

# Design and Implementation of a Remote Monitoring System to Detect Contamination in Beehives

## (Diseño e implementación de un sistema remoto para la detección de contaminación en colmenas de abejas)

Alejandro Draper, Nicolás Obrusnik, Pablo Zinemanas, Pablo Monzón and Nicolás Pérez *Member, IEEE*

**Abstract** — The global use of agrochemicals and pesticides has increased due to the development of agricultural technologies. Evidence of the toxicity of these chemicals has been detected in beehives. In order to find the relationship between the ecosystem's contamination and the behavior of bees, we developed a device that samples audio and temperature in hives. This correlation would allow the use of apiaries as remote monitors of contamination.

This paper presents the design and implementation of the system, including both hardware and software specifications. The appliance takes samples on 14 channels: six to measure temperature and eight for audio, being the latter of up to 1 kHz. It calculates the Fast Fourier transform and keeps its module to represent the energy in each frequency band. All the information is locally stored in a flash memory card and is later sent to a remote server using GPRS.

The device is based on a Texas Instruments development board that uses the Stellaris LM4F232H5QD microcontroller. The system can be remotely configured and it is energetically autonomous since its battery is solar-charged.

**Index Terms** — audio, beehive, Fast Fourier transforms, microcontroller, pesticide contamination, spectrum.

### I. INTRODUCCIÓN

ENTRE los años 2000 y 2011 el área de suelo uruguayo dedicada a la agricultura aumentó 138% - de 673.000 ha a 1.604.000 ha [1]. Este incremento y los cambios tecnológicos utilizados en los cultivos incluyó el aumento del uso de pesticidas, y estos generalmente afectan negativamente la actividad apícola. Las abejas obreras vuelan en un radio de hasta 3 km en busca de alimentos [2]; y así se exponen a los pesticidas de las plantaciones. Se está estudiando la posibilidad de utilizar la colmena como un indicador de la dosis de pesticida aplicada en su zona de influencia, y de esta forma tener un sensor distribuido.

Este trabajo fue enviado para revisión al IEEE CHILECON2015 el 28 de julio de 2015. Este trabajo contó con el apoyo económico de la CSIC – Universidad de la República, Uruguay.

A. Draper, N. Obrusnik, P. Zinemanas y P. Monzón pertenecen al Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay (e-mail: alejandro.draper@fing.edu.uy, nicolas.obrusnik@fing.edu.uy, pzinemanas@fing.edu.uy, monzon@fing.edu.uy).

N. Pérez pertenece al Departamento de Ingeniería Aplicada a los Procesos Agrícolas y Biológicos, Centro Universitario de Paysandú, CENUR Litoral Norte, Universidad de la República. Paysandú, Uruguay (e-mail: nico@fisica.edu.uy).

Este trabajo se enmarca en el proyecto de investigación “Uso de la colmena como monitor cuantitativo de residuos de pesticidas aplicados en soja y su influencia en la sustentabilidad del agroecosistema”, un proyecto llevado a cabo por científicos de la Universidad de la República en conjunto con investigadores del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de Uruguay. Su objetivo es detectar residuos contaminantes a través de la colmena de abejas y sus productos.

Existen indicios de una posible relación entre el zumbido generado en la colmena y las condiciones del ecosistema. La abeja *Apis Mellifera* habita en colonias de entre 15.000 y 50.000 individuos [3] y por tanto se asume que en la colmena existe un patrón medio de sonido que contiene información acerca de su actividad y estado de salud. Dado el número de abejas, lo importante del patrón de sonido es el módulo de su estructura en frecuencia, usualmente denominada espectro. Se supone que el patrón de comportamiento de la colmena es afectado por la presencia de pesticidas y que puede detectarse a través de cambios en los patrones de sonido.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un dispositivo autónomo que adquiera las muestras de sonido para correlacionarlas con datos químicos y biológicos del ecosistema. Si la correlación existe, el patrón de sonido podría informar tempranamente de la contaminación por pesticidas.

### II. ANTECEDENTES

Existen numerosos trabajos que analizan la relación entre el comportamiento de animales o insectos y la salud de un ecosistema. A modo de ejemplo se presenta “Caracterización acústica de la colmena para detección temprana de contaminación por agroquímicos” [4] (CUP, Universidad de la República, Uruguay).

