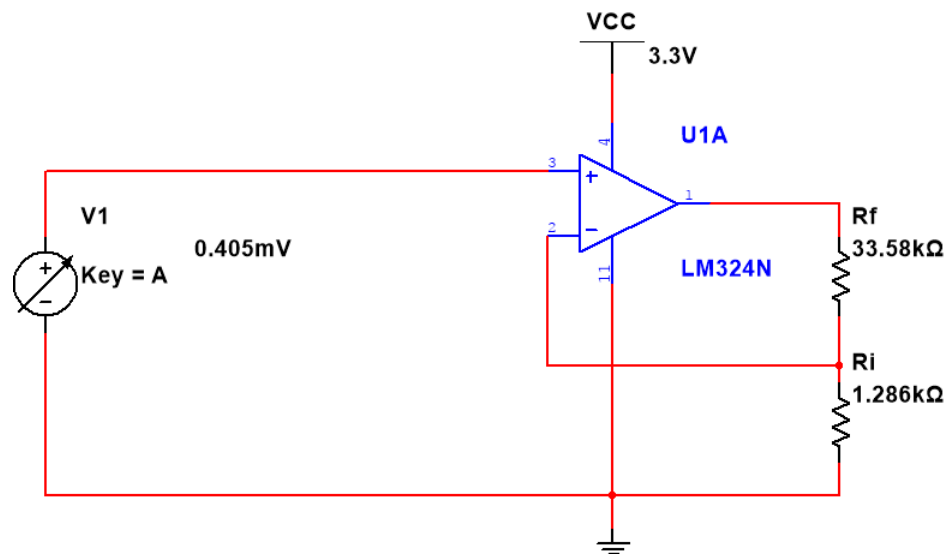


Figura 3.13: Circuito Amplificador No inversor realizado en Multisim.

Sensor de Temperatura y Humedad

El sensor de temperatura y humedad a utilizar tiene una salida digital por el protocolo I^2C y utilizando la hoja de datos se encuentra que para calcular la temperatura se utiliza la fórmula de la ecuación 3.12

$$Temperatura(^{\circ}C) = \frac{Salidadelsensor}{2^{12} - 2} * 165 - 40 \quad (3.12)$$

y también se puede obtener la humedad con la ecuación 3.13

$$Humedad(\%RH) = \frac{Salidadelsensor}{2^{12} - 2} * 100 \quad (3.13)$$

Estas dos ecuaciones calculan la información que el sensor capta y que puede ser directamente programada en el microcontrolador para procesarla y empaquetarla de forma que se pueda transmitirla, esto se verá en la sección 3.6 que trata la transmisión de esta información hacia un concentrador de datos. Parte de la hoja de datos en la figura B.3 se muestra también el diagrama de circuito a realizar para conectar este sensor. Cabe mencionar que la resolución del ADC depende del microcontrolador, en este caso es de 12 bits.

3.5.3 Termistor

Este dispositivo se encuentra en el cuarto de maquinas de la piscina, son los sensores que están instalados de fabrica en las tuberías por donde baja y sube el agua. De la hoja de datos dado se tiene una tabla con los equivalentes de tensión según la temperatura a la que se encuentren. Los datos de temperatura se convirtieron de grados Fahrenheit a Celsius para un mejor manejo de esta información esta en la tabla A.1 y los valores en la tabla no son todos, se eligieron los que pueden ser soportados por el pin de entrada en el microcontrolador que son 3.3[V].

Con esta información se crea una gráfica de la que se obtiene una linea de tendencia con su respectiva ecuación para poder utilizar para el cálculo de la temperatura en el microcontrolador. Como este sensor es similar al RTD que cambia su resistencia con la temperatura, con la diferencia que este es uno NTC (Negative Temperatura Coefficient), esto quiere decir que la resistencia aumenta conforme la temperatura disminuye.

Por las similitudes con el RTD, se aplica un puente Wheatstone para este sensor, haciendo los mismos cálculos mostrados en la sección 3.5.1 de este capítulo con la diferencia de las temperaturas mínimas y máximas que se pueden ver en la tabla A.1. Como se ha mencionado, el sensor ya tiene su tabla de valores de tensión que permiten asimilar la salida y capturar esto en el microcontrolador a utilizar. Sin embargo, este sensor esta incrustado en las tuberías y solo se cuenta con esta información de referencia, además, la salida del sensor es resistencia y no tensión por lo que al realizar el diseño del circuito puente para obtener un valor de tensión en función de la resistencia medida, se realiza un barrido de valores simulados con un potenciómetro simulando el sensor. y limitando estos valores según el diseño para la temperatura a la que los colectores deben mantener la piscina a menos de $30^{\circ}C$, por lo que se toma este como máximo y hasta $15^{\circ}C$ como mínimo. Eso con el objetivo de imitar los valores dados para este sensor, por esta razón después del diseño de los componentes en la simulación se verifican los valores de tensión para redimensionar el resistencias asociadas a una tensión conocida en los nodos, en este caso los valores extremos a los que se limita el rango de la tabla del sensor.

Al terminar de tabular los datos se calculan las resistencias asociadas al porcentaje para el valor de resistencia del potenciómetro. Después se contrastan estos valores de resistencia con los dados para el sensor y verificar a cuanto equivalen en temperatura, la cual se deja en grados Fahrenheit para luego hacer la conversión en el microcontrolador. Esto permite realizar una gráfica de resistencia versus tensión y resistencia versus temperatura de modo que se pueda relacionar la resistencia con el valor de tensión y este con la tensión asociada que se interpreta en el microcontrolador.

Los circuitos acondicionadores deben ser para cada entrada de sensor en la tubería, los cuales son

dos, uno para el agua que entra a la piscina y otro para el agua que sale en el ciclo.

3.5.4 Diseños para circuito impreso

En esta sección se presentaran los diseños para implementar los circuitos impresos de los acondicionadores de señal diseñados. La premisa principal es hacerlos lo mas pequeños posible para encapsularlos con materiales resistentes al agua por la aplicación que se les esta dando. Se crearon bibliotecas para el componente Feather y el módulo RF, utilizando las hojas de datos de estos.

Nodo 1

La figura 3.14 muestra el esquemático realizado para el nodo 1, el cual se conforma como se ha mencionado de la tarjeta de desarrollo Linkit 7688 Duo, el módulo RFM69HCW y un conector para poder conectar los cables de salida de los sensores colocados en la tubería, se puso un conector de 4 pines para abarcar los 4 sensores colocados, pero solo se usan 2 de estos, del agua cuando baja a la piscina y cuando la bomba la dirige a los colectores nuevamente. Se descargaron las bibliotecas para utilizar el módulo del Linkit y se creó el componente para el módulo RFM69HCW y sus distancias que se pueden obtener de la hoja de datos del radio. La figura 3.15 muestra el diseño para el circuito impreso.

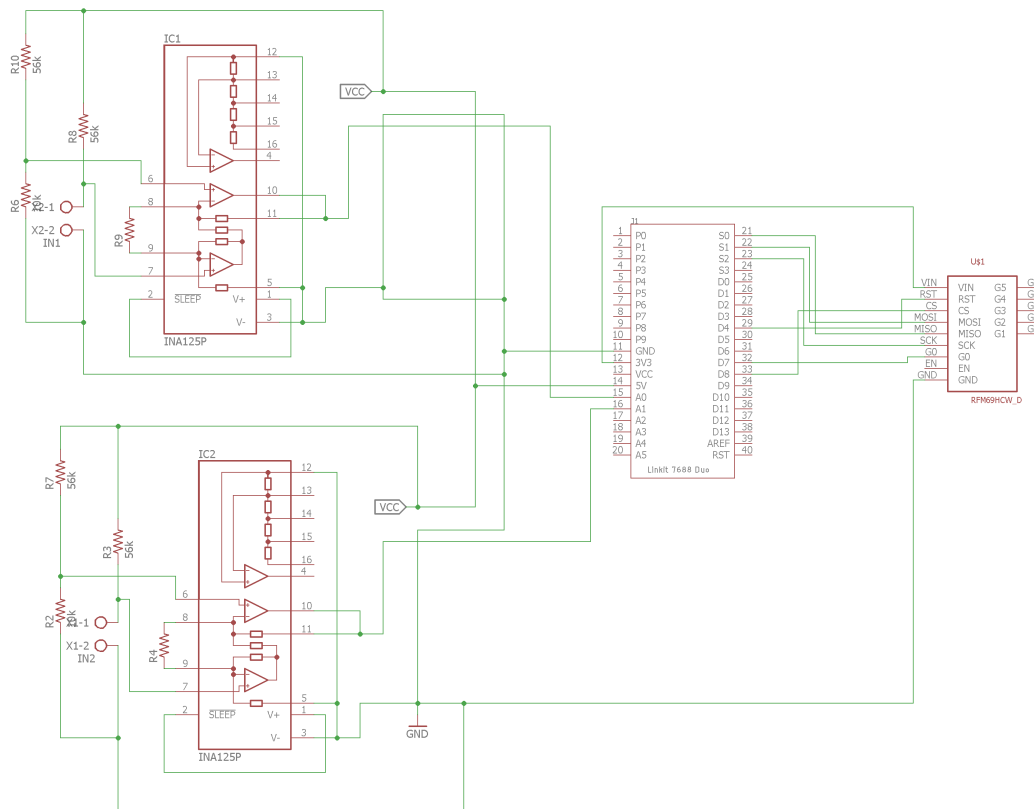


Figura 3.14: Esquema de conexión para nodo 1 realizado en Eagle.

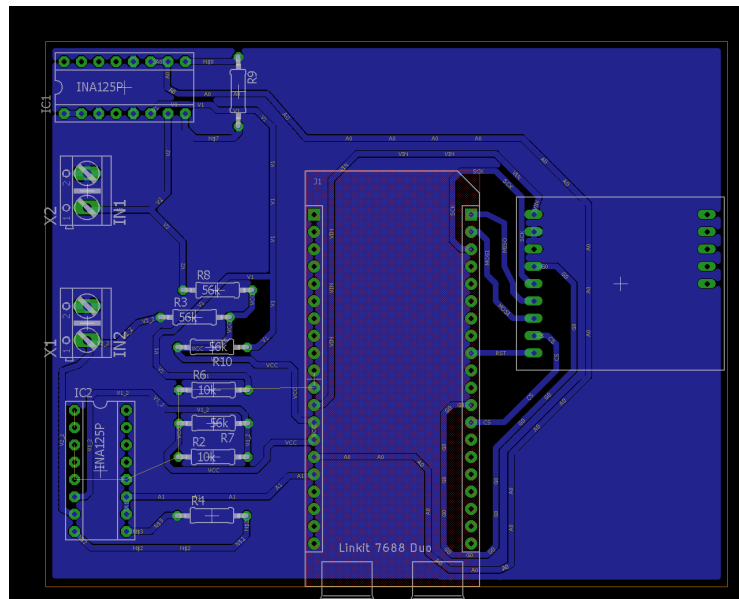


Figura 3.15: Diseño de circuito impreso para nodo 1 realizado en Eagle

Nodo 2

La figura 3.16 es el circuito acondicionador para los dos sensores que se colocan en el techo, para tomar radiación y temperatura en la superficie del colecto. Y en la figura 3.17 el diseño para el circuito impreso. Este nodo es para el Feather y los acondicionadores de señal.

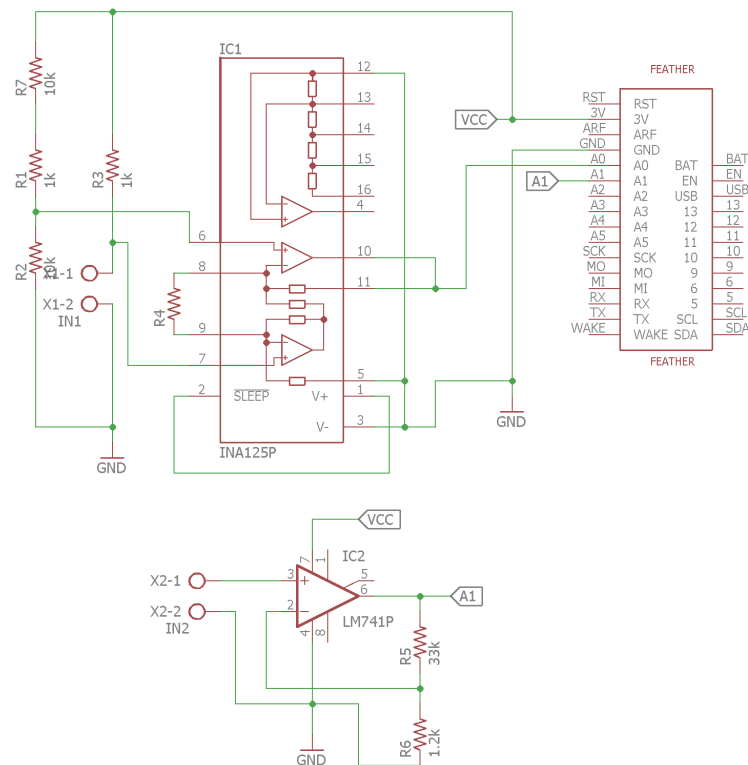


Figura 3.16: Esquema de conexión para nodo 2 realizado en Eagle.

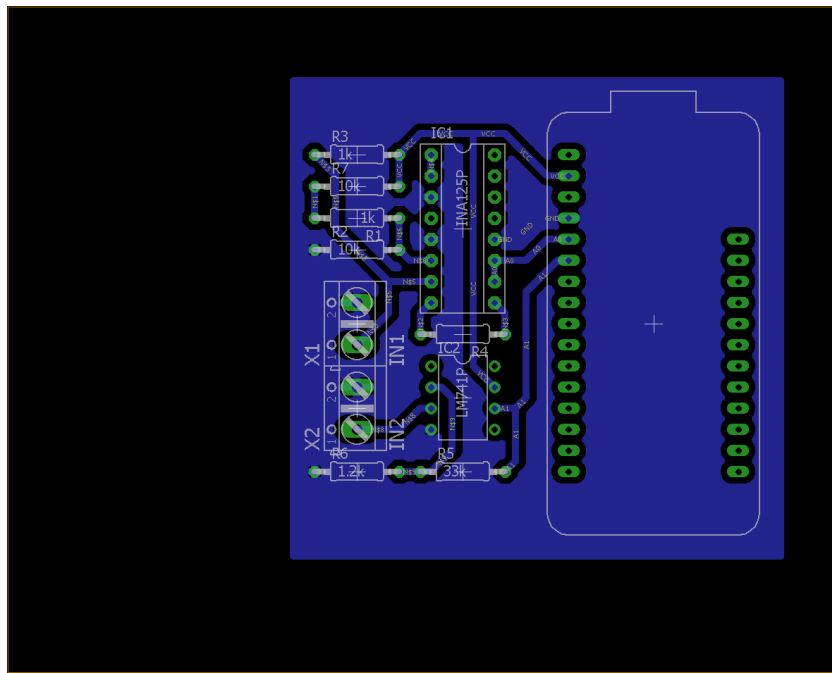


Figura 3.17: Diseño de circuito impreso para nodo 2 realizado en Eagle

Nodo 3

La figura 3.18 se detalla la conexión del Feather con el sensor de temperatura y humedad de 4 pines. Y por consiguiente la figura 3.19 es el circuito impreso correspondiente al esquemático.

