



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Sistema de monitoreo del sonido emitido por una colmena de abejas como herramienta para estudios comportamentales

Oscar Alejandro Amado Sarmiento

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2013

Sistema de monitoreo del sonido emitido por una colmena de abejas como herramienta para estudios comportamentales

Oscar Alejandro Amado Sarmiento

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Automatización Industrial

Director:
Ph.D., Johan Sebastian Eslava Garzon

Línea de Investigación:
Sistemas electrónicos de alto nivel, Sistemas de Instrumentación
Grupo de Investigación:
Grupo de Microelectrónica GMUN

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2013

A mis padres y a mi hermana, por ser un apoyo constante, por su amor, comprensión y ejemplo de vida.

A Juliana, por todo su amor y su apoyo.

A mis amigos, por los momentos compartidos y los que vendrán.

Agradecimientos

Al doctor Sebastian Eslava, Director de la Maestría en Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia, por su orientación en la elaboración de este trabajo. A los ingenieros Angela Alzate y David Montoya, por su trabajo en la realización de las pruebas en campo. A los ingenieros Sergio Navarro, Mauricio Asprilla, Angela Méndez, Octavio Marquez y Dario Cuello por su trabajo en hardware y software utilizado en este trabajo. A Yerman Avila, estudiante de la Maestría en Automatización Industrial, por sus correcciones sobre el documento y su asesoría sobre verificación de sistemas.

Resumen

Esta tesis presenta el diseño e implementación de un sistema de monitoreo del sonido y vibraciones mecánicas emitidas por una colmena de abejas para la detección de su comportamiento. El sistema propuesto está compuesto por un dispositivo electrónico ubicado en la colmena llamado Monitor Onerex y un sistema de información llamado Servidor Onerex. El monitor captura las señales, las procesa y las transmite al servidor, el cual almacena permanentemente la información e identifica el comportamiento de la colmena. El lugar de pruebas del sistema fue el Centro Agropecuario Marengo de la Universidad Nacional de Colombia, ubicado en el km 14 de la vía Mosquera - Bogotá. El sistema fue empleado en la detección del fenómeno *colmena huérfana* logrando identificar dicho fenómeno con una buena concordancia (70 % según el índice Kappa).

Palabras clave: Abejas, Procesamiento digital de señales, Sonido, comportamiento animal, sistemas embebidos.

Abstract

This thesis presents the design and implementation of a monitoring system which detect behavior of a beehive based on the mechanical vibrations and sound. The proposed system is composed by an electronic device located in the beehive called Monitor Onerex and an information system called Server Onerex. The monitor captures the signals, processes them and transmits them to the server, which stores information permanently and identifies the behavior of the beehive. The system was tested on Marengo Agricultural Center of the National University of Colombia, located at km 14 of the road Mosquera - Bogota. The system was used in the detection of the phenomenon *textit queenless beehive* identifying successfully this phenomenon with a good concordance (70 % with Kappa test).

Keywords: Honey bees, digital signal processing, sound, animal behavioral, embedded systems)

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
1. Introducción	1
2. Especificación de la plataforma de hardware del sistema Onerex	5
2.1. Requisitos generales del sistema Onerex	5
2.2. Señales de estudio y Sensores	7
2.2.1. Sonido y vibración producido por las abejas	7
2.2.2. Acelerómetro	10
2.2.3. Micrófono	12
2.2.4. Acondicionamiento de señal	17
2.3. Unidad de procesamiento y almacenamiento	18
2.4. Sistema de comunicación	19
2.4.1. Alcance o área de servicio	20
2.4.2. Robustez	20
2.4.3. Eficiencia energética	20
2.4.4. Costos de implementación	21
2.4.5. Matriz de ponderación	22
2.5. Especificaciones físicas y eléctricas	22
2.6. Especificaciones del monitor Onerex	23
3. Diseño de un algoritmo de procesamiento de señales para el análisis de los sonidos producidos por las abejas	25
3.1. Adquisición de la señal	25
3.2. Preproceso de la señal	26
3.3. Extracción de parámetros	26
3.3.1. RMS y Rugosidad	27
3.3.2. Puntos máximos de potencia en el espectro	27
3.3.3. Entropía	28
3.3.4. Acumulados de energía en el espectro	30
3.3.5. Sumatoria de la energía por intervalos de frecuencia	31

3.4.	Análisis de componentes principales PCA	31
3.5.	Clasificación e identificación	34
3.5.1.	K-means	34
3.5.2.	Método aglomerativo - AGNES	34
3.5.3.	Método divisivo - DIANA	35
3.5.4.	Redes neuronales artificiales - ANN	35
3.6.	Algoritmo de procesamiento del sistema Onerex	35
4.	Diseño del sistema de información Onerex	37
4.1.	Descripción general	37
4.2.	Metodología para el diseño del Sistema de Información	38
4.2.1.	Captura de requisitos con los interesados (stakeholders)	38
4.2.2.	Especificar y validar los requisitos de software	39
4.2.3.	Desarrollo del software	39
4.3.	Acta de constitución del Sistema de Información Onerex	39
4.3.1.	Recursos asignados	40
4.3.2.	Descripción del producto	40
4.3.3.	Restricciones y Supuestos	40
4.4.	Elicitación de requerimientos	41
4.4.1.	Requerimientos funcionales	41
4.4.2.	Requerimientos no funcionales	42
4.5.	Casos de uso	42
5.	Implementación y verificación del sistema Onerex	45
5.1.	Implementación del Monitor Onerex - Hardware	45
5.1.1.	Especificaciones del monitor Onerex	45
5.1.2.	Tarjeta Principal	46
5.1.3.	Periféricos y conexiones	47
5.1.4.	Montaje físico y suministro de energía	48
5.2.	Verificación del Monitor Onerex - Hardware	50
5.3.	Implementación del Monitor Onerex - Software	51
5.3.1.	Cadena de herramientas, Kernel de Linux y Sistema de archivos	51
5.3.2.	Aplicación Principal del Monitor Onerex	51
5.4.	Verificación funcional y evaluación de desempeño del Monitor Onerex - Software	52
5.4.1.	Métricas de error de computo para DWT	52
5.4.2.	Métricas de error de computo para la estimación espectral de Welch	52
5.4.3.	Métricas de tiempo de ejecución	53
5.5.	Pruebas del Monitor Onerex en Campo	55
5.5.1.	Análisis de componentes principales PCA	56
5.5.2.	Estimación del número de clusters	57

5.5.3. Clasificadores usados	58
5.5.4. Evaluación de desempeño de los clasificadores	60
5.5.5. Ajuste del algoritmo	62
5.6. Implementación del Servidor Onerex	62
5.6.1. Aplicación Web	63
5.6.2. Base de datos	64
6. Conclusiones y trabajo futuro	65
6.1. Conclusiones	65
6.2. Trabajo Futuro	66
A. Anexo: Pruebas con el Monitor Onerex en Campo	67
A.1. Bitacora de visitas al apiario	67
A.2. Análisis de los datos con estadística descriptiva	69
Bibliografía	72

Lista de Figuras

2-1. Mapa del Centro Agropecuario Marengo.	6
2-2. Diagrama general del sistema Onerex.	7
2-3. Espectro del sonido de la abeja <i>Apis Mellifera</i> europea (izquierda) y <i>Apis Mellifera</i> africanizada (derecha) [36]	8
2-4. Espectro de frecuencias del silbido y el zumbido generado por una abeja <i>Apis Mellifera Cypria</i> [56]	8
2-5. Espectro de frecuencias del sonido emitido por la <i>Apis Mellifera Ligustica</i> durante el día, la noche y el enjambre [25]	9
2-6. Espectrograma del sonido generado por una abeja <i>Apis Mellifera Ligustica</i> en enjambre [25]	9
2-7. Diagrama general de un acelerómetro [79]	10
2-8. Diagrama de un acelerómetro piezoresistivo [75]	11
2-9. Diagrama de un acelerómetro piezoeléctrico [28]	11
2-10. Diagrama de un acelerómetro diferencial capacitivo [43]	11
2-11. Diagrama general de un micrófono.	13
2-12. Respuesta en frecuencia típica para un micrófono electret WM-63PR [55] .	13
2-13. Patrones de directividad característicos. [54]	14
2-14. Diagrama de un micrófono tipo condensador [64]	15
2-15. Diagrama de un micrófono tipo condensador electret [64]	15
2-16. Diagrama de un micrófono magnético o de bobina móvil [64]	15
2-17. Diagrama de un micrófono piezoeléctrico [64]	16
2-18. Arquitectura del sistema Apidictor [6]	19
2-19. Eficiencia energética [mJ/Mb] por estándar	21
2-20. Valor comercial de los componentes por número de monitores	22
3-1. Esquema general para el procesamiento de señales [58]	25
3-2. Diagrama de flujo para el cálculo de los parámetros RMS y Rugosidad . . .	28
3-3. Diagrama de flujo para el cálculo de los valores máximos de potencia en el espectro	29
3-4. Diagrama de flujo para el cálculo del parámetro entropía	30
3-5. Diagrama de flujo para el cálculo de acumulados de energía en el espectro . .	32
3-6. Diagrama de flujo para el cálculo de la sumatoria de energía por intervalos de frecuencia	33

3-7. Intervalos de frecuencia definidos para el cálculo de la energía	33
3-8. Diagrama de una neurona artificial [7]	35
3-9. Diagrama detallado del algoritmo de procesamiento de señales del sistema Onerex.	36
4-1. Diagrama general del sistema de información Onerex	37
4-2. Mapa del Centro Agropecuario Marengo.	40
4-3. Diagrama UML de la capa de aplicación en la comunicación Monitor - Servidor Onerex	41
5-1. Diagrama general de AndroidStamp [41]	47
5-2. Diagrama general de la tarjeta principal del Monitor Onerex	48
5-3. Diagrama del montaje físico del Monitor Onerex	49
5-4. Fotografía del Monitor Onerex	49
5-5. Diagrama de conexión del suministro eléctrico y el Monitor Onerex	50
5-6. Entorno de verificación de software utilizado	53
5-7. Tiempo de ejecución respecto al tamaño de la ventana Welch	54
5-8. Tiempo de ejecución respecto a la duración del archivo .WAV con frecuencia de muestreo 8000kHz	55
5-9. Diagrama detallado de las etapas realizadas en la prueba en campo del sistema	56
5-10. Aporte a la varianza por componente	57
5-11. Círculo de correlaciones para los parámetros de la señal de Audio	57
5-12. Número de clusters óptimo según la suma de cuadrados dentro los clusters para la señal de audio	58
5-13. Número de clusters óptimo según la suma de cuadrados dentro los clusters para la señal de vibración	58
5-14. Diagrama de la ANN implementada para la clasificación de los datos	60
5-15. Histograma para el parámetro frecuencia al 95 % para Sonido y Vibración	62
5-16. Arquitectura del servidor Onerex	63
5-17. Capturas de pantalla de la aplicación web del servidor Onerex	64
5-18. Diagrama Entidad-Relación de la base de datos del servidor Onerex	64
A-1. Diagrama de caja de los parámetros de la señal de audio	70
A-2. Diagrama de caja de los parámetros de la señal de vibración	71

Lista de Tablas

2-1.	Acelerómetros usados en sistemas de monitoreo de abejas [11, 47, 19, 31, 2] .	12
2-2.	Micrófonos usados en sistemas de monitoreo de abejas[25, 61, 63, 56, 47, 14]	16
2-3.	Comparacion de plataformas de hardware basadas en un SoC [42, 41, 77, 9] .	18
2-4.	Eficiencia energética de circuitos integrados por estandar [39, 84]	21
2-5.	Costo de los componentes del sistema de comunicación	22
2-6.	Ponderación de criterios para la selección del protocolo de comunicación . . .	22
2-7.	Especificaciones del monitor Onerex	23
5-1.	Especificaciones del monitor Onerex	45
5-2.	Relación señal a ruido (SNR) de grabaciones en ambiente controlado	50
5-3.	Estimación del error del algoritmo DWT implementado en el monitor Onerex [3]	52
5-4.	Resultados del entorno de verificación	54
5-5.	Tiempo de ejecución del programa principal del Monitor Onerex	55
5-6.	Ejemplo de una matriz de confusión para un resultado ideal	60
5-7.	Evaluación de los clasificadores con datos del Sonido	61
5-8.	Evaluación de los clasificadores con datos de la Vibración	61
A-1.	Correlación entre parámetros de Vibración y Sonido	69
A-2.	Correlación entre parámetros de Audio	69
A-3.	Correlación entre parámetros de Vibración	69

1. Introducción

Las abejas son de especial interés, dado que son productoras de alimentos de consumo humano y cumplen un papel importante en el proceso de polinización [76]. En Colombia el campo apícola productivo es un sector primario de la economía que tiene un impacto positivo en los resultados a nivel agrícola y medioambiental. [82, 27, 65, 48]

Debido a la importancia económica de las abejas a nivel nacional y mundial, se han desarrollado investigaciones en los siguientes campos [48]:

- Mejoramiento genético
- Buenas prácticas de apicultura
- Agroindustria y producción apícola
- Estudio del comportamiento de las abejas

En esta ultima área de investigación se reportan diferentes trabajos donde se evidencia la correlación existente entre el sonido y las vibraciones generadas por las abejas y su comportamiento bajo ciertas condiciones [81, 24, 36, 20, 25, 11, 52]. Estos trabajos tienen una característica en común: el uso de sensores para capturar sonido y vibraciones mecánicas. En 1957 un dispositivo llamado *Apidictor* fue patentado por Woods [81] para el monitoreo de las colmenas y, en 1967, Esch propuso un modelo del sonido generado por las abejas [24]. En 1989 Kerr diseño un dispositivo que logró identificar el tipo de abeja (europea o africanizada) por el sonido emitido [36].

Trabajos más recientes han contado con sistemas de adquisición de datos en las colmenas con procesamiento de información en un computador. En estos estudios, las variables físicas de interés fueron: sonido, humedad relativa, temperatura [25], vibraciones de la colmena [11] y el conteo de individuos a la entrada de la colmena [62]. Estos trabajos lograron identificar el comportamiento de interés en las abejas a través del procesamiento de las señales adquiridas.

Otros trabajos han estudiado el comportamiento de las abejas con grabaciones de video [61]. Estos trabajos no han contado con sistemas de procesamiento de señales y toda la investigación ha sido a partir de análisis detallados por parte de los investigadores. Adicionalmente,

el procesamiento de señales bidimensionales, como el video, es más costoso computacionalmente que el procesamiento de señales unidimensionales.

En 2009 David Atauri propuso un sistema de procesamiento de señales de audio en tiempo real [6], donde evaluó sonido y temperatura. El sonido se capturó durante ocho segundos cada hora y de éste se extrajeron parámetros que luego fueron transmitidos inalámbricamente y centralizados en un servidor. No obstante, este sistema no propone la calificación de los registros almacenados que permita identificar comportamientos de la colmena. Otro trabajo propuso el uso de un acelerómetro [11] para capturar las vibraciones de una colmena en vez de un micrófono, generando ventajas como la inmunidad al ruido y el uso de un sensor no invasivo. Sin embargo, esta solución empleó un sensor altamente costoso.

En el país la investigación sobre abejas y apicultura ha sido desarrollada principalmente por la Universidad Nacional de Colombia, la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), la Universidad del Tolima, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), la Universidad de los Andes y la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ) [48]. Sin embargo, las investigaciones donde se diseñó un sistema de monitoreo, han sido desarrolladas por la Universidad de Cundinamarca y la Universidad Nacional de Colombia. En 2011 el Grupo de Investigación en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (GITEINCO) de la Universidad de Cundinamarca desarrolló un sistema de monitoreo para evaluar el efecto de las abejas en la polinización de cultivos [52] capturando la temperatura, humedad relativa y empleando una registradora de abejas.

El Grupo Apícola de la Universidad Nacional (GAUN) ha trabajado desde el año 1999 en la investigación y transferencia de tecnología necesaria para el adecuado desarrollo de la apicultura en el país. El GAUN también ha incentivado la explotación apícola, formando personal, asesorando la implementación de nuevos apiarios y monitoreando los existentes.

El Grupo de Microelectrónica de la Universidad Nacional (GMUN) ha venido trabajando en sistemas de instrumentación, sistemas electrónicos de alto nivel y fuentes alternativas de energía. El GMUN se ha vinculado al trabajo del GAUN con el desarrollo de diez trabajos de grado en ingeniería electrónica[31, 10, 30, 74, 2, 50, 19, 8, 1, 51], enfocados en la captura y almacenamiento del sonido, vibraciones, temperatura, humedad relativa y niveles de CO₂, el procesamiento de señales y el diseño de soluciones de suministro de energía eléctrica para los equipos de monitoreo.

En los trabajos anteriores no se ha desarrollado un sistema de monitoreo que incluya una etapa de clasificación de los registros según el comportamiento o estado de la colmena. Estos antecedentes, junto con la existencia de técnicas de procesamiento de señales y de hardware capaz de ejecutar dichos algoritmos, generan un panorama prometedor para el trabajo con

señales de audio y vibraciones mecánicas.

El propósito de este trabajo es el diseño de un sistema de monitoreo (Sistema de Monitoreo Onerex) para la captura y procesamiento del sonido emitido por las abejas como herramienta para estudios comportamentales. Dado al gran número de comportamientos reportados en las colmenas de abejas [13, 14, 24, 56, 25, 11, 47, 32], el sistema de monitoreo presentado es verificado en campo con el fenómeno *colmena huérfana*. A diferencia de la mayoría de los antecedentes mencionados en este campo, el procesamiento de las señales no se hará en un computador, sino que se implementará en un sistema embebido reduciendo costos, consumo energético y espacio. Adicionalmente, el sistema de monitoreo incluirá un servidor que almacenará la información recolectada de los equipos instalados en campo.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es el diseño e implementación de un sistema de monitoreo Hardware - Software para la captura y procesamiento del sonido emitido por las abejas. Los objetivos específicos planteados son:

- a) Especificar e implementar una plataforma de hardware que sea la base del sistema de monitoreo.
- b) Seleccionar e implementar un algoritmo de procesamiento de señales adecuado para el análisis de los sonidos producidos por las abejas.
- c) Especificar e implementar una aplicación que visualice la información de varios equipos de monitoreo conectados inalámbricamente.

El documento presenta el siguiente orden: en el Capítulo 2 se presentan las especificaciones de la plataforma de hardware del sistema Onerex (Monitor Onerex) y las consideraciones técnicas que llevaron a estas. En el Capítulo 3 se describe el proceso de diseño del algoritmo de procesamiento de señales del sistema Onerex. En el Capítulo 4 se presenta la metodología empleada para el diseño del Sistema de Información del Sistema Onerex (Servidor Onerex). En el Capítulo 5 se describe la implementación y verificación del sistema Onerex de acuerdo a las especificaciones enunciadas en los capítulos 2, 3 y 4. Finalmente, en el Capítulo 6, se dan las conclusiones del trabajo de investigación y se proponen trabajos futuros.

2. Especificación de la plataforma de hardware del sistema Onerex

2.1. Requisitos generales del sistema Onerex

El objetivo de este trabajo de investigación es desarrollar un sistema de monitoreo para la captura y procesamiento del sonido y vibraciones mecánicas emitidas por las abejas. El sistema permitirá estudiar el comportamiento en la colmena sin la presencia de un humano en su entorno, debido a que la visita de personas a los apiarios suele generar estrés en las abejas y alterar su comportamiento [14]. Para efectos del monitoreo de la colmena, las variables a medir son el sonido y la vibración mecánica, dado que varios estudios han demostrado una correlación entre éste y fenómenos etológicos en el apiario [81, 25, 6, 11]. Por lo tanto, el sistema debe realizar las siguientes tareas:

1. Capturar el sonido y las vibraciones mecánicas al interior de la colmena.
2. Procesar las señales capturadas.
3. Transmitir la información procesada a un servidor.
4. Visualizar la información al usuario final.

El lugar de operación del sistema es el Centro Agropecuario Marengo de la Universidad Nacional de Colombia, ubicado en el km 14 de la vía Mosquera - Bogotá. El apiario utilizado para las pruebas se encuentra en las coordenadas N 4°41'2.81" W 74°12'51.08". En la Figura 2-1 se muestra la ubicación del apiario y de la oficina del grupo de apicultura. Adicionalmente, el sistema Onerex debe operar bajo las siguientes condiciones:

1. Dado que el apiario se encuentra a la interperie, el monitor Onerex debe soportar las condiciones ambientales características del lugar:

Temperatura (°C): Mínima: 0 Promedio: 12 Máxima: 22

Humedad relativa (%): Mínima: 45 Promedio: 86 Máxima: 100

2. Los módulos del sistema que estén dentro de la colmena deben estar protegidos, puesto que las abejas cubren cualquier objeto extraño a la colmena con propóleo.

3. El sistema que se instale en el campo debe operar con baterías eléctricas y/o paneles solares.
4. El costo final del sistema debe ser bajo sin comprometer el desempeño del mismo. Por esta razón el software utilizado (para desarrollo y uso) debe ser gratuito y de preferencia de código abierto.



Figura 2-1.: Mapa del Centro Agropecuario Marengo.

De acuerdo a las condiciones de operación y las especificaciones funcionales presentadas el sistema Onerex estará compuesto por un monitor y un servidor. El monitor es un equipo electrónico encargado de capturar las señales, procesarlas y transmitir las al servidor. Este último es el encargado de centralizar la información de los monitores conectados al sistema y de visualizar la información a los usuarios. El diagrama general del sistema Onerex se presenta en la Figura 2-2 y se compone de los siguientes módulos:

- a) **Sensores:** Son los responsables de capturar el sonido y la vibración al interior de la colmena. En este módulo se incluye el acondicionamiento de la señal.
- b) **Unidad de procesamiento y almacenamiento:** Incluida en el sistema Onerex para el procesamiento y almacenamiento temporal de las señales capturadas.
- c) **Sistema de comunicación:** Módulo encargado de enlazar los monitores Onerex con el Sistema de Información Onerex.
- d) **Sistema de información:** Módulo encargado del almacenamiento permanente de la información procesada y de la visualización de los datos para los usuarios. Este módulo se presenta en el Capítulo 4.



Figura 2-2.: Diagrama general del sistema Onerex.

2.2. Señales de estudio y Sensores

En esta sección se presenta una revisión del sonido y la vibración producidos por las abejas. Con base en esta revisión, posteriormente se presentan las consideraciones para la selección los sensores (micrófono y acelerómetro) del monitor.

2.2.1. Sonido y vibración producido por las abejas

El sonido y las vibraciones son una forma de comunicación de las abejas [38, 35]. Este sonido le permite a un apicultor experimentado identificar el estado de salud de una colmena sin tener que abrirla [81]. El sonido característico de las abejas es producido por el movimiento de sus alas y tiene componentes de frecuencias entre los 200 Hz y 600 Hz [24]. Sin embargo, las abejas pueden emitir otro tipo de sonidos dependiendo de fenómenos que ocurran en la colmena o a su alrededor [13, 14]. Otro factor a tener en cuenta es la presencia de armónicos en el sonido generado por las abejas [24]. En la literatura, el sonido reportado con mayor frecuencia es de 6,8 kHz [24, 56] y para frecuencias mayores a 11 kHz el sonido es lo suficientemente leve para considerarse ruido [23].

Según la especie o subespecie, las abejas emiten sonidos diferentes [36, 56, 47]. En la Figura 2-3 se presenta el espectro de frecuencias del sonido generado por la abeja *Apis Mellifera* europea y africanizada, donde se ven diferencias en la frecuencia fundamental, armónicos y amplitud. En Colombia las abejas son de la especie *Apis Mellifera* africanizada.

En la mayoría de los trabajos consultados, el estudio del sonido se ha enfocado en el análisis frecuencial y temporal. Adicionalmente, la amplitud del sonido ha sido reportada en unidades arbitrarias o en decibeles sin indicar un valor de referencia. El trabajo desarrollado por HrnCir [47] si reporta gráficas con amplitudes en unidades del Sistema Internacional. El valor máximo de amplitud del sonido es 0.2 Pa, mientras que el valor máximo de vibración es 0.2 mm/s^2 . Estos valores fueron capturados con un montaje en la entrada de la colmena y corresponden al sonido y vibración generados por una abeja.

