



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Estudio y caracterización de algoritmos de
procesado adaptativo para sensores acústicos
distribuidos del tipo HDAS.

Study and characterization of adaptive processing
algorithms for distributed acoustic sensors of
HDAS type.

Autor

Álvaro Macipe Enguita

Director

Alfonso Ortega Giménez

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2020

Estudio y caracterización de algoritmos de procesamiento adaptativo para sensores acústicos distribuidos del tipo HDAS.

RESUMEN

Los sistemas de vigilancia y control se vienen haciendo con el uso de cámaras o radares y, si queremos mantener este control en zona grandes y abiertas es complicado y costoso. Por lo tanto, se propone el desarrollo de una alternativa basándose en el sensado acústico distribuido por medio de la fibra óptica. Así, podríamos mantener todo el entorno que queremos controlado.

La señal que obtenemos a partir de este sensado no es apta para detectar los eventos, así que, se tiene que procesar esta información para que nos sea útil. Para ello se desarrolla un sistema que nos permite adecuar estos datos a una señal útil y así poder detectar los eventos. La idea del detector es observar un cambio en la señal recibida, basándose en la energía y la frecuencia, lo que podría indicar que está sucediendo un evento. Desarrollado el sistema se evalúa para ver sus prestaciones y se compara con una técnica anterior.

Como conclusión, el sistema propuesto consigue una detección muy buena, sin una elevada falsa alarma. Está pensado para su implementación en un sistema real dado su baja latencia y el bajo coste computacional que conlleva.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quería agradecer al programa Mobility City por la concesión de la beca de apoyo a este trabajo de fin de grado.

También agradecer a Alfonso Ortega por plantearme este proyecto, por toda la ayuda otorgada para su resolución y por el trato cercano conmigo.

Por último, gracias a mi familia, sobre todo a mi madre por confiar siempre en mí. A Pilar y su familia, de la que he ido aprendiendo día a día, a Adrián, mi fiel compañero desde el principio y los otros tres que separaron sus caminos, a Ana y Jaime por llegar a ser tan pesados que me hacen mejorar y a mis demás compañeros. También se merecen una mención mis amigos, por despejarme la mente cuando lo necesitaba.

Tabla de contenidos

Capítulo 1	1
Introducción	1
1.1. Motivación del proyecto	1
1.2. Marco del proyecto	1
1.3. Objetivos	2
1.4. Metodología y herramientas de trabajo	2
1.5. Organización de la memoria	3
Capítulo 2	4
Sistema completo de detección de eventos y su evaluación	4
2.1. Introducción	4
2.2. Obtención de la señal	4
2.3. Detector de eventos	5
2.3.1. Métodos para la supresión de la línea de base	5
2.3.1.1. Filtro paso bajo	5
2.3.1.2. Media y mediana móvil	5
2.3.1.3. Splines cúbicos (PCHIP)	6
2.3.1.4. Transformada de onda discreta (DWT)	6
2.4. Sistema detector	6
2.4.1. <i>Short-Term Energy</i>	7
2.4.2. Detección de cruce por cero	9
2.5. Sistema decisor	9
2.6. Calidad de las medidas	12
2.7. Sistema detector anterior con la tecnología HECTOR	13
2.8. Evaluación objetiva del sistema	14
2.8.1. Métricas	14
Capítulo 3	16
Etapa experimental	16
3.1. Base de datos	16
3.2. Calidad de las medidas	18
3.3. Fase experimental	20
3.3.1. Línea de base	20
3.3.2. Detectores de eventos	23
3.4. Evaluación de los resultados	24
3.4.1. Número de filtros en el banco de filtros	25
3.4.2. Ventana	25

3.4.3. Variable actualización espectro de ruido (α)	26
3.4.4. HDAS vs HECTOR	26
Capítulo 4	30
Conclusiones y líneas futuras	30
4.1. Conclusiones	30
4.2. Líneas futuras	30
Bibliografía	32

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación del proyecto

En la actualidad hay numerosas maneras de controlar la seguridad tanto de espacios abiertos como de espacios cerrados. No obstante, se necesitan muchos recursos, ya sean sensores o cámaras y sin olvidarnos de la alimentación necesaria. Si las zonas a controlar son muy grandes la inversión también lo será. También la manera en la que nos desplazamos está cambiando, como consecuencia, el modo de controlar el tráfico también podría hacerlo.

En España hay un elevado número de kilómetros de fibra óptica que no son usados, por lo tanto, son recursos perdidos. La fibra óptica, aparte de ser el medio de transmisión más usado por las telecomunicaciones, tiene otras aplicaciones como puede ser el sensado acústico distribuido. La tecnología DAS (*Distributed Acoustic Sensor*) está basada en la reflectometría óptica de dominio temporal sensible a la fase (Φ -OTDR, en inglés *Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry*) que permite que se detecten señales de frecuencia subsónica a través de grandes distancias. Actúan como miles de micrófonos capturando vibraciones pero con un menor coste computacional.

Las aplicaciones para el sensado acústico distribuido pueden ser desde la monitorización de tráfico [1], la detección de intrusiones en áreas [2], la monitorización del suelo submarino [3], el estudio de la actividad sísmica [4], vigilancia, aplicaciones de seguridad [5] y supervisiones de tuberías [6].

Durante el desarrollo de este trabajo de fin de grado, se irá viendo la evolución de estas señales tras el procesado y cuál es el grado de calidad de esta técnica con el sistema propuesto.

1.2. Marco del proyecto

El trabajo realizado es posible gracias a la colaboración con la empresa APL (*Aragon Photonics Labs*) [7]. La labor de esta empresa está orientada a la investigación, desarrollo y producción de sistemas electrónicos y aplicaciones de medida relacionadas con la fotónica.

Este trabajo viene posterior al desarrollo del sistema de medida de una tecnología anterior, llamada HECTOR. Se trata también un detector de estímulos basado en sensado acústico distribuido, pero con una reflectometría óptica distinta, lo que cambiará la manera de analizar los datos.

Por otra parte, con este trabajo se pretende controlar y prevenir posibles intrusiones a infraestructuras de grandes dimensiones. Así que la toma de medidas para este proyecto está centrada en entornos monitorizados, áreas en las que los eventos que suceden y se quieren detectar están controlados, en la medida de lo posible, ya que al ser una zona al aire libre no se puede tener un control absoluto de todo lo que está pasando. La fibra óptica se encuentra enterrada alrededor de estos lugares, con lo que se puede detectar la localización de los eventos en función de la distancia de la fibra en la que aparezcan.

Las medidas tomadas tratan de una serie de estímulos que bien pueden simular una amenaza real para nuestras instalaciones.

1.3. Objetivos

El objetivo del presente trabajo de fin de grado es analizar las prestaciones en el ámbito de la detección de eventos medidos a través de sensores acústicos distribuidos del tipo HDAS, gracias a la aplicación de técnicas de procesado digital de señal. Con esto, podríamos llegar al objetivo final que es la detección de eventos en entornos monitorizados.

Para lograr este propósito, el trabajo se divide en varios subobjetivos:

- **Sistema de detección robusto.** Estudio y desarrollo de varias técnicas para detectar los eventos en las señales HDAS. Debe ser robusto dado que tenemos que maximizar la detección, pero no obtener apenas falsas alarmas; dado que nadie creería en el sistema si le engaña la mayoría de las veces. También hay que tener muy en cuenta que es un sistema para implantar a tiempo real, por lo que se valora la latencia de los procesados y su bajo coste computacional.
- **Evaluación de los resultados objetiva.** Necesitamos una manera de caracterizar el sistema y poder alcanzar los mejores resultados posibles. Por eso es necesario diseñar un método eficiente para la evaluación de la detección de eventos con la que tener un resultado objetivo tanto de detección como de falsa alarma.
- **Comparación HDAS y HECTOR.** Por último, se expondrán los resultados de ambas tecnologías disponibles desarrolladas hasta la fecha.

1.4. Metodología y herramientas de trabajo

Este trabajo se ha realizado en Matlab y ha seguido la siguiente metodología:

- **Estudio de la tecnología anterior.** Puesta en marcha con la tecnología HECTOR, basada en la reflectometría óptica coherente en el dominio temporal (C-OTDR). Toma de contacto con el sensado acústico distribuido y valoración de las opciones disponibles.
- **Procesado de señal archivos nuevos.** Primer contacto con los archivos nuevos, modo de lectura de propiedades y los datos.
- **Análisis visual de los resultados.** Observación de manera subjetiva de la salida de los resultados del procesado de las señales. Qué tipo de eventos se detectan mejor que otros.
- **Comparación de las técnicas de detección.** Evaluación y elección del uso de las técnicas desarrolladas para la detección de eventos automática.
- **Etiquetado puntos de detección.** Se etiqueta la base de datos con los eventos detectados en cada uno de ellos, tanto de manera subjetiva (visual), como de manera objetiva (sistema detector automático).
- **Sistema evaluador.** Se utiliza un sistema evaluador ya creado para comparar las señales obtenidas con el etiquetado anteriormente citado. Así se podrá realizar un análisis objetivo de la técnica empleada, el tipo de evento o el ajuste de algunos parámetros como el umbral o el tamaño de la ventana de datos.
- **Comparación.** Por último, se comparan los mejores resultados obtenidos con las dos tecnologías de las que se poseen datos.

1.5. Organización de la memoria

Una vez vista la introducción del trabajo y los objetivos que se quieren lograr, vamos a pasar a enumerar las partes en las que se descompone esta memoria:

- **Capítulo 2. Sistema completo de detección de eventos y su evaluación.**
Se van a presentar de manera teórica los conceptos de las técnicas utilizadas, desde el preprocesado de las señales hasta la decisión y su posterior evaluación.
- **Capítulo 3. Etapa experimental**
Análisis de los archivos disponibles en la base de datos tanto calidad de medida como el estudio de los resultados que obtenemos en la parte evaluativa. Podremos valorar el sistema propuesto y compararlo con la tecnología HECTOR.
- **Capítulo 4. Conclusiones y líneas futuras**
Extracción de conclusiones en base a los resultados obtenidos teniendo en cuenta los objetivos iniciales. Se plantearán posibles líneas futuras en las que este proyecto podría evolucionar.

Capítulo 2

Sistema completo de detección de eventos y su evaluación

En este capítulo se van a desarrollar los conceptos teóricos de las técnicas empleadas en la consecución del proyecto.

2.1. Introducción

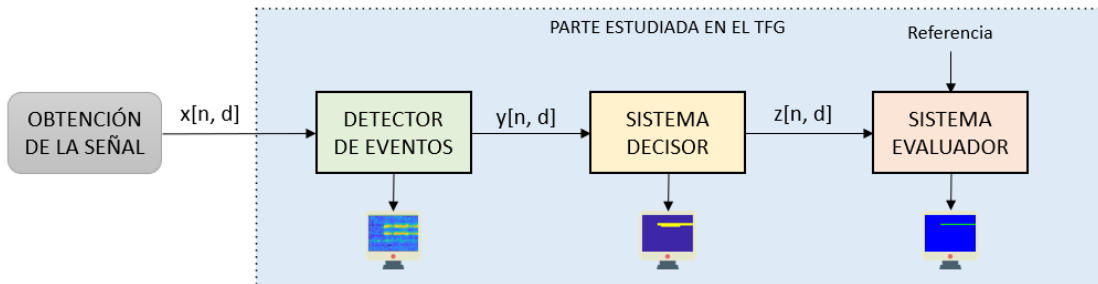


Figura 1. Esquema general del sistema completo de detección de eventos y su evaluación.