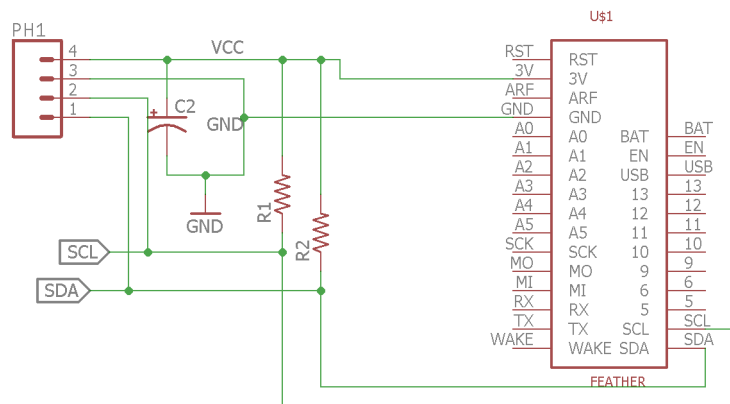


Figura 3.18: Esquema de conexión para nodo 3 realizado en Eagle.

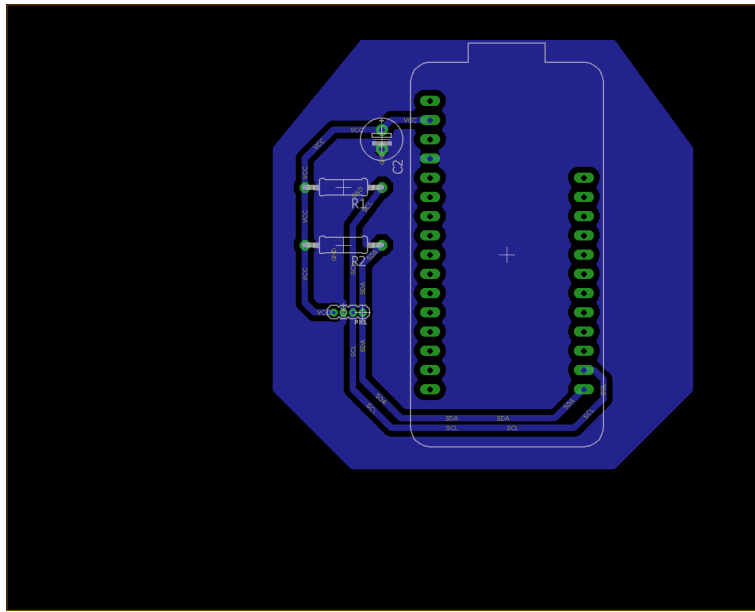


Figura 3.19: Diseño de circuito impreso para nodo 3 realizado en Eagle

3.6 Sistema de Comunicación

Para implementar el sistema de comunicación para el proyecto es necesario entender el tipo de microcontrolador con el que se trabaja y para esto se utiliza la hoja de datos. Para el proyecto se hará uso de dos tipos de microcontroladores, unos de bajo consumo que funcionan en lógica de 3.3[V] con un módulo de radiofrecuencia integrado. El segundo tipo es microcontrolador compartido con procesador el cual tiene un módulo Wi-Fi que permita transmitir los datos a un servidor destinado para este propósito.

En términos generales se quiere implementar una serie de sensores en la piscina donde con la ayuda de los microcontroladores y el módulo RF, se logre transmitir esta información luego del acondicionamiento de señal. Entonces los microcontroladores con el módulo RF (Adafruit Feather M0 RFM69HCW Packet Radio) se disponen como nodos que envían la información solicitada por el HUB o concentrador de datos, microcontrolador con el módulo de Wi-Fi (Mediatek Linkit Smart 7688 Duo).

3.6.1 Nodos

Los nodos son compuestos por el microcontrolador Feather, uno o dos sensores y acondicionamiento de señal según corresponda. El sistema tiene un arreglo de 3 nodos donde uno de ellos es el mismo HUB debido a su ubicación en el cuarto de maquinas con los sensores de las tuberías. El segundo con la entrada de los sensores de radiación y temperatura (RTD), y el tercero dentro de las instalaciones de la piscina donde recibe la temperatura ambiente y la humedad relativa del lugar. La topología de red a utilizar para implementar el sistema es de tipo estrella como se muestra en la figura 3.20, se puede observar que el nodo 1 esta unido al nodo maestro lo cual se debe a que están en el mismo punto donde se obtiene la información del sensor en las tuberías, esto se debe a que el Linkit se le conecta un módulo RF igual al de los nodos para que la comunicación se realice.

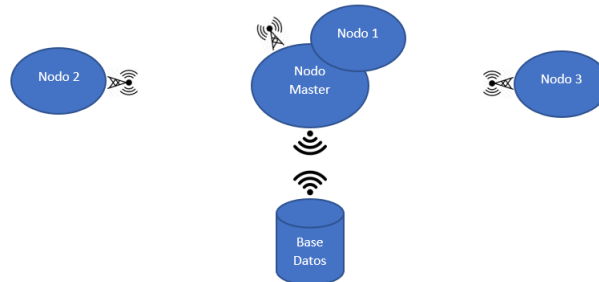


Figura 3.20: Topología de red en estrella inalámbrica.

3.6.2 Sensor de temperatura en las tuberías

Como se indicó este nodo; que es el nodo 1, contiene el microcontrolador que sera el principal concentrador de datos que capturen los otros dos nodos. Se le llama nodo debido a que este también adquiere los datos de los sensores ubicados en las tuberías, y que se encarga de empaquetar este dato y lo capturado por los otros nodos en las ubicaciones establecidas. En la figura 3.21 se muestra la ubicación de este microcontrolador. El cual se debe conectar a la caja que esta a lado del panel de control de establecido para el control de temperaturas en la piscina.

La conexión de la salida de estos sensores se establece de manera simple utilizando las entradas analógicas del Linkit similar a un Arduino. Similarmente se le conecta el módulo RF para obtener los datos de los demás nodos, la tabla 3.6 muestra los pines que se utilizan para lograr la funciona-

alidad de este nodo con el sensor, y la tabla 3.7 la conexión necesaria para poner en funcionamiento el módulo RF en el Linkit el cual utiliza la comunicación por el protocolo SPI.



Figura 3.21: Cuarto de maquinas, piscina del TEC.

Tabla 3.6: Conexión de sensor de temperatura con Linkit Smart 7688 Duo

Descripción	Pin
Salida sensor temperatura	Analógico A0

Tabla 3.7: Conexión de módulo RFM69HCW con Linkit Smart 7688 Duo

Pin RFM69HCW	Pin Linkit Smart 7688 DUO
Chip Select (CS)	D8
Interrupción (Go)	D7
MOSI	S1 (MOSI)
MISO	S0 (MISO)
SCK	S2 (SCK)
Reset (RST)	D4
Alimentación (VIN)	3.3[V]
Referencia (GND)	GND

Para el módulo RF en el Linkit se decide utilizar el arreglo de pines similar a como están definidos para el Feather para homologar su uso en la programación, como el CS y el Reset y que oportunamente un pin de interrupción en el Linkit se ubica en el D7. La configuración de pines puede observarse en el apéndice B.1. Cabe señalar que la alimentación se mantiene la lógica de 3.3[V] que tienen los módulos integrados en los Feather.

3.6.3 Sensor de temperatura y radiación

La conexión de este que se denomina nodo 2, toma de información de los sensores de temperatura y radiación se puede observar en la tabla 3.8.

Tabla 3.8: Conexión de CAS en Nodo 2 con Feather

Descripción	Pin Feather
Salida Temperatura	A0
Salida Radiación	A1
Alimentación circuito	3.3[V]
Referencia	GND

Estas entradas en el microcontrolador permiten capturar la información ya acondicionada y convertida en el ADC explicada en el capítulo anterior. Para poder transmitir esta información se hace uso del módulo RFM69HCW que viene integrado en el Feather que utiliza el protocolo de comunicación SPI para poder intercambiar datos entre el microcontrolador y el módulo RF, la conexión interna del dispositivo se puede ver en la tabla 3.9. Estos pines son facilitados por la guía de Adafruit y se pueden observar en el apéndice B.2.

Tabla 3.9: Conexión Feather con módulo RFM69HCW

Descripción	Pin
Chip Select (CS)	D8
Interrupción (G0)	D3
Reset	D4
Alimentación	3.3[V]
Referencia	GND

3.6.4 Sensor de temperatura y humedad

El tercer nodo de la red se compone del Feather y del sensor de doble propósito para obtener la temperatura y humedad relativa del lugar. Se ubica en los alrededores de la piscina cerca del cuarto de maquinas para tener la temperatura ambiente y la correspondiente humedad. Este sensor tiene la particularidad que transmite la información por el protocolo I^2C hacia el Feather. Por lo tanto se tiene la tabla 3.10 y con ayuda de la figura en el apéndice B.3 que muestra la conexión entre el sensor y el microcontrolador.

Tabla 3.10: Conexión Feather con sensor de temperatura y humedad relativa

Descripción	Pin HIH7000	Pin Feather
I^2C Clock	3	SCL
I^2C Data	4	SDA
Referencia (V_{ss})	2	GND
Alimentación (V_{cc})	1	3.3[V]

3.6.5 Diseño de comunicación

El ambiente de programación que se utiliza es Arduino IDE para los 3 microcontroladores, para esto se utilizan las diferentes guías que proveen los fabricantes de estos dispositivos de modo que se puedan configurar y descargar las diferentes bibliotecas hechas para los módulos que utilizan. Se muestran los diferentes diagramas de flujos de los códigos realizados para la comunicación entre los dispositivos.

Se quiere realizar la comunicación de modo que los nodos sean activados por medio de una señal de Broadcast que envía el HUB para preparar los nodos, de esta forma se logra mantener un bajo consumo de corriente al no situar el modulo siempre en un estado de recepción de datos. Luego

de enviarse esta señal que llega simultáneamente a todos los nodos, los nodos quedan atentos a escuchar la señal para enviar los datos.

Configuración del Arduino IDE

Primeramente para utilizar el ambiente de programación se deben seguir los pasos de [7] para poder configurar el ambiente de desarrollo integrado (IDE en inglés) de Arduino para el Feather. Para el Linkit se realizan pasos similares al principio, pero que se ven modificados por instalación de driver y habilitación del puente que permite comunicar el procesador con el microcontrolador. Para estos pasos se debe tener una conexión a internet para que el IDE descargue la información correspondiente.

Feather M0 Radio with RFM69HCW Packet Radio

- Como primer paso se debe instalar una versión de Arduino, los fabricantes recomiendan la última versión o una igual o mayor que la versión 1.6.4, sin embargo, se utiliza la versión 1.6.8 de este software por cuestiones de compatibilidad.
- Se copia el link para que el IDE adquiera la información de las tarjetas correspondientes a Adafruit: https://adafruit.github.io/arduino-board-index/package_adafruit_index.json. Esto en la ventana de Arduino: File>Preferences>Additional Boards Manager Urls y pegar el link.
- La guía de adafruit menciona instalar el Arduino SAMD Boards, sin embargo por compatibilidad es mejor no instalarlo.
- Luego de instalar el software e indicar los repositorios a usar, se procede a agregar las tarjetas correspondientes al fabricante para poder subir la programación se ubica en Tools>Board>Boards Manager. Para el caso del Feather en la barra de búsqueda se puede ingresar Adafruit SAMD Boards que trae la indicación que es para el Feather M0 el cual se utiliza en este proyecto, instalar la versión 1.0.13.
- Instalar los drivers https://github.com/adafruit/Adafruit_Windows_Drivers/releases/-/1.0.0.0/adafruit_drivers.exe.
- Probar con el ejemplo Blink que viene en Arduino>File>Examples>Basics>Blink y programar el Feather para verificar que es posible utilizarlo.

Linkit Smart 7688 Duo

- Se instala una versión de Arduino, el fabricante recomienda la versión 1.6.5, sin embargo, se utiliza la versión 1.6.8 de este software debido a la previa configuración con el Feather.
- Se copia el link para que el IDE adquiera la información de la tarjeta correspondiente al Linkit: http://download.labs.mediatek.com/package_mtk_linkit_smart_7688_test_index.json. Esto en la ventana de Arduino: File>Preferences>Additional Boards Manager Urls, dar click en el icono al final del espacio para pegar texto, de modo que se tenga un espacio para multitexto y pegar el link debajo del que se utilizo para el Feather.
- Al entrar a la ventana para buscar la tarjeta correspondiente, se debe revisar en la consola del IDE de Arduino por si aparece un mensaje de que no se puede descargar la información se puede deber a que falta el http en el link. En la guía indica esto pero dentro de la ventana de búsqueda de tarjetas, lo cual es eliminando los archivos caché con extensión ".json".
- Luego de instalar el software e indicar los repositorios a usar, se procede a agregar las tarjetas correspondientes al fabricante para poder subir la programación se ubica en Tools>Board>Boards Manager. En la barra de búsqueda se puede ingresar "linkit" el cual aparece inmediatamente

en la búsqueda, se instala la última versión.

