

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Diseño de un circuito integrado digital como detector de disparos de armas de fuego y motosierras, basado en correlación bitstream.

Informe final de proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en electrónica con grado de Licenciatura.

Gabriel Loría Marín

14 de diciembre de 2016

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

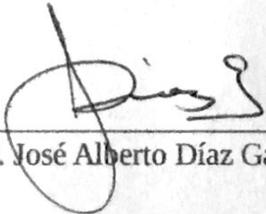
PROYECTO DE GRADUACIÓN

ACTA DE APROBACIÓN

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

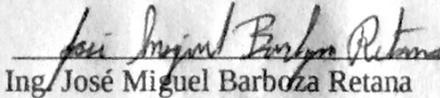
El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado Diseño de un circuito integrado digital como detector de disparos de armas de fuego y motosierras, basado en correlación bitstream, realizado por el señor Gabriel Loría Marín y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador



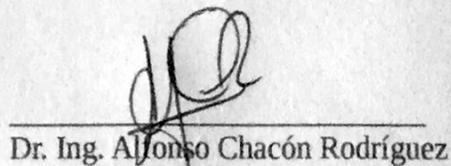
Ing. José Alberto Díaz García

Profesor lector



Ing. José Miguel Barboza Retana

Profesor lector

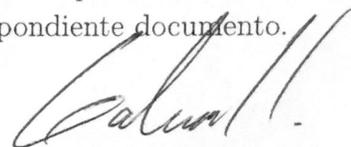


Dr. Ing. Alfonso Chacón Rodríguez

Profesor asesor

Cratago, 12 de diciembre del 2016

Declaro que el presente informe de proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios. En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente documento.



Gabriel Loría Marín

Cartago, 14 de diciembre de 2016

Céd: 1-1441-0257

Resumen

El diseño de un detector de señales en FPGA. Este es un procedimiento el cuál comprende varios campos de la ingeniería en electrónica, es necesario realizar un manejo de las señales que garantice el correcto tratamiento de las mismas. Se utilizan principios de la teoría de correlación y procesamiento digital de señales (DSP, por sus siglas en inglés) para el análisis de las mismas.

En este documento se describe el proceso de diseño para FPGA de un detector de patrones acústicos para aplicaciones de protección ambiental, basado en correlación de señales. El diseño es verificado con sonidos previamente grabados de motosierras y armas de fuego.

Palabras clave: DSP, correlación de señales, correlación bitstream, FPGA

Abstract

The design process of an audio signal detector is a process that comprehends several fields of electronic engineering. Such as handling audio signals with proper treatment, principles of digital signal processing (DSP) and signal correlation in order to create a proper signal detection system.

This document describes the design process in FPGA of an acoustic signal detector for environmental protection applications. This mentioned detector works with correlation signal theory, and its verification is made with previously recorded sounds of fireguns and chainsaws.

Keywords:DSP, signal correlation, bitstream correlation, FPGA.

a mi querida familia

Agradecimientos

El resultado de este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo de todas esas personas que estuvieron a mi alrededor durante mi tiempo de estudio. A mis profesores que brindaron conocimiento y corrección siempre que era apropiado. A mis amigos y compañeros que siempre brindaron apoyo incondicional. A las personas cercanas a mí que siempre me dieron soporte y creyeron en mí. Pero principalmente a Dios por abrirme las puertas siempre y preparar un camino que cumplió un propósito específico en mi vida. Hoy les agradezco a todos, pues fueron indispensables en este proceso.

Gabriel Loría Marín

Cartago, 14 de diciembre de 2016

Índice general

Índice de figuras	iii
Índice de tablas	vii
Lista de símbolos y abreviaciones	ix
1 Introducción	1
2 Meta y objetivos	5
2.1 Meta	5
2.2 Objetivos	5
2.2.1 Objetivo general	5
2.2.2 Objetivos específicos	5
3 Marco teórico	7
3.1 Correlación de señales	7
3.1.1 Autocorrelación	7
3.1.2 Correlación cruzada	8
3.2 Modulación sigma delta y correlación <i>bitstream</i>	8
3.2.1 Modulador Sigma Delta	9
3.2.2 Representación bitstream	10
3.2.3 Multiplicación de señales bitstream	11
3.3 Cálculo de valor de correlación para señales <i>bitstream</i>	12
4 Unidad de acondicionamiento de señal para la implementación de un mod- ulador $\Sigma\Delta$ de segundo orden	13
5 Rediseño del algoritmo de correlación cruzada para señales <i>bitstream</i> .	17
5.1 Diseño en bajo nivel	18
5.2 Almacenamiento señales <i>bitstream</i>	18
5.3 Multiplicación de señales patrón y muestra	19
5.4 Filtro paso bajo digital	19
5.4.1 Cálculo de peso de Hamming por medio de decodificadores	20
5.4.2 Cálculo de peso de Hamming con decodificadores y árbol de sumadores	22
5.4.3 Suma implementada con ordenador y contador de bits	22
5.5 Unidad de comparación	24

5.6	Unidad de cálculo de media móvil	25
6	Unidad de pruebas en FPGA	29
7	Resultados experimentales y análisis	33
7.1	Modulador Sigma delta	33
7.1.1	Obtención de Señales	33
7.1.2	Implementación práctica de modulador sigma delta de segundo orden	39
7.2	Algoritmo de correlación <i>bitstream</i>	42
7.2.1	Pruebas realizadas al algoritmo de correlación diseñado	42
7.2.2	Pruebas con señales reales	49
7.3	Detector de disparos y motosierras	55
7.3.1	Resultados del detector para las señales genéricas de prueba	55
7.3.2	Resultados del detector para las señales reales de prueba	57
7.3.3	Resultados del detector para las señales de sonidos del bosque	58
7.3.4	Análisis de resultados del detector	59
8	Conclusiones	61
9	Recomendaciones	63
	Bibliografía	65

Índice de figuras

1.1	Diagrama del dispositivo de detección de disparos y motosierras	2
3.1	Explicación a nivel gráfico de la correlación de señales.	7
3.2	Autocorrelación de una señal en el dominio del tiempo. Tomado de [5]	8
3.3	Diagrama de bloques de un modulador Sigma Delta de primer orden	9
3.4	Modulador Delta Sigma en el dominio de la Frecuencia.	10
3.5	Respuesta a una función senoidal	11
3.6	Funcionamiento a nivel de bloques de la operación correlación.	12
4.1	Implementación realizada por el Sr. Moraga del circuito acondicionador de señal del AD7405. Tomado de [4]	13
4.2	Sugerencia de implementación de un filtro paso bajas. Tomado de la hoja de datos del AD74055	14
4.3	Esquemático del dispositivo de acondicionamiento de señal para modulador AD7405	14
4.4	Circuito impreso del dispositivo de acondicionamiento de señal para modu- lador AD7405	15
5.1	Propuesta a nivel de bloques del sistema de cálculo de correlación cruzada en formato <i>bitstream</i> del dispositivo de detección de disparos y motosierras. . .	18
5.2	Diagrama de bloques funcional propuesto para el detector basado en cor- relación <i>bitstream</i> de disparos y motosierras.	19
5.3	Diagrama de bloques de filtro paso bajo de primer orden tomado de [11] . .	20
5.4	Decodificador implementado en [3]	21
5.5	Diagrama de sumadores para filtro digital	22
5.6	Etapas de cálculo de peso de Hamming tal como se propone en [9] . Tomado de [9]	23
5.7	Filtro Pasa Bajas en digital. Tomado de [9]	23
5.8	Diagrama de etapa de comparación del algoritmo de correlación de señales. .	25
5.9	Ejemplo de cálculo de media móvil. Tomado de [15]	26
5.10	Diagrama de cálculo en el tiempo del cálculo de la media móvil de un dato. Tomado de [14]	26
6.1	Unidad de verificación del detector de patrones acústicos	29
6.2	Fotografía de la implementación del módulo de adquisición de datos con la unidad de verificación en FPGA	30

7.1	Señal senoidal de un ciclo y su representación en tren de pulsos, OSF=8. . .	34
7.2	Señal senoidal de tres ciclos y su representación en tren de pulsos, OSF=8. .	34
7.3	Señal emitida por una motosierra a 30 metros del micrófono.	35
7.4	Señal emitida una motosierra a 90 metros del micrófono	35
7.5	Señal emitida por un arma de fuego calibre 22 a 30metros del micrófono . . .	36
7.6	Señal emitida por un disparo de un arma de fuego calibre 22 a 90 metros del micrófono.	36
7.7	Señal de audio con sonidos varios del bosque.	37
7.8	Generación de un promedio aritmético de motosierras para su uso como patrón.	38
7.9	Generación de un promedio aritmético de disparos de armas de fuego para su uso como patrón.	39
7.10	Fotografía del circuito impreso del dispositivo de acondicionamiento de señal para modulador AD7405	40
7.11	Respuesta del modulador sigma delta ante un estímulo senoidal.	41
7.12	Señales utilizadas en la autocorrelación.	42
7.13	Autocorrelación estadística teórica	43
7.14	Autocorrelación teórica y experimental del algoritmo de correlación implementado.	43
7.15	Análisis de autocorrelación senoidal	44
7.16	Señales utilizadas para el cálculo de la correlación cruzada de señales senoidales.	45
7.17	Correlación cruzada teórica para las señales senoidales de la figura 7.16. . . .	45
7.18	Correlación cruzada de señales senoidales del algoritmo implementado. . . .	46
7.19	Análisis de correlación de señales senoidales de tres y cinco ciclos	46
7.20	Error absoluto de pruebas genéricas	47
7.21	Error absoluto de pruebas genéricas	48
7.22	Señales muestra y patrón utilizadas en el algoritmo de correlación para la primera prueba de detección de motosierras.	49
7.23	Resultados de la correlación cruzada de las señales patrón y muestra de una señal de audio proveniente de una motosierra a 30m del detector.	50
7.24	Señales muestra y patrón utilizadas en el algoritmo de correlación para la segunda prueba de detección de motosierras.	50
7.25	Resultados de la correlación cruzada de las señales patrón y muestra de una señal de audio proveniente de una motosierra a 90m del detector.	51
7.26	Señales muestra y patrón utilizadas en el algoritmo de correlación para la primera prueba de detección de disparos.	52
7.27	Resultados de la correlación cruzada de las señales patrón y muestra de un disparo a 30 metros	52
7.28	Señales muestra y patrón utilizadas en el algoritmo de correlación para la segunda prueba de detección de disparos.	53
7.29	Resultados de la correlación cruzada de señales patrón y muestra de un disparo a 90 metros	53
7.30	Señales muestra y patrón utilizadas en el algoritmo de correlación para la verificación de detección de falsos positivos.	54

7.31	Correlación del algoritmo de correlación implementado para una señal de audio de el sonido del canto de un ave.	54
7.32	Resultados del detector de patrones acústicos para la autocorrelación de una señal senoidal.	56
7.33	Resultados del detector de patrones acústicos para la correlación cruzada de señales senoidales de tres y cinco ciclos.	56
7.34	Resultados del detector de patrones acústicos para la correlación cruzada de la señal de una motosierra a 30 metros del micrófono contra la señal patrón para motosierras.	57
7.35	Resultados del detector de patrones acústicos para la correlación cruzada de la señal de un disparo a 30 metros del micrófono contra la señal patrón para disparos.	58
7.36	Resultados del detector de patrones acústicos para la correlación cruzada de la señal de sonido del canto de un ave contra la señal patrón para motosierras.	59

Índice de tablas

3.1	Ciclo de trabajo de una señal en bitstream para un valor de tensión dado. . .	10
5.1	Señales del sistema de detección de patrones acústicos.	21
5.2	Ejemplo de un código termómetro de cuatro bits.	24
7.1	Error absoluto promedio de pruebas realizadas	48

Lista de símbolos y abreviaciones

Abreviaciones

BCD	Decimal codificado en binario
DSP	Procesamiento digital de Señales
OSF	Factor de sobremuestreo
PCM	Modulación por impulsos codificados
RTL	Nivel de transferencia de registros
VLSI	Integración a muy grande escala

Capítulo 1

Introducción

Costa Rica es un país el cual tiene 51100 kilómetros cuadrados de superficie terrestre[1]. De esta cantidad de territorio nacional, existe un 29% el cuál se encuentra protegido por las leyes costarricenses[2].

No es de extrañar en el presente, que personas insensibles al cuidado de la biodiversidad, busquen lugares para realizar actividades ilícitas como la caza y la deforestación indiscriminada en lugares prohibidos para tal fin. Es por esta razón que existen numerosas iniciativas que tienen como fin el identificar y castigar a aquellos que se encuentren realizando dichas actividades.

A lo largo de los últimos años, el Instituto Tecnológico de Costa Rica se ha preocupado por dicha situación y ha realizado esfuerzos desde la Escuela de Ingeniería Electrónica, con el fin de buscarle una solución a este problema.

En este escrito se documenta el diseño y prueba de un dispositivo de detección de patrones acústicos similares a los producidos por motosierras y armas de fuego. El objetivo principal es diseñar un sistema que permita detectar efectivamente la presencia de cualquiera de estas dos herramientas, utilizadas principalmente en la tala y caza ilegal en los bosques del país.

Se parte principalmente del trabajo realizado ya por los estudiantes egresados Josué Mora Castro y Rolando Moraga Mora. Estos estudiantes, en sus tesis de licenciatura [3] [4] realizaron un trabajo previo en esta materia con el fin de proponer los algoritmos y bloques principales de dicho detector de patrones acústicos. El Ing. Moraga en su tesis realiza un diseño del dispositivo detector de patrones acústicos implementándolo en software de alto nivel. Esto anterior se realizó como una prueba de concepto que se encarga de verificar la posibilidad de realizar la comparación de dichas señales de audio. Por su parte, el Ing. Mora, realiza una sección del proyecto implementándola en un bajo nivel de abstracción confirmando a su vez la posibilidad de realización de la comparación de las señales de audio.

Es importante recalcar que en este proyecto el trabajo heredado se ha debido rediseñar a nivel de transferencia de registros (RTL, por sus siglas en inglés) cada uno de los módulos del dispositivo diseñados por el Sr. Mora. Adicionalmente ha sido necesario efectuar varias correcciones en el algoritmo implementado en el pasado para asegurar la funcionalidad y minimizar el área que dicho diseño utilizaría a la hora de realizar la integración a muy larga escala (VLSI, por sus siglas en inglés) de dicho dispositivo, como parte de la meta final del proyecto general de investigación en que se enmarca este trabajo de graduación.

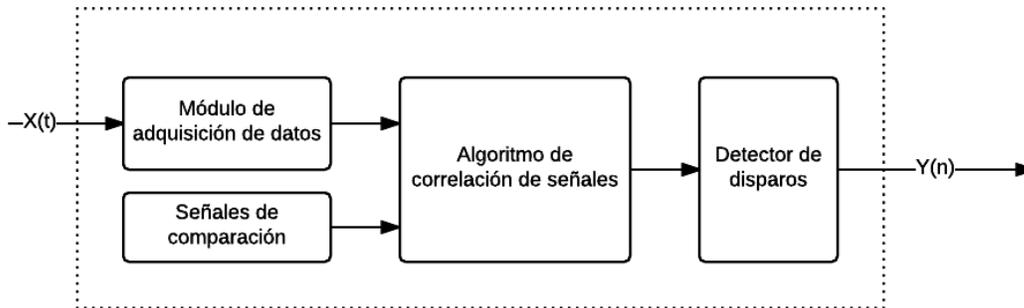


Figura 1.1: Diagrama del dispositivo de detección de disparos y motosierras

En la figura 7.11 se puede apreciar el diagrama general del detector del dispositivo de detección diseñado. Dicho dispositivo cuenta con un módulo de adquisición de datos el cuál se encarga de recibir los datos externos, los cuales pueden ser cualquier tipo de señal de audio. Dicho módulo realiza una modulación con un circuito integrado llamado "modulador $\Sigma - \Delta$ ". Este dispositivo, se encarga de convertir las señales analógicas de audio en una señal *bitstream* (del inglés, tren de pulsos) la cuál se encuentra codificada en forma serial.

El algoritmo de correlación de señales diseñado está compuesto de una serie de registros, compuertas y módulos combinacionales que determinan mediante un valor la medida en que se parecen dos señales dadas. Esto hace cuantificable la comparación entre señales de audio lo cuál nos permite analizar las señales del medio.

Luego de realizar la correlación entre la señal externa y un patrón de comparación previamente guardada dentro del dispositivo, se obtiene un valor de la correlación entre estas señales, la cuál será analizada por el módulo detector de disparos. Esté último módulo por definir, debe de realizar el cálculo de la media móvil de los valores de correlación obtenidos durante un tiempo determinado y la comparación contra el valor de la correlación actual. Esta comparación asegura que si el valor de correlación actual es mayor que la media móvil las señales son lo suficientemente similares como para asegurar la detección de un disparo o una motosierra según sea el caso.

En el próximo capítulo de este informe, se ofrece al lector las metas, objetivos generales y específicos del presente proyecto. Seguidamente, en el capítulo 3, se tratan los temas principales, la teoría necesaria para la realización de este proyecto, y una explicación de los conceptos importantes a tratar en el resto del informe. El capítulo 4, 5 y 6 se expone la me-

Metodología de diseño utilizada para las 3 partes principales de este proyecto. En el capítulo 7 se describen los resultados experimentales con su respectivo análisis de los mismos. Las conclusiones y recomendaciones del presente proyecto, se encuentran descritas respectivamente en el capítulo 8 y 9.

Capítulo 2

Meta y objetivos

2.1 Meta

Un detector de disparos y motosierras de muy bajo consumo, capaz de integrarse dentro de un sistema de protección ambiental contra tala y caza ilegal.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

Diseñar un sistema digitalmente correcto sobre FPGA para la detección de disparos de armas de fuego y motosierras basado en la correlación *bitstream*.

2.2.2 Objetivos específicos

1. Implementar un sistema de adquisición de datos utilizando un modulador sigma delta de segundo orden comercial y una unidad de acondicionamiento de señal.
2. Implementar a nivel RTL un detector de señales basado en correlación *bitstream*.
3. Implementar de manera correcta a nivel RTL un módulo de correlación bitstream con salida PCM.
4. Sintetizar correctamente de forma lógica y física el diseño en HDL de los objetivos anteriores sobre una FPGA, con su respectiva verificación funcional satisfactoria.

Capítulo 3

Marco teórico

3.1 Correlación de señales

La correlación de señales es un procedimiento matemático que nos muestra mediante un valor numérico la dependencia en el tiempo entre dos señales y comúnmente se utiliza para comparar dos señales dadas como se muestra en la figura 3.6

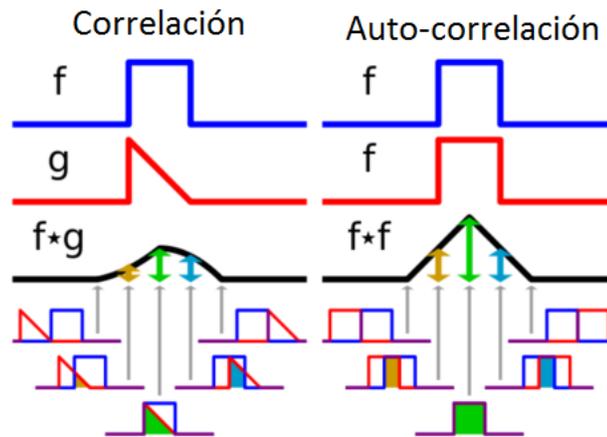


Figura 3.1: Funcionamiento a nivel gráfico de la correlación de señales. Tomado de [5].

3.1.1 Autocorrelación

Definida anteriormente la correlación entre dos señales, podemos entonces decir que la autocorrelación entre dos señales se da al realizar la correlación entre una señal y sí misma a diferentes retardos. El resultado de esto anterior podemos visualizarlo en la figura 3.2.

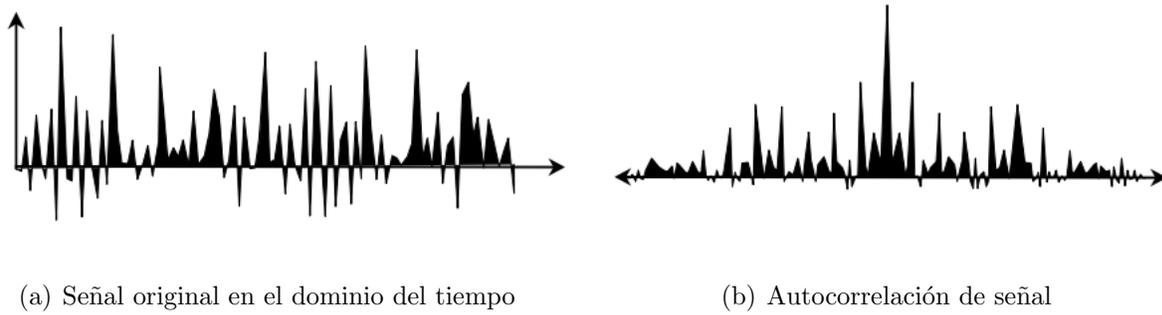


Figura 3.2: Autocorrelación de una señal en el dominio del tiempo. Tomado de [5]

Como se puede visualizar en las gráficas de la figura 3.2, el resultado de la Autocorrelación de una señal produce una respuesta de manera que se puede ver un pico el cual indica que las señales en ese instante fueron iguales. Esto se dá debido a que se trata de la comparación exacta de a señal consigo misma.