En la Figura 1 se muestra un esquema del sistema completo. La señal de entrada $x[n, d]$ es obtenida gracias al sensado acústico de la fibra óptica. Se realiza una serie de comprobaciones haciendo uso de la reflectometría óptica en el dominio temporal sensible a la fase. La variable n hace referencia a las muestras temporales y la variable d a las espaciales. La señal $y[n, d]$ ha sido procesada, eliminando una línea de base sobre la que se situaba y se es capaz de detectar los eventos que suceden. Por último, $z[n, d]$ es la señal usada para evaluar el sistema. También es la señal que nos da la información en binario de si existe evento o no.

Todos estos bloques se van a explicar de manera exhaustiva en los siguientes apartados.

2.2. Obtención de la señal

Los sensores distribuidos de fibra óptica se basan en procesos de dispersión que ocurren a lo largo de la fibra, pudiendo ser Rayleigh, Brillouin o Raman. La diferencia entre ellos se expresa posteriormente en el modo de uso: los sensores basados en Raman son sensores de temperatura muy efectivos, los basados en Brillouin tienen la capacidad de dar una buena resolución en distancias grandes, mientras que las basadas en Rayleigh miden variaciones en las frecuencias acústicas.

Durante la última década se han realizado grandes avances en el estado del arte de los diferentes tipos de sensores de fibra óptica distribuidos. [8] [9] [10]

La tecnología utilizada para el desarrollo de este TFG está basada en la reflectometría óptica en el dominio temporal sensible a la fase (Φ OTDR) que usa una detección directa utilizando un tren de pulsos ópticos.

Un pequeño resumen del funcionamiento del Φ OTDR sería:

- I. Un pulso óptico se propaga a lo largo de la fibra y la potencia se dispersa.

- II. La traza óptica de la interferencia de la luz retrodispersada se verá variada si se produce una perturbación sobre la fibra que altera la distancia del camino óptico.
- III. Se comparan los pulsos y, si ha habido una perturbación, se encontrará un retraso temporal en la ventana de ese pulso proporcional a esta.

Esta técnica se basa en el desplazamiento temporal y la ambigüedad de los datos que se comparan. La explicación se encuentra más desarrollada y completa en [11].

Aparte de ser la parte física del proceso, también forma conjunto con el preprocesado necesario para obtener unos datos que tengan las características adecuadas para poder procesarlos.

2.3. Detector de eventos

La señal que se adquiere en el proceso anterior contiene las perturbaciones detectadas en sus datos, pero es necesario un procesado posterior para poder detectar algún estímulo de interés.

El primer paso que hay que dar es la reducción de ruido de las muestras que vienen dadas por el láser del sensor distribuido en la fibra óptica. No ha sido un apartado estudiado en este TFG.

El segundo paso es la corrección de la línea de base que aparece sobre los datos y hace complicado poder detectar los eventos. Esta línea de base [12] o *baseline wander* como se conoce en el ámbito del procesamiento de ECG (Electrocardiograma) aparece debido a la manera en la que se han obtenido los datos, por lo que una solución pasa por eliminarla.

Se han planteado varios métodos para minimizar o estimar la línea de base y posteriormente eliminarla de los datos. Después de este procesado, tendremos una señal que se podrá tratar como una señal de voz.

2.3.1. Métodos para la supresión de la línea de base

Para eliminar esta clase de ruido, que aparece en todos los tipos de eventos grabados, se han desarrollado diferentes técnicas [13]. Con fin de determinar la más adecuada, en el presente trabajo se ha realizado un estudio comparativo de cuatro de ellas. A continuación, se hará una breve explicación de las cuatro técnicas empleadas y en el siguiente capítulo se presentará el estudio comparativo de las mismas.

2.3.1.1. Filtro paso bajo

La idea del primer método es el filtrado de las variaciones de la señal que se encuentran en las frecuencias altas. El filtro utilizado ha sido de respuesta infinita al impulso (IIR) y de tipo Butterworth para no alterar la información en la banda de paso.

Para controlar el proceso de selección de la frecuencia de corte se ha trabajado en el dominio transformado de la frecuencia.

2.3.1.2. Media y mediana móvil

Este método trata de eliminar la línea de base restando un valor a una ventana de datos. El valor utilizado es calculado con la media y la mediana [14] a partir de esa ventana de datos.

La eficacia de este método variará con el número de muestras eventanadas y será dependiente de que no existan cambios abruptos entre estos, dado que entonces habrá grandes errores.

2.3.1.3. Splines cúbicos (PCHIP)

El cálculo de splines cúbicos (en concreto PCHIP, en inglés *Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial*) es una interpolación de Hermite cúbica por partes que preserva la forma. [15]

Es diferente de los demás métodos de spline cúbicos en el sentido de que busca hacer coincidir solo las derivadas de primer orden en los puntos de datos con las de los intervalos anterior y posterior. Es una característica de la interpolación de Hermite.

Su mínimo coincide con el mínimo de los datos y además es monótono en intervalos donde los datos son monótonos, por lo que cuando no tengamos ningún movimiento en la señal será capaz de reproducirlo de una forma óptima. Es un método que no suele presentar ni picos ni valles, por lo que los cambios de la estimación serán suaves.

Las curvas PCHIP se calculan con MATLAB® utilizando funciones integradas.

2.3.1.4. Transformada de onda discreta (DWT)

La transformada de onda discreta [16] (DWT, *Discrete Wavelet Transform*) se basa en la idea de que el ruido de la señal (la línea de base para nosotros) se encuentra principalmente en los coeficientes finos de la escala, de tal forma que se eliminarán los coeficientes con una escala más fina que un cierto umbral.

El procedimiento para la estimación de la línea de base requiere tres etapas. La primera, el cálculo de la transformada de la señal y número de niveles de descomposición. Seguidamente se procede a aplicar un umbral y a calcular los coeficientes que van a estimar la línea de base. Por último, el cálculo de la transformada inversa para recuperar la señal a partir de los coeficientes modificados.

El cálculo de la transformada de Wavelet se realizada en MATLAB® utilizando funciones integradas.

El estudio comparativo de estas técnicas y la posterior elección del método que se utiliza se realiza en 3.3.1. Línea de base. Se tendrá en cuenta tanto la calidad de la señal de salida como el tiempo necesario para calcularla.

2.4. Sistema detector

En este punto buscamos detectar los eventos en la fibra óptica para posteriormente ser capaces de decidir con una salida binaria si existe evento o no.

Existen diferentes métodos capaces de determinar el comienzo y el final de un evento, como son el cálculo de energía a corto plazo o *short-term energy* y la detección de cruce por cero o *zero-crossing rate* [17]. Estas características temporales pueden ser extraídas simplemente a partir de los valores de las muestras sin la necesidad de transformar en el dominio de la frecuencia.

Sin embargo, hay otros métodos que sí hacen uso del dominio frecuencial para categorizar la actividad en un intervalo de tiempo. En este apartado vamos a desarrollar unas posibles

técnicas para la detección de eventos grabados con la tecnología HDAS exponiendo sus conceptos teóricos.

Los siguientes métodos van a partir de la señal obtenida después del procesado de eliminación de la línea de base.

2.4.1. *Short-Term Energy*

El cálculo de la energía a corto plazo es el método principal y más natural que se ha venido utilizando para aplicaciones de esta índole.

Podemos obtener la energía de la señal y así visualizar en qué momento y lugar se ha dado un estímulo. La señal se divide en ventanas, y para ser más precisos en la medida de la energía se ha optado por un pequeño solape de la ventana anterior y de la posterior. Lo que logramos gracias a esto es tener certeza de lo que está ocurriendo antes y después del segmento de señal a analizar. Utilizar muestras futuras no tendría mucho sentido si queremos realizar un sistema de detección realizable, es decir, causal. Por lo tanto, el sistema se adapta de tal manera que esperamos a obtener todos los datos que se van a enventanar, hasta las futuras (que ya no serían futuras si no presentes) para realizar ese solape final. Así nos podremos adaptar y evolucionar de manera más suave a los cambios.

La ventana utilizada en este caso es la ventana *Hamming* [18]. Tiene un lóbulo central ancho y la energía en los laterales es prácticamente nula, lo que minimiza la dispersión espectral que podemos obtener al enventanar la señal.

El solape anteriormente descrito crea una latencia asumible, por lo que se podría permitir su uso en un sistema real. Posteriormente se calcula la energía de esa ventana y por último se utiliza la función logarítmica para darle un mayor margen a la medida.

En la Figura 2 podemos ver el diagrama de bloques con los pasos que se han seguido para el cálculo de la energía a corto plazo.

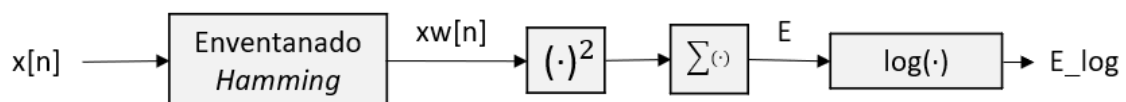


Figura 2. Diagrama de bloques para el cálculo de la energía a corto plazo.

Si en lugar de interesarnos la energía, pensamos que la potencia nos puede dar información más valiosa, solamente tendremos que promediar la energía estimada por el número de muestras de la ventana.

A continuación, se representa la energía calculada del mismo archivo pero en distancias distintas.

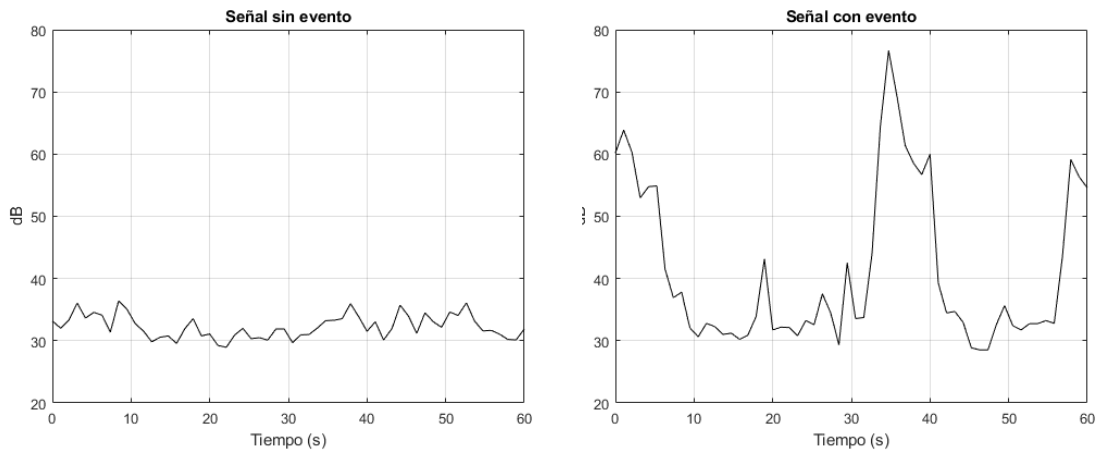


Figura 3. A la izquierda, la energía de la señal calculada para una distancia sin evento. A la derecha, la energía calculada para la misma señal pero en una distancia donde existen eventos.