- La guía recomienda instalar Arduino SAMD Boards por si existe problemas de instalación, pero se puede proceder sin instalar este paquete de tarjetas.
- Para instalar el driver, se debe acceder en el IDE a File>Preferences>darle click a la dirección de preferences.txt>packages>LinkIt>hardware>avr>0.1.8, esta versión varía según la que se instale>driver>darle click derecho al archivo linkit smart 7688.inf>en el menú darle instalar. Esto falla si es en Windows 10, por lo que se accede a la configuración de Windows>Update Security>Recovery>Advance Startup>Restart>Troubleshooting>Advance Options>Restart>Presionar 7 que deshabilita el uso obligatorio de drivers firmados.
- Realizar el paso anterior hasta darle instalar al archivo .inf e instalar el driver.
- Probar con el ejemplo Blink que viene en Arduino>File>Examples>Basics>Blink y programar el Linkit para verificar que es posible utilizarlo, se puede realizar el ejemplo que viene en la documentación [10] que también programa del lado de Linux para que el procesador interprete el sketch de Arduino.

Programación en Feather M0 Radio with RFM69HCW Packet Radio

Después de configurar el IDE se pretende utilizar el módulo RF incluido en el microcontrolador, por lo que se busca la biblioteca necesaria para utilizar el módulo. En adafruit [7] se puede descargar la biblioteca Radiohead [25]. Existe también la biblioteca RFM69 de [26], sin embargo, el ejemplo de transmisión y recepción que trae la biblioteca no funciona para compilar para el Feather debido a que solicita archivos adicionales como avr/wdt.h biblioteca para algunas versiones de ATmega, la cual no incluye al ATSAMD21G18 según [27] el cual es el que viene en el Feather. No obstante, esta biblioteca debe estar incluida en Arduino y por esta razón se evita incluirla y se reduce a utilizar la primera biblioteca recomendada en la guía de adafruit para utilizar el módulo RF del microcontrolador.

Para entender como funciona la biblioteca escogida para poder programar el Feather, se utilizan los ejemplos de transmisión y recepción que vienen incluidos en estos archivos llamados RadioHead69_AddrDemo_TX y RadioHead69_AddrDemo_RX, como base para entender el funcionamiento del radio en el microcontrolador y la sintaxis para poder llevar a cabo la comunicación. Estos archivos pueden ser accedidos en la ventana de programación Arduino>File>Examples>RadioHead>feather.

RadioHead69_AddrDemo_TX es un ejemplo que permite realizar transmisiones de paquetes con el mensaje "hola mundo" donde después de enviar este mensaje espera un mensaje respuesta para indicar si el mensaje llegó a algún receptor que notifique esta acción. Además, este código permite ver como se inicializa el módulo de radio para disponer de este, entre los parámetros que pueden ser modificados como la frecuencia de operación la cual debe indicarse la misma en todos los nodos para que se logre la comunicación entre los módulos, la potencia de transmisión, y la opción de ponerle llave de encriptación.

La figura 3.22 muestra la dinámica del código de transmisión del que se tomó como base para realizar el diseño de la comunicación. Se empaqueta el dato, se realiza la comprobación si el mensaje se envía, y si lo hace, recibir respuesta del receptor para terminar la comunicación.

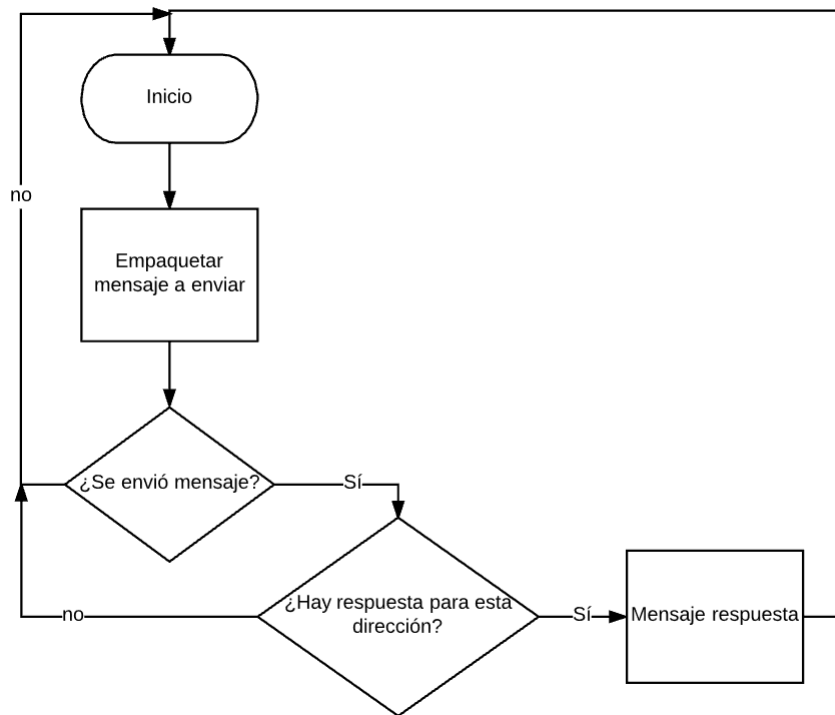


Figura 3.22: Diagrama de flujo del código ejemplo para transmisión.

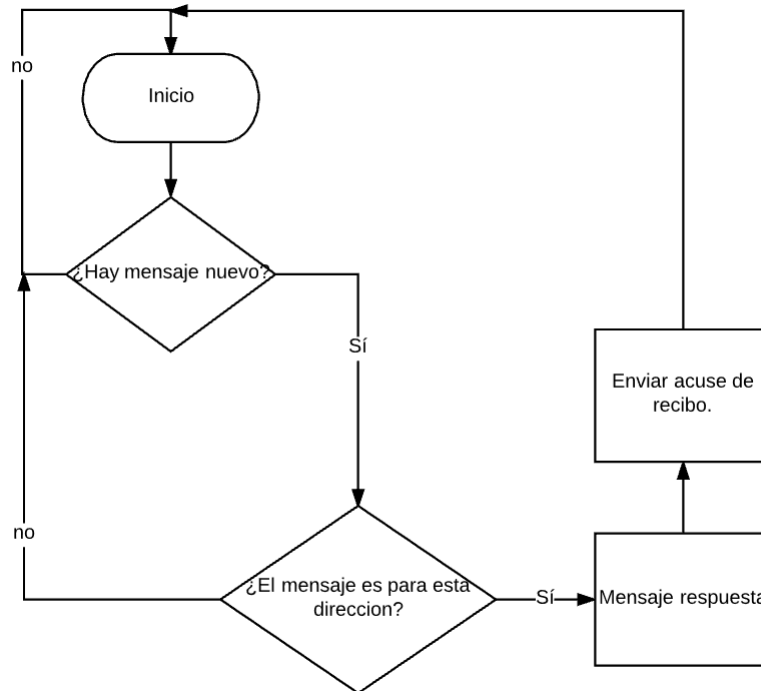


Figura 3.23: Diagrama de flujo del código ejemplo para recepción.

Similarmente la figura 3.23 muestra la dinámica que tiene el receptor utilizando el ejemplo RadioHead69_AddrDemo_RX, el cual tiene el mismo proceso para iniciar el modulo de radio que el ejemplo para la transmisión. Luego en cada ciclo revisa si hay mensaje nuevo, para poder capturarlo y enviar un acuse de recibo a la dirección de donde provino el mensaje original. Esto permite hacer la prueba de transmisión y recepción entre dos Feather como prueba funcional de los radios.

Cabe destacar que estos ejemplos son para comunicación dirigida, es decir, existe una dirección que es servidor y otra cliente como parte de la comunicación, en el caso de los Feather estos serán los clientes o nodos que envían la información al servidor o HUB.

Estos ejemplos y estudiar la biblioteca para el uso del modulo de radio permiten desarrollar el diseño para la comunicación en los nodos para la espera de las señales para enviar los datos procesados. La figura 3.24 muestra como se realiza el código para la comunicación en los nodos. Con el diagrama expuesto se espera que el modulo conozca si el mensaje que envían es una señal de broadcast o un mensaje dirigido hacia este nodo específicamente. La función del nodo es recibir señales para realizar las acciones correspondientes, hasta este punto es un nodo de solo recepción hasta que tiene la señal para enviar datos que es cuando envía lo solicitado al HUB.

De esta forma el nodo mantiene una postura de recepción combinado con transmisión de mensajes y discriminando la señal que recibe, además que solo se ve afectado por el HUB, es decir, se sincroniza con el tiempo que lleve el HUB para actualizar datos y enviar según se requiera.

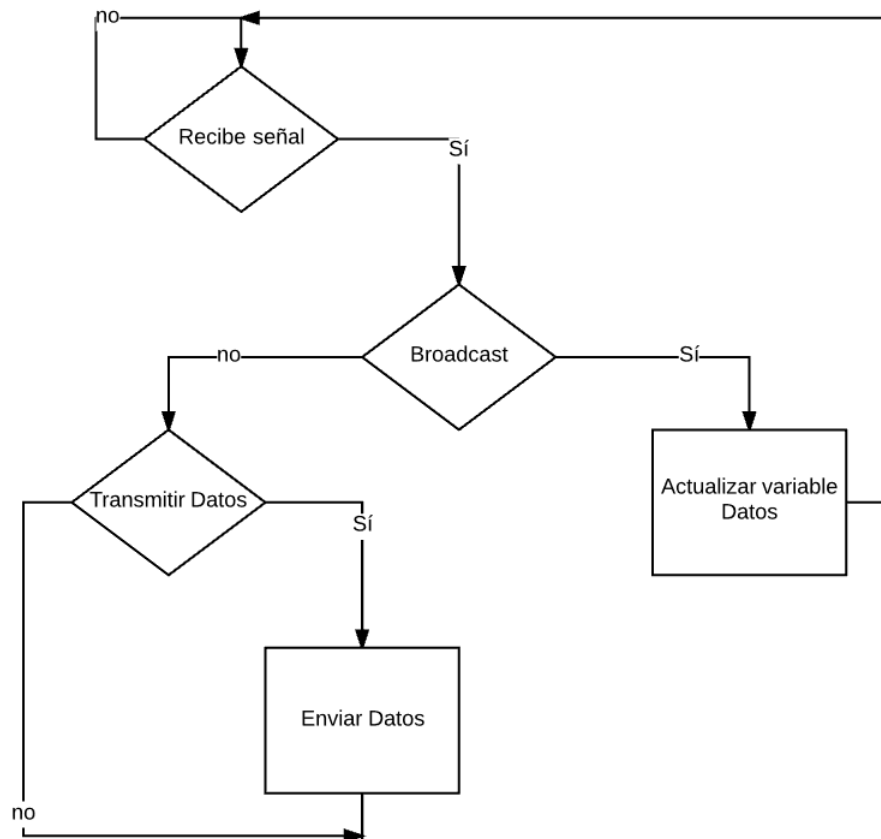


Figura 3.24: Diagrama de flujo del código en los nodos.

Programación en Linkit Smart 7688 Duo

La implementación de este microcontrolador lleva un proceso similar al Feather, ya que puede utilizar igualmente el Arduino IDE para poder realizar la programación del modulo de radio para poder capturar lo que envían los nodos, al igual que enviar las señales para solicitar esos datos. La diferencia de este dispositivo es la ubicación de los pines, por lo que se establecieron para que fueran similares a los que usa el Feather que se pueden observar en la sección 3.6.1, y que para programar en Arduino se debe configurar el Linkit para que haga un puente entre el microcontrolador (MCU)

y el procesador (MPU) para poder utilizar el hardware.

Para poder programar los sketches de Arduino en el Linkit es un paso específico para no tener que estar programando del lado de Arduino y del lado de Linux por puerto serial, lo cual puede hacer compleja la implementación según la aplicación. Lo que se activa es el `yunbridge`, el cual es una biblioteca creada para Arduino Yun, pero que se exportó a otras tarjetas que utilicen un procesador con sistema Linux y un microcontrolador para facilitar la comunicación y evitar la complejidad de usar el puerto serial. También existen otros métodos por bibliotecas como Firmata que hace de puente entre el MCU y el MPU.

Por ser la más práctica se decide utilizar la que activa el `yunbridge` en el Linkit, por lo tanto, se deben seguir los siguientes pasos para poder acceder al Linkit y activar esta característica:

- Descargar Putty un cliente telnet de software abierto para realizar la conexión por SSH.
- Acceder al Linkit, si esta como punto de acceso conectarse a esta red escribiendo la dirección 192.168.100.1, y cambiar a modo estación para la red que se quiere utilizar.
- En modo estación asegurarse que se conecta a la misma red, para esto se puede utilizar algún software que muestre la dirección IP de los dispositivos en esa red.
- Cuando se conozca la dirección IP del hardware, acceder a este vía Putty ingresando esta dirección, al conectarse pide autenticarse el login es "root" y la contraseña la que se creó cuando se accedió a este por primera vez.
- Dentro de la ventana se accede al Linkit el cual son comandos Linux, utilizar el comando `uci show` que muestra una lista de parámetros, buscar el que dice `yunbridge.config.disabled=1` esto indica que el `yunbridge` está desactivado.
- Escribir el comando `uci set yunbridge.config.disabled=0`, apretar la tecla enter, luego escribir `uci commit` y apretar tecla enter, agregar `reboot` para reiniciar el Linkit.
- Acceder nuevamente con Putty al Linkit y revisar si este parámetro cambió de 1 a 0 en el valor del comando, si es así el puente `yun` está activado y es posible programarle cualquier sketch al Linkit.

Con esta configuración adicional para esta placa, es posible utilizar los sketches de transmisión para probar que tanto `yunbridge` como el módulo de radio funcionan sin problemas. Basándose en el ejemplo de transmisión y recepción, se realiza un diagrama de flujo del código a implementar en la figura 3.26 se puede observar como es la dinámica del HUB con los nodos.

