



Escuela de Ciencias de la Ingeniería
Ingeniería Civil Eléctrica

Diseño y construcción de prototipo electrónico para el monitoreo remoto de colmenas

Rubén Nicolás Quijón Aguilar
Profesor guía: Daniel Casagrande

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico

Rancagua, Chile
Febrero 2022

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, principalmente a mis padres y hermanos, quienes estuvieron apoyándome y guiándome durante toda mi vida.

Adicionalmente, quisiera agradecer a todos los profesores que han sido parte en mi formación profesional en especial a mi profesor guía Daniel Casagrande, quien me guió durante este proceso y siempre estuvo allí para cualquier consulta o inconveniente que tuviese.

También me gustaría agradecer a mis compañeros que me apoyaron durante mi formación y este proceso.

Finalmente me gustaría agradecer a la Fabrica Digital O'Higgins, por facilitar los materiales y herramientas que hicieron posible este proyecto.

Índice

AGRADECIMIENTOS	1
ÍNDICE.....	2
RESUMEN.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS.....	7
2.1 OBJETIVO GENERAL	7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
2.3 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	7
3. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LITERATURA	8
3.1. COLMENA DE ABEJAS.	8
3.2. MÉTODOS ACTUALES DE REVISIÓN	9
3.3. COMPARACIÓN DE COLMENAS DIGITALES EN EL MERCADO.....	10
3.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS ABEJAS	12
3.4.1. <i>Ciclo de vida</i>	12
3.4.2. <i>Producción de miel</i>	13
3.4.3. <i>Eventos dentro de una colmena</i>	13
4. MARCO METODOLÓGICO	16
5. DETERMINACIÓN DE VARIABLES	18
5.1. TEMPERATURA.....	18
5.2. HUMEDAD	18
5.3. NÚMERO DE ABEJAS.....	19
5.4. COMPORTAMIENTO DE LAS ABEJAS	19
6. SISTEMAS DE MEDICIÓN	21

6.1.	TEMPERATURA	21
6.2.	HUMEDAD	21
6.3.	PESO	22
6.4.	SONIDO	22
6.5.	VIBRACIÓN	23
7.	SISTEMAS DE CONTROL Y DE COMUNICACIÓN DE LA COLMENA.....	24
7.1.	SISTEMAS DE CONTROL.....	24
7.2.	SISTEMA DE COMUNICACIÓN	24
8.	DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE UNA COLMENA DIGITAL IDEAL.....	27
8.1.	TEMPERATURA Y HUMEDAD.....	27
8.2.	PESO	27
8.3.	SONIDO	28
8.4.	TRAFICO DE RECOLECTORES	28
8.5.	SISTEMA DE CONTROL	29
8.6.	SISTEMA DE CONEXIÓN	30
9.	PROTOTIPO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE UNA COLMENA DIGITAL	32
10.	ESTUDIO DE AUTONOMÍA DEL SISTEMA	36
10.1.	MEDICIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA CONSUMIDA DEL SISTEMA	36
10.2.	PROPUESTA DE SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	44
11.	CONCLUSIÓN.....	49
	REFERENCIAS.....	52
	ANEXOS.....	55

Resumen

La disminución de la población de abejas a nivel mundial afecta a los apicultores, quienes para evitar pérdidas económicas buscan formas de cuidar el bienestar de las abejas. Con el objetivo de ayudar al apicultor a cuidar a las abejas, surgen colmenas equipadas con diferentes sensores y la capacidad de registrar o enviar datos a una nube. Estas colmenas reciben el nombre de “colmenas digitales” y permiten el monitoreo a distancia de una colonia de abejas. Además, pueden enviar notificaciones al apicultor cuando se detecta algún peligro o alguna condición fuera de lo común dentro de la misma.

Se realizó un diseño del sistema electrónico de una colmena digital ideal a partir de la selección de variables que son posibles de monitorear de una colmena y se propuso un sistema de medición, control y comunicación. Este diseño permite obtener datos sobre las condiciones ambientales dentro de la colmena, además, de proporcionar información sobre el crecimiento de la colmena y de algún cambio anormal del comportamiento de las abejas dentro de la colmena.

El prototipo del sistema electrónico de una colmena digital desarrollado mediante un sistema de control que utiliza una placa de desarrollo Arduino, recolecta información de temperatura y humedad, graba muestras de sonido y estima el tráfico de recolectores. Además de grabar los datos localmente en un data Logger cuenta con la capacidad de enviar los datos registrados a través de una conexión inalámbrica utilizando el protocolo LoRa a otro dispositivo que se encarga de recibir y registrar los datos en una hoja de cálculo.

Se evaluó técnicamente el poder desarrollar un dispositivo de bajo consumo y que sea autosustentable, para poder lograr la utilización en ubicaciones geográficas rurales. Para esto se realizaron mediciones del consumo eléctrico al prototipo del sistema electrónico de una colmena digital cuya potencia consumida es igual a 0,109 W, además, en un día de trabajo con funcionamiento constante consume 2,6 Wh. Por otro lado, se observó que el uso del modo de hibernación de Arduino reduce la potencia consumida de un circuito en un 22%.

Palabras clave: colmena digital, monitoreo de colmena, beehive monitoring.

1. Introducción

Las abejas son los insectos polinizadores por excelencia y tienen una función esencial para el equilibrio de la naturaleza, ya que contribuyen activamente a la supervivencia de muchas especies de plantas que se reproducen gracias al transporte de polen que realizan al alimentarse del néctar de las flores. Las abejas son una especie muy importante para la alimentación del ser humano, debido a que el 70% de los alimentos consumidos dependen de la polinización. Además de una buena polinización mejora las producciones agrícolas, ayudando a garantizar la seguridad alimentaria en el mundo [1]. En el año 2013 en Chile el cultivo de arándanos, paltas y almendras dependen en un 100%, el cultivo de cerezas y kiwi dependen en un 90%, y las ciruelas dependen en 70% de la polinización de las abejas [2].

La miel es un producto dulce procesado por la abeja melífera (*Apis mellifera*) y es conocida por sus componentes nutritivos que benefician el bienestar humano. Además, es reconocida por sus múltiples usos en la medicina y como alimento funcional para proporcionar energía. La producción comercial de miel se realiza en muchos países del mundo, generando que el valor de la apicultura dentro de la economía aumente. En el año 2007 existían un total de 454.483 colmenas a lo largo de Chile, teniendo una producción de miel aproximada de 12.000 toneladas [3]. En el año 2015 la exportación Chilena de miel corresponde al 0,45% del mundo. Además, el valor de exportación de la miel llegó a USD 27,5 millones [3].

Por último, además de la miel, existe una gran variedad de productos obtenidos de las colmenas. La apicultura estudia cómo, con dichos productos, prolongar y mantener la salud de las personas [4].

Actualmente las abejas presentan una disminución de su población tan grande que en muchos países se les considera en peligro de extinción [5]. Esta disminución se atribuye a varios factores, uno de ellos es la contaminación del aire, que impide que las abejas puedan oler las flores a grandes distancias. Otro factor es el cambio climático, cuando cambia la temperatura, de forma fuera de lo normal, los procesos que realizan las plantas o flores se modifican, esto puede dificultar la polinización. Un tercer factor es la urbanización a nivel

mundial, que produce una disminución de áreas verdes, por lo que a las abejas se les dificulta conseguir alimento. Por último, el uso de pesticidas para fumigar cultivos, ya que produce un envenenamiento de la fuente de alimento de las abejas [6].

De la necesidad de cuidar el bienestar de las abejas surgen colmenas equipadas con diferentes sensores y capacidad de almacenar o enviar información a una base de datos. Las llamaremos “colmenas digitales” y permiten monitorear a distancia la colmena de una forma no invasiva, reduciendo el número de las visitas del apicultor a las colmenas, evitando el estrés de las abejas producido al momento de revisarlas. Además, es posible enviar notificaciones al apicultor cuando se detecta algún peligro o alguna condición fuera de lo común.

El monitoreo de las colmenas digitales se realiza mediante un sistema equipado con una serie de sensores que, en general, posibilitan un seguimiento de las condiciones ambientales tales como temperatura y humedad interior de la colmena y las condiciones meteorológicas del exterior de una colmena. En algunos casos, también se registran el peso y el sonido dentro de la colmena. Esta información registrada es enviada mediante una conexión inalámbrica a la nube y mediante una aplicación o software se envían notificaciones al apicultor cuando se detecta un peligro en la colmena.

Algunas colmenas digitales actuales implementan la tecnología de Internet de las cosas (IOT), que consiste en tener una interconexión de los dispositivos a través de una red, donde todos ellos podrán ser visibles e interactuar sin necesidad de la intervención humana [7]. En el caso de una colmena digital, las interconexiones de dispositivos permiten monitorear varias colmenas a la vez y acceder a los registros realizados por los diferentes sensores instalados en todas las colmenas supervisadas.

Otros aspectos relevantes de las colmenas digitales es su autonomía, que depende de la fuente de alimentación y del consumo de los componentes que utiliza, en especial el consumo del sistema de control y el sistema de envío de datos. Las colmenas digitales que existentes en el mercado están optimizadas para un bajo consumo, como por ejemplo la colmena digital Beep Base cuya su autonomía es de 1 año [8].

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Diseñar y construir un prototipo electrónico de colmena digital que permita registrar variables que influyen en el comportamiento de la colmena y monitorear su estado a distancia.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar una investigación sobre las colmenas digitales existentes.
- Determinar los parámetros medibles de una colmena.
- Identificar sistemas de medición de los parámetros medibles.
- Identificar sistemas de control y comunicación de una colmena digital.
- Diseño del sistema electrónico de una colmena digital ideal.
- Crear e implementar un prototipo del sistema electrónico de una colmena digital.
- Realizar estudio de autonomía del prototipo electrónico de colmena digital.

2.3 Alcances y Limitaciones

- El proyecto identifica los parámetros medibles de una colmena y de los sistemas electrónicos que permiten la medición.
- El prototipo del sistema electrónico no incluye una base de datos, ni un software, que tome decisiones y que notifique al apicultor, sobre alguna perturbación en la colmena.
- El prototipo del sistema electrónico solo se ha implementado en un ambiente de laboratorio.
- El prototipo del sistema electrónico no ha sido implementado en una colmena real.

3. Marco teórico y revisión de literatura

3.1. Colmena de abejas.

Una colmena es el habitáculo de las abejas, por lo tanto, el enjambre o colonia vive en ella. La colmena está construida por panales que están compuestos de celdillas con forma hexagonal. Las celdillas tienen dos funciones: son espacios que funcionan como sectores de cría y como despensa [9]. En general, el sector de despensa rodea al sector de cría. El tipo de colmena más utilizado por los apicultores es la colmena Langstroth, es una colmena de tipo movilista, es decir contiene marcos móviles [10]. La Figura 3.1 muestra distintas partes que componen una colmena Langstroth; dichas partes son:

- Base: también llamada puente o piso, es en donde descansa el cuerpo de la colmena. Debe ser resistente ya que debe soportar todo el peso de la colmena.
- Piquera: es la entrada y salida de las abejas en la colmena, está ubicada entre la base y la caja superior. Este espacio se puede cerrar con la guarda piquera, para proteger la colmena del frío, del pillaje y de los enemigos de las abejas.
- Cámara de cría: es la primera caja y va encima de la base. En ella se mantiene la cría y la reina.
- Excluidor de reina: es un tamiz con agujeros ubicado entre la cámara de cría y el alza. Tiene como finalidad evitar el paso de la reina hacia el alza, para que no ponga huevos, permitiendo solo el paso de las obreras.
- Alzas: también llamado cámaras de miel, es en donde las abejas almacenan la miel.
- Entre tapa: es una cubierta que va colocada encima de la última alza y sirve para mantener una cámara de aire aislante y como elemento separador para el manejo.
- Tapa: es el techo de la colmena y evita la entrada de agua, aire y otros animales.
- Marcos: también llamados cuadros, es un objeto móvil e independiente. Se construye con tablas rectangulares como marco, pero con cada lado con dimensiones diferentes. Posee alambre permitiendo a las abejas fijar la cera, facilitando la creación de los panales, siendo este lugar donde están las crías y almacenan la miel.

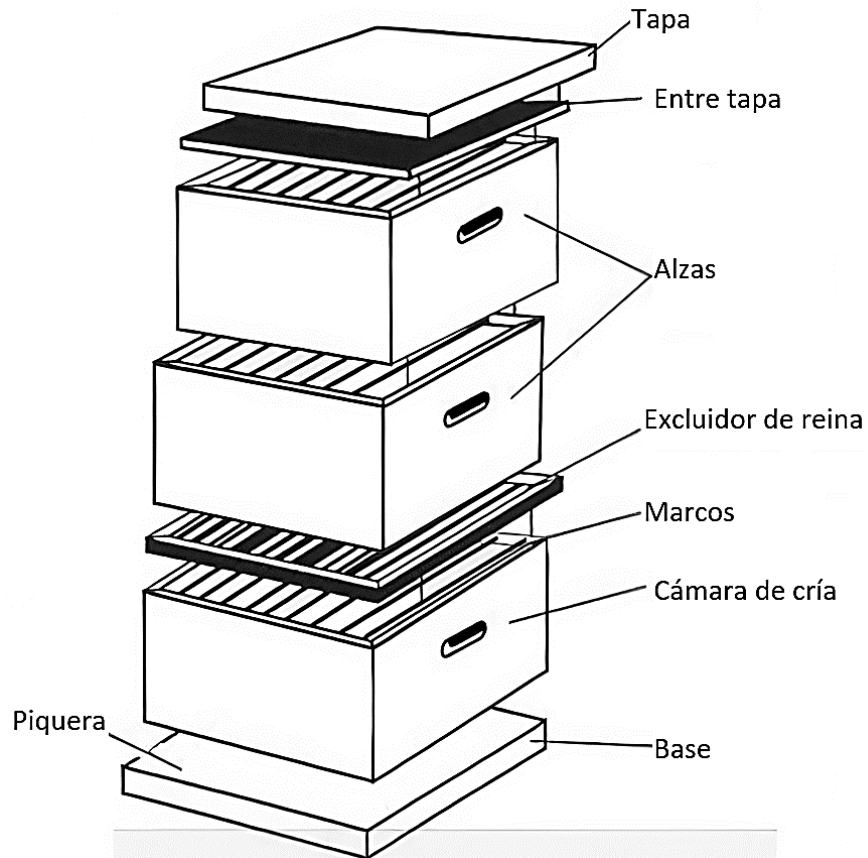


Figura 3.1: Partes de una colmena Langstroth [10].

3.2. Métodos actuales de revisión

Según el Servicio Agrícola y Ganadero [11], la revisión de una colmena la realiza un apicultor de manera presencial y se divide en dos partes:

La primera parte es una revisión externa, la que consiste en revisar diferentes aspectos de la colmena:

1. Observar el comportamiento de las abejas alrededor de las piqueras y la colmena.
2. Analizar el sonido y olor de la colmena.
3. Comprobar si hay abejas muertas y revisarlas.
4. En algunos casos, comparar el peso actual con el de la revisión anterior de la colmena.

La segunda parte es una revisión interna de la colmena, que consiste en destapar la colmena y revisar cada panel. Esta acción supone un estrés para las abejas, por lo que el

apicultor debe hacerlo en situaciones en que las abejas muestran menos agresividad, como lo son los días con un buen clima y en horas centrales debido a que no están las pecoreadoras en la colmena. Además, se evita abrir la colmena en los meses fríos, pues se destruyen las juntas de propóleo que las abejas utilizan para temperar la colmena. Durante la evaluación de los panales se debe observar lo siguiente: el estado de la reina, los huevos y las larvas; el estado óptimo de cera, reservas de miel y polen; existencia del espacio necesario para almacenamiento o puesta de huevos de la reina; puesta de huevos compacta y homogénea; y por último que no haya presencia de celdilla de recambio o de enjambrazón.