Como podemos ver en la anterior figura, la energía aumenta cuando existe un evento. Se podría plantear un detector de actividad basado en el nivel de energía obtenido, pero varía en demasía en función del evento, por lo que no sería un decisor realmente fiable.

Eso no quiere decir que este cálculo no nos vaya a servir de ayuda, ya que podemos ver la información real en cada momento. Nos servirá de ayuda para crear una referencia de los eventos y compararla con la información de la base de datos.

A continuación, se representa la energía de los eventos para todas las distancias estudiadas en un margen temporal de un minuto.

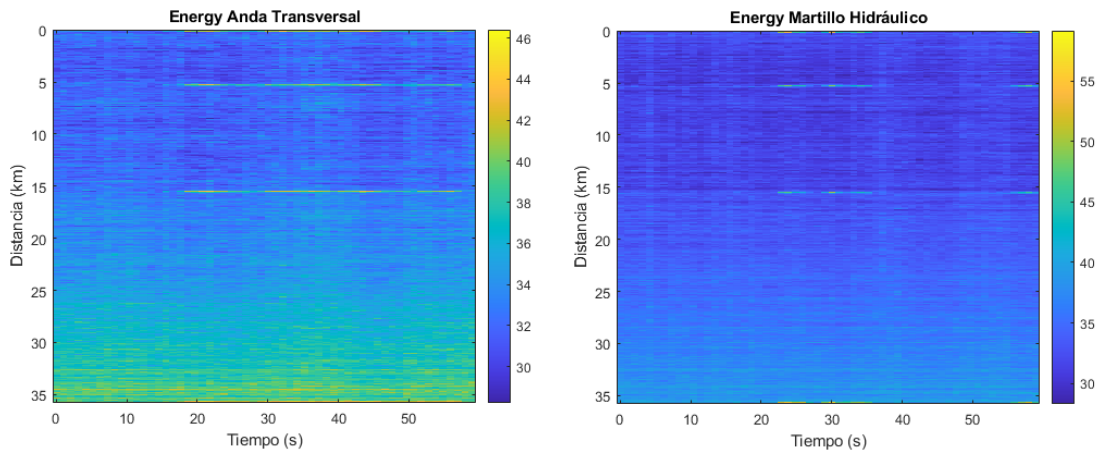


Figura 4. A la izquierda, el mapa de energía para una excavadora andando con problemas de detección en las últimas distancias. A la derecha, el mapa de energía para el martillo hidráulico con una obtención de señal más clara para todas las distancias.

Vamos obteniendo más energía a medida que nos alejamos en distancia, aunque no es lo que esperaríamos. En la Figura 4 se ve claramente como el evento de la excavadora andando aumenta la energía en las últimas distancias, aunque en el evento del martillo también se ven atisbos de este suceso. Tiene una explicación y es debido a la calidad de la obtención de los datos en los puntos más alejados de la medida. Como se ha explicado en el punto 2.2. Obtención de la señal, la potencia del pulso óptico se dispersa a lo largo de la fibra obteniendo menos y menos potencia a medida que nos distanciamos del generador de los pulsos. Por eso, la ambigüedad de los datos en estos puntos varía mucho dependiendo del

ruido ambiente o interferencia que nos podremos encontrar dado que la señal a ruido en estos casos será menor.

Este problema ocurre en todos los casos, en unos eventos es más grave que en otros, y se comprobará en el siguiente capítulo cuánto puede afectar a nuestro sistema.

2.4.2. Detección de cruce por cero

El número de cruces por cero es también una característica temporal útil en estos casos. Podemos detectar la velocidad a la que se producen los cruces por cero, y así poder estimar la frecuencia de los datos que estamos procesando.

Al haber pasado antes por un preprocesado de la supresión de línea de base, se ha podido modificar bastantes valores de cruce por cero, por lo que puede ser una medida de detección errónea en algunos casos.

2.5. Sistema decisor

Para la detección automática de eventos en la fibra óptica, es necesario separar los segmentos en los que sucede evento de los que no. La salida de este módulo será binaria en función de si hay eventos o no.

Una vez eliminada la línea de base de los datos, obtenemos una señal audible, por lo que se diseña un detector de actividad basado en los conceptos de VAD (*Voice Activity Detection*) [19] [20].

El rendimiento del sistema decisor basado en la energía se vería degradado en entornos con un ruido ambiente elevado. Para resolver este problema, se propone el parámetro de entropía de energía de banda parcial bidimensional (TD-PBEE, *two-dimensional part-band energy entropy*) [21] basado en dos variables: una será el número de la partición de bandas sobre el índice de la frecuencia y otra el tamaño de la ventana a largo plazo sobre el índice de la distancia. Debido a las características de señal no estacionaria de los eventos, se usará esta información a largo plazo para refinar el cálculo de las variables que estimen si ha habido evento o no.

Se evaluará el sistema variando la información a largo plazo que utilizamos y dependiendo de la relación señal a ruido (SNR) que dispongamos en cada evento.

El principio de funcionamiento del sistema está representado en el diagrama de flujo de la Figura 7. El primer paso es inventanar la señal para realizar un análisis más localizado. Se utiliza una ventana de tipo *Hamming* y para mantener la continuidad de la información de la señal, se realiza el inventanado con bloques de muestras solapados entre sí, de tal manera que no se pierde información en la transición entre ventanas.

En segundo lugar, se aplica una Transformada discreta de Fourier (DFT) para obtener el espectro de cada trama, como vemos en la ecuación 2.1. Luego, el espectro se multiplica por los factores comunes de ponderación del banco de filtros y se calcula la energía de cada banda de frecuencia. Todos los cálculos que se detallan a continuación se realizan para cada distancia.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{NFFT-1} x[n]e^{-j2\pi nk} , 0 \leq k < NFFT \quad (2.1)$$

A partir de este momento se descarta la fase y se trabaja con el módulo de la señal de los datos que poseen los posibles eventos $|X[k]|$.

La señal $|X[k]|$ se procesa por un banco de filtros de F filtros triangulares y de área unidad. Podemos decir que se ha dividido en dos bandas parciales. Las primeras ocho en las frecuencias más bajas, donde es posible que se encuentre un evento, y las cuatro siguientes donde lo más probable es que la señal perteneciente a esas bandas sea ruido sin evento.

Un ejemplo del banco de filtros utilizado se puede ver en la siguiente figura:

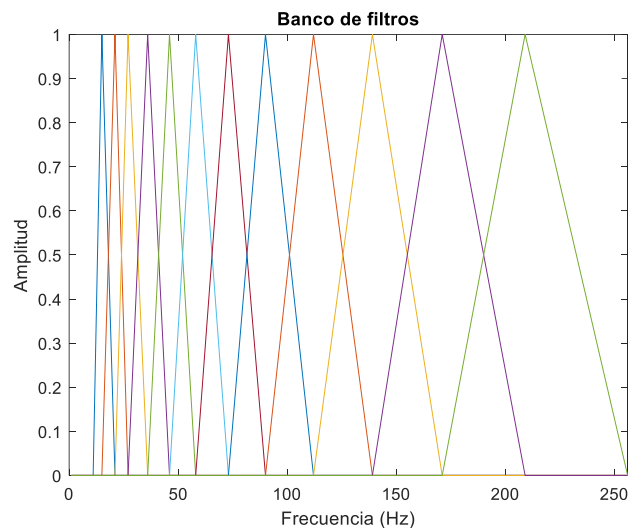


Figura 5. Banco de filtros usado en el sistema detector.

Una de las ventajas de trabajar con el banco de filtros es la reducción de las muestras con las que trabajamos a posteriori, pues serán el número de filtros en lugar de las NFFT muestras que habíamos calculado anteriormente. El banco de filtros está formado por 12 filtros y el ancho de banda de cada uno de ellos viene determinado por conceptos basados en la escala Mel, una escala musical perceptual de tonos.

Una vez que el módulo del espectro de la señal ha sido multiplicado por el banco de filtros, se calcula la energía correspondiente en cada uno de los filtros.

$$B_m = \sum_{k=0}^{NFFT-1} |X[k]|^2 BF_m[k] , 1 \leq m \leq F \quad (2.2)$$

donde BF es el banco de filtros anteriormente descrito y F el número de filtros que lo componen.

En las siguientes figuras podemos ver una comparativa de dos señales en el mismo periodo espacial, pero distinto temporal. Observamos cómo varía la energía de la señal con respecto a la frecuencia (frecuencia representada con el número del filtro).

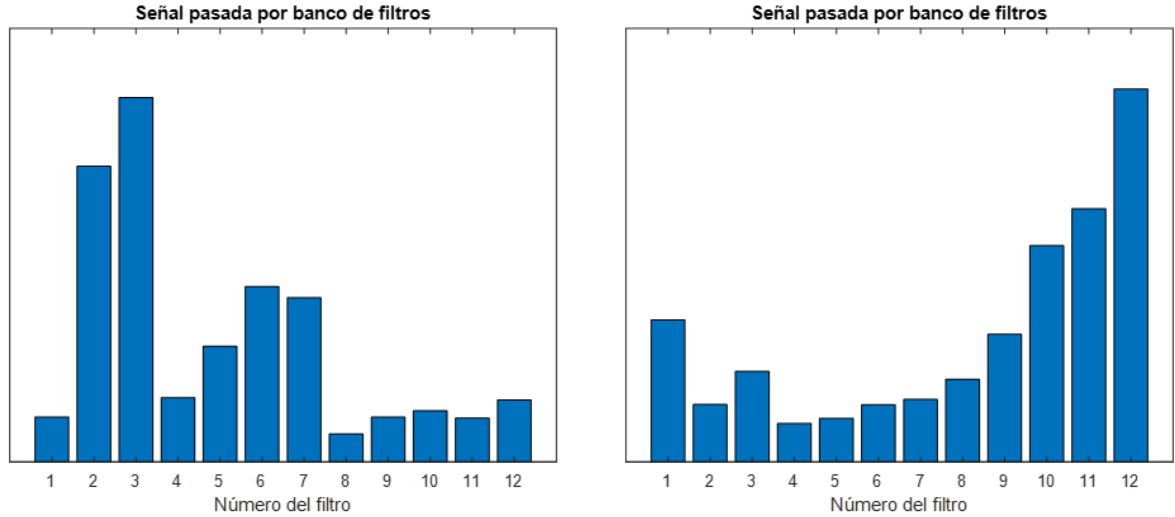


Figura 6. A la izquierda se está representando una señal procesada por el banco de filtros con un estímulo presente y a su derecha una señal procesada por el banco de filtros en reposo (sin estímulos)

Como podemos ver en las figuras anteriores, donde se representa la energía de la señal normalizada, ante la presencia de un estímulo en ese instante temporal se traslada la información a las frecuencias bajas, mientras que en reposo se mantiene en las más altas.