El montaje para este estudio incluyó un computador portátil con un micrófono omnidireccional tipo electret y una batería externa con autonomía de 48 horas. Se tomaron muestras continuas de 30 segundos del sonido en tres colmenas activas de la especie *Apis Mellifera*, con una frecuencia máxima de 11.000 Hz. Las muestras de 30 segundos están separadas entre sí por intervalos de 30 segundos.

Se buscó encontrar los picos de frecuencia relevantes y estudiar su variación a lo largo del día. Para esto:

- Se obtuvo el “espectro medio correspondiente al intervalo considerado”, calculando la Transformada

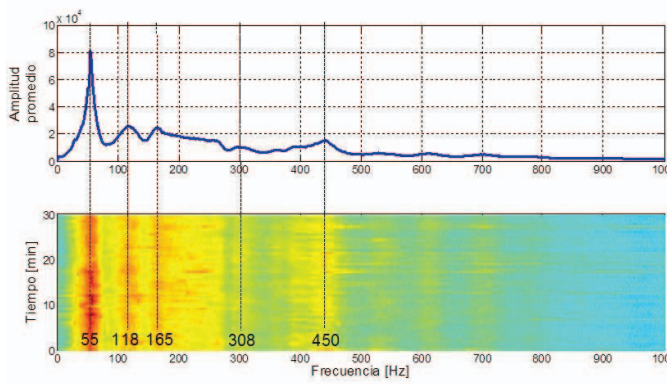


Fig. 1. Espectro de 12:30 pm a 1:00 pm.

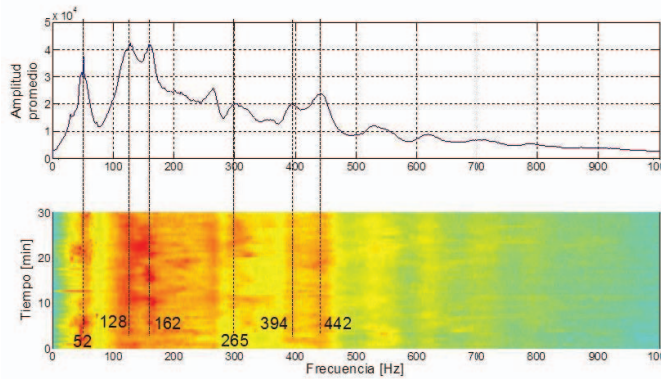


Fig. 2. Espectro de 4:30 pm a 5:00 pm.

Rápida de Fourier a las 30 tramas que se obtienen en media hora y promediando sus módulos.

- Se construyó el espectrograma, que muestra los cambios en el patrón de frecuencias en un día.

Las Figs. 1 y 2 muestran respectivamente los resultados para una misma colmena en dos momentos del día: mediodía y tarde.

Los autores concluyen que los momentos del día se caracterizan por componentes dominantes en determinadas frecuencias, por ejemplo las componentes en 52Hz y 53Hz. No se presentan resultados del vínculo que estos espectros pueden tener con las actividades concretas en la colmena, ni con la contaminación del ecosistema. De este trabajo también se desprende que el zumbido en la colmena no tiene componentes significativas en frecuencias mayores a 1000Hz. Este estudio inicial permitió definir una forma sistemática de obtener los datos de las colmenas. Para ello se diseñó y construyó un equipo con las características descritas a continuación.

### III. DISEÑO DEL HARDWARE

Para resolver el problema se definió el diagrama de bloques de la Fig. 3. Sus principales partes son:

1. Micrófonos y sensores de temperatura.
2. Adaptación de las señales.
3. Memoria externa
4. Transmisión.
5. Alimentación.

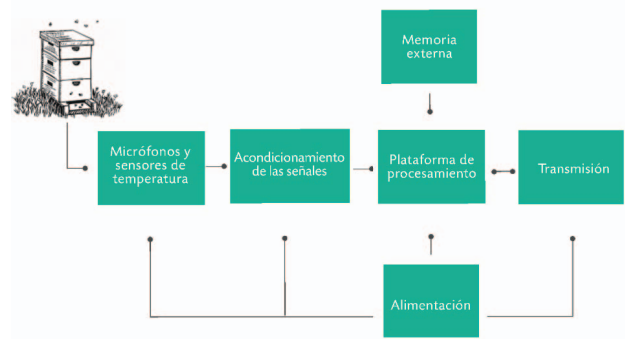


Fig. 3. Diagrama de bloques del sistema.