Algunos fenómenos de las abejas ya han sido correlacionados con cierto tipo de sonido o vibración. Varios estudios se han desarrollado para predecir el enjambre de una colmena [25,

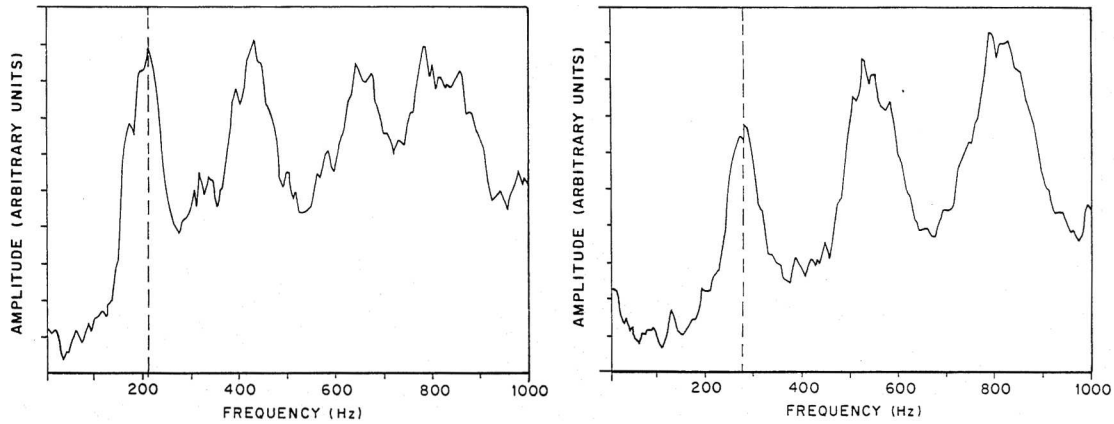


Figura 2-3.: Espectro del sonido de la abeja *Apis Mellifera* europea (izquierda) y *Apis Mellifera* africanizada (derecha) [36]

11]. Algunos se han enfocado en el proceso de recolección de alimento [47, 32], la detección de sustancias tóxicas en el ambiente [13] y la respuesta de las abejas al ataque de un depredador [56]. Otro tipo de comportamientos son identificables a partir del sonido. Algunos de estos son: a) condiciones de estrés (por múltiples razones), b) una colmena infestada por parásitos y c) una colmena con o sin reina (colmena huérfana)[13]. Algunos sonidos característicos ya han sido reportados, el silbido y el zumbido. El espectro de frecuencias de estos sonidos se muestra en la Figura 2-4[56].

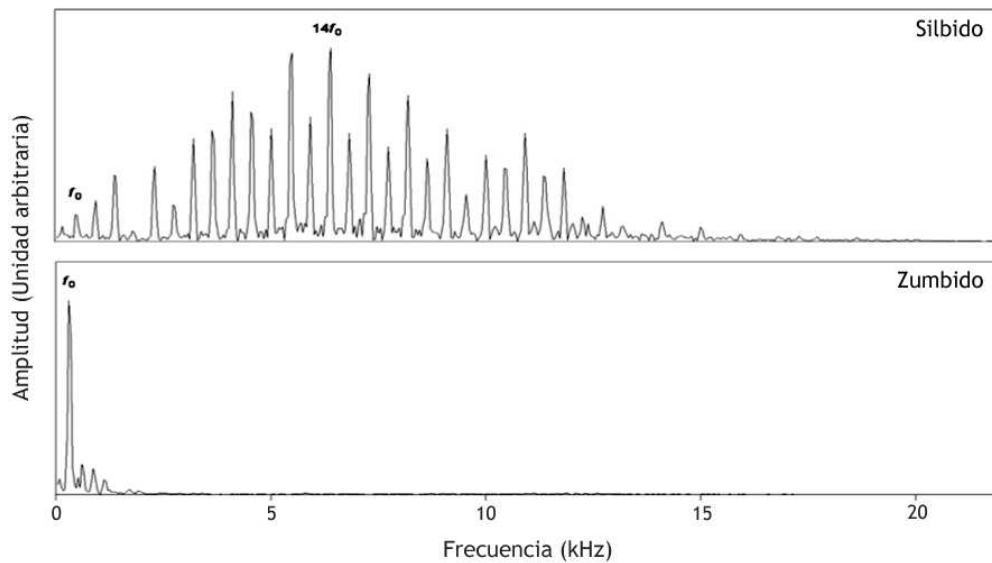


Figura 2-4.: Espectro de frecuencias del silbido y el zumbido generado por una abeja *Apis Mellifera Cypria* [56]

En la Figura 2-6 se presenta el espectrograma del sonido capturado de una colmena en enjambre. Apparently el enjambre se puede modelar como ruido blanco, pero si se compara

con la Figura 2-5, que presenta el análisis espectral de frecuencias del sonido emitido por las abejas en tres diferentes momentos (día, noche y enjambre), hay cambios en la amplitud en las frecuencias de 220 Hz y 440 Hz [25].

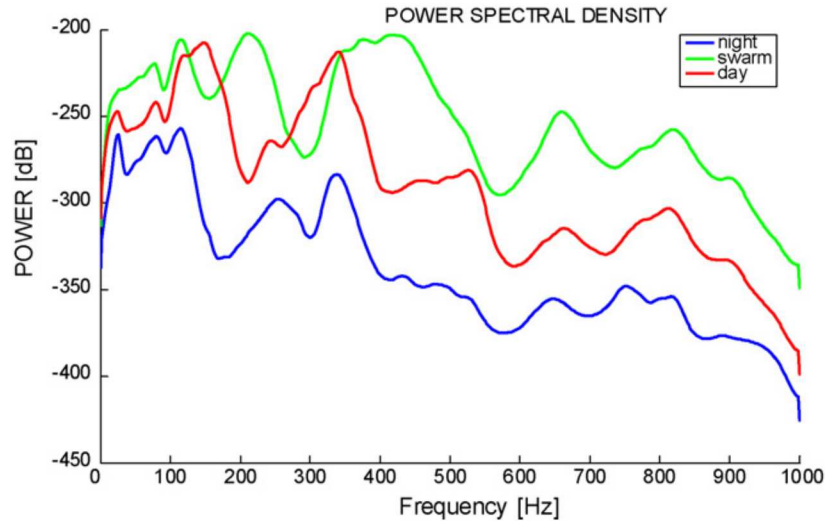


Figura 2-5.: Espectro de frecuencias del sonido emitido por la *Apis Mellifera Ligustica* durante el día, la noche y el enjambre [25]

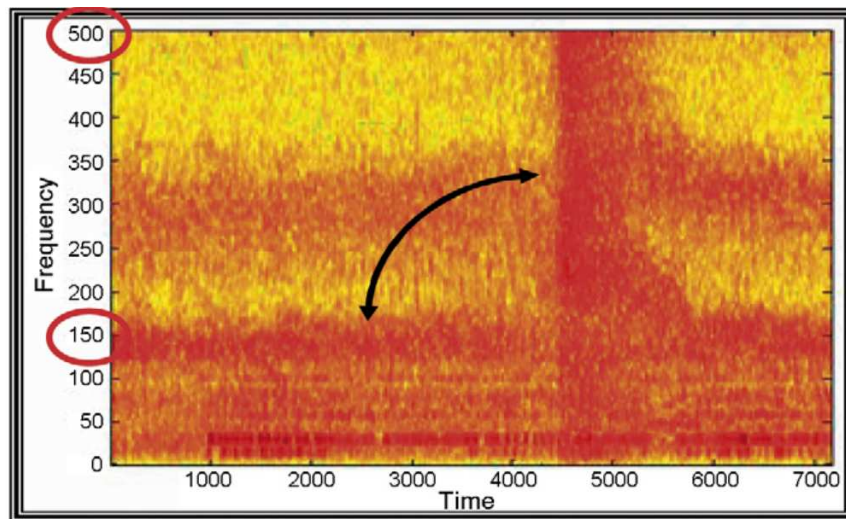


Figura 2-6.: Espectrograma del sonido generado por una abeja *Apis Mellifera Ligustica* en enjambre [25]

Por lo tanto, basados en las características de las señales de estudio presentadas anteriormente, el sistema Onerex grabará y procesará el sonido en el intervalo de frecuencias de 20 Hz a 11 kHz. El procesamiento de la señal de audio será en el dominio del tiempo y la frecuencia. Los sensores incluidos en el monitor Onerex para la captura de las ondas acústicas son un micrófono y un acelerómetro.

2.2.2. Acelerómetro

Este sensor mide la aceleración a la que es sometido. El principio de funcionamiento generalmente consiste en una masa acoplada a un sistema suspensión, como se presenta en la Figura 2-7. Cuando el sensor es sometido a una aceleración la masa se desplazará con respecto a un punto de referencia, lo cual puede ser medido electricamente [83]. Antes de convertir la aceleración en una señal eléctrica el sensor convierte la energía mecánica en fuerza o desplazamiento. Al acoplar el acelerómetro mecánicamente a la colmena, este detecta variaciones de velocidad de las partículas del medio de propagación del sonido. [11, 19, 31]

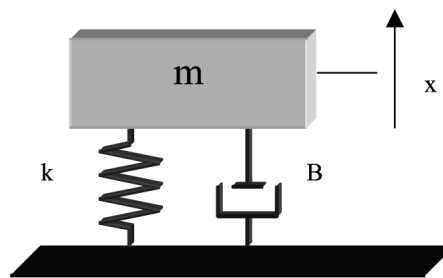


Figura 2-7.: Diagrama general de un acelerómetro [79]

2.2.2.1 Características de los acelerómetros

- a) **Respuesta en frecuencia:** Indica el intervalo de frecuencias en el cual el sensor detecta aceleraciones. Esta característica se presenta como un intervalo o con un diagrama de Bode. [22]
- b) **Sensibilidad:** La sensibilidad es la relación entre la tensión eléctrica generada por la aceleración determinada. dependiendo del tipo de acelerómetro esta puede expresarse en mV/g, pC/g [80]
- c) **Rango de medición:** Es la cantidad de aceleración para la cuál el sensor puede entregar una medida confiable. Este rango se define en $\pm g$. [80]

2.2.2.2 Tipos de acelerómetros

- a) **Piezoresistivo:** Este acelerómetro consta de un sistema de fijación y una masa de prueba. Al someterse a una aceleración el movimiento de la masa de prueba es detectado por piezoresistencias en el sistema sujeción y en la masa de prueba. Los acelerómetros piezoresistivos son sencillos y de bajo costo. Sus principales ventajas es su baja dependencia de la temperatura y su salida de magnitud reducida [83]. El diagrama se presenta en la Figura 2-8.

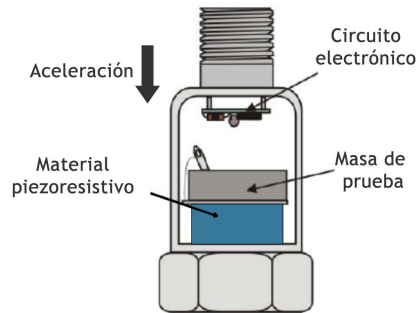


Figura 2-8.: Diagrama de un acelerómetro piezoresistivo [75]

- b) Piezoeléctrico:** Este sensor mide el desplazamiento de la masa de prueba usando materiales con propiedades piezoelectricas. Los acelerómetros piezoeléctricos no detectan la aceleración constante. Su principal característica es su buena respuesta en frecuencia. [22]. El diagrama se presenta en la Figura 2-9.

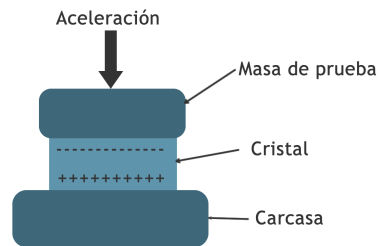


Figura 2-9.: Diagrama de un acelerómetro piezoeléctrico [28]

- c) Diferencial capacitivo:** Este sensor mide el desplazamiento de la masa de prueba por efecto capacitivo. Los acelerómetros de diferencial capacitivo se caracterizan por detectar aceleraciones constantes, por tener una alta sensibilidad y una baja respuesta en frecuencia [22]. El diagrama se presenta en la Figura 2-10.

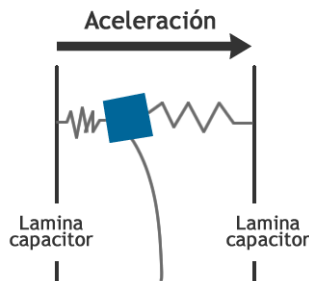


Figura 2-10.: Diagrama de un acelerómetro diferencial capacitivo [43]

2.2.2.3 Acelerómetros utilizados en otros sistemas de monitoreo

En la Tabla 2-1 se listan los acelerómetros usados en trabajos consultados y sus principales características.

Tabla 2-1.: Acelerómetros usados en sistemas de monitoreo de abejas [11, 47, 19, 31, 2]

Acelerómetro	Tipo ¹	Sensibilidad	Resp. Frecuencia	Rango	Costo ²	Trabajo
Endevco 7259B-10	PE	10 mV/g	1 - 30000 Hz	± 500 g	891	[11]
Brüel & Kjær 4375	PE	1.5pC/g	1 - 26000 Hz	± 5000 g	740	[47]
Freescale MMA7361L	DC	206 mV/g	1 - 400 Hz	± 6 g	3.22	[31, 19, 2]

¹ PE \rightarrow Piezoelectrico ; DC \rightarrow Diferencial Capacitivo

² Precios en dolares (USD) obtenidos de cotizaciones con los fabricantes y/o sus representantes comerciales en febrero de 2012

2.2.2.4 Requerimientos de diseño y criterios de selección

Debido al alto costo de los acelerómetros piezoelectricos presentados en la Tabla 2-1, se decidió usar el acelerómetro diferencial capacitivo Freescale MMA7361L. Aunque este sensor no tiene una respuesta en frecuencia para capturar toda la energía de las vibraciones mecánicas producidas por las abejas, captura un gran porcentaje de dicha energía. Adicionalmente, este sensor ha sido usado en varios trabajos de grado en el GMUN [31, 19, 2] para su uso en colmenas de abejas, donde se ha diseñado el acople mecánico y las protecciones físicas del sensor.

2.2.3. Micrófono

El micrófono convierte las vibraciones acústicas en energía eléctrica. Estos pueden responder a variaciones de presión o a variaciones de velocidad de las partículas del medio. La mayoría de los micrófonos identifican los cambios de presión. En la Figura 2-11 se presenta el diagrama de un micrófono compuesto tres elementos principales:

- a) Diafragma:** El diafragma es un componente liviano que oscila al ser golpeado por las ondas sonoras.
- b) Transductor:** Es el que convierte la energía de las vibraciones mecánicas en energía eléctrica.
- c) Cubierta:** La cubierta protege el diafragma y el transductor. La directividad del micrófono puede ser ajustada con la forma de la cubierta.

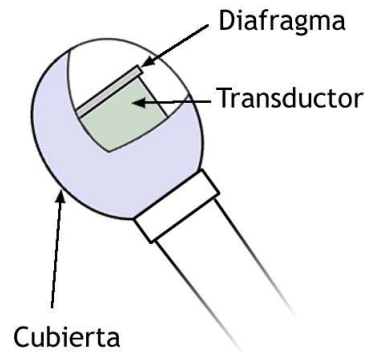


Figura 2-11.: Diagrama general de un micrófono.

2.2.3.1 Características de los micrófonos

- a) Respuesta en frecuencia:** Indica el comportamiento del micrófono a ondas acústicas con diferentes frecuencias. Este comportamiento está asociado a la amplitud de la señal eléctrica generada. Un micrófono ideal no debe modificar la amplitud de las ondas según su frecuencia y debe captar el rango completo de frecuencias (20 Hz - 20kHz). Esta característica se presenta como un intervalo o con un diagrama de Bode como la figura 2-12 . [54]

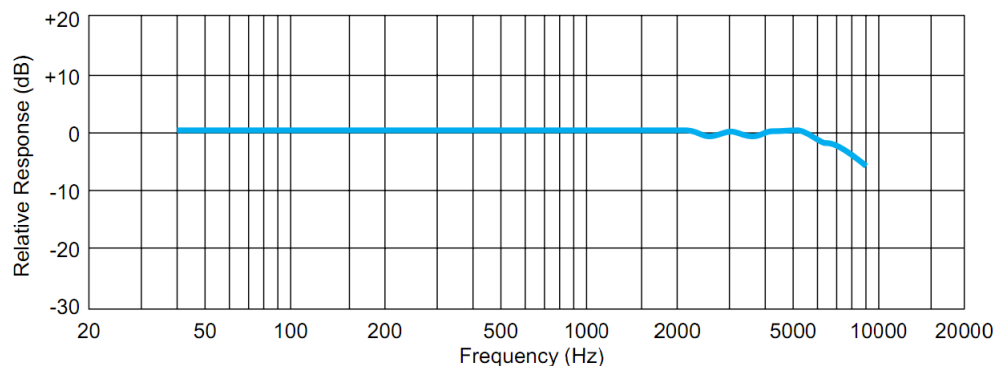


Figura 2-12.: Respuesta en frecuencia típica para un el micrófono electret WM-63PR [55]

- b) Sensibilidad:** La sensibilidad es la relación entre la tensión eléctrica generada por la presión de una onda acústica determinada. Generalmente, esta viene dada en dB, usando como sensibilidad de referencia 1 V/Pa. (0 dB = 1V/Pa). [37, 54]
- c) Directividad:** Es la respuesta del micrófono según la ubicación de la fuente de sonido. Este parámetro es determinado fuertemente por la cubierta del micrófono. La directividad de un micrófono es expresada en un diagrama polar como los que aparecen en la figura 2-13 [54]

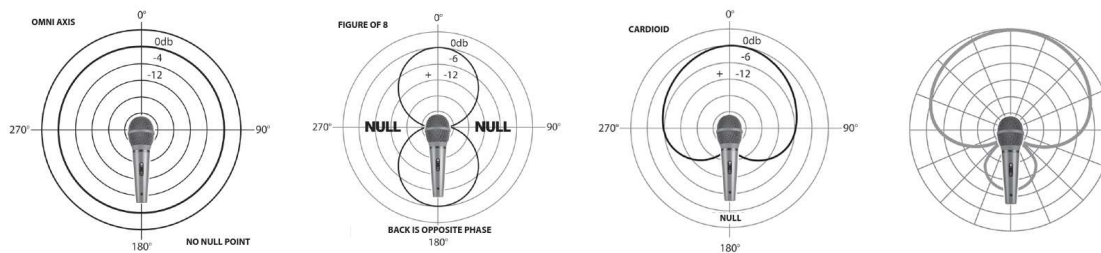


Figura 2-13.: Patrones de directividad característicos. [54]

d) Manejo del ruido: El micrófono ideal debe ser inmune al ruido mecánico y eléctrico. Para la reducción del ruido mecánico, algunos micrófonos cuentan con montajes físicos. Para el manejo del ruido eléctrico, es recomendado el uso de amplificadores con una buena relación de señal a ruido. Esta relación viene dada en dB e indica la relación de amplitud entre la señal de interés y el ruido asociado, por lo que valores altos indican una buena relación. Algunos micrófonos vienen con una etapa de pre-amplificación, por lo que en ocasiones, el valor de relación señal a ruido aparece en las hojas de especificaciones de los micrófonos. [54]

e) Impedancia: Característica eléctrica del micrófono que indica la oposición a una corriente eléctrica. La unidad de medida es el Ohm (Ω). Para una máxima transferencia de potencia, la impedancia del micrófono y la impedancia del amplificador deben ser iguales. [64]

2.2.3.2 Tipos de micrófonos

a) Condensador: Este micrófono tiene dos placas paralelas formando un condensador. Una de estas esta fija y la otra hace parte del diafragma. Cuando una onda sonora golpea el diafragma este se mueve, cambiando el valor de la capacitancia y generando una corriente eléctrica. Estos micrófonos cuentan con una alta impedancia, por lo que generalmente vienen con un pre amplificador integrado. La respuesta en frecuencia de este micrófono es buena, sin embargo necesita de una tensión considerable para cargar el condensador y operar correctamente. Esta es una desventaja que lo hace poco práctico para la aplicación requerida. [54]

b) Electret: Este micrófono también es tipo condensador, pero no requiere de una tensión eléctrica elevada para su operación. El diafragma se carga electricamente en el proceso de fabricación, evitando la necesidad de la tensión eléctrica. Algunos de estos micrófonos también incluyen un pre amplificador.[64, 54] El micrófono electret es de tamaño reducido y su costo no es elevado.

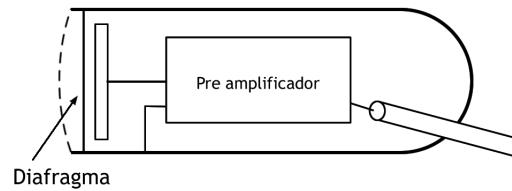


Figura 2-14.: Diagrama de un micrófono tipo condensador [64]

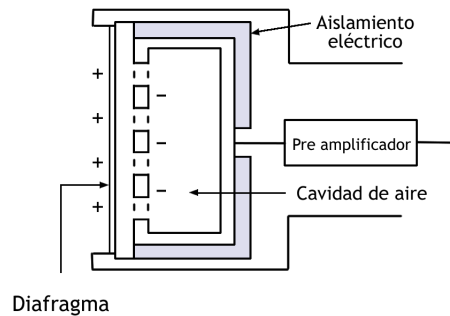


Figura 2-15.: Diagrama de un micrófono tipo condensador electret [64]

- c) Bobina móvil:** Este micrófono funciona con el principio de inducción electromagnética. Una onda sonora golpea el diafragma, moviendo un conductor dentro de un campo magnético y generando una señal eléctrica. Estos micrófonos cuentan con una sensibilidad baja y una impedancia baja. Cuentan con una buena respuesta en frecuencia y soportan altos niveles de sonido. Son usados profesionalmente en presentaciones en vivo y en estudios de grabación.[64] Su costo puede ser elevado.

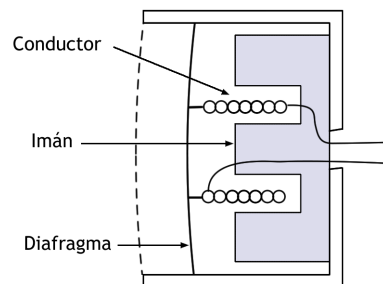


Figura 2-16.: Diagrama de un micrófono magnético o de bobina móvil [64]

- d) Piezoeléctricos:** El transductor de este micrófono es un cristal piezoeléctrico. Este genera una tensión eléctrica ante una deformación mecánica (producida por una onda sonora). Este micrófono tiene una alta sensibilidad, pero no tiene una buena respuesta en frecuencia, por lo que no es muy usado a nivel profesional.[64]

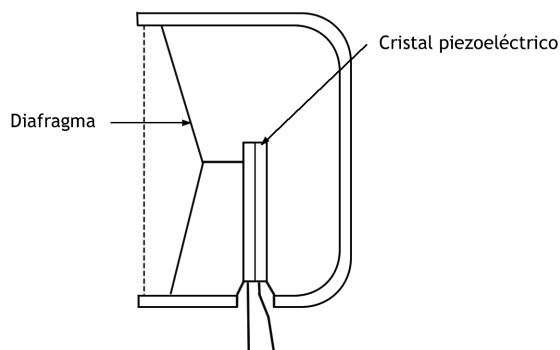


Figura 2-17.: Diagrama de un micrófono piezoeléctrico [64]

2.2.3.3 Micrófonos utilizados en otros sistemas de monitoreo

En la Tabla 2-2 se listan los micrófonos usados los trabajos consultados. Otros trabajos [6, 23, 57] no reportan que tipo de micrófono fue utilizado, o indican que usaron micrófonos contruidos a la medida.

Tabla 2-2.: Micrófonos usados en sistemas de monitoreo de abejas[25, 61, 63, 56, 47, 14]

Micrófono	Tipo ¹	Sensibilidad ²	Resp. Frecuencia	Directividad ³	Trabajo
ECM Monacor 3005	E	-44,43	50 - 16000 Hz	O	[25]
Radio Shack 33-3013	E	-45	50 - 16000 Hz	O	[61, 63]
Sennheiser ME64	C	-30	40 - 20000 Hz	C	[56]
Sony ECM-959C	E	-43	50 - 18000 Hz	U	[47]
MB6022APC-0	E	-40	100 - 10000 Hz	O	[14]

¹ E → Electret ; C → Condensador

² [dB] (0 dB = 1V/Pa)

³ C → Cardioide ; O → Omnidireccional ; U → Unidireccional

2.2.3.4 Requerimientos de diseño y criterios de selección

Con base en las características del sonido emitido por las abejas y a los micrófonos utilizados en anteriores sistemas de monitoreo, el micrófono para el sistema Onerex debe cumplir con las siguientes especificaciones:

Respuesta en frecuencia: 20 Hz - 20 kHz

Directividad: Omnidireccional

Tensión eléctrica nominal: Menor a 5 V.