Una vez calculada la señal procesada por el banco de filtros, podemos pasar a estudiar los cambios espectrales de los datos actuales utilizando la envolvente de espectro a largo plazo (LTSE, *N-order Long Term Spectral Envelope*) como:

$$LTSE(k, l) = \max \{ (B(k, l + j)) \}_{j=-N}^{j=+N} \quad (2.3)$$

donde l es la ventana de datos actual y k es la banda espectral. Obtenemos un término de LTSE para cada uno de los filtros del banco.

La decisión final de la existencia de un evento viene formulada por el cálculo de la divergencia espectral a largo plazo (LTSD, *Long-Term Spectral Divergence*)

Para ello necesitamos estimar el ruido ambiente posible mientras no ha habido evento en los instantes pasados.

$$R(k, l) = \alpha R(k - 1, l) + (1 - \alpha) \cdot \min (B(k, l), R_{est}(k, l)) \quad (2.4)$$

donde R_{est} es la media de la salida del cálculo de B y se va actualizando a medida que se obtienen resultados de la misma manera que R . Este cálculo depende de otra variable (α), la cual nos permite ajustar el modo de actualizar la estimación de ruido en el sistema.

Finalmente llegamos al término deseado:

$$LTSD(l) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{F} \sum_{k=0}^{F-1} \frac{LTSE(k, l)}{R(k, l)} \right) \quad (2.5)$$

Cada una de las distancias que son procesadas tiene un valor de LTSD, si es mayor que un determinado umbral, esa distancia será determinada como evento.

En conclusión, este sistema decisor depende del número de muestras con el que trabajemos, el número de filtros en el que está dividido el banco de filtros, la variable α que nos permite actualizar el valor del ruido actual y por último el umbral de decisión.

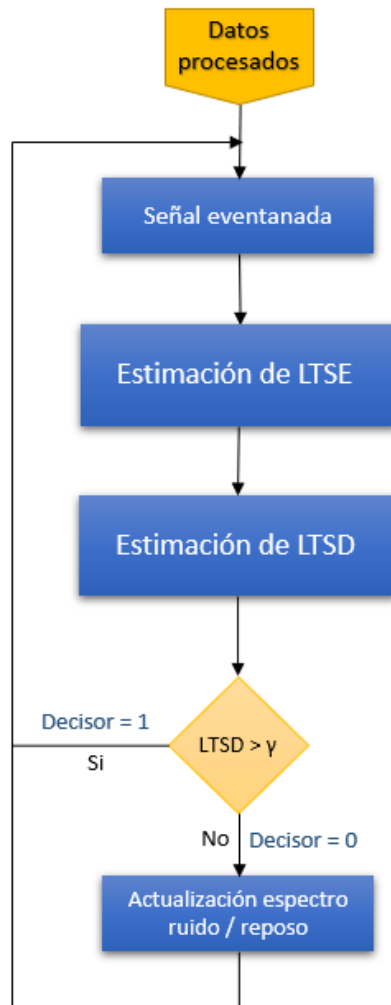


Figura 7. Diagrama de flujo del algoritmo decisor de eventos LTSD.

2.6. Calidad de las medidas

La relación señal a ruido (SNR, *Signal-to-noise ratio*) indica la proporción existente entre la potencia de señal que contiene un estímulo y la potencia de señal de un momento sin estímulo, es decir, el ruido que hay en el ambiente y detecta el sensor.

La fibra óptica está enterrada bajo tierra y, como se ha explicado antes, es sensible a las variaciones acústicas. Por lo tanto, se va a estudiar la calidad de estas medidas.

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{P_{Evento}}{P_{NoEvento}} \text{ (dB)} \quad (2.6)$$

Se evaluará para cada tipo de evento la SNR y así podremos estudiar la calidad de las medidas y poder caracterizar mejor los resultados que obtenemos tras en procesado.

2.7. Sistema detector anterior con la tecnología HECTOR

Esta tecnología puede parecer similar a la HDAS estudiada en el TFG, pero se diferencia en la técnica de obtención de la información, lo que cambia en completo el sistema detector. Es también un sensor acústico distribuido, pero utiliza una técnica basada en reflectometría óptica coherente en el dominio temporal o C-OTDR (*Coherent Optical Time Domain Reflectometer*).

Para poner en contexto antes de comparar las dos técnicas de las que se tienen datos disponibles se va a realizar una breve explicación del sistema realizado para esta técnica con las mejores prestaciones.

Esta tecnología fue estudiada en un TFM [22] de la Universidad de Zaragoza. Su sistema tiene el siguiente esquema:

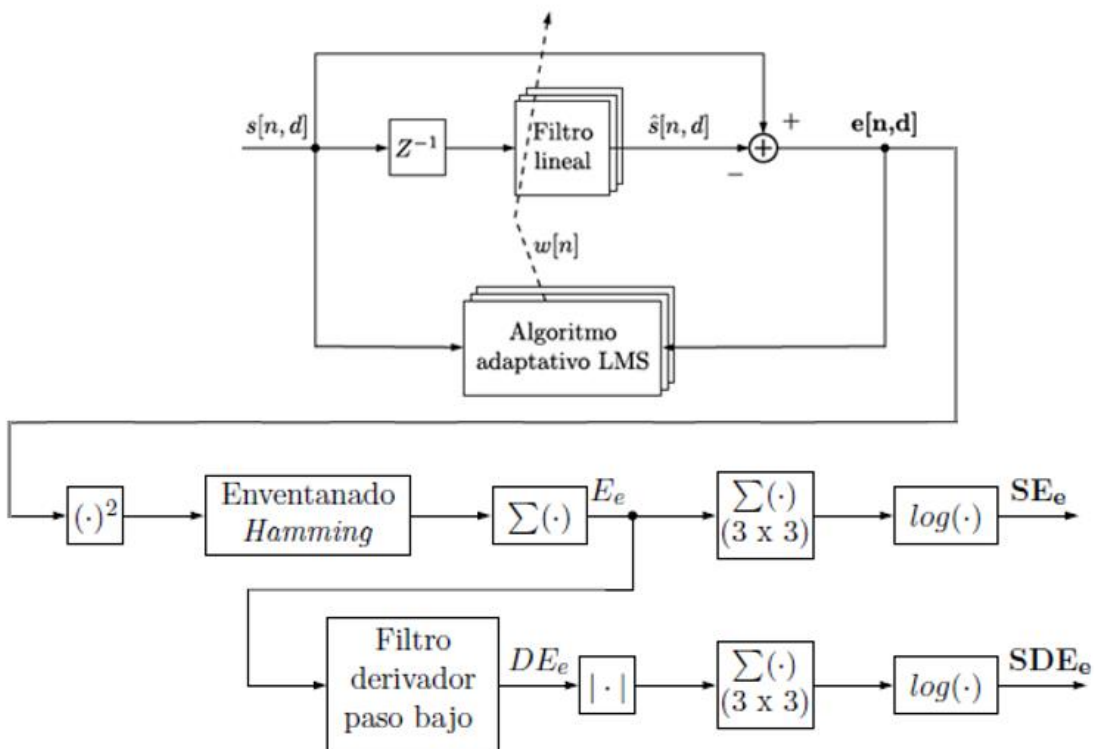


Figura 8. Diagrama del filtrado LMS adaptativo y obtención de la energía y derivada a partir del error de predicción (Fuente: Diego Álvarez Gutiérrez [22])

Se trata de un sistema predictor adaptativo haciendo uso del algoritmo LMS (*Least Mean Square*) que consiste en la obtención del valor esperado de la señal de error, viniendo definido por la diferencia entre la señal deseada y la salida del filtro lineal. Con esta diferencia se halla el error de predicción, cuya energía tiende a disminuir mientras el sistema está en reposo mientras que si se produce un cambio en la señal de entrada se produce un pico de aumento en la señal de error.

Posteriormente se enventana el cuadrado del error instantáneo usando una ventana *Hamming*. A partir de este punto se subdivide el proceso para obtener el suavizado de la energía y la derivada de esta energía suavizada.

2.8. Evaluación objetiva del sistema

Este punto va a permitir establecer el punto de operación del sistema a partir de la señal obtenida en el apartado anterior. Se obtienen unos valores de detección y de falsa alarma con los que podremos determinar las prestaciones del sistema.

La verificación de los resultados hallados se realiza mediante un proceso de comparación con los archivos de referencia, que comprobarán la salida del sistema detector dando lugar a unos resultados identificadores del funcionamiento del sistema.

La clave del sistema es crear un archivo con los eventos detectados, un fichero *.rttm* (*Real-Time Trade Marching*). En dicho archivo se van escribiendo los eventos a medida que son detectados. Este archivo será el fichero hipótesis.

Se compara la referencia, con unos márgenes de guarda tanto en la dimensión temporal (2 segundos) como en la espacial (20 metros), con la hipótesis. A partir de estos ficheros, se obtienen las prestaciones del sistema.

2.8.1. Métricas

Para poder obtener estos resultados, se definen cuatro conceptos que se explican a continuación [23] [24]:

- **Verdadero Positivo (VP)**. Puntos en los que se indica en la hipótesis que sucede un evento y realmente está sucediendo.
- **Falso Positivo (FP)**. Puntos en los que se indica en la hipótesis que sucede un evento y no ocurre nada realmente.
- **Verdadero Negativo (VN)**. Puntos en los que se indica en la hipótesis que no sucede nada y, en efecto, no ocurre nada.
- **Falso Negativo (FN)**. Puntos en los que se indica en la hipótesis que no sucede nada y sin embargo sucede un evento.

En la Figura 9 se muestra un ejemplo en el que se compara un archivo hipótesis con uno de referencia para explicar los conceptos anteriormente descritos.

Podemos observar como tanto en la hipótesis como en la referencia existe el primer suceso, por lo tanto es cierto y lo detectamos, sería Verdadero Positivo. Sin embargo, el suceso en la siguiente distancia no existe en la realidad pero sí en la hipótesis, por lo que sería un Falso Positivo. Para finalizar, en la última distancia no se detecta un suceso, así que se trata de un Falso Negativo. Lo demás sería Verdadero Negativo.

Con esta comparación entre el fichero hipótesis y el fichero referencia se pueden obtener los valores de falsa alarma, detección y pérdida de manera fácil y rápida.

La **probabilidad de falsa alarma** se calcula mediante los puntos que han quedado definidos como eventos detectados pero que no lo deberían de ser realmente (FP) y aquellos que se han detectado como no eventos de manera correcta (VN).

$$P_{FA} = \frac{FP}{FP + VN} \quad (2.7)$$

La **probabilidad de detección** se calcula mediante los puntos definidos como eventos detectados de manera correcta (VP) y los puntos que han sido etiquetados como no evento de manera errónea (FN).

$$P_D = \frac{VP}{VP + FN} \quad (2.8)$$

La **probabilidad de pérdida** es la contraria a la probabilidad de detección.