#### A. Micrófonos y sensores de temperatura

El sistema cuenta con ocho micrófonos y seis sensores de temperatura para ser colocados en diferentes colmenas cercanas entre sí. Puesto que las abejas cubren de cera cualquier objeto extraño que introducido en la colmena, se trabaja con un entepiso técnico: un compartimento especial para colocar los sensores, separado de la colmena por una rejilla metálica. Se utilizan micrófonos de condensador modelo ECM-60PC del fabricante Jameco [6], omnidireccionales y de respuesta en frecuencia plana entre 50 Hz y 1 kHz. Para realizar la adquisición de temperaturas se elige el circuito integrado LM35 [7] de respuesta lineal y sensibilidad de 10 mV/°C

#### B. Adaptación de las señales

Dado que es necesario filtrar y amplificar las señales de audio, se diseñó y fabricó un circuito específico. Este circuito consta de un filtro pasabajos con ganancia ajustable a 100 o 150 V/V. Para esto se construyó un amplificador de dos etapas con amplificadores operacionales en configuración inversora, y un filtro Butterworth de segundo orden. La ganancia variable permite adaptar individualmente la señal recibida de cada colmena. La frecuencia de corte es 750Hz. En la Fig. 4 se muestra el circuito adquisidor finalizado. Se utiliza el integrado LM324 que contiene cuatro amplificadores operacionales.

#### C. Plataforma de procesamiento

Este bloque realiza la toma de las decisiones, el muestreo de las señales, el cálculo de las FFT, el almacenamiento en memoria y la comunicación con el equipo transmisor de datos. Se utilizó la placa de desarrollo Stellaris EK-LM4F232 [8]. Esta incluye un microcontrolador de 80 MHz [9] que cuenta con un módulo de hardware que realiza operaciones en punto flotante, de gran utilidad para calcular las FFT.

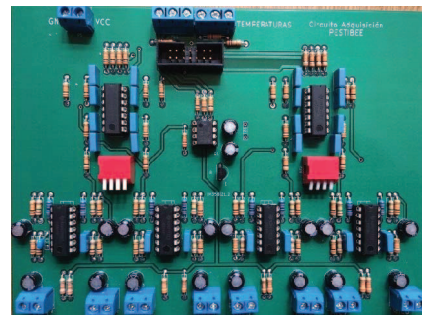


Fig. 4. PCB fabricado y soldado.

#### D. Memoria externa

Como es necesario almacenar los resultados en algún medio extraíble, se utilizó una memoria microSD de 8Gb. Esta capacidad garantiza, en el caso más exigente, el almacenamiento de los datos de un año.

#### E. Transmisión

Por tratarse de un sistema en un lugar aislado, se incluyeron las funciones de envío de resultados y mensajes del estado del sistema a un servidor remoto, y de recepción de comandos. Para ello, se utilizó un módulo GSM para plataformas Arduino. Este dispositivo utiliza el módem M10 de Quectel [10]. El microcontrolador es el encargado de comandar este módulo. Se seleccionó la tecnología GSM, en lugar de otras de tercera o cuarta generación, pues actualmente cuenta con mejor cobertura nacional en zonas rurales.

#### F. Alimentación

El sistema de alimentación consiste de un panel solar, una batería y una placa de control. La energía obtenida se almacena en la batería para poder alimentar el dispositivo cuando hay escasa irradiación solar. En la Fig. 5 se muestra la arquitectura utilizada. Los componentes son un panel solar de 20W, un circuito controlador de carga que implementa un algoritmo MPPT4, una batería de 12V y un convertidor DC-DC. Este último disminuye el voltaje de la batería a 5V; tensión requerida por la placa Stellaris, el módulo GSM y la placa de adquisición de audio. El controlador de carga se implementó con el integrado LT3652. En la Fig. 6 se observa una fotografía del circuito de alimentación.

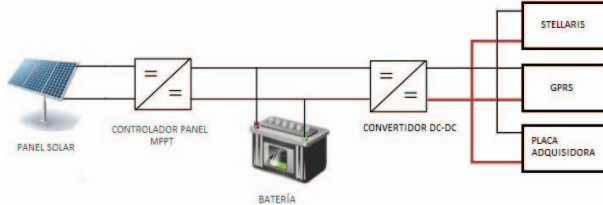


Fig. 5. Arquitectura del sistema de alimentación.