Sensibilidad: Mayor a -50 dB (0 dB = 1V/Pa)

Los criterios de selección del micrófono son: a) el consumo energético, b) el tamaño físico, c) la linealidad en la respuesta en frecuencia y d) el precio.

2.2.4. Acondicionamiento de señal

Este modulo del sistema se encarga de recibir la señal analógica obtenida por los sensores y convertirla en información codificada que puede ser usada por un procesador. Las funciones detalladas de este modulo son:

- Tratar la señal analógicamente (filtrar, atenuar, amplificar).
- Hacer la conversión de la señal analógica a formato digital.
- Enviar la señal digitalizada a una unidad de procesamiento mediante un protocolo de comunicación.

Los requerimientos mínimos que debe cumplir este modulo según las características de la señal a capturar son:

- Frecuencia de muestreo mínima: 22050 Hz
- Resolución mínima: 16 bits lineal
- SNR: 60 dB
- Control de ganancia integrada

Ademas de estos requerimientos, es deseado un bajo valor comercial y baja disipación de energía. Como resultado, el dispositivo elegido para el sistema fue el Codec de Audio del System on Chip (SoC) [26] presentado en la siguiente sección. Este Codec fue escogido por cumplir con todas los requerimientos mínimos y por que al estar integrado en el SoC, se reduce el costo final del sistema, el área del circuito impreso y la disipación de energía. Este Codec tiene las siguientes características:

- Conversor Análogo Digital Sigma Delta.
- Filtro digital de Respuesta Finita al Impulso FIR.
- Ganancia para entrada de micrófono de 0 dB , 20 dB, 30 dB y 40 dB.
- Codificación PCM de 16 o 32 bits.
- Frecuencia de muestreo programables: 8 kHz, 11.025 kHz, 12 kHz, 16 kHz, 22.05 kHz, 24 kHz, 32 kHz, 44.1 kHz, 48 kHz, 64 kHz, 88.2 kHz, 96 kHz, 128 kHz, 176.4 kHz y 192 kHz.

2.3. Unidad de procesamiento y almacenamiento

Las arquitecturas que fueron consideradas para ser usadas en el sistema son: a) DSP, b) FPGA y c) SoC. Dado que las funciones que debe realizar el monitor pueden ser implementadas con hardware de producción masiva, y que en el procesamiento de la señales no es crítico el tiempo de ejecución la arquitectura seleccionada es un System on Chip. Esta arquitectura cuenta con un buen compromiso entre consumo energético, área del circuito impreso, valor comercial y desempeño [15].

De la arquitectura seleccionada se compararon cuatro plataformas de hardware y se eligió una por los siguientes criterios:

1. Costo del SoC.
2. Costo de la tarjeta con componentes.
3. Incluir un codec de audio en el SoC.
4. Capacidad de ejecutar una sistema operativo basado en el núcleo Linux.

El uso del nucleo Linux en el monitor fue una restricción técnica debido a los beneficios que este aporta para el desarrollo de un sistema embebido. Algunos de estos beneficios son un aumento la estabilidad, un incremento seguridad y reduce los errores sin perder flexibilidad ni incrementar el costo de la implementación [15, 66]. En la Tabla **2-3** se muestran las plataformas comparadas y la plataforma seleccionada (Android Stamp).

Tabla 2-3.: Comparacion de plataformas de hardware basadas en un SoC [42, 41, 77, 9]

	SIE	AndroidStamp	FriendlyARM	BeagleBoard
Procesador	Jz4725 / Ingenic	IMX233 / Freescale	S3C2440A / SAMSUNG	OMAP 3530 / TI
Tipo	RISC/SIMD	RISC	RISC/SIMD	OMAP
Ram [MB]	64	64	64	256
CLK [MHz]	360	454	400	720
HW Floating Point	No	No incluido - Opcional	No	Si
Audio Codec ¹	Incluido. No adecuado	Incluido. Adecuado	Incluido	Externo al SoC
Costo Chip [USD] ²	4	11	NA	45
Costo Board [USD] ²	NA	90 ³	95	150
Encapsulado Chip	LQFP	LQFP / BGA	BGA	BGA

¹ Los codecs de audio son adecuados o no según las especificaciones presentadas en la Sección 2.2.4.

² Valores consultados en marzo 2012 para una unidad.

³ El precio mostrado corresponde a la tarjeta ChumbyHacker Board, que cuenta con el mismo procesador y memoria RAM. Varía de la Android Stamp en el tipo de encapsulado del chip y algunos periféricos adicionales.

En la Tabla **2-3** todas las plataformas tienen el socket para memorias microSD. Este tipo de memorias son economicas, fisicamente pequeñas, con bajo consumo de energía y ampliamente usada. Por esta razón la memoria usada en el monitor Onerex es microSD.

2.4. Sistema de comunicación

Debido a la distancia de 346 metros entre el monitor y el servidor (Ver Figura 2-1) un sistema de comunicación cableado es poco práctico, propenso a fallas y costoso. La solución más económica y de fácil instalación es un sistema de comunicación inalámbrica. En esta sección se presenta la selección de la capa física del sistema de comunicación. En el Capítulo 4 se presenta la capa de aplicación del sistema de comunicación. La metodología empleada para la selección del estándar de comunicación fue:

- Revisión bibliográfica de los estándares usados en redes de sensores inalámbricos.
- Elección del estándar según las especificaciones de diseño.
- Elección de los componentes para la implementación física del sistema.

La arquitectura de red del sistema Onerex difiere de la arquitectura usada por Atauri [6]. Atauri plantea el uso de una red de área personal PAN dentro del apiario usando nodos ZigBee en cada colmena. En el apiario hay un nodo ZigBee que cuenta con conexión externa que se enlaza con un servidor central por protocolos Wi-Fi o redes de datos de operadores móviles. En la figura 2-18 se muestra el diagrama de la red propuesta por Atauri.

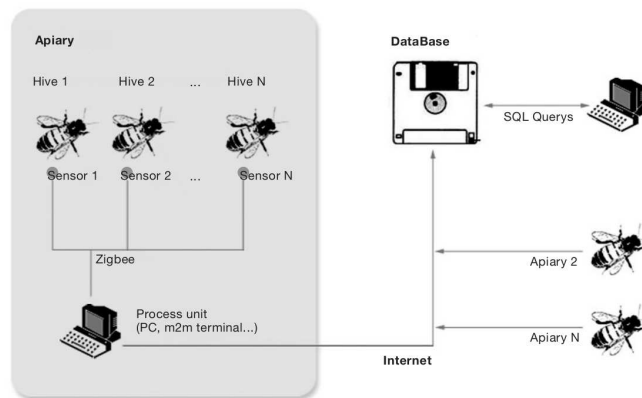


Figura 2-18.: Arquitectura del sistema Apidictor [6]

La arquitectura de red del sistema Onerex no considera el uso de una red PAN en el apiario y a su vez, cada nodo tiene conexión directa con el servidor instalado en la oficina de apicultura de la Figura 2-1.

Para realizar una comparación de los estándares de comunicación inalámbrica se seleccionaron los siguientes elementos comparativos: alcance, robustez, consumo de energía y valor comercial de los dispositivos. Estas características fueron seleccionadas de un grupo mas numeroso [39] dado que permiten comprar cual es el estándar adecuado para el sistema Onerex. Los estándares considerados para la selección fueron:

1. Wi-Fi 802.11g
2. Wi-Fi 802.11n
3. ZigBee

2.4.1. Alcance o área de servicio

El alcance es la superficie de cobertura de la red inalámbrica [69]. Para el sistema Onerex la distancia mínima de cobertura es 346 metros como se aprecia en la Figura 2-1.

2.4.2. Robustez

La robustez es entendida en este análisis como los métodos de coexistencia con otras redes inalámbricas y los métodos para asegurar la transmisión correcta de los datos [69]. Aunque también es deseado contar con una red inalámbrica segura, no es una prioridad en el sistema Onerex. En esta característica los estándares Wi-Fi y ZigBee tienen un buen desempeño. Sin embargo, Wi-Fi tiene mejor desempeño, incluso cuando coexista con otras soluciones inalámbricas [16].

2.4.3. Eficiencia energética

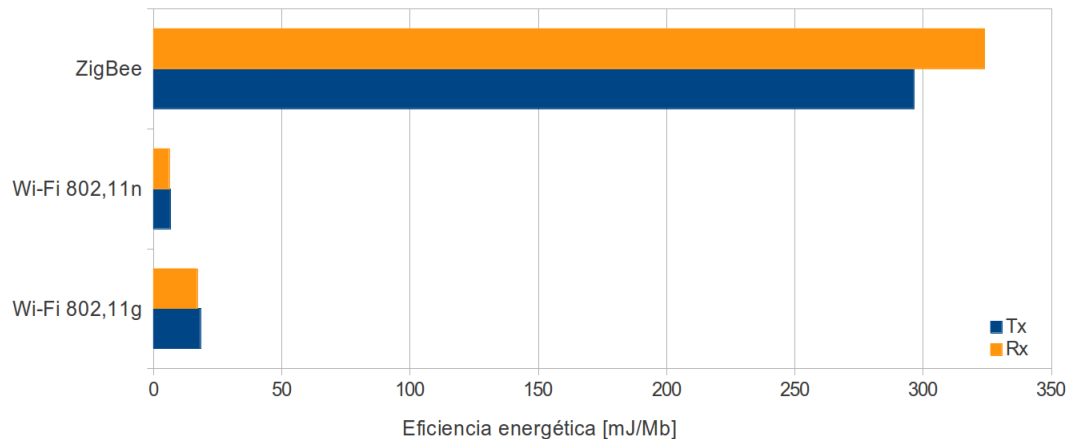
Para considerar la eficiencia energética, se debe tener en cuenta que los estándares Wi-Fi y ZigBee fueron diseñados para propósitos diferentes. Wi-Fi es un estándar con alto consumo de energía utilizado para la conexión inalámbrica de dispositivos a una red de computadores. Así como el consumo de energía es alto, la tasa de transmisión también lo es. Por el contrario, ZigBee es un protocolo de comunicación de bajo consumo de energía, también cuenta con una tasa de transmisión baja. Finalmente, para considerar la eficiencia energética de cada estándar se usa la siguiente expresión:

$$\frac{\text{potencia disipada}}{\text{tasa de transmisión}} = \frac{\frac{\text{energía disipada}}{\text{tiempo}}}{\frac{\text{información transmitida}}{\text{tiempo}}} = \frac{\text{energía disipada}}{\text{información transmitida}} \left[\frac{mJ}{Mb} \right] \quad (2-1)$$

En la Tabla 2-4 se muestra la comparación de la eficiencia energética para Wi-Fi y ZigBee. Con datos tomados de [39, 84], la Figura 2-19 presenta los valores de la eficiencia energética, donde se aprecia que el estándar Wi-Fi 802.11n es el que tiene mejor la mejor relación.

Tabla 2-4.: Eficiencia energética de circuitos integrados por estándar [39, 84]

Estándar	Wi-Fi 802.11g	Wi-Fi 802.11n	ZigBee
Integrado	Atheros AR9271		CC2430
VDD (V)	3.3		3.0
Tx (mA)	300		24.7
Rx (mA)	280		27
Tasa de transmisión (Mb/s)	54	150	0.25
Eficiencia energética			
Tx (mJ/Mb)	18.33	6.6	296.4
Rx (mJ/Mb)	17.11	6.16	324

**Figura 2-19.:** Eficiencia energética [mJ/Mb] por estándar

2.4.4. Costos de implementación

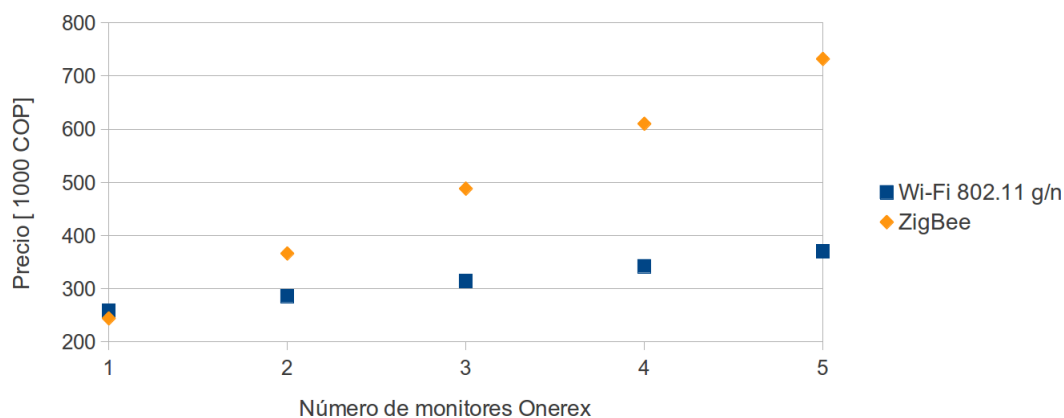
Para la implementación del estándar Wi-Fi se debe contar con un router inalámbrico para la oficina de apicultura y una tarjeta de red por cada colmena a monitorear. Los equipos seleccionados para la implementación del estándar Wi-Fi son equipos adquiridos en el grupo de investigación GMUN en el marco del trabajo de grado elaborado por Gutiérrez [30].

De la misma manera, para la implementación del estándar ZigBee se debe adquirir una tarjeta XBeePro para la oficina de apicultura y una tarjeta XBeePro para cada colmena a monitorear. En la Tabla 2-5 se presentan los precios de los dispositivos para cada estándar y en la Figura 2-20 se presenta el precio de los componentes según el número de monitores. Como resultado, la solución con ZigBee solo es más económica que la de Wi-Fi cuando se tiene un monitor Onerex en el sistema.

Tabla 2-5.: Costo de los componentes del sistema de comunicación

Estándar	Wi-Fi 802.11 g/n		ZigBee	
	Referencia	Costo ¹	Referencia	Costo ¹
Servidor	TPLINK TL-WDR4300	\$230.000	XBeePro	\$122.000
Monitor	TPLINK TL-WN722N	\$28.000	XBeePro	\$122.000

¹ Precios en pesos colombianos (COP) obtenidos de cotizaciones con tiendas de tecnología en Bogotá en marzo de 2012

**Figura 2-20.:** Valor comercial de los componentes por número de monitores

2.4.5. Matriz de ponderación

Con la información presentada anteriormente se elabora una matriz de ponderación presentada en la Tabla 2-6 para seleccionar el estándar de comunicación. Finalmente, el estándar seleccionado es Wi-Fi 802.11g.

Tabla 2-6.: Ponderación de criterios para la selección del protocolo de comunicación

Criterio	Ponderación	Calificación		
		Wi-Fi 802.11g	Wi-Fi 802.11n	ZigBee
Alcance	30 %	3	2	3
Robustez	30 %	3	3	2
Eficiencia energética	20 %	2	3	1
Costos de Implementación	20 %	3	3	1
Total	100 %	2.8	2.7	1.9

2.5. Especificaciones físicas y eléctricas

El Monitor Onerex estará a la interperie, por lo que necesita de una protección de todos sus componentes a la humedad y al polvo. Para eso es necesario un empaque que cumpla con

el estandar IP65 [33]. Con esta protección se asegura que no ingresará polvo al monitor ni tampoco ingresará agua dirigida a presión hacia el monitor.

Adicionalmente, el Monitor Onerex estará alejado de un lugar con conexión eléctrica, por lo que debe operar con baterías y fuentes alternativas de energía. El Monitor debe consumir la menor cantidad de energía eléctrica posible y será conectado al sistema de suministro de energía eléctrica diseñado por Acosta y Cuarán [1] y optimizado por Barreto y Macías [8]. Este sistema puede suministrar máximo 3 Amperios de corriente directa a 5 Voltios.

2.6. Especificaciones del monitor Onerex

Con base en las consideraciones presentadas a lo largo del capítulo, las especificaciones del monitor en forma resumida se presentan en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7.: Especificaciones del monitor Onerex

Especificaciones físicas
El sistema ubicado en campo de debe ir protegido por una caja IP65.
Especificaciones eléctricas
El sistema ubicado en campo debe ser alimentado por celdas solares y baterías. No podrá consumir mas de 15 Watts [1, 8].
Acondicionamiento de señal
Codec de audio con las siguientes propiedades: <ul style="list-style-type: none"> ■ Frecuencia de muestreo mínima: 22050 Hz ■ Resolución mínima: 16 bits lineal ■ SNR: 60 dB ■ Control de ganancia integrada
Sensores
Micrófono electret con las siguientes características: <p>Respuesta en frecuencia: 20 Hz - 20 kHz</p> <p>Directividad: Omnidireccional</p> <p>Tensión eléctrica nominal: Menor a 5 V.</p> <p>Sensibilidad: Mayor a -50 dB (0 dB = 1V/Pa)</p>

Sensores (continuación)
Acelerómetro diferencial capacitivo con las siguientes características: Respuesta en frecuencia: 1 Hz - 400 Hz Tensión eléctrica nominal: Menor a 5 V. Sensibilidad: 206 mV/g
Unidad de Procesamiento y almacenamiento
Plataforma AndriodStamp con las con las siguientes especificaciones: <ul style="list-style-type: none">■ Procesador ARM9 iMX233 de Freescale a 454 MHz con codec de audio incluido■ Memoria RAM de 64 MB DDR■ MicroSD
Sistema de comunicación
Protocolo de capa física Wi-Fi estandar IEEE 802.11g.

3. Diseño de un algoritmo de procesamiento de señales para el análisis de los sonidos producidos por las abejas

En este capítulo se describe el proceso de diseño e implementación del algoritmo de procesamiento de señales del sistema Onerex. El objetivo del procesamiento de dichas señales es identificar patrones de comportamiento en las colmenas de abejas. Para lograrlo, el módulo de procesamiento del sistema Onerex se basa en un esquema general para el procesamiento de señales [58] presentado en la Figura 3-1 compuesto por los siguientes elementos:

- a) Adquisición de la señal (Sección 3.1)
- b) Preproceso de la señal (Sección 3.2)
- c) Extracción de parámetros (Secciones 3.3 y 3.4)
- d) Clasificación e identificación (Sección 3.5)

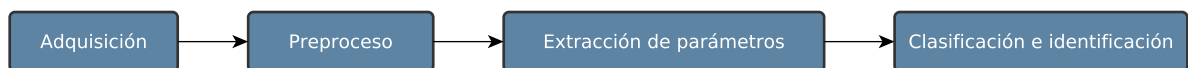


Figura 3-1.: Esquema general para el procesamiento de señales [58]

Al final del capítulo se presenta la Sección 3.6 que resume las consideraciones para el diseño del algoritmo e incluye un diagrama detallado del mismo.

3.1. Adquisición de la señal

Como se indicó en el Capítulo 2, la captura de las señales de audio se realiza con una frecuencia de muestreo de 22050 Hz y una resolución lineal de 16 bits. Las señales capturadas son codificadas en un archivo tipo WAV con dos canales. Un canal corresponde a la señal capturada por el micrófono y el otro canal corresponde a la señal del acelerómetro. Este archivo es almacenado en la memoria microSD del sistema Onerex.

3.2. Preproceso de la señal

Después de realizada la adquisición de la señal, el sistema procesa las señales capturadas y las transforma al dominio tiempo - frecuencia. Para realizar esta transformada se contemplaron dos métodos de procesamiento:

1. Transformada de Fourier de Tiempo Corto STFT.
2. Transformada Discreta de Wavelet DWT.

STFT divide la señal en el tiempo en señales de menor duración, y a cada una le calcula la Transformada de Fourier. El resultado de STFT en el dominio tiempo - frecuencia tiene una limitación en la resolución de tiempo o frecuencia debido a la selección de la duración de las señales divididas (duración de la ventana)[29].

DWT es un método de análisis multiresolución que no tiene el inconveniente presentado por STFT [29]. DWT usa ventanas de diferentes tamaños para representar la señal a diferentes resoluciones [29]. Al implementar DWT en el hardware del sistema Onerex se obtuvieron errores cercanos al 10 % al compararlo con el algoritmo implementado en Scilab [3].

Debido a los anteriores resultados y la limitación presentada por STFT, se modificó el preproceso de la señal para obtener la estimación espectral de potencia en vez de una representación de la señal en el dominio tiempo - frecuencia. El método utilizado fue el desarrollado por Welch [78], el cual obtiene una estimación del espectro mas confiable, al promediar los espectros obtenidos de fragmentos superpuestos de la señal que previamente han sido multiplicados por una función ventana. La función utilizada en el sistema Onerex es la Ventana de Hanning. El método Welch es un punto intermedio entre el método Bartlett y el método Blackman & Tukey, siendo un buen compromiso entre fiabilidad del resultado y costo computacional [59]. Al final de esta etapa se obtiene una estimación del espectro de potencia de la señal que luego sera usado en las etapas de extracción de parámetros y clasificación e identificación.

3.3. Extracción de parámetros

El objetivo de esta etapa es obtener valores numéricos de la señal que tengan capacidad discriminante, fiabilidad, incorrelación y rapidez de cálculo. Para la identificación y selección de los parámetros a extraer de la señal se realizó una revisión de los trabajos previos en esta área y las herramientas de software de bioacústica. Los parámetros seleccionados son:

1. Acumulados de energía en el espectro.
2. Entropía.

3. Raíz Cuadratica Media RMS.
4. Rugosidad.
5. Puntos máximos de potencia en el espectro.
6. Sumatoria de la energía por intervalos de frecuencia.

A continuación se presentan los parámetros seleccionados e implementados en el sistema Onerex. Estos se agrupan de acuerdo a la implementación realizada.

3.3.1. RMS y Rugosidad

RMS: Este parámetro aporta información de la energía de la señal cuando tiene valores negativos y positivos en el tiempo. Esta directamente correlacionado con la energía de la señal, por lo que este ultimo parámetro no fue usado en el sistema Onerex. El RMS es usado en el sistema Apilink [4, 6]

Rugosidad: Al igual que RMS este parámetro es usado en Apilink [4, 6] con el objetivo de aportar información sobre la forma de la señal. Una señal con pocos cambios en el tiempo tiene una rugosidad baja, mientras que una señal con ruido tiene una alta rugosidad. La formula para calcular la rugosidad es :

$$Rugosidad = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{i-1})^2}{N}} \quad [6] \quad (3-1)$$

donde N es el número de muestras en el tiempo, y x_i es el valor de energía para la muestra i .

RMS y rugosidad se implementaron en una sola función dado que ambos algoritmos recorren el vector de la señal en el tiempo. En la Figura 3-2 se presenta el diagrama de flujo utilizado para la implementación.

3.3.2. Puntos máximos de potencia en el espectro

Son los puntos máximos de la estimación espectral de potencia. Estos valores son implementados por Atauri en Apilink [6] y por Alzate y Montoya [2]. El algoritmo usado se presenta en la Figura 3-3 y esta basado en el algoritmo presentado por Bosetti para la detección de puntos máximos [12]. Este algoritmo se basa en el calculo de la desviación estandar de todo el vector y el de una ventana móvil. Para esto recibe dos parametros: el tamaño de la ventana y un factor de escala. En la implementación realizada, este ultimo parámetro es calculado con base en la entropía, mejorando el desempeño del algoritmo, logrando encontrar puntos máximos que antes ignoraba. El tamaño de la ventana es calculado según la frecuencia de muestreo y el tamaño de la ventana de Welch.