3.3. Comparación de colmenas digitales en el mercado

La Tabla 1 muestra la comparación de cuatro sistemas de colmenas digitales presentes en el mercado. Se comparan los parámetros medidos, la frecuencia de registro de los datos, la autonomía, el tipo de conexión que posee, el almacenamiento interno de los datos registrados y el tipo de alimentación que utilizan. Además, para la columna almacenamiento interno la sigla NA significa que no posee o no se encontró información sobre la existencia de algún tipo de almacenamiento de respaldo. Un punto para destacar es que todas las colmenas utilizan la tecnología de internet de las cosas (IOT), en donde se puede monitorear cada colmena digital que el usuario posee, además de poder acceder a datos públicos de otras colmenas que utilizan la misma aplicación.

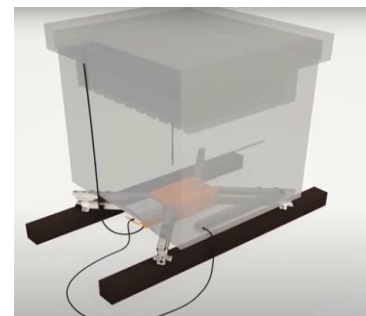
Tabla 1: Tabla de comparación de colmenas digitales presentes en el mercado.

Nombre	Parámetros Medidos	Frecuencia de registro	Autonomía	Conexión	Almacenamiento interno	Alimentación
BeeBot	Temperatura, Humedad, Sonido	15 min	6 meses	Wifi	NA	Batería recargable
Beep Base	Peso, Temperatura, Humedad y Sonido	15 min	1 año	LoRa	64MB	2 pilas AA
BroodMinder	Temperatura, Humedad, Peso	1 hora	2 años	Bluetooth	NA	3 pilas AA
BuzzBox	Temperatura, Humedad, Sonido y Clima	15 min	2,5 días	Wifi	NA	Batería con panel solar

La Figura 3.2 muestra una imagen de cada colmena digital comerciales mostradas en la Tabla 1. La Figura 3.2 (a) muestra a la Colmena digital BeeBot, la cual se adosa en una sección dentro de un marco destinado de la cámara de cría. La Figura 3.2 (b) muestra a la Colmena digital Beep Base, la cual hace de base de la colmena, lo que permite monitorear el peso de la colmena, además, de contar con sensores de sonido y temperatura en el interior de la colmena. La Figura 3.2 (c) muestra a la Colmena digital BuzzBox, la cual se ubica entre dos marcos dentro la cámara de cría. La Figura 3.2 (d) muestra a la Colmena digital BroodMinder, la cual consta de una barra de acero ubicada en la base de la colmena, con el fin de monitorear el peso de la colmena, además, posee sensores de temperatura y humedad ubicados en el interior de la colmena.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.2: Colmenas Digitales Comerciales. (a) Colmena digital BeeBot [12], (b) Colmena digital Beep Base [13], (c) Colmena digital BuzzBox [14], (d) Colmena digital BroodMinder [15].

3.4. Caracterización de las abejas

Es importante caracterizar el ciclo de vida de las abejas y colmenas para identificar parámetros normales y los distintos eventos que pueden suceder en una colmena. Esta información es útil para determinar qué variables monitorear y cuáles son los rangos de valores normales para dichas variables.

3.4.1. *Ciclo de vida*

El desarrollo de la abeja consiste en cuatro etapas: huevo, larva, pupa y adulto. Existen 3 castas: la reina, el zángano y la obrera; y cada una tiene un tiempo de desarrollo diferente en cada etapa y se crían de diferente manera. El periodo de desarrollo de la reina es de 16 días, el de los zánganos es 24 días y el de las obreras es de 21 días [11]. El promedio de vida de la reina es de tres o cuatro años, los zánganos mueren en el apareamiento o son expulsados de la colmena antes del invierno y las obreras viven de 1 a 6 meses [9]. Cada casta cumple un rol definido en la colmena:

- La reina es capaz de controlar a la colmena a través de feromonas. Estas sustancias ayudan en el aprendizaje de las obreras, las mantiene juntas (incluso en los enjambres), suprimen el desarrollo de sus ovarios y la cría de nuevas reinas y atrae a los zánganos en temporada de apareamiento [16]. Además, la reina es la encargada de colocar los huevos dentro de la colmena para el surgimiento de nuevas abejas [11].
- Las abejas de la casta zángano son más grandes que las de la casta obrera, pero más pequeñas que la reina. Las únicas funciones de los zánganos de la colmena son aparearse con la reina y ayudar a la mantención de la temperatura de la colmena [9].
- Las abejas de la casta obrera tienen diferentes funciones que desempeñan según su edad, estas funciones están especificadas en la Tabla 2.

La reproducción de las abejas se realiza mediante el vuelo nupcial, que consiste en un vuelo de la abeja reina acompañada por una corte de zánganos. La reina se aparea con 6 a 9 de ellos, en cada vuelo nupcial, para acumular esperma en su órgano llamado espermateca. Esto le permite la fecundación de los huevos que colocará en la colmena, poniendo alrededor de 2.000

huevos diarios [9]. La reina vive alrededor de 3 años y sus actividades reproductivas inician a partir de los 7 a 10 días de haber nacido. La reproducción se realiza durante la primavera y verano.

Tabla 2: Tabla división de trabajo de las obreras [11].

Edad (en días)	Funciones de las abejas de la casta obrera
De 1 a 10	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa de nodriza (alimentación de larvas) • Limpieza de celdillas y regulación de temperatura de la cría (35 a 36°C) • Desarrollo de las glándulas hipofaríngeas y salivales.
De 10 a 20	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de glándulas cereras para la construcción de panales. • Reparto y recepción de alimento néctar y polen. • Limpieza de la colmena, regulación de temperatura colmena y vigilancia de la colonia.
Más de 20	<ul style="list-style-type: none"> • Función de pecoreadoras para recolectar polen y agua, además producen miel, mielato y propóleo

3.4.2. Producción de miel

La producción de la miel inicia con la recolección del néctar. El néctar es un líquido azucarado secretado por las plantas para atraer a los polinizadores. Durante la extracción del néctar, la abeja succiona el néctar que luego regurgita en las celdillas de almacenamiento. En ellas iniciará el proceso de deshidratación, lo que reducirá el contenido de agua de un 80% a un aproximado de un 20%, siendo este el contenido de agua de la miel. Para realizar este proceso, las abejas crean corrientes de aire caliente con lo que evaporan un 75% del agua dentro del néctar [9]. Una vez terminada la deshidratación, las abejas sellan la celdilla con cera para evitar la entrada de la humedad y poder conservar la miel.

3.4.3. Eventos dentro de una colmena

Existen diversos eventos que pueden suceder en la colmena, algunos de los cuales son los siguientes:

- Enjambración: también llamado enjambre es un fenómeno natural que se da dentro de las colmenas de abejas, que permite a una colonia de abejas reproducirse. Este

fenómeno consiste en la división o abandono de la colmena que realizan las abejas, permitiendo la creación de una nueva colmena en otro lugar. La enjambrazón ocurre normalmente en los meses que comprenden las estaciones de primavera y verano. La preparación de este fenómeno puede durar aproximadamente un mes. Alrededor de 10 días antes de abandonar la colmena, las abejas comienzan a ingerir miel y se puede observar un patrón de vuelo anormal de estas. El fenómeno de enjambre tiene un gran interés económico para los apicultores ya que representa una pérdida de la cantidad de abejas en la colonia y de miel producida [17].

Actualmente se han detectado tres factores que están relacionados con la enjambrazón [17]. Uno es el aumento de la población de abejas adultas y de crías en relación con el espacio dentro de la colmena; en otras palabras, la sobrepoblación dentro de la colmena. Una forma de identificar este fenómeno es el aumento de temperatura dentro de la colmena debido al aumento de la población, en [18] describieron que la temperatura aumenta entre 1,5° y 3,4° C. Otro factor es la cantidad y distribución de feromonas de las reinas disponibles. Por último, la condición de la colmena, este factor hace referencia a condiciones sanitarias deficientes que pueden conducir a que las abejas decidan enjambrazar [17].

- **Pillaje:** es un fenómeno que se da cuando la cantidad de néctar recolectado es baja; y consiste en robar el néctar y polen de otra colmena. Generalmente sucede cuando una colonia fuerte se encuentra con una colonia débil que no es capaz de evitar el robo del néctar [19].

- **Enfermedades y plagas:** Un peligro al que las abejas están expuestas afectando el bienestar de la colmena y a la calidad y producción de miel. Existen diversos factores que afectan a la salud de una colmena y a la producción de miel. Un factor es la pérdida de abejas adultas debido a la mala alimentación; usualmente debido a falta de miel. Otro factor que afecta la producción neta de miel es un mayor gasto de miel en la mantención de la colmena en invierno, ya que se reduce la producción y aumenta el consumo. Por último, la falta de producción de jalea real también afecta la salud de la colmena y la producción de miel, ya que no se producen crías saludables. Las enfermedades y plagas que afectan

comúnmente a las abejas se muestran en la Tabla 3, en donde se clasifican según la etapa de desarrollo en la que afectan: larva, abeja adulta o abeja adulta y larva. La detección de estas enfermedades se realiza mediante la inspección de la colmena o pruebas de laboratorio [9].

Tabla 3: Plagas y enfermedades de las abejas [9].

En abejas adultas	En larvas	En larvas y abejas adultas
Nosemosis	Loque europea	Varroasis
El piojo de la abeja	Loque americana	
Acariosis Traqueal	Ascospaerosis o cría de tiza	
	Cría ensaca	

4. Marco metodológico

La revisión bibliográfica se enfocó en encontrar artículos científicos de investigaciones en donde se utilizó una colmena digital, además, de estudios realizados a las colmenas de abejas y en manuales de apicultura. Permitiendo identificar los parámetros medibles que permiten detectar problemas en el interior de una colmena.

A cada parámetro medible se le realizó una investigación de los sistemas electrónicos que permiten medirlos y del método de medición que se han utilizados en colmenas digitales existentes. Además, se caracterizó los componentes electrónicos que permiten la medición de los parámetros.

Se llevó a cabo una investigación sobre los sistemas de control que pueden ser implementado en una colmena digital, donde se enfocó en placas de desarrollo de bajo consumo y compatibilidad con sensores analógicos.

Se realizó una investigación de un sistema de comunicación entre la colmena y un receptor, específicamente en sistemas de comunicación inalámbrica. Además, se investigó un sistema que permita realizar un respaldo de los datos obtenidos de una colmena digital.

El diseño del sistema electrónico de una colmena ideal se realizó al seleccionar los parámetros medibles más importantes de una colmena. Luego, se escogieron los sistemas de medición, control y comunicación que debe tener el sistema electrónico de una colmena ideal.

Para la creación del prototipo de sistema electrónico de una colmena electrónica, se comenzó con la implementación de una placa de desarrollo Arduino con diferentes componentes electrónicos. Luego se estableció una comunicación inalámbrica entre dos placas de desarrollo. Después se configuró el registro de datos en un Data Logger. Seguidamente se configuró el modo de hibernación de Arduino.

El estudio de autonomía del prototipo del sistema electrónico de una colmena digital comenzó con la medición de consumo eléctrico a cinco circuitos conformado por un Arduino conectado a distintos componentes electrónicos. La medición se enfocó en obtener el valor de la corriente que circula por el circuito y el voltaje del Arduino, con el fin de conocer la potencia

consumida por el circuito. Por último, los datos de consumo obtenidos se utilizaron para realizar la propuesta de sistema de alimentación de la colmena.

5. Determinación de variables

Para el monitoreo de la colmena se identificaron cuatro parámetros que ayudan a identificar problemas en su interior: la temperatura, la humedad, el número de abejas y el comportamiento de las abejas.

5.1. Temperatura

La temperatura es un parámetro fundamental para el monitoreo de la colmena, ya que las abejas controlan la temperatura dentro de la colmena. Entonces, si hay cambios de la temperatura interna debido a factores externos, las abejas se concentrarán en regular la temperatura más que en producir miel. Además, la temperatura también es relevante para la producción misma de miel, debido a que se produce mediante la deshidratación del néctar depositado por la abeja. Este proceso se logra mediante el aumento de temperatura y la ventilación que producen las abejas [20].

Otra información que es posible obtener con esta medición, es que un cambio anormal de la temperatura podría indicar algún peligro dentro de la colmena o que sucedió un cambio en la población de abejas. Puede que exista una baja población, indicando presencia de enfermedad o plaga, o que exista una sobrepoblación en la colmena, indicando la posibilidad de que ocurra una enjambrazón [9], [17], [20].

La temperatura dentro de una colmena según [21], tiene un mínimo de 8.7 °C presente en invierno y un máximo de 32 °C presente en verano. Es importante tener en cuenta que una temperatura extrema puede provocar colapsos en la colmena debido al derretimiento y problemas en la reproducción de abejas debido a la pérdida de fertilidad de los espermatozoides de la espermateca de la reina [20].

5.2. Humedad

La humedad influye en la producción de miel, específicamente en la deshidratación del néctar, debido a que se requiere reducir el nivel de un 70% del agua del néctar. Esto se produce gracias a aire caliente producido por las abejas; por lo tanto, un nivel alto de humedad se traduce en un aumento de la energía necesaria para producir miel [9]. Otro punto de influencia

es la proliferación de hongos en la colmena o presencia de babosas que provocan enfermedades [20]. Por último, si el polen recolectado por las abejas es afectado por la humedad, puede desarrollar moho y ser desechado por las abejas. En [22] descubrieron que el rango de humedad absoluta entre seis colmenas es de 4 a 24 g/m³ y la humedad relativa tiene un rango de 25 a 70%.

5.3. Número de abejas

Conocer y registrar el número de abejas de una colmena permite identificar fenómenos como la enjambrazón y detectar cuando la colmena está siendo afectada por una enfermedad o plaga. Existen diversos métodos que ayudan a estimar la cantidad de abejas dentro de una colmena, los cuales se mencionan a continuación:

- **Peso:** El peso es un parámetro que permite obtener información sobre el crecimiento de la colmena mediante los cambios de peso promedio de la colmena, además permite tener noción de la demanda de alimento diaria y detectar una posible enjambrazón [23].
- **Registro de dióxido de carbono (CO₂):** este método permite identificar fluctuaciones de la población mediante la variación de CO₂ dentro de la colmena, entregando información de cuando las abejas salen a polinizar y de cuando la población de abejas disminuye, alertando sobre posibles enfermedades o plagas [20].
- **Tráfico de recolectores:** este método consiste en registrar cada abeja que entra y sale de la colmena mediante la instalación de sensores (infrarrojos, optoelectrónicos, fotoeléctricos y otros) en la entrada de la colmena.

5.4. Comportamiento de las abejas

- **Sonido:** la medición del sonido permite detectar cambios anormales dentro de las colmenas mediante patrones de sonidos, los cuales se obtienen al aplicar la transformada discreta de Fourier a la señal de audio registrada [24]. Además, puede predecir el fenómeno de enjambrazón, mediante el aumento de picos de energía en las frecuencias específicas. Durante la enjambrazón se registraron picos de 400–600 Hz [17].
- **Vibración:** es un parámetro que mide las vibraciones que producen las abejas dentro de la colmena. El procesamiento de la señal muestreada es similar al sonido, al aplicar la

transformada discreta de Fourier a la señal muestreada se puede identificar patrones que permitirán detectar anomalías en la colmena [23], [25].

- Meteorología: las condiciones meteorológicas ayudan a complementar la información obtenida de otras variables. Esto permite realizar un análisis adicional, ya que el comportamiento de las abejas cambia según la estación y el clima externo de la colmena [20].