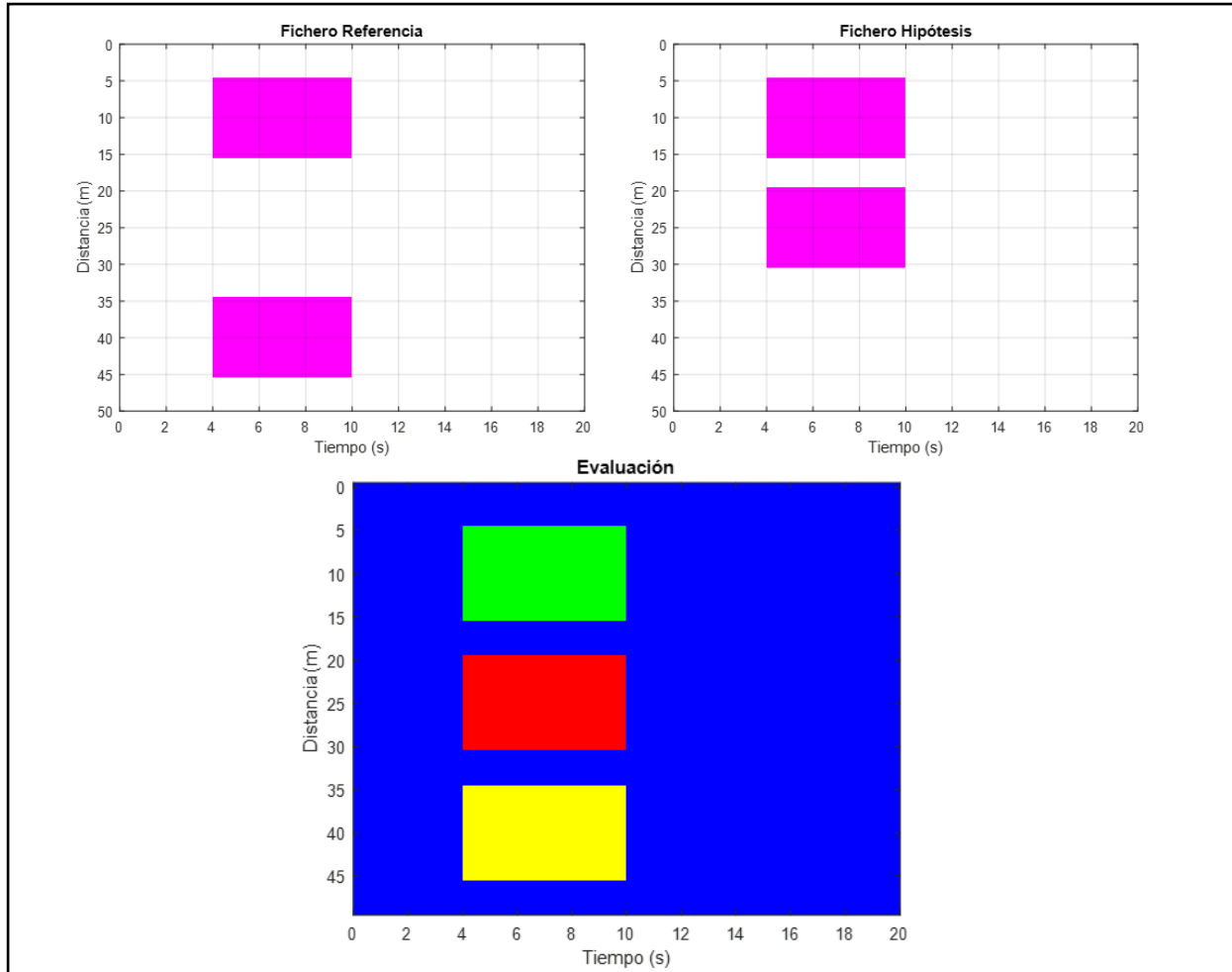


Figura 9. Ejemplo del resultado de las diferentes situaciones posibles tras comparativa del fichero hipótesis y referencia. A la izquierda el fichero referencia, a la derecha el fichero hipótesis y debajo el resultado tras la comparación.

Gracias a estas medidas de las prestaciones del sistema, se van a poder elaborar diferentes curvas ROC [25], *Receiver Operating Characteristic* o Característica Operativa del Receptor. Estas curvas son una herramienta muy empleada en teoría de detección de señales, como por ejemplo en la detección de la voz, en radares o para diagnósticos médicos. Una curva ROC consiste en la representación de la probabilidad de detección frente a la falsa alarma en función de una variable objeto de estudio.

El análisis de las curvas ROC proporcionan herramientas para seleccionar los modelos posiblemente óptimos y descartar modelos subóptimos. La ventaja de este tipo de representaciones es que nos ofrecen las prestaciones del sistema independientemente del umbral de decisión.

Capítulo 3

Etapa experimental

3.1. Base de datos

La base de datos empleada para evaluar el sistema se ha grabado con una excavadora oruga, en un terreno específico para realizarlas y alternando diferentes modos de uso de esta excavadora como veremos a continuación:

<i>Tipo de dato</i>	<i>Número de grabaciones</i>	<i>Segundos grabados (s)</i>
<i>Anda</i>	24	1440
<i>Cazo</i>	18	1080
<i>Compactadora</i>	7	420
<i>Martillo Hidráulico</i>	8	480

Tabla 1. Base de datos disponible y empleada para la evaluación del sistema.

Los datos de tipo HDAS se procesan a una frecuencia de muestreo de 500 Hz mientras que los de tipo HECTOR se procesan a 1 kHz.

El terreno donde se grabó podría tratarse como un laboratorio al aire libre y estuvo situado al lado del Edificio Betancourt al noreste del campus Río Ebro. Una breve explicación de los eventos sería:

- **Oruga anda.** La excavadora anda sobre la canalización de la fibra óptica. Se tratará de un estímulo débil.
- **Oruga cazo.** La excavadora utiliza una pala para cavar sobre la tierra. Se tienen dos estímulos, el momento de remover la tierra y el impacto de la tierra con el suelo.
- **Compactadora.** Impulso excitando el terreno.
- **Oruga martillo hidráulico.** Estímulo de alta intensidad sobre la tierra. Es intrusivo en el terreno, al igual que el evento del cazo.

Se pueden separar en más subgrupos, que es como se ha trabajado para su posterior caracterización. Tiene que ser sabido que hay eventos que se detectarán mejor que otros, dado que la fuerza ejercida en el suelo es mayor y, por lo tanto, el ruido acústico que es captado será mayor. Estas características las podremos ver en las representaciones de los archivos analizados.

<i>Tipo de dato</i>	<i>Subgrupo</i>	<i>Segundos grabados (s)</i>
<i>Anda</i>	Oruga 0m	360
	Oruga 5m	360
	Oruga 10m	360
	Oruga Transversal	360
<i>Cazo</i>	Cazo 0m	360
	Cazo 5m	360
	Cazo 10m	360

Cazo y compactadora	Cazo 5m + Compactadora 0m	420
Martillo Hidráulico	Iteración 1	240
	Iteración 2	240

Tabla 2. Base de datos desarrollada en subgrupos.

Los estudios se van a dividir en estos diez eventos y se sacará un valor de falsa alarma y detección para cada uno de ellos.

Además de estos eventos grabados, se añadieron dos más con la misma tecnología pero diferente metodología, variando la frecuencia de muestreo.

Evento	Frecuencia de muestreo	Promedio de muestras
Cazo	4 kHz	No
Cazo	1 kHz	Sí (4 AVG)

Tabla 3. Ficheros adicionales a la base de datos.

El promedio de muestras quiere significar que la frecuencia a la que vamos a leer los datos será proporcional a la frecuencia de muestreo y los datos promediados.

Además de los archivos grabados para desarrollar la detección de los eventos con la tecnología HDAS se realizó en paralelo la grabación de los archivos para HECTOR, la tecnología anterior. Podremos realizar un estudio comparativo entre ambos métodos, viendo que tecnología es la más adecuada por ahora.

La base de datos trae consigo un guion de las medidas. Cuando se realizaron apuntaron en cada evento el tipo de suceso y la duración de los sucesos que deberían ocurrir. Por lo tanto, es más fácil etiquetar todos estos tipos de eventos teniendo esta referencia.

Las medidas son experimentales y han sido tomadas para desarrollar el sistema de detección y evaluarlo. Para realizar la simulación real en infraestructuras de fibras en ductos, se colocaron secciones de doble conducto y mediante bucles de fibra se permite ensayar la situación de cable enterrado a distancia y profundidad configurable como se muestra en la siguiente figura.

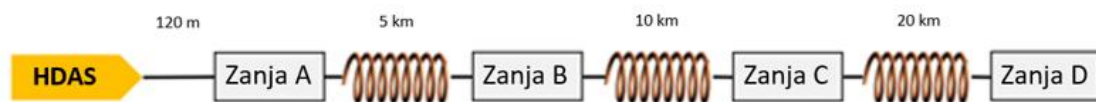


Figura 10. Disposición de la fibra óptica en el campo de pruebas.

Observamos que en el laboratorio habría cuatro zanjas. Estas sirven para caracterizar mejor el evento y así poder sacar conclusiones futuras con una plantilla de distancias en las que sucederá el mismo. No quita que también se puedan detectar eventos erróneos o falsas alarmas.

3.2. Calidad de las medidas

Un buen criterio para evaluar el sistema de medida utilizado puede ser, como se ha explicado en el capítulo anterior, la diferencia entre un momento con evento, y uno próximo sin él. Lo que se conoce como SNR.

Se ha realizado la medida para cada evento de la base de datos. A continuación, se muestran los datos recogidos en las medidas. Las letras A, B, C y D corresponden con la distancia donde se encuentra la zanja experimental.

Primer evento.

Oruga 0m	SNR
A	25.07 dB
B	22.60 dB
C	19.52 dB
D	11.40 dB

Segundo evento.

Oruga 5m	SNR
A	19.24 dB
B	17.88 dB
C	16.95 dB
D	12.45 dB

Tercer evento.

Oruga 10m	SNR
A	23.42 dB
B	17.90 dB
C	11.77 dB
D	10.88 dB

Cuarto evento.

Oruga Transversal	SNR
A	20.10 dB
B	18.45 dB
C	14.96 dB
D	13.23 dB

Quinto evento.

Cazo 0m	SNR
A	14.84 dB
B	13.80 dB
C	6.76 dB
D	4.25 dB

Sexto evento.

Cazo 5m	SNR
A	36.71 dB
B	28.56 dB
C	23.94 dB
D	18.43 dB

Séptimo evento.

Cazo 10m	SNR
A	8.66 dB
B	8.62 dB
C	4.30 dB
D	3.23 dB

Octavo evento

Compactadora	SNR
A	34.13 dB
B	29.29 dB
C	27.20 dB
D	20.17 dB

Noveno evento.

Martillo Hidráulico 1	SNR
A	38.43 dB
B	34.88 dB
C	32.11 dB
D	30.04 dB

Décimo evento.

Martillo Hidráulico 2	SNR
A	37.55 dB
B	34.32 dB
C	32.79 dB
D	28.82 dB

Undécimo evento.

Cazo 5m 4kHz	SNR
A	16.61 dB
B	14.73 dB

Duodécimo evento.

Cazo 5m 1kHz 4 AVG	SNR
A	28.44 dB
B	23.82 dB
C	23.64 dB
D	16.18 dB

Mediana

Media	SNR
A	24.25 dB
B	20.53 dB
C	18.24 dB
D	12.84 dB

Media

Mediana	SNR
A	25.62 dB
B	22.63 dB
C	19.03 dB
D	15.29 dB

Si nos centramos en los diez primeros eventos (se excluyen los dos últimos al ser medidas especiales), observamos que la SNR tiene una tendencia a la baja a medida que nos alejamos de la fuente de energía.