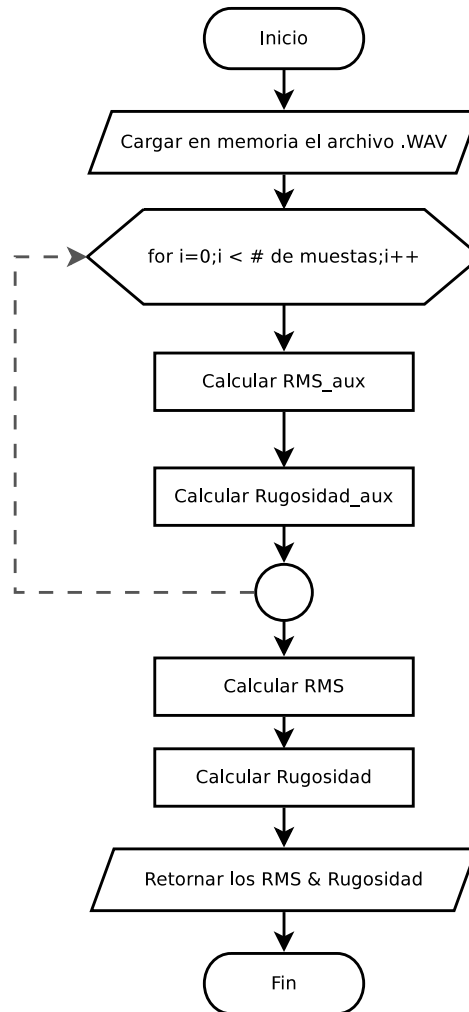


Figura 3-2.: Diagrama de flujo para el cálculo de los parámetros RMS y Rugosidad

3.3.3. Entropía

La entropía aporta información acerca de la distribución de energía en la frecuencia. Un tono puro tiene como entropía cero, mientras que una señal con una distribución alta tiene un valor de entropía mayor. Este parámetro está implementado en el software de bioacústica Raven desarrollado por el laboratorio de Ornitología de la Universidad de Cornell [18]. En la Figura 3-4 se presenta el diagrama de flujo basado en la implementación. La ecuación para el cálculo de la entropía total es:

$$Entropia = \sum_{f=0}^{f_{max}} \left(\frac{E_i}{E_{total}} \cdot \log_2 \left(\frac{E_i}{E_{total}} \right) \right) \quad [18] \quad (3-2)$$

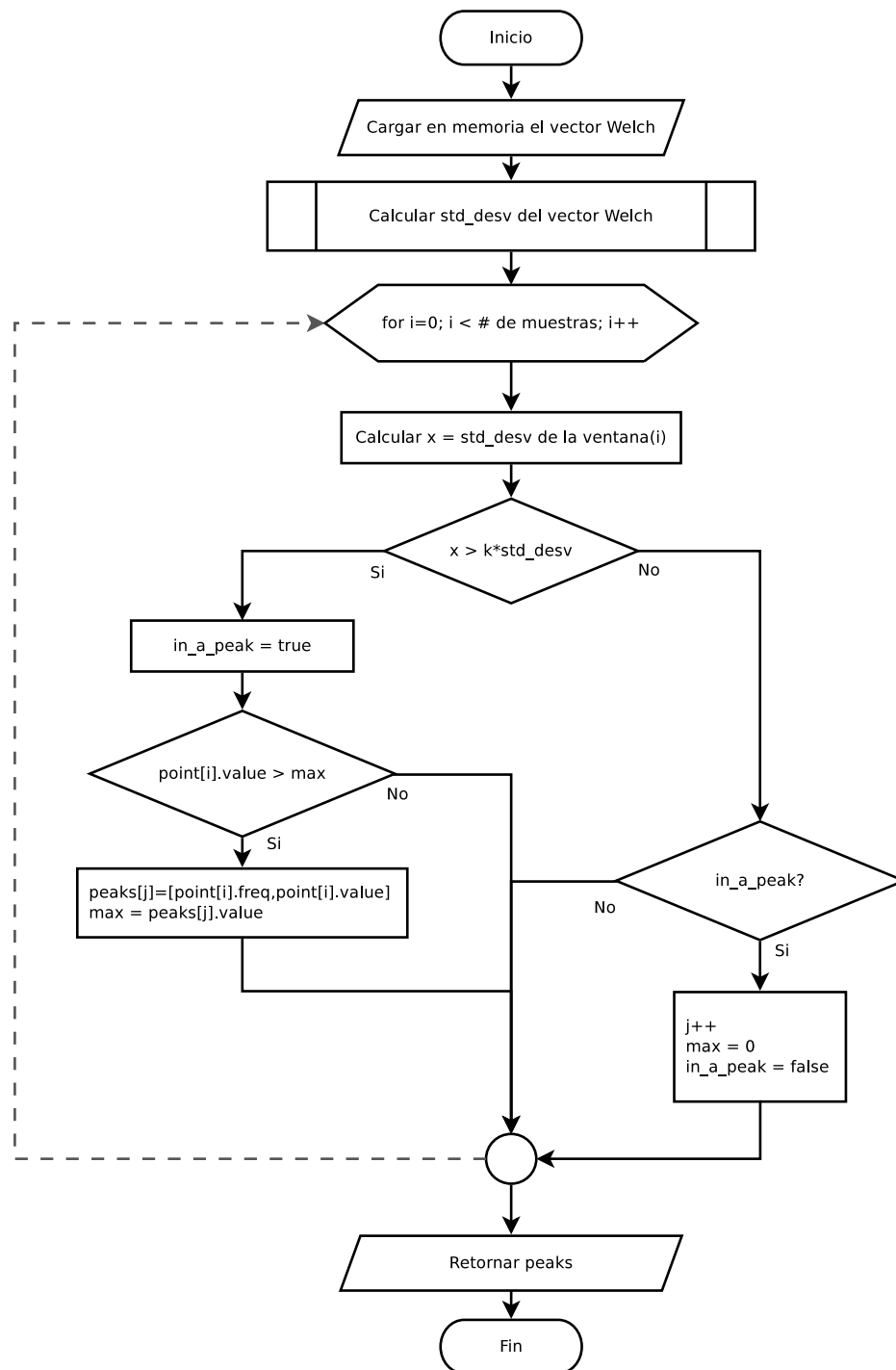


Figura 3-3.: Diagrama de flujo para el cálculo de los valores máximos de potencia en el espectro

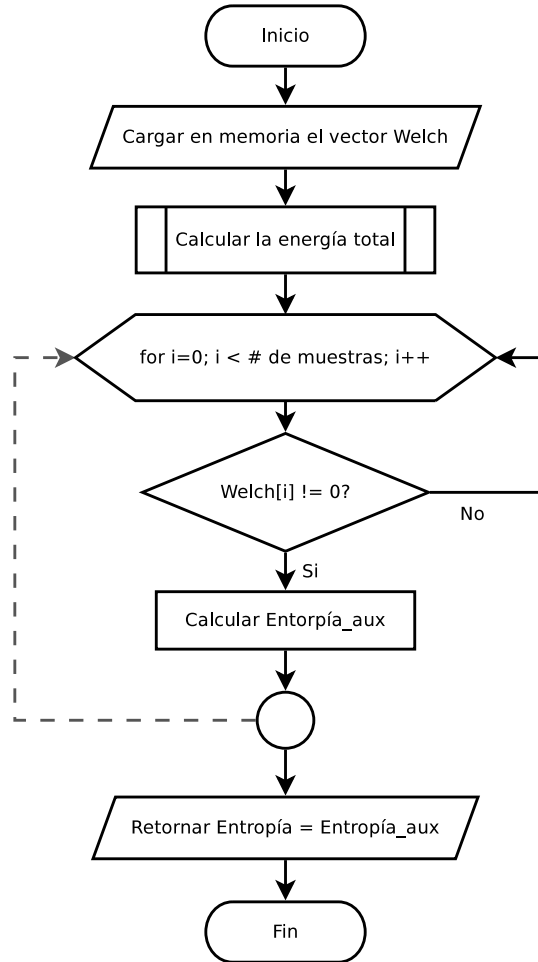


Figura 3-4.: Diagrama de flujo para el cálculo del parámetro entropía

3.3.4. Acumulados de energía en el espectro

Estos parámetros se calculan en un solo en una sola ejecución, debido a que todos recorren el vector que contiene la estimación espectral de potencia. El diagrama de flujo implementado se presenta en la Figura 3-5.

Frecuencia central: Es la frecuencia que divide la estimación espectral de potencias en dos intervalos de frecuencia con igual energía. Este parámetro esta implementado en el software de bioacústica Raven [18]. La ecuación empleada para el calculo de la frecuencia central f_c es:

$$\sum_{f=f_1}^{f_c} S_f \geq \sum_{f=f_{c+1}}^{f_2} S_f \quad [18] \quad (3-3)$$

Donde S_f es la estimación espectral de potencia en la frecuencia f .

Frecuencias 1er cuartil, 3er cuartil, 5 % y 95 %: Estas frecuencias dividen la estimación espectral de potencias en dos intervalos de frecuencia que contienen 25 % - 75 %, 75 % - 25 %, 5 % - 95 % y 95 % - 5 % respectivamente. La forma de calculo es igual a la usada en frecuencia central, cambiando el porcentaje adecuado para cada frecuencia [18].

Rango intercuartil: Es la diferencia entre el primer cuartil y el tercer cuartil de frecuencias [18].

Ancho de banda 90 %: Es la diferencia entre las frecuencias 5 % y 95 % [18].

3.3.5. Sumatoria de la energía por intervalos de frecuencia

El uso de este parámetro en el sistema Onerex busca aportar información sobre el comportamiento de la colmena de abejas según estudios previos. Los intervalos definidos son: [25, 20]

Presentados por Ferrari [25]: Intervalos de frecuencia que aportan información para detección temprana de enjambre: a) 100 Hz – 150 Hz, b) 150 Hz – 250 Hz, c) 300 Hz – 400 Hz y d) 400 Hz – 500 Hz.

Presentados por Hrncir [20]: Intervalos de frecuencia que aportan información sobre fenómenos varios: a) 200 Hz – 350 Hz, b) 300 Hz – 350 Hz, c) 300 Hz – 550 Hz y d) 350 Hz – 500 Hz.

Para la implementación del algoritmo que calcula estos parámetros, se definieron intervalos de frecuencia auxiliares, haciendo que el algoritmo no recorra varias veces el vector de estimación espectral. Los intervalos definidos se presentan en la Figura 3-7. El diagrama de flujo base para la implementación se presenta en la Figura 3-6.

3.4. Análisis de componentes principales PCA

El Análisis de Componentes Principales (PCA) es un procedimiento estadístico que involucra la correlación y variabilidad los datos objeto de estudio [68]. PCA se empleó para reducir el número de variables que luego serán evaluadas por el clasificador del algoritmo propuesto. Adicionalmente, basado en trabajos anteriores [11, 49], se aplicó PCA al vector que contiene la estimación espectral de potencia.

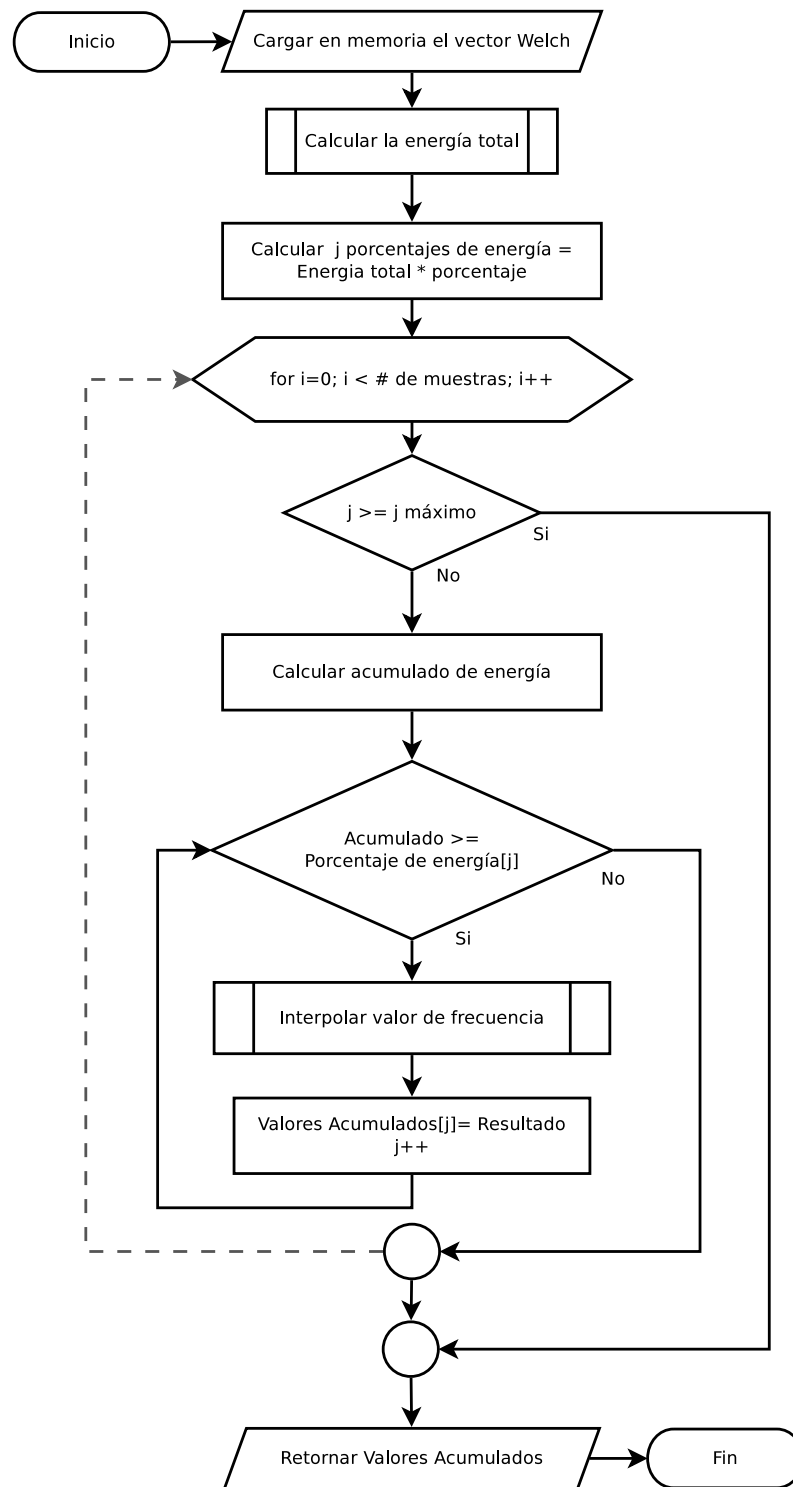


Figura 3-5.: Diagrama de flujo para el cálculo de acumulados de energía en el espectro

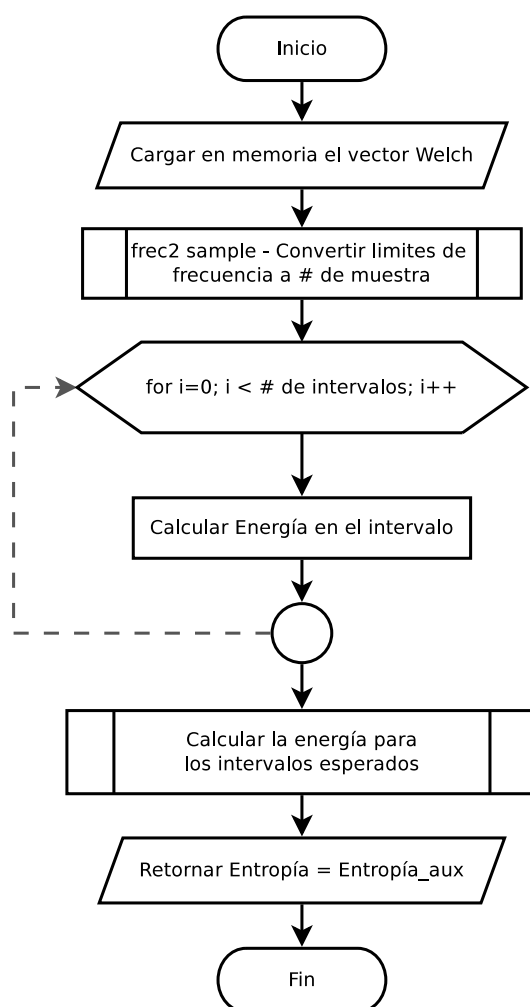


Figura 3-6.: Diagrama de flujo para el cálculo de la sumatoria de energía por intervalos de frecuencia

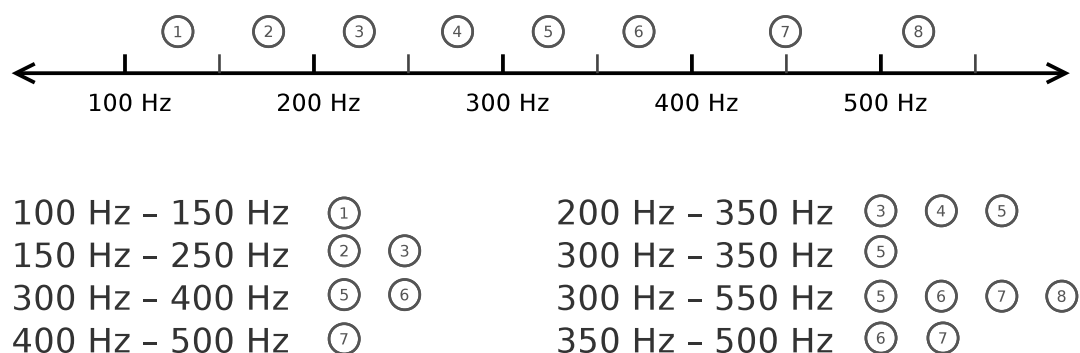


Figura 3-7.: Intervalos de frecuencia definidos para el cálculo de la energía

3.5. Clasificación e identificación

El módulo de Clasificación e identificación tiene como objetivo agrupar los registros según las condiciones de la colmena de abejas. Este módulo es de gran importancia en el sistema Onex, dado que permite asociar cambios en el comportamiento de la colmena con cambios en las señales capturadas. En este trabajo se implementaron cuatro técnicas de Clasificación y se evaluó su desempeño. La implementación de los clasificadores y la evaluación de desempeño se presentan en la Sección 5.5 del Capítulo 5. Las técnicas de clasificación implementadas en este trabajo son:

1. K-means
2. Método aglomerativo - AGNES
3. Método divisivo - DIANA
4. Redes neuronales artificiales - ANN

3.5.1. K-means

El algoritmo de K-means agrupa un conjunto de datos en un número N de grupos dado. Los pasos que realiza son:

1. Definir N centroides en los datos.
2. Calcular la distancia de todos los registros a dichos centroides.
3. Agrupar los registros basado en mínima distancia euclidiana.
4. Volver al paso 1 hasta cumplir el criterio de parada.

El algoritmo recibe como parámetros el número de clusters, los registros a clasificar y el criterio de parada. Este ultimo puede ser un número de iteraciones o una tolerancia en el resultado. Cuando el resultado no cabía superando esta tolerancia el algoritmo termina su ejecución. En este algoritmo es muy importante saber elegir el número de grupos, dado que al ser un parámetro de entrada, se pueden obtener resultados poco satisfactorios. [34]

3.5.2. Método aglomerativo - AGNES

AGNES es una técnica de clustering jerárquico. Su principio de funcionamiento consiste en considerar inicialmente a cada registro un grupo. En el siguiente paso dos registros cercanos o muy parecidos, se unen para formar un grupo. Luego el algoritmo encuentra un par de registros con pocas o mínimas diferencias. Si hay varios pares con mínimas diferencias, el algoritmo elige un par de objetos aleatoriamente [71].

3.5.3. Método divisivo - DIANA

DIANA es una técnica de clustering jerárquico, pero su principal diferencia con el método aglomerativo (AGNES) es que construye la jerarquía en orden inverso [71].

Inicialmente, hay un cluster grande que contiene todos los n objetos. EN cada paso, el cluster más grande disponible se parte en dos clusters hasta finalizar todos los clusters, que comprenden solo un objeto. Entonces, la jerarquía es construida en $n - 1$ pasos.

3.5.4. Redes neuronales artificiales - ANN

Las redes neuronales artificiales son una imitación de una red neuronal biológica. Las redes neuronales artificiales ANN, al igual que las biológicas se conforman por una red de neuronas. En la Figura 3-8 se presenta el diagrama de una neurona artificial. La señal de activación z es calculada como la sumatoria de las entradas x_1, x_2, \dots, x_p multiplicadas por sus respectivos pesos w_1, w_2, \dots, w_p . Luego, $\sigma(z)$ es una función de umbral. Las señales usadas pueden ser lineales o no lineales [7]

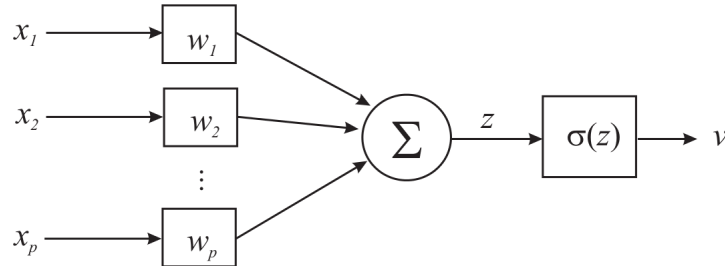


Figura 3-8.: Diagrama de una neurona artificial [7]

La arquitectura de la ANN usada en este trabajo se presenta en la Figura 5-14 del Capítulo 5. Esta arquitectura es conocida como *feedforward*. Esta compuesta por una capa de neuronas de entrada, otra capa denominada capa oculta y finalmente la capa de salida. El entrenamiento de una ANN para clasificación se realiza con datos previamente clasificados, y en una serie de iteraciones los pesos de las neuronas se ajustan hasta ajustar los registros a los grupos definidos. Hay que evitar en este entrenamiento un sobreajuste al igual que un pobre ajuste [58, 7].

3.6. Algoritmo de procesamiento del sistema Onerex

Con base en las consideraciones presentadas a lo largo del capítulo, el diagrama detallado del algoritmo del sistema Onerex se presenta en la Figura 3-9.

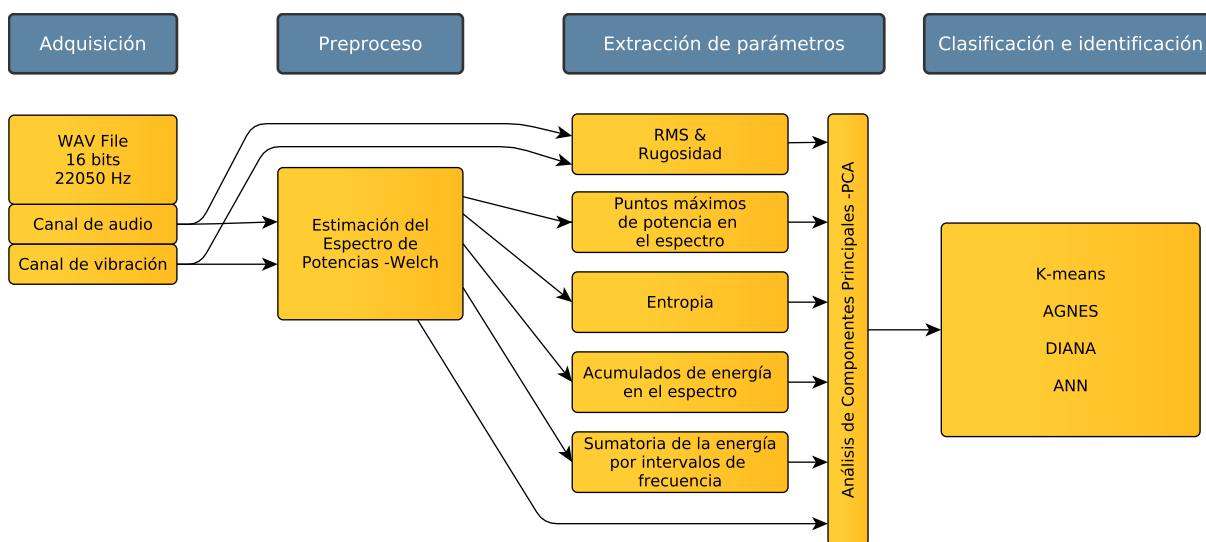


Figura 3-9.: Diagrama detallado del algoritmo de procesamiento de señales del sistema Onerex.

4. Diseño del sistema de información Onerex

4.1. Descripción general

El sistema de monitoreo propuesto cuenta con un sistema de información (Servidor Onerex) diseñado para centralizar la información adquirida en los Monitores Onerex. El Servidor Onerex debe contar con una interfaz gráfica para los usuarios del sistema y debe permitir la extracción de datos para ser usados con otras herramientas de software.

El Servidor establece comunicación con los Monitores Onerex y con los usuarios; por lo tanto tiene un despliegue cliente - servidor. En la Figura 4-1 se presenta el diagrama general del sistema de información.

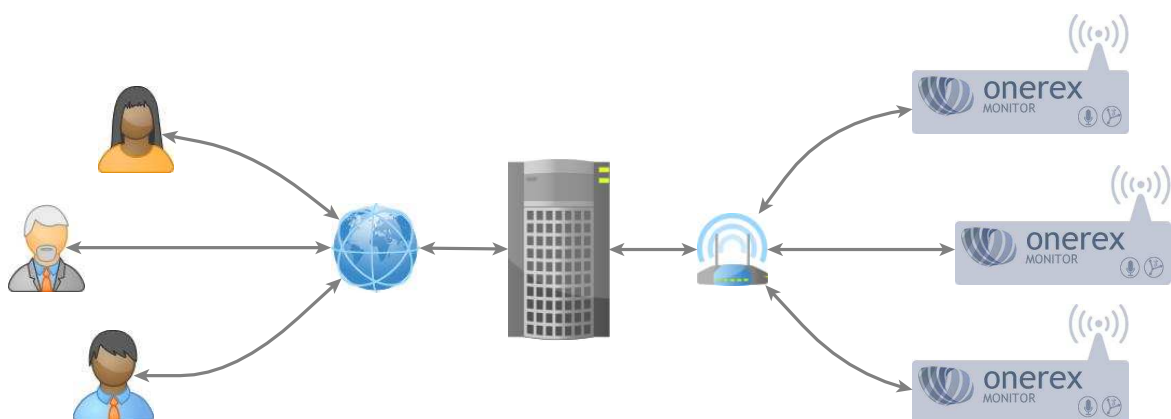


Figura 4-1.: Diagrama general del sistema de información Onerex

En este capítulo se presenta la metodología empleada para el diseño del Servidor Onerex. Posteriormente se presenta su implementación y el diseño de la capa de aplicación para la comunicación entre los Monitores Onerex y el Servidor Onerex.