6. Sistemas de medición

Los parámetros que permiten el monitoreo de una colmena tienen un sistema de medición que utilizan componentes electrónicos. Los componentes electrónicos deben contar con una protección contra el propóleo, sustancia que las abejas utilizan para cubrir todos los cuerpos externos que entran en la colmena.

6.1. Temperatura

Los sistemas de medición de temperatura utilizan sensores de bajo consumo y que tengan un rango de operación de 10° a 60° C. Según lo descrito en [18] es posible utilizar solo un sensor de temperatura para detectar la enjambrazón, ubicado en la parte superior de la colmena, como se muestra en el Anexo 7. Además, el sensor se puede colocar en la parte superior de un marco intermedio en la caja de la cría; y lo ideal es ir cambiando la posición del sensor según cambie el lugar de las crías [23]. Los sensores más utilizados son mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4: Sensores de temperatura más utilizados.

Sensor de Temperatura	Alimentación (V)	Rango de funcionamiento (°C)	Precisión (°C)	Comentarios adicionales
LM35	4 a 30	-55° a 150°	±0,5	
DS18B20	3 a 5,5	-55° a 125°	±0,5	Puede funcionar con líquidos o gases
HOBO H08-007-02	Batería: CR-2032, con 1 año de autonomía	-20° a 70°	±0,7	Sensor de temperatura y humedad
SHT15	2,4 a 5,5	-40° a 120°	±0,3	Sensor de temperatura y humedad
DHT11	3 a 5,5	0° a 50°	±2	Sensor de temperatura y humedad

6.2. Humedad

Los sistemas de medición de la humedad son similares al caso de la temperatura. En general la ubicación de los sensores es cerca de los almacenes de néctar y cerca del panal de

cría de la colmena, además se puede ubicar otro sensor en el exterior de la colmena para conocer su humedad externa [22], [23]. Los sensores más utilizados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Sensores de humedad más utilizados.

Sensor de Humedad	Alimentación (V)	Rango de funcionamiento (%)	Precisión (%)	Comentarios adicionales
HOBO H08-007-02	Batería: CR-2032, con 1 año de autonomía	0 a 95	±5	Sensor de temperatura y humedad
SHT15	2,4 a 5,5	0 a 100	±2	Sensor de temperatura y humedad
808H5V5	5	0 a 100	±4	
DHT11	3 a 5,5	20-90	±5	Sensor de temperatura y humedad

6.3. Peso

El sistema de medición de peso consiste en una báscula de precisión, esta debe tener un rango de funcionamiento de 0 a 125 Kg. En [26] utilizaron un el sistema de monitoreo llamado WBee, que consiste en una báscula ubicada debajo de la colmena, compuesta de un marco metálico de 500 mm × 400 mm con una celda de carga de 150 kg. La celda de carga está conectada a una pantalla BR80 de Baxtran y envía la información al microcontrolador.

6.4. Sonido

El sonido dentro de la colmena se mide mediante micrófonos, los que pueden ser colocados en la parte superior del marco del panal. Además, si la calidad de la señal no es buena, se debe conectar un circuito amplificador como por ejemplo un control automático de ganancia (AGC) y un convertidor análogo digital. Los micrófonos más utilizados figuran en la Tabla 6.

Tabla 6: Micrófonos más utilizados.

Micrófono	Alimentación (V)	Sensibilidad (dB)	Presión sonora máxima (dB)	Comentarios adicionales
ECM-60P	1,5 a 10	-64	120	
ECM-3005	1,5 V mediante una batería AA	-64	120	Incluye cable de 4m con plug de 3,5 mm
Max4466	2,4 - 5	-44	120	

6.5. Vibración

La vibración se mide mediante acelerómetros instalados dentro de la colmena, estos pueden ser colocados en la pared de la colmena o en un panel interno [25]. Los acelerómetros más utilizados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Acelerómetros más utilizados.

Acelerómetro	Alimentación (V)	Rango de funcionamiento (g)	Precisión	Rango de frecuencia (Hz)	Comentarios adicionales
7259B	23 a 30	50-500	10 mV/g	5 a 10.000	
ADXL335	1,8 a 3,6	3-10k	270 mV/g	0,5 1.000	
LIS3DH	1,71 a 3,6	2-3k	1 a 192 mg/digit	1 a 5.300	Posee 4 escalas

7. Sistemas de control y de comunicación de la colmena

7.1. Sistemas de Control

El sistema de control consiste en un microcontrolador que pueda recibir la información de los sensores, que tenga un bajo consumo y que pueda conectarse a un módulo de conexión inalámbrica. En la Tabla 8, se muestran las características de cinco microcontroladores, de bajo consumo y con modo de hibernación incorporado.

Tabla 8: Comparación de microcontroladores utilizados en colmenas digitales.

Microcontrolador	Arduino Due	Arduino Uno	Stellaris	Waspote	ESP32	Arduino mega
Procesador	AT91SAM3X8E	ATmega328P	ARM Cortex M4F-based	ATmega1281	XTensilica LX6	ATmega2560
Velocidad reloj (Hz)	84 M	16 M	80 M	32 k	32 k	16 M
Memoria RAM (KB)	96	2	32	8	512	8
Entradas analógicas	12	6	24	7	16	16
Puertos series (UART)	4	1	12	2	3	4
Voltaje de funcionamiento (V)	3,3	3,3	3	3,3-4,2	2,3-3,6	7 a 12
Consumo (mA)	800	50	100	17	500	50
Conexión inalámbrica	Con módulo externo	Con módulo externo o modelo equivalente	Con módulo externo	Conexión a red inalámbricas mediante módulo de Libelium	Conectividad Wifi y Bluetooth integrada	Con módulo externo
Consumo en modo de hibernación	2.6 μ A	2 μ A	1.6 μ A	7 μ A	5 μ A	7 μ A
Comentario Adicional	Posee modo de hibernación profunda	Posee modo de hibernación profunda	Unidad de punto flotante; utiliza batería de litio de 3 V.	Posee una batería con un panel solar de carga,		Posee modo de hibernación profunda

7.2. Sistema de comunicación

El sistema de almacenamiento y envío de datos consiste en un sistema que permite almacenar localmente los datos obtenidos por los sensores y enviarlos a la nube. El sistema puede funcionar mediante un Data Logger o programando un microcontrolador para que guarde los datos en forma de respaldo en una memoria SD.

Un Data Logger o en español registrador de datos, es un dispositivo electrónico que registra datos en el tiempo por medio de instrumentos y sensores propios o conectados externamente. Algunos registradores de datos se comunican con un ordenador personal y utilizan software específico para activar el registrador de datos, ver y analizar los datos recogidos, mientras que otros tienen un dispositivo de interfaz local (teclado, pantalla LCD) y pueden ser utilizados como dispositivos independientes [27]. Se elige un registrador de datos en lugar de un sistema de adquisición de datos cuando la aplicación no requiere grabación de alta velocidad, pero sí requiere tiempos de grabación prolongados [28].

El sistema de envío de datos es un sistema que permite el envío de datos de forma inalámbrica desde la colmena hasta la nube. En la actualidad existe una gran variedad de protocolos que permiten esta conexión, los más utilizados son:

- WiFi: Es un sistema de conexión inalámbrica que utiliza una señal radiofrecuencia para conectar los equipos compatibles a internet o entre sí [29]. Una red WiFi dispone de uno o varios puntos de acceso, que captan la señal de los dispositivos y la canalizan a la red fija, o a la inversa. Pueden agregarse más puntos de acceso para generar redes de cobertura más amplia, conectar antenas WiFi más grandes que amplifiquen la señal o usar repetidores WiFi inalámbricos para extender la cobertura de una red que tiene la señal más débil [30]. La red WiFi posee un alcance máximo de 90 metros, una alta velocidad de transmisión de datos de un máximo de 10 Gbps y tiene una frecuencia de trabajo de 2 GHz o de 5 GHz.
- LoRa WAN: LoRa es la capa física o la modulación inalámbrica utilizada para crear un enlace de comunicación de largo alcance. LoRa se basa en la modulación de espectro ensanchado por chirp (CSS). El espectro extendido de chirp se ha utilizado en comunicaciones militares y espaciales durante décadas debido a las largas distancias de comunicación que se pueden lograr y la solidez a la interferencia, pero LoRa es la primera implementación de bajo costo para uso comercial [31]. LoRaWAN es un protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema para la red, mientras que la capa física LoRa habilita el enlace de comunicación de largo alcance. El protocolo y la

arquitectura de la red tienen la mayor influencia en la determinación de la vida útil de la batería de un nodo, la capacidad de la red, la calidad del servicio, la seguridad y la variedad de aplicaciones que atiende la red [31]. La red LoRaWAN posee un bajo costo energético y un buen funcionamiento a distancia con un alcance de 10 a 20 Km. Su frecuencia de trabajo varía según su ubicación geográfica, los cuales son 868 Mhz en Europa, 915 Mhz en América, y 433 Mhz en Asia, además, su velocidad de envío tiene un rango de 250 bps hasta 50 kbps.

- Xbee: Es una serie de módulos electrónicos que brinda un medio de conexión inalámbrico para la interconexión y comunicación entre dispositivos, que utiliza protocolo de red llamado IEEE 802.15.4 [32]. El protocolo IEEE 802.15.4 es un estándar para redes de área personal inalámbricas, que comprende dispositivos que se caracterizan por una velocidad de datos baja, un rango de comunicación corto y un costo bajo [33]. Los módulos utilizan el protocolo IEEE 802.15.4 para crear redes POINT-TO-MULTIPOINT (punto a multipunto); o para redes PEER-TO-PEER (punto a punto). Fueron diseñados para aplicaciones que requieren de un alto tráfico de datos, baja latencia y una sincronización de comunicación predecible [32]. La red Xbee tiene un alcance máximo de 24 Km, una frecuencia de trabajo de 2,4 GHz o de 900 MHz y posee una velocidad de envío de 10 kbps a 250 kbps, además, el consumo energético que produce aumenta para los equipos de larga distancia.

8. Diseño del sistema electrónico de una colmena digital ideal

Una colmena digital permite monitorear la colmena de una forma no invasiva y reduciendo el número de las visitas del apicultor a las colmenas, evitando el estrés producido al momento de revisarlas y envía notificaciones al apicultor cuando se detecta algún peligro o alguna condición fuera de lo común dentro de la colmena. El monitoreo se realiza mediante un sistema que controla una serie de sensores que posibilitan el seguimiento de diferentes variables dentro de la colmena. En este proyecto se diseñó el sistema electrónico de una colmena digital ideal sin tener en cuenta la disponibilidad de los componentes en el mercado nacional. Se seleccionaron sensores capaces de medir los siguientes parámetros: temperatura, humedad, peso y sonido dentro de la colmena, además debe de ser capaces de estimar el tráfico de recolectores. Estos parámetros permiten obtener información sobre las condiciones ambientales dentro de la colmena, además de proporcionar información sobre el crecimiento de la colmena y de algún cambio anormal del comportamiento de las abejas dentro de la colmena.

8.1. Temperatura y humedad

Para la medición de temperatura y humedad, se utilizará el sensor SHT15, mostrado en la Figura 8.2, el cual es capaz de medir ambos parámetros. Este sensor posee una alta precisión y un bajo consumo energético, los datos más importantes están presentes en la Tabla 9. Dentro de la colmena el sensor debe estar ubicado en la parte superior de un marco intermedio en la caja de cría y cerca de los almacenes de néctar.

Tabla 9: Datos técnicos del sensor SHT15.

SHT15	Alimentación (V)	Rango de funcionamiento	Precisión
Temperatura	2,4 a 5,5	-40°C a 120°C	±0,3°C
Humedad	2,4 a 5,5	0% a 100%	±2%

8.2. Peso

La medición del peso se llevará a cabo mediante una báscula capaz de soportar un rango de 0 a 125 Kg ubicada debajo de la colmena, compuesta de una celda de carga y una estructura metálica. En la actualidad existen dos tipos de sistemas. El primero es el diseñado en

[26], que consiste en una báscula ubicada debajo de la colmena, compuesta de un marco metálico de 500 mm × 400 mm con una celda de carga de 150 kg, la celda de carga está conectada a una pantalla BR80 de Baxtran, la que envía la información al microcontrolador. El segundo es el utilizado en la colmena digital Beepbase, consiste en un marco de acero inoxidable de 480x390x68 mm, con dos celdas de carga Bosche H40A 150 kg conectada a un amplificador de peso de 2 canales (HX711) [8].

8.3. Sonido

El sonido dentro de la colmena se medirá mediante el micrófono ECM-3005, mostrado en la Figura 8.1 y cuyas especificaciones se encuentran en Tabla 6, el microfono es colocado en la parte superior del marco del panel. Además, se debe conectar un circuito amplificador como el AGC y un convertidor análogo digital.



Figura 8.1: Micrófono ECM-3005

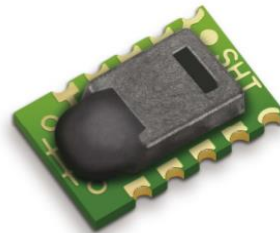


Figura 8.2: Sensor SHT15

8.4. Trafico de recolectores

La medición del tráfico de recolectores conlleva un diseño de la piquera de la colmena, que permita la integración de sensores capaces de medir el número de los recolectores que entren o salgan de la colmena. La selección del sensor dependerá de la piquera diseñada, sin embargo, un sensor que es utilizable para este fin es el sensor fotoeléctrico Groove Coupler, cuyas características son las siguientes:

- El ancho de ranura: 10 mm aprox.
- Voltaje de funcionamiento 3,3 V-5 V.
- Salidas de conmutación digital.

8.5. Sistema de control

Para el sistema de control se debe utilizar una placa de desarrollo que cumpla con los siguientes requerimientos:

- Debe contar con al menos 6 entradas analógicas para los sensores de la colmena.
- La velocidad de procesamiento debe permitir tomar muestras del audio con una frecuencia de muestreo mínima de 2.048 Hz y resolución 1 Hz.
- La memoria y velocidad de procesamiento necesarios para calcular las transformada rápida de Fourier (FFT).
- Mínimo consumo posible para facilitar la autonomía energética. Además, es aconsejable que posea algún de modo bajo consumo, programable para momentos de inactividad.
- Es necesario que cuente con algún puerto serie para la comunicación con el equipo de transmisión y la computadora.
- Se debe contemplar la compatibilidad con un medio removible para el almacenamiento de la información.

Tomando en cuenta la comparación de placas de desarrollo, mostrada en la Tabla 8, se puede concluir que la opción que mejor cumple los requerimientos es la placa de desarrollo Stellaris, mostrada en la Figura 8.3. Esto se debe a que, en comparación con el resto de los sistemas planteados, posee una mayor capacidad de procesamiento de datos, posee un bajo consumo energético, específicamente en su modo de hibernación, ayudando a aumentar la autonomía del sistema.



Figura 8.3: Placa de desarrollo Stellaris

8.6. Sistema de conexión

El sistema de conexión que se utilizará será LoRa, ya que, en comparación con los protocolos existentes, mostrados en la Figura 8.4, LoRa se ajusta mejor a las necesidades de la colmena debido a que funciona con un bajo costo energético y transmite datos a distancias largas.








	Local Area Network Short Range Communication	Low Power Wide Area (LPWAN) Internet of Things	Cellular Network Traditional M2M
	40%	45%	15%
	Well established standards In building	Low power consumption Low cost Positioning	Existing coverage High data rate
	Battery Live Provisioning Network cost & dependencies	High data rate Emerging standards	Autonomy Total cost of ownership
	Bluetooth 4.0  WiFi 		

Figura 8.4: Comparación de protocolo de comunicación inalámbrica [31].