Podríamos decir que tenemos pérdidas a lo largo de la fibra óptica sensada, pero no es del todo cierto. Es normal por lo que se ha contado en el apartado anterior 2.2. Obtención de la señal y es debido a la técnica que se utiliza para obtener los datos. A medida que nos alejamos del sensor, la energía recibida disminuye, por lo que la ambigüedad de los datos variará en mayor medida que en las distancias más cercanas. Por lo tanto, las medidas en estas distancias son más susceptibles a obtener una detección errónea.

También reflejar que los valores máximos de las SNR medidas dependen de la **actividad** que crea el evento. El valor máximo proviene en la mayoría de los casos del martillo hidráulico o de la compactadora, que nada tiene que ver el movimiento de esta acción con la de cavar o andar con la oruga.

Podremos ver si el detector se comporta de manera correcta en los casos con menor relación señal a ruido, como por ejemplo el séptimo evento, que se trata de la oruga con el cazo a 10 metros y es el más crítico.

Fijándonos en los dos últimos eventos, observamos que el undécimo evento, al ser grabado a 4 kHz, su archivo tiene muchas más muestras, dado que se graban también 60 segundos,

pero a una frecuencia 8 veces mayor. Como podemos deducir, las muestras serán 8 veces las de los eventos normales, por lo que solo se han recogido las muestras de las dos primeras zanjas. Comparando su SNR con su alias, la SNR del Cazo 5m a 500 Hz, vemos que disminuye la calidad de las medidas en las dos primeras distancias.

Por último, el evento del cazo grabado a 1 kHz pero con promediado de muestras nos dará, en teoría, una menor resolución que el anterior método descrito. Sin embargo, la SNR es mayor que la del grabado a 4 kHz, pero sigue siendo menor que la grabada a 500 Hz.

3.3. Fase experimental

En este apartado se va a analizar el comportamiento de los sistemas descritos en el capítulo anterior. Empezará con el estudio de la eliminación de la línea de base de la señal y posteriormente se analizará el sistema de detección y decisión. Por último, se compararán los eventos de la base de datos para las tecnologías HECTOR y HDAS obteniendo unos resultados objetivos sobre las mismas.

Comencemos con el estudio y la decisión del mejor algoritmo elegido para suprimir la línea de base.

3.3.1. Línea de base

Para poder comparar los diferentes métodos explicados en el punto 2.3.1. Métodos para la supresión de la línea de base, se han realizado unos cálculos para todos ellos.

La **correlación cruzada** es una medida de similitud entre dos señales, utilizada frecuentemente para encontrar características relevantes en una señal desconocida por medio de la comparación con otra que sí se conoce. Podemos ver el cálculo de esta medida en la ecuación 3.1 donde x es la señal original y b es la línea de base estimada.

$$r_{xb}[m] = E\{x[n] \cdot b^*[n - m]\} \quad (3.1)$$

El **operador I**, basado en la distancia Euclídea entre dos señales nos da una medida de similitud. Como podemos ver en la ecuación 3.2, comparamos la señal de entrada con la línea de base. La diferencia de este valor con respecto a la correlación cruzada es la capacidad de detección de offset o escalado que pudiera tener alguna de las señales.

$$l_{operator}\{x[n], baseline[n]\} = 1 - \frac{E\{(x[n] - baseline[n])^2\}}{E\{x^2[n]\} + E\{baseline^2[n]\}} \quad (3.2)$$

El **tiempo de procesado o coste computacional**, para ser capaces de utilizar el modelo de manera online y no gastar demasiados recursos en un preprocesado de la señal. Es muy importante no tener un tiempo elevado de cómputo o el procesado no será útil.

A continuación, se van a representar unos ejemplos de cada uno de los métodos probados. El instante que se va a representar corresponde con un momento con evento.

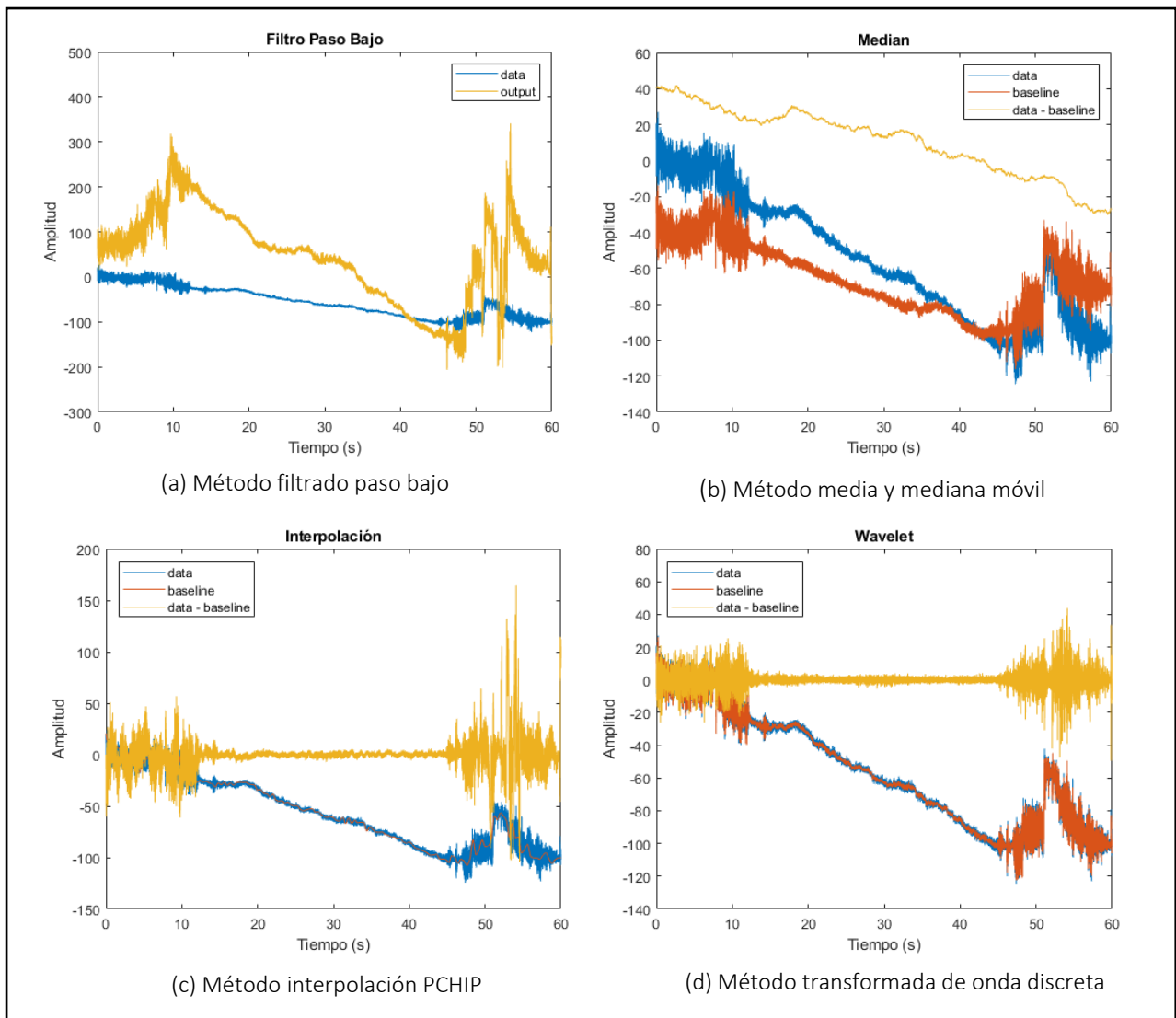


Figura 11. Comparación métodos estimación y eliminación de la línea de base.

De manera visual y para este evento observamos que tanto el método de filtrado paso bajo (a) como el uso de la media móvil (b) para eliminar la línea de base no nos dan un resultado que podamos dar por válido. El filtrado paso bajo nunca da la salida deseada, por lo que se van a comparar los métodos con los que estimamos una línea de base.

	Correlación	Operador I	Tiempo procesado*
Media y mediana	0,870 ± 0,071	1	5,61 segundos
DWT	0,998 ± 0,002	1	9,70 segundos
PCHIP	0,996 ± 0,006	1	5,25 segundos

Tabla 4. Resultados comparativa aproximación línea de base. *Medido en NVIDIA GeForce GTX 1650

Los resultados que vemos en la Tabla 4 se han calculado con tres distancias para todos los eventos de la base de datos, uno correspondiente a distancia con evento, otra próxima a ese evento y por último una distancia que no posee evento; sacando su mediana y la desviación de su media.

El tiempo de procesado es el tiempo de cálculo total de 60 segundos de señal en toda la dimensión espacial.

Se pueden sacar varias conclusiones con estos resultados, que están recogidos en la siguiente tabla:

<i>Técnica</i>	<i>Efectividad</i>
<i>Filtro paso bajo</i>	Filtrado poco selectivo.
<i>Media y mediana</i>	Enmascara detalles de la alta frecuencia de la señal y depende del momento en el que empiece a trabajar.
<i>DWT</i>	Buen método para estimar la línea de base, pero se necesita gran uso computacional.
<i>PCHIP</i>	Estimación de la línea de base correcta y en un tiempo eficiente.

Tabla 5. Evaluación de los resultados obtenidos para la supresión de la línea de base.

A la vista de las diferentes técnicas, se propone el cálculo de la estimación de la línea de base por el método de **splines cúbicos (PCHIP)**. Esto es debido a que, aunque el resultado en el estudio de la transformada de onda discreta de la correlación cruzada fuera ligeramente superior, el tiempo que nos ahorramos procesando los datos es más significativo.

Restando a la señal original la línea de base calculada obtenemos una señal con los eventos alineados con respecto al origen.

Para aplanar espectralmente la señal y hacerla menos susceptible a los efectos de precisión finita más adelante en el procesamiento de la señal, la señal se somete a un filtro de preénfasis de primer orden con un coeficiente de preénfasis 0,99.

La salida de este filtro es la señal que vamos a usar para detectar los eventos.

En la siguiente figura tenemos dos representaciones con un tipo de evento diferente y tres señales cada una. La azul se corresponde con los datos originales, la roja representa la estimación calculada de la línea de base y por último la anaranjada es la salida. Las representaciones a simple vista son muy distintas, pero al final el método para corregir el problema es el mismo.