4.2. Metodología para el diseño del Sistema de Información

Para el diseño del Sistema de Información Onerex se siguió una metodología de desarrollo de software basada en ingeniería de requerimientos [40, 45] y metodologías ágiles de software [44]. El uso de esta metodología permite el desarrollo de software de calidad cumpliendo con los requerimientos definidos por las personas interesadas en el proyecto (stakeholders) [40]. Los pasos que conforman dicha metodología se presentan a continuación.

4.2.1. Captura de requisitos con los interesados (stakeholders)

El objetivo de esta tarea es recolectar los requisitos que el software debe cumplir. En esta fase se realizan reuniones entre los interesados del proyecto y los desarrolladores. Para obtener los resultados esperados es recomendado el uso de formatos para la elaboración de la documentación.

Responsables Grupo de interesados (stakeholders): Investigadores de GAUN y Grupo de desarrolladores: Investigadores de GMUN.

Resultados del proceso Como resultado se obtienen dos documentos:

- **Acta de constitución del proyecto:** Es un documento donde se dan detalles técnicos y metodológicos del proyecto. Se define la descripción general del proyecto, las personas involucradas en el proyecto y su rol, las necesidades del software, los recursos asignados, el alcance del proyecto y los entregables, restricciones, supuestos y firmas de aprobación de los involucrados en el proyecto.
- **Elicitación de requerimientos:** El objetivo de este documento es definir modelos que ayuden a entender la entidad a construir y priorizar los requerimientos. La elicitación de requerimientos es un documento de carácter técnico que contiene los requerimientos funcionales y no funcionales. Los *requerimientos funcionales* están asociados a los siguientes dominios:

Gestión Indican las funciones que el sistema debe desarrollar asociado a un proceso de gestión y no al núcleo del negocio. Un ejemplo es la gestión *CRUD* - *Create Read Update Delete* de una entidad del negocio.

Soporte Hacen referencia a funciones no críticas de la aplicación, por ejemplo imprimir.

Negocio Son los requerimientos asociados los procesos que el software va a apoyar. Estos se documentan en forma de diagramas UML.

A su vez, los *requerimientos no funcionales* son cualidades o características que el producto debe cumplir. Algunas de estas características son: Seguridad, funcionalidad, fiabilidad, usabilidad, portabilidad, flexibilidad, mantenibilidad, eficiencia, lenguaje de programación, arquitectura de la aplicación, tipo de despliegue, IDE de desarrollo entre otros.

4.2.2. Especificar y validar los requisitos de software

En esta etapa se validan los diagramas UML (requerimientos funcionales del proceso) con las personas involucradas en el proceso que el software va a soportar. Adicionalmente se especifican de manera detallada los requisitos de software por medio de casos de uso, historias de usuario, prototipo de la interfaz gráfica entre otros.

Responsables Grupo de interesados (stakeholders): Investigadores de GAUN y Grupo de desarrolladores: Investigadores de GMUN.

Resultados del proceso Al finalizar el proceso se cuentan con las versiones finales de los diagramas UML y con la especificación detallada de los requisitos de software (casos de uso, prototipo de interfaz gráfica, historias de usuario, entre otros)

4.2.3. Desarrollo del software

Finalmente, se inicia la implementación del software. En esta fase se hace la codificación en el IDE y lenguaje de programación seleccionado en la elicitación de requerimientos. Para el desarrollo del software es común el uso de metodologías de gerencia de proyectos diseñadas para este fin. El uso de EDT (Estructura de descomposición del trabajo¹)[70] o metodologías de desarrollo ágil como SCRUM [44] son adecuadas para esta tarea.

Responsables Grupo de desarrolladores: Investigadores de GMUN.

Resultados del proceso Entregables definidos en la elicitación de requerimientos.

4.3. Acta de constitución del Sistema de Información Onerex

En esta sección se presenta el acta de constitución elaborada para el desarrollo del Servidor Onerex. Las necesidades del proyecto ya se presentaron en la Sección 4.1.

¹También conocido como Work Breakdown Structure o WBS

4.3.1. Recursos asignados

Se cuenta con los siguientes recursos para el proyecto:

1. Una estación de trabajo en la Sala de Microelectrónica del Edificio 411. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.
2. El servidor del GMUN para realizar las pruebas.
3. Un prototipo del Monitor Onerex.
4. Un Router TP-Link WDR4300.

4.3.2. Descripción del producto

El producto final tiene los siguientes componentes:

1. Código fuente del sistema de Información.
2. Instalación del Sistema de Información en el servidor del GMUN.
3. Script de instalación.

4.3.3. Restricciones y Supuestos

El Sistema de Información debe ser construido con herramientas de software libre. El Servidor Onerex estará ubicado en la oficina de apicultura (Ver Figura 4-2)



Figura 4-2.: Mapa del Centro Agropecuario Marengo.

4.4. Elicitación de requerimientos

En esta sección se presenta la elicitación de requerimientos de la aplicación del servidor Onerex. La elicitación esta compuesta por los requerimientos funcionales y no funcionales.

4.4.1. Requerimientos funcionales

Gestión

- Creación, lectura, actualización y eliminación de Colmenas.
- Creación, lectura, actualización y eliminación de Apiarios.
- Creación, lectura, actualización y eliminación de Usuarios.

Soporte

- Imprimir identificación para el Apiario y el Monitor Onerex.
- Exportar los registros almacenados en formato `csv` para ser usado por otro software.

Negocio

El principal requerimiento es el almacenamiento de la información transmitida por los Monitores. En la Figura 4-3 se presenta el diagrama UML propuesto de este proceso.

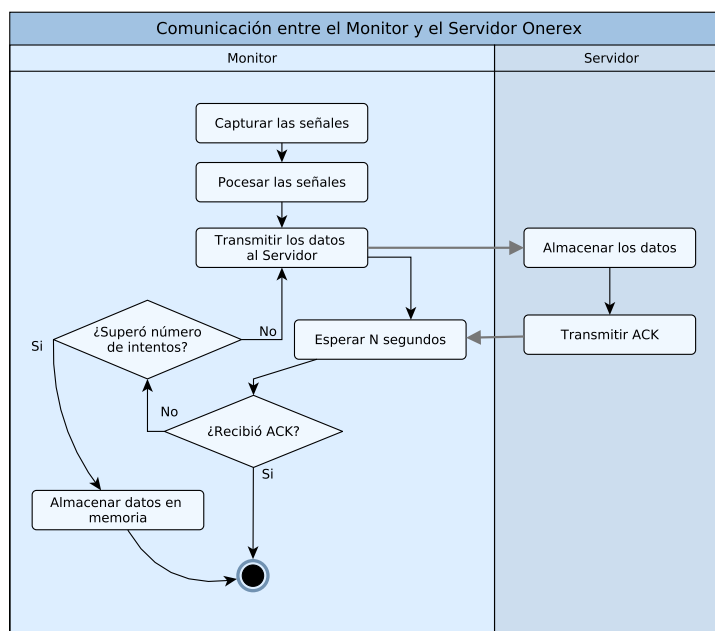


Figura 4-3.: Diagrama UML de la capa de aplicación en la comunicación Monitor - Servidor Onerex

4.4.2. Requerimientos no funcionales

- **Arquitectura:** La arquitectura escogida es Modelo Vista Controlador MVC, por sus ventajas en mantenibilidad.
- **Tipo de despliegue:** El despliegue del sistema de información Onerex es de tipo cliente-servidor (ver figura 4-1).
- **Infraestructura:** La solución tecnológica elegida para este sistema es la combinación Linux/Apache/PHP/MySQL (LAMP). La solución LAMP fue escogida por su amplio uso en servidores web y ser software de código abierto, lo que permite reducir costos.
- **Framework:** El framework seleccionado para el desarrollo del software es CodeIgniter[21]
- **Motor de base de datos:** Para la persistencia de la información se usará MySQL[53]
- **IDE:** Debe ser gratuito y preferiblemente de código abierto.

4.5. Casos de uso

En esta sección se presentan los casos de uso de la aplicación del servidor Onerex. Los casos de uso definidos fueron tres: acceso a usuarios, administración del sistema y comunicación con el monitor Onerex.

Caso de Uso 1 Acceso a usuarios	
<i>Descripción:</i>	Proceso de acceso a usuarios y las opciones que tienen disponibles en la aplicación.
<i>Actor primario:</i>	Usuario con permisos en el sistema
<i>Precondiciones:</i>	El usuario debe ingresar correctamente sus credenciales en el sistema.
<i>Poscondiciones:</i>	El usuario podrá visualizar los datos almacenados en el sistema.
<i>Escenario principal exitoso:</i>	

1. Podrá ver la información y las gráficas de los apiarios, colmenas y registros.
2. Podrá exportar la información en formato `csv`.

Otros escenarios:

1. Credenciales invalidas.
 2. Sistema sin datos.
-

Caso de Uso 2 Administración del sistema

Descripción: Acceso de administradores del sistema y las opciones que tiene dentro del sistema.

Actor primario: Usuario con rol administrador.

Precondiciones: El usuario debe ingresar correctamente sus credenciales en el sistema.

Poscondiciones: El usuario podrá visualizar los datos almacenados en el sistema y administrar apiarios, colmenas y usuarios.

Escenario principal exitoso:

1. Podrá crear, visualizar, actualizar y eliminar apiarios.
 2. Podrá crear, visualizar, actualizar y eliminar colmenas.
 3. Podrá crear, visualizar, actualizar y eliminar usuarios.
 4. Podrá ver la información y las gráficas de los apiarios, colmenas y registros.
 5. Podrá exportar la información en formato `csv`.
-

Otros escenarios:

1. Credenciales invalidas.
-

Caso de Uso 3 Comunicación con el monitor Onerex

Descripción: Comunicación en la capa de aplicación entre el servidor y el monitor Onerex.

Actor primario: Monitor Onerex

Precondiciones: El Monitor Onerex transmitió los datos correctamente.

Poscondiciones: El Servidor Onerex debe retornar una respuesta exitosa de la transacción al Monitor.

Escenario principal exitoso:

1. El servidor almacena correctamente los datos en la base de datos.
 2. El servidor responde al monitor si la solicitud fue exitosa o no.
-

Otros escenarios:

1. Error de comunicación entre el monitor y el servidor.
 2. Error interno del servidor.
-

5. Implementación y verificación del sistema Onerex

En este capítulo se presenta la implementación y verificación del sistema Onerex de acuerdo a las especificaciones enunciadas en los Capítulos 2, 3 y 4. La Sección 5.1 y 5.2 presentan la implementación y verificación del hardware del Monitor Onerex. En las Secciones 5.3 y 5.4 se presentan la implementación y verificación del software del Monitor Onerex. En la Sección 5.5 se presentan las pruebas en campo del Monitor Onerex y finalmente, en la Sección 5.6 se presenta la implementación del Servidor Onerex.

5.1. Implementación del Monitor Onerex - Hardware

En esta sección se presentan las especificaciones de diseño del Monitor Onerex desarrolladas en el Capítulo 2. Posteriormente se presenta la implementación de la tarjeta principal, periféricos y conexiones y el montaje físico y el suministro de energía del Monitor.

5.1.1. Especificaciones del monitor Onerex

Las especificaciones del Monitor Onerex desarrolladas en el Capítulo 2 son:

Tabla 5-1.: Especificaciones del monitor Onerex

Especificaciones físicas
El sistema ubicado en campo de debe ir protegido por una caja IP65.
Especificaciones eléctricas
El sistema ubicado en campo debe ser alimentado por celdas solares y baterías. No podrá consumir mas de 15 Watts [1, 8].
Acondicionamiento de señal
Codec de audio con las siguientes propiedades: <ul style="list-style-type: none">▪ Frecuencia de muestreo mínima: 22050 Hz▪ Resolución mínima: 16 bits lineal

<ul style="list-style-type: none"> ■ SNR: 60 dB ■ Control de ganancia integrada
Sensores
<p>Micrófono electret con las siguientes características:</p> <p>Respuesta en frecuencia: 20 Hz - 20 kHz</p> <p>Directividad: Omnidireccional</p> <p>Tensión eléctrica nominal: Menor a 5 V.</p> <p>Sensibilidad: Mayor a -50 dB (0 dB = 1V/Pa)</p>
<p>Acelerómetro diferencial capacitivo con las siguientes características:</p> <p>Respuesta en frecuencia: 1 Hz - 400 Hz</p> <p>Tensión eléctrica nominal: Menor a 5 V.</p> <p>Sensibilidad: 206 mV/g</p>
Unidad de Procesamiento y almacenamiento
<p>Plataforma AndriodStamp con las con las siguientes especificaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Procesador ARM9 iMX233 de Freescale a 454 MHz con codec de audio incluido ■ Memoria RAM de 64 MB DDR ■ MicroSD
Sistema de comunicación
Protocolo de capa física Wi-Fi estandar IEEE 802.11g.

5.1.2. Tarjeta Principal

La tarjeta principal esta basada en la Plataforma AndroidStamp [41]. El diagrama general de esta plataforma se presenta en la Figura 5-1. Inicialmente se fabricó un prototipo sin modificaciones de la AndroidStamp, pero, a los cuatro meses de uso la tarjeta dejo de funcionar y no pudo ser reparada. Por esta razón se uso la Plataforma ChumbyHacker Board (CH Board) para el desarrollo del software y las pruebas en campo. CH Board fue seleccionada por contar con el mismo procesador, memoria y periféricos más importantes para su uso en el Monitor Onerex.

Después de completar el desarrollo de software y comprobar su correcto funcionamiento en CH Board, se diseño una tarjeta basada en la plataforma AndroidStamp. Las principales modificaciones al circuito impreso fueron:

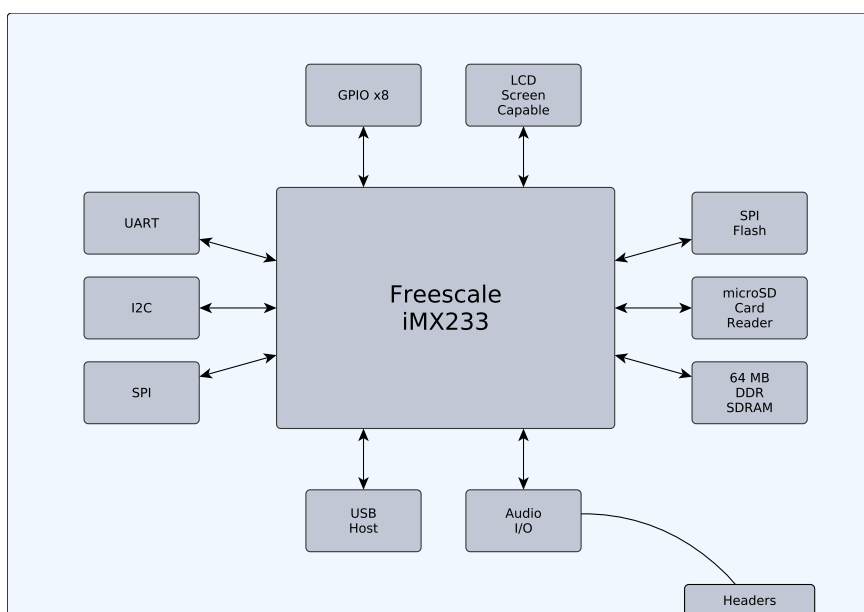


Figura 5-1.: Diagrama general de AndroidStamp [41]

- Adición de componentes pasivos para la conexión del micrófono según recomendaciones del fabricante [26]
- Modificación de conectores para los sensores.
- Ajuste del footprint del diodo D1. Referencia VS-10BQ015TRPBF.

El diagrama de la tarjeta del Monitor Onerex se presenta en las Figura 5-2.

5.1.3. Periféricos y conexiones

Periféricos

Los periféricos del Monitor Onerex son todos los dispositivos no incluidos en la tarjeta principal. Estos elementos son:

Acelerómetro: El acelerómetro usado (Freescall MMA7361L) está protegido por un protector en acrílico diseñado por Becerra y Cuello [19] y optimizado por Alzate y Montoya [2]. Este está instalado en la parte superior del cuadro central de la colmena. El cable usado para su conexión con la tarjeta principal es un cable blindado de un hilo.

Micrófono: El micrófono electret CMA-4544PF-W fabricado por CUI INC se ubica dentro de la colmena. La protección, diseñada por Alzate y Montoya [2], es una malla plástica recubierta de tela. Usa el mismo tipo de cable que el acelerómetro.

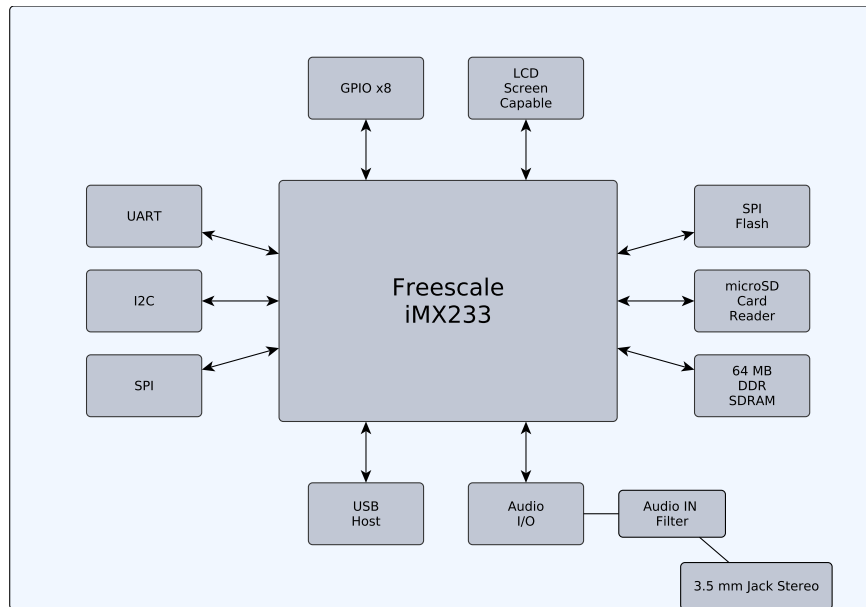


Figura 5-2.: Diagrama general de la tarjeta principal del Monitor Onerex

Tarjeta de red inalámbrica: La tarjeta de red inalámbrica usada (Realtek 8192cu) tiene conexión a la tarjeta principal vía USB. Esta tarjeta está dentro de la caja IP65 que protege a la tarjeta principal.

Conexiones

El Monitor Onerex no cuenta con teclado ni pantalla. De esta manera se reduce el costo de cada monitor sin afectar la usabilidad del sistema, dado que los usuarios acceden a la información por medio del Servidor Onerex. Las conexiones que tiene disponibles para el usuario son:

Puerto serial de depuración: Puerto configurado a 115200 baudios para tener acceso al monitor.

Acceso remoto vía SSH: Por medio de la red inalámbrica se puede tener acceso al monitor.

5.1.4. Montaje físico y suministro de energía

El diagrama del Monitor Onerex instalado en la colmena se presenta en la Figura 5-3. El monitor está protegido con una caja IP65 y los sensores están cubiertos por un acrílico, malla plástica y una tela. En la Figura 5-4 se presenta la fotografía del Monitor Onerex.

El Monitor recibe energía eléctrica de un sistema de suministro a partir de energía solar diseñado por Acosta y Cuarán [1] y optimizado por Barreto y Macías [8]. El sistema de

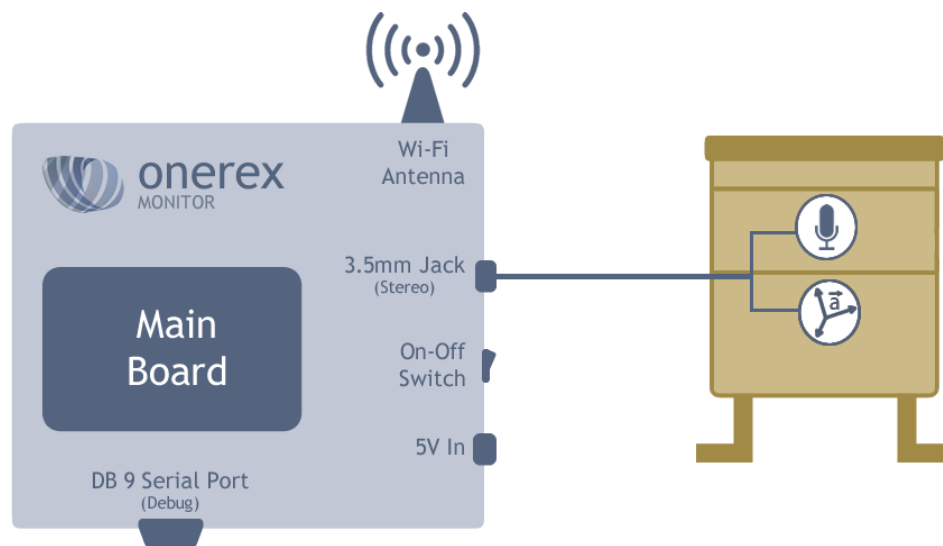


Figura 5-3.: Diagrama del montaje físico del Monitor Onerex



Figura 5-4.: Fotografía del Monitor Onerex

suministro de energía consiste en un panel solar de 10 Watts a 18 Voltios y una batería de plomo de 7.5 Ah a 12 Voltios. La máxima corriente que entrega el sistema es 3 Amperios a 5 Voltios [8]. El diagrama de conexiones del sistema de suministro eléctrico y el Monitor Onerex se presenta en la Figura 5-5



Figura 5-5.: Diagrama de conexión del suministro eléctrico y el Monitor Onerex

5.2. Verificación del Monitor Onerex - Hardware

Para verificar que el Monitor graba sonido de forma adecuada se realizó un protocolo de pruebas en un ambiente controlado. La prueba consiste en:

1. Grabar con el monitor sonidos generados por computador previamente.
2. Calcular la Transformada Rápida de Fourier de las señales.
3. Estimar el nivel de ruido en la grabación.

En la Tabla **5-2** se presentan los resultados observando una relación señal a ruido (SNR) cercana a los 20 dB. Este resultado es satisfactorio y se obtuvo debido al uso de cables blindados y conectores 3.5mm de audio estandar que disminuyen notablemente el ruido.

Tabla 5-2.: Relación señal a ruido (SNR) de grabaciones en ambiente controlado

Señal	Frecuencia de Muestreo	
	8000 Hz	22050 Hz
	SNR [dB]	
100 Hz	5,367	5,419
400 Hz	21,784	22,241
1000 Hz	22,646	24,011
2500 Hz	17,178	22,928
3800 Hz	26,424	7,244
Dos tonos	22,104	26,740
Tres tonos	24,199	28,427
Dos tonos con SNR:20dB	11,589	16,851
Dos tonos con SNR:40dB	22,870	33,790
Dos tonos con SNR:60dB	13,161	11,824

5.3. Implementación del Monitor Onerex - Software

En esta sección se presenta la implementación del software del Monitor Onerex. Se listan las utilidades y librerías de terceros incluidas en el monitor y finalmente se presenta la implementación de la aplicación desarrollada para el monitor Onerex.

5.3.1. Cadena de herramientas, Kernel de Linux y Sistema de archivos

Para la implementación del monitor Onerex se utilizó la cadena de herramientas desarrollada por CodeSourcery. El kernel de Linux usado fue el 2.6.31 distribuido por TuxRail con las modificaciones disponibles de la comunidad Linux en Caja [41]. Las principales aplicaciones incluidas el sistema de archivos del monitor Onerex son:

1. **alsa utils:** Contiene utilidades de consola para ALSA (Advanced Linux Sound Architecture).
2. **libsndfile:** Es una librería para la lectura de los archivos .WAV escrita en C.
3. **MySQL Client Library:** Es una API en C para establecer comunicación entre cliente y servidor de base de datos MySQL.
4. **openssh:** Es una implementación de código abierto del protocolo SSH.
5. **IW, wireless tools y wpa_supplicant:** Utilidades para establecer la conexión inalámbrica del monitor.