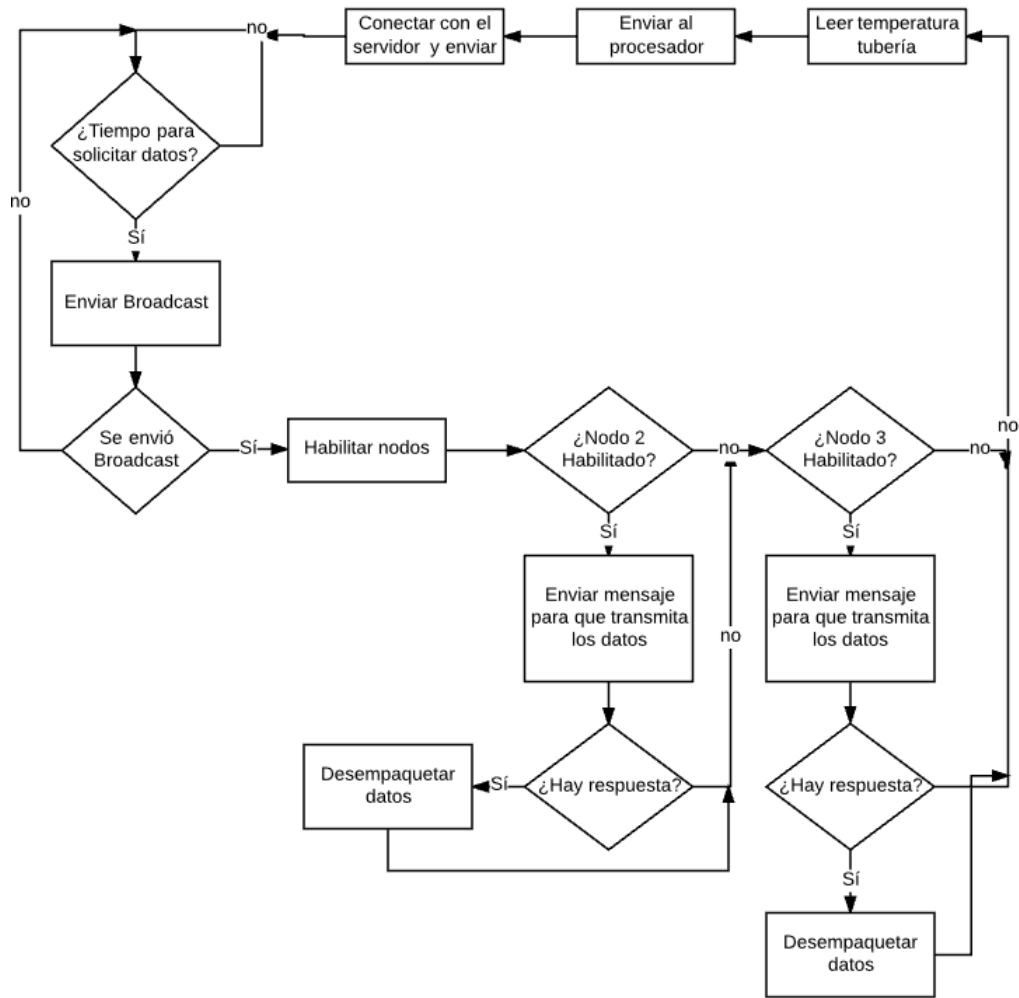


Figura 3.25: Diagrama de flujo para el HUB.

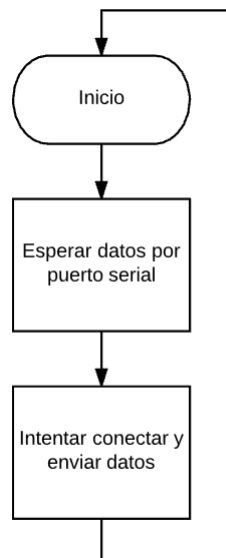


Figura 3.26: Diagrama de flujo de recepción y transmisión de datos al servidor.

La función del HUB es transmitir las señales que sincronicen a los nodos a actualizar datos y tomarlos. Estos se deben desempaquetar para poder enviarlos nuevamente por puerto serial interno entre el MCU y MPU, la finalidad es que el MPU se encargue de la transmisión por el modulo Wi-Fi que tiene integrado el Linkit. Por lo tanto, se requiere realizar una programación en Python aparte del sketch de Arduino; que es para capturar y procesar los datos, este se utiliza para capturar los datos en el puerto serial para enviarlos al servidor por conexión inalámbrica. En la figura 3.26 se muestra como se reciben y se envían los datos.

La implementación en Python necesita que se instalen la biblioteca "requests" desde la consola del Linkit utilizando el comando "pip install requests", y se puede verificar las bibliotecas instaladas utilizando el comando "pip list", en la documentación para desarrolladores de la tarjeta de desarrollo se refieren a este comando "pip". Para trabajar en Python se puede optar por usar los editores de texto y descargarlos al Linkit desde consola, pero si se usa una maquina con sistema operativo Windows se puede descargar de la pagina de Python el IDE para realizar el código. En la documentación se refieren y para comodidad se puede utilizar WinSCP que permite transferir archivos con interfaz gráfica en Windows, esto facilita estar modificando el código en el IDE y probarlo en el Linkit.

3.7 Modelo dinámico del sistema

Para realizar el modelo dinámico se toman varios aspectos para poder determinar la temperatura a la que fluye el agua cuando pasa por los colectores solares. Esto se realiza a partir de la transferencia de calor que se obtiene de la temperatura que se produce en la superficie del colector y que pasa a los tubos de polipropileno de alta densidad que están instalados en contacto con el agua. Teóricamente se parte de que la temperatura en la superficie del colector y la del lado que hace contacto con el tubo donde pasa el agua, es la misma debido al grosor que estos tienen se puede despreciar entonces la temperatura que se calcula por medio de la energía ganada y perdida en la superficie es la misma.

Utilizando la ecuación 2.2 se puede obtener la razón de transferencia de calor que sucede en el agua, para esto es necesario contar con el flujo másico, el cual viene dado en forma de flujo volumétrico en [1]; el calor específico del agua constante conocida y la diferencia de temperatura, esta es la temperatura del agua que entra al sistema y la que sale de esta para volver a pasar por los colectores solares. Por lo tanto, es necesario hacer la debida medición en los sensores en las tuberías para extraer la diferencia de temperatura que se genera en este sistema por colectores solares.

- \dot{Q}_{agua} : es la razón de transferencia de calor que se da en el agua.
- \dot{m} : flujo másico en [kg/s], en el documento dan el caudal igual a 41.9 [L/s]. Para una densidad de 1000 [kg/m³], $\dot{m}=41.9$ [kg/s].
- C_p : calor específico del agua = 4.186 [J/g°C]
- ΔT : diferencia de temperatura que entra y sale de la piscina.

Después de haber sustituido los valores de la ecuación 2.2, se realiza un balance de energía de la siguiente manera, utilizando la ecuación 2.3 de convección y la razón de transferencia de calor por radiación $\dot{q}_{incidente}$:

$$\dot{q}_{agua} = \dot{q}_{incidente} - \dot{q}_{conv} \quad (3.14)$$

la ecuación de convección depende del área del material que interactúa con el aire, en este caso los colectores, pero como se está utilizando esta transferencia en unidades de área (m^2), por lo que se puede eliminar el término, debido a que los términos eventualmente se cancelan.

$$\dot{q}_{agua} = \dot{q}_{incidente} - h(T_s - T_\infty) \quad (3.15)$$

como es mencionado, la convección sucede en el techo entre el material y el ambiente, entonces la T_s de la ecuación 3.15 se refiere a la temperatura del colector solar, término que se desea calcular. Por lo que se obtiene al realizar el despeje:

$$T_s = \frac{\dot{q}_{incidente} - \dot{q}_{agua}}{h} + T_\infty \quad (3.16)$$

Por lo tanto, con la ecuación 3.16 se puede calcular la temperatura en el colector solar por el que pasa el agua de la piscina. Para este cálculo es necesario conocer el coeficiente de transferencia de calor por convección que en [15] citan algunos valores típicos para este tipo de convección, y el valor utilizado es $5W/m^2K$.

Capítulo 4

Resultados y análisis del sistema de monitoreo

4.1 Acondicionamiento de señal

4.1.1 Detectores de temperatura resistivo (RTD)

La tabla 4.1 muestra el resultado de caracterizar el sensor, se tomaron 36 muestras desde una temperatura del sensor a partir de 25°C hasta 60°C, que demuestran la linealidad del sensor que también son respaldados por diferentes fuentes donde presentan los comportamientos de los PT1000, y que además, para alcanzar 1 [kΩ] se puede ver como sigue la tendencia en disminución de la temperatura hasta 0°C. Esta tendencia se puede comparar con tablas de resistencia para los PT1000 de otras fuentes como en la figura 3.5, que se puede leer la temperatura en la primera columna y se puede ubicar sus unidades con las demás columnas desplazándose hacia la derecha. Si se comparan los datos con los medidos en la tabla 4.1 se puede apreciar que son muy similares; por lo tanto, tienen una relación lineal entre sus parámetros, un aspecto esperado para este tipo de sensor.

Se puede corroborar los datos con la siguiente gráfica de la figura 4.1. La utilización del circuito integrado INA125P permite capturar de manera precisa los valores de resistencia del sensor por lo que la caracterización es similar a otros sensores de este tipo. También se realizó una medición de las tensiones de salida del circuito acondicionador con respecto a la resistencia para poder interpretar en el microcontrolador los valores de temperatura asociados a la resistencia medida, la tabla 4.2 muestra esa información medida y gráficamente en la figura 4.2.

Lo que se logra con esta segunda medición y la ecuación de la línea de tendencia es que se puede relacionar las ecuaciones de ambas gráficas al sacar la resistencia como el factor común en ambas mediciones y poder igualar las ecuaciones para despejar el término de la temperatura. Este cálculo se introduce en el código al microcontrolador para que interprete la entrada en el pin analógico como la temperatura medida por el sensor.

Tabla 4.1: Datos de resistencia con respecto a la temperatura del sensor PT1000 medidos a 24.2°C en el laboratorio.

Muestra	Temperatura (°C)	Resistencia (Ω)
1	25	1095
2	26	1096
3	27	1101
4	28	1105
5	29	1109
6	30	1113
7	31	1115
8	32	1118
9	33	1122
10	34	1127
11	35	1131
12	36	1137
13	37	1142
14	38	1147
15	39	1150
16	40	1154
17	41	1158
18	42	1162
19	43	1165
20	44	1170
21	45	1174
22	46	1179
23	47	1182
24	48	1185
25	49	1190
26	50	1196
27	51	1200
28	52	1205
29	53	1207
30	54	1211
31	55	1215
32	56	1218
33	57	1224
34	58	1227
35	59	1230
36	60	1235

Tabla 4.2: Datos de tensión con respecto a la resistencia del sensor PT1000

Muestra	Resistencia (Ω)	Tensión (V)
1	1095	1.092
2	1096	1.115
3	1101	1.112
4	1105	1.146
5	1109	1.176
6	1113	1.182
7	1115	1.197
8	1118	1.211
9	1122	1.222
10	1127	1.245
11	1131	1.268
12	1137	1.293
13	1142	1.317
14	1147	1.339
15	1150	1.350
16	1154	1.366
17	1158	1.382
18	1162	1.403
19	1165	1.417
20	1170	1.442
21	1174	1.454
22	1179	1.474
23	1182	1.483
24	1185	1.501
25	1190	1.523
26	1196	1.545
27	1200	1.560
28	1205	1.576
29	1207	1.583
30	1211	1.596
31	1215	1.615
32	1218	1.625
33	1224	1.647
34	1227	1.656
35	1230	1.671
36	1235	1.686

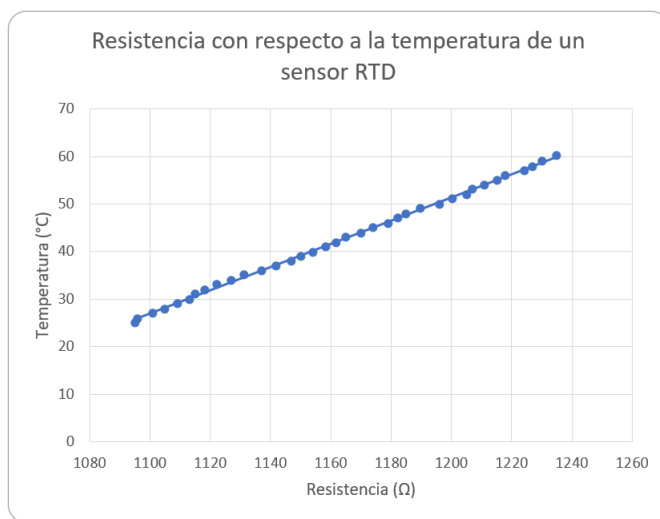


Figura 4.1: Comportamiento de la resistencia con respecto a la temperatura del sensor RTD.

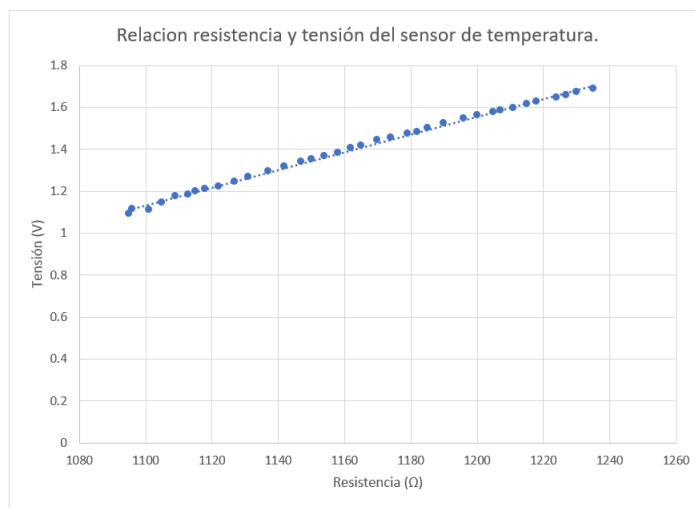


Figura 4.2: Comportamiento de la tensión con respecto a la resistencia del sensor RTD.

4.1.2 Sensor de Radiación

La caracterización del sensor de radiación se realiza utilizando un bombillo incandescente de 60W como fuente de luz y un Luxómetro para medir la iluminancia mientras se realiza un desplazamiento con el sensor expuesto a la luz. La tabla 4.3 muestra los datos que se midieron.

Como referencia se tiene que el sensor utilizado recibe una irradiancia de $1000[\text{W}/\text{m}^2]$ cuando la tensión de salida es de $80.3[\text{mV}]$ según la información del fabricante. Estos datos también se pueden observar con la gráfica en la figura 4.3, donde no hay un comportamiento totalmente lineal del sensor con respecto a la iluminancia de la fuente al menos no después de los $46[\text{mV}]$ aproximadamente viendo la gráfica. Estas mediciones se tomaron con una distancia de $90[\text{cm}]$ de la fuente de luz, medidos con cinta métrica con el fin de poder realizar una partición de las mediciones cada $3[\text{cm}]$ para un total de 30 mediciones, y 2 adicionales para obtener el valor de tensión que determina $1000[\text{W}/\text{m}^2]$. Para la iluminancia se toman las mismas distancias que para el sensor de radiación para mantener una equivalencia entre ambas mediciones.

Tabla 4.3: Datos medidos del sensor de radiación y valores de iluminancia con un luxómetro.