El funcionamiento de LoRa para este caso se ejemplifica con la Figura 8.5, donde desde una placa de desarrollo conectada a un LoRa Shield se envían las mediciones de los sensores hasta un Gateway, cuya función es reenviar los datos hasta la nube, a través de una conexión Wifi o Ethernet. Luego de que se envían los datos a la nube, un software utiliza esos datos para monitorear la colmena y enviar notificaciones al apicultor. Para esta propuesta de colmena, los elementos propuestos son un LoRa RFM95 915 MHz con la antena con configuración inalámbrica y un Gateway LoRaWAN LG308 915Mhz.

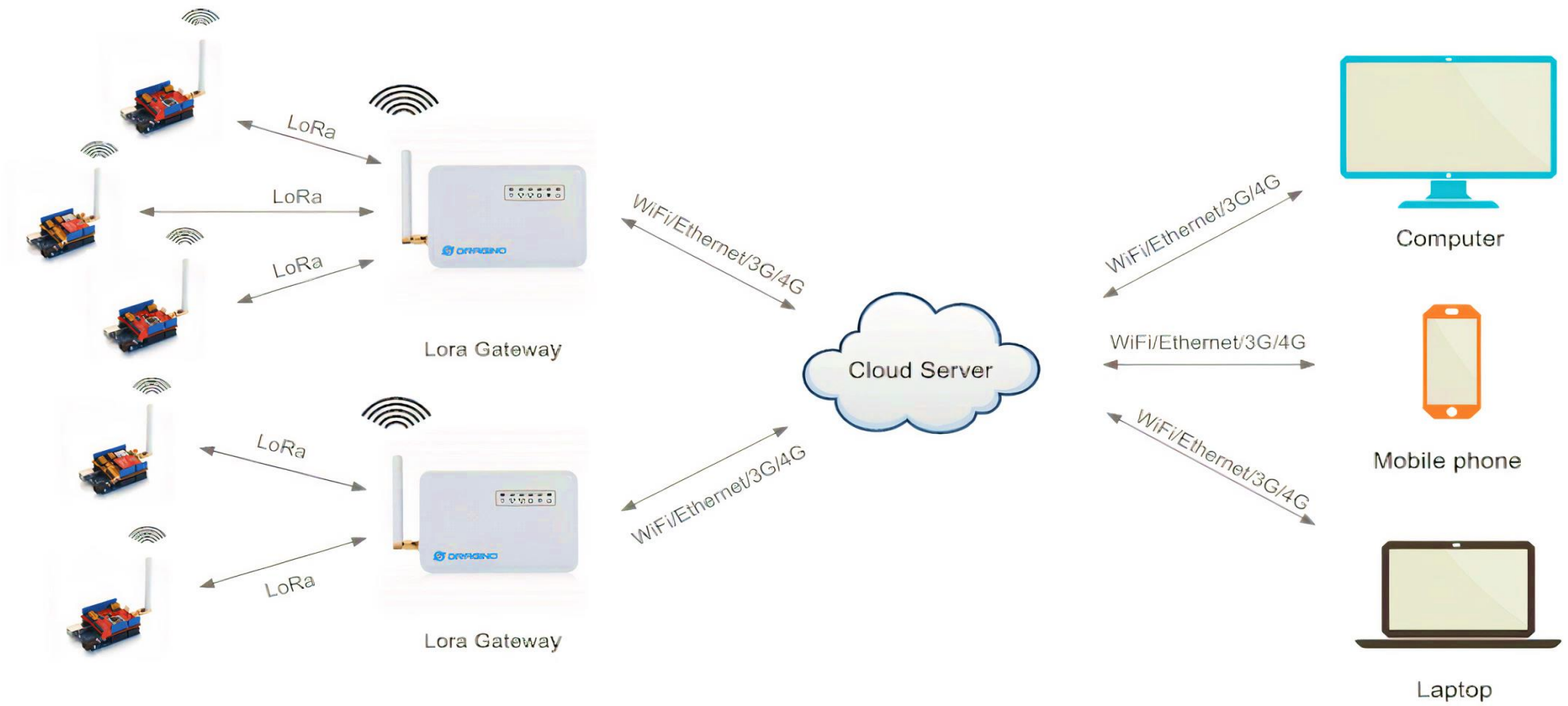


Figura 8.5: Esquema de referencia para la utilización de LoRa [34].

9. Prototipo del sistema electrónico de una colmena digital

El prototipo electrónico de colmena digital tiene como finalidad implementar el sistema electrónico de una colmena digital teniendo en cuenta la disponibilidad de componentes en el mercado nacional. El sistema cuenta con una variedad de sensores que enviarán la información recolectada a un dispositivo receptor que se encargará de recibir y guardar los datos. Para este proyecto se implementaron un sensor de temperatura y humedad, un micrófono y un sensor fotoeléctrico, todos conectados a un Arduino Mega, el cual tiene incorporado un Data Logger Shield y un LoRa Shield. Este Microcontrolador envía los datos obtenidos de los sensores mediante el Shield LoRa, donde un Arduino Uno conectado a un Shield LoRa y con una conexión alámbrica a un computador recibe los datos y los registra a un archivo Excel, permitiendo observar desde el computador los datos obtenidos de una forma continua y en tiempo real.

Los componentes electrónicos utilizados son:

- 2 Arduino Uno
- 1 Arduino Mega
- 1 sensor DHT11
- 1 data Logger Shield V1.0
- 1 micrófono MAX4466
- 1 sensor fotoeléctrico Groove Coupler.
- 2 Dragino LoRa Shield v95

Las especificaciones técnicas del Arduino Uno y Mega se encuentran en la Tabla 8, las del sensor de temperatura y humedad DHT11 están en la Tabla 4 y Tabla 5 y el micrófono MAX4466 tiene sus especificaciones técnicas en la Tabla 6. Por otra parte, componente Dragino LoRa Shield v95 tiene las siguientes especificaciones técnicas:

- Estimación de conexión máxima 168 dB.
- Tasa de bits programable hasta 300 kbps.
- Sensibilidad: -148 dBm.
- Baja corriente RX de 10,3 mA, retención de registro de 200 nA.
- Sintetizador totalmente integrado con una resolución de 61 Hz.
- Modulación FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRaTM y OOK.
- Sincronizador de bits incorporado para la recuperación del reloj.

- RSSI de rango dinámico de 127 dB.

El Data Logger Shield V1.0 tiene las siguientes características:

- La interfaz de la tarjeta SD funciona con tarjetas formateadas FAT16 o FAT32. El circuito de cambio de nivel integrado de 3,3 V le permite leer o escribir súper rápido y evita daños en su tarjeta SD.
- El reloj en tiempo real (RTC) mantiene el tiempo en marcha incluso cuando el Arduino está desconectado. El respaldo de la batería de celda de moneda dura años.
- El regulador integrado de 3,3 V es un voltaje de referencia confiable y también funciona de manera confiable con tarjetas SD que requieren mucha energía para funcionar.
- Utiliza los puertos I2C e ICSP / SPI de "diseño R3", por lo que es compatible con una amplia variedad de modelos de Arduino.

La interacción entre el sensor DHT11 y el Arduino Uno, se realiza mediante el uso de la librería Adafruit y utilizando una entrada digital para la recepción de información. El uso de la Dragino LoRa Shield v95 con Arduino Uno se hace mediante la librería RadioHead.

Se realizó la conexión de dos Arduino Uno de manera inalámbrica utilizando el protocolo LoRa mediante el componente Dragino LoRa Shield v95, en donde uno de los Arduino estaba conectado al sensor DHT11, siendo este el Arduino emisor. Por otra parte, el Arduino receptor, recibe la información codificada del emisor, por lo que se creó una función para realizar la decodificación. Este sistema está representado en el esquema de referencia mostrado en la Figura 9.1. La codificación comienza con cambiar el tipo de variable de float a str, para luego pasar desde la variable String a uint8, utilizando la función getBytes. Es importante aclarar que la variable tipo float son números decimales que ocupan 4 bytes, la variable tipo String se utiliza para almacenar cadenas de texto y la variable uint8 son números enteros de 1 byte. Luego, el Arduino Receptor conectado a un computador de manera alámbrica, registra los datos en un archivo Excel, utilizando el complemento Microsoft Data Streamer for Excel, lo que habilita al programa Excel para registrar los datos que recibe el Arduino receptor a tiempo real, permitiendo ver de una manera inmediata los datos obtenidos de los sensores.

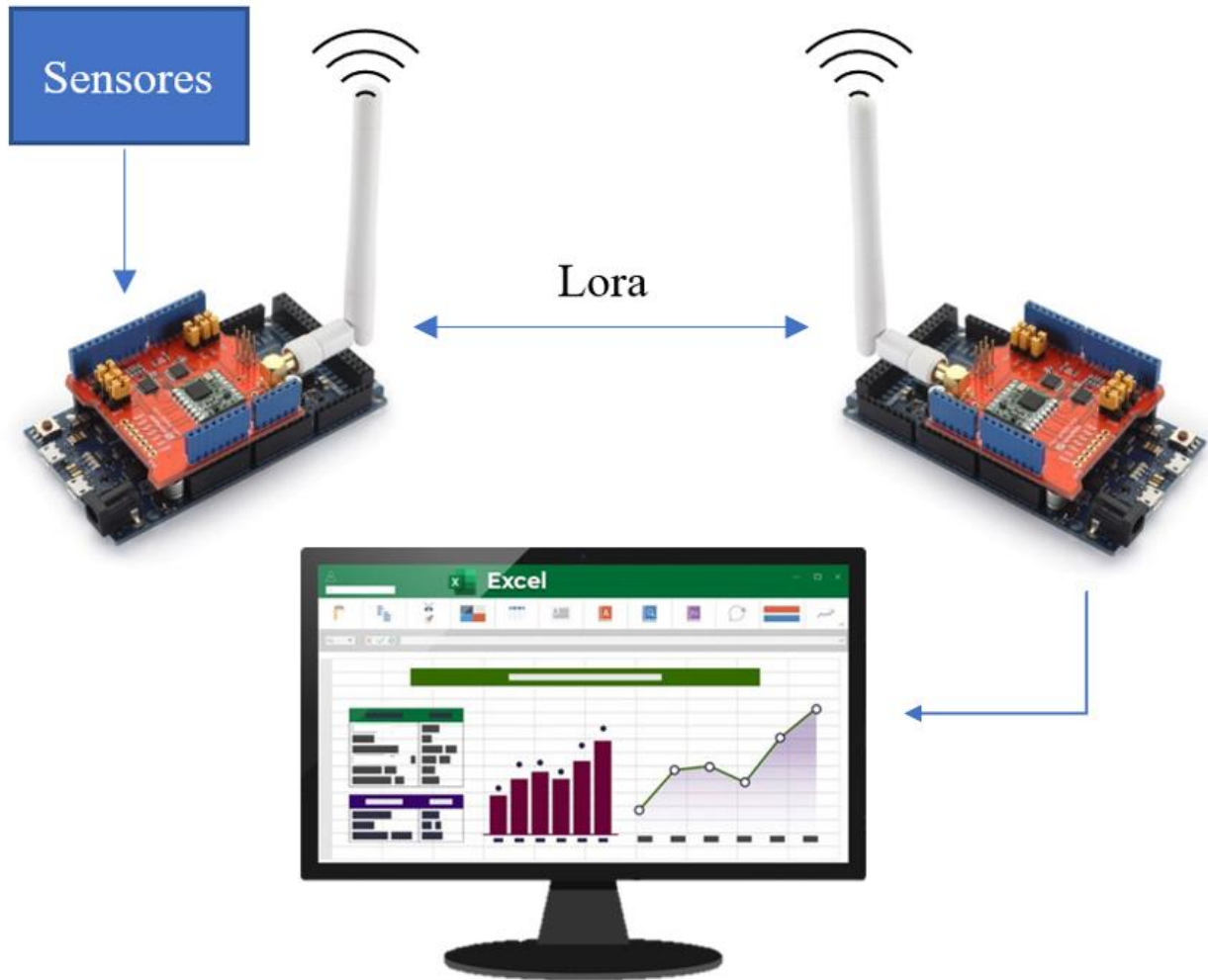


Figura 9.1: Esquema de referencia de la conexión inalámbrica de dos Arduino utilizando LoRa.

La implementación del Data Logger Shield V1.0 se realizó en un Arduino Uno y en un Arduino Mega, para esto se utilizaron las librerías SPI, Wire y SD para registrar los datos en una tarjeta microSD de 16 GB. Además, se utilizó la librería RTCLib para utilizar el reloj del Data Logger. En un principio se intentó implementar el data Logger en el sistema que contiene el sensor de temperatura y humedad dht11 y el Dragino LoRa Shield v95 utilizando como microcontrolador un Arduino Uno, pero este sistema no funcionó debido a que la memoria del Arduino Uno no soportó el código, en consecuencia, se reemplazó el Arduino Uno por un Arduino Mega, quedando la configuración mostrada en el Anexo 5.

Para poder reducir el consumo eléctrico del sistema que se desea utilizar, se implementa el modo de hibernación de Arduino o también conocido como el modo de ahorro de energía de

Arduino. Con el uso de la librería Low-Power se controla el modo de hibernación de Arduino. Para los casos de que se requiera una hibernación mayor a 8 segundos se usó una configuración en la que el modo hibernación se detiene cada 8 segundos y luego vuelve a estar en hibernación, lo que se repite hasta que pase el tiempo que se requiera. Esto se debe a que la librería solo puede interrumpir el modo de hibernación hasta un máximo de 8 segundos, para lograr una hibernación continua se requiere utilizar un reloj externo que pueda enviar alarmas para interrumpir el modo ahorro.

La configuración del micrófono Mx4466 se realiza estableciendo una frecuencia de muestreo y una ventana de la señal, para este caso se utilizaron los mismos valores de la investigación realizada en [24], donde se utilizó una frecuencia de muestreo de 1 kHz y una ventana de 1 s.

La configuración del sensor fotoeléctrico Groove Coupler se realizó guardando el valor medido por el sensor, y comparándolo con el valor anterior. Si el valor del sensor es diferente al valor anterior y si el valor del sensor es igual a 1, se activa el contador, ya que representa cuando un objeto pasa por el sensor. Un dato importante es que no se puede utilizar el modo hibernación cuando se utiliza este sensor, esto se debe a que el fin del sensor fotoeléctrico es que mida el número de abejas que entran y que salen de la colmena, por lo tanto, este sensor siempre tiene que estar activo, pero si el sistema entra en modo hibernación el sensor deja de funcionar.

Al implementar el micrófono y el sensor fotoeléctrico en el sistema de Arduino Mega con Data Logger, Shield LoRa y sensor DHT11, como se muestra en el Anexo 4, se presentaron problemas con el sensor fotoeléctrico. Cuando funcionan los demás sensores o se envían los datos mediante LoRa, el sistema ignora la información entregada por el sensor fotoeléctrico. Por lo que se recomienda realizar un sistema aparte para poder utilizar este sensor.