5.3.2. Aplicación Principal del Monitor Onerex

La aplicación principal es la encargada de inicializar los protocolos de comunicación, encargarse de capturar las señales cada determinado intervalo de tiempo, procesar la información adquirida y transmitirla al Servidor Onerex. Para lograrlo la aplicación esta dividida en tres elementos de software: a) Script de inicio, b) Script de tarea programada y c) aplicación monitor Onerex.

a) Script de inicio

Es un script de consola que se ejecuta al iniciar el sistema operativo. Este script se encarga de sincronizar la hora con el Servidor Onerex y configurar el script de tarea programada con intervalos de grabación y modo bajo consumo.

b) Script de tarea programada

Es un script de consola que se ejecuta cada determinado tiempo con la utilidad cron jobs. Su función es capturar el sonido y la aceleración y ejecutar la aplicación Monitor Onerex.

c) Aplicación Monitor Onerex

La aplicación del Monitor Onerex es un binario escrito en C/C++ que realiza las siguientes tareas:

1. Cargar en memoria el archivo .wav con las señales de sonido y aceleración.
2. Estimación espectral de potencia por método Welch.
3. Calculo de los parámetros definidos en el Capítulo 3.
4. Transmisión de la información en Servidor Onerex.

5.4. Verificación funcional y evaluación de desempeño del Monitor Onerex - Software

5.4.1. Métricas de error de computo para DWT

Como se presento en el Capítulo 3 Sección 3.3, inicialmente se realizó una implementación con la Transforma Discreta Wavelet DWT. Sin embargo, esta implementación tenia un error cercano al 10 % al compararlo con el algoritmo implementado en Scilab [3]. En la Tabla 5-3 se presentan los resultados obtenidos al estimar el error del algoritmo DWT en el monitor Onerex.

Tabla 5-3.: Estimación del error del algoritmo DWT implementado en el monitor Onerex [3]

Prueba	Error acumulado	Error porcentual	Error cuadratico medio
Señal A	0.3016	5.4645 %	0.1663
Señal B	0.5036	8.6198 %	0.9906
Señal C	0.4235	7.2193 %	0.4967

5.4.2. Métricas de error de computo para la estimación espectral de Welch

Para verificar el funcionamiento del algoritmo implementando en el Monitor Onerex se realizó una verificación funcional en el entorno de verificación presentado en la Figura 5-6.

El generador de señales almacena archivos . WAV que luego son copiados a la memoria del Monitor (Fig 5-6 - Punto 3). En este se procesan las señales de prueba y luego son copiadas

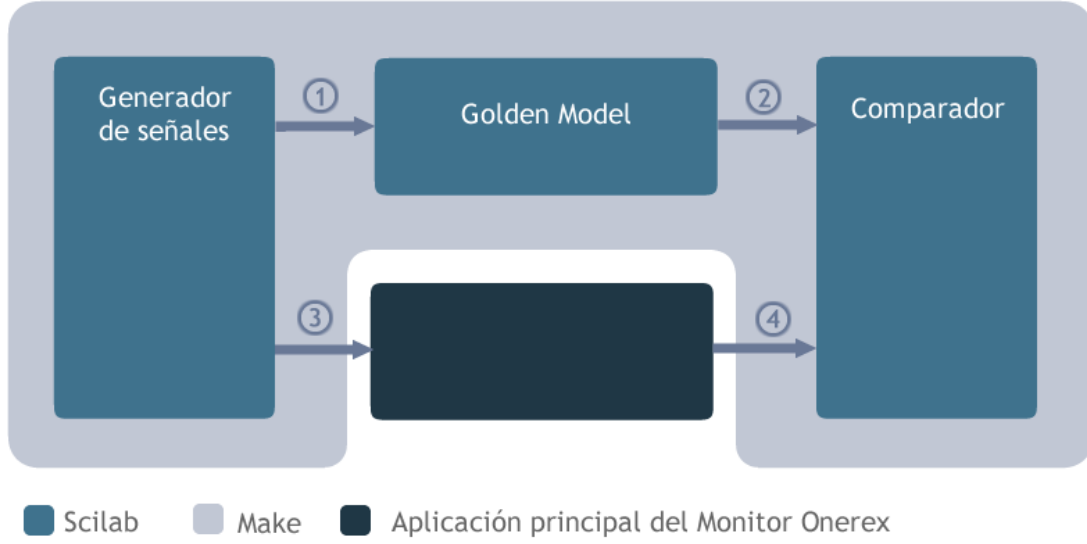


Figura 5-6.: Entorno de verificación de software utilizado

a la memoria del computador donde se está ejecutando el entorno (Fig 5-6 - Punto 4). Finalmente, el Golden Model (`pspect` de Scilab [67]) realiza el procesamiento y se realizan las comparaciones para calcular las métricas de desempeño.

Los resultados de la verificación se presentan en la Tabla 5-4, donde ECM es Error Cuadrático Medio y el Error porcentual se calcula así:

$$Error\ porcentual = \frac{\sum_{i=1}^N |x_{ref_i} - x_{medido_i}|}{N} \quad (5-1)$$

Al analizar los resultados de la Tabla 5-4 se concluye que el error de cómputo del monitor Onerex es muy bajo (menor al 0,01 %) y que el monitor Onerex procesa adecuadamente las grabaciones respecto a la implementación de referencia (`pspect` de Scilab [67]).

5.4.3. Métricas de tiempo de ejecución

Con el fin de evaluar el tiempo de ejecución del Monitor Onerex se generaron las siguientes condiciones de prueba:

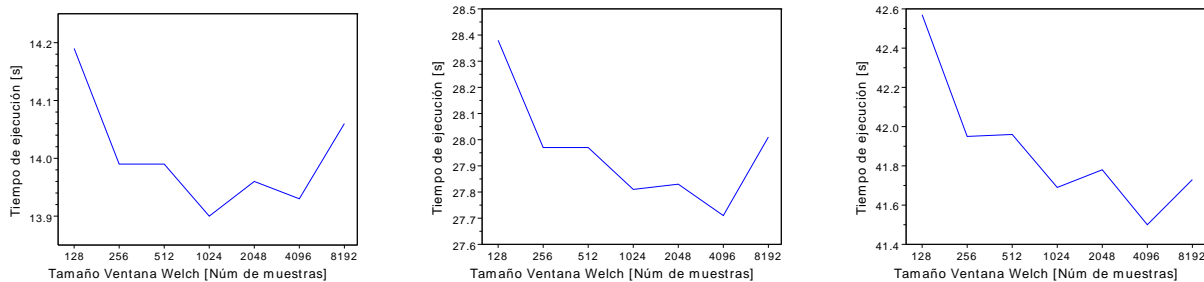
1. Frecuencia de muestreo [kHz]: 8 y 22.05
2. Duración del archivo .wav [Segundos]: 15, 30, 45, 60, 75, 90.
3. Tamaño de la ventana Welch [Número de muestras]: 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192.

Tabla 5-4.: Resultados del entorno de verificación

Frec. Muestreo	8 kHz		22,05 kHz	
Señal	ECM	E. Porcentual	ECM	E. Porcentual
100Hz	0,0000191	0,0001 %	0,0002845	0,0003 %
400Hz	0,0000093	0,0001 %	0,0000336	0,0001 %
1000Hz	0,0000407	0,0001 %	0,0000367	0,0001 %
2500Hz	0,0000409	0,0001 %	0,0000296	0,0001 %
3800Hz	0,0000292	0,0001 %	0,0000384	0,0001 %
Dos tonos	0,000003	0,0002 %	0,0000238	0,0004 %
Tres tonos	0,0000015	0,0003 %	0,0000014	0,0003 %
Dos tonos con SNR:20dB	0,0000001	0,0002 %	0,0000013	0,0003 %
Dos tonos con SNR:40dB	0,0000001	0,0003 %	9,78E-008	0,0002 %
Dos tonos con SNR:60dB	0,0000002	0,0005 %	6,33E-008	0,0003 %

Para el calculo de las pruebas se generaron archivos .WAV de diferente duración. Luego se realizó el procesamiento y la medición de los tiempos de ejecución con la utilidad `time` en el Monitor Onerex. Finalmente, la prueba se escribe en un archivo de texto plano. Los resultados de estas pruebas se presentan en la Tabla 5-5 y en las Figuras 5-7 y 5-8.

Según los resultados obtenidos, no hay un cambio significativo al variar el tamaño de la ventana de Welch (Figura 5-7), en cambio, al cambiar el número de muestras a procesar, ya sea ajustando la frecuencia de muestreo o la duración de la señal, el tiempo de ejecución cambia considerablemente y de forma lineal (Figura 5-8). Para las grabaciones que deben ser capturadas y las frecuencias entre su captura el Monitor Onerex tiene un tiempo de ejecución menor al máximo permitido, por lo que el desempeño es adecuado para la aplicación.



(a) 30 Segundos

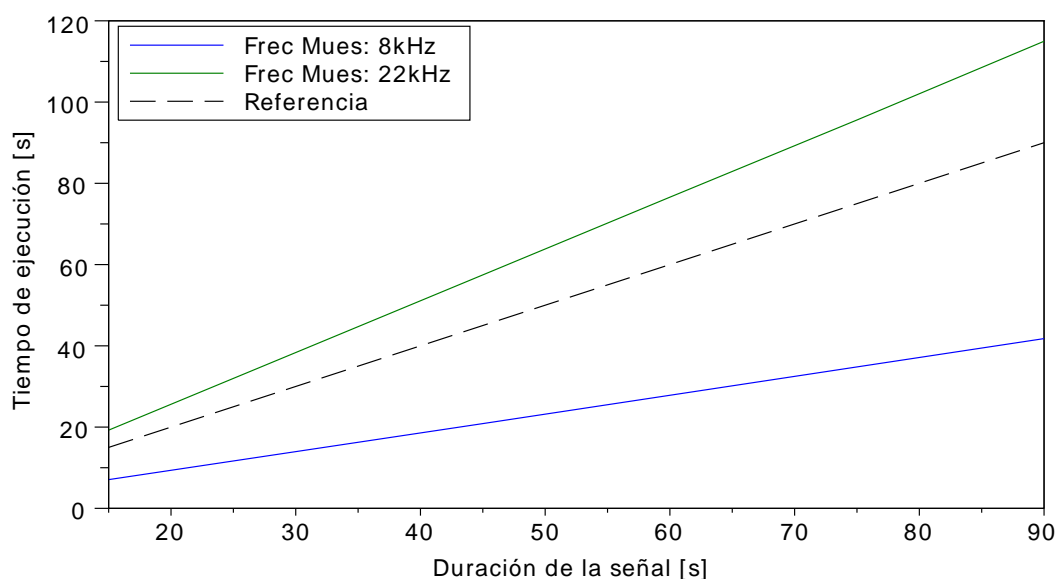
(b) 60 Segundos

(c) 90 Segundos

Figura 5-7.: Tiempo de ejecución respecto al tamaño de la ventana Welch

Tabla 5-5.: Tiempo de ejecución del programa principal del Monitor Onerex

Frec Muestreo	Duración	Número de muestras de la ventana Welch						
		128	256	512	1024	2048	4096	8192
8 kHz	15 s	7.14	7.03	7.04	7.02	7.07	7.05	7.25
	30 s	14.19	13.99	13.99	13.90	13.96	13.93	14.06
	45 s	21.26	20.95	20.95	20.82	20.86	20.73	20.87
	60 s	28.38	27.97	27.97	27.81	27.83	27.71	28.01
	75 s	35.50	34.97	34.99	34.76	34.81	34.57	34.89
	90 s	42.57	41.95	41.96	41.69	41.78	41.50	41.73
22.05 kHz	15 s	19.55	19.32	19.34	19.20	19.25	19.18	19.32
	30 s	39.03	38.56	38.58	38.31	38.35	38.09	38.42
	45 s	58.38	57.71	57.72	57.36	57.46	57.00	57.42
	60 s	77.87	76.96	76.97	76.46	76.59	75.90	76.34
	75 s	97.24	96.10	96.11	95.44	95.59	94.95	95.32
	90 s	116.9	115.52	115.57	114.73	114.97	114.03	114.77

**Figura 5-8.:** Tiempo de ejecución respecto a la duración del archivo .WAV con frecuencia de muestreo 8000kHz

5.5. Pruebas del Monitor Onerex en Campo

Para probar el monitor Onerex, se realizaron pruebas en conjunto con Alzate y Montoya [2]. Las pruebas fueron realizadas en el apiario ubicado en el Centro Agropecuario Marengo de

la Universidad Nacional del 28 de noviembre de 2012 al 17 de enero de 2013. En total se capturaron 283 archivos . WAV, que equivalen a 12.8 GB. Estos archivos fueron fragmentados en 2576 archivos . WAV con una duración de un minuto. El objetivo de las pruebas fue identificar el fenómeno de colmena huérfana, es decir, la ausencia de abeja reina en la colmena. En la Figura 5-9 se presenta el diagrama de las etapas realizadas en esta prueba. En el Anexo A se presenta la bitácora de visitas al apiario y un análisis descriptivo de los datos.

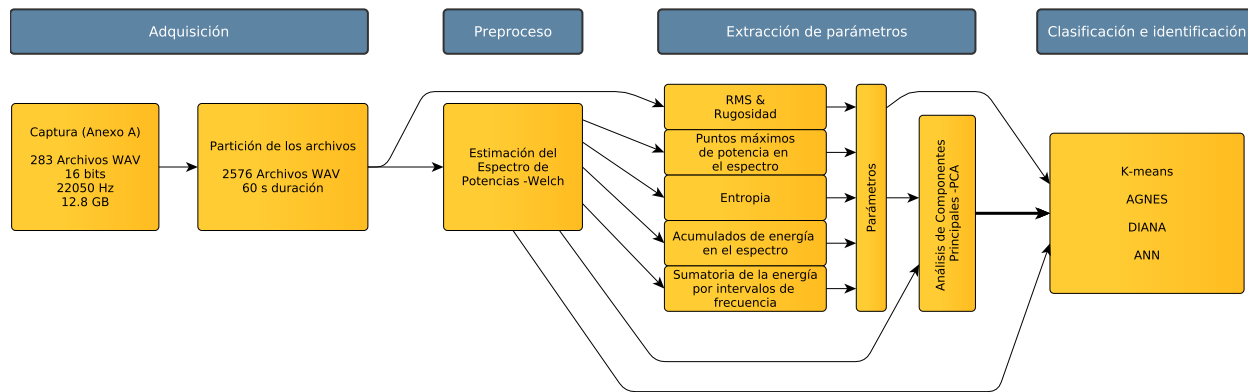


Figura 5-9.: Diagrama detallado de las etapas realizadas en la prueba en campo del sistema

En esta Sección se presentan los resultados de ejecutar el algoritmo expuesto en el Capítulo 3. Los 2576 archivos fueron procesados por el Monitor Onerex para obtener la estimación espectral de potencia por el método de Welch [78] y los parámetros presentados en el Capítulo 3, Sección 3.3. Los resultados de esta fase del procesamiento fueron almacenados en la base de datos del Servidor Onerex. Con base en los datos almacenados en la base de datos se realizó el Análisis de Componentes Principales PCA, la estimación del número de grupos en la muestra, la clasificación de los registros, la evaluación de desempeño de la clasificación y los ajustes al algoritmo.

5.5.1. Análisis de componentes principales PCA

En la Figura 5-10 se presenta el número de factores que reúnen la mayor cantidad de variación en estos datos. Cada barra representa el valor propio obtenido de la matriz de correlaciones en este caso para la variable de audio. El número ideal de componentes a tener en cuenta serán 2, ya que son las más altas y por tanto reúnen mayor variabilidad.

Para conocer el aporte que realiza cada variable sobre estos componentes se realiza un gráfico de correlaciones sobre el plano factorial presentado en la Figura 5-11. A medida que el vector que representa cada variable se acerca más al contorno circular, mayor será su influencia o correlación sobre alguno de los componentes, las variables que no representan mayor

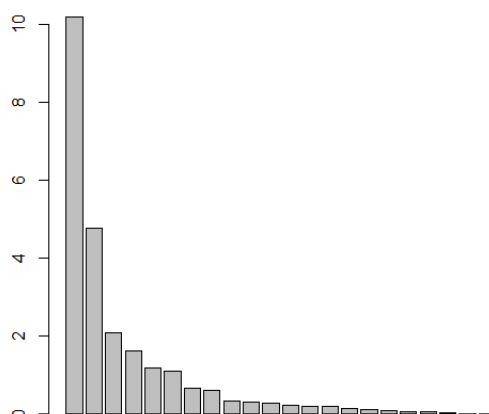


Figura 5-10.: Aporte a la varianza por componente

influencia sobre estos componentes se mantendrán cerca al centro del círculo.

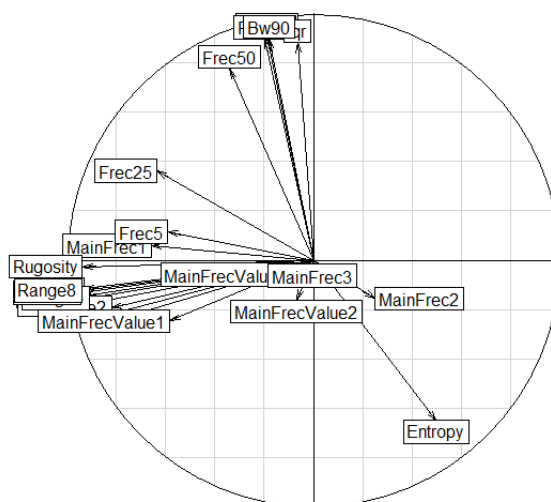
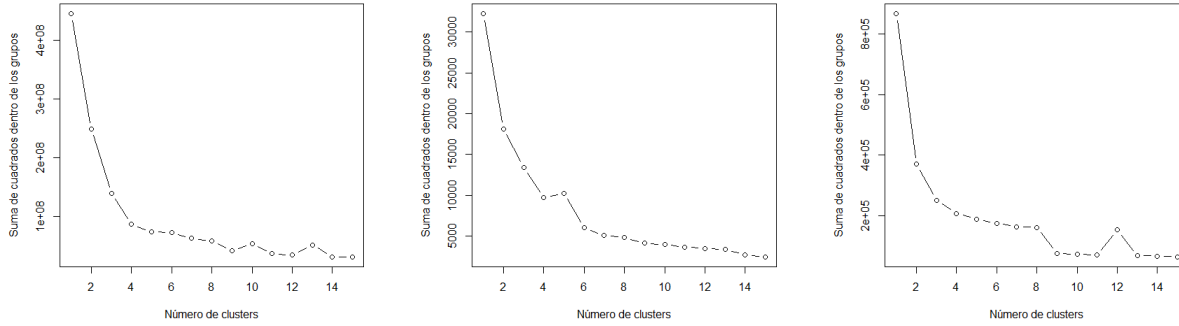


Figura 5-11.: Circulo de correlaciones para los parámetros de la señal de Audio

5.5.2. Estimación del número de clusters

Basados en los datos de prueba presentados en el Anexo A, sabemos que tenemos dos grupos (clusters) a clasificar: una colmena con abeja reina y una colmena sin abeja reina. Sin embargo, se realiza un análisis de suma de cuadrados para identificar el número de clusters optimo. En la Figura 5-12 se observa que a partir de 4 ó 5 clusters hay una suma de cuadrados baja, sin embargo en la Figura 5-13 se observa que el número de clusters adecuado es 2.

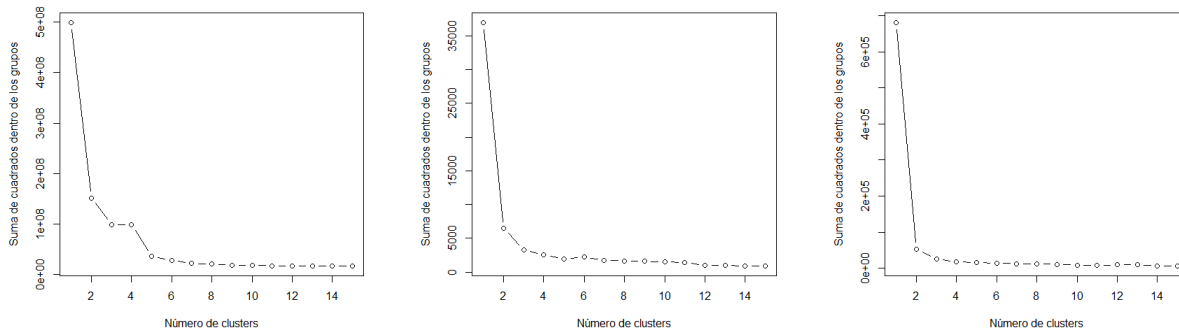


(a) Parámetros de la señal

(b) PCA de los Parámetros

(c) PCA Densidad Espectral

Figura 5-12.: Número de clusters optimo según la suma de cuadrados dentro los clusters para la señal de audio



(a) Parámetros de la señal

(b) PCA de los Parámetros

(c) PCA Densidad Espectral

Figura 5-13.: Número de clusters optimo según la suma de cuadrados dentro los clusters para la señal de vibración

5.5.3. Clasificadores usados

A continuación se presentan los parámetros usados en los algoritmos de clasificación del sistema. Todos los clasificadores fueron implementados en el Software estadístico R[60]. Los clasificadores implementados en este trabajo son:

1. K-Means
2. AGNES
3. DIANA
4. ANN

K-Means

El algoritmo de clasificación K-Means fue ejecutado con los siguientes parámetros:

Conjunto de datos: 100 % de la muestra.

Número de centros (clusters): 2.

Número de iteraciones: Se hicieron pruebas con 100, 50 y 10 iteraciones. El algoritmo siempre convergía al mismo resultado.

AGNES

El algoritmo de clasificación AGNES fue ejecutado con los siguientes parámetros:

Conjunto de datos: 100 % de la muestra.

Número de centros (clusters): 2.

Métrica empleada: Euclidiana, sin estandarizar datos.

Método de clustering: Promedio o UPGMA (unweighted pair-group average method).

DIANA

El algoritmo de clasificación DIANA fue ejecutado con los siguientes parámetros:

Conjunto de datos: 100 % de la muestra.

Número de centros (clusters): 2.

Métrica empleada: Euclidiana, sin estandarizar datos.

Redes Neuronales Artificiales (ANN)

El diagrama de la red neuronal artificial implementada con el paquete `nnet`[72] se presenta en la Figura 5-14.

Los parámetros para el entrenamiento feedforward de la ANN fueron:

Conjunto de datos: 50 % de la muestra.

Número de clusters: 2.

Número de iteraciones: Se realizaron pruebas con 100 iteraciones y la ANN no convergía. El número adecuado para ANN fue 800.

Peso inicial aleatorio: 0,1

Decaimiento del peso: 0,0005

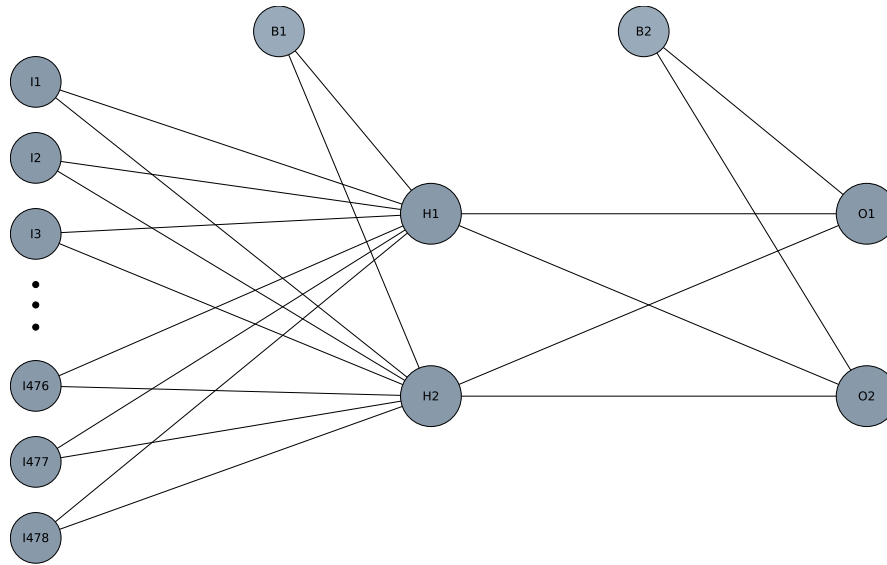


Figura 5-14.: Diagrama de la ANN implementada para la clasificación de los datos

Resultados de los clasificadores

Como resultado de la etapa de clasificación se obtiene una matriz de confusión que indica el número de registros agrupados correctamente. En la Tabla 5-6 se presenta un ejemplo de una clasificación perfecta para dos grupos. La suma de los elementos de la diagonal debe ser igual al total de la muestra y los valores fuera de la diagonal deben ser cero.