Muestra	Tensión (mV)	Iluminancia (lx)
1	0.3	83.20
2	0.3	87.00
3	0.3	90.70
4	0.3	93.20
5	0.3	99.60
6	0.3	105.30
7	0.4	115.10
8	0.4	123.10
9	0.4	132.00
10	0.5	141.60
11	0.5	151.60
12	0.5	164.80
13	0.6	179.00
14	0.6	200.00
15	0.7	228.00
16	0.8	251.00
17	0.9	278.00
18	1.0	313.00
19	1.1	357.00
20	1.3	410.00
21	1.4	473.00
22	1.7	566.00
23	2.0	664.00
24	2.5	826.00
25	3.0	1021.00
26	4.1	1312.00
27	5.6	1751.00
28	7.8	2490.00
29	12.1	3850.00
30	21.3	6760.00
31	46.6	14390.00
32	59.8	31000.00
33	86.1	42000.00



Figura 4.3: Irradiancia medida en tensión con respecto a iluminancia.

Para tener una mejor idea de cuanto es el valor máximo en un día soleado con el sensor, se realizó una medición en un intervalo de 2 horas de 10:35 am a las 12:35 md para verificar este aspecto que ayuda a conocer el nivel de irradiancia que se percibe en un día aproximadamente y así el calculo que debe hacerse en el microcontrolador para interpretar la salida del CAS de este sensor, estos datos se muestran en la figura 4.4.

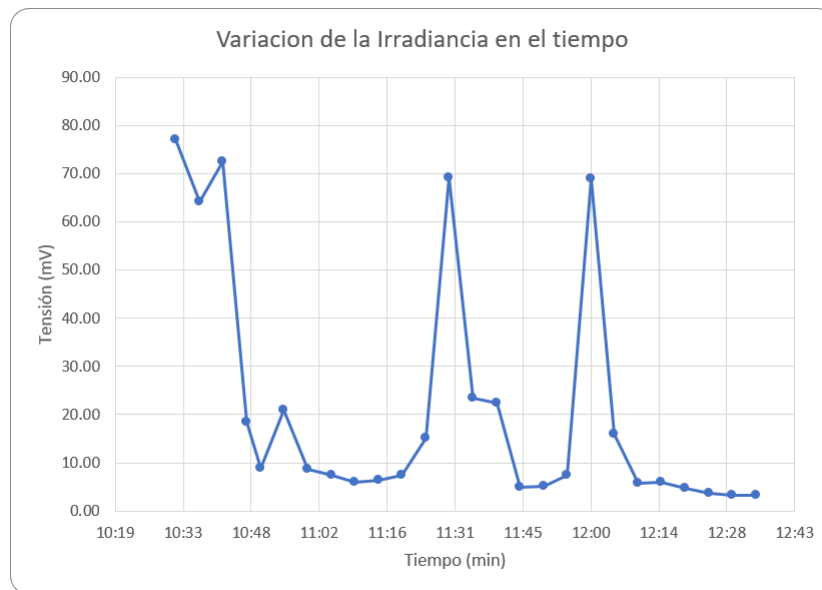


Figura 4.4: Irradiancia medida en tensión con respecto al tiempo.

Y como se observa en la figura 4.4 un día típico donde empezó soleado con intervalos nublados, se ve como varían estos datos cada 5 min que se tomaron las muestras, este tiempo se eligió porque el multímetro y el luxómetro tienen un lapso de encendido aproximado a este y para evitar cortes de medición de datos en la grabación que se realizó ese día, se decidió este intervalo entre muestras. El valor máximo medido fue de 77[mV] aproximadamente, por lo que se cubre que el valor máximo del

sensor es apenas alcanzable y por esto se puede tomar que hasta este valor el sensor se comporta de forma lineal. Dejando al luxómetro como un parámetro no apto para comparar con la irradiancia, y es que calcular o hacer la conversión de iluminancia a irradiancia se debe tomar solo una longitud de onda y trabajar la conversión a partir de ahí por lo que no es algo práctico para todo el espectro que se quiere convertir.

El CAS realizado para este sensor es una amplificación de la señal de modo que cuando el microcontrolador lea el dato, la diferencia entre cada valor medido sea mas significativa, y no en unidades de milivolts y evitar incurrir en errores de lectura de parte del ADC del microcontrolador.

4.1.3 Termistor

De los datos tabulados de forma simulada, en Multisim se tiene la siguiente tabla 4.4 que permite hacer un acercamiento a los valores esperados en la medición del sensor ubicado en las tuberías.

Con estos valores se saca la linea de tendencia para poder tener la ecuación con el comportamiento de esta salida del circuito acondicionador. La figura 4.5 se ve como con el CAS tiende a mantener valores constantes para las temperaturas altas en este caso para la piscinas es hasta $29^{\circ}C$ pero que a partir de $24^{\circ}C$ los niveles de tensión son mas significativos, esto quiere decir que el ADC del microcontrolador puede tener una mejor lectura de temperaturas menores a $24^{\circ}C$. Este dato resulta importante porque según el personal de mantenimiento de la piscina, el sistema llega hasta una temperatura de $24^{\circ}C$.

Según lo diseñado, este circuito acondicionador no esta llegando al valor mínimo de 1[V] que se deseaba sino a 300[mV] según la tabla 4.4, sin embargo, se ajustaron las resistencias del puente para que el valor máximo estuviera alrededor de 3[V], valor que es una resistencia equivalente a $15^{\circ}C$, ya que se quiere imitar los valores que están en la hoja de datos del sensor, y tomando en cuenta las temperaturas de diseño para la piscina de $25^{\circ}C$ a $28^{\circ}C$ siendo esta ultima temperatura como incomoda para el usuario, por lo que el CAS se mantiene dentro del rango.

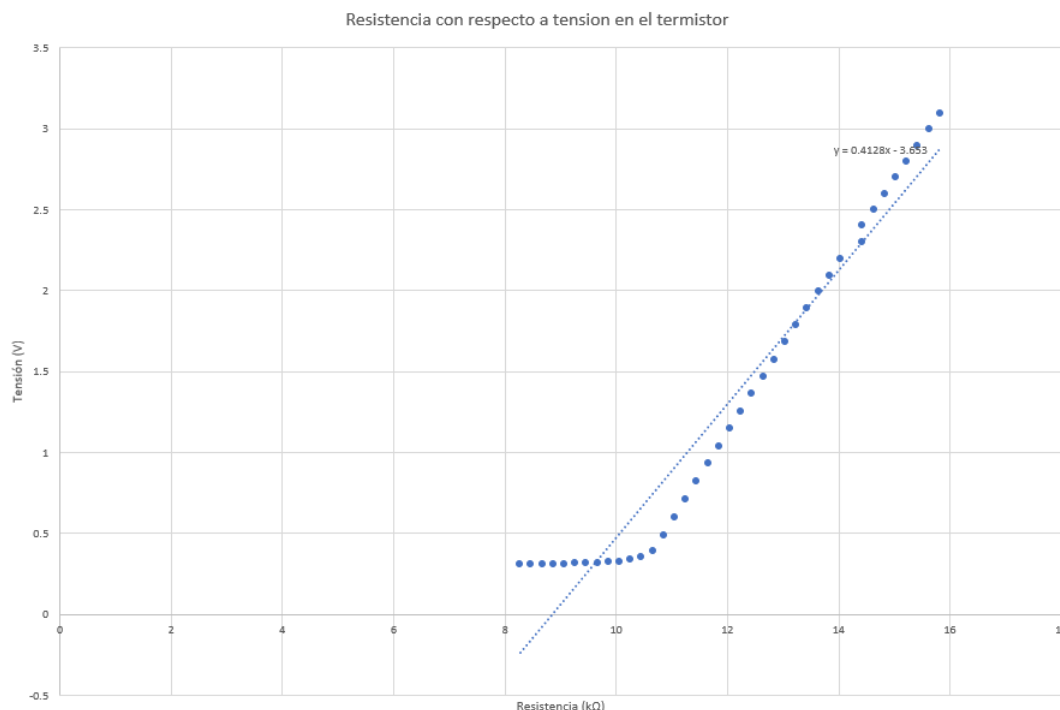


Figura 4.5: Resistencia del potenciómetro con respecto a tensión en el sensor.

Tabla 4.4: Resultados del acondicionador simulados para el termistor en las tuberías.

Porcentaje Pot. 82.719k Ω (%)	Tensión salida (V)	Resistencia (k Ω)	Temperatura °F	Temperatura °C
19.12	3.092000	15.816	58	14.444
18.88	2.995000	15.617	59	15.000
18.64	2.897000	15.419	60	15.556
18.40	2.799000	15.220	61	16.111
18.16	2.700000	15.022	61	16.111
17.92	2.600000	14.823	61	16.111
17.68	2.500000	14.625	62	16.667
17.44	2.400000	14.426	62	16.667
17.44	2.299000	14.426	62	16.667
16.96	2.197000	14.029	63	17.222
16.72	2.095000	13.831	64	17.778
16.48	1.992000	13.632	64	17.778
16.24	1.888000	13.434	65	18.333
16.00	1.784000	13.235	65	18.333
15.76	1.680000	13.037	66	18.889
15.52	1.574000	12.838	67	19.444
15.28	1.468000	12.639	67	19.444
15.04	1.362000	12.441	68	20.000
14.80	1.255000	12.242	69	20.556
14.56	1.147000	12.044	70	21.111
14.32	1.039000	11.845	71	21.667
14.08	0.929620	11.647	71	21.667
13.84	0.819978	11.448	72	22.222
13.60	0.709690	11.250	73	22.778
13.36	0.598755	11.051	73	22.778
13.12	0.487592	10.853	74	23.333
12.88	0.393725	10.654	75	23.889
12.64	0.353259	10.456	76	24.444
12.40	0.335621	10.257	76	24.444
12.16	0.325808	10.059	77	25.000
11.92	0.319841	9.860	78	25.556
11.68	0.316122	9.662	79	26.111
11.44	0.313802	9.463	80	26.667
11.20	0.312364	9.265	81	27.222
10.96	0.311479	9.066	82	27.778
10.72	0.310938	8.867	82	27.778
10.48	0.310609	8.669	83	28.333
10.24	0.310409	8.470	84	28.889
10.00	0.310289	8.272	85	29.444

Tabla 4.5: Resultados de medición manual en las tuberías y su respectiva temperatura.

Resistencia Entrada (k Ω)	Resistencia salida (k Ω)	Temp. Entrada $^{\circ}$ C	Temp. Salida $^{\circ}$ C	Hora (24h)
11.82	12.12	21.78	21.19	15:15
11.84	12.12	21.73	21.19	15:20
11.85	12.13	21.71	21.17	15:25
11.87	12.14	21.68	21.15	15:30
11.89	12.15	21.64	21.13	15:35
11.91	12.17	21.60	21.09	15:40
11.91	12.16	21.60	21.11	15:45
11.92	12.14	21.58	21.15	15:50
11.92	12.15	21.58	21.13	15:55
11.94	12.14	21.54	21.15	16:00
11.94	12.13	21.54	21.17	16:05
11.95	12.12	21.52	21.19	16:10
11.96	12.14	21.50	21.15	16:15

Tabla 4.6: Resultados de temperatura calculadas del CAS con el microcontrolador.

Temp. Entrada $^{\circ}$ F	Temp. Salida $^{\circ}$ F	Temp. Entrada $^{\circ}$ C	Temp. Salida $^{\circ}$ C	Hora (24h)
77.34	76.91	25.19	24.95	15:15
77.27	76.91	25.15	24.95	15:20
77.30	76.84	25.17	24.91	15:25
77.13	76.80	25.08	24.89	15:30
77.10	76.75	25.06	24.86	15:35
77.07	76.79	25.04	24.88	15:40
77.11	76.73	25.06	24.85	15:45
77.02	76.86	25.01	24.92	15:50
76.93	76.91	24.96	24.95	15:55
76.95	76.82	24.97	24.90	16:00
76.89	76.89	24.94	24.94	16:05
76.81	76.91	24.89	24.95	16:10
76.74	76.78	24.85	24.88	16:15

Debido a la aproximación que se hace en los valores máximos de temperatura definidos y que sea acorde a la tabla de tensiones del sensor, eso implica que no en todos los valores se mantenga la misma línea característica que se puede ver en la figura 4.5, la línea de tendencia por la cual se harán los cálculos mantiene un margen de error cuando el sensor mida temperaturas debajo de 12[k Ω] y por encima de 14[k Ω]. Si bien este último valor es difícil de alcanzar debido al sistema de calentamiento que no debe dejar que la piscina tenga una temperatura alrededor de los 15 $^{\circ}$ C, el problema son temperaturas entre 25 $^{\circ}$ C y 20 $^{\circ}$ C donde se empieza a aumentar el error por estar la línea de tendencia muy lejana al comportamiento deseado. La figura 4.6 permite tener la temperatura a partir de la resistencia que al igualar las ecuaciones de tendencia de la figura 4.5 y esta se puede obtener el valor de temperatura correspondiente a la tensión de salida del CAS.

La tabla 4.5 muestra los valores en resistencia medidos manualmente en el sensor y la tabla 4.6

los calculados en el microcontrolador y el CAS implementado. Se toman pocas muestras porque la ubicación para leer el sensor esta lejano al toma corriente para poder conectar la computadora donde se verán los resultados en el servidor, entonces se limita esto a 1 hora tiempo donde no es posible apreciar un cambio significativo de temperatura en la piscina. Por esta razón, resulta importante que se acondicione de una extensión eléctrica que permita mantener conectado el HUB a la red eléctrica debido al mayor consumo que tiene con respecto a los microcontroladores en los nodos.

Por otra parte se puede observar el error de cálculo que hace el microcontrolador al capturar la salida del CAS, un error inducido por las aproximaciones a partir de las simulaciones del sensor como potenciómetro y que en el diseño simulado no se logra llegar al valor mínimo designado para evitar este tipo de situaciones, además que la línea de tendencia de los datos simulados se aleja de estos.