10. Estudio de autonomía del sistema

10.1. Medición de potencia eléctrica consumida del sistema

La medición de potencia eléctrica consumida se realizó a diferentes configuraciones compuestas por un Arduino Mega conectado a diversos componentes electrónicos. Para obtener las mediciones de corriente que circula en el circuito, se utilizó el circuito mostrado en la Figura 10.1, en donde la medición del voltaje en la resistencia de $10\ \Omega$ se realizó con un osciloscopio Rigol DS2302A. Además, se alimentó el circuito con una fuente de voltaje Rigol DP832, configurada con un voltaje de salida de 9 Volt. Utilizando la Ecuación (1), obtenida a partir de la Ley de Ohm, es posible obtener la señal de corriente $i(t)$ a partir de la señal de voltaje $V_R(t)$ medida en la resistencia R .

$$i(t) = \frac{V_R(t)}{R} \quad (1)$$

Para calcular la potencia consumida por cada configuración analizada, es necesario conocer el voltaje $V_A(t)$ aplicado a la placa de desarrollo Arduino. Dicho voltaje puede obtenerse aplicando la Ley de Kirchhoff del voltaje, que establece que la suma de los voltajes en un lazo cerrado es igual a cero. Aplicando dicha ley en el circuito mostrado en la Figura 10.1 se obtiene la Ecuación (2), en la que $V_F(t)$ es el voltaje de la fuente y $V_R(t)$ es el voltaje en la resistencia.

$$V_F(t) - V_A(t) - V_R(t) = 0 \quad (2)$$

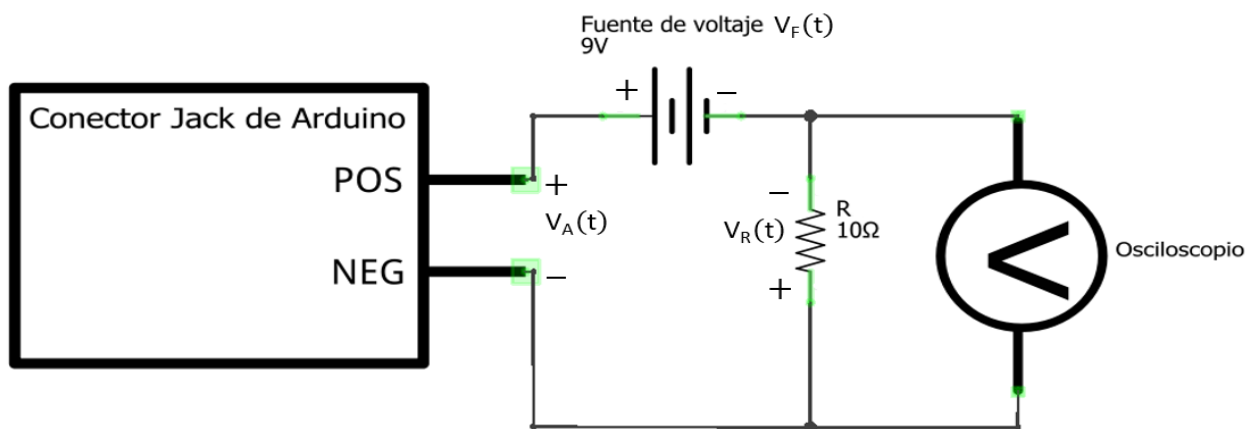


Figura 10.1: Circuito de referencia para la medición de los sistemas. Utiliza un osciloscopio, una fuente de voltaje, una resistencia y la entrada de alimentación de Arduino.

Despejando el voltaje aplicado al Arduino de la Ecuación (2), se obtiene la Ecuación (3).

$$V_A(t) = V_F(t) - V_R(t) \quad (3)$$

La potencia eléctrica se define como el producto entre el voltaje y la corriente. Entonces, para calcular la potencia instantánea $P_A(t)$ consumida por cada configuración analizada se puede utilizar la Ecuación (4).

$$P_A(t) = V_A(t) \cdot i(t) = (V_F(t) - V_R(t)) \cdot i(t) \quad (4)$$

Las mediciones de corriente eléctrica se realizaron a cinco circuitos compuestos por diferentes componentes electrónicos, los cuales son:

- Circuito 1: Sistema electrónico compuesto por un Arduino Mega conectado a un sensor de humedad y temperatura DHT11. El circuito se muestra en el Anexo 1.
- Circuito 2: Sistema electrónico compuesto por un Arduino Mega conectado a un sensor de humedad y temperatura DHT11 y un Dragino LoRa Shield v95. El circuito se muestra en el Anexo 2
- Circuito 3: Sistema electrónico compuesto por un Arduino Mega conectado a un sensor de humedad y temperatura DHT11, un Dragino LoRa Shield v95 y un Data Logger Shield V1.0. El circuito se muestra en el Anexo 3.
- Circuito 4: Sistema electrónico compuesto por un Arduino Mega conectado a un sensor de humedad y temperatura DHT11, un Dragino LoRa Shield v95 y un Data Logger Shield V1.0, utilizando el modo de hibernación. El circuito se muestra en el Anexo 3.
- Circuito 5: Sistema electrónico compuesto por un Arduino Mega conectado a un sensor de humedad y temperatura DHT11, un Dragino LoRa Shield v95, un Data Logger Shield V1.0, un microfono Mx4466 y sensor fotoeléctrico Groove Coupler. El circuito se muestra en el Anexo 4. Es importante mencionar que este circuito corresponde al considerado en el prototipo del sistema electrónico de una colmena digital.

La Figura 10.2 muestra el comportamiento de la corriente eléctrica registrada del Circuito 1, durante un ciclo de funcionamiento. El eje horizontal es el tiempo en segundos mientras que el eje vertical es la intensidad de corriente en miliamperios, esta estructura de

figura se mantiene para las figuras 10.2, 10.3, 10.4 y 10.5. En la figura se observan picos de corrientes que representan cuando entra en funcionamiento el sensor DHT11.

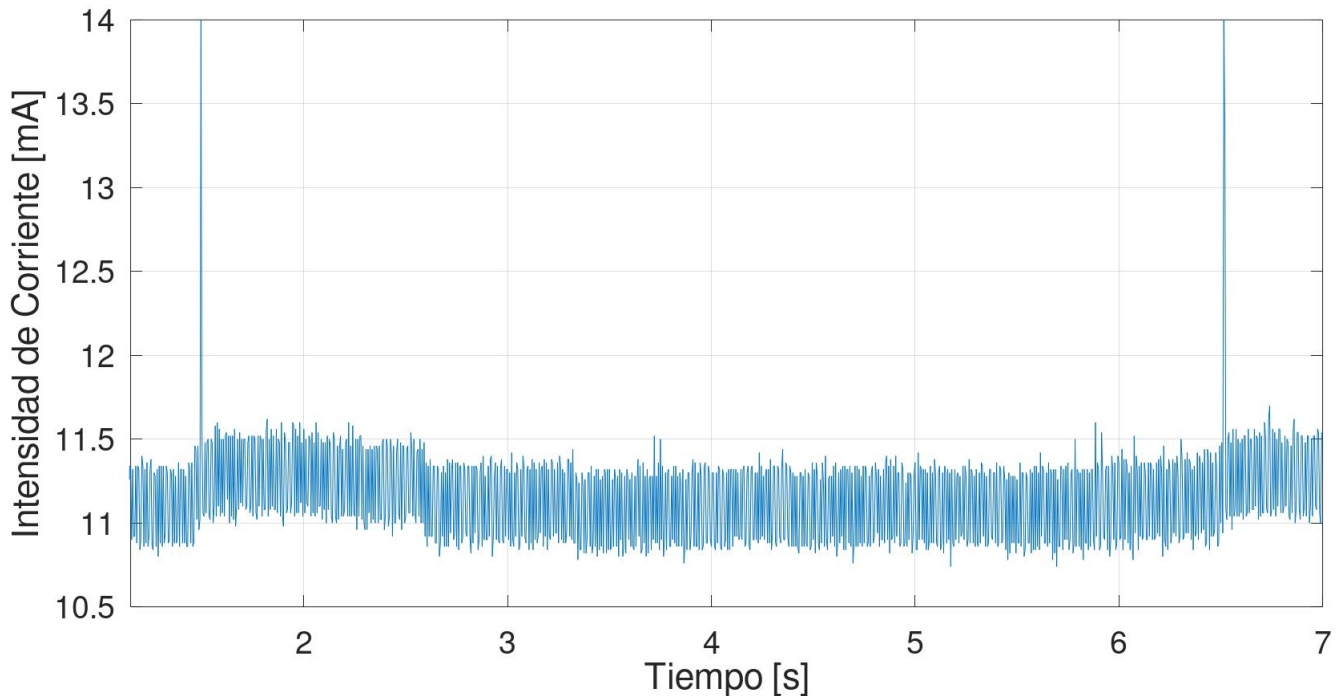


Figura 10.2: Grafico de intensidad de corriente registrada del Circuito 1, conformado por un Arduino Mega y un sensor DHT11.

La Figura 10.3 muestra el comportamiento de la corriente eléctrica registrada del Circuito 2, durante dos ciclos de funcionamiento de 4 s cada uno. En la figura se observan dos tipos de picos de corrientes que representan cuando entra en funcionamiento el sensor DHT11 y cuando se envía información mediante el Shield LoRa. Los picos de corriente producido por el sensor DHT11 se identifican como aquellos con un valor cercano a 18 mA. Los picos de corriente producido por enviar la información se identifican como aquellos cuyo valor superan los 20 mA, además se observa que durante un pequeño tiempo se mantiene sobre este valor, lo que representa al tiempo en que se demoró enviar los datos.

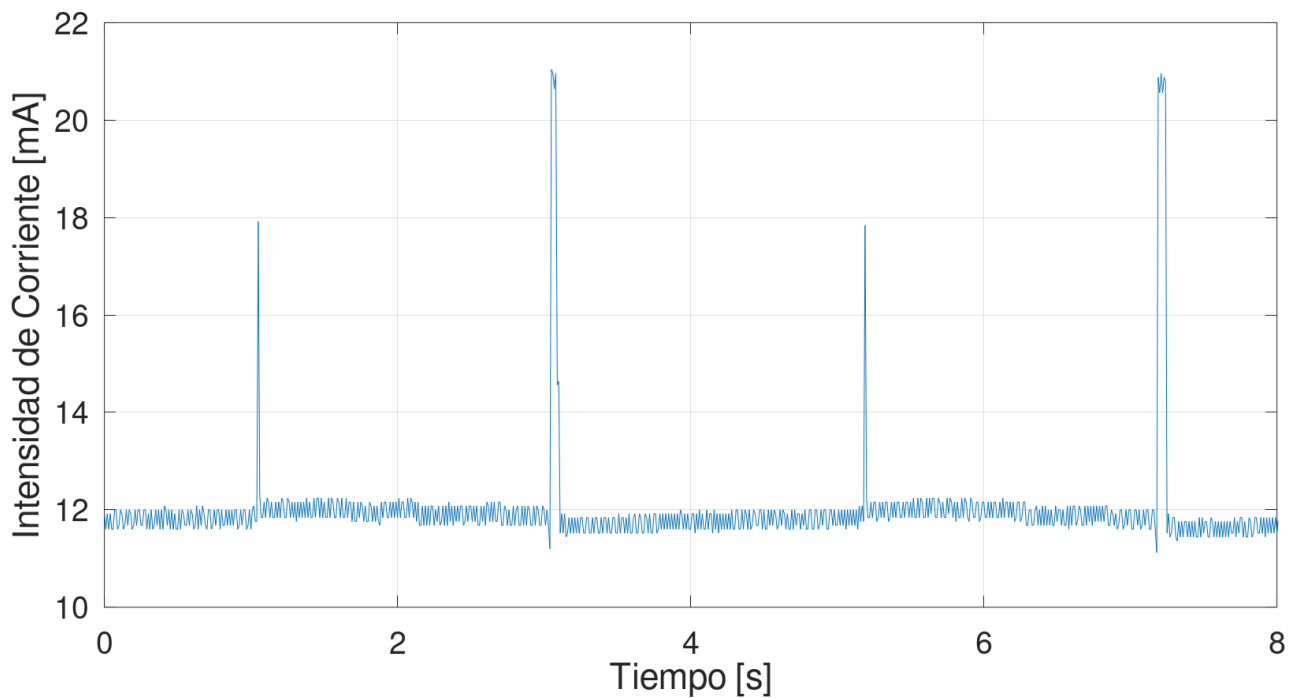


Figura 10.3: Grafico de intensidad de corriente registrada del Circuito 2, conformado por un Arduino Mega, un Shield LoRa y un sensor DHT11.

La Figura 10.4 muestra el comportamiento de la corriente eléctrica registrada del Circuito 3, durante un ciclo de funcionamiento. En la figura se observan dos tipos de picos de corrientes que representan cuando entra en funcionamiento el sensor DHT11 y cuando se envía información mediante el Shield LoRa. El pico de corriente producido por el sensor DHT11 se identifican como aquel con un valor cercano a 18 mA. Los picos de corriente producido por el envío de información se identifican como aquellos cuyo valor superan los 18 mA, además se observa que durante un pequeño tiempo se mantiene sobre este valor, lo que representa al tiempo en que se demoró enviar los datos.

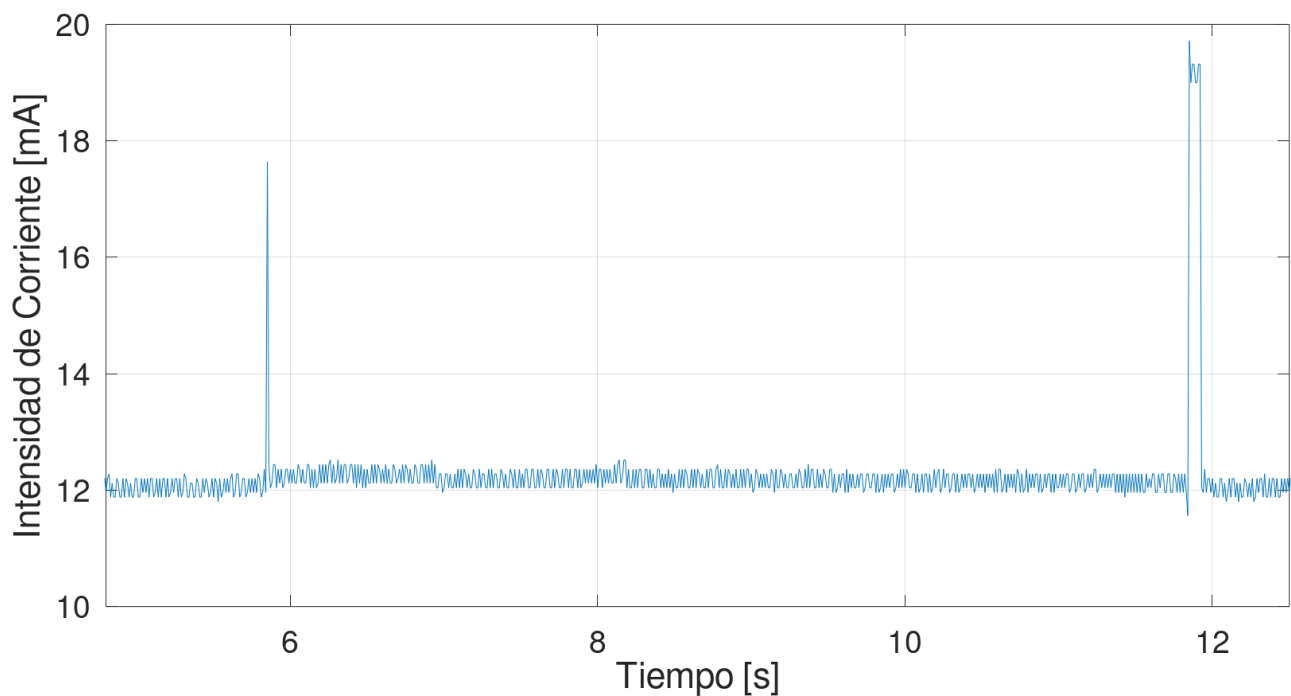


Figura 10.4: Grafico de intensidad de corriente registrada del Circuito 3, con Arduino Mega conectado con un Shield LoRa, un Data Logger y un sensor DHT11.