3.1.2 Correlación cruzada

Formalmente, la definición de correlación cruzada es una medida estadística que nos indica cuantitativamente que tan similares son dos señales determinadas. Dicha relación se puede calcular de la siguiente manera para dos señales discretas:

$$y_i = f[i] * g[i] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k)y(k-i) \quad (3.1)$$

donde $x(k)$ es la señal contra la cuál se desea comparar la muestra $y(k)$. De esta manera se puede saber que cuanto dos señales son estadísticamente muy parecidas el valor de la correlación será el más alto posible según las condiciones de muestreo del sistema. Nótese la similitud de la correlación con la convolución, excepto en el manejo de los índices.

3.2 Modulación sigma delta y correlación *bitstream*

Bitstream, como su traducción en español lo indica es un tren de pulsos en serie que representan a una señal modulada en el tiempo. Dicha modulación de la señal es realizada por un dispositivo $\Sigma\Delta$ el cual entrega una serie de pulsos que indican el valor de la señal analógica representandola digitalmente. Posteriormente esta señal es convertida en PCM para su tratamiento en un sistema digital convencional.

Según [6] la utilización de convertidores $\Sigma\Delta$ para el cálculo de la correlación de señales ofrece una ventaja adicional al uso de cualquier otro tipo de modulador debido a que utiliza el OSF (por las siglas en inglés de Factor de Sobremuestreo) para "mover" a altas frecuencias el error debido al ruido de cuantización, lo que lo hace un modulador muy efectivo.

3.2.1 Modulador Sigma Delta

En la figura 3.3 se puede observar que un modulador $\Sigma\Delta$ consta de un integrador y un cuantizador.

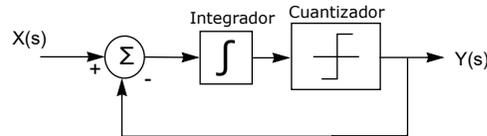


Figura 3.3: Respuesta del Modulador Delta Sigma a una Rampa. Tomado de [7].

Y como se explica en [3] considerando que el ruido de cuantización es nulo, se obtiene una función de transferencia para dicho modulador como la que se muestra en la ecuación (3.2).

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{s+1} \quad (3.2)$$

Por otro lado, contabilizando el ruido de cuantización se obtiene una función de transferencia para el ruido de cuantización como la que se presenta en la ecuación 3.3

$$\frac{Y(s)}{N(s)} = \frac{s}{s+1} \quad (3.3)$$

De las ecuaciones (3.2) y (3.3) podemos observar según dadas funciones de transferencia para el modulador que la salida del sistema se encuentra en las señales bajas, mientras que el ruido de cuantización se ubica en las frecuencias altas. Lo anterior se puede visualizar en la figura 3.4.

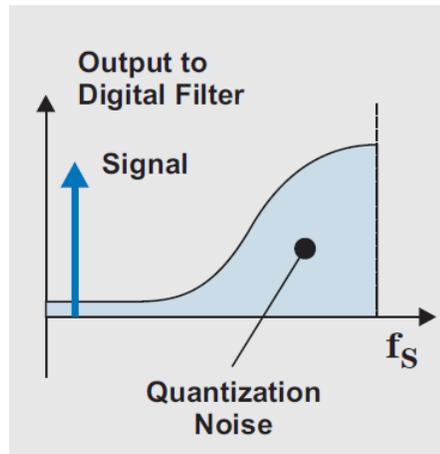


Figura 3.4: Modulador Delta Sigma en el dominio de la Frecuencia. Tomado de [8].

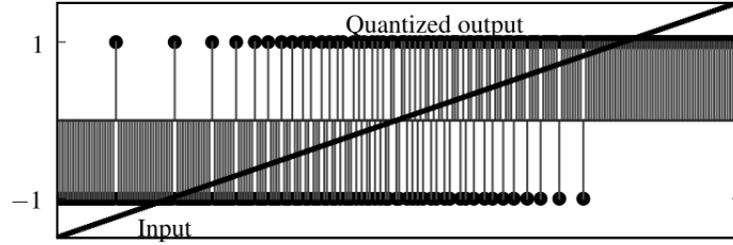
3.2.2 Representación bitstream

La cantidad de bits con los que se represente cada dato es igual al OSF y el valor que representa el dato en *bitstream* depende de la densidad de bits en uno que se encuentran en el *bitstream*; por ejemplo, en la Figura 3.5 se muestra la respuesta del Modulador Sigma Delta a una rampa, se observa que para valores mayor a cero la mayor cantidad de bits del *bitstream* son uno.

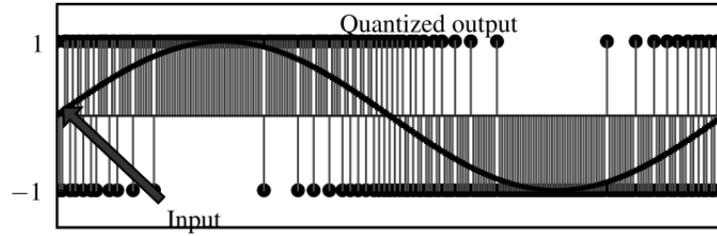
Tabla 3.1: Ciclo de trabajo de una señal en bitstream para un valor de tensión dado.

Tensión de entrada	Ciclo de trabajo de la señal en <i>bitstream</i>	<i>Bitstream</i> de 4 bits
+ V_{in}	100%	1111
+ $V_{in}/2$	75%	0111
0	50%	0101
- $V_{in}/2$	25%	0100
- V_{in}	0%	0000

Según como lo explica [4] con ayuda de la tabla 3.1, según los valores analógicos en la entrada de dicho modulador se muestra un tren de bits compuesto según sea la cantidad del OSF utilizado. En el caso de esta tabla se utiliza un OSF de 4 lo que implicaría que el ancho de palabra en el bitstream es igualmente de 4 bits.



(a) Respuesta a una función rampa



(b) Respuesta a una función senoidal

Figura 3.5: Respuesta del Modulador Delta Sigma. Tomado de [7].

Analizando también la respuesta del modulador en el dominio del tiempo como se visualiza en la figura 3.5 se puede verificar que entre mayor sea el valor de tensión mayor será la cantidad de bits en alto de la representación de la modulación.

3.2.3 Multiplicación de señales bitstream

En [9] se mencionan las probabilidades de que la respuesta de un modulador sea uno o cero están determinadas por las ecuaciones 3.4 y 3.5

$$P(X = 1) = \frac{1 + x}{2} \quad (3.4)$$

$$P(X = 0) = \frac{1 - x}{2} \quad (3.5)$$

Por otro lado según [10] la probabilidad de que la *xnor* de dos señales x y y sea uno es

$$P(x \oplus y = 1) = P(x = 1)P(y = 1) + P(x = 0)P(y = 0) \quad (3.6)$$

Utilizando la Ecuación (3.4) y (3.5) en la Ecuación (3.6) para calcular la probabilidad de que la *xnor* entre dos señales x y y moduladas sea uno, donde se representa como X y Y las señales moduladas, se obtiene:

$$P(X \oplus Y = 1) = \frac{1 + xy}{2} \quad (3.7)$$

Esta ecuación anterior es importante dado a que justifica la utilización de una compuerta xnor para realizar la multiplicación de dos señales moduladas $\Sigma\Delta$.

3.3 Cálculo de valor de correlación para señales *bitstream*

En la Figura 3.6 se puede ver un diagrama de implementación utilizado para el cálculo de la correlación cruzada de señales *bitstream*. Como se visualiza en esta figura, se utilizan dos multiplexores para recorrer los datos del registro muestra y patrón para realizar la multiplicación uno a uno de los bits de dichos registros. Luego dichos resultados van a un acumulador donde se suman con los resultados anteriores. Importante es notar que para que dicho correlador funcione, este debe de funcionar a n veces la tasa de adquisición de Nyquist, además de que los datos deben de codificados en PCM o alguna otra codificación estándar.

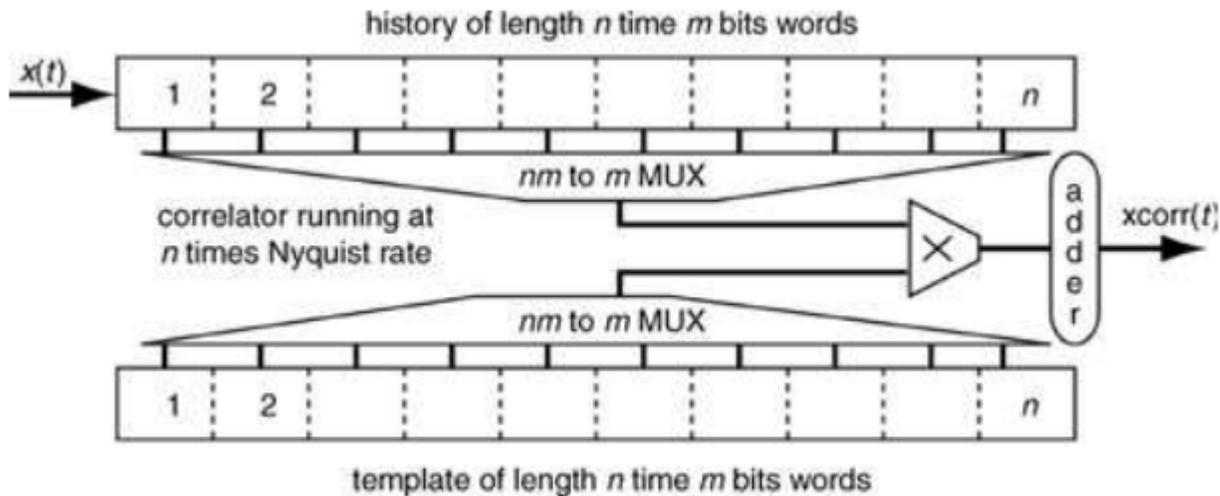


Figura 3.6: Funcionamiento a nivel de bloques de la operación correlación. Tomado de [6].

Otra manera de realizar dicho cálculo del valor de correlación es efectuando las multiplicaciones en paralelo, esto con el fin de reducir la cantidad de ciclos de reloj necesarios para realizar este cálculo. Con esto se reduciría la frecuencia de conmutación de las operaciones aritméticas. Producto de la implementación en paralelo de dicho algoritmo de correlación, se requiere la utilización de n multiplicadores, los cuales típicamente son circuitos complejos y con un alto consumo de potencia.

Debido a que la implementación de la multiplicación de bits en paralelo de los registros de patrón y muestra podría considerarse no apropiada debido a las razones previamente dadas, se sugiere el uso de una simple compuerta xnor como alternativa aproximada a la multiplicación como se explicó en la sección 3.2.3. Con esto, el cálculo de la correlación de señales se simplifica, y puede ser implementada fácilmente.

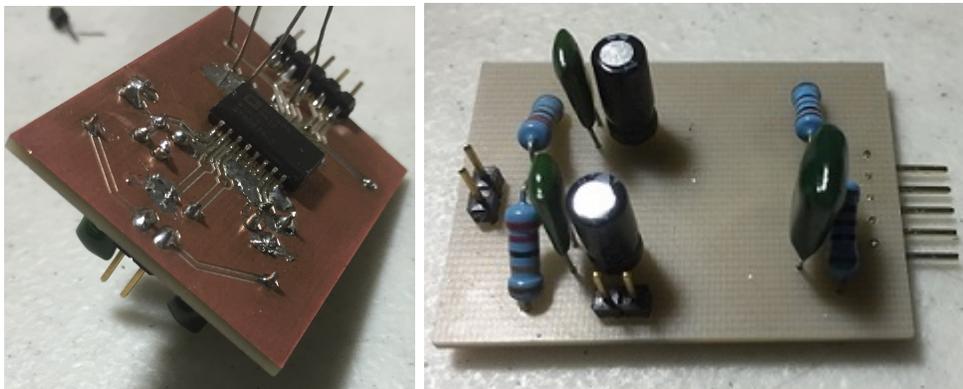
Capítulo 4

Unidad de acondicionamiento de señal para la implementación de un modulador $\Sigma\Delta$ de segundo orden

Luego de la realización de un estudio de los moduladores $\Sigma\Delta$ de segundo orden comerciales AD7403, AD7405, ACPL-C797, se decidió por razones de costo, resolución y recomendación de [4] el utilizar el dispositivo AD7405 para la implementación del modulador $\Sigma\Delta$ necesario para este proyecto.

Aunque en [4] se realiza un PCB que debió funcionar en dicho proyecto, los resultados obtenidos por dicha implementación no fueron favorables. Dicho PCB había sido diseñado con los componentes mal dimensionados, razón por la cuál a la hora de realizar el montaje de los componentes este no fue el más adecuado, esto se puede ver en la figura 4.1(b).

Además, la implementación de dicho modulador realizada tiene claros errores en la técnica de soldadura de componentes, esto se puede evidenciar en la figura 4.1(a).



(a) parte posterior del PCB original (b) montaje de componentes del PCB original

Figura 4.1: Implementación realizada por el Sr. Moraga del circuito acondicionador de señal del AD7405. Tomado de [4]

Es por las razones anteriores que el rediseño de un dispositivo de acoplamiento para el modulador AD7405 utilizando las especificaciones y dimensionamiento de los componentes brindadas por la hoja de datos era imperativo. Se puede visualizar la sugerencia del uso de un filtro paso bajas analógico como el que se puede visualizar en la figura 4.2. Dicho filtro no fue contemplado en el diseño del Sr. Moraga, por cuanto esto puede explicar el porqué sus resultados no fueron favorables en esta parte.

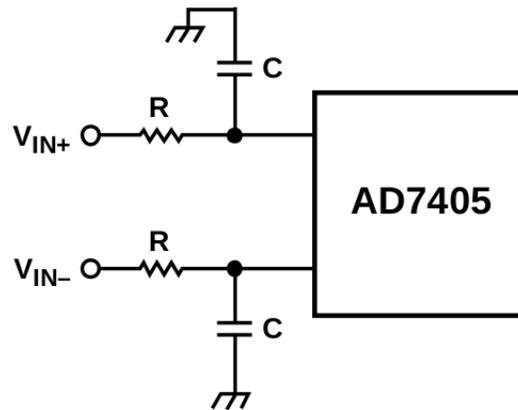


Figura 4.2: Sugerencia de implementación de un filtro paso bajas. Tomado de la hoja de datos del AD7405

Con base en las sugerencias de implementación de la hoja de datos del modulador a utilizar, se realizó el esquemático del circuito de acondicionamiento de señal el cuál se puede ver en la figura 4.3.

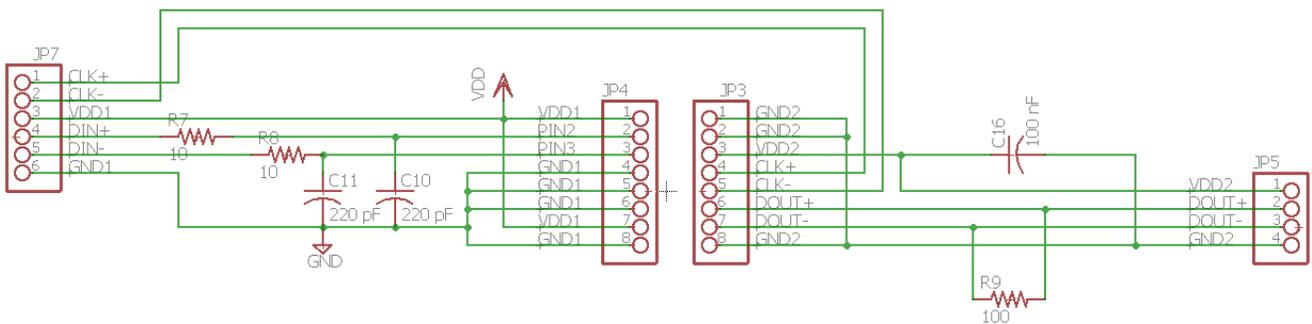


Figura 4.3: Esquemático del dispositivo de acondicionamiento de señal para modulador AD7405

Debido a la alta frecuencia a la que trabaja el modulador $\Sigma\Delta$ no fue posible la comprobación de un prototipo previo a la implementación de dicho dispositivo, esto debido a la existencia de capacitancias parásitas provenientes de la tarjeta de prototipado o incluso los cables a utilizar. Por esto, se procedió a implementar en circuito impreso el esquemático de la figura 4.3; dicho circuito impreso se puede visualizar en la figura 4.4

Capítulo 5

Rediseño del algoritmo de correlación cruzada para señales *bitstream*.

Para el diseño de un sistema que realice la correlación de señales digitales en formato *bitstream*, es necesario conocer el algoritmo necesario para la obtención del dato de correlación entre dos señales *bitstream*. Dicho procedimiento se detalla a continuación:

1. Almacenamiento de las señales en *bitstream* a comparar.
2. Realizar la multiplicación de dichas señales.
3. Aplicar un filtro pasa bajas en digital del resultado de la multiplicación.
4. Obtener el resultado de la correlación y almacenarlo junto a los n valores de correlación obtenidos a lo largo del tiempo.
5. Comparar el valor de correlación de las dos señales contra el valor de la media móvil de dicha magnitud.

En [3], el Sr. Mora realiza una propuesta del algoritmo el cuál tiene conceptualmente varios errores de diseño en el código RTL heredado. Primeramente el diseño a nivel RTL que fue probado en el pasado, se encontraba programado de manera rígida, esto quiere decir que no se encontraba parametrizado para distintos valores de OSF y muestras posibles. Además, las señales de muestra y patrón, ambas se cargaban por el modulador bitstream, lo cuál hacía imposible realizar pruebas reales con señales pregrabadas. Tercero, el algoritmo de correlación diseñado por el Sr. Mora tenía un error de concepto el cuál se tradujo en un error a la hora de realizar la implementación del mismo. El autor de [3] realiza el cálculo de la correlación de señales sin realizar el filtrado de la señal para eliminar el error de cuantización. por cuanto el valor obtenido de correlación cruzada entre la señal de muestra y patrón está erróneo.

Partiendo de esto anterior el algoritmo se rediseña y desarrolla utilizando un nivel de abstracción bajo, el cual emplea registros para la transferencia de señales. Dicho diseño se ejemplifica utilizando el diagrama de bloques que se puede visualizar en la figura 5.1

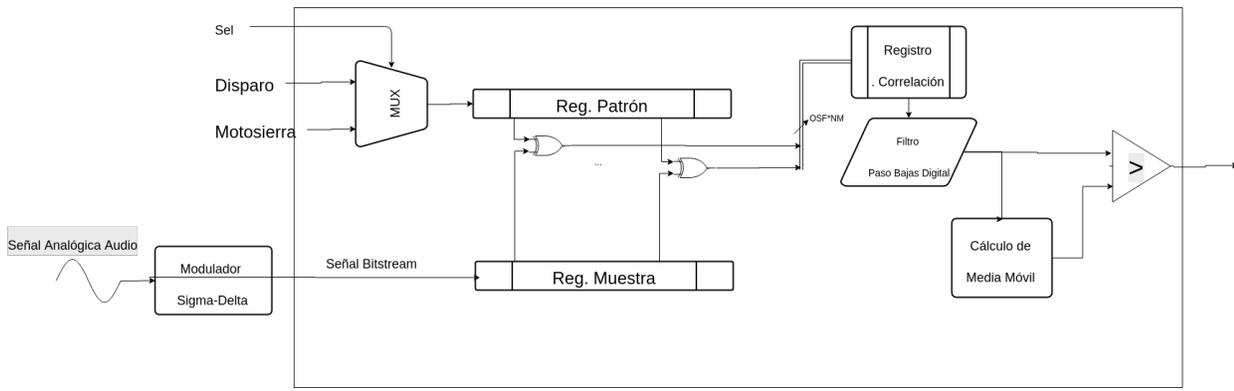


Figura 5.1: Propuesta a nivel de bloques del sistema de cálculo de correlación cruzada en formato *bitstream* del dispositivo de detección de disparos y motosierras.

Como se aprecia en la figura 5.1 la señal de muestra proviene del modulador sigma delta externo, mientras que la señal patrón se precarga en el registro patrón según sea la prueba a realizar, corrigiendo así el error realizado en [3]. Esta es parte

5.1 Diseño en bajo nivel

Para realizar el diseño la programación de cada uno de los módulos en lenguaje de descripción de hardware, se utilizó la parametrización de los módulos como elemento esencial para la codificación de los mismos. Esto anterior se realiza debido a la necesidad de realizar pruebas con diferente cantidad de OSF y diferente cantidad de muestras en futuras implementaciones. Esto anterior es de suma importancia y ventaja con respecto al algoritmo diseñado en [3], debido a como este fue diseñado en el pasado por el Sr. Mora.