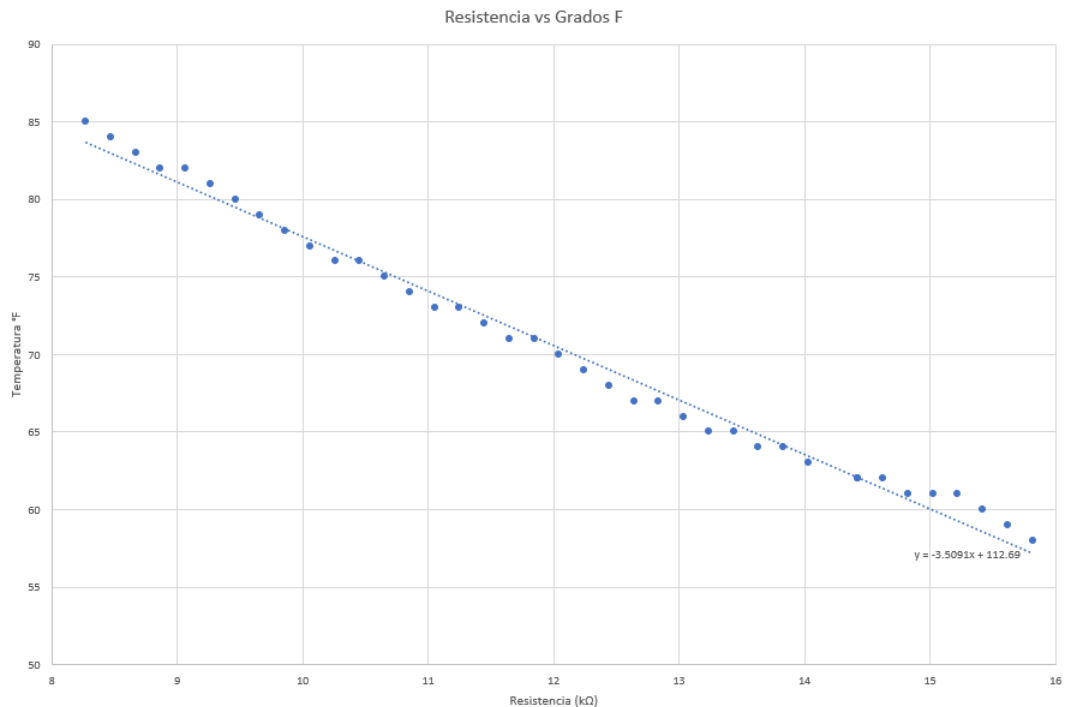


Figura 4.6: Resistencia del potenciómetro con respecto a temperatura en el sensor.

4.2 Sistema de comunicación

La implementación de los diagramas de flujo de la sección 3.6 para los nodos, permite una respuesta en ejecución del nodo como se espera, ya que se deja esperando señal para poder ser alcanzado por el HUB cuando el periodo para enviar las señales inicie.

Se probaron diferentes formas de implementar esto, por ejemplo para intentar hacer una comunicación tipo dialogo entre el nodo y HUB donde este manda señal para despertar a los nodos y se espera una respuesta de la activación de estos, nuevamente se envía una señal para que tomen datos y se deja al HUB en un ciclo esperando la respuesta de cada nodo individual. Similarmente del lado de los nodos se dejan con un ciclo esperando, ya que se espera que el HUB tome el orden de los nodos. El problema con esto es un código muy tedioso de leer por la cantidad de condiciones y los ciclos que deben mantener, además de la cantidad de variables booleanas que funcionan como banderas para salir de los ciclos. Una ventaja que se pudo visualizar en las pruebas parciales es

que se podía implementar la función de dormir al módulo RF en los nodos para que este entre en un modo de ahorro profundo, que según la hoja de datos mantiene una corriente de máximo $1\mu\text{A}$ y acorde a la biblioteca utilizada este puede ser despertado utilizando las funciones de recibir mensaje nuevo o enviar mensaje, pero en pruebas esto no ocurría, solo cuando se implementaba como ciclo.

Por esta razón se implementa a como están en los diagramas de flujo donde el nodo solo espera dos mensajes para realizar operaciones y estos mantienen haciendo esta comprobación en el ciclo de operación. El HUB igualmente mantiene una programación sin ciclos anidados ya que este es el que sincroniza los nodos que están atentos a recibir las señales. Además, que en la práctica el HUB manda el mensaje que tomen datos a los nodos y este debería recibir un mensaje como acuse de recibo pero por alguna razón en la lógica no estaba haciendo esta acción sino que el nodo directamente enviaba el dato en este punto, por lo que se aprovecho este aspecto y quedo de forma mas simple el código en cuanto a los pasos que realiza, pero siempre ejecuta para cada nodo un método.

Durante la programación del Linkit luego de hacer pruebas de comunicación con los nodos utilizando el Yunbridge, se quería también que con este método del puente entre el MCU y MPU se pudiera implementar la comunicación Wi-Fi para así evitar realizar otro código del lado del MPU para capturar estos datos. Pero sucede que la memoria Flash para la programación en el lado del MCU es de 32kB, que a diferencia de los Feather que tienen 256kB, se verificó que solo programarle el ejemplo de transmisión mencionado en la sección ?? le consume un 50% de la memoria, y en la prueba funcionando como HUB utiliza un 70% aproximadamente. Al utilizar las bibliotecas Bridge, Yun y ThingSpeak con la que se accede al servidor donde se envían los datos, llenan la memoria a un 97% hecho que afecta la funcionalidad del dispositivo porque cuando le programa este código no se logra ver funcionalidad alguna por medio del monitor serie del ambiente de programación.

Por esta razón, se utiliza el procesador y el puerto serie UART para la comunicación entre el MCU y MPU, entonces se implementa el código en Python para recibir los datos que recibe el MCU por el módulo RF y lo pasa por serie al MPU que hace la conexión hacia ThingSpeak para visualizar la información. Este servidor funciona solo para subir datos cada 16s. Utilizar el IDE de Arduino en los Feather es muy sencillo ya que es muy similar a la tarjeta Arduino y similares a excepción de los pines que en la documentación del microcontrolador ubica cuales son los que se deben utilizar para el módulo RF y como implementarle los ejemplos de la biblioteca que recomienda el fabricante la cual fue usada en este proyecto.

Un aspecto a mencionar de estos microcontroladores es que la guía menciona que se puede instalar la versión mas nueva de Arduino IDE para utilizarlos, sin embargo, esto en combinación con la versión del repositorio de la tarjeta de desarrollo tienen un conflicto que evita que estos puedan ser programados normalmente y empieza pedir archivos adicionales que no encuentra para compilar el programa.

Otro detalle es que al abrir una ventana de Arduino IDE para trabajar este habilita un proceso en Windows 10 que es el sistema operativo sobre el que se trabajó, cuando se ocupaba tener dos ventanas para revisar ir siguiendo la comunicación de nodo a HUB utilizando los Feather, entonces se debían conectar ambos en los puertos USB para poder programarlos y hacer pruebas parciales. Las dos ventanas se crean porque se le da desde File>Open y se abre uno de los proyectos que se han guardado las ventanas se crean sobre el mismo proceso, esto implica que cuando se selecciona la tarjeta hacia la que va dirigido y luego el puerto donde se conectaron cada uno de estos Feather aparecían problemas de que no se programaban o se perdía el puerto que se estaba usando porque no se cerraba correctamente cuando mientras se hacían los cambios de uno a otro para subirlos el

programa. Esto se vio solucionado utilizando un proceso aparte para las tarjetas y por ende los puertos, por lo que si se cambiaba un puerto en una ventana no afectaba la otra que estaba abierta y se podían ver ambos programas corriendo en diferentes puertos serie.

En el microcontrolador Linkit según la configuración se le debe poner una red conocida para poder acceder a este y poder ingresarle los archivos de programación de Python, la documentación pone los estados en los que se encuentra el Wi-Fi por medio del LED dedicado a este módulo. Hay un estado en el que el dispositivo entra y deja sin el LED encendido sin parpadear y según la documentación cuando no se puede acceder a este por red se puede usar un reset dejándolo 10s para volver a ponerlo en modo punto de acceso para configurarlo, pero cuando el LED estaba en un estado sin parpadeo, no se lograba restablecer la configuración y en la documentación muestran esto como un fallo en el inicio de Linux y que necesita una actualización del firmware actual para poder volver a utilizarlo. Esta acción toma unos 3 minutos y se debe tener un cable OTG para poder conectarlo al puerto USB HOST para cargárselo.

La comunicación entre los módulos RF se da de manera satisfactoria en pruebas parciales sin antenas, por lo que se deben mantener cerca para que puedan mantener comunicados, en pruebas de distancia se logro ver que a linea de vista soportan unos 5[m] a 6[m] pero que si se ve obstruida por alguna pared puede llegar a perderse la conexión. Al instalar las antenas que debían ser soldadas se logra hacer pruebas parciales con distancias de hasta 25m con paredes como obstáculos entre otros objetos entre dos módulos.

4.2.1 Resultados

Los resultados presentes se realizaron en uno del estacionamiento del Instituto Tecnológico de Costa Rica, que se ubica a lado del Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO), donde se aprovecho que no había muchos carros utilizando el estacionamiento. Esto deja que los módulos RF se vean en linea de vista para poder comunicarse. Por limitaciones en el acceso al techo de la piscina se realizan estas mediciones en este lugar, además, es el nodo 2 el cual se pone a una distancia de aproximadamente 40[m] del HUB para medir el indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI) que es observable en el monitor serie del IDE de Arduino. La figura 4.7 muestra la distancia entre los nodos que fue medida utilizando google maps, por lo que es una medida aproximada, además se utiliza una aplicación de rastreo por GPS de un smartphone para medir la distancia de lado a lado del parqueo, la cual rastreo una distancia de 45[m] la cual al compararse con la ubicación de la imagen que mide 56[m], sacando un promedio de esos datos resulta en 50[m] aproximadamente.

Con esta medición con linea de vista entre las antenas, que hay que mencionar que no son antenas unidireccionales sino omnidireccionales ya que la hoja de datos menciona que con antenas unidireccionales se obtienen 500[m] para establecer enlace. El RSSI medido por el modulo RF cuando se le pide el último RSSI leído en el mensaje recibido, da unos -92 [dB] lo cual es ya un limite en el enlace, aun así se mantenía la comunicación mientras se tomaron las muestras de radiación y temperatura la cual se tomo la del suelo del estacionamiento en día nublado. Sin embargo, al ubicar estos módulos RF hacerlo en menos de esa distancia para asegurar la comunicación y evitar cortes en ella, la figura 4.8 muestra los datos recolectados en ese lugar.

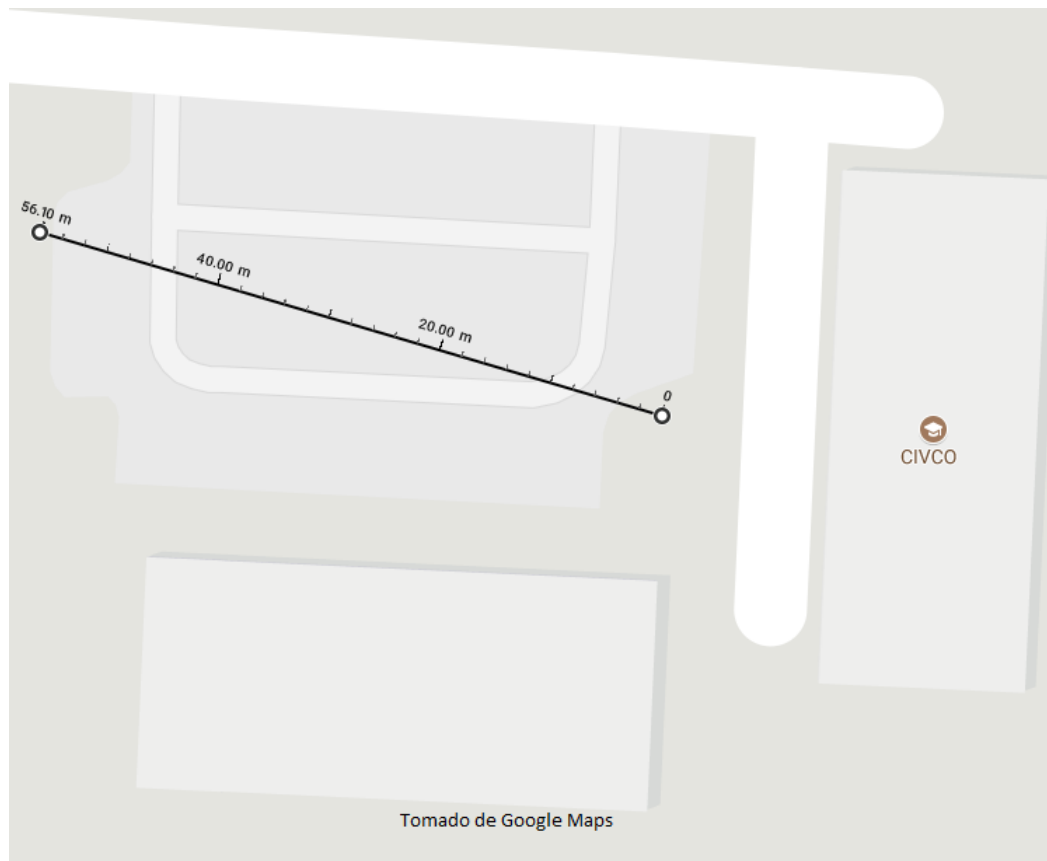


Figura 4.7: Estacionamiento contiguo al CIVCO en el TEC.