Tabla 5-6.: Ejemplo de una matriz de confusión para un resultado ideal

		Grupos estimados	
		G1	G2
Grupos observados	G1	X	0
	G2	0	Y

En la siguiente Sección se presenta la evaluación de desempeño de los clasificadores usados. Para la evaluación de desempeño de los clasificadores se usó el Test de Cohen Kappa [17], el cual evalúa la concordancia entre los grupos observados y estimados, con base en matrices de confusión como la presentada en la Tabla 5-6.

5.5.4. Evaluación de desempeño de los clasificadores

Después de ejecutar los algoritmos de clasificación se realizó una evaluación de desempeño. El objetivo de esta etapa es validar los clasificadores e identificar si detectan los registros con colmena huérfana o en estado normal. Los clasificadores fueron configurados para cuatro diferentes datos de entrada:

1. Parámetros presentados en el Capítulo 3, Sección 3.3.
2. PCA de los Parámetros.
3. Vector de Estimación espectral de potencia con el 90 % de la energía.
4. PCA del vector de Estimación espectral de potencia con el 90 % de la energía.

En las Tablas 5-7 y 5-8 se presentan los resultados con la señales de sonido y vibración respectivamente. Los algoritmos K-means, DIANES y AGNES tuvieron un pobre desempeño y no logran identificar los registros dentro de los grupos correctamente. Por el contrario, la red neuronal artificial clasifica mejor los registros. El caso de mejor ajuste es con el vector de estimación espectral de potencia de la señal de sonido. Los resultados con un índice Kappa entre el 41 % y el 60 % tienen un ajuste moderado mientras que los datos entre 61 % y 80 % se consideran con buena concordancia [46, 73].

Tabla 5-7.: Evaluación de los clasificadores con datos del Sonido

Método	Parámetros	Param PCA	Espectro	Espectro PCA
K-means	14,00 %	33,00 %	-1,80 %	2,60 %
AGNES	13,00 %	-0,09 %	-0,18 %	-0,09 %
DIANA	15,00 %	31,00 %	-0,18 %	-0,09 %
ANN	54,00 %	42,00 %	70,00 %	54,00 %

Tabla 5-8.: Evaluación de los clasificadores con datos de la Vibración

Método	Parámetros	Param PCA	Espectro	Espectro PCA
K-means	0,87 %	-0,45 %	-20,00 %	0,08 %
AGNES	-0,54 %	-0,45 %	-0,04 %	-0,45 %
DIANA	0,39 %	-0,45 %	-0,04 %	-0,45 %
ANN	45,00 %	53,00 %	44,00 %	57,00 %

En los resultados obtenidos se observa que con la red neuronal, es mayor la concordancia obtenida con el vector de densidad espectral que con los parámetros seleccionados. Este resultado es esperado, dado que los parámetros seleccionados buscan representar la señal sin perder información, sin embargo, la estimación espectral tiene mayor información sobre la señal.

El mejor índice de concordancia para la detección de colmena huérfana con el sonido es del 70 % y para vibración es del 57 %. Ambos resultados utilizan la información obtenida de la etapa de preproceso, aunque para el caso de vibración, los datos fueron sometidos al análisis de componentes principales PCA. El resultado del 70 % tiene una buena concordancia,

mientras que el resultado con vibración tiene un ajuste moderado. Esto puede ser asociado a la baja respuesta en frecuencia del acelerómetro utilizado.

5.5.5. Ajuste del algoritmo

5.5.5.1 Ajuste en la frecuencia de muestreo

Debido a que la energía de las señales de sonido y vibración se concentraban la mayor parte de su energía en las bajas frecuencias se ajusto la frecuencia de muestreo a 8000 Hz. En la Figura 5-15 se presenta el histograma del parámetro Energía 95 % para las señales de sonido y vibración.

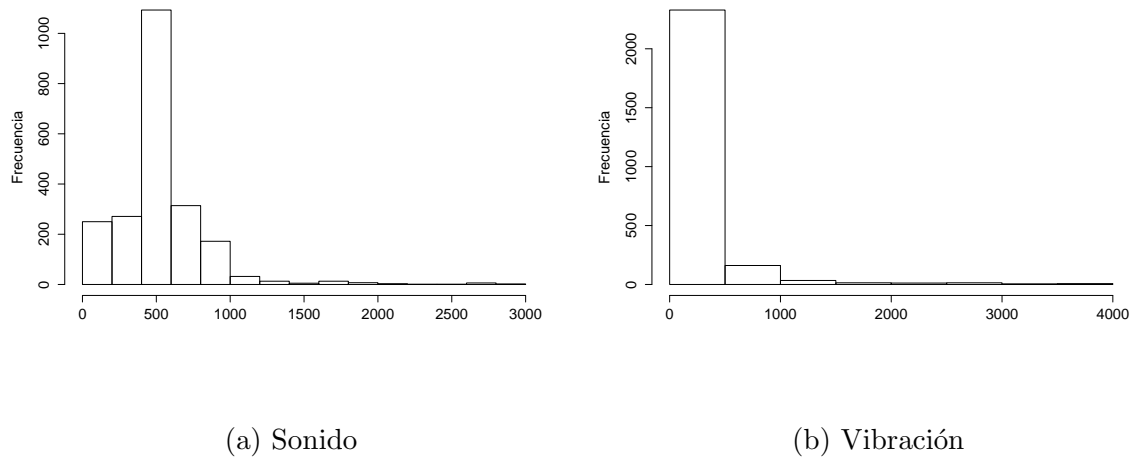


Figura 5-15.: Histograma para el parámetro frecuencia al 95 % para Sonido y Vibración

5.5.5.2 Módulo de detección de errores

Otro ajuste significativo fue la adición de un módulo de detección de errores que permite identificar cuando se presenta un problema en la grabación. Los casos detectados son la desconexión del micrófono y a cercanía de una abeja al micrófono. En el caso de desconexión, el parámetro RMS es mucho menor que los datos con el micrófono operando correctamente. Adicionalmente, la frecuencia donde la señal tiene el 95 % de la energía acumulada es menor que en otros casos.

5.6. Implementación del Servidor Onerex

El servidor Onerex se compone de los siguientes elementos:

- Aplicación web para la visualización y administración del sistema.
- Base de datos para el almacenamiento permanente de la información.

5.6.1. Aplicación Web

La aplicación web fue desarrollada en PHP, HTML5 y CSS3 usando el framework CodeIgniter [21] bajo la arquitectura Modelo - Vista - Controlador (MVC). La Figura 5-16, basada en la gráfica presentada por Atanasov [5], presenta la interacción de la aplicación web con su arquitectura y la base de datos. Las vistas, modelos y controladores contienen código relacionado con la funcionalidad específica del sistema Onerex. Por el contrario, los *helpers* y las librerías adicionales contienen código relacionado con tareas genéricas que no son el núcleo de la aplicación, por ejemplo, conectarse a una base de datos.

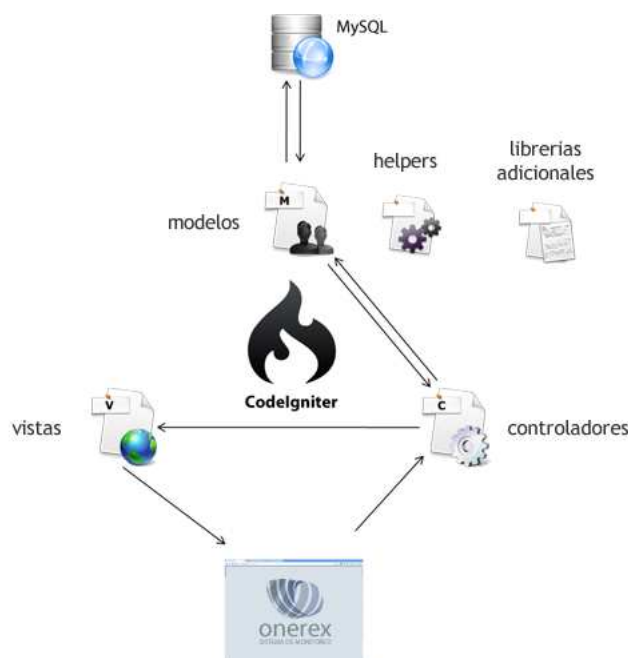


Figura 5-16.: Arquitectura del servidor Onerex

Los módulos de la aplicación web implementados para responder a las especificaciones presentadas en el Capítulo 3 son:

Aparios: En este módulo se presentan los apiarios monitoreados por el sistema.

Colmenas: En este módulo se presentan las colmenas monitoreadas por el sistema.

Visor de registros: En este módulo se presenta la información captada por el monitor Onerex.

Login y administrador de usuarios: Este módulo permite la autenticación de los usuarios a la aplicación web. También permite gestionar (crear, visualizar, actualizar y eliminar) usuarios.

En la Figura 5-17 se presentan algunas capturas de pantalla de la aplicación web.



(a) Login

(b) Visor de registros - Espectro

(c) Visor de registros - Datos

Figura 5-17.: Capturas de pantalla de la aplicación web del servidor Onerex

5.6.2. Base de datos

La persistencia de la información es implementada con una base de datos relacional. El motor de base de datos usado es MySQL [53]. Las entidades que deben ser almacenadas en la base de datos son: a) Usuarios, b) Colmenas, c) Apiarios y d) Registros del monitor.

En la Figura 5-18 se presenta el diagrama de entidad - relación con el cual se implemento la base de datos. De esta manera se construyen las tablas, las relaciones, las llave primarias y las llaves foraneas que componen la base de datos.

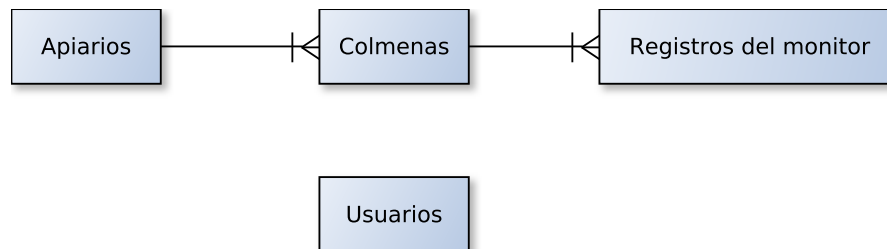


Figura 5-18.: Diagrama Entidad-Relación de la base de datos del servidor Onerex

6. Conclusiones y trabajo futuro

6.1. Conclusiones

Este trabajo presenta el diseño e implementación del Sistema de Monitoreo Onerex compuesto de un dispositivo ubicado en la colmena llamado Monitor Onerex y un sistema de información llamado Servidor Onerex. El sistema Onerex fue empleado en la detección del fenómeno *colmena huérfana* logrando identificar dicho fenómeno con una buena concordancia (70 % según el índice Kappa). El sistema puede ser usado para la detección de otros comportamientos realizando la captura de los datos y el entrenamiento de los clasificadores.

Se especificó y se implementó el Monitor Onerex, que responde a las necesidades del problema propuesto en este trabajo de investigación. El Monitor captura señales de audio con una Relación Señal Ruido (SNR) de 20 dB, capturando satisfactoriamente las señales de interés. El Monitor usa el estándar de comunicación Wi-Fi 802.11 g que usa las bandas ISM definidas por la UIT, y por lo tanto, el Monitor Onerex operará en cualquier lugar del mundo.

El rendimiento del Monitor Onerex es adecuado para la aplicación al momento de realizar el procesamiento de la señal. Los tiempos de ejecución de los algoritmos implementados permiten capturar con la resolución y en los intervalos de tiempo necesarios para procesar las señales de estudio.

El algoritmo de procesamiento de las señales de audio propuesto en este trabajo logra identificar con un 70 % de concordancia un caso de colmena huérfana. En el proceso de diseño de este algoritmo se realizaron pruebas con la Transformada Discreta Wavelet (DWT). Sin embargo, no se tuvieron resultados satisfactorios al ser implementado en el Monitor Onerex[3], teniendo un error porcentual cercano al 10 %.

El algoritmo de procesamiento de señales implementado usó un estimador espectral de potencia por el método Welch, permitiendo tener una adecuada resolución en frecuencia de la señal y eliminando información innecesaria. Se definieron parámetros de la señal que aportan información relevante para el ajuste del algoritmo y para la clasificación de las señales capturadas. El algoritmo de clasificación basado en redes neuronales artificiales (ANN) tuvo mejor desempeño que los algoritmos K-Means, AGNES y DIANA.

Se desarrollo y se implementó una aplicación web (Servidor Onerex) para la visualización y centralización de la información capturada por los Monitores Onerex. El servidor Onerex se diseño bajo una metodología ágil de software y contó con una fase de ingeniería de requerimientos. Se usaron Frameworks de código abierto y ampliamente usados, ademas de una arquitectura de la aplicación Modelo - Vista - Controlador. Esto permite que el Servidor Onerex sea una aplicación mantenible por terceros.

En el desarrollo del Sistema de Monitoreo Onerex se realizaron pruebas de verificación y se calcularon métricas de desempeño del sistema. Se utilizaron metodologías de desarrollo para hardware y software que involucraban procesos de verificación y aseguramiento de la calidad.

En este proyecto se usaron herramientas de software libre y plataformas de hardware copyleft, haciendo al sistema de monitoreo desarrollado una herramienta de libre distribución que puede ser el soporte para investigaciones sobre el comportamiento de *Apis Mellifera* y el de otras especies.

6.2. Trabajo Futuro

Los trabajos futuros en este campo son:

- Integrar variables climáticas y sensores de conteo de individuos, peso de la colmena, temperatura al interior de la colmena, y humedad relativa al Monitor para evaluar su efecto en el comportamiento de la colmena.
- Realizar pruebas en campo y entrenar los clasificadores para detectar otro tipo de fenómenos comportamentales de las abejas.
- Seleccionar un acelerómetro que tenga una mayor respuesta en frecuencia y bajo precio.
- Hacer ajustes al algoritmo propuesto en este trabajo para evaluar su desempeño respecto a otras técnicas de procesamiento. Ajustes en las transformaciones del dominio del tiempo al tiempo o tiempo-frecuencia pueden ser estudiadas.
- Comparar el algoritmo de clasificación usado en este trabajo con otros existentes y evaluar su desempeño en términos de confianza y eficiencia computacional.
- Instalar varios Monitores Onerex en campo y un Servidor Onerex en la nube. Esto permitirá a ingenieros de procesamiento de señales, a biólogos y veterinarios proponer nuevos fenómenos de las colmenas a estudiar.

A. Anexo: Pruebas con el Monitor Onerex en Campo

En este anexo se presentan los datos de las pruebas realizadas en conjunto con Alzate y Montoya [2]. Las pruebas fueron realizadas en el apiario ubicado en el Centro Agropecuario Marengo de la Universidad Nacional. En este anexo se presenta la bitacora de visitas al apiario y un análisis de los datos con estadística descriptiva. A continuación se presenta la bitácora de visitas al apiario y un análisis descriptivo de los datos.

A.1. Bitacora de visitas al apiario

- 1 - 28 de noviembre de 2012:** Se realizan las primeras. Se configuran grabaciones de 25 minutos realizadas cada hora. (1 Hora y 25 minutos entre la generación del archivo). Se realizaron 18 grabaciones.
- 2 - 30 de noviembre de 2012:** Sin novedades. Se obtienen 17 grabaciones con la misma configuración de duración y frecuencia. Debido a un daño en el cargador de baterías se posponen las mediciones del 1 de diciembre al 5 de diciembre. También se decide cambiar la capacidad de corriente de la batería (de 12 V – 9 Ah, a 12 V – 18 Ah) para asegurar un mayor tiempo de medición entre visitas al Centro Agropecuario.
- 3 - 5 de diciembre de 2012:** Sin ninguna novedad. Fueron capturadas 54 grabaciones con una duración de 6 minutos realizadas cada hora. (1 Hora y 6 minutos entre la generación del archivo).
- 4 - 10 de diciembre de 2012:** Se obtuvieron 6 grabaciones. Se realiza una revisión del equipo para determinar la causa del número reducido de grabaciones. No se encuentra una falla evidente
- 5 - 13 de diciembre de 2012:** Se observa que la malla electro-soldada que encierra al micrófono está cubierta de cera solamente en sus orificios. Por lo tanto se procede a cambiar la malla y a recubrirla con una tela delgada (Media de Nylon). Se obtuvieron 24 grabaciones.
- 6 - 18 de diciembre de 2012:** Se empiezan con las pruebas específicas de ambientes alterados retirando un cuadro de cría y se agregando uno vacío. Solo se capturaron 2

grabaciones. Se revisa el monitor y se detecta un problema de conexión entre la tarjeta principal y la memoria USB donde se almacenan las grabaciones. Se posponen las mediciones hasta que se asegure el correcto funcionamiento del módulo de medición. Además se hará necesario empezar de nuevo con las mediciones de ambientes alterados.

Se decide cambiar la malla electro-soldada con tela que recubre el micrófono por una malla plástica con tela, ya que el plástico es un material con una temperatura mayor que el metal y esto puede evitar que las abejas cubran con cera la malla o por lo menos que lo hagan en menor cantidad.

7 - 28 de diciembre de 2012: A las 11 de la mañana se activó de nuevo el monitor para grabar 4 horas en condiciones normales. Posteriormente, alrededor de las 3 de la tarde se introdujo un cuadro de cría nuevo (con los orificios en cera). Se capturaron 25 registros de 6 minutos.

8 - 2 de enero de 2013: Continuando con el protocolo de medición se procede a retirar la reina durante 24 horas. Hora de retiro: 13:22. Se capturan 22 grabaciones.

9 - 3 de enero de 2013: Se introduce nuevamente la reina a las 14:05. Se capturan 31 registros.

10 - 9 de enero de 2013: Se retira nuevamente la reina durante 24 horas. Se capturan 23 registros.

11 - 10 de enero de 2013: Se introduce nuevamente la reina a las 14:12. No se realizaron grabaciones.

12 - 16 de enero de 2013: Se pone en funcionamiento para observar condiciones normales de la colmena 24 horas antes de retirar la reina. Se capturan 28 registros.

13 - 17 de enero de 2013: Se retira la reina a las 11:54 por 24 horas. Las grabaciones realizadas del 17 al 21 de enero de 2013 no contienen ninguna información debido a un mal contacto en el micrófono con el módulo de medición.

En total se capturaron 283 archivos .WAV con las señales de sonido y vibración. Estos fueron divididos en archivos de 1 minuto de duración separando los canales en archivos .WAV diferentes. Estos fueron 2576 archivos para las señales de sonido y la misma cantidad para las señales de vibración. De estos archivos fueron descartados 393, debido a que en la captura de los datos hubo problemas de desconexión de los sensores. De los 2183 archivos restantes, 320 archivos fueron de colmena sin reina y 1863 fueron de colmena con reina.

A.2. Análisis de los datos con estadística descriptiva

En la Tabla A-1 se presenta la correlación entre los parámetros de las señales de vibración y sonido. Según estos datos, no existe una correlación fuerte entre las dos señales.

Tabla A-1.: Correlación entre parámetros de Vibración y Sonido

	Rms	Entropía	MainFrecValue	MainFrec	Frec25	Frec5	Frec75	Frec95	Ir	Bw90	Rugosity
VRms	0.06	-0.04	0.08	-0.02	-0.02	0.01	0.02	0.11	0.03	0.11	0.17
VEntropy	-0.09	0.13	-0.03	-0.11	-0.10	-0.10	-0.03	-0.10	-0.01	-0.10	-0.15
VMainFrecValue1	-0.01	0.02	0.02	-0.02	-0.02	0.02	-0.01	0.01	-0.00	0.01	-0.00
VMainFrec1	0.05	-0.02	0.03	0.01	0.00	0.01	-0.00	0.06	-0.00	0.06	0.13
VFrec25	0.09	-0.07	0.03	0.06	0.05	0.05	0.01	0.16	0.00	0.15	0.28
VFrec5	0.07	-0.08	0.01	0.08	0.07	0.07	0.01	0.14	-0.00	0.14	0.24
VFrec75	0.09	-0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.01	0.14	0.00	0.14	0.27
VFrec95	0.01	-0.02	0.00	-0.00	-0.01	0.02	0.00	0.07	0.00	0.07	0.09
VIqr	0.09	-0.04	0.05	0.03	0.03	0.03	0.01	0.13	-0.00	0.13	0.26
VBw90	0.01	-0.02	0.00	-0.00	-0.01	0.02	0.00	0.07	0.01	0.07	0.09
VRugosity	0.09	-0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.01	0.15	0.01	0.15	0.28

En la Tabla A-2 se evidencia la correlación entre el parámetro Frec95 y el ancho de banda con el 90 % de la energía BW90. Esto se debe a su forma de cálculo. Otra correlación apreciable esta entre los parámetros Rugosidad y RMS, de igual forma su explicación es la forma de calculo de la rugosidad.

Tabla A-2.: Correlación entre parámetros de Audio

	Rms	Entropy	MainFrecValue1	MainFrec1	Frec25	Frec5	Frec75	Frec95	Iqr	Bw90	Rugosity
Rms	1.00	-0.29	0.73	0.57	0.48	0.52	-0.02	-0.05	-0.12	-0.06	0.85
Entropy	-0.29	1.00	0.01	-0.52	-0.60	-0.42	-0.56	-0.68	-0.47	-0.67	-0.51
MainFrecValue1	0.73	0.01	1.00	0.23	0.21	0.41	-0.03	-0.07	-0.07	-0.09	0.50
MainFrec1	0.57	-0.52	0.23	1.00	0.76	0.60	0.04	0.09	-0.12	0.07	0.67
Frec25	0.48	-0.60	0.21	0.76	1.00	0.59	0.36	0.31	0.17	0.30	0.61
Frec5	0.52	-0.42	0.41	0.60	0.59	1.00	0.13	0.16	0.01	0.13	0.60
Frec75	-0.02	-0.56	-0.03	0.04	0.36	0.13	1.00	0.80	0.98	0.80	0.09
Frec95	-0.05	-0.68	-0.07	0.09	0.31	0.16	0.80	1.00	0.78	1.00	0.18
Iqr	-0.12	-0.47	-0.07	-0.12	0.17	0.01	0.98	0.78	1.00	0.78	-0.03
Bw90	-0.06	-0.67	-0.09	0.07	0.30	0.13	0.80	1.00	0.78	1.00	0.17
Rugosity	0.85	-0.51	0.50	0.67	0.61	0.60	0.09	0.18	-0.03	0.17	1.00

En la Tabla A-3 se presenta la la matriz de correlación entre los parámetros de vibración. Se observa una relación entre los parámetros Frec5 y Frec25. Esto puede ser explicado por el tipo de sensor utilizado que sensa la aceleración debido al campo gravitacional. Esto hace que la señal de vibración tenga un alto componente de enegía en bajas frecuencias y que los parámetros estén altamente correlacionados.