5.2 Almacenamiento señales *bitstream*

Es necesario el uso de registros para el almacenamiento de las dos señales que se deben de comparar. Dichas señales vienen de diferentes secciones, dos señales que actúan como patrones de comparación. Dichas señales se seleccionan externamente por un bit que va a un multiplexor e ingresan al registro patrón. Mientras que la señal de muestra, la cual es la señal a comparar se almacena mediante un registro de corrimiento. Para un detalle a nivel de bloque 5.2

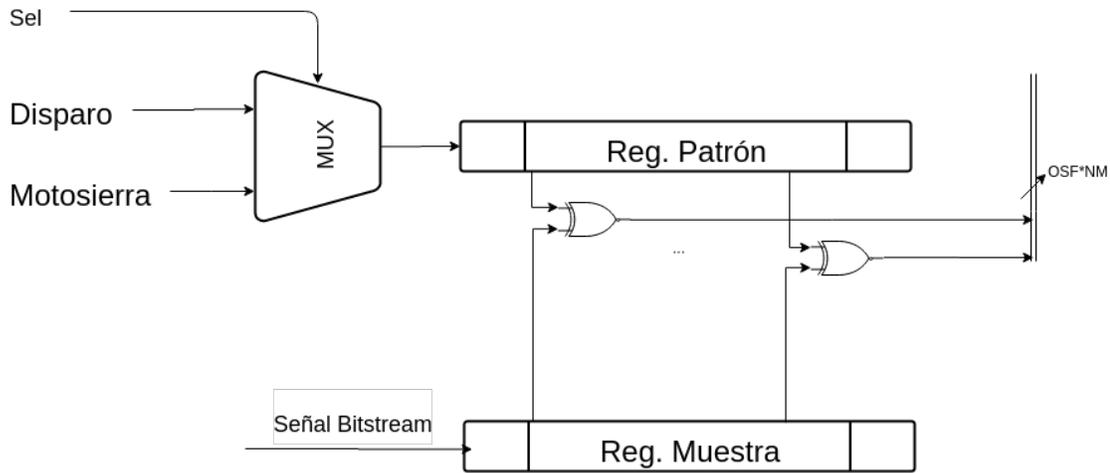


Figura 5.2: Diagrama de bloques funcional propuesto para el detector basado en correlación *bitstream* de disparos y motosierras.

5.3 Multiplicación de señales patrón y muestra

En el diagrama de la figura 5.2 se ejemplifica la colocación de un arreglo de compuertas xnor la cuál se coloca en paralelo con cada uno de los bits de los registros patrón y muestra. Posterior a esta implementación, la salida de dichas compuertas se almacena en un registro en paralelo el cuál tiene un valor de correlación en crudo el cuál debe de ser procesado posteriormente para encontrar el valor de correlación correcto.

5.4 Filtro paso bajo digital

Según la sección 3.2 se explica que al tener un dato modulado en formato *bitstream*, este debe ser tratado para convertirse en formato PCM. Típicamente este proceso incluye un filtrado pasa bajo que elimina el ruido de cuantificación y algún submuestreo (típicamente llamado proceso de diezrado), operaciones que de una u otra manera se realizan en paralelo con la conversión de serie a paralelo de la codificación $\Sigma\Delta$. En el caso del correlador, lo que debe convertirse es el resultado en formato *bitstream* de la salida del multiplicador de señales patrón y muestra (qué típicamente significa calcular el peso de Hamming o densidad de “unos” a lo largo de toda la cadena de datos *bitstream*), para su posterior filtrado y diezrado). Como se explica en [11] un filtro digital puede ser implementado de diferentes formas, y en este caso se escogió una implementación de un filtro de primer orden como lo sugiere dicha bibliografía debido a su facilidad para la implementación en RTL. Un ejemplo estructural de dicho filtro se muestra en la figura 5.3, con su ecuación de diferencias dada por

$$y = 0,5 \cdot x[n] + 0,5 \cdot x \quad (5.1)$$

Esta escogencia no obstante no fue muy buena, pues como veremos más adelante tras las pruebas, el filtro escogido se reveló de orden demasiado insuficiente —es simplemente un promediador pesado con una corte demasiado suave— lo que significa algo pendiente de mejorar con un filtro quizás de orden cuatro o superior, y al que pueda definírsele claramente la frecuencia de corte.

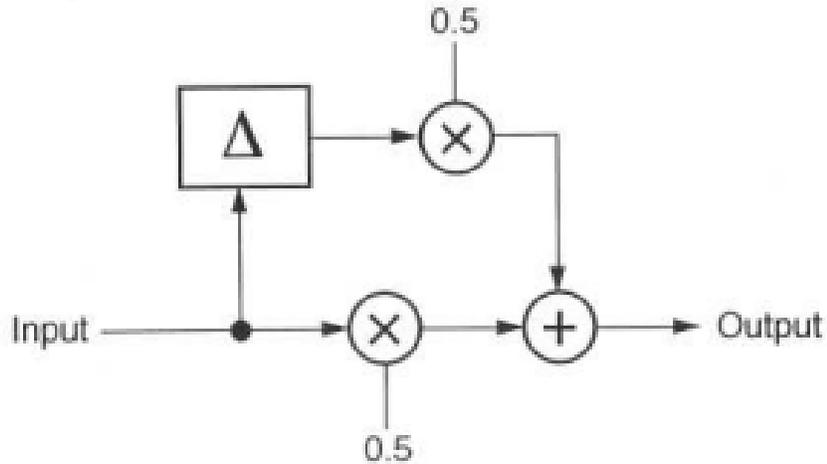


Figura 5.3: Diagrama de bloques de filtro paso bajo de primer orden tomado de [11]

5.4.1 Cálculo de peso de Hamming por medio de decodificadores

Como se explicó, el principio de la conversión de modulación $\Sigma\Delta$ a formato PCM implica averiguar el peso de Hamming. La implementación realizada de la suma de las cantidades de “unos” se explica en [3]. Dicha suma se materializa utilizando varios decodificadores que tienen como entrada los bits del registro de resultado de la Xnor, y como salida un valor en BCD (por las cifras en inglés de decimal codificado en binario) así como se explica en la figura 5.4 donde en la entrada del decodificador se tiene un valor que tiene 5 bits en alto, lo que implica que en la salida debe haber un valor en BCD que representa un valor decimal de 5.



Figura 5.4: Decodificador implementado en [3]

Este esquema tiene la ventaja de tener un peso computacional $O(1)$ (es decir, se implementa en un solo ciclo), pero según el tamaño que tenga el registro de correlación será necesario diseñar un decodificador cada vez mayor (la relación de costo de área termina siendo exponencial conforme aumenta el largo de la palabra a considerar). Esto se puede visualizar con ayuda de la tabla 5.1. Como un decodificador se implementa con lógica combinacional, tendríamos entonces necesidad de un área excesiva la hora de realizar el plano o trazado físico del dispositivo completo, razón por la cuál no es eficiente.

Tabla 5.1: Señales del sistema de detección de patrones acústicos.

Valor	Decimal
0000	0
0001	1
0010	1
0011	2
0100	1
0101	2
0110	2
0111	3
1000	1
1001	2
1010	2
1011	3
1100	2
1101	3
1110	3
1111	4

5.4.2 Cálculo de peso de Hamming con decodificadores y árbol de sumadores

La segunda opción de diseño que se consideró es utilizando el mismo principio del decodificador del registro de correlación, con la diferencia de la definición de un solo decodificador de 8 bits el cuál se replica n veces para lograr abarcar el ancho de bits de todo el registro de correlación. Luego, dado que tenemos n decodificadores se deben realizar n etapas de suma de los resultados obtenidos en cada uno de los decodificadores. Todo este proceso puede resumirse en la figura 5.5.

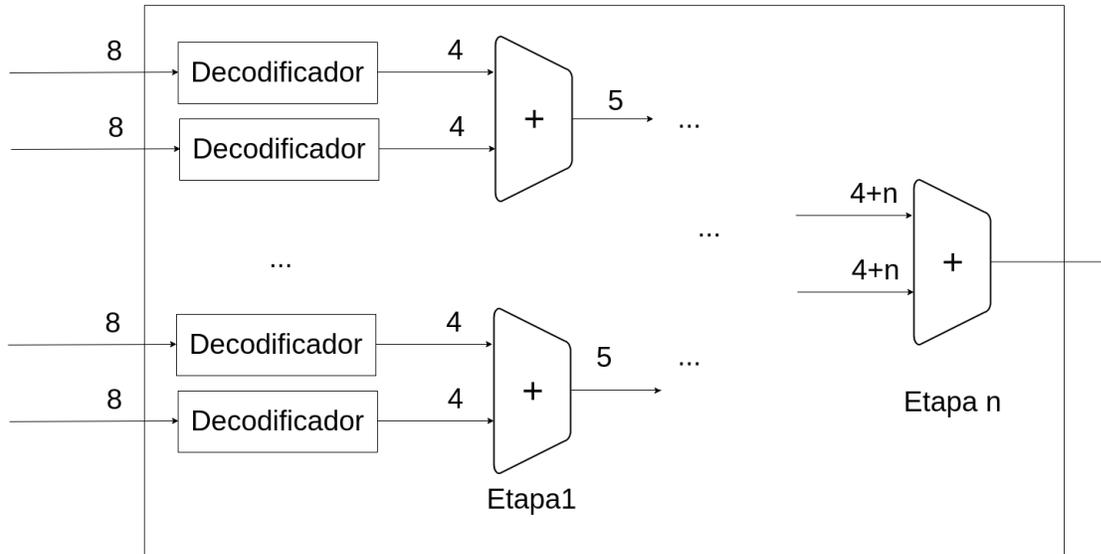


Figura 5.5: Diagrama de sumadores para filtro digital

La implementación ejemplificada en la figura 5.5 tiene como ventaja de que el código de definición de dicho módulo puede ser parametrizada según sea el tamaño de los registros internos. En términos de velocidad, la implementación será más ineficiente, pues los sumadores son dispositivos lentos. Aunque la estructuración en un árbol segmentado con registros podría mitigar el impacto en retardos, los sumadores siguen siendo circuitos grandes, lo que significa que, aunque habría ahorro en área, esta quizás seguiría siendo excesiva con respecto a las necesidades del problema. Esto conllevaría asociado un consumo dinámico y estático quizás elevado.

Una opción alternativa a esta es jugar con el tamaño de los decodificadores y el número de sumadores, en futuras implementaciones deberá de juzgar si es viable o no el cálculo del peso de Hamming con decodificadores y sumadores con respecto a otras maneras de implementar esto.

5.4.3 Suma implementada con ordenador y contador de bits

En [9] se propone la utilización de un ordenador de burbuja asincrónico y encodificador termómetro a binario, y los cuales se conectan como se explica en la figura 5.6

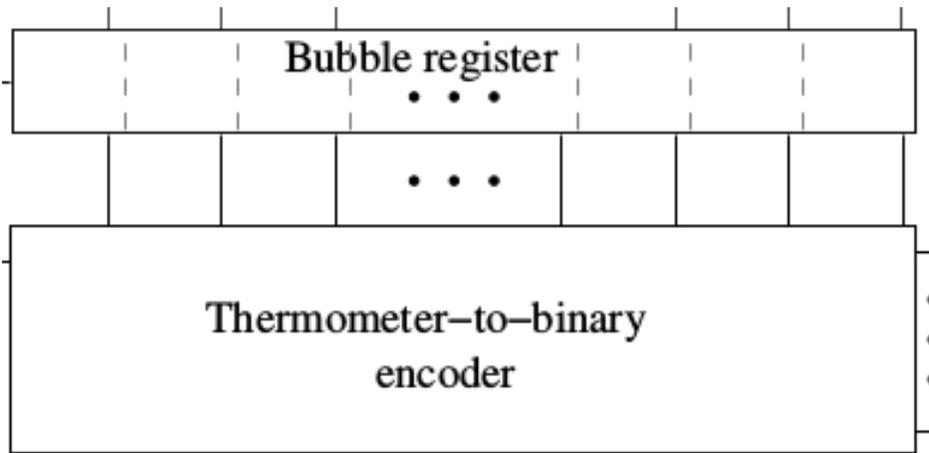


Figura 5.6: Etapa de cálculo de peso de Hamming tal como se propone en [9] . Tomado de [9]

El registro burbuja está realmente implementados con cerrojos Set-Reset y una compuerta *and* para mover los bits en alto del dato obtenido en el registro de correlación hacia el bit menos significativo de la salida del ordenador de burbuja (ver figura 5.7)

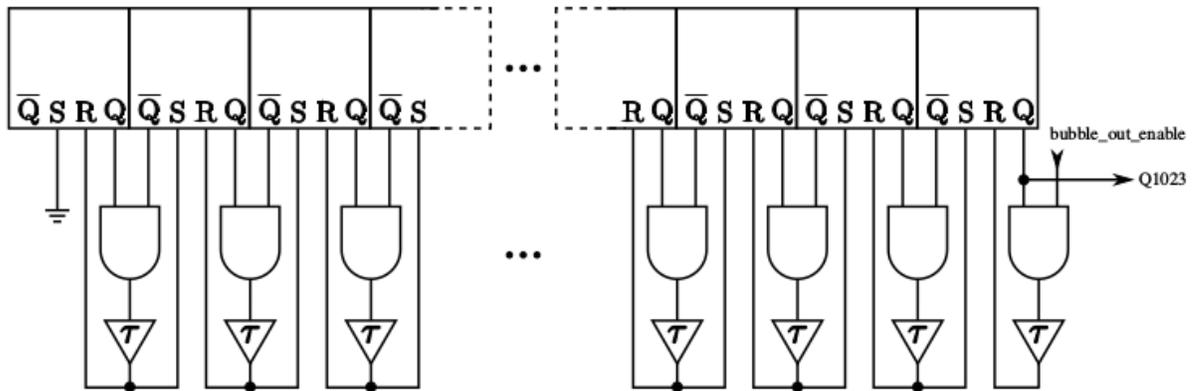


Figura 5.7: Filtro Pasa Bajas en digital. Tomado de [9]

Lo anterior es posible debido a la utilización de los latches y al retardo inherente de las celdas. Dicho retardo se puede ajustar colocando buffers extra en caso de ser necesario. El circuito resuelve entonces asincrónicamente y, si se ajustan correctamente los retardos, podría alcanzarse a tener un resultado en un solo ciclo de reloj si la OSF no es muy alta.

Ahora, una vez trasladados los bits en alto del registro de correlación a los bits menos significativos, es posible realizar una conversión de código termómetro a BCD. En la tabla 5.2 se muestra un ejemplo la entrada y salida de un decodificador de datos "termómetro" a datos en cuatro bits.

Tabla 5.2: Ejemplo de un código termómetro de cuatro bits.

Termómetro	Decimal
0001	1
0011	2
0111	3
1111	4

Una vez obtenidos los valores en BCD de los valores es cuestión de realizar una suma de los valores en BCD obtenidos por el decodificador de código termómetro a BCD.

Ante la implementación explicada anteriormente, es importante justificar de que dicho diseño es más eficiente en términos de área que el explicado en la sección 5.4.2 debido a que el tamaño del decodificador utilizado es mucho menor.

5.5 Unidad de comparación

Como se sugiere en [12], para encontrar el valor de correlación entre dos señales es necesaria la comparación de el valor obtenido en la correlación una vez se encuentre en PCM contra el valor de la media móvil de sus últimos n datos colocados.

En la figura 5.8 se puede visualizar el diagrama del comparador que recibe los dos datos a comparar y entrega como resultado un valor en binario que indica simplemente cuando el valor de la correlación obtenido es mayor que la media móvil calculada previamente.

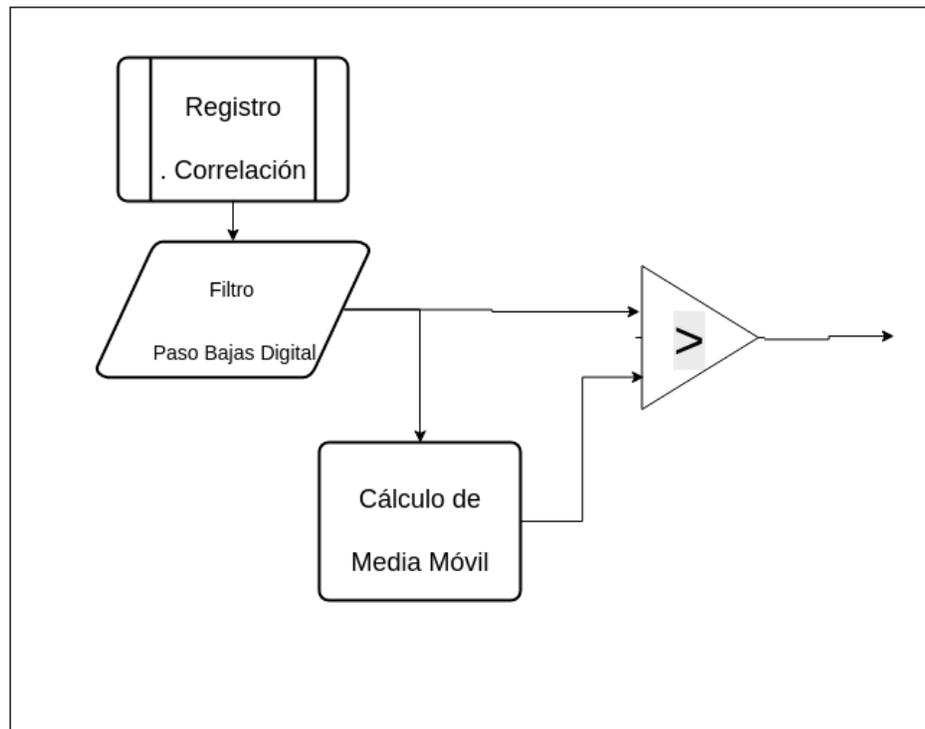


Figura 5.8: Diagrama de etapa de comparación del algoritmo de correlación de señales.

Ante esto es importante asociar dicho resultado obtenido de la correlación entre las dos señales con el contexto en que se encuentra este proyecto. Esto anterior se refiere a que el cálculo de realizado en por este sistema debe de ser lo más preciso y eficiente posible, dado a que este se colocará en zonas alejadas donde no suele haber control de lo que pase en el medio. Se hace referencia a los sonidos del bosque como señales que recibirá constantemente el dispositivo detector, por esta razón es necesario que dicho dispositivo reconozca efectivamente los patrones de onda similares a los de un disparo y una motosierra, y no los de la caída de un tronco o canto de un pájaro de la zona.

5.6 Unidad de cálculo de media móvil

Tomando en cuenta las técnicas de cálculo eficiente de el valor de media móvil propuesto en [13] se realiza una implementación que realice el cálculo de el valor de media móvil similar al utilizado en [14].

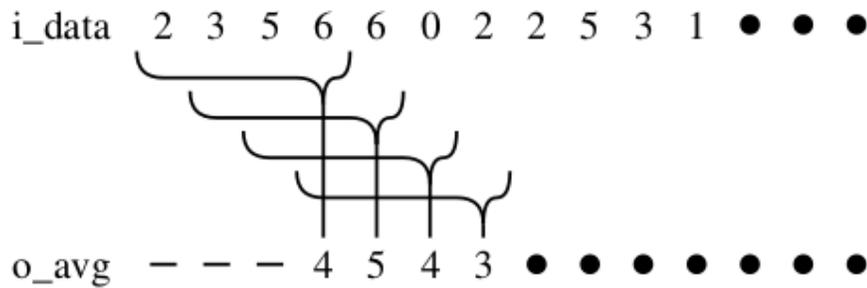


Figura 5.9: Ejemplo de cálculo de media móvil. Tomado de [15]

En la figura 5.9 se puede observar un ejemplo de la manera en que se realiza el cálculo de la media móvil de una serie de n datos. Como se expresa en [16], la precisión del sistema mejorará entre más grande sea el valor de la cantidad de datos sobre los cuales se realiza el cálculo de la media móvil.

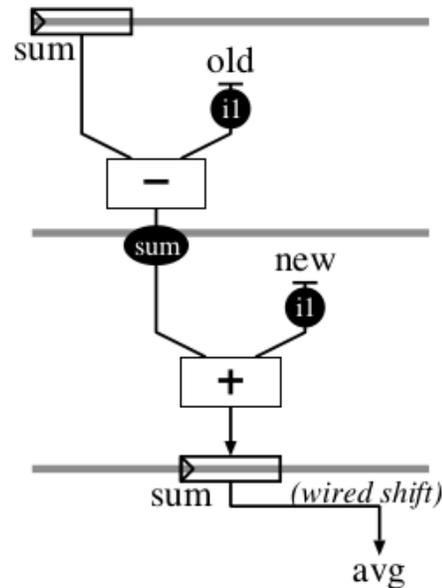


Figura 5.10: Diagrama de cálculo en el tiempo del cálculo de la media móvil de un dato. Tomado de [14]

Ahora, como se puede apreciar en la figura 5.10 se denota que el cálculo de la media móvil de una serie de datos se puede calcular realizando el siguiente algoritmo:

1. Suma de los "n" cantidad de valores anteriores.
2. Resta del valor más "viejo" sumado.
3. Suma del valor actual.
4. Realizando un corrimiento hacia la derecha de los bits de la suma para realizar a división.

En el presente proyecto, se realiza la implementación de este cálculo de media móvil del valor de correlación. Sin embargo, es importante que se haga mención de que un módulo de cálculo de media móvil en sí es un filtro paso bajo digital como el diseñado en la sección 5.4. Este filtro a nivel de hardware se considera un filtro pesado debido a la cantidad de registros necesarios para implementarlo, por cuanto para futuras implementaciones se debe considerar este filtro y verificar si es la opción más viable de implementación.