La Figura 10.5 muestra el comportamiento de la corriente eléctrica registrada del Circuito 4, durante un ciclo de funcionamiento. En la figura se observan cuatro tipos de eventos producidos por el funcionamiento de los componentes electrónicos del circuito. El primero es producido por el modo hibernación de Arduino, el que se evidencia cuando la intensidad de corrientes está entre el rango de 5 a 7 mA. El segundo es el funcionamiento del sensor DHT11, representado por un pico de corriente de aproximadamente 18 mA. El tercero es el funcionamiento del Data Logger al registrar los datos junto al funcionamiento del Arduino en un modo de pausa. El modo pausa se controla con la función `delay()`, utilizado para poder identificar la corriente producida por cada componente, agregando una pausa después del funcionamiento de cada uno. Este evento se identifica cuando el valor de intensidad de corriente está en el rango de 12 a 14 mA. El último es el producido por el envío de información, en donde se presenta un incremento en la intensidad de corriente mayor a 20 mA, que se mantiene en el rango hasta que termina el envío de datos.

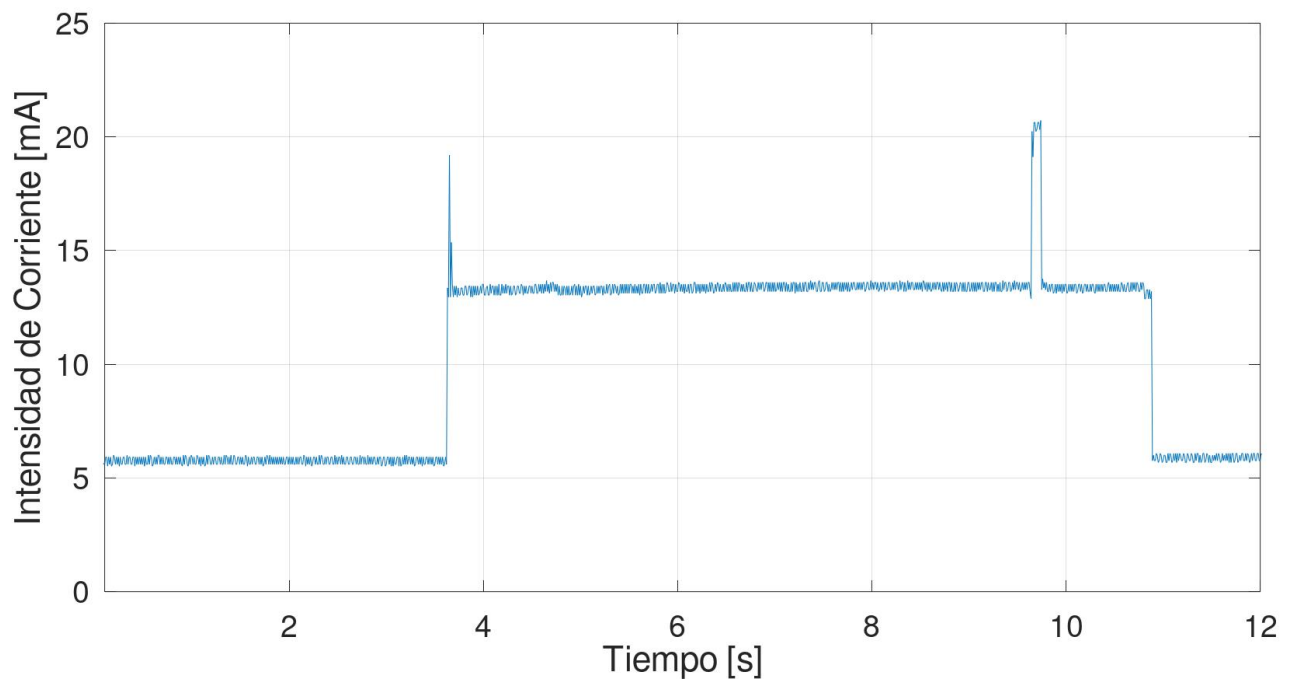


Figura 10.5: Gráfico de intensidad de corriente registrada del Circuito 4, conformado por un Arduino Mega conectado con un Shield LoRa, un Data Logger y un sensor DHT11, utilizando el modo hibernación.

La Figura 10.6 muestra el comportamiento de la corriente eléctrica registrada del Circuito 5, durante un ciclo de funcionamiento. En la figura se observan cuatro tipos de eventos producidos por el funcionamiento de los componentes electrónicos del circuito. El primero es producido por el funcionamiento del sensor SHT11, representado por un pico de corriente de aproximadamente 18 mA. El segundo es el funcionamiento del Data Logger al registrar los datos junto al funcionamiento del Arduino en un modo de pausa, debido a la función `delay()`. Este evento se identifica cuando el valor de intensidad de corriente está en el rango de 10,5 a 11,5 mA. El tercero es el funcionamiento del micrófono, el que se evidencia cuando la intensidad de corriente está en el rango de 11,5 a 12,5 mA. El último es el producido por el envío de información, en donde se presenta un incremento en la intensidad de corriente mayor a 18 mA, que se mantiene en el rango hasta que termina el envío de datos.

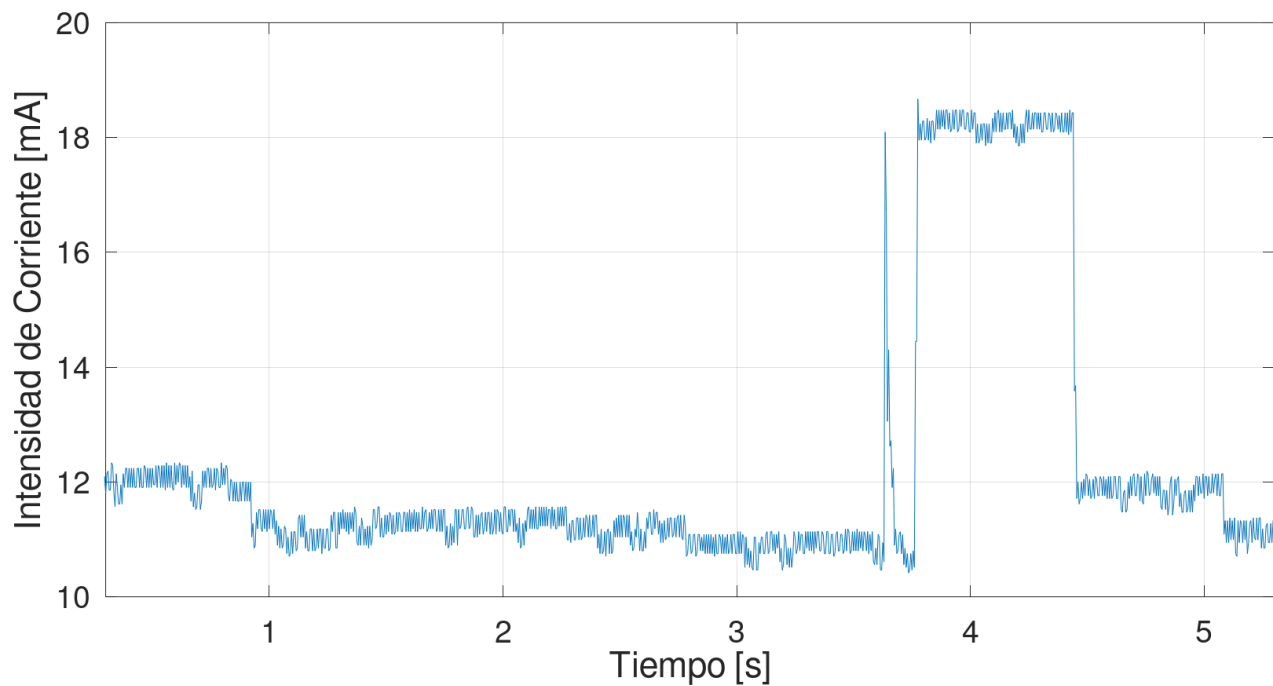


Figura 10.6: Grafico de intensidad de corriente registrada del Circuito 5, conformado por un Arduino Mega conectado con un Shield LoRa, un Data Logger, un sensor DHT11, un micrófono y un sensor fotoeléctrico.

La Tabla 10 muestra el valor promedio, máximo, y mínimo de la corriente medida en miliamperios, el voltaje en el Arduino en volts y potencia consumida del circuito en watts. Los circuitos mostrados en la Tabla 10 constan de diferentes configuraciones compuestas de un Arduino Mega y un sensor de temperatura y humedad DHT11 conectados a diferentes componentes electrónicos.

Utilizando los datos disponibles en la Tabla 10 para comparar el circuito 1 con el circuito 2, se aprecia el consumo eléctrico producido al momento de enviar los datos, utilizando el Shield LoRa. El promedio de la potencia consumida de dichos circuitos evidencia que el consumo eléctrico aumenta al momento del envío de datos, teniendo una diferencia de 7 mW, equivalente a un 7 % y que se debe al consumo producido por el Shield LoRa para enviar los datos obtenidos del sensor de humedad y temperatura. Al observar el valor de corriente medida de ambos circuitos, se aprecia que el circuito 2 posee un valor máximo mayor que el circuito 1,

esto significa que el uso del Shield LoRa provoca picos de corrientes mayores a los producidos por el sensor de humedad y temperatura, lo que se ve ejemplificado en la Figura 10.3, donde la diferencia del pico de corriente producido por el sensor DHT11 con el pico de corriente producido por el Shield LoRa es de aproximadamente 3 mA.

También se puede observar en la Tabla 10 el aporte del modo hibernación para la autonomía de los circuitos. Comparando el circuito 3 y el circuito 4 se evidencia la diferencia entre un circuito con modo hibernación y uno que no lo posee. La diferencia del promedio de potencia consumida entre el circuito 3 y el circuito 4 es de 22 mW, equivalente a una reducción de la potencia consumida del 20% al utilizar el modo hibernación. Además, se observa que la corriente mínima medida del circuito 3 es el doble que la del circuito 4, esta diferencia aprecia visualmente al comparar los gráficos de intensidad de corriente mostrados en la Figura 10.6 y en la Figura 10.5.

Por último, puede observarse en la Tabla 10 que al implementar el micrófono y el sensor fotoeléctrico no se registra un aumento del consumo respecto al circuito 3.

Tabla 10: Valores registrados de la medición de los circuitos.

Circuito	Componentes conectados	Corriente [mA]			Voltaje en Arduino [V]			Potencia consumida[W]		
		Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo
1	Solo DHT11	11,149	14,000	10,740	8,889	8,860	8,893	0,099	0,124	0,096
2	Shield LoRa	11,931	21,040	11,120	8,881	8,790	8,889	0,106	0,185	0,099
3	Data Logger y Shield LoRa	12,262	19,720	11,480	8,877	8,803	8,885	0,109	0,174	0,102
4	Shield LoRa, Data Logger y modo hibernación	9,786	20,720	5,520	8,902	8,793	8,945	0,087	0,182	0,049
5	Shield LoRa, Data Logger, micrófono y fotoeléctrico	12,269	18,672	10,416	8,877	8,813	8,896	0,109	0,165	0,093

10.2. Propuesta de sistema de alimentación

En esta sección se estudia la posibilidad de dotar a la colmena digital de autonomía, completa o parcial, de la red eléctrica. Para realizar esta propuesta se trabajó con el circuito 5, mostrado en la Tabla 10, el cual consta de un Arduino Mega conectado a un sensor DHT11, un Shield LoRa, un Data Logger, un microfono Max 4466 y un sensor fotoeléctrico. Dicho circuito debe tener un funcionamiento permanente, debido al sensor fotoeléctrico, ya que se encarga de contar el número de abejas que entran y salen de la colmena. En la Tabla 10 se observa que la potencia consumida del circuito es de 0,109 W. Como su funcionamiento es continuo su consumo en una hora es de 0,109 Wh. El consumo del circuito en un día es de 2,614 Wh, lo que es igual a 9,41 kJ.

Se propone utilizar como fuente de alimentación un sistema fotovoltaico (FV) compuesto por paneles solares, baterías y un controlador de carga. La capacidad del banco de baterías, para cargas de corriente continua, se calcula con la Ecuación (5) [35].

$$C = \frac{\text{Consumo CC}}{\text{Voltaje CC}} \quad (5)$$

Considerando que el consumo del circuito es de 0,109 Wh y el voltaje de alimentación es igual a 5 V, se obtiene una capacidad C es igual a 21,783 mAh. El banco de baterías debe tener una autonomía por una cantidad limitada de horas. Durante este tiempo la batería debe alimentar el circuito sin la necesidad de cargarse [35]. La capacidad del banco de baterías incluyendo las horas de autonomía se calcula con la Ecuación (6) .

$$C_1 = C \cdot \text{Horas Autonomía} \quad (6)$$

Considerando 12 horas de autonomía se tiene que la capacidad C_1 es igual a 261,399 mAh. Como las baterías no deben descargarse por completo, se debe considerar un porcentaje de descarga máxima [35]. Por lo tanto, el cálculo de la capacidad total del banco de baterías se realiza con la Ecuación (7).

$$C_2 = \frac{C_1}{\text{Factor de Descarga Máxima}} \quad (7)$$

Considerando un factor de descarga máxima de la batería igual a un 80% la capacidad total del banco de baterías C_2 es igual a 326,748 mAh.

Para determinar la cantidad total de baterías se debe calcular el número de baterías conectadas en paralelo con la Ecuación (8) y el número de baterías conectadas en serie con la Ecuación (9). Además, la cantidad total de baterías se calcula con la Ecuación (10) [35].

$$N_{\text{ser}} = \frac{\text{Voltaje CC sistema}}{\text{Voltaje CC Batería}} \quad (8)$$

$$N_{\text{par}} = \frac{C_2}{\text{Capacidad nominal}} \quad (9)$$

$$N_{\text{bat}} = N_{\text{par}} \cdot N_{\text{ser}} \quad (10)$$

Si se emplean pilas de ion litio recargables, con voltaje de 3,7 V y capacidad 6600 mAh, el número de baterías conectadas en serie N_{ser} es igual a 2 y el número de baterías conectadas en paralelo N_{par} es igual a 1. Además, la cantidad total de baterías N_{bat} es igual a 2.

Se propone utilizar un módulo FV, cuyas características son las siguientes:

- Monocristalino
- Dimensiones: 160x138x2.5(±0,2) mm
- Pico de potencia típica: 3 W
- Voltaje al pico de potencia: 6,4 V
- Corriente al pico de potencia: 540 mA
- Voltaje en circuito abierto: 8,2 V
- Voltaje nominal: 5,5 V
- Corriente en corto circuito: 620 mA
- Coeficiente de temperatura: -0,45 %/°C

La cantidad de módulos FV necesarios para realizar un arreglo FV que supla el consumo del circuito se calcula utilizando la Ecuación (11).

$$N_{\text{módulo}} = \frac{P_{\text{deseada}}}{P_{\text{módulo}}} \quad (11)$$

Considerando la potencia deseada P_{deseada} igual a 0,109 W, que es la potencia que consume el circuito y la potencia del módulo $P_{\text{módulo}}$ igual a 3 W, el número de módulos necesarios $N_{\text{módulo}}$ es igual a 1, por lo tanto, el número de módulos conectados en serie y en paralelo es igual a 1.

Para evaluar la generación del módulo FV se utilizó la herramienta web Explorador Solar [36], la cual sirve para estimar la generación de un sistema FV con un modelo simple o avanzado. Debido a que se desconoce la ubicación de la colmena se eligió un lugar de referencia ubicado en una zona rural, mostrado en la Figura 10.7, este lugar es cercano a la ciudad de Lo Miranda en la región Libertador Bernardo O'Higgins, cuyas coordenadas geográficas son: Latitud $-34,21^\circ$ y Longitud $-70,88^\circ$.