Tabla A-3.: Correlación entre parámetros de Vibración

	Rms	Entropy	MainFrecValue1	MainFrec1	Frec25	Frec5	Frec75	Frec95	Iqr	Bw90	Rugosity
Rms	1.00	-0.64	-0.00	0.27	0.63	0.59	0.61	0.30	0.58	0.30	0.67
Entropy	-0.64	1.00	0.05	-0.12	-0.46	-0.60	-0.39	-0.40	-0.37	-0.39	-0.36
MainFrecValue1	-0.00	0.05	1.00	0.02	-0.04	0.01	-0.01	0.02	-0.00	0.02	-0.01
MainFrec1	0.27	-0.12	0.02	1.00	0.48	0.44	0.41	0.20	0.38	0.20	0.44
Frec25	0.63	-0.46	-0.04	0.48	1.00	0.95	0.90	0.46	0.85	0.46	0.97
Frec5	0.59	-0.60	0.01	0.44	0.95	1.00	0.82	0.45	0.77	0.45	0.88
Frec75	0.61	-0.39	-0.01	0.41	0.90	0.82	1.00	0.61	1.00	0.60	0.94
Frec95	0.30	-0.40	0.02	0.20	0.46	0.45	0.61	1.00	0.62	1.00	0.46
Iqr	0.58	-0.37	-0.00	0.38	0.85	0.77	1.00	0.62	1.00	0.62	0.91
Bw90	0.30	-0.39	0.02	0.20	0.46	0.45	0.60	1.00	0.62	1.00	0.45
Rugosity	0.67	-0.36	-0.01	0.44	0.97	0.88	0.94	0.46	0.91	0.45	1.00

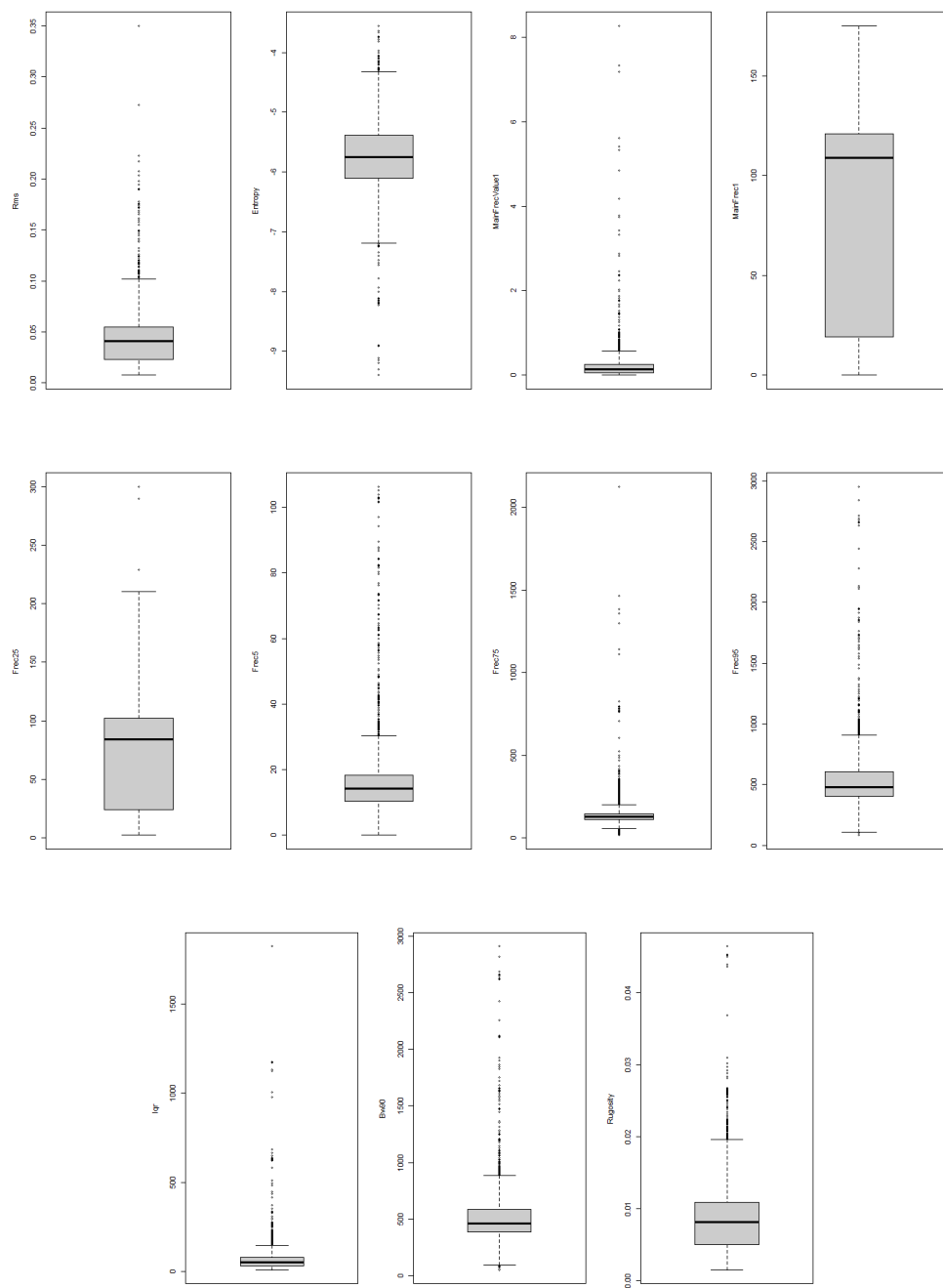


Figura A-1.: Diagrama de caja de los parámetros de la señal de audio

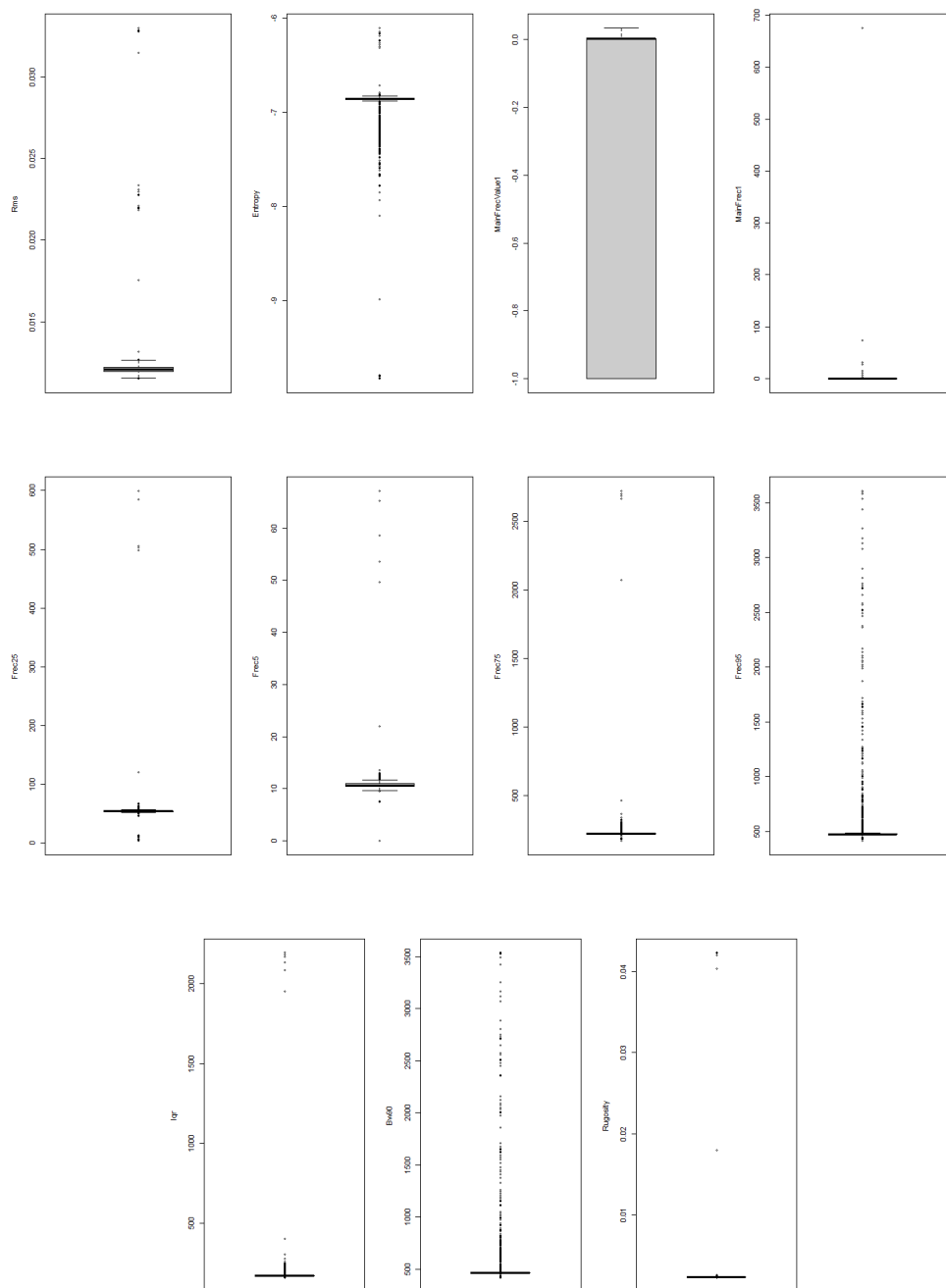


Figura A-2.: Diagrama de caja de los parámetros de la señal de vibración

Bibliografía

- [1] ACOSTA SARMIENTO, Jhair S. ; CUARÁN VALENZUELA, José R.: *Diseño y construcción de un sistema de alimentación eléctrico a partir de energía solar para un equipo de instrumentación de un apiario en Marengo*, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2012
- [2] ALZATE GIRALDO, Ángela P. ; MONTOYA MORALES, David A.: *Caracterización del comportamiento de una colmena apícola mediante el análisis de señales de vibración mecánica*, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2013
- [3] AMADO SARMIENTO, Oscar A. ; ESLAVA GARZON, Sebastian: Implementation of a Wavelet Discrete Transform on agricultural applications. En: *4th IEEE Colombian Workshop on Circuits and Systems*, 2012
- [4] APILINK.NET. *Acerca de Apilink [ONLINE]*. <http://150.214.114.80:5901/portal/index.html>. Octubre 2011
- [5] ATANASOV, Yavor: *Development of a website for user generated video on demand*, University of Portsmouth, Tesis de Grado, 2009
- [6] ATAURI MEZQUIDA, David ; LLORENTE MARTÍNEZ, Jesús: Short communication. Platform for bee-hives monitoring based on sound analysis. A perpetual warehouse for swarm apos;s daily activity. En: *Spanish Journal of Agricultural Research* 7 (2009), Nr. 4. – ISSN 2171–9292
- [7] BABUŠKA, Robert. *Fuzzy and Neural Control*. 2009
- [8] BARRETO BERNAL, Diego F. ; MACÍAS RINCÓN, Fredy A.: *Diseño y construcción de un sistema de alimentación y soporte de energía para instrumentación remota*, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2013
- [9] BEAGLEBOARD. *BeagleBoard ONLINE*. <http://beagleboard.org/>. Junio 2012
- [10] BELTRAN PINILLA, Raul I.: *Diseño y construcción de una tarjeta de instrumentación para la adquisición, registro y procesamiento de señales de audio en un apiario*, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2011

-
- [11] BENCSIK, Martin ; BENCSIK, Joseph ; BAXTER, Michael ; LUCIAN, Andrei ; ROMIEU, Julien ; MILLET, Mathias: Identification of the honey bee swarming process by analysing the time course of hive vibrations. En: *Comput. Electron. Agric.* 76 (2011), March, p. 44–50. – ISSN 0168–1699
- [12] BOSETTI, Paolo. *Peak Search Algorithm ONLINE*. Julio 2009
- [13] BROMENSHENK, Jerry J. ; HENDERSON, Colin B. ; SECCOMB, Robert A. ; RICE, Steven D. ; ETTER, Robert T. *Honey bee acoustic recording and analysis system for monitoring hive health*. 06 2009
- [14] BRUNDAGE, Trenton J. *Acoustic sensor for beehive monitoring*. 03 2010
- [15] CAMARGO BAREÑO, Carlos I. *Plataforma de desarrollo ECBOT*. <http://gmun.unal.edu.co/cicamargoba/embebidos/book.pdf>. 2011
- [16] CHALLOO, R. ; OLADEINDE, A. ; YILMAZER, N. ; OZCELIK, S. ; CHALLOO, L.: An Overview and Assessment of Wireless Technologies and Co- existence of ZigBee, Bluetooth and Wi-Fi Devices. En: *Procedia Computer Science* 12 (2012), Nr. 0, p. 386 – 391. – Complex Adaptive Systems 2012. – ISSN 1877–0509
- [17] COHEN, J.: A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. En: *Educational and Psychological Measurement* 20 (1960), Nr. 1, p. 37
- [18] CORNELL LAB OF ORNITHOLOGY. *Raven Interactive Sound Analysis Software Overview [ONLINE]*. <http://www.birds.cornell.edu/brp/raven/RavenOverview.html>. Septiembre 2012
- [19] CUELLO MEJÍA, Darío A. ; BECERRA ESLAVA, Gabriel J.: *Diseño e implementación de un sistema de instrumentación para señales de vibración en una colmena apícola*, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2012
- [20] DROSOPOULOS, S. ; CLARIDGE, M.F.: *Insect Sounds and Communication: Physiology, Behaviour, Ecology, and Evolution*. Taylor & Francis, 2005 (Contemporary Topics in Entomology). – ISBN 9780849320606
- [21] ELLISLAB INC. *CodeIgniter PHP Framework*. <http://ellislab.com/codeigniter>. 2012
- [22] ENDEVCO: Steps to selecting the right accelerometer / Endevco. 2012. – Informe de Investigación
- [23] EREN, H. ; WHIFFLER, L. ; MANNING, R.: Electronic sensing and identification of queen bees in honeybee colonies. En: *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1997. IMTC/97. Proceedings. 'Sensing, Processing, Networking', IEEE* Vol. 2, 1997, p. 1052 –1055 vol.2

- [24] ESCH, Harald ; WILSON, Donald: The sounds produced by flies and bees. En: *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 54 (1967), p. 256–267. – 10.1007/BF00298031. – ISSN 0340–7594
- [25] FERRARI, S. ; SILVA, M. ; GUARINO, M. ; BERCKMANS, D.: Monitoring of swarming sounds in bee hives for early detection of the swarming period. En: *Comput. Electron. Agric.* 64 (2008), November, p. 72–77. – ISSN 0168–1699
- [26] FREESCALE SEMICONDUCTOR: *i.MX23 Applications Processor Reference Manual*. 1, 2009
- [27] FUNDACIÓN APIS QUINHUENSIS. *La Historia de la Apicultura en Colombia*. <http://asaquinguindihuenensis.blogspot.com/2009/04/la-historia-de-la-apicultura-en.html?m=1>. 2009
- [28] GIMÉNEZ, Carlos. *Teoría y Aplicaciones de la Informática 2: Acelerómetro*. <http://www.jeuazaru.com/docs/Acelerometro.pdf>. 2009
- [29] GRAPS, Amara: An introduction to wavelets. En: *IEEE Computational Science and Engineering* 2 (1995), p. 50–61
- [30] GUTIÉRREZ, Jeisson A.: *Diseño y construcción de un sistema de medición y transmisión de información inalámbrico para la apicultura*, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2012
- [31] GUZMÁN MENDOZA, Luis C. ; JARAMILLO BUITRAGO, Jorge A.: *Desarrollo e Implementación de un Sistema de Instrumentación Para Señales de Audio y Vibración en una Colmena Apícola*, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2011
- [32] INGRID AGUILAR ; DANIEL BRICEÑO: Sounds in *Melipona costaricensis* (Apidae: Meliponini): effect of sugar concentration and nectar source distance. En: *Apidologie* 33 (2002), Nr. 4, p. 375–388
- [33] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION IEC: *International Standard 60529 - Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*. 2.1, 2001
- [34] JAIN, Anil K.: Data clustering: 50 years beyond K-means. En: *Pattern Recognition Letters* 31 (2010), Nr. 8, p. 651 – 666. – jce:title¿Award winning papers from the 19th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)¿/ce:title¿xocs:full-name¿19th International Conference in Pattern Recognition (ICPR)¿/xocs:full-name¿. – ISSN 0167–8655
- [35] JAMES C. NIEH: Recruitment communication in stingless bees (Hymenoptera, Apidae, Meliponini). En: *Apidologie* 35 (2004), Nr. 2, p. 159–182

-
- [36] KERR, Howard T. ; BUCHANAN, Michael E. ; VALENTINE, Kenneth H. *Method and device for identifying different species of honeybees*. 10 1989
- [37] KINSLER, Lawrence E. ; RUIZ BOULLOSA, Ricardo: *Fundamentos de acustica*. Mexico : Limusa/Grupo Noriega, 1992
- [38] KIRCHNER, W.H.: Acoustical communication in honeybees. En: *Apidologie* 24 (1993), Nr. 3, p. 297–307. – ISSN 0044–8435
- [39] LEE, Jin-Shyan ; SU, Yu-Wei ; SHEN, Chung-Chou: A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. En: *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE, 2007*. – ISSN 1553–572X, p. 46 –51
- [40] LINARES, Naryana. *Propuesta de un procedimiento para el flujo de trabajo de requisitos en un proyecto de software*. En Departamento de Ingeniería y Gestión de Software, Ciudad de La Habana, Cuba. 2008
- [41] LINUX EN CAJA. *AndroidStamp [ONLINE]*. www.linuxencaja.net/wiki/AndroidStamp. Junio 2012
- [42] LINUX EN CAJA. *SIE [ONLINE]*. <http://linuxencaja.net/wiki/SIE>. Junio 2012
- [43] LIVESAY, Ed. *Understanding The Vericom VC-2000 Accelerometer- Pitfalls for the Operator and Making Comparisons to Other Drag Factor Determination Methods*. <http://www.tarorigin.com/art/Elivesay/>. 2007
- [44] LOAIZA CIRO, Diana M. *Mejoría del proceso de gestión de requerimientos apoyado en la aplicación de una metodología agil*. En Universidad Autónoma de Manizales. 2010
- [45] LONDOÑO, Anaya Raquel Tabares Marta S.: ANÁLISIS DE LA INGENIERÍA DE REQUISITOS ORIENTADA POR ASPECTOS SEGÚN LA INDUSTRIA DEL SOFTWARE. En: *Revista EIA [online]* 9 (2008), Julio, p. 43–52. – ISSN 1794–1237
- [46] LÓPEZ DE ULLIBARRI GALPARSORO I, PITA FERNÁNDEZ, S.: Medidas de concordancia: el índice Kappa. En: *Cad Aten Primaria* 6 (1999), p. 169–171
- [47] MICHAEL HRNCIR ; STEFAN JARAU ; RONALDO ZUCCHI ; FRIEDRICH G. BARTH: Recruitment behavior in stingless bees, *Melipona scutellaris* and *M. quadrifasciata*. II. Possible mechanisms of communication. En: *Apidologie* 31 (2000), Nr. 1, p. 93–113
- [48] MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL: *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de las abejas y la apicultura en Colombia con énfasis en miel de abejas*. 2010

-
- [49] MIRZAEI, Golrokh ; MAJID, Mohammad W. ; ROSS, Jeremy ; JAMALI, Mohsin M. ; GORSEVSKI, Peter V. ; FRIZADO, Joseph P. ; BINGMAN, Verner P.: The BIO-acoustic feature extraction and classification of bat echolocation calls. En: *EIT*, IEEE, 2012. – ISBN 978–1–4673–0819–9, p. 1–4
- [50] MÉNDEZ ÁVILA, Angela A. ; MÁRQUEZ REYES, Octavio A.: *Módulo de monitoreo apícola*, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2012
- [51] NAVARRO LÓPEZ, Sergio D.: *Diseño e implementación de un sistema de supervisión y monitoreo para la apicultura*, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2012
- [52] NUMPAQUE LOPEZ, Humberto: Incorporación de herramientas tecnológicas para determinar la actividad de la abeja Apis Mellifera en el proceso de polinización Inducida de cultivos de frutos comerciales del trópico Colombiano. En: *Revista Colombiana De Ciencias Pecuarias* Vol. 24, 2011. – ISSN 0120–0690
- [53] ORACLE CORPORATION. *What is MySQL? Reference Manual*. <http://dev.mysql.com/doc/refman/5.1/en/what-is-mysql.html>. 2013
- [54] OWSINSKI, B.: *The Recording Engineer's Handbook*. Course Technology, 2009. – ISBN 9781598638677
- [55] PANASONIC. *Omnidirectional Electret Condenser Microphone WM-63PR Datasheet*. <http://industrial.panasonic.com/www-data/pdf/ABA5000/ABA5000CE3.pdf>
- [56] PAPACHRISTOFOROU, ALEXANDROS ; SUEUR, JÉRÔME ; RORTAIS, AGNÈS ; ANGELOPOULOS, SOTIRIOS ; THRASYVOULOU, ANDREAS ; ARNOLD, GÉRARD: High frequency sounds produced by Cyprian honeybees Apis mellifera cypria when confronting their predator, the Oriental hornet Vespa orientalis. En: *Apidologie* 39 (2008), Nr. 4, p. 468–474
- [57] PASTOR, Kristen A. ; SEELEY, Thomas D.: The Brief Piping Signal of the Honey Bee: Begging Call or Stop Signal? En: *Ethology* 111 (2005), Nr. 8, p. 775–784. – ISSN 1439–0310
- [58] PRIETO, Flavio. *Representación y descripción de imágenes*. Transparencias de clase. 2011
- [59] PROAKIS, J.G. ; MANOLAKIS, D.G.: *Digital signal processing: principles, algorithms, and applications*. Prentice Hall, 1996 (Prentice-Hall International editions). – ISBN 9780133737622
- [60] R CORE TEAM: *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2013

-
- [61] RANGEL, Juliana ; SEELEY, Thomas D.: The signals initiating the mass exodus of a honeybee swarm from its nest. En: *Animal Behaviour* 76 (2008), Nr. 6, p. 1943 – 1952. – ISSN 0003–3472
- [62] REYNOLDS, D. R. ; RILEY, J. R.: Remote-sensing, telemetric and computer-based technologies for investigating insect movement: a survey of existing and potential techniques. En: *Computers and Electronics in Agriculture* 35 (2002), Nr. 2-3, p. 271 – 307. – ISSN 0168–1699
- [63] RITTSCHOF, Clare C. ; SEELEY, Thomas D.: The buzz-run: how honeybees signal ‘Time to go!’. En: *Animal Behaviour* 75 (2008), Nr. 1, p. 189 – 197. – ISSN 0003–3472
- [64] ROSSING, Thomas D.: *The science of sound*. Norwood, MA, USA : Addison Wesley, 1989
- [65] SALAMANCA GROSSO, Guillermo. *La apicultura naturaleza y perspectivas Colombia y su contexto*. http://www.beekeeping.com/articulos/salamanca/apicultura_naturaleza.htm. 2001
- [66] SALLY, G.: *Pro Linux Embedded Systems*. Apress, 2009 (IT Pro). – ISBN 9781430272267
- [67] SCILAB ENTERPRISES: *Scilab: Free and Open Source software for numerical computation*. Orsay, France: Scilab Enterprises, 2012
- [68] SMITH, Lindsay I.: A tutorial on principal components analysis / Cornell University, USA. 2002. – Informe de Investigación
- [69] STALLINGS, W. ; VERDEJO, J.E.D.: *Comunicaciones y redes de computadores*. Pearson Educación, 2004 (Fuera de colección Out of series). – ISBN 9788420541105
- [70] TAUSWORTHE, Robert C.: The work breakdown structure in software project management. En: *J. Syst. Softw.* 1 (1984), Septiembre, p. 181–186. – ISSN 0164–1212
- [71] UNESCO: *IDAMS Statistical Software - Advanced Guide*, 2008
- [72] VENABLES, W. N. ; RIPLEY, B. D.: *Modern Applied Statistics with S*. Fourth. New York : Springer, 2002. – ISBN 0-387-95457-0
- [73] VIERA, Anthony J. ; GARRETT, Joanne M.: Understanding Interobserver Agreement: The Kappa Statistic. En: *Family Medicine* 37 (2005), Mayo, Nr. 5, p. 360–363. – ISSN 0742–3225
- [74] VILLAMIL, Alejandra Maria R. ; ROMERO, Andrés Mauricio R.: *Sistema de Alarmas y Monitoreo de Seguridad en un Apiario*, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2012

-
- [75] VOJÁČEK, Anthony. *Principy akcelerometrů*. <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007012601>. 2007
- [76] ÁRVÁNÉ VÁNYI, Georgina ; CSAPÓ, Zsolt ; KÁRPÁTI, László: Positiv externality of honey production. En: *120th EAAE Seminar*, 2010
- [77] WATTEROTT, Andreas. *FriendlyARM ONLINE*. <http://www.friendlyarm.net/>. Junio 2012
- [78] WELCH, P. D.: The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. En: *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics* 15 (1967), p. 70–73
- [79] WIAK, Slawomir ; SMÓLKA, Krzysztof ; MARIA DEMS, Krzysztof K.: Numerical modeling of 3D intelligent comb drive accelerometer structure: Mechanical models. En: *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* 25 (2006), p. 697 – 704
- [80] WILCOXON RESEARCH: Reading Accelerometer Specifications / Wilcoxon Research. 1997. – Informe de Investigación
- [81] WOODS, Edward F. *Means for detectind and indicating the activities of bees and conditions in beehives*. 09 1957
- [82] XVI ENCUESTRO COLOMBIANO DE APICULTURA. *Presentación y Justificación del XVI Encuentro Colombiano de Apicultura*. <http://apiencuentro2012.blogspot.com/2009/08/participantes.html>. 2012
- [83] YANG, Che-Chang ; HSU, Yeh-Liang: A Review of Accelerometry-Based Wearable Motion Detectors for Physical Activity Monitoring. En: *Sensors* 10 (2010), Nr. 8, p. 7772–7788. – ISSN 1424–8220
- [84] ZCOMAX TECHNOLOGIES INC.: *Wireless N USB Adapter for GNU / Linux (TPE-N150USB)*. 1.6, 2011