Capítulo 6

Unidad de pruebas en FPGA

Para realizar la implementación en FPGA es necesario el desarrollo de una unidad de prueba para la verificación de funcionamiento del detector de patrones acústicos. Dicha unidad de prueba parte de una unidad desarrollada en el laboratorio de diseño de circuitos integrados del Instituto Tecnológico de Costa Rica, la cuál fue modificada específicamente para la prueba del detector diseñado en este documento. Un diagrama de dicha unidad de verificación se encuentra en la figura 6.2

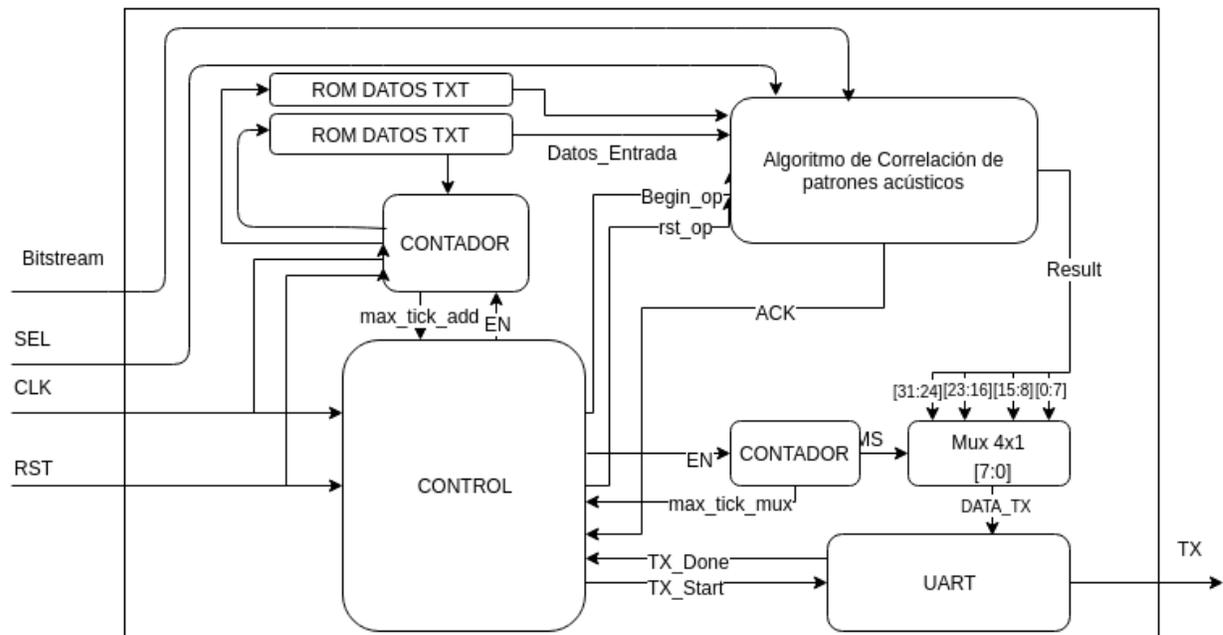


Figura 6.1: Unidad de verificación del detector de patrones acústicos

Como se puede ver en la esquina superior derecha del diagrama se encuentra el algoritmo de correlación de señales. Este sistema se pone a prueba al iniciarse con 2 datos previamente cargados en dicha unidad quienes representan los patrones acústicos contra los cuales se realizará la comparación de señales recibidas en formato bitstream a través del modulador $\Sigma\Delta$ implementado.

En esta unidad se realizan las pruebas que garantizan el funcionamiento del dispositivo, para que en etapas posteriores de dicho proyecto sea implementado con la seguridad del caso.

Dicha unidad se entrelaza con un computador a través del puerto de comunicación UART y recibe un archivo de texto con los resultados de la correlación obtenidos para cada muestra calculada por el algoritmo de correlación implementado.

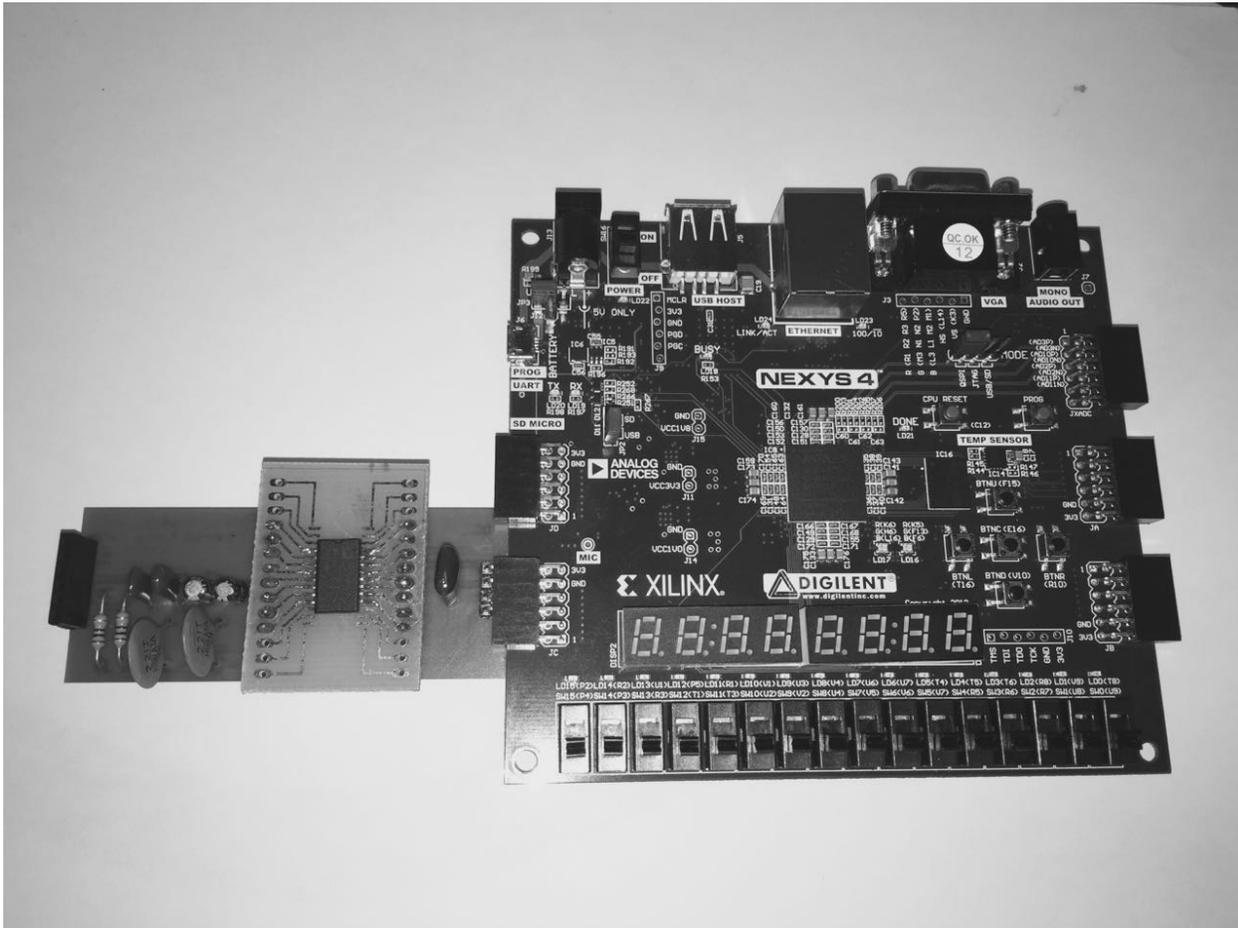


Figura 6.2: Fotografía de la implementación del módulo de adquisición de datos con la unidad de verificación en FPGA

Es necesaria la realización de esta prueba en FPGA para cumplir con la verificación de la funcionalidad del algoritmo de correlación implementado.

Una vez realizada la verificación funcional en el entorno explicado anteriormente, sí se puede garantizar que el dispositivo diseñado puede pasar a una etapa de diseño e integración a muy grande escala del dispositivo.

Como se puede ver en la figura, existe un enlace externo de la unidad de pruebas descrita en este apartado con el modulador sigma delta externo diseñado en el capítulo 4, el cual se puede conectar en uno de los puertos de comunicación de la FPGA y así realizar la interfaz de los dispositivos diseñados en el presente proyecto.

Es importante aclarar que la prueba del algoritmo de correlación en conjunto con el modulador no fue posible de realizar debido a que los niveles de voltaje que utiliza el modulador AD7405 no son compatibles con la Nexys 4. Este punto se aclarará en el capítulo 7.

Capítulo 7

Resultados experimentales y análisis

Se organizan en esta sección del documento los resultados experimentales de las pruebas realizadas a los dispositivos diseñados en el presente documento

7.1 Modulador Sigma delta

7.1.1 Obtención de Señales

Para la realización de las pruebas del modulador sigma delta y el detector de disparos y motosierras, es necesario obtener señales que garanticen el funcionamiento correcto del algoritmo de correlación. Para esto anterior se utilizan señales genéricas generadas por LabView junto a señales previamente grabadas de disparos, motosierras y diferentes sonidos del bosque.

Las señales pregrabadas fueron obtenidas con una frecuencia de 44,1 kHz, utilizando una cantidad de muestras de 128 y un factor de sobremuestreo de 8. Esto anterior significa que las señales obtenidas tienen una duración de 2,90 ms.

Señales senoidales moduladas a *bitstream*

En esta sección se muestran las señales senoidales utilizadas para las pruebas del algoritmo de correlación.

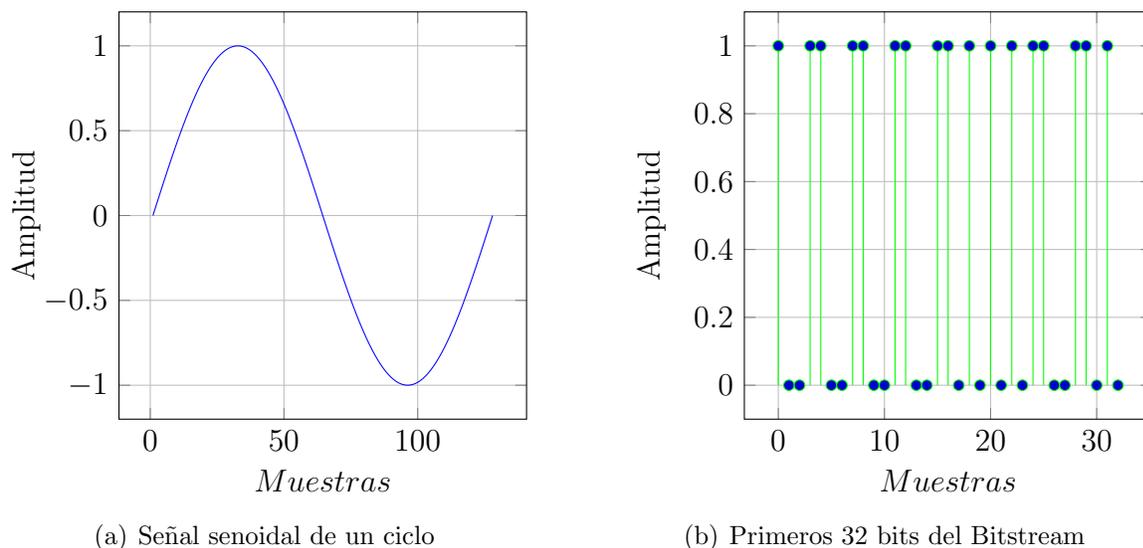


Figura 7.1: Señal senoidal de un ciclo y su representación en tren de pulsos, OSF=8.

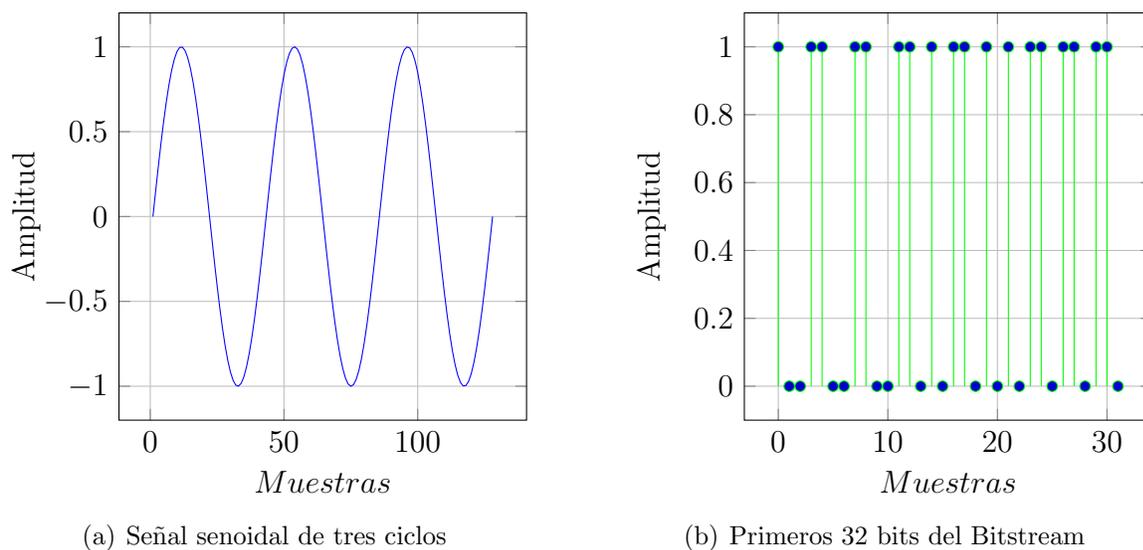
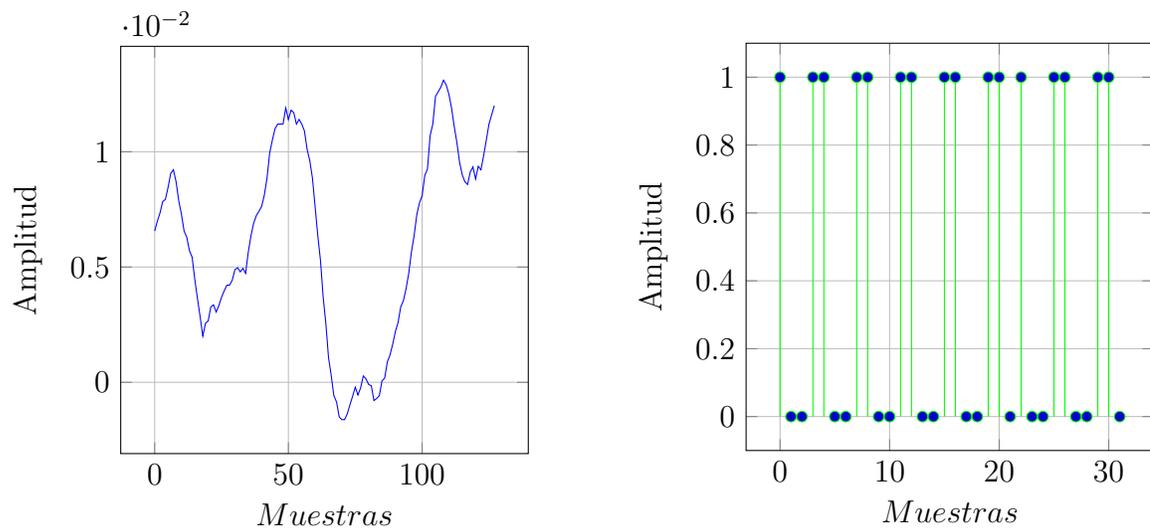


Figura 7.2: Señal senoidal de tres ciclos y su representación en tren de pulsos, OSF=8.

Motosierras moduladas a *bitstream*.

En esta sección se organizan algunas de las las señales obtenidas de archivos de audio con grabaciones de motosierras reales.



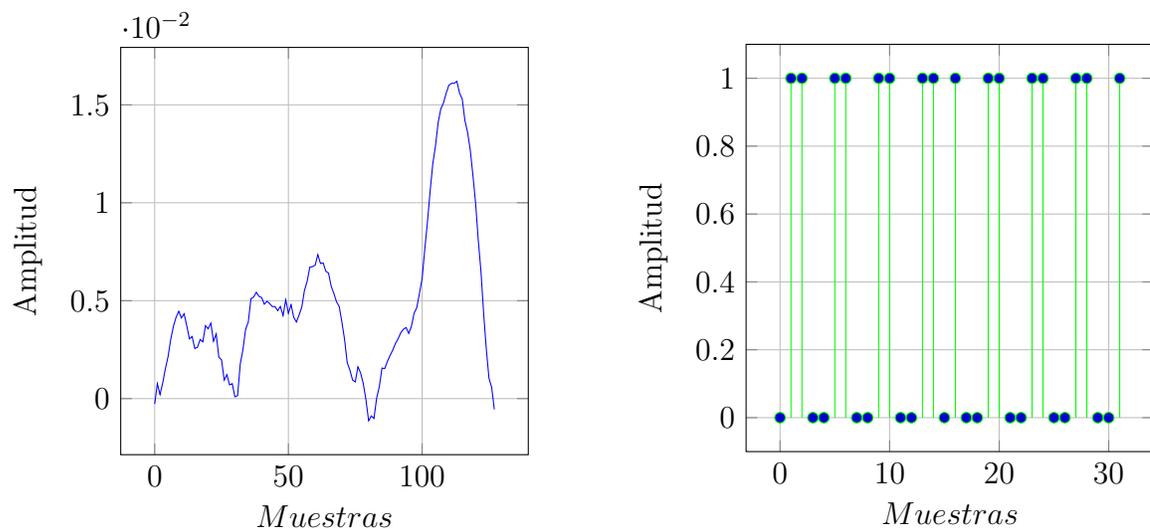
(a) Señal de audio de una motosierra a 30 metros del micrófono

(b) Primeros 32 bits del *bitstream*

Figura 7.3: Señal emitida por una motosierra a 30 metros del micrófono.

La señal de la figura 7.3(a) corresponde a las 128 muestras obtenidas en el tiempo, la cuál contiene una señal de audio correspondiente a las vibraciones sónicas producidas por una motosierra ubicada a 30 metros de distancia.

En la figura 7.3(b) podemos observar los primeros sesenta y cuatro bits obtenidos del modulador sigma delta utilizado.



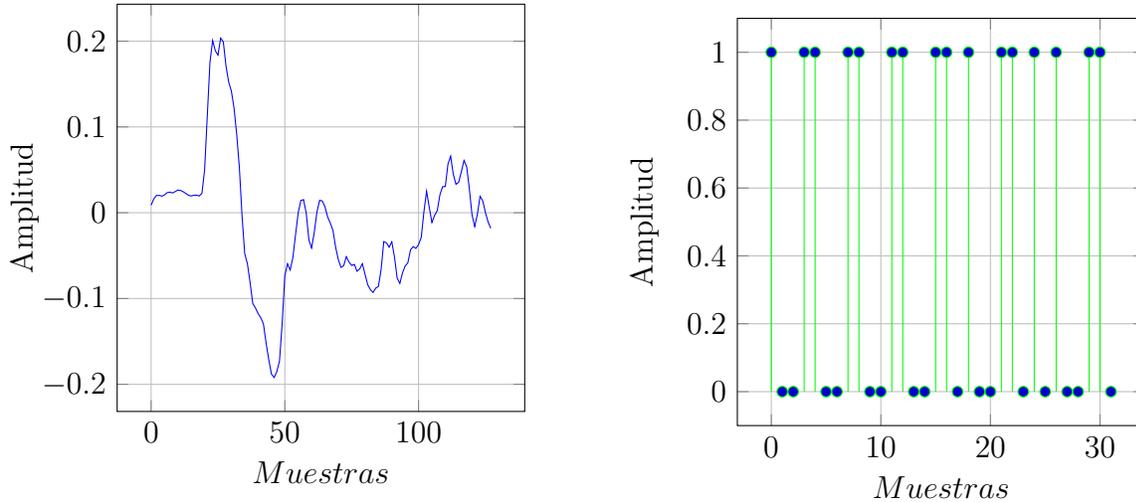
(a) Señal de audio de una motosierra a 90 metros del micrófono

(b) Primeros 32 bits del *bitstream*

Figura 7.4: Señal emitida una motosierra a 90 metros del micrófono

Disparos moduladas a *bitstream*

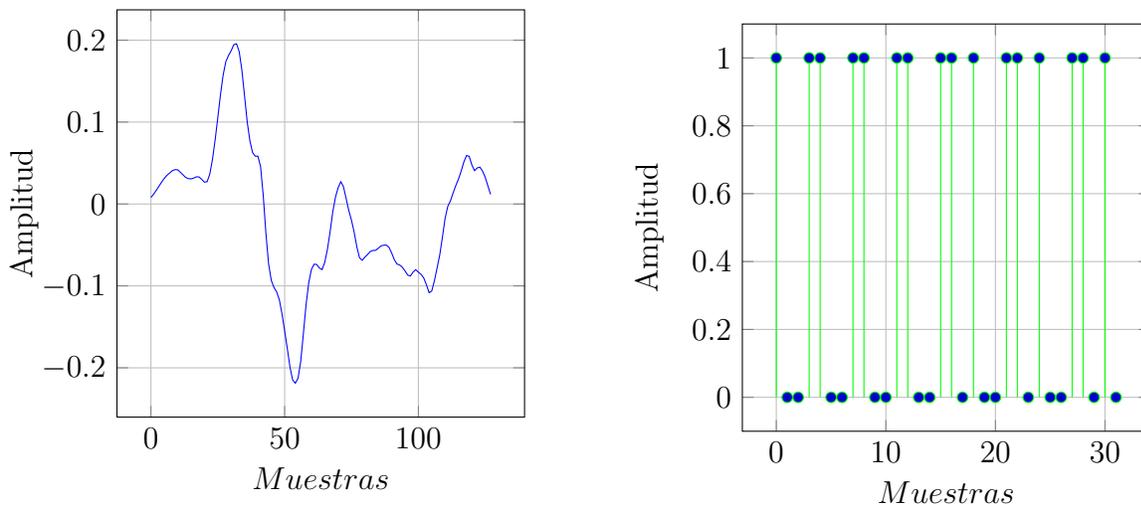
Así como se realiza la digitalización de las señales de audio grabadas de motosierras, se utilizan señales de disparos para realizar las pruebas pertinentes del dispositivo en cuestión, dichas señales se muestran a continuación.