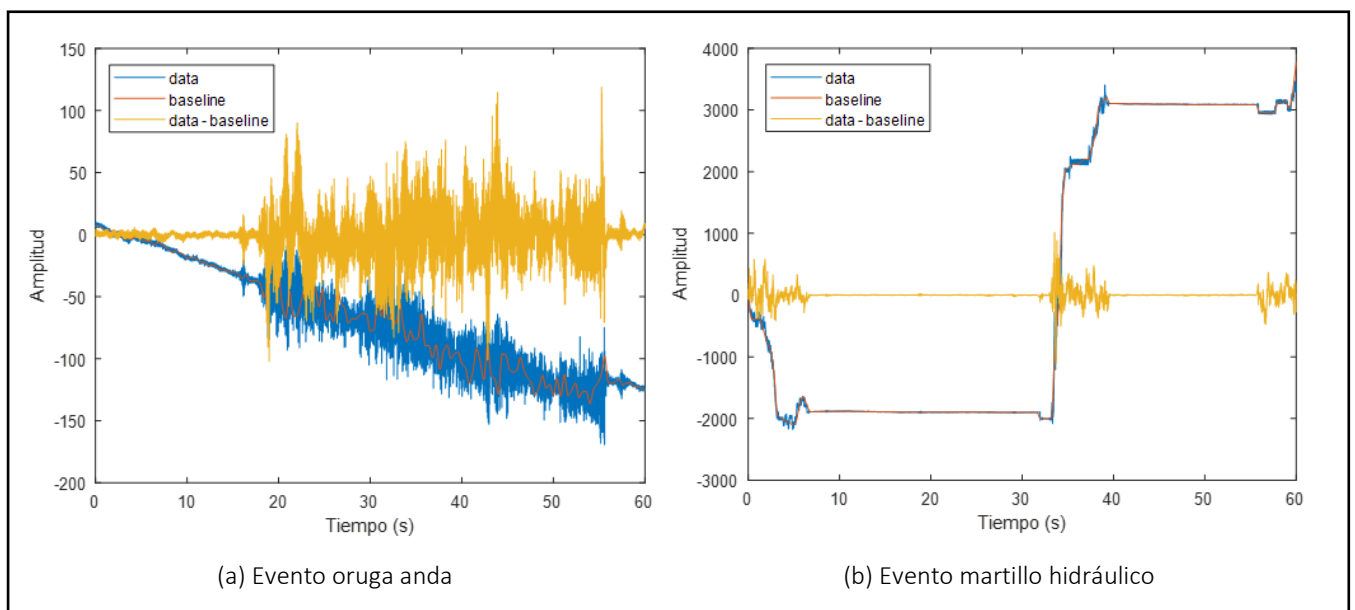


Figura 12. Estimación y corrección de la línea de base con el método PCHIP

La señal que obtenemos tras este procesado se parece a una señal sonora, por lo que podremos utilizar los **conceptos y técnicas de detección de voz** para realizar nuestro cometido.

3.3.2. Detectores de eventos

Pasamos a analizar las señales provenientes de los detectores de estímulos. Observaremos la detección de los eventos con respecto al momento de tiempo y distancia en el que suceden.

A continuación, se van a representar gráficamente las señales que se obtienen al procesar una señal tanto en el detector basado en el cálculo de la energía a corto plazo como para el detector basado en la divergencia espectral a largo plazo.

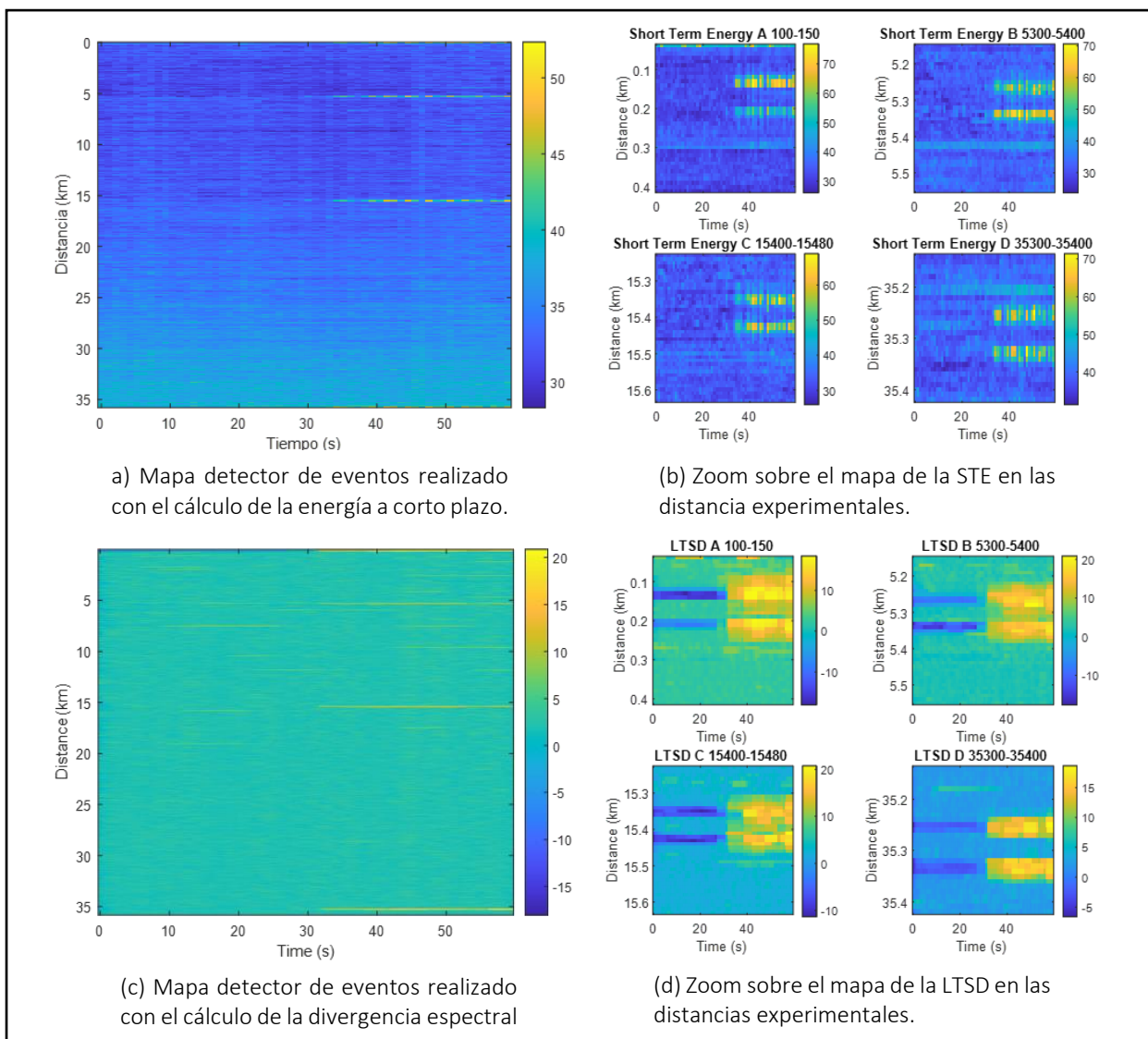


Figura 13. Detección de estímulos con las dos técnicas desarrolladas.

A la izquierda se han representado las figuras completas barriendo todas las distancias procesadas. En la Figura 13 (a) podemos ver la detección con el método del cálculo de energía a corto plazo, mientras que en la Figura 13 (c) se encuentra la detección mediante el cálculo de la divergencia espectral a largo plazo. No somos capaces de apreciar información valiosa en esas imágenes a simple vista, por lo que en la parte derecha se realiza un zoom en las

distancias que debería de existir evento. Así sí podemos ver que el evento es detectado por ambas dos técnicas en las cuatro distancias experimentales. Ambas representaciones corresponden con el mismo archivo analizado, en concreto tratan del evento cazo a 5 metros.

Si realizamos el análisis del mismo evento pero grabado con la tecnología anterior, explicada en el punto 2.7. Sistema detector anterior con la tecnología HECTOR vemos que el evento detectado es el mismo tanto en el margen espacial como temporal.

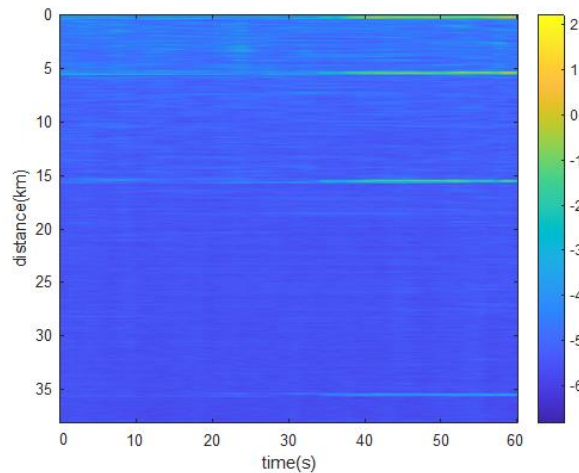


Figura 14. Mapa detector de eventos realizado con el cálculo de la fusión de la energía del error y su derivada (tecnología HECTOR)

3.4. Evaluación de los resultados

Los resultados obtenidos hasta ahora ofrecen una información visual de los eventos detectados. Sin embargo, estas conclusiones no son puramente objetivas, por lo que se hace uso del sistema evaluador comentado en el punto 2.8. Evaluación objetiva del sistema. Nos permite comprobar si las hipótesis de los resultados obtenidos son correctas de forma total o parcial. Aunque no se trate de una base de datos muy amplia, sería inviable realizar de manera manual la comprobación de todos los archivos a mano.

El sistema decisor automático ha sido implementado con la técnica del cálculo de la divergencia espectral a largo plazo de la señal. Se va a realizar un barrido de diversos parámetros de los que depende este sistema (umbral, enventanado, variable de actualización...) con el objetivo de optimizarlos para obtener el mejor detector posible. Este estudio también nos servirá para determinar si ese parámetro es crítico o no y veremos cómo se comporta al cambio.

El objetivo de este sistema es que sea robusto, por lo tanto, lo principal es que no tenga una falsa alarma elevada. El sistema perfecto sería aquel que tuviera una probabilidad de detección más próxima a 1 y una probabilidad de falsa alarma de 0.

Las gráficas representadas a continuación barren diferentes parámetros de las áreas acumuladas, por lo que tendremos una curva con todos los puntos de operación que corresponden con la probabilidad de detección y de falsa alarma. Resulta interesante observar estas gráficas ya que nos muestran los valores que representan el último paso a realizar en la detección de eventos. Los parámetros que se van a modificar para estudiar el comportamiento del decisor son: la ventana de datos y la variable de actualización del ruido.

3.4.1. Número de filtros en el banco de filtros

Aumentando el número de filtros no se conseguía realmente una mejora, a no ser que nos fuéramos un número extremo que no tiene una explicación real y además gastando recursos computacionales en algo innecesario.

Como consecuencia, los cálculos que se han realizado a continuación están desarrollados con 12 filtros en el banco de filtros.

3.4.2. Ventana

El detector basado en el cálculo de la divergencia espectral se realiza previo a un enventanado. La ventana utilizada para las representaciones previas hasta ahora ha sido una ventana *Hamming* de tamaño $L_v = 600$, con un desplazamiento en el eje temporal de la mitad de las muestras.

En este apartado se va a variar el tamaño de las ventanas L_v observando los efectos que causan estas modificaciones.

En la siguiente figura barremos unos umbrales de detección para tres ventanas *Hamming* variando su tamaño. A medida que aumentemos las muestras en la ventana, el sistema tendrá una mayor latencia para detectar la actividad, por lo que no podremos aumentar este valor de manera gratuita.