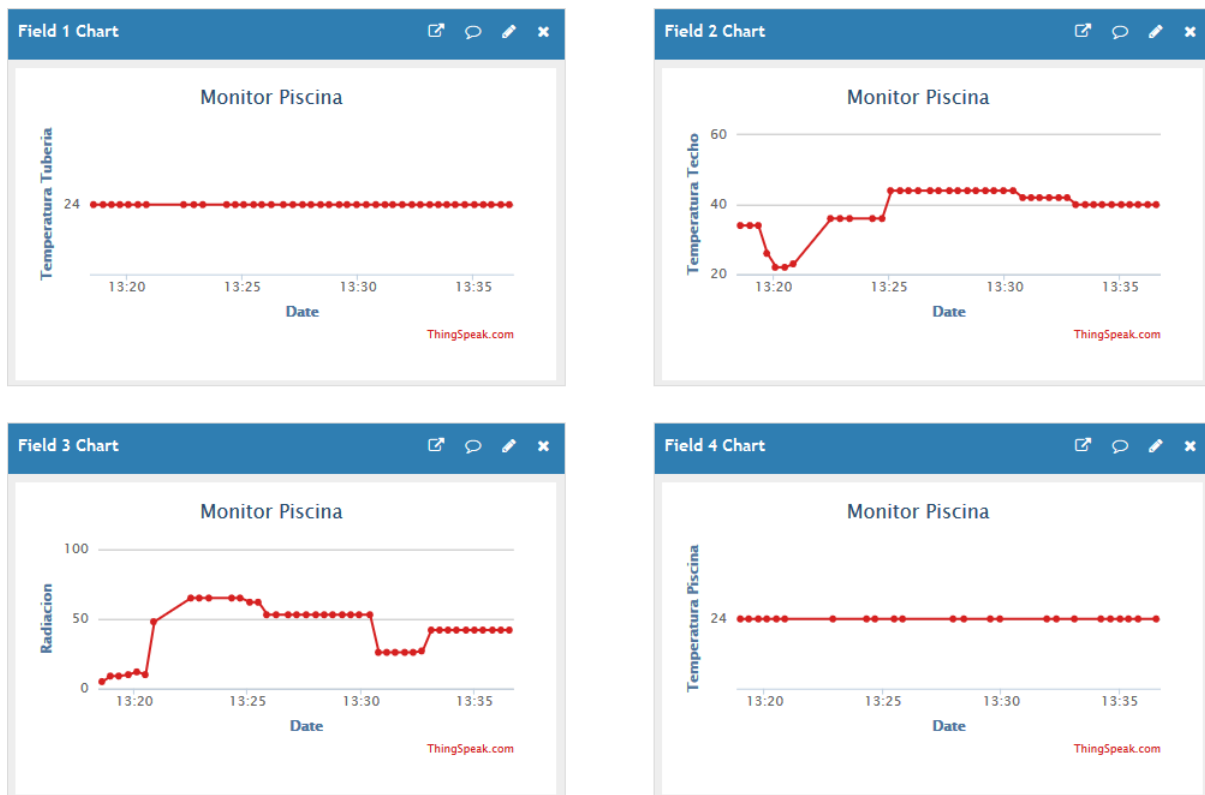


Figura 4.8: Datos enviados a la pagina de Thingspeak.

Es necesario mencionar que se simularon los datos de temperatura en tuberías, y del sensor que mide la temperatura en el ambiente debido a que se quiere medir la distancia máxima para que se establezca el enlace, y a linea de vista. Además que para el sensor de temperatura ambiente no se tiene el circuito impreso para poner el sensor que es especifico para usar de esta forma, debido a mantenimiento de la maquina utilizada para realizarlos en la institución.

Se realizó otra medición, en interiores del edificio del CIVCO, en la figura 4.9 se muestra la distancia desde aproximadamente estaba el HUB y el nodo 2 que se utilizo igual para el del estacionamiento. La distancia acá medida es de aproximadamente 40[m], donde la señal debe atravesar por varios muros además de muchos objetos. El RSSI reportado por el monitor serie fue de -90 [dB] lo cual a unos cuantos pasos ya pierde el enlace, por lo que queda mencionar que es mejor utilizar una distancia menor a esta para mejorar la señal.

Lo que se quiere con esto es determinar a cuanta distancia pueden estar los módulos al ser ubicados en la piscina, donde el techo del cuarto de maquinas tiene un poco mas de 10[m]-15[m] si se quiere poner los sensores en el centro del techo. Lo mismo para el sensor de temperatura ambiente en la piscina, y que según [1] la piscina tiene 25[m] de largo y 12.5[m] de ancho, por lo que ya atravesando el cuarto de maquinas se necesitan alcanzar por encima de los 15[m] si se coloca al otro lado de la piscina.



Figura 4.9: Interior edificio CIVCO en el TEC.

4.3 Modelo dinámico del sistema

Para probar este modelo, es necesario medir las temperaturas del agua que entra y sale de la piscina, esto hace una diferencia de temperatura necesaria para aplicar los cálculos en la ecuación 3.14 del capítulo 3.7. A partir del resultado en la ecuación 4.1 se sustituye en 4.2 y el valor medido de radiación del cual depende también este modelo, la T_{∞} es la temperatura ambiente que se toma como $25^{\circ}C$.

$$\dot{Q}_{agua} = (41.9)(4.186)(20.56 - 20) = 98.22[W] \quad (4.1)$$

$$T_s = \frac{80 - 98.22}{5} + 25 = 21.356^{\circ}C \quad (4.2)$$

Como se puede observar en 4.2 el valor es cercano a las mediciones de los sensores, además hay que notar que las mediciones fueron realizadas durante un día nublado y frío alrededor del medio día, por esta razón la radiación es baja y por ende la temperatura en la superficie del colector. Si se toma este ultimo dato y se compara con el dato medido del sensor en la entrada de agua en la piscina equivalente a $20.56^{\circ}C$, estaría resultando un error de:

$$error = \frac{21.356 - 20.56}{21.356} = 3.72\% \quad (4.3)$$

Cabe destacar que esto es un valor cambiante que depende de las temperaturas de la piscina, y la radiación que esta generando la temperatura en el techo. Dicho esto calcular con otra radiación para ese valor medido de temperaturas dará resultados no acorde al sistema. Por lo tanto,

Tabla 4.7: Resultados razón de transferencia de calor en la piscina.

$\Delta T(^{\circ}C)$	Radiación [W/m^2]	$Q[W]$	$T_{colector}$
0.59	102.50	103.48	24.80
0.54	98.75	94.71	25.81
0.54	96.25	94.71	25.31
0.53	95.00	92.96	25.41
0.51	92.50	89.45	25.61
0.51	88.75	89.45	24.86
0.49	86.25	85.94	25.06
0.43	85.00	75.42	26.92
0.45	82.50	78.93	25.71
0.39	73.75	68.40	26.07
0.37	70.00	64.90	26.02
0.33	67.50	57.88	26.92
0.35	63.75	61.39	25.47

Tabla 4.8: Error en la temperatura calculada para la superficie en el colector.

Temp. Entrada ($^{\circ}C$)	Temp. colector($^{\circ}C$)	Error (%)
21.78	24.80	13.87
21.73	25.81	18.73
21.71	25.31	16.58
21.68	25.41	17.20
21.64	25.61	18.35
21.60	24.86	15.09
21.60	25.06	16.00
21.58	26.92	24.74
21.58	25.71	19.14
21.54	26.07	21.03
21.54	26.02	20.80
21.52	26.92	25.09
21.50	25.47	18.46

es necesario la constante medición de la radiación y las temperaturas de las tuberías, además de la temperatura ambiente para poder realizar este modelo del sistema de calentamiento, y tener indicadores de como anda el sistema. Sin embargo, información del personal de la piscina indican que el sistema no esta funcionando a la temperatura que fue diseñada. Se puede observar las temperaturas a las que esta entrando el agua en la piscina, con respecto al techo, baja alrededor de $1^{\circ}C$ en el momento de entrar en la piscina.

El modelo supone un caudal constante, o flujo másico en las tuberías, además del valor de densidad dado en el informe sobre el diseño y selección de los colectores solares.

La tabla 4.7 utiliza los diferenciales de temperatura de la tabla 4.5 de las temperaturas resultantes medidas en las tuberías que permitirán realizar el calculo de temperatura en los colectores, basándose en los cálculos de las ecuaciones 4.1 y 4.2 ya aplicadas a una medición en día diferente.

Esto contrastando con la temperatura que entra en la piscina de la misma tabla 4.5, se puede obtener el error en la estimación de la temperatura en el colector, que se puede ver en la tabla 4.8, que muestra la eficacia del modelo que se utiliza para aproximar la temperatura en la superficie del colector. Este nivel de error es por la aproximación que se realiza por medio de la superficie de contacto con el agua y no directamente con esta, aunado a incertidumbre en la medición de la radiación y que se esta suponiendo que el material se calienta uniformemente. Otro aspecto a tomar es que para el calculo se supone un caudal constante en la tubería de $41.9[\text{L/s}]$ y que la densidad del agua es de $1000[\text{kg/m}^3]$ lo que deja al caudal másico en la misma magnitud que el caudal volumétrico dado. Por convección se sabe que para calentar el liquido entre mayor sea la velocidad de este, mayor sera la transferencia de calor con la superficie del colector.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- El circuito acondicionador diseñado para el sensor de temperatura en el techo, permite obtener resultados con un porcentaje de error de 0.2% para un sensor del mismo tipo, utilizando los valores de resistencia a 25°C.
- La información obtenida de los sensores presenta variaciones aleatorias en sus valores por su implementación en protoboard y el ruido que ocasiona el cableado en los terminales de los sensores.
- El algoritmo implementado para la comunicación entre el HUB y los nodos se realiza de manera sincronizada, con el HUB estableciendo el tiempo en el que los nodos realizan la toma de datos de los sensores.
- Se comprobó experimentalmente que al colocarle las antenas omnidireccionales a los módulos RF, el rango de señal aumenta sustancialmente hasta 25m dentro de un edificio a través de paredes, y un límite de hasta 50m con línea de vista entre los nodos.
- ThingSpeak permite visualizar y almacenar los datos procesados en el sistema de monitoreo.
- El modelo implementado para el cálculo de temperatura en los colectores es una estimación, para tener este dato como referencia del sistema de calentamiento.

5.2 Recomendaciones

- Con el fin de evitar la inclusión de ruido en las mediciones de los circuitos acondicionadores, es mejor implementar los circuitos impresos para mejorar la precisión para los que fue diseñado.
- Probar otra configuración para el CAS del termistor en las tuberías, para poder imitar mejor las temperaturas y tensiones dadas en la hoja de datos, o caracterizar directamente el sensor para tener la información del método de medición.
- Si se necesita mayor rango entre los módulos RF, utilizar antenas unidireccionales que según la hoja de datos pueden ser hasta 500m.
- Si se quiere agregar nodos, revisar el porcentaje de uso de la memoria Flash del HUB para no saturarla y así considerar utilizar procesador para capturar estos datos.
- Para aumentar autonomía de los nodos se puede revisar la biblioteca Radiohead para el módulo RF en uso e implementar una rutina para dormirlo y este logre despertar cuando hay un mensaje nuevo.
- Alimentar el HUB utilizando la red eléctrica, y no por batería ya que es el dispositivo que más consumo de corriente tiene por utilizar un procesador y el módulo Wi-Fi.
- El error en el cálculo del modelo teórico depende de factores como radiación, densidad y caudal del agua para aumentar la precisión, por lo que se puede aumentar precisión si se toman en cuenta.
- Para el sensor de temperatura/humedad calcular si hay mucha perdida por los 2 bits que no se toman en cuenta por la limitación de hardware del microcontrolador.

Bibliografía

- [1] J. C. Marín, “Selección de un sistema de calentamiento solar térmico para el agua de la piscina del campus central del instituto tecnológico de costa rica,” 2016.
- [2] Fronius, “Sensors for measuring additional values.” <https://www.fronius.com/en/photovoltaics/products/home/system-monitoring/hardware/sensors/module-temperature-sensor>, 2017.
- [3] L. S. Cryotronics, “Temperature/resistance table for platinum sensors.” <http://www.lakeshore.com/Documents/F038-00-00.pdf>, 2014.
- [4] S. H. USA, “Pt 1000 resistor table.” <http://www.solarhotusa.com/products/controls/files/Resistor-table-Pt1000.pdf>, 2007.
- [5] Fronius, “Sensors for measuring additional values.” <https://www.fronius.com/en/photovoltaics/products/home/system-monitoring/hardware/sensors/irradiation-sensor>, 2017.
- [6] Honeywell, “Honeywell humidicon digital humidity/temperature sensors.” <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-humidicon-hih7000-series-product-sheet-009074-6-en.pdf>, 2015.
- [7] Adafruit, “Feather m0 rfm69 packet radio.” <https://learn.adafruit.com/adafruit-feather-m0-radio-with-rfm69-packet-radio>, 2017.
- [8] M. A. R. Pozueta, “Puente wheatstone.” <http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Puente%20de%20Wheatstone.pdf>.
- [9] T. L. Floyd, “Dispositivos electronicos 8va edicion,” 2008.
- [10] S. Studio, “Linkit smart 7688 duo.” http://wiki.seeed.cc/LinkIt_Smart_7688_Duo/, 2017.
- [11] Adafruit, “Pinouts.” <https://learn.adafruit.com/adafruit-feather-m0-radio-with-rfm69-packet-pinouts>, 2017.
- [12] J. U. Venegas, “Tec convierte sus campus en laboratorios de sostenibilidad energética.” <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2016/04/04/tec-convierte-sus-campus-laboratorios-sostenibilidad-energetica>, 2016.
- [13] F. Olmedo, “¿qué es un colector solar o captador solar? tipos de colectores solares.” <http://www.biodisol.com/destacado/que-es-un-colector-solar-o-captador-solar-tipos-de-colectores-solares-energia-solar-ter> 2009.

- [14] J. M. Cabrera, “Captador solar plano.” <https://juanmacabrera.files.wordpress.com/2011/08/captador-solar-plano.pdf>, 2011.
- [15] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, “Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones,” 2011.
- [16] C. Mathas, “Conceptos básicos sobre sensores de temperatura.” <https://www.digikey.com.mx/es/articles/techzone/2011/oct/temperature-sensors-the-basics>, 2011.
- [17] J. B. Aragonés, C. G. Gómez, B. Z. Zaragozí, A. G. Martínez, D. M. Campos, and A. G. Llinares, “Sensores de temperatura.” http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/LSED/2003-04/0.Sens_Temp/ARCHIVOS/SensoresTemperatura.pdf/, 2003.
- [18] T. I. M. S.A, “Rtd pt100, pt1000 y pt500.” <http://teii.com.mx/RTDPt100.html>, 2010.
- [19] O. of Energy Efficiency Renewable Energy, “Crystalline silicon photovoltaics research.” <https://www.energy.gov/eere/sunshot/crystalline-silicon-photovoltaics-research>.
- [20] M. Ángel Navarro Martínez, “Metodología y análisis comparativo de equipos solares prefabricados indirectos por termosifón..” <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4830/fichero/Definiciones.pdf>, 2010.
- [21] J. A. E. Pajares, “Simulador de temperatura de un sensor rtd pt100 mediante microconvertidor aduc812 e interfaz de usuario labview.” <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1770pub.pdf>, 2011.
- [22] meteoblue, “Humedad.” <https://content.meteoblue.com/es/ayuda/variables-meteorologicas/humedad>.
- [23] OMEGA, “Thermistor.” <http://www.omega.com/prodinfo/thermistor.html>.
- [24] G. Controls, “G1-235 solar pool controller.” <http://www.hayward-pool.com/assets/documents/pools/pdf/manuals/AquaSolarGL-235.pdf>, 2008.
- [25] Adafruit, “Biblioteca radiohead.” <https://github.com/adafruit/RadioHead>, 2017.
- [26] LowpowerLab, “Biblioteca lowpowerlab.” <https://github.com/LowPowerLab/RFM69/>, 2017.
- [27] A. Libc, “Biblioteca avr.” http://www.nongnu.org/avr-libc/user-manual/group__avr__watchdog.html, 2017.