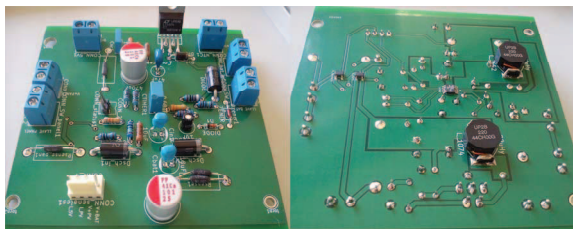


Fig. 6. PCB fabricada y soldada.

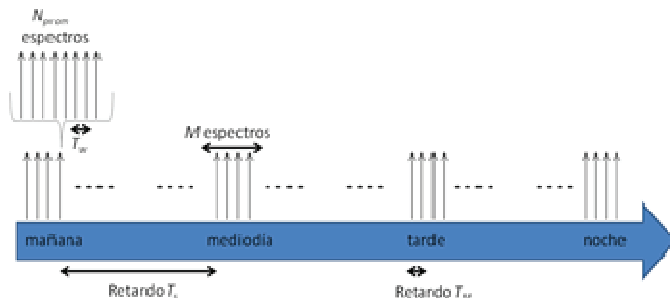


Fig. 7 Ciclo de funcionamiento.

#### IV. DISEÑO DEL SOFTWARE

El sistema se rige por un ciclo de funcionamiento definido por tres parámetros que se configuran de forma remota a través de una página web. La Fig. 7 muestra un esquema del ciclo.

1. Las trazas de sonido se adquieren en ventanas de ancho  $TW=1$  segundo. Para cada una de estas trazas, se calcula la FFT. La frecuencia de muestreo es de 2048Hz.
2. Para obtener el comportamiento medio de la señal, se decide calcular una FFT representativa de un minuto. Se define el parámetro  $N_{prom}$  como el número de trazas a promediar para representar el comportamiento medio de cada minuto. A estas muestras de  $N_{prom}$  segundos se les calculan sus FFT y se promedian los módulos. Se obtiene entonces un módulo de FFT por cada minuto.
3. Otra ventana de tiempo  $M$ , indica la cantidad de minutos consecutivos durante los que se realiza este proceso. Al final se tienen los módulos de  $M$  transformadas. En ese momento se envía la información de forma remota.
4. El parámetro  $T_s$  fija el período al cabo del cual se reinicia el ciclo.

A modo de ejemplo si se elige  $N_{prom} = 5$ ,  $M = 10$  y  $T_s = 20$  minutos, se realizará el muestreo durante un segundo y se calcula el módulo de las FFT de estas muestras. Este proceso se repite 5 veces en los segundos siguientes, luego se promedian los resultados y se espera hasta que transcurra un minuto. Este ciclo se repite 10 veces en los minutos siguientes. En este momento se tienen 10 módulos de FFT promediados, los cuales son almacenados en memoria y transmitidos hacia el servidor. El sistema espera que transcurran 20 minutos para reiniciar todo el proceso.

El desarrollo del software se realizó en el lenguaje C y se implementó una arquitectura Round Robin con interrupciones. Se programaron librerías para el control del programa y el manejo de las distintas partes del hardware. Se crearon cuatro modos de funcionamiento para el dispositivo:

- Modo *normal*. Se define con el ciclo presentado anteriormente.
- Modo de *bajo consumo*. Cuando se reconoce un período de inactividad, el microcontrolador se lleva a uno de sus estados de bajo consumo.
- Modo *sin señal*. Se activa cuando la señal de celular es muy pobre o si el voltaje de la batería es bajo. Se calculan las FFT y se guardan en la memoria pero no se envían al servidor. Este modo a su vez es una medida para economizar energía.
- Modo *debug*. Se implementó para configurar el sistema in situ utilizando una computadora. También permite muestrear señales con el objeto de fijar las ganancias del circuito de adaptación.



## V. ENSAMBLADO

Para poder ser utilizado en zonas rurales, el sistema se diseñó estanco al agua, polvo e insectos. Los distintos bloques se instalaron en cajas homologadas IP65, dentro de un tablero con igual grado de protección. Se construyó una estructura en aluminio, donde se montó el tablero y el panel fotovoltaico. La inclinación del panel es de  $30^\circ$  para maximizar la recolección de energía. En la Fig. 8 se muestran imágenes del equipo y su soporte.