(a) Señal de audio de un disparo a 30 metros del micrófono

(b) Primeros 32 bits del *bitstream*

Figura 7.5: Señal emitida por un arma de fuego calibre 22 a 30metros del micrófono



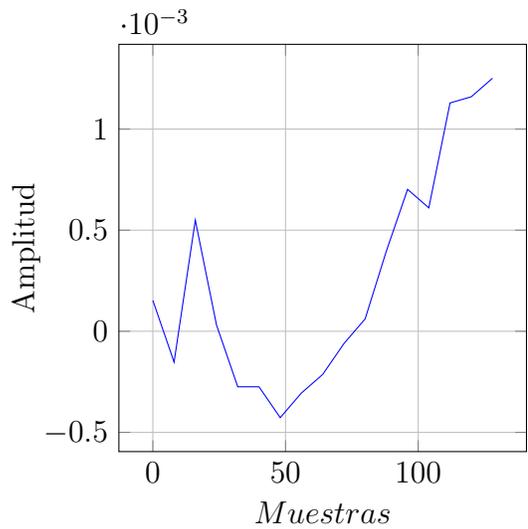
(a) Señal de audio de un disparo a 90 metros del micrófono

(b) Primeros 32 bits del *bitstream*

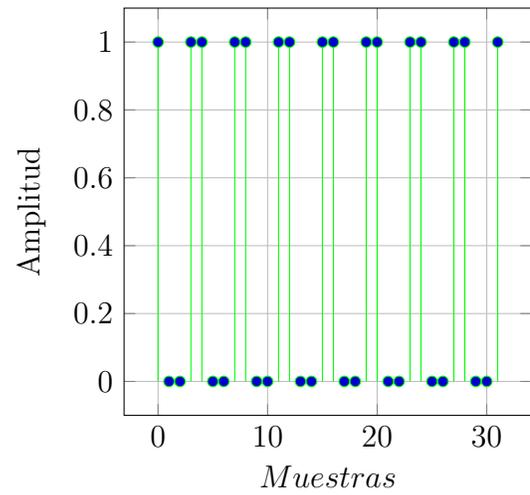
Figura 7.6: Señal emitida por un disparo de un arma de fuego calibre 22 a 90 metros del micrófono.

Señales reales del bosque moduladas a *bitstream*

Se utilizan también como puntos de referencia señales pregrabadas de sonidos variados del bosque.



(a) Señal de audio de sonidos varios del bosque.

(b) Primeros 32 bits del *bitstream***Figura 7.7:** Señal de audio con sonidos varios del bosque.

Generación de señales patrón

Para la detección es necesario generar un patrón o plantilla contra quién calcular la correlación.

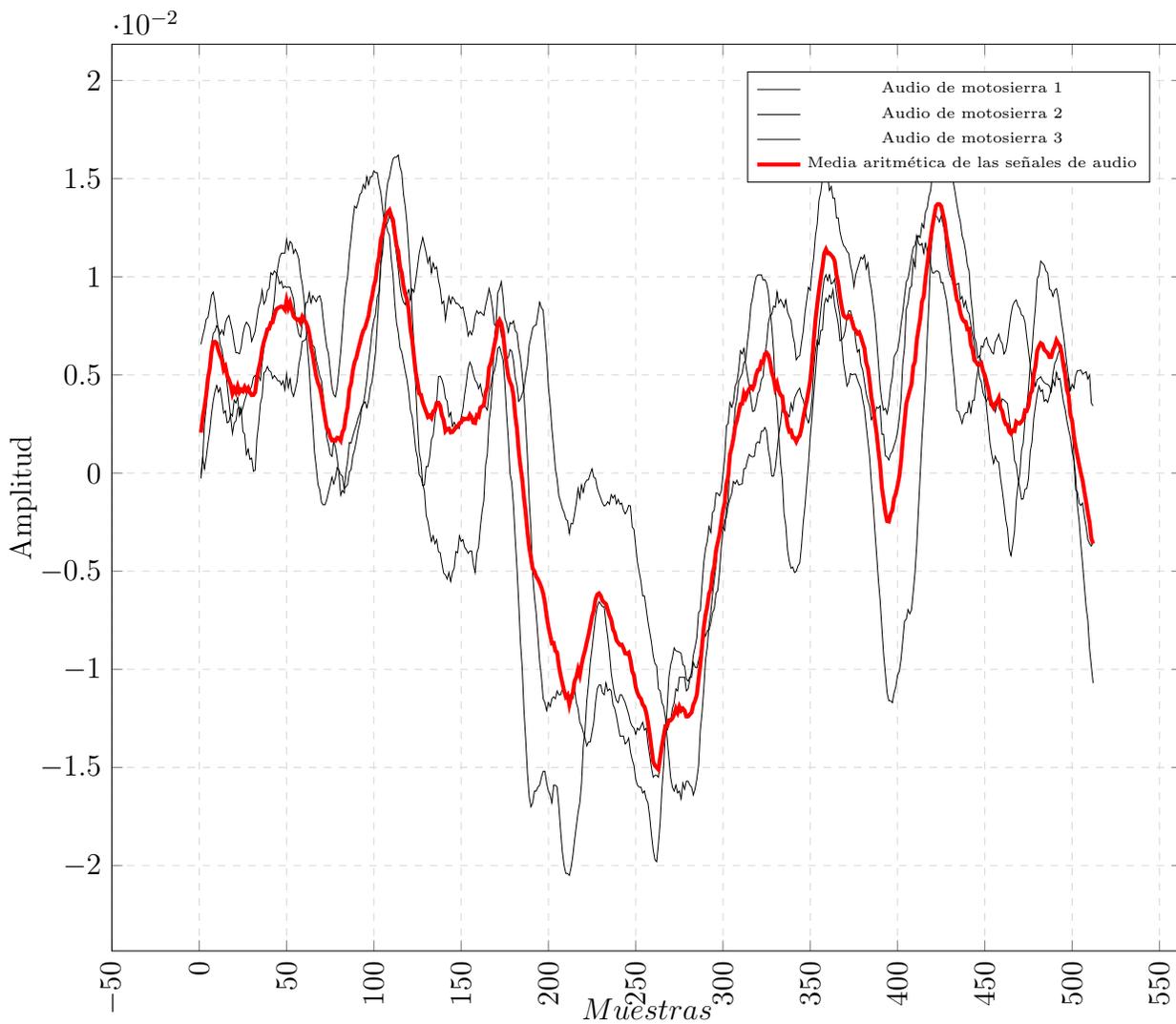


Figura 7.8: Generación de un promedio aritmético de motosierras para su uso como patrón.

Como se puede ver en la figura 7.8, la forma típica de generar la señal patrón es realizar el cálculo de la media aritmética de varias señales de muestra. La media aritmética puede verse en esta figura resaltada y en color rojo.

De la misma manera que se realiza el cálculo de la señal patrón para motosierras en el bosque, se realiza el cálculo de la señal que servirá como patrón para disparos por parte del algoritmo de correlación de las señales. La señal patrón calculada para los disparos de un arma de fuego calibre 22 se pueden ver en la figura 7.9.

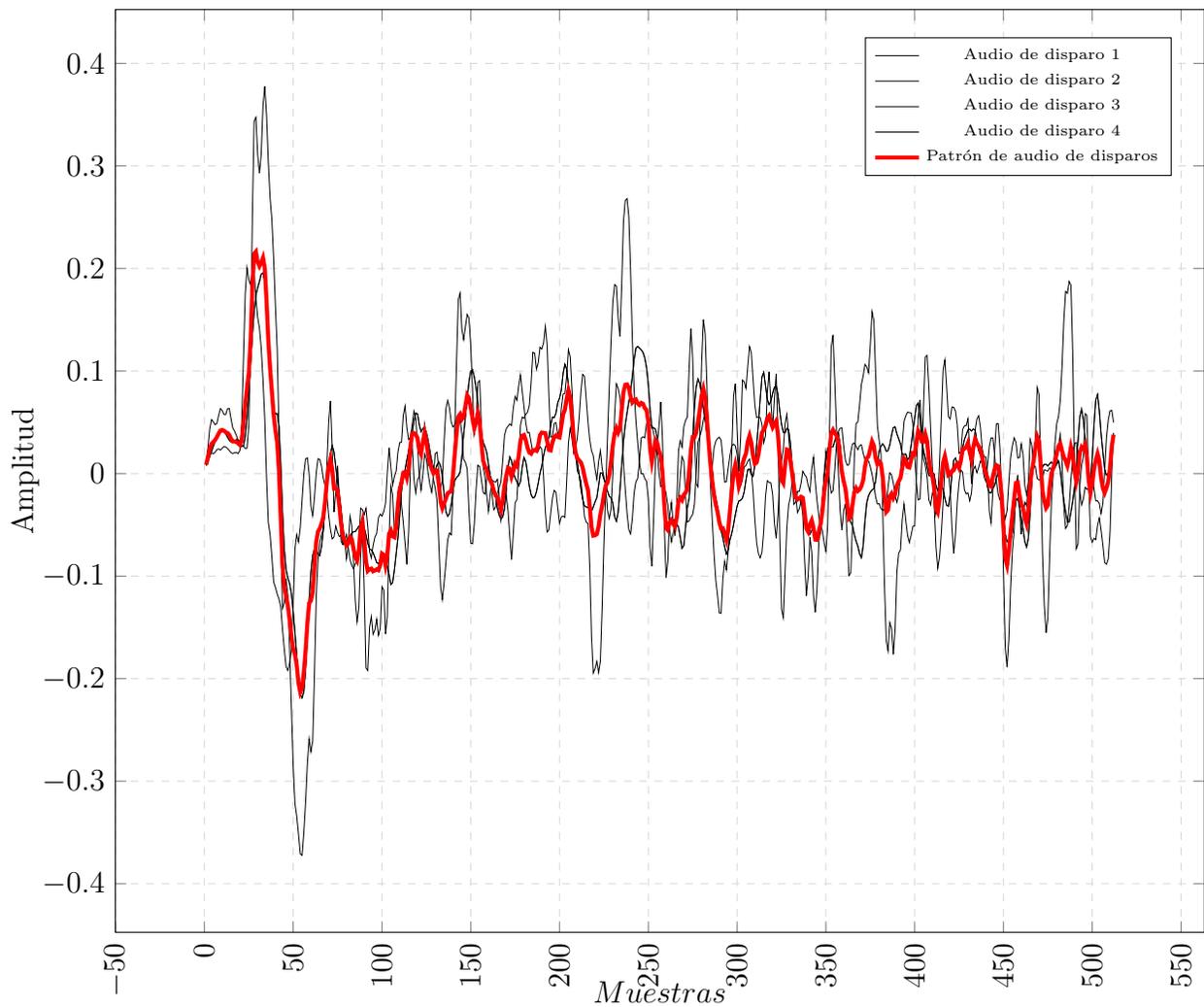


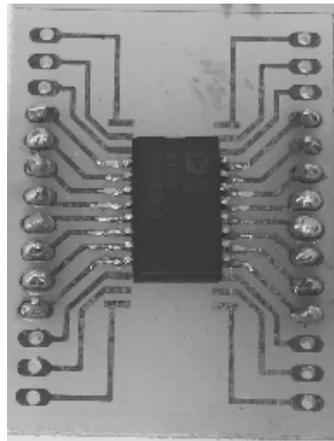
Figura 7.9: Generación de un promedio aritmético de disparos de armas de fuego para su uso como patrón.

Quizas será necesario construir en el futuro este patrón con muestras de muchas señales de armas distintas.

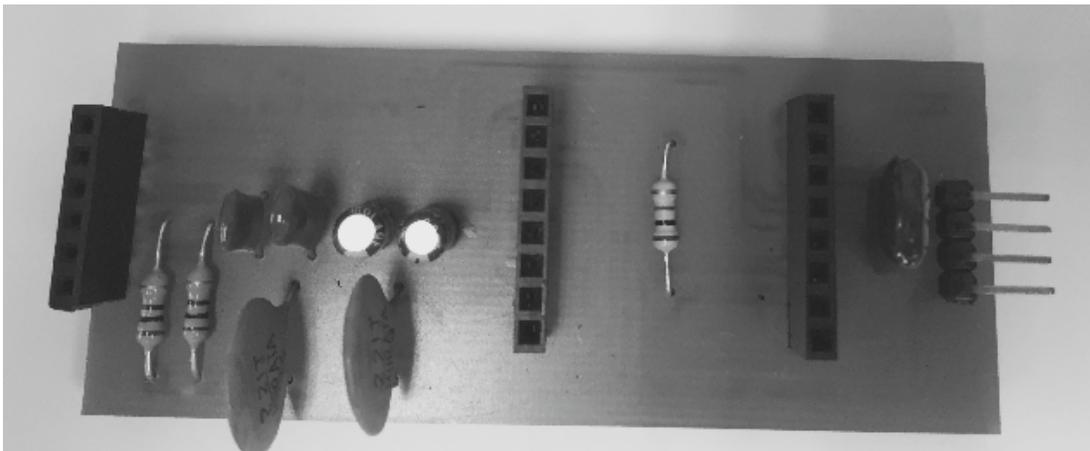
7.1.2 Implementación práctica de modulador sigma delta de segundo orden

Como se muestra en el capítulo 4, se realizó un circuito de prueba para la verificación de la recepción de las señales de audio. Dicho dispositivo, luego de la fabricación en PCB se presenta en la figura 7.10 la cuál muestra el acabado del circuito implementado, además del diseño realizado en el PCB con el fin de verificar la funcionalidad real del modulador sigma delta comercial.

Como se aprecia en la figura 7.10(a), el chip comprado fue soldado a una placa de pruebas previamente diseñada la cuál tiene como función facilitar el uso de varios moduladores sigma delta con el circuito de acondicionamiento de señal, ver figura 7.10(b). Esta acción se realiza con un fin preventivo, ya que existe la posibilidad de que alguno de los moduladores sigma delta utilizados funcione de manera no apropiada y dicha medida permita la utilización rápida de otro modulador similar. Es importante aclarar que los dos moduladores comerciales utilizados en el proyecto fueron escogidos en [4] y dichos moduladores aptos para el proyecto según el documento citado anteriormente presentaron errores de funcionamiento desconocidos.



(a) Fotografía modulador AD7405 sobre la placa DIP



(b) Fotografía circuito impreso con filtro acondicionador y receptáculo DIN para el AD7405

Figura 7.10: Fotografía del circuito impreso del dispositivo de acondicionamiento de señal para modulador AD7405

Para la prueba del circuito explicado anteriormente, se sigue la recomendación presente en la hoja de datos del componente, la cual recomienda el uso de un entorno de pruebas en lenguaje de descripción de hardware para la prueba y verificación de dicho circuito.

Luego de la codificación, verificación y síntesis en FPGA del entorno de pruebas, se procede a realizar las pruebas necesarias para la verificación funcional del circuito de acondicionador de señal y modulador sigma delta. Esto se realiza excitando con un computador por medio del software LabView la entrada diferencial analógica del modulador implementado con las mismas señales de prueba utilizadas en la sección.

Ante la prueba anterior, no se reciben en el computador pruebas de funcionamiento satisfactorias para el modulador sigma delta AD7405 junto al filtro acondicionador de señal. Esto se debe a que dicho modulador, como se explica en su hoja de datos no puede ser utilizado con una placa Nexys 4, debido a que los niveles de voltaje que utiliza este modulador son de la norma LVDS (de las siglas en inglés de señal diferencial de baja tensión). Por cuanto hay un problema de interfaz con las señales de tensión utilizadas por la FPGA Nexys 4 utilizada en este proyecto.

Es por esta razón anterior que se procede a comprobar la entrega de la señal modulada. Para esto se excita el modulador sigma delta fabricado con una señal de entrada senoidal con una frecuencia de 100kHz y amplitud de 250mV como se sugiere en a hoja de datos. Además se utiliza una señal de reloj de 5 MHz y se verifica que la salida diferencial entregada por el moduador sea una señal modulada a bitstream tenga el comportamiento esperado

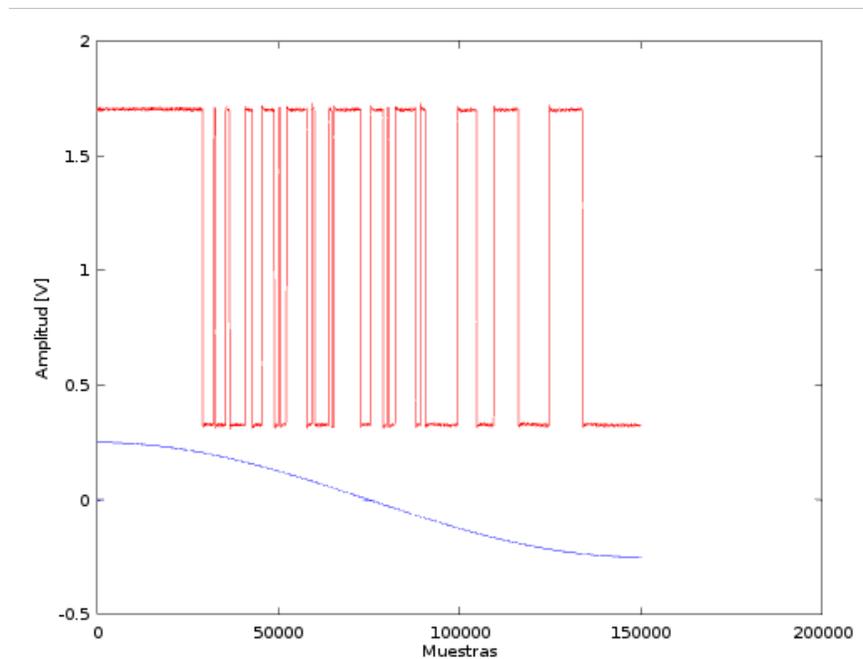


Figura 7.11: Respuesta del modulador sigma delta ante un estímulo senoidal.

7.2 Algoritmo de correlación *bitstream*

Luego del diseño, compilación y síntesis del algoritmo de correlación explicado en el capítulo 5, se procede a realizar la verificación funcional de dicho algoritmo. Para esto se utiliza el entorno diseñado para pruebas del capítulo 6. Las pruebas organizadas en esta sección se comparan contra los valores teóricos obtenidos mediante la utilización de una función genérica del software de análisis matemáticos Octave. Dicha función permite realizar el cálculo de la correlación entre dos señales, lo cual nos permite tomar como referencia dorada esta información para la comparación de los resultados obtenidos.

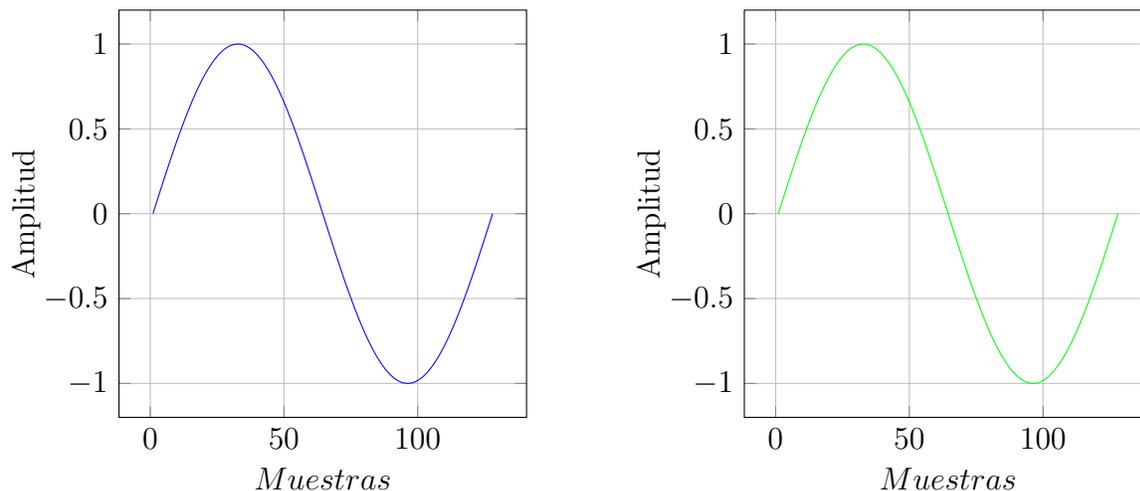
Es importante saber que para analizar las figuras con los resultados de correlación, los valores esperados para la correlación entre dos señales para el algoritmo implementado dependen directamente de la cantidad de muestras utilizadas y el OSF utilizado. Dado que se utiliza un valor de OSF de 8 y una cantidad de muestras de 128, el valor máximo de correlación posible será de 1024, mientras que el mínimo será de 0.