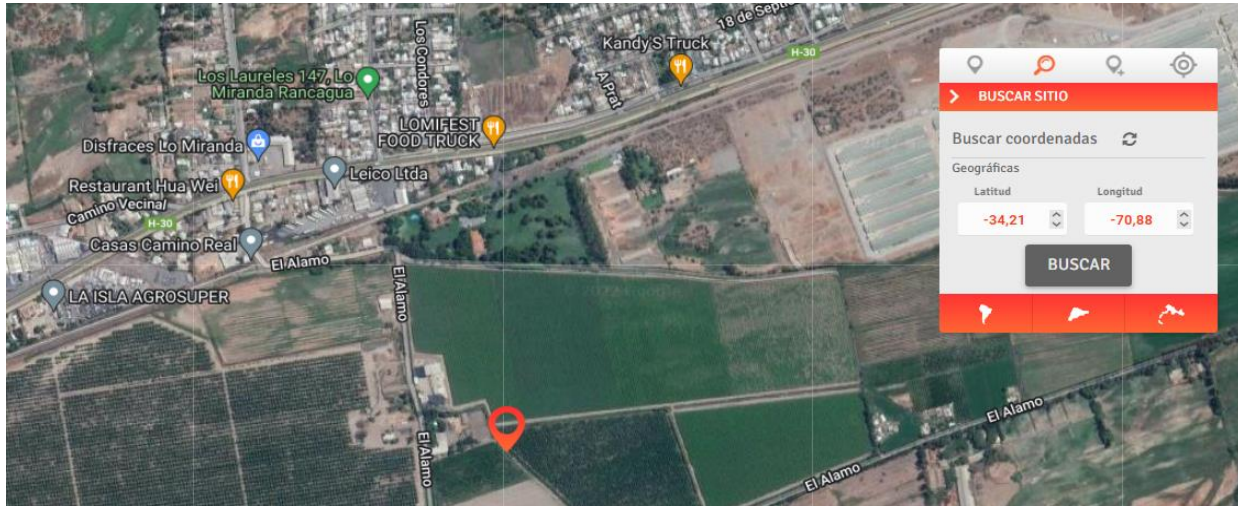


Figura 10.7: Ubicación geográfica utilizada [36].

La Figura 10.8 muestra un gráfico de la generación fotovoltaica mensual promedio creado con los datos proporcionados por el Explorador Solar, presentes en Anexo 6 con la configuración de modelo básico de un sistema Monofacial, un arreglo FV en posición horizontal y sin pérdidas. Se observa que el mes con menor generación es junio con un aproximado de 0,115 Wh. Además, los meses con mayor generación son enero y diciembre con 0,456 Wh. Debido a que la generación fotovoltaica del arreglo FV propuesto en el mes de menor generación es capaz de suplir el consumo del circuito, se comprueba de que el módulo en la ubicación de referencia es capaz de dar autonomía al circuito.

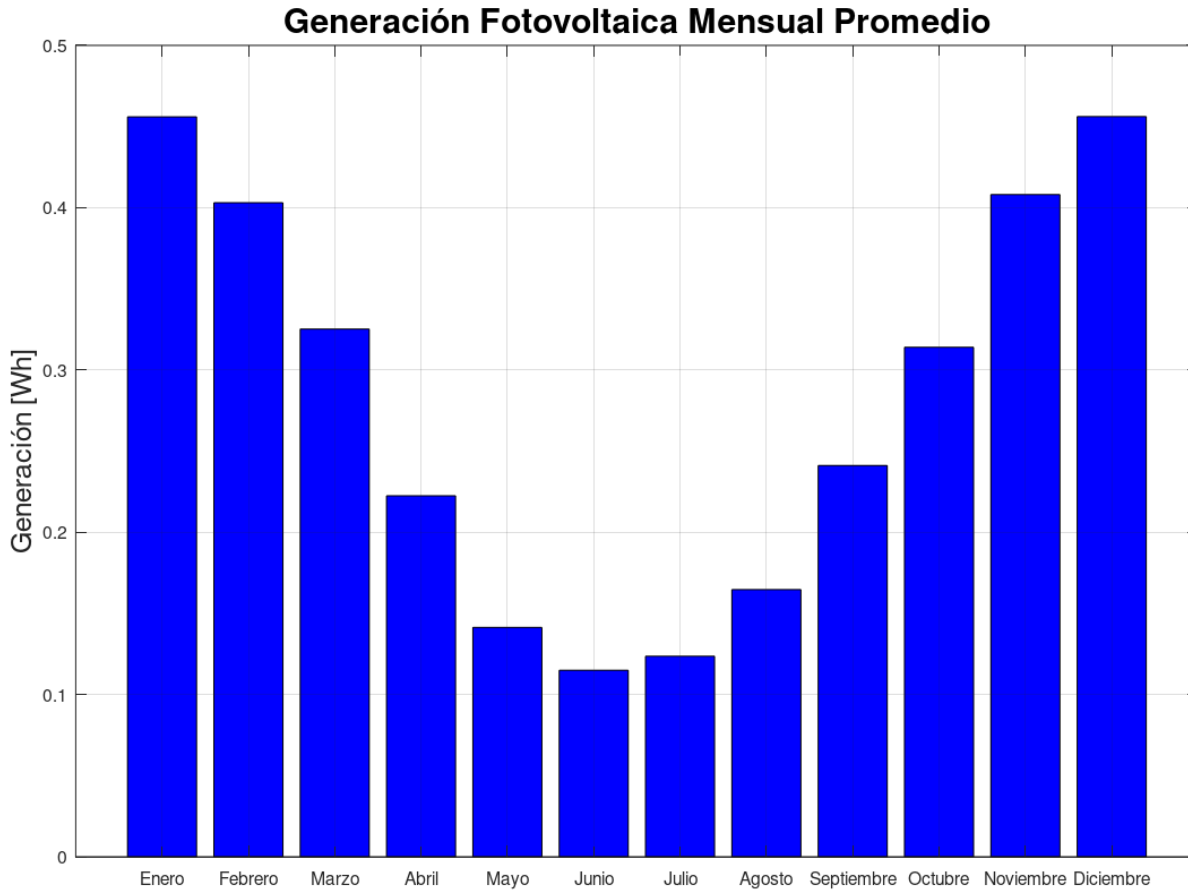


Figura 10.8: Generación fotovoltaica mensual promedio del módulo.

Para seleccionar un controlador de carga se debe verificar que sea capaz de soportar la corriente máxima que inyectan los paneles solares $I_{pico,FV}$ con la Ecuación (12). Además, debe poder soportar la corriente máxima exigida por la carga $I_{pico,CC}$ calculándose con la Ecuación (13).

$$I_{pico,FV} = I_{CCC} \cdot N_{FV,par} \cdot \text{Factor de Seguridad} \quad (12)$$

$$I_{pico,CC} = \frac{P_{T,CC}}{\text{Voltaje CC Sistema}} \quad (13)$$

Considerando un factor de seguridad estándar de un 1,25, el número de módulos FV conectados en paralelo igual a 1 y la corriente en corto circuito del módulo FV igual a 620 mA, la corriente máxima que inyectan los paneles solares $I_{pico,FV}$ es igual a 775 mA. Además,

considerando la potencia total del sistema $P_{T,CC}$ igual a 0,109 W la corriente máxima exigida por la carga $I_{pico,CC}$ es igual a 21,8 mA.

Es importante mencionar que, una vez se conozca la ubicación de la colmena, se debe realizar un estudio para confirmar o ajustar la cantidad de módulos y potencia del sistema FV.

11. Conclusión

Se identificaron algunos eventos importantes en el ciclo de vida de una colmena que pueden identificarse empleando sensores específicos. Uno de estos eventos es la enjambrazón, el que es ocasionado por una reacción en cadena, comenzando por una sobrepoblación, lo que a la vez produce aumento entre 1,5° y 3,4° C de la temperatura interna en la colmena, causando un cambio en el comportamiento de las abejas, quienes terminan abandonando la colmena provocando la disminución en la miel producida. Este evento puede ser detectado con una colmena digital equipada con un sensor de temperatura, un micrófono y sensores fotoeléctricos.

Otro evento es el surgimiento de enfermedades o plagas dentro de las colmenas. Uno de los factores que permite revelar una enfermedad o plaga, es la disminución de la población de abejas que se puede manifestar al observar cadáveres de abejas cerca de la colmena. Además, se pueden detectar al observar un comportamiento anormal en las abejas, principalmente en la forma de su patrón de vuelo. Mediante la implementación de micrófonos o acelerómetros instalados dentro de la colmena, es posible detectar los cambios en el comportamiento de las abejas, al presentarse un aumento de picos de energía en las frecuencias específicas.

Además, durante la investigación de las colmenas digitales se logró determinar las variables de interés de una colmena, las cuales son: la temperatura, la humedad, el número de abejas y el comportamiento de las abejas. Además, se encontraron diferentes sistemas digitales de medición para cada variable, éstos realizan la medición de una forma poco invasiva a la colmena y con un bajo consumo eléctrico.

Se realizó un diseño electrónico de una colmena digital ideal sin tener en cuenta restricciones de disponibilidad local de componentes como placa de control y sensores. En este diseño se considera el monitoreo de las siguientes variables: temperatura, humedad, peso, sonido y tráfico de recolectores. El sistema de control de esta colmena es una placa Stellaris, elegida por su bajo consumo eléctrico y su capacidad de procesamiento. El sistema de

comunicación está basado en el protocolo LoRa, ya que, permite una comunicación inalámbrica de larga distancia con un bajo consumo eléctrico.

El prototipo electrónico desarrollado considera componentes disponibles localmente y es capaz de recolectar información de temperatura, humedad y grabar muestras de sonido. Además de grabar los datos localmente en un data Logger; cuenta con la capacidad de enviar los datos registrados a través de una conexión inalámbrica utilizando el protocolo LoRa a un dispositivo receptor distante como máximo 20 km. Por otra parte, el prototipo tiene implementado un sensor fotoeléctrico para obtener información del tráfico de recolectores, al ser solo un componente no es capaz de obtener una información completa.

Con las mediciones del consumo eléctrico a cinco diferentes circuitos se apreció que el componente electrónico LoRa Shield es el componente con mayor consumo, aumentando en un 7% el consumo del circuito. Además, se observó una disminución en consumo eléctrico de un circuito al ser implementado el modo hibernación, reduciendo la potencia consumida en un 22%, por otra parte, la potencia mínima consumida cuando el controlador está en modo pausa es el doble que la potencia mínima consumida producida cuando esta activado el modo hibernación. Para el cálculo de la fuente de energía se utiliza el circuito con funcionamiento constante, cuyo consumo es de 0,109 W; lo que equivale a 2,6 Wh por día.

La propuesta de sistema de alimentación fue diseñada para su funcionamiento en una zona rural dentro de la Región de O'Higgins, lejos de una conexión a la red eléctrica y amigable con el medio ambiente. Por eso se diseñó un sistema de alimentación que consta de un medio de generación limpia, como lo es la generación mediante módulo fotovoltaicos. La propuesta consta de un módulo fotovoltaico de 3 W con dos baterías de 6.600 mAh. Las baterías proveen una autonomía de 12 horas, para el caso cuando se produzca un fallo en el que el módulo deje de funcionar.

Es importante mencionar que la implementación del prototipo sólo se ha realizado en laboratorio con un enfoque en la medición del consumo eléctrico. Se puede dar continuidad al proyecto implementando la colmena en terreno y con abejas para obtener datos reales y detectar oportunidades de mejora. Además, se puede continuar el trabajo agregando una base

de datos en tiempo real y un algoritmo que analice los datos y notifique al apicultor sobre alguna perturbación en la colmena.

Referencias

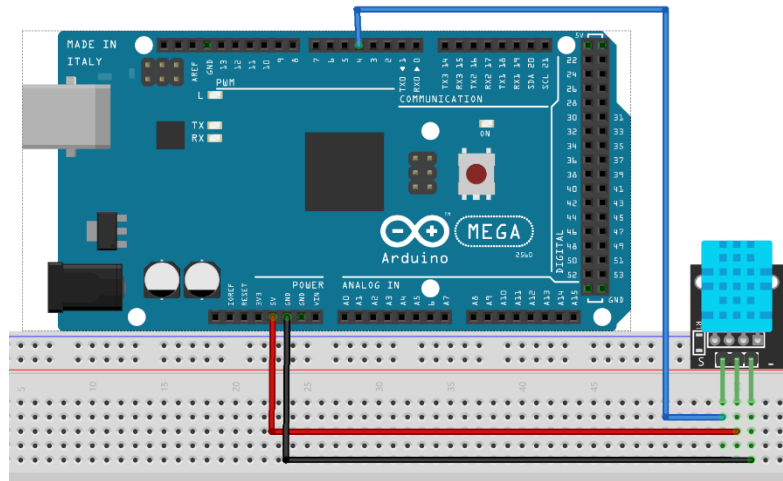
- [1] V. Carvajal, "Importancia de las abejas como polinizadores". ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL. [En línea]. Disponible en:
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/21021/1/Importancia%20de%20las%20abejas%20como%20polinizadores2a.pdf>
- [2] Fraunhofer Chile, "Polinización y agricultura sustentable".
https://www.fraunhofer.cl/content/dam/chile/es/documents/Newsite/FOLLETO_SEMINARIO_POLINIZACION.pdf
- [3] M. Cortés, S. Boza, P. Dinamarca, y M. Espinoza, "Estudio estratégico de la cadena apícola de Chile", Facultad de Ciencias Agronómicas Universidad de Chile y Asesorías Agrícolas y Agroindustriales Ltda., Santiago de Chile, nov. 2015. Accedido: 24 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/04/estudioCadenaApicola.pdf>
- [4] V. R. Pasupuleti, L. Sammugam, N. Ramesh, y S. H. Gan, "Honey, Propolis, and Royal Jelly: A Comprehensive Review of Their Biological Actions and Health Benefits", *Oxid. Med. Cell. Longev.*, vol. 2017, p. e1259510, jul. 2017, doi: 10.1155/2017/1259510.
- [5] La Vanguardia, "Las abejas están en peligro y, con ellas, también el ser humano", 4 de octubre de 2016.
<https://www.lavanguardia.com/natural/20161005/41771284333/abeja-peligro-humanos.html> (accedido 30 de julio de 2021).
- [6] A. Telese, "La importancia de las abejas en el mundo", Universidad de La Sabana, Working Paper, 2019. Accedido: 30 de julio de 2021. [En línea]. Disponible en:
<https://intellectum.unisabana.edu.co/handle/10818/38415>
- [7] María Gracia, "IoT - Internet Of Things", *Deloitte Spain*.
<https://www2.deloitte.com/es/es/pages/technology/articles/loT-internet-of-things.html> (accedido 30 de julio de 2021).
- [8] BEEP, "Technical specifications". <https://beep.nl/index.php/measurement-system-2/technical-specifications> (accedido 7 de octubre de 2021).
- [9] G. Montenegro, Ed., "MANUAL APICOLA". 2016. [En línea]. Disponible en:
<http://agronomia.uc.cl/extension/publicaciones-1/151-manual-apicola-indap-uc/file>
- [10] J. B. Magem, "COLMENA Y PORTANÚCLEO TIPO LANGSTROTH", Informe Técnico. [En línea]. Disponible en: <https://esf-cat.org/wp-content/uploads/2017/04/Informe-técnico-colmena-langstroth.pdf>
- [11] Servicio Agrícola y Ganadero, "Manual de Gestión Productiva-Sanitaria Y de Buenas Prácticas Apícolas". 2018. Accedido: 6 de agosto de 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/manual_gestion_productiva-sanitaria_apicola-sag-2018.pdf
- [12] Pollenitry, "Beebot - The Smart Hive Remote Monitoring System", *Pollenitry*.
<https://pollenitry.com/product/beebot/> (accedido 27 de febrero de 2022).