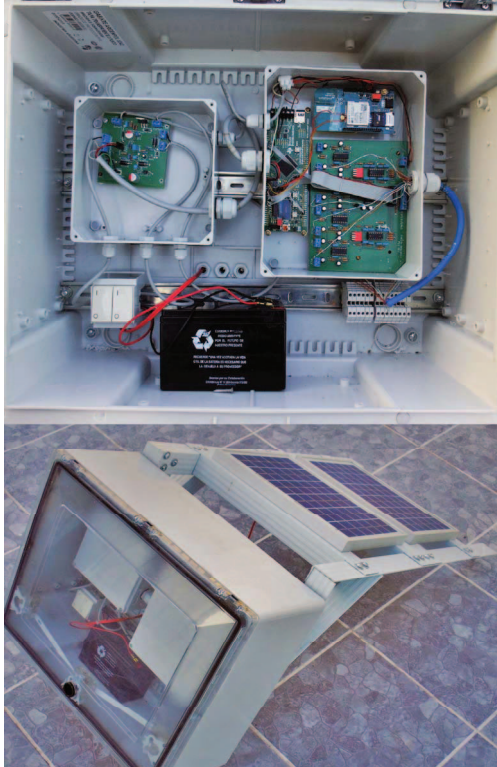


Fig. 8. Sistema ensamblado para pruebas en intemperie.

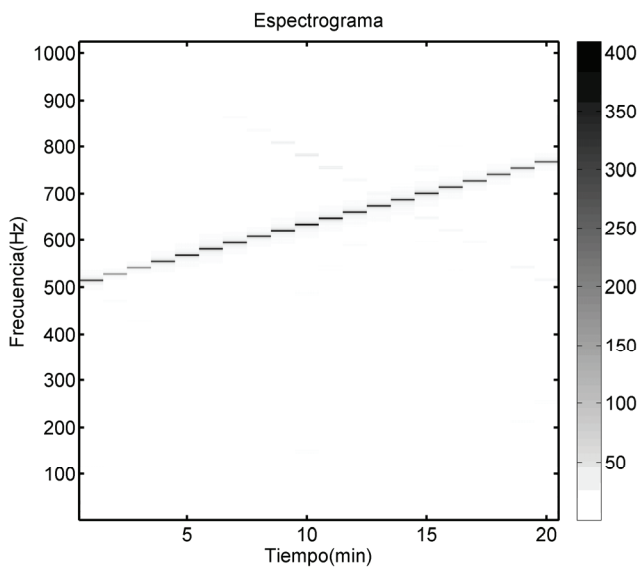


Fig. 9. Espectrograma de prueba de 20 min.

## VI. RESULTADOS

Se verificó tanto el muestreo y cálculo de los espectros de sonido como el funcionamiento autónomo del dispositivo durante períodos prolongados. Las pruebas se dividen en dos:

### A. Espectros

En primer lugar se reproducen con un altavoz señales sinusoidales conocidas y se grafican los archivos generados. Se comprueba que el espectro contiene una fundamental en la frecuencia de la onda utilizada.

Luego se reproduce una señal sinusoidal cuya frecuencia varía linealmente con el tiempo entre 500Hz y 800Hz (función *sweep* o barrido). Las muestras se toman durante una ventana de 20 minutos. Con las FFTs obtenidas de un canal se obtiene el espectrograma de la Fig. 9.

Se observa que las frecuencias de los máximos relativos varían con el tiempo de forma escalonada. Esto se debe a que la resolución temporal del espectrograma es de 1 minuto. Para esta señal, el promedio de los módulos de las FFT parece ser una buena representación del comportamiento en frecuencia. Por lo tanto, también se puede concluir que el sistema funciona correctamente en lo que a muestreo, cálculo de FFT y almacenamiento en memoria respecta.

### B. Pruebas de funcionamiento

Se instaló el equipo completo de manera que funcione ininterrumpidamente en condiciones normales. Se presentan los resultados tomados durante la primera semana de funcionamiento. El objetivo fue evaluar la autonomía del dispositivo y comprobar los ciclos de carga y descarga de la batería. Se estudian las curvas en función del tiempo de: tensión del panel, tensión de la batería, intensidad de corriente suministrada por el panel y por la batería al resto del sistema. En la Fig. 10 se grafican estos resultados obtenidos para un día de la prueba, en otoño.

Como se espera, la batería se carga cuando aumentan la corriente y tensión del panel. Luego de alcanzar un valor máximo, el circuito se alimenta únicamente desde el panel y el voltaje en la batería se mantiene constante. Comienza a disminuir aproximadamente a la hora 18:00, momento en el cual la irradiación solar recibida es mínima o nula.