7.2.1 Pruebas realizadas al algoritmo de correlación diseñado

Se realizan las siguientes pruebas que tienen como objetivo el comprobar la funcionalidad del algoritmo de correlación con las modificaciones propuestas.

Autocorrelación de una señal senoidal

Se plantean las siguientes 2 señales senoidales para aplicarles la correlación. En la figura 7.12, se muestran las señales utilizadas para dicha prueba:



(a) Señal senoidal utilizada como muestra

(b) Señal senoidal utilizada como patrón

Figura 7.12: Señales utilizadas en la autocorrelación.

Dado que las señales patrón y muestra son idénticas, la prueba busca realizar la autocorrelación de una señal senoidal. Esta medida tiene un resultado estadístico teórico el cual se puede apreciar en la siguiente figura.

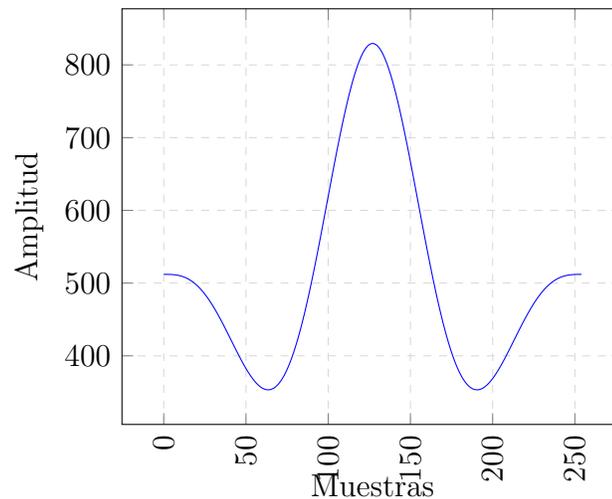
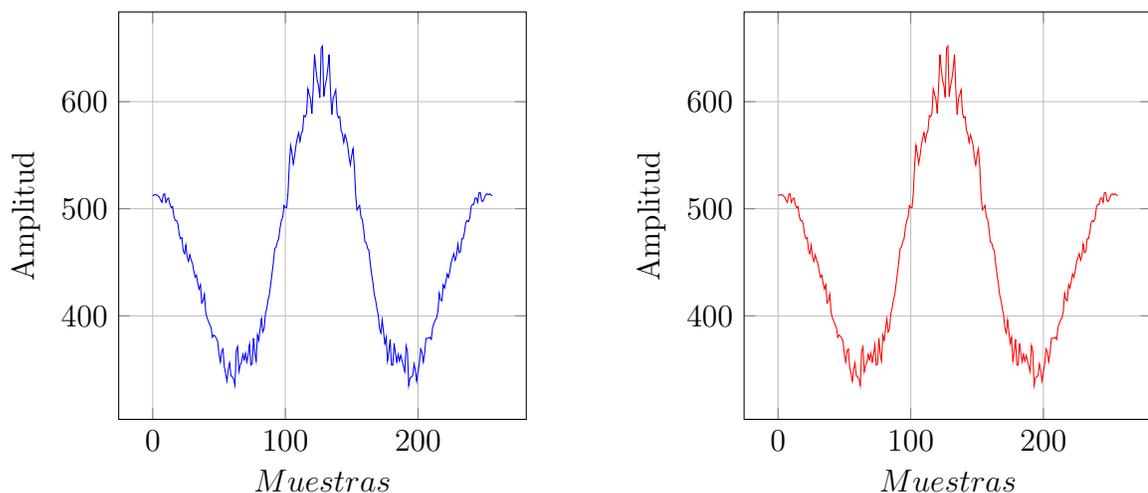


Figura 7.13: Autocorrelación estadística teórica

Como se puede ver en la figura anterior, el resultado de la autocorrelación de una señal senoidal tiene una forma singular, la cual nos indica el valor de correlación obtenido por la señal patrón y la muestra siendo escalado debido a que las señales a utilizar serán moduladas en *bitstream*. Una vez obtenido esto anterior se procede a obtener el modelo teórico del algoritmo de correlación *bitstream* utilizado con una señal senoidal de un ciclo modulada en formato *bitstream*. Estos resultados obtenidos los podemos ver en la figura 7.14.



(a) Autocorrelación teórica realizada en Octave

(b) Autocorrelación experimental

Figura 7.14: Autocorrelación teórica y experimental del algoritmo de correlación implementado.

Además de realizar el cálculo, se procede a realizar la prueba del algoritmo de correlación implementado en FPGA. Este módulo recibe las señales *bitstream* de la figura 7.12 y entrega los datos representados gráficamente en la figura 7.14.

Al realizar la comparación de la figura 7.14(a) con la figura 7.14(b), se visualiza que la correlación teórica realizada en Octave y la correlación experimental tienen un error absoluto de 0, esto nos indica que el algoritmo de correlación implementado es correcto.

Se puede visualizar en la figura 7.19 que al comparar la implementación experimental con la real se visualiza un error absoluto el cuál se comentará posteriormente, sin embargo a pesar de dicho error, la forma y comportamiento de la autocorrelación de la señal senoidal modulada a *bitstream* sigue el comportamiento teórico.

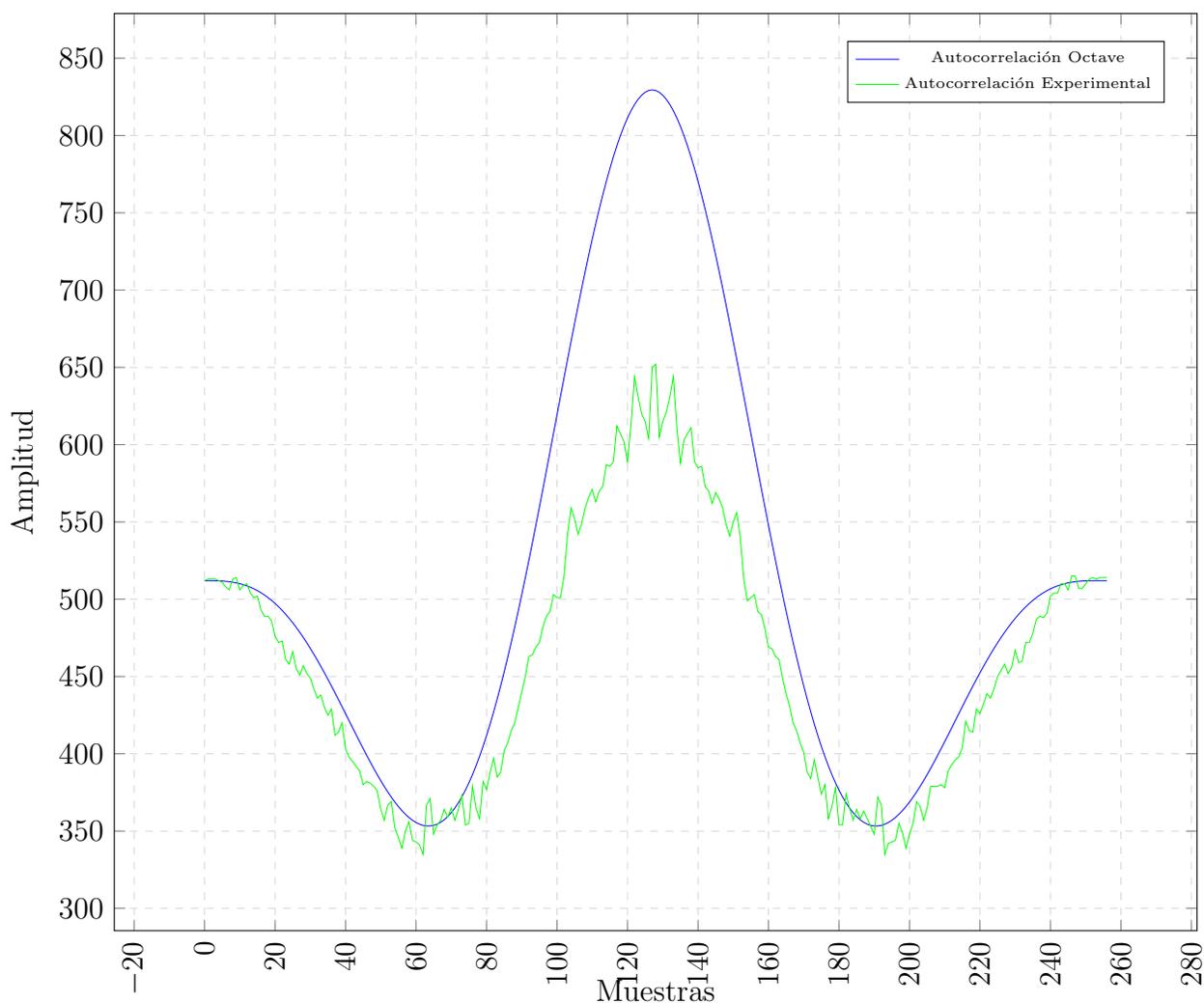


Figura 7.15: Análisis de autocorrelación senoidal

Correlación cruzada de señales senoidales

Se realiza también una segunda prueba con señales genéricas, esta vez señales senoidales con una cantidad de ciclos distinta. Como se puede ver en la figura 7.16(a) la señal muestra tiene en la misma cantidad de muestras que la figura 7.16(b). Sin embargo, la primera tiene 3 ciclos completos de una señal senoidal, mientras que la otra tiene 5 ciclos completos.

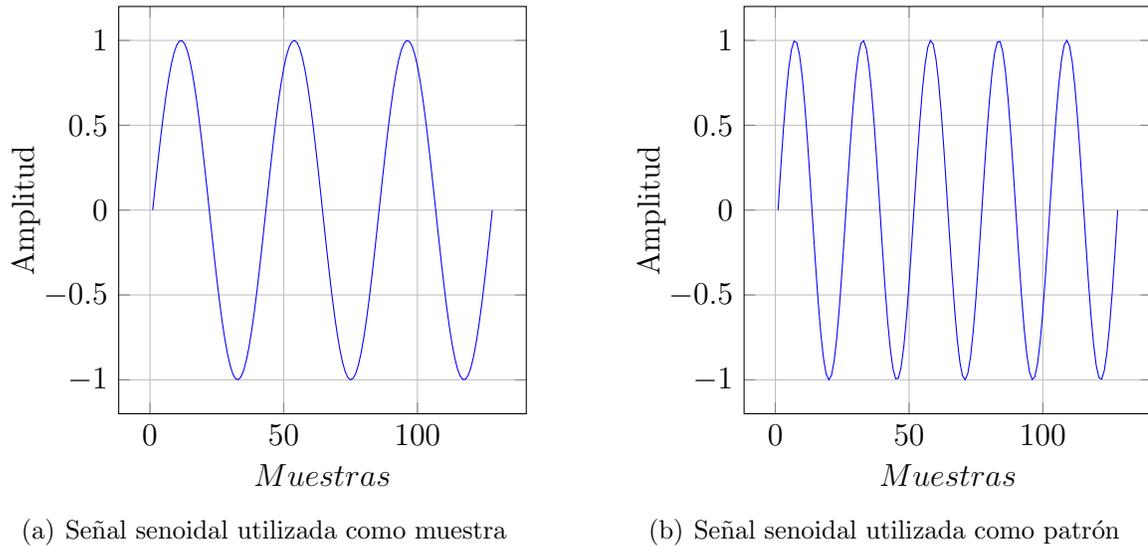


Figura 7.16: Señales utilizadas para el cálculo de la correlación cruzada de señales senoidales.

El modelo teórico dado por Octave de la correlación cruzada de las señales representadas anteriormente se puede visualizar en la siguiente figura.

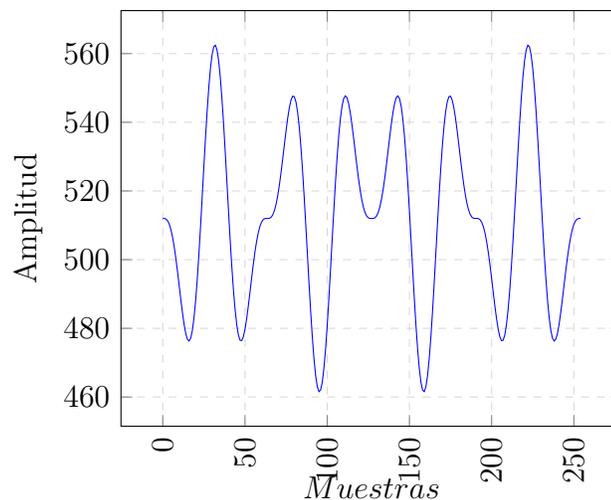
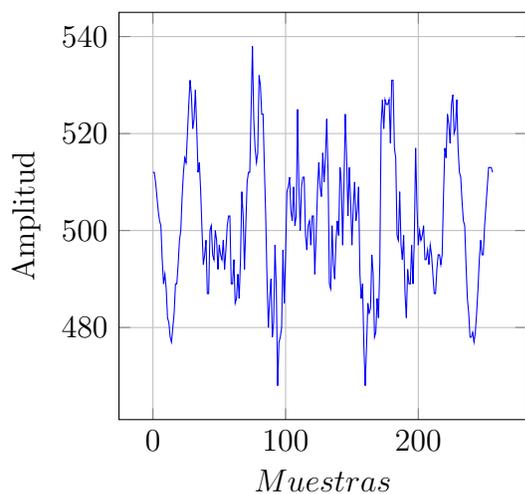
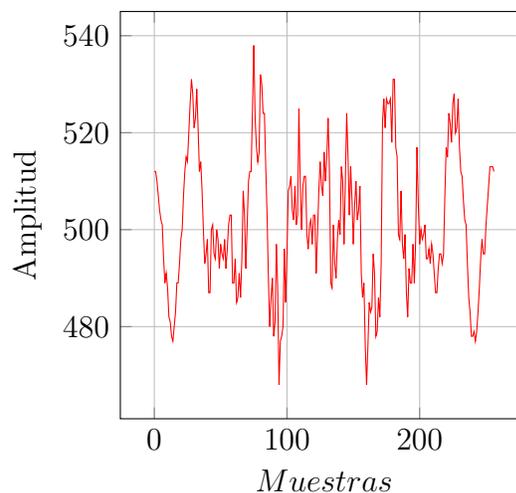


Figura 7.17: Correlación cruzada teórica para las señales senoidales de la figura 7.16.

Como se puede ver en la figura anterior, la correlación cruzada tiene un patrón establecido, el cuál se puede ver a grandes rasgos en la figura 7.18(a) y 7.18(b) que representan el modelo teórico calculado en Octave y experimental del algoritmo de correlación puesto a prueba.



(a) Correlación cruzada teórica realizada en Octave



(b) Correlación cruzada experimental

Figura 7.18: Correlación cruzada de señales senoidales del algoritmo implementado.

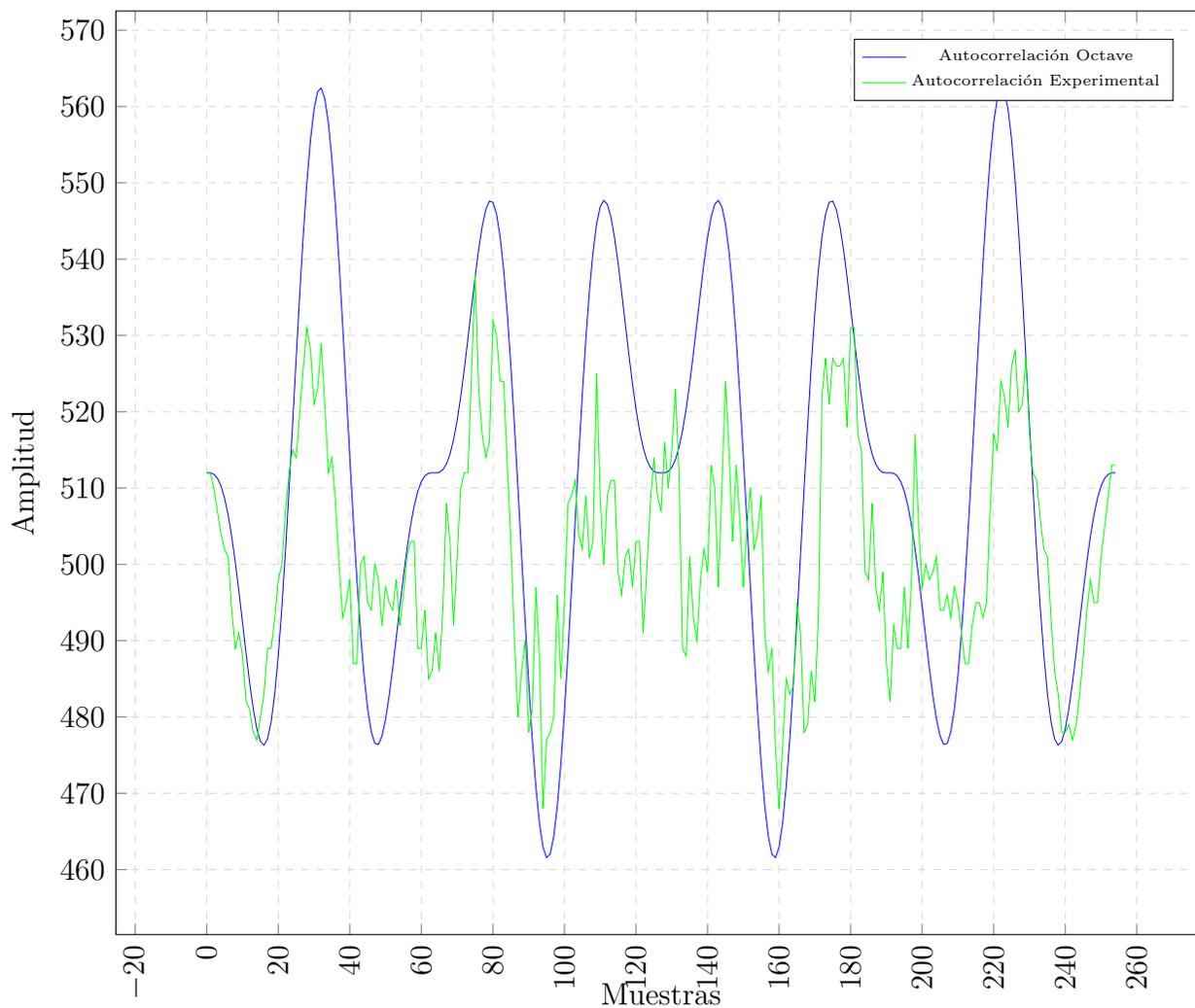


Figura 7.19: Análisis de correlación de señales senoidales de tres y cinco ciclos

Las figuras anteriores reafirman que la implementación del algoritmo de correlación *bitstream* diseñado se encuentra correctamente realizado. Esto debido a que el modelo Octave y el experimental no se encuentran lejos uno de otro. Para asegurar esto, se debe considerar que las señales obtenidas en Octave y experimentalmente al excitar el algoritmo de correlación con las señales moduladas a *bitstream* son bastante ruidosas producto de la sobremodulación realizada por el modulador sigma delta. Además, es claro que el filtro paso bajo diseñado en la sección 5.4 no elimina el ruido efectivamente.

Cálculo de error absoluto en pruebas genéricas

Luego de verificar el comportamiento característico de la autocorrelación, se realiza un análisis del error absoluto obtenido en las pruebas genéricas aplicadas al algoritmo de correlación con ayuda de la ecuación (7.1).

$$Error\ Absoluto = |Valor\ Teórico - Valor\ Experimental| \quad (7.1)$$

Los resultados del cálculo del error absoluto promedio para la prueba de la autocorrelación senoidal se organizan en la figura 7.20.

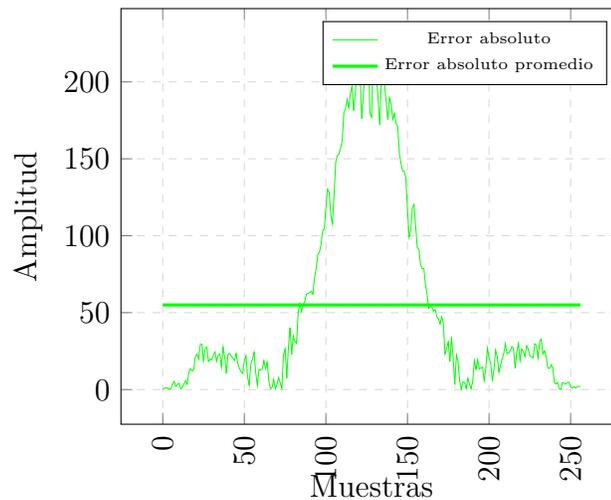


Figura 7.20: Error absoluto de pruebas genéricas

Como se puede ver en esta figura anterior, el valor de dicho error es de 55. Seguidamente se realiza el cálculo del error absoluto de la correlación cruzada de las señales senoidales de tres y cinco ciclos.