Apéndice A

Sensor Tuberías

A.1 Datos sensor en tuberías

Tabla A.1: Datos de temperatura, resistencia y tensión para el sensor GL-235.[12]

Grados(°C)	Resistencia (Ω)	Tensión (V)
0.00	32648	3.83
0.55	31737	3.80
1.11	30853	3.78
1.66	29998	3.75
2.22	29169	3.72
2.77	28365	3.70
3.33	27587	3.67
3.88	26832	3.64
4.44	26100	3.61
5.00	25391	3.59
5.56	24704	3.56
6.11	24037	3.53
6.67	23391	3.50
7.22	22764	3.47
7.77	22156	3.45
8.33	21566	3.42
8.88	20993	3.39
9.44	20438	3.36
10.00	19900	3.33
10.56	19377	3.30
11.11	18870	3.27
11.66	18377	3.24
12.22	17899	3.21
12.78	17435	3.18
13.33	16985	3.15
13.89	16548	3.12
14.44	16123	3.09
15.00	15711	3.06

Tabla A.1: Datos de temperatura, resistencia y tensión para el sensor GL-235.[12]

Grados(°C)	Resistencia (Ω)	Tensión (V)
15.56	15310	3.02
16.11	14921	2.99
16.67	14543	2.96
17.22	14176	2.93
17.78	13820	2.90
18.33	13473	2.87
18.89	13136	2.84
19.44	12809	2.81
20.00	12491	2.78
20.56	12182	2.75
21.11	11882	2.72
21.67	11589	2.68
22.22	11305	2.65
22.78	11029	2.62
23.33	10761	2.59
23.89	10500	2.56
24.44	10246	2.53
25.00	9999	2.50
25.56	9758	2.47
26.11	9525	2.44
26.67	9297	2.41
27.22	9076	2.38
27.78	8861	2.35
28.33	8651	2.32
28.89	8447	2.29
29.44	8249	2.26
30.00	8056	2.23
30.56	7867	2.20
31.11	7684	2.17
31.67	7506	2.14
32.22	7333	2.12
32.78	7164	2.09
33.33	6999	2.06
33.89	6839	2.03
34.44	6683	2.00
35.00	6530	1.98
35.56	6382	1.95
36.11	6238	1.92
36.67	6097	1.89
37.22	5960	1.87
37.78	5827	1.84
38.33	5697	1.81

Tabla A.1: Datos de temperatura, resistencia y tensión para el sensor GL-235.[12]

Grados(°C)	Resistencia (Ω)	Tensión (V)
38.89	5570	1.79
39.44	5446	1.76
40.00	5326	1.74
40.56	5208	1.71
41.11	5094	1.69
41.67	4982	1.66
42.22	4873	1.64
42.78	4767	1.61
43.33	4664	1.59
43.89	4563	1.57
44.44	4464	1.54
45.00	4368	1.52
45.56	4274	1.50
46.11	4183	1.47
46.67	4094	1.45
47.22	4007	1.43
47.78	3922	1.41
48.33	3839	1.39
48.89	3758	1.37
49.44	3679	1.34
50.00	3602	1.32
50.56	3527	1.30
51.11	3454	1.28
51.67	3382	1.26
52.22	3312	1.24
52.78	3244	1.22
53.33	3177	1.21
53.89	3112	1.19
54.44	3049	1.17
55.00	2987	1.15
55.56	2926	1.13
56.11	2867	1.11
56.67	2809	1.10
57.22	2752	1.08
57.78	2697	1.06
58.33	2643	1.05
58.89	2591	1.03
59.44	2539	1.01
60.00	2489	1.00

Apéndice B

Diagrama de pines

B.1 Linkit Smart 7688 Duo

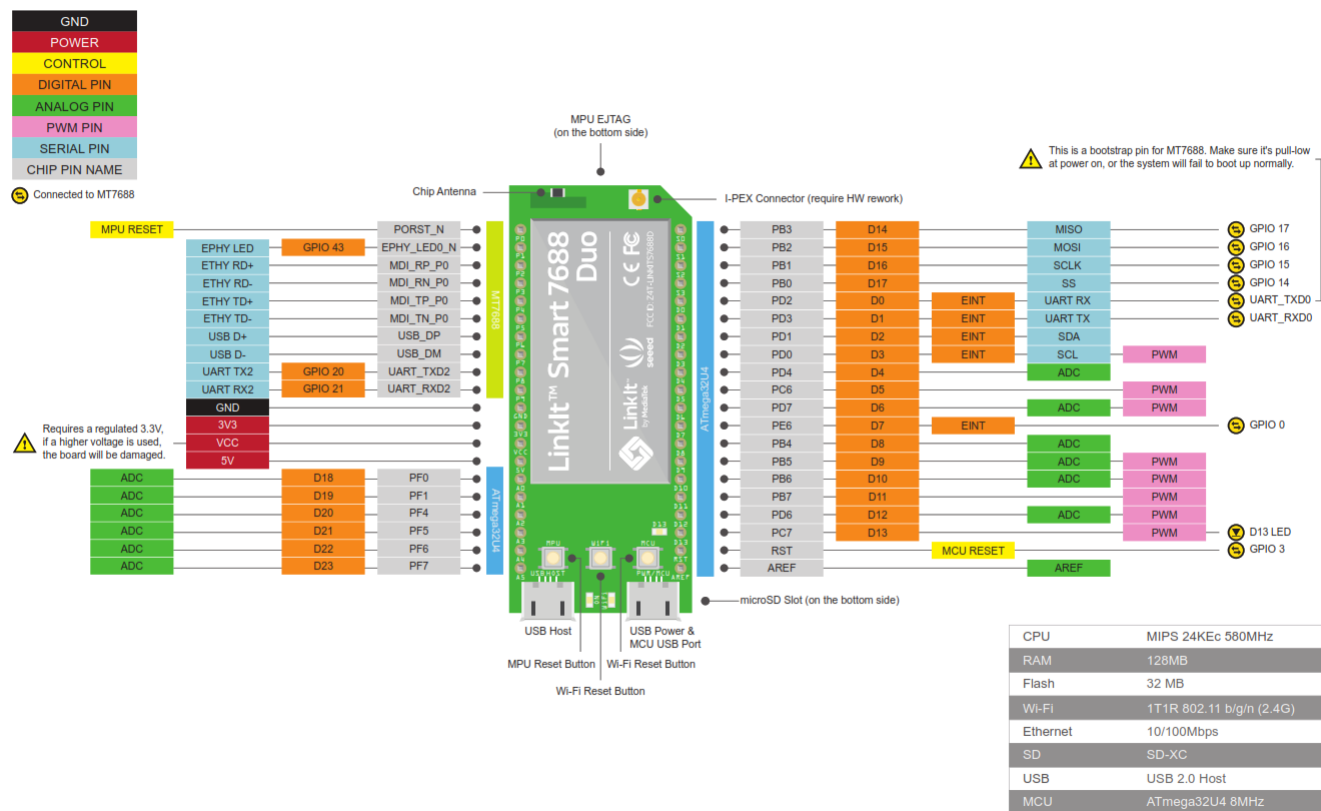


Figura B.1: Diagrama de pines Linkit Smart 7688 Duo. [10]

B.2 Feather M0 Radio with RFM69 radio packet

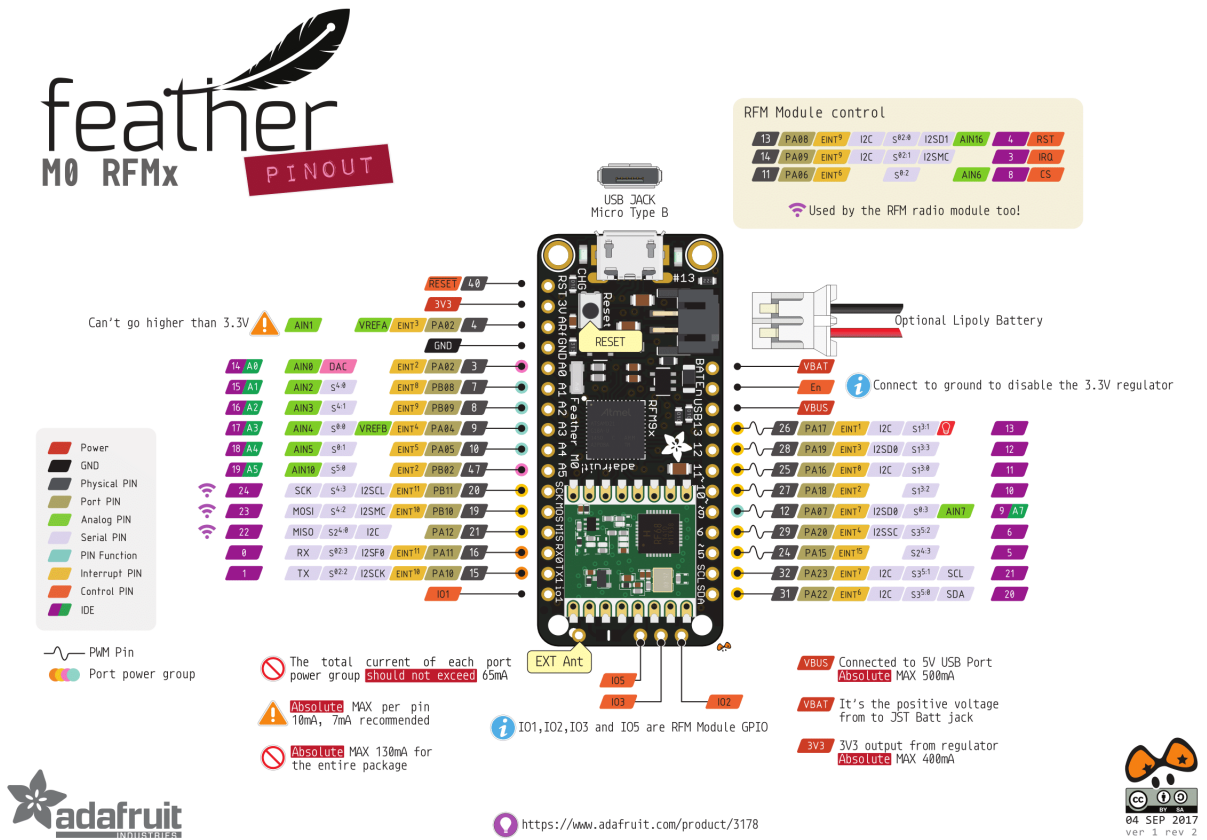


Figura B.2: Diagrama de pines Feather M0 Radio with RFM69 radio packet.[11]

B.3 Sensor HIH7120-021-001CT-ND

HIH7000 Series $\pm 3.0\%$ RH Accuracy | $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ Temperature Accuracy

Figure 5. SIP 4 Pin Typical Application Circuit

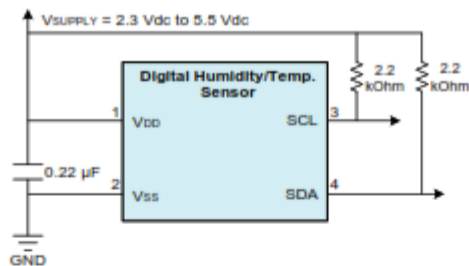
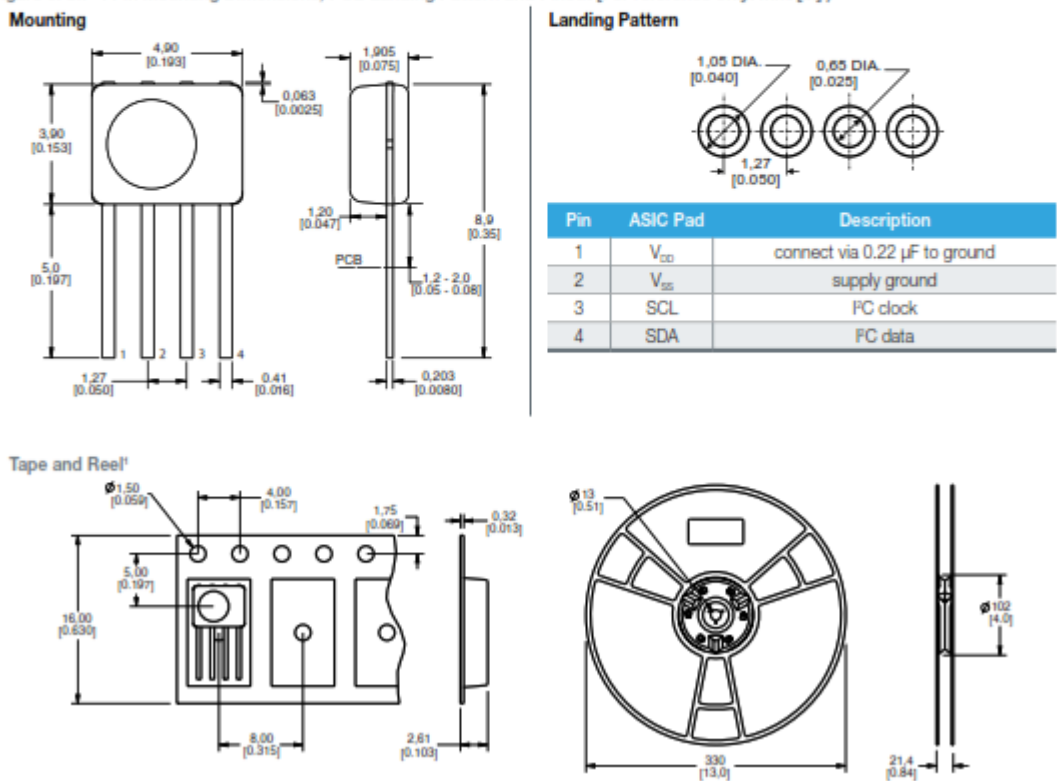


Figure 6. SIP 4 Pin Mounting Dimensions, PCB Landing Pattern and Pinout [For reference only: mm/[in].]



¹For orders of 250 to 1000 units

Figura B.3: Sensor de temperatura y humedad relativa. [6]