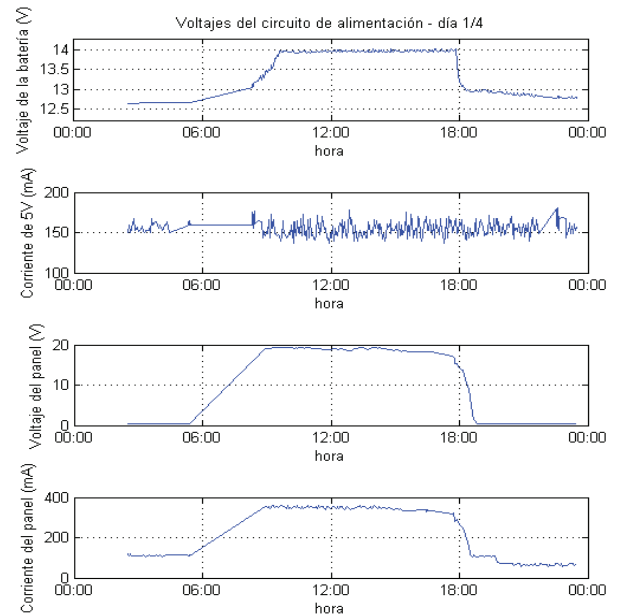


Fig. 10. Curvas de voltajes y corrientes del circuito de alimentación.

## VII. CONCLUSIONES

De acuerdo a las pruebas realizadas el equipo funciona adecuadamente con las especificaciones establecidas inicialmente. Por lo tanto, permitirá caracterizar los patrones de sonido de las colmenas y estudiar la posible relación entre estos patrones y la contaminación de las abejas por sustancias agrotóxicas.

Para cumplir con las distintas funciones el equipo se diseñó en forma modular y por lo tanto cada una de sus partes, como tales o con variantes, se pueden utilizar con la misma finalidad en otros contextos. A modo de ejemplo, el circuito de alimentación se puede emplear en cualquier aplicación que necesite alimentación autónoma del mismo orden de potencia. El resto del sistema es aplicable para el muestreo de cualquier señal eléctrica diferente de audio o temperatura; alcanza con hacer algunos cambios al circuito de adaptación. Sobre la programación del módulo GSM, la biblioteca desarrollada se puede utilizar en proyectos que trabajen con módulos similares. El sistema de adquisición de sonido puede utilizarse directamente en otras aplicaciones que utilicen la misma banda de frecuencias. El diseño del hardware está optimizado para trabajar en la banda de frecuencias menores que 1 kHz.

## VIII. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República y al Centro Universitario de Paysandú.

## REFERENCIAS

- [1] G. Freiria, "Producción" en *Anuario estadístico Agropecuario*, 1ra ed., vol. 17, Ed: Montevideo, Oficina de Estadísticas Agropecuarias, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2014, p. 25.
- [2] T. D. Seely, "Honeybees in Nature," en *Honeybee Ecology: a study of Adaptation in Social Life*, 1ra ed., vol. 1, Ed. Princeton: Princeton University Press, 1985, pp. 9–17.
- [3] P. Jean-Prost, Y. Le Conte, "La colonia de abejas" en *Apicultura: conocimiento de la abeja, manejo de la colmena*, 4ta ed., vol. 1, Ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2006, pp. 45–49.
- [4] N. Pérez, S. Niell, F. Jesús, C. Pérez, L. C. Letelier, Y. Mendoza y S. Díaz-Cetti. (2014, julio) "Caracterización acústica de la colmena para la detección temprana de contaminación por pesticidas" en *Revista Cangüé*, vol. 35, pp. 1-5.
- [5] J.O. Smith, (2007). *Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT) with Audio Applications* (2da ed.) [en línea]. Disponible: <https://ccrma.stanford.edu/~jos/st/Spectrograms.html>.
- [6] *Omni-Directional Electret Condenser Microphone Model ECM-60P Datasheet*, Jameco Electronics, 2011.
- [7] *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors Datasheet*, Texas Instruments Inc., Austin, TX, 1999.
- [8] *Stellaris LM4F232 Evaluation Board User's Manual*, Texas Instruments Inc., Austin, TX, 2011.
- [9] *Stellaris LM4F232H5QD Microcontroller Datasheet*, Texas Instruments Inc., Austin, TX, 2011.
- [10] *M10 Hardware Design, v1.01*, Shanghai Quectel Wireless Solutions Co. Ltd, Shanghai, 2009.