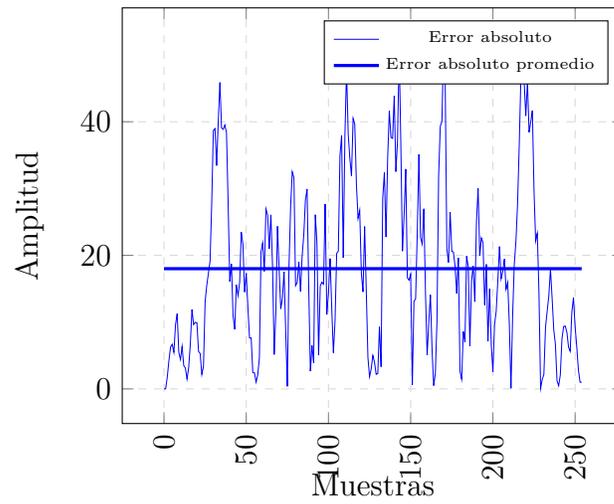


Figura 7.21: Error absoluto de pruebas genéricas

Como se aprecia en la figura 7.21 el valor del error absoluto promedio es de 18. Esto se organiza también en la tabla 7.1.

Tabla 7.1: Error absoluto promedio de pruebas realizadas

	Error absoluto promedio
Autocorrelación senoidal	55
Correlación cruzada señales senoidales	18

7.2.2 Pruebas con señales reales

Es necesario la aplicación de señales reales para coprobar la detección de los valores de correlación entre dichas señales, para esto se utilizan las siguientes señales de disparos de armas de fuego y motosierras. En esta sección se organizan los resultados obtenidos por el algoritmo de correlación probado anteriormente siendo excitado con señales reales. .

Pruebas con las señales de motosierras

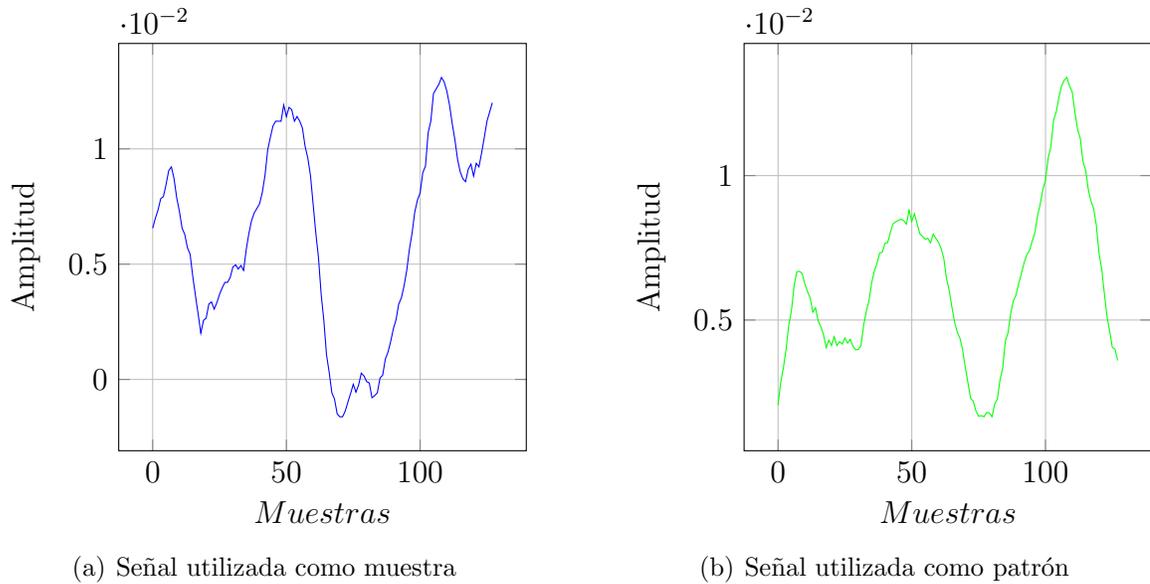
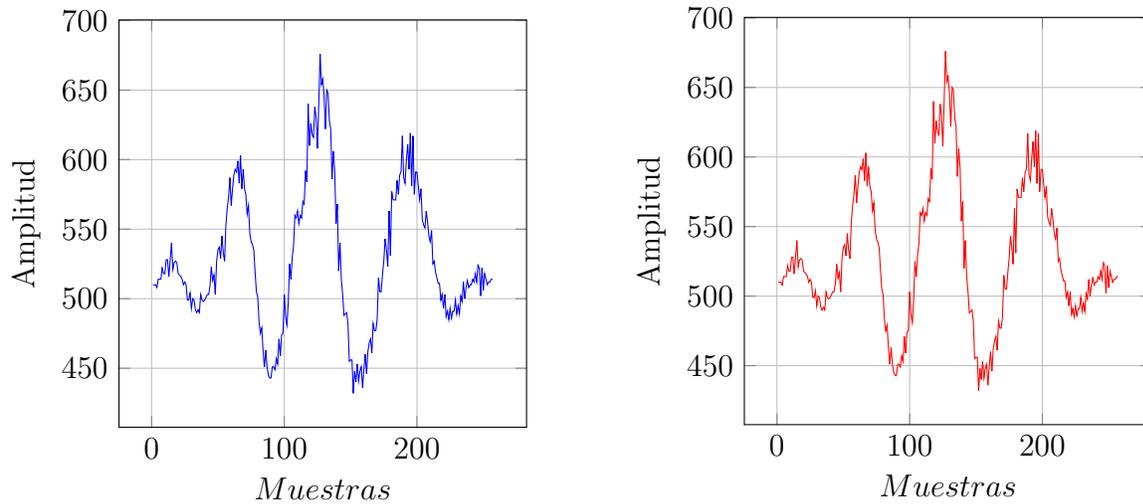


Figura 7.22: Señales muestra y patrón utilizadas en el algoritmo de correlación para la primera prueba de detección de motosierras.

Se utiliza la señal de la figura 7.22(a) como muestra para la verificación de la correlación contra la señal de la figura 7.22(b) utilizada como patrón de muestra. Utilizando estas señales anteriores, se logra la obtención de los siguientes resultados ordenados en la figura 7.23.

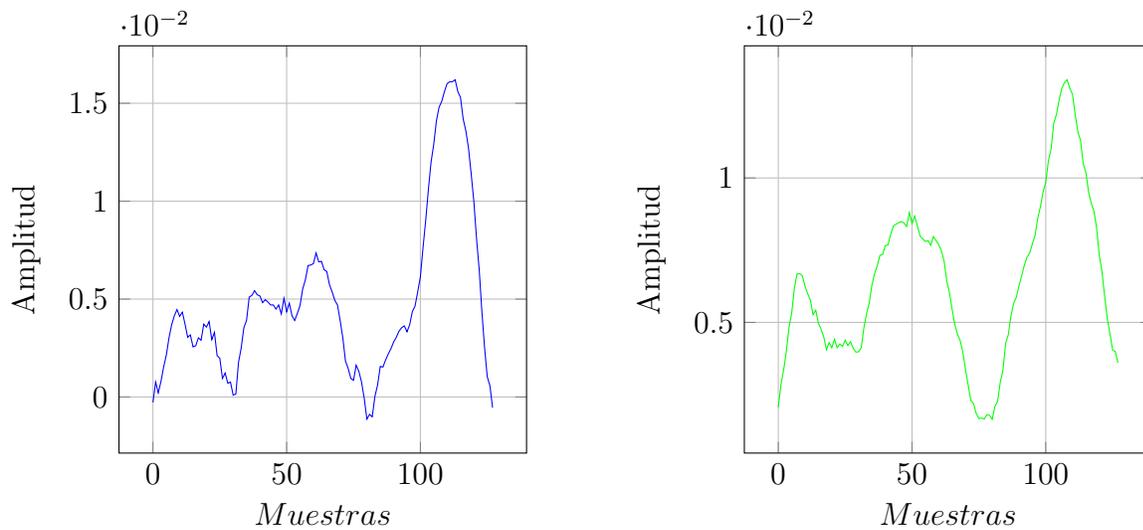


(a) Correlación cruzada teórica de las motosierras calculada en Octave

(b) Correlación cruzada experimental del algoritmo de correlación implementado

Figura 7.23: Resultados de la correlación cruzada de las señales patrón y muestra de una señal de audio proveniente de una motosierra a 30m del detector.

Cómo se puede apreciar en la figura anterior, al utilizar las señales mencionadas en el algoritmo de correlación diseñado, el comportamiento del resultado es característico y similar en las señales que tienen un comportamiento similar, donde el valor de correlación obtenido tiende a ser máximo conforme las señales tiendan a ser cada vez más similares.



(a) Señal utilizada como muestra

(b) Señal utilizada como patrón

Figura 7.24: Señales muestra y patrón utilizadas en el algoritmo de correlación para la segunda prueba de detección de motosierras.

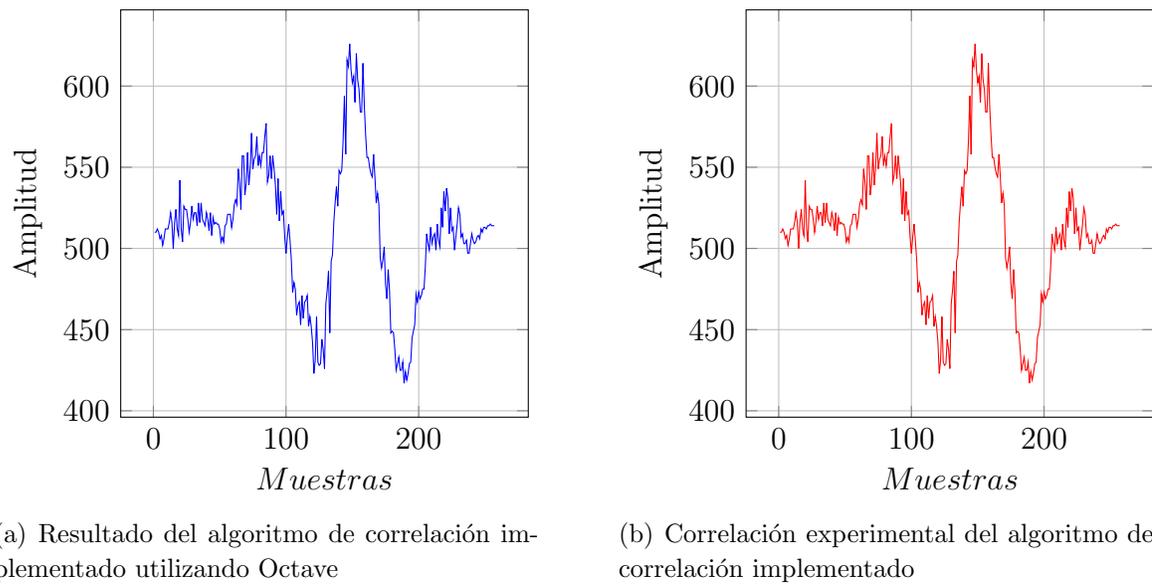


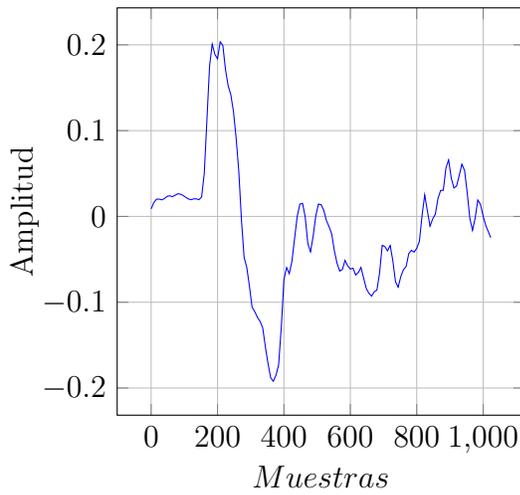
Figura 7.25: Resultados de la correlación cruzada de las señales patrón y muestra de una señal de audio proveniente de una motosierra a 90m del detector.

Como se puede ver en las gráficas 7.25(a) y 7.25(b) de los resultados obtenidos para los resultados del algoritmo de correlación, el resultado de correlación alcanza un pico máximo cuando las señales son lo más parecidas estadísticamente. Con esto se puede verificar que el algoritmo de correlación funciona según las especificaciones de diseño propuestas en [17] para la detección de motosierras.

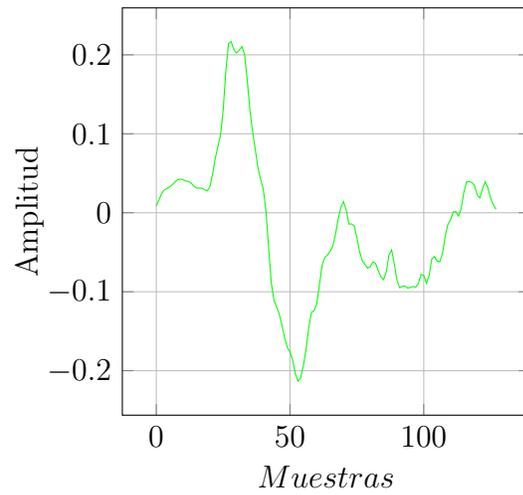
Pruebas con las señales de disparos

Se realizan además las pruebas del algoritmo de correlación de señales para la comparación de señales de disparos. En la figura 7.26, se organizan las señales comparadas las cuales son bastante similares, por cuanto se espera que el algoritmo implementado entregue un pico que confirme esto anterior.

Los resultados de la correlación teórica y experimental se encuentran en la figura 7.27.

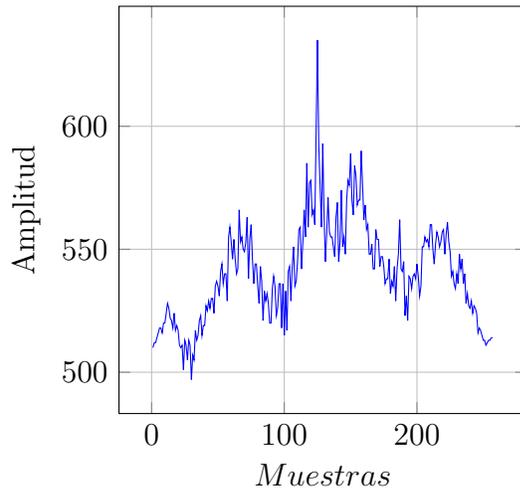


(a) Señal utilizada como muestra

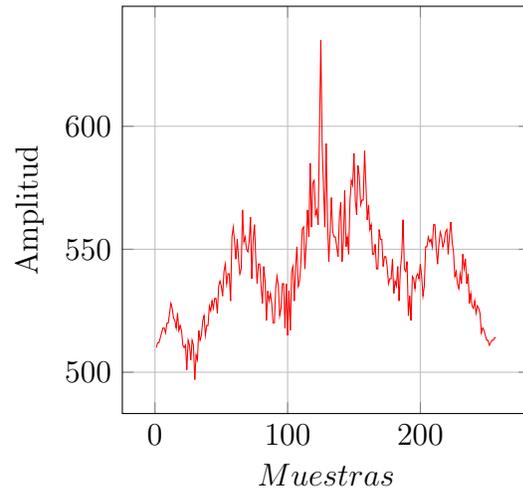


(b) Señal utilizada como patrón

Figura 7.26: Señales muestra y patrón utilizadas en el algoritmo de correlación para la primera prueba de detección de disparos.



(a) Resultado del algoritmo de correlación implementado utilizando Octave



(b) Correlación experimental del algoritmo de correlación implementado

Figura 7.27: Resultados de la correlación cruzada de las señales patrón y muestra de un disparo a 30 metros

Se puede ver en la figura 7.27(a) y 7.27(b) que el pico esperado sí se encuentra en la gráfica lo cuál confirma que las señales sí son estadísticamente parecidas.

Se realiza una última prueba de comparación de señales de disparos, en la cuál se muestran las señales utilizadas con la ayuda de las figura 7.28.

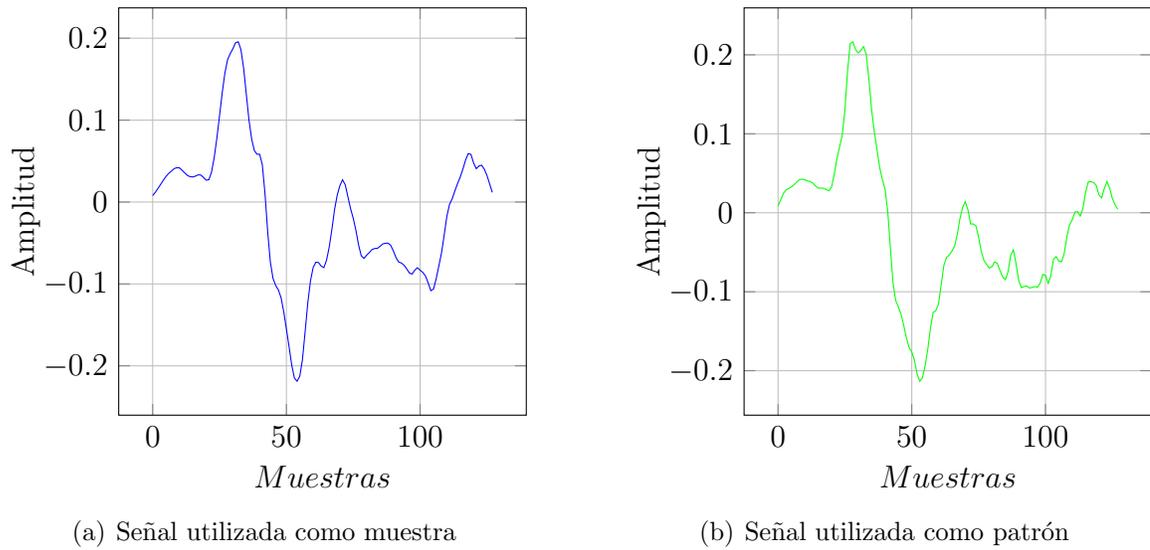


Figura 7.28: Señales muestra y patrón utilizadas en el algoritmo de correlación para la segunda prueba de detección de disparos.

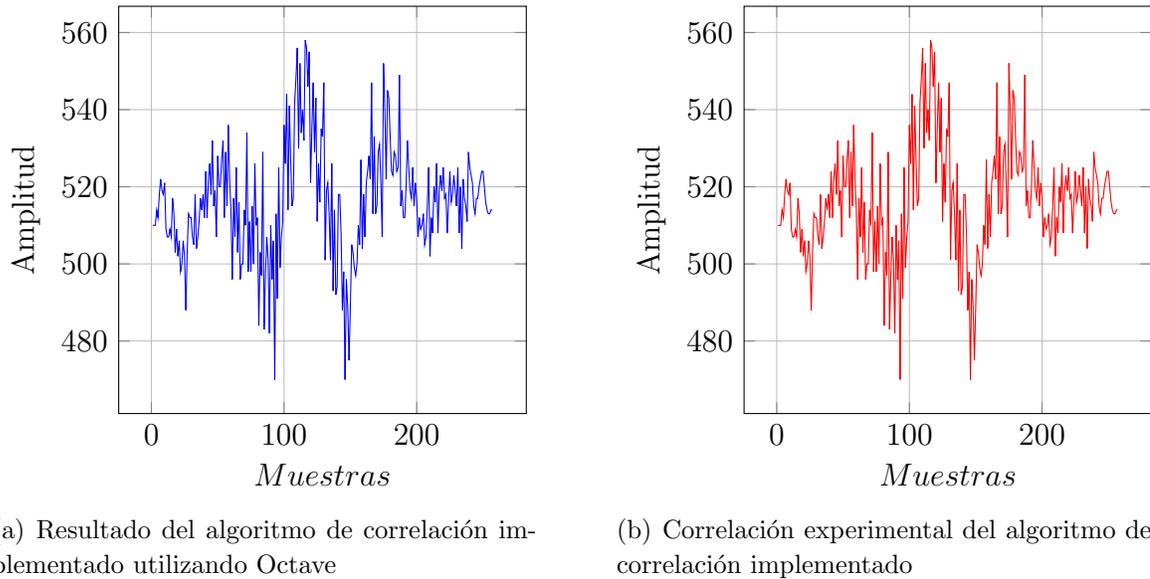
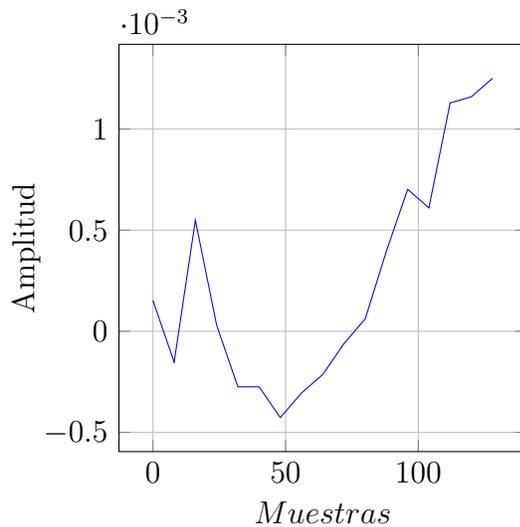


Figura 7.29: Resultados de la correlación cruzada de señales patrón y muestra de un disparo a 90 metros

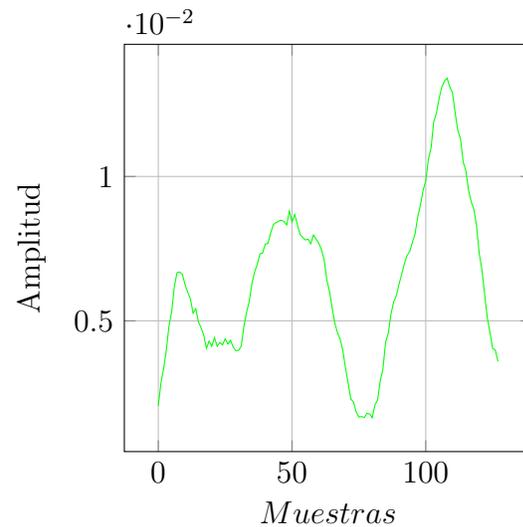
Pruebas de las señales del bosque

Se realizan pruebas con señales del bosque que muestran comportamientos diferentes al de las señales patrón y verificar que las señales no alcanzan valores de correlación altos.