- [13] BEEP bee monitoring, *BEEP base – Automatic bee hive monitor available in BEEP webshop*, (22 de septiembre de 2020). Accedido: 27 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=jouLtSUC858>
- [14] OSBeehives, “BuzzBox Mini”. <https://www.osbeehives.com/products/buzzbox-mini> (accedido 27 de febrero de 2022).
- [15] BroodMinder, “BroodMinder–Citizen Science Kit”, *BroodMinder*. <https://broodminder.com/products/broodminder-citizen-science-kit> (accedido 27 de febrero de 2022).
- [16] Hero España, “La comunidad apícola”, *bee careful*. <https://www.bee-careful.com/es/la-vida-de-las-abejas/la-comunidad-apicola/> (accedido 5 de agosto de 2021).
- [17] S. Ferrari, M. Silva, M. Guarino, y D. Berckmans, “Monitoring of swarming sounds in bee hives for early detection of the swarming period”, *Comput. Electron. Agric.*, vol. 64, nº 1, pp. 72–77, nov. 2008, doi: 10.1016/j.compag.2008.05.010.
- [18] A. Zacepins, A. Kvisis, E. Stalidzans, M. Liepniece, y J. Meitalovs, “Remote detection of the swarming of honey bee colonies by single–point temperature monitoring”, *Biosyst. Eng.*, vol. 148, pp. 76–80, ago. 2016, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.05.012.
- [19] P. Jean–Prost, *Apicultura: conocimiento de la abeja. Manejo de la colmena (4a. ed.)*. Mundi–Prensa, 2007.
- [20] F. Edwards–Murphy, M. Magno, P. M. Whelan, J. O’Halloran, y E. M. Popovici, “b+WSN: Smart beehive with preliminary decision tree analysis for agriculture and honey bee health monitoring”, *Comput. Electron. Agric.*, vol. 124, pp. 211–219, jun. 2016, doi: 10.1016/j.compag.2016.04.008.
- [21] E. Stalidzans y A. Berzonis, “Temperature changes above the upper hive body reveal the annual development periods of honey bee colonies”, *Comput. Electron. Agric.*, vol. 90, pp. 1–6, ene. 2013, doi: 10.1016/j.compag.2012.10.003.
- [22] H. Human, S. W. Nicolson, y V. Dietemann, “Do honeybees, *Apis mellifera scutellata*, regulate humidity in their nest?”, *Naturwissenschaften*, vol. 93, nº 8, pp. 397–401, ago. 2006, doi: 10.1007/s00114–006–0117–y.
- [23] W. G. Meikle y N. Holst, “Application of continuous monitoring of honeybee colonies”, *Apidologie*, vol. 46, nº 1, pp. 10–22, ene. 2015, doi: 10.1007/s13592–014–0298–x.
- [24] N. Pérez *et al.*, “Continuous monitoring of beehives’ sound for environmental pollution control”, *Ecol. Eng.*, vol. 90, pp. 326–330, may 2016, doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.082.
- [25] M. Bencsik, J. Bencsik, M. Baxter, A. Lucian, J. Romieu, y M. Millet, “Identification of the honey bee swarming process by analysing the time course of hive vibrations”, *Comput. Electron. Agric.*, vol. 76, nº 1, pp. 44–50, mar. 2011, doi: 10.1016/j.compag.2011.01.004.
- [26] S. Gil–Lebrero, F. J. Quiles–Latorre, M. Ortiz–López, V. Sánchez–Ruiz, V. Gámiz–López, y J. J. Luna–Rodríguez, “Honey Bee Colonies Remote Monitoring System”, *Sensors*, vol. 17, nº 1, Art. nº 1, ene. 2017, doi: 10.3390/s17010055.
- [27] Final Test, “¿Que es un Datalogger?” <https://www.FinalTest.com.mx/product-p/art-4.htm> (accedido 31 de agosto de 2021).

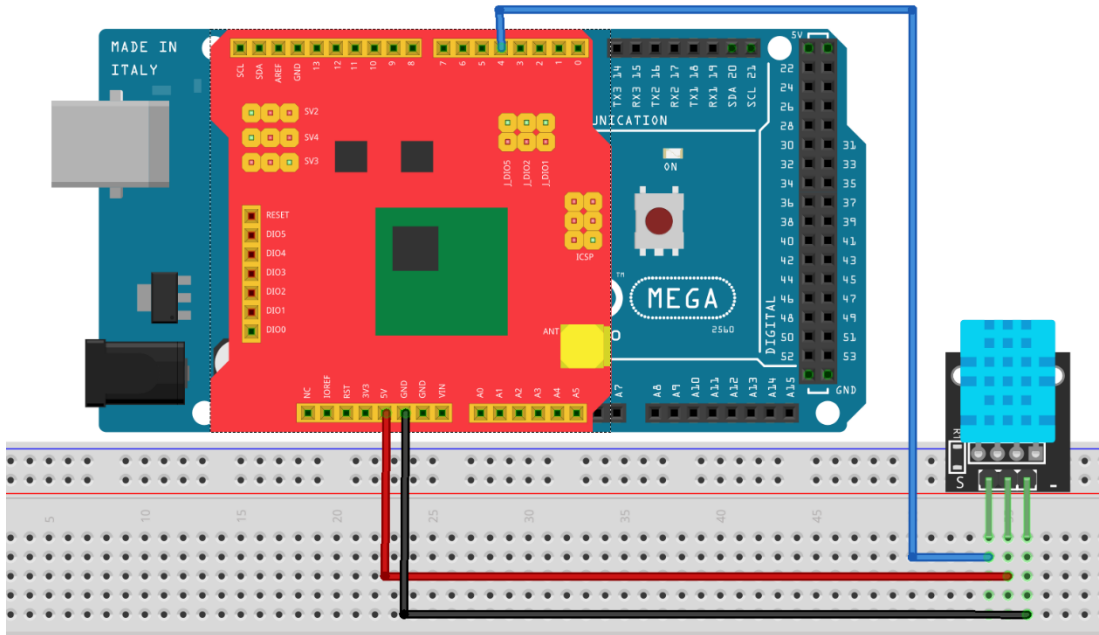
- [28] Grant Maloy, “¿Qué es un Data Logger y cómo funciona? | Dewesoft”, 3 de abril de 2020. <https://dewesoft.com/es/daq/que-es-un-data-logger> (accedido 31 de agosto de 2021).
- [29] Xfinity, “What Is WiFi and How Do I Get It?”, *Xfinity Help & Support*, 26 de agosto de 2021. <https://es.xfinity.com/support/articles/what-is-wifi> (accedido 31 de agosto de 2021).
- [30] J. Roca, “¿Qué es WiFi?”, *InformeTICfacil*, 6 de julio de 2013. <https://www.informeticplus.com/que-es-wifi> (accedido 31 de agosto de 2021).
- [31] LoRa Alliance, “What is LoRaWAN®”. noviembre de 2015. Accedido: 31 de agosto de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>
- [32] MCI electronics, “¿Qué es XBee?”, *XBee.cl*. <https://xbee.cl/que-es-xbee/> (accedido 31 de agosto de 2021).
- [33] L.-H. Yen y W.-T. Tsai, “The room shortage problem of tree-based ZigBee/IEEE 802.15.4 wireless networks”, *Comput. Commun.*, vol. 33, nº 4, pp. 454-462, mar. 2010, doi: 10.1016/j.comcom.2009.10.013.
- [34] Dragino, “LG01-N Single Channel LoRa IoT Gateway”. <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/143-lg01n.html> (accedido 26 de febrero de 2022).
- [35] W. Brokering y R. Palma, *Atrapando el sol en los sistemas eléctricos de potencia*, 1ª ed. Santiago de Chile, 2018. [En línea]. Disponible en: http://sepsolar.centroenergia.cl/pdf/libro_download.pdf
- [36] Gobierno de Chile: Ministerio de Energía, “Explorador Solar”. <https://solar.minenergia.cl/exploracion> (accedido 25 de febrero de 2022).

Anexos

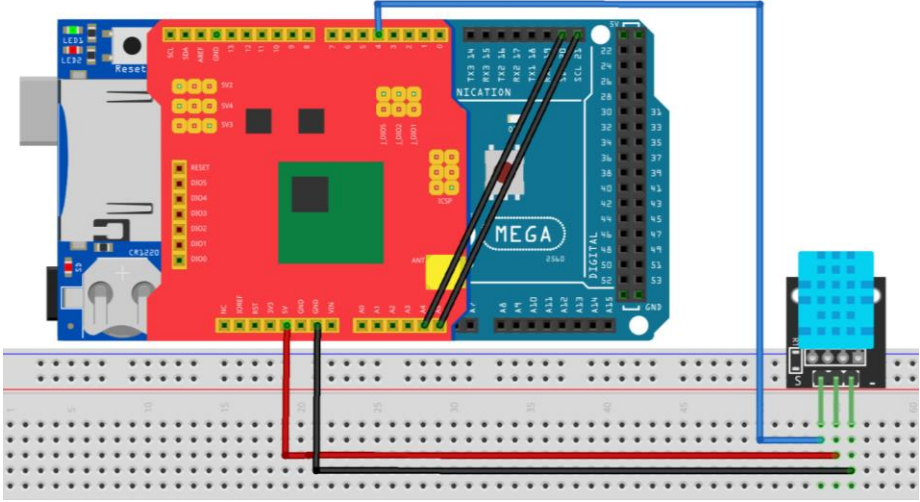
Anexo 1. Circuito del sistema con un Arduino Mega conectado con un sensor DHT11.



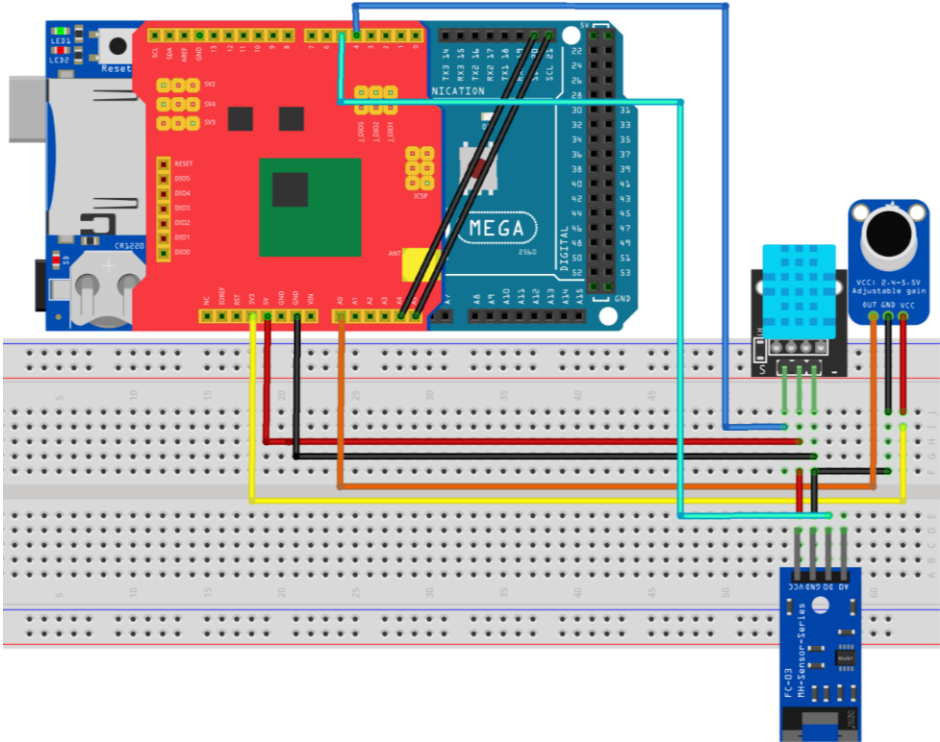
Anexo 2. Circuito del sistema conformado por un Arduino Mega conectado a un sensor DHT11 y un Shield de LoRa.



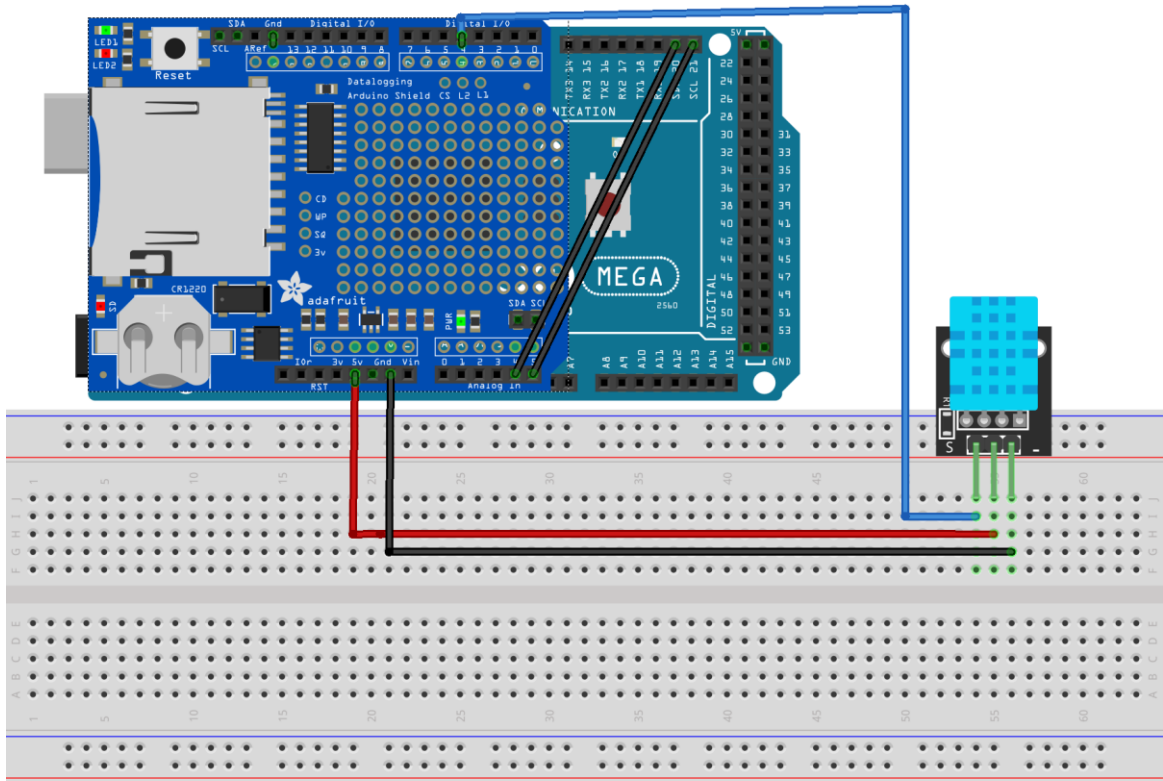
Anexo 3. Circuito del sistema conformado por un Arduino Mega conectado a un Data Logger, un Shield LoRa y un sensor Dht11.



Anexo 4. Circuito del sistema conformado por un Arduino Mega conectado a un Shield de LoRa, un data Logger, un sensor de DHT11, un micrófono y un sensor fotoeléctrico.



Anexo 5. Circuito del sistema conformado por un Arduino Mega conectado a un Data Logger Shield y un sensor DHT11.



fritzing

Anexo 6. Tabla de generación fotovoltaica mensual promedio de un módulo fotovoltaico monofacial de 3 W, instalado en posición horizontal y ubicado en la región Libertador Bernardo O'Higgins, cuyas coordenadas geográficas son: latitud $-34,21^\circ$ y longitud $-70,88^\circ$, obtenida desde el Explorador solar.

Meses	Generación FV (Wh)
Enero	0,456
Febrero	0,403
Marzo	0,325
Abril	0,223
Mayo	0,141
Junio	0,115
Julio	0,124
Agosto	0,165
Septiembre	0,241
Octubre	0,314
Noviembre	0,408
Diciembre	0,456

Anexo 7: figura de referencia de la ubicación de un sensor de temperatura (Hive sensor) dentro de una colmena [21].