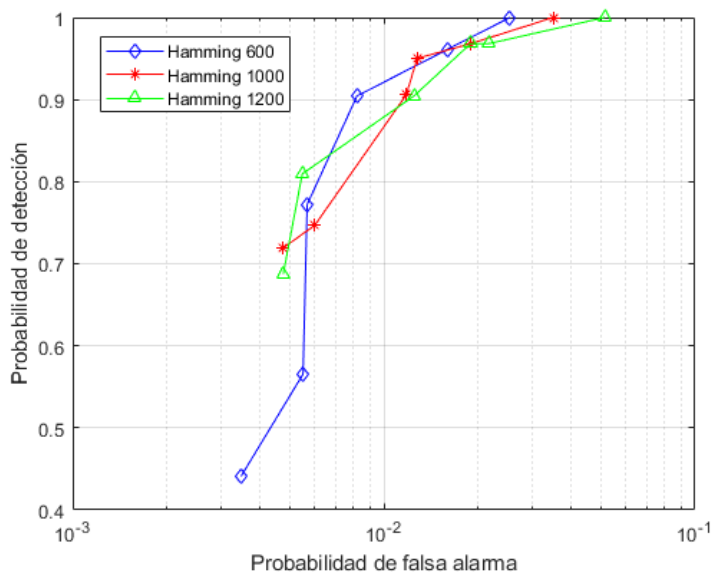


Figura 15. Curvas ROC para tres tipos de ventanas *Hamming*

Si aumentamos el tamaño de la ventana mejora la detección del sistema, sobre todo para los umbrales menos restrictivos; pero la probabilidad de falsa alarma también aumenta, aunque vemos que los datos se mantienen más estables en términos de detección en todas las ventanas con los umbrales menos restrictivos, que mantienen una probabilidad de detección superior al 90%. Es un comportamiento destacable que se cumple en las tres ventanas analizadas.

Habrá que tener muy en cuenta la elección del enventanado elegido dado que es la variable crítica para la latencia del sistema. Si elegimos un umbral restrictivo tendríamos que

aumentar el tamaño de la ventana y sacrificar la velocidad con la que monitorizamos la detección de eventos para obtener una detección considerable.

3.4.3. Variable actualización espectro de ruido (α)

En la siguiente gráfica podemos ver el comportamiento del sistema al cambio de la variable α , que va actualizando el ruido del sistema en cada ciclo de computación. Se han evaluado los casos extremos y el valor neutro.

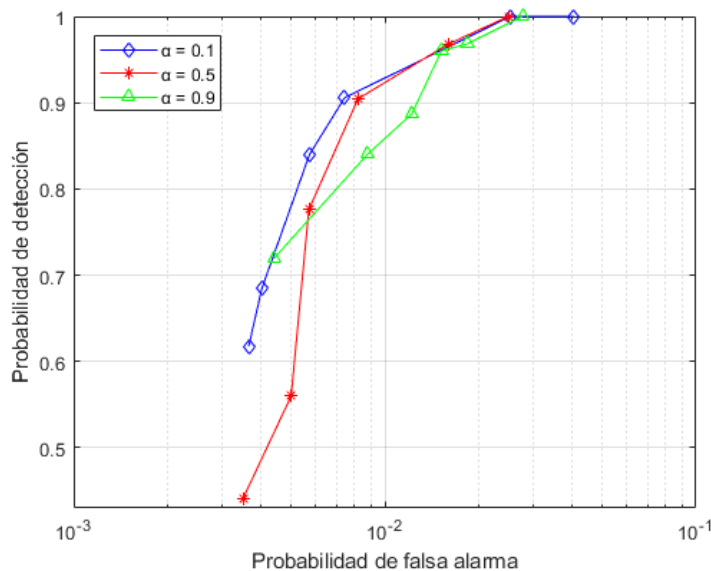


Figura 16. Curvas ROC para tres valores de la variable de actualización del ruido.

La primera conclusión que podemos observar en el sistema es que con el mismo umbral en los tres casos logramos una detección completa, pero con los casos de α extremos la probabilidad de falsa alarma es mayor. Sin embargo, con el valor α neutro el sistema es más sensible al continuo cambio de umbral. También la probabilidad de falsa alarma tiene la tendencia a aumentar conforme el valor de α aumenta. Esto es debido a que no vamos actualizando el espectro de ruido con nuevos datos, sino que utilizamos en la mayor parte de su cálculo el valor anterior y no la media de la magnitud de espectro de señal de los N términos que colindan en distancia. Por lo tanto, esta estimación del ruido no será tan exacta en todo momento, sobre todo cuando pasemos de una etapa silencio a evento. En el caso de $\alpha = 0,1$ los resultados tienen una buena tendencia de comportamiento con respecto a la probabilidad de falsa alarma, por lo que podría ser una buena elección. Aun con todo, tendríamos que elegir este valor sabiendo el compromiso detección – falsa alarma.

3.4.4. HDAS vs HECTOR

Para finalizar el estudio se van a examinar los tipos de evento por separado y además se compararán con los archivos de HECTOR. Así podemos ver la evolución de cada tipo de evento con el cambio de umbral tanto con la tecnología HDAS como con la HECTOR. Los tipos de eventos se han dividido en cuatro categorías como se realizó en la explicación de la base de datos (anda, cazo, compactadora y martillo hidráulico).

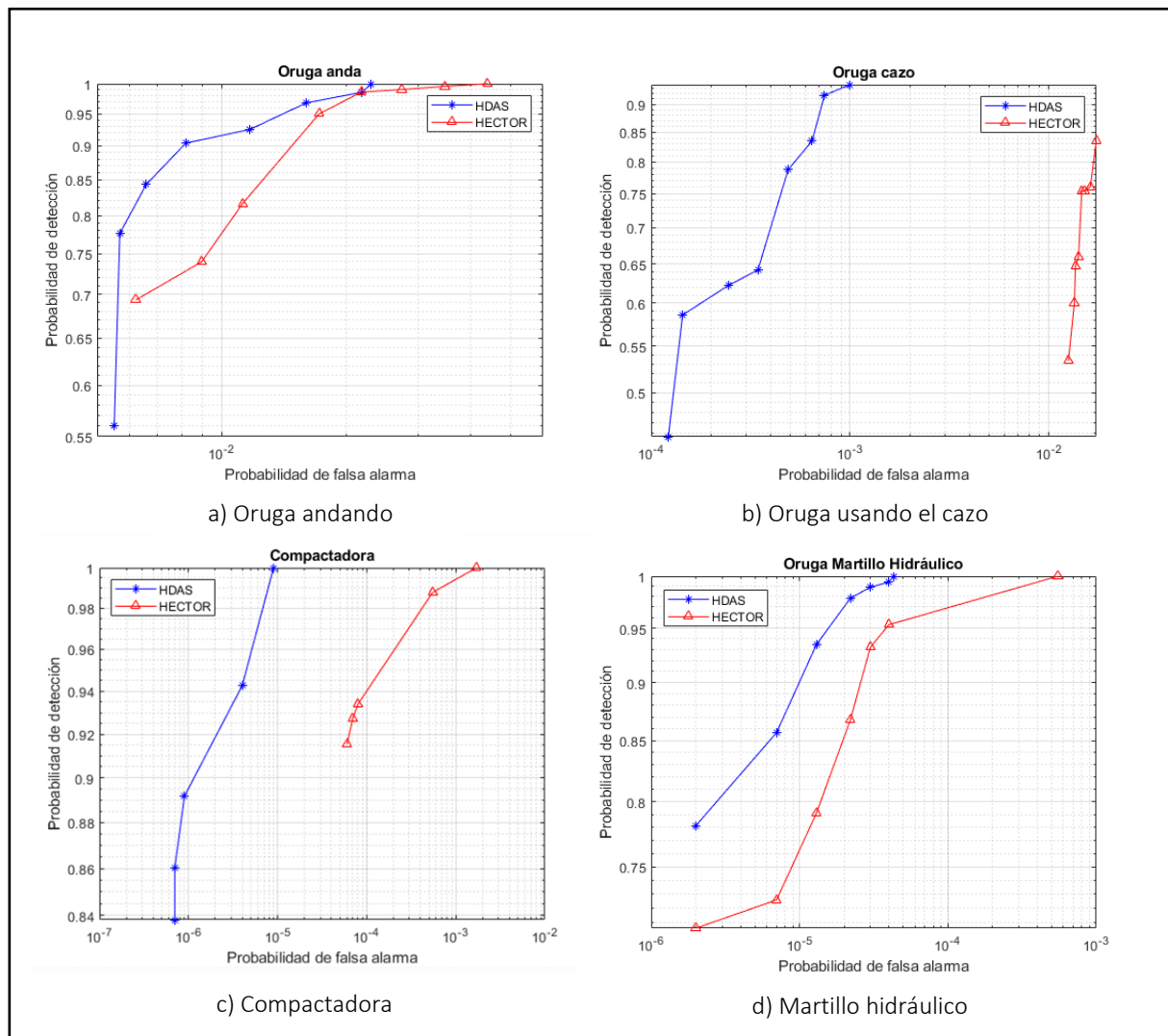


Figura 17. Curvas ROC para para diferentes eventos para HDAS y HECTOR

Estas cuatro figuras son muy interesantes tanto para ver el comportamiento de los eventos y la capacidad del sistema de detectarlos de una manera eficaz como para comparar los resultados obtenidos con ambas técnicas. Los umbrales escogidos para ambas técnicas no pueden ser los mismos porque son técnicas totalmente diferentes, pero se han querido asemejar lo mejor posible. Además, para cada tipo de evento se ha escogido el rango de umbrales que más le convenía. Posteriormente se analizarán todos con los mismos umbrales.

Empezando por la Figura 17 (a) podríamos decir que el cambio de ambas tecnologías no es extremadamente diferente. El punto con el que logramos una detección completa en ambos casos nos ofrece una falsa alarma menor en el HDAS. Esto es una mejora del 50 % con respecto a la que tenemos con el HECTOR pero aun así, la falsa alarma en estos tipos de eventos es elevada. Con la tecnología HECTOR se mantiene más estable la probabilidad de detección que con la nueva, la HDAS.

Pasando a la figura de su derecha (b), estamos estudiando los eventos de oruga utilizando el cazo. La primera diferencia que se observa es el cambio de valor de la probabilidad de falsa alarma obtenida con una u otra tecnología. Asimismo, la probabilidad de detección que se consigue con HDAS no la logramos nunca con HECTOR. En estos eventos nunca conseguimos una detección del 100% y es debido a la baja calidad de las medidas, como vimos en el punto

3.2. Calidad de las medidas donde calculábamos la SNR de cada evento y estas tenían el valor más crítico.

La Figura 17 (c) es especial porque solo teníamos un archivo de eventos, pero podemos ver que tiene la misma tendencia que en los eventos del cazo. En este caso se logra con ambas tecnologías una detección total dado que es un tipo de evento que se detecta bien dada la naturaleza física del evento.

La última figura que corresponde con la (d), nos ofrece la misma idea que las anteriores. A medida que la probabilidad de detección disminuye lo hace con mayor rapidez.

Para hacer un estudio completo deberíamos de aunar todos los tipos de evento y estudiarlos con los mismos umbrales. Vamos a verlo a continuación.

En la Figura 18 se han representado dos curvas ROC, la azul corresponde al resumen de resultados obtenidos con todos los eventos con la tecnología HDAS y la roja a los eventos con la tecnología HECTOR.