Se utiliza una señal de muestra de sonido del canto de un ave, y la señal patrón de motosierras.

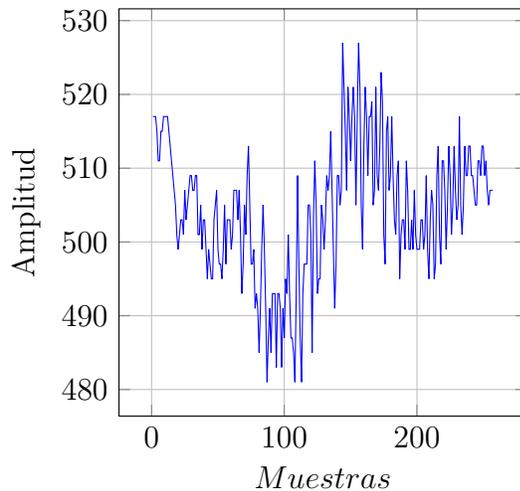


(a) Señal utilizada como muestra

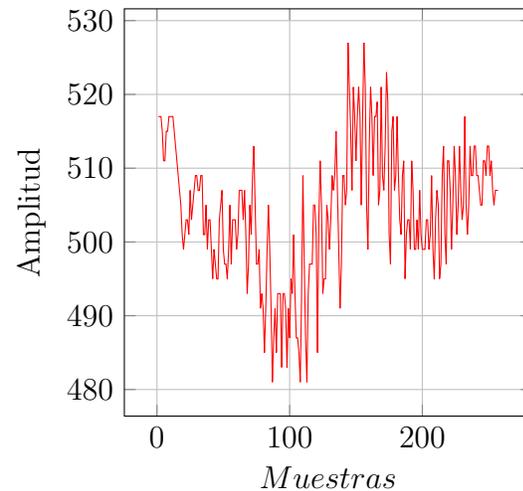


(b) Señal utilizada como patrón

Figura 7.30: Señales muestra y patrón utilizadas en el algoritmo de correlación para la verificación de detección de falsos positivos.



(a) Resultado del algoritmo de correlación implementado utilizando Octave



(b) Correlación experimental del algoritmo de correlación implementado

Figura 7.31: Correlación del algoritmo de correlación implementado para una señal de audio de el sonido del canto de un ave.

Como se puede ver en las figuras anteriores, las señales de correlación obtenidas son bastante variables y no tienen un valor de correlación mayor a 530, lo que indica que las señales no son lo suficientemente parecidas como para que se indique lo contrario. Aún cuando la correlación obtenida tiene un aumento, esta es de apenas 30 valores de diferencia entre el valor máximo y el mínimo obtenido de la correlación, por cuanto no es un pico lo suficientemente pronunciado como para que se detecte un valor que indique que las señales son estadísticamente parecidas.

Se tiene ahora entonces un sistema funcional de correlación *bitstream*. Por cuanto es necesario comprobarse el detector completo.

7.3 Detector de disparos y motosierras

En la presente sección se organizan los resultados obtenidos por en las pruebas del detector utilizando las mismas señales utilizadas para el algoritmo de correlación.

Se presentan los datos resaltando en las figuras con color rojo la salida del detector de patrones acústicos. Además como se verá en las siguientes figuras, se representa con un valor de una amplitud de 300 o 700 el valor digital de salida del detector, considerandose 300 el valor bajo y 700 el valor alto. Esto anterior se realiza con el fin de ejemplificar en la misma figura el resultado de la salida del detector junto a los valores de correlación y media móvil obtenidos durante cada prueba.

Se espera que cuando el valor de correlación es mayor al valor de la media móvil del valor de la correlación escalado el detector debería de responder enviando un valor binario en alto que representa la detección de una señal de muestra muy similar a la señal patrón. Además, el valor de ganancia utilizado para la media móvil es de 5, ya que este proporcionó resultados significativos en comparación con los otros implementados en [4].

7.3.1 Resultados del detector para las señales genéricas de prueba

Se utilizan primeramente las señales genéricas con las que se realizaron las pruebas para el algoritmo de correlación.

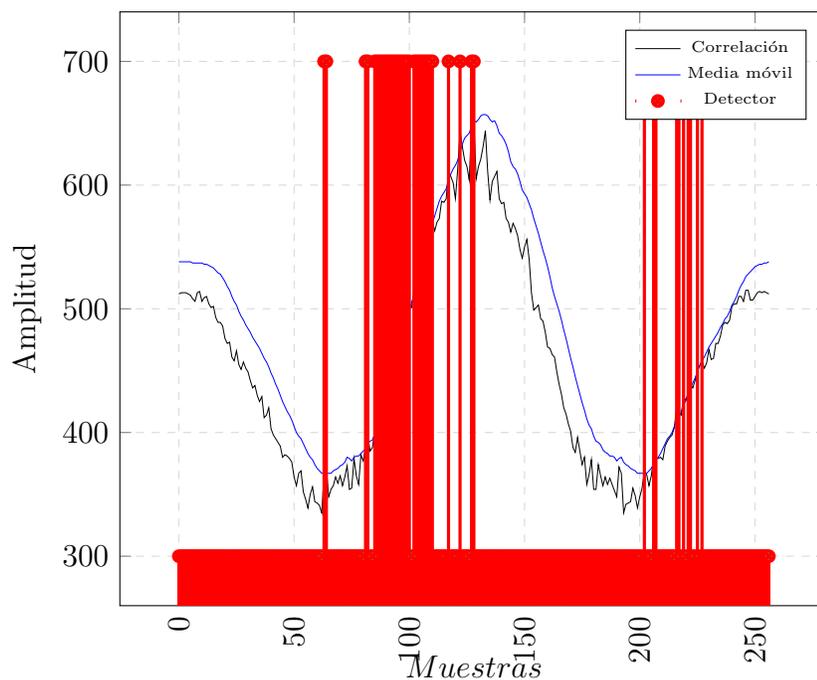


Figura 7.32: Resultados del detector de patrones acústicos para la autocorrelación de una señal senoidal.

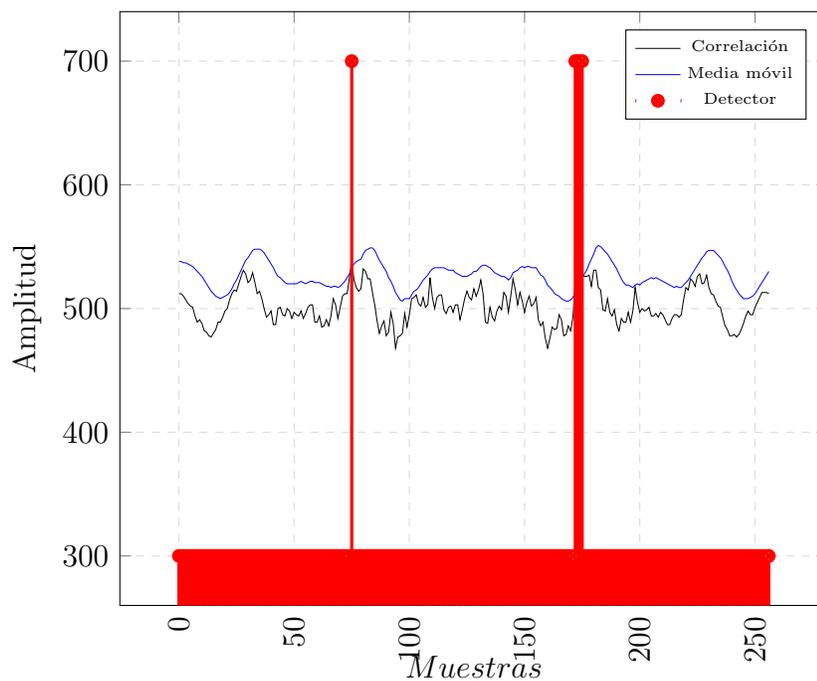


Figura 7.33: Resultados del detector de patrones acústicos para la correlación cruzada de señales senoidales de tres y cinco ciclos.

Como se nota en las dos figuras anteriores, el valor de salida obtenido para las señales no es el deseado para el detector de patrones acústicos. Esto se dá por varias razones las cuales se comentarán al final de esta sección, pero el hecho de que una prueba sencilla falle hace prever que los próximos también.

7.3.2 Resultados del detector para las señales reales de prueba

Se utilizan también las señales reales de audio de disparos y motosierras para la verificación del comportamiento del detector.

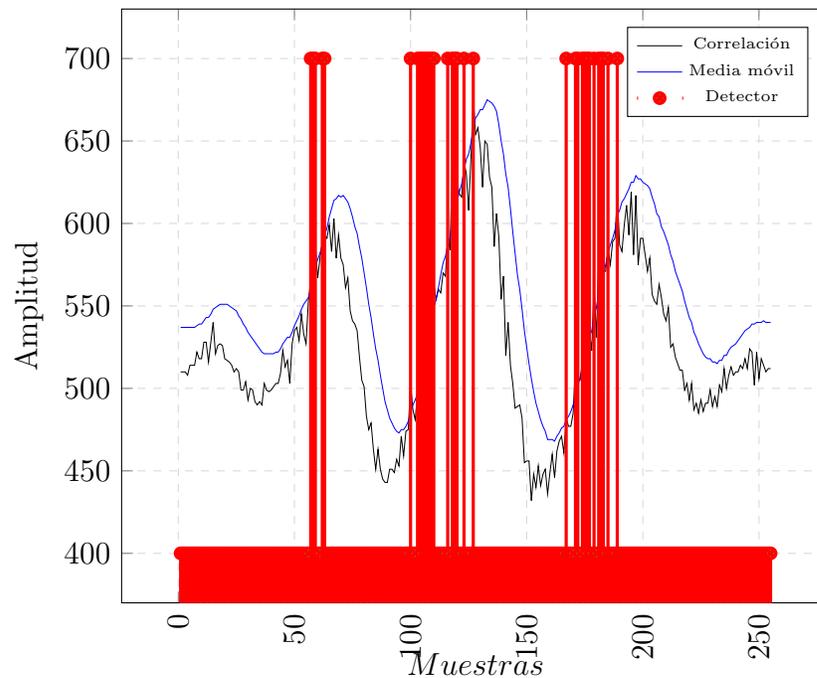


Figura 7.34: Resultados del detector de patrones acústicos para la correlación cruzada de la señal de una motosierra a 30 metros del micrófono contra la señal patrón para motosierras.

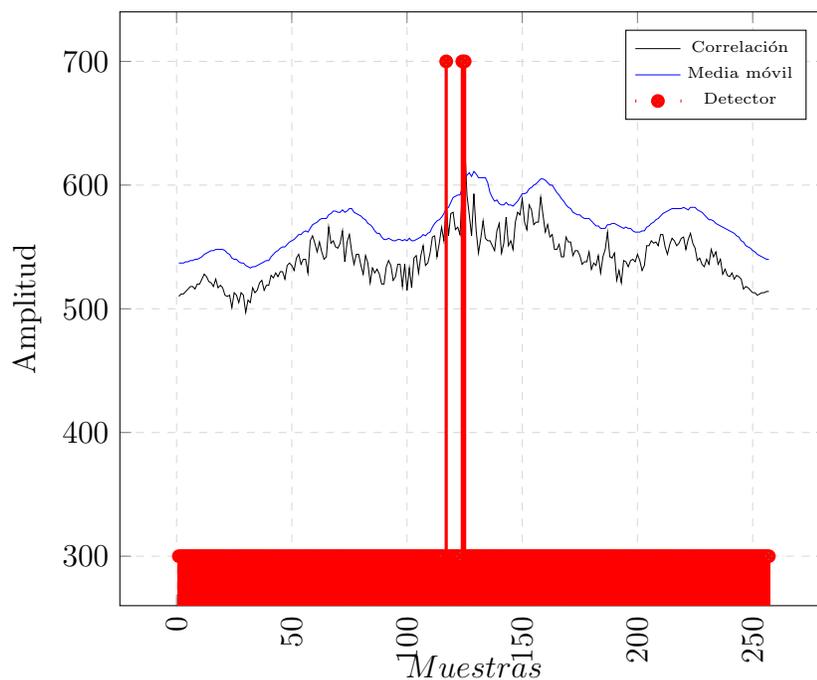


Figura 7.35: Resultados del detector de patrones acústicos para la correlación cruzada de la señal de un disparo a 30 metros del micrófono contra la señal patrón para disparos.

7.3.3 Resultados del detector para las señales de sonidos del bosque

Como último punto se verifica la respuesta del detector de patrones acústicos utilizando la señal de muestra del canto de un ave, considerando como señal patrón una señal de motosierras.

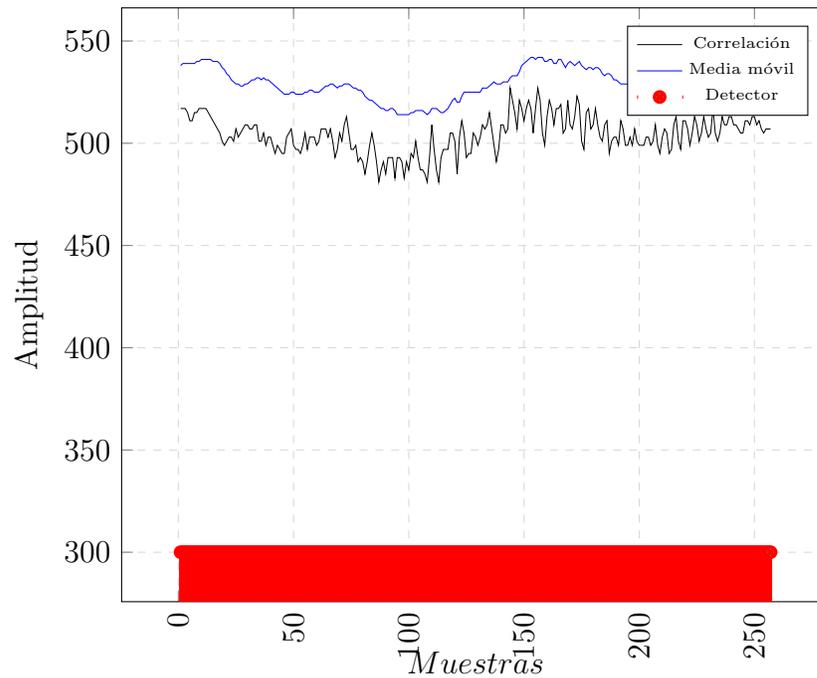


Figura 7.36: Resultados del detector de patrones acústicos para la correlación cruzada de la señal de sonido del canto de un ave contra la señal patrón para motosierras.

7.3.4 Análisis de resultados del detector

Como se denota en las figuras con los resultados para el detector, el comportamiento no es el esperado para el detector de patrones acústicos. Esto se dá principalmente por dos razones. Primero, el alto valor de ruido proveniente del sobremuestreo realizado al modular la señal. Es por esta razón que el filtro diseñado e implementado en este proyecto deben ser modificados con el fin de corregir este problema, se sugiere utilizar un filtro paso bajas de mayor orden. Se recomienda a utilización de un filtro distinto al implementado que elimine mejor el ruido, por cuanto se sugiere analizar e implementar el filtro descrito en la hoja de datos del modulador AD7405.

Como segundo punto se atribuye el comportamiento no deseado del detector al filtro de media móvil implementado, debido a que se utilizan muy pocos valores para realizar el cálculo de esta media móvil. Esto se explica debido a que al utilizar un valor de OSF de 8 y una cantidad de muestras de 128, las señales muestreadas tienen un tamaño de 1024 bits, lo que representan apenas 3ms de la señal de audio. Para realizar un cálculo de la media móvil más representativo, es necesario el aumentar la ventana en la que actúa dicho filtro, lo cuál haría que el tamaño del registro de correlación aumente significativamente. Por cuanto dicha variable deberá de determinarse en el futuro para lograr un balance entre la eficiencia de deitección y el tamaño de los registros utilizados.

En determinado punto, no será viable la implementación de un registro de correlación tan grande, por lo que será necesario reconsiderar el algoritmo de correlación implementado.

Capítulo 8

Conclusiones

Al finalizar el presente proyecto, se realizan varias conclusiones relevantes, las cuales se describen en esta sección del documento.

Se puede concluir que la utilización de señales de audio para la detección de patrones acústicos moduladas a bitstream requiere de una ventana mayor a 3ms.

Se puede comprobar que es posible realizar el cálculo de un valor de correlación entre señales moduladas a formato bitstream.

Se puede afirmar que es posible encontrar una señal patrón obtenida con una media aritmética que ejemplifique el comportamiento de un evento o sonido generado por una motosierra o un arma de fuego.

Además, se puede comprobar que la utilización de filtros digitales disminuye el ruido por sobremuestreo de una señal *bitstream*.

Capítulo 9

Recomendaciones

Se realizan varias recomendaciones finales una vez finalizado el presente proyecto de graduación, con miras a que el trabajo realizado se mejore y finalice de la mejor manera.

Para el cálculo de la señal patrón, es necesario utilizar varios procedimientos estadísticos para el cálculo de la señal patrón y verificar si el detector de patrones acústicos realiza una detección que produzca mejores resultados.

Es imperativo el uso de un filtro de orden mayor que elimine el ruido de sobremuestreo de la señal bitstream del algoritmo de correlación, para esto se sugiere la investigación del filtro sugerido por la hoja de datos del modulador AD7405.

Se debe realizar un análisis que utilice diferentes valores de ganancia para la media móvil del algoritmo de correlación que garantice el mejor resultado según las condiciones de muestreo.

Es importante reconsiderar la propuesta de correlación bitstream completa, ya que esta podría utilizar muchos recursos según aumente la ventana de cálculo de la media móvil de los valores de correlación.

Bibliografía

- [1] Alexander Frank Skutch. *Guía de aves de Costa Rica*. Editorial INBio, 2007.
- [2] TA Meza Ocampo and A Bonilla Durán. *Áreas naturales protegidas de Costa Rica*. Number 333.95097286 M617; 50913. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 1990.
- [3] Josué Mora Castro. Implementación de algoritmo para calcular la correlación bitstream entre dos señales para detectar sonidos de disparos y motosierras en el bosque. Tesis de licenciatura, Escuela de Ingeniería Electrónica, ITCR, Cartago, Costa Rica, Junio 2016.
- [4] Rolando Moraga Mora. Sistema de detección de patrones acústicos de disparos de armas de fuego y motosierras en bosques tropicales basado en un algoritmo de correlación de bitstream. Tesis de licenciatura, Escuela de Ingeniería Electrónica, ITCR, Cartago, Costa Rica, Junio 2016.
- [5] Oliver Hinton. Eee305-digital signal processing. *UNIVERSITY OF NEWCASTLE UPON TYNE*, 11, 2002.
- [6] T. S. Lande, T. G. Constandinou, A. Burdett, and C. Toumazou. Running cross-correlation using bitstream processing. *Electronics Letters*, 43(22), Oct 2007.
- [7] Olav E. Liseth. Low power bitstream running cross-correlator / convolver. Master's thesis, 2009.
- [8] Bonnie Baker. How delta-sigma adcs work, part 1. 2011.
- [9] O. E. Liseth, H. A. Hjortland, and T. S. "Bassen" Lande. Power efficient cross-correlation beat detection in electrocardiogram analysis using bitstreams. In *2009 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference*, pages 237–240, Nov 2009.
- [10] F. Maloberti and P. O'Leary. Processing of signals in their oversampled delta-sigma domain. In *Circuits and Systems, 1991. Conference Proceedings, China., 1991 International Conference on*, pages 438–441 vol.1, Jun 1991.
- [11] Emilia Gómez Gutiérrez. Introducción al filtrado digital.
- [12] Albertus C den Brinker. Calculation of the local cross-correlation function on the basis of the laguerre transform. *IEEE transactions on signal processing*, 41(5):1980–1982, 1993.

-
- [13] P REYES, P REVIRIEGO, O RUANO, and J MAESTRO. Efficient structures for the implementation of moving average filters in the presence of seus using system knowledge. In *the 2006 Radiation Effects on Components and Systems Workshop*, 2006.
 - [14] Yang-Sae Moon and Jinho Kim. Efficient moving average transform-based subsequence matching algorithms in time-series databases. *Information Sciences*, 177(23):5415–5431, 2007.
 - [15] University of Waterloo. Moving average examples, 2016.
 - [16] Kehuang Li, Zhen Huang, You-Chi Cheng, and Chin-Hui Lee. A maximal figure-of-merit learning approach to maximizing mean average precision with deep neural network based classifiers. In *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 4503–4507. IEEE, 2014.
 - [17] A. Chacon-Rodriguez. *Circuitos integrados de bajo consumo para detección y localización de disparos de armas de fuego*. PhD thesis, 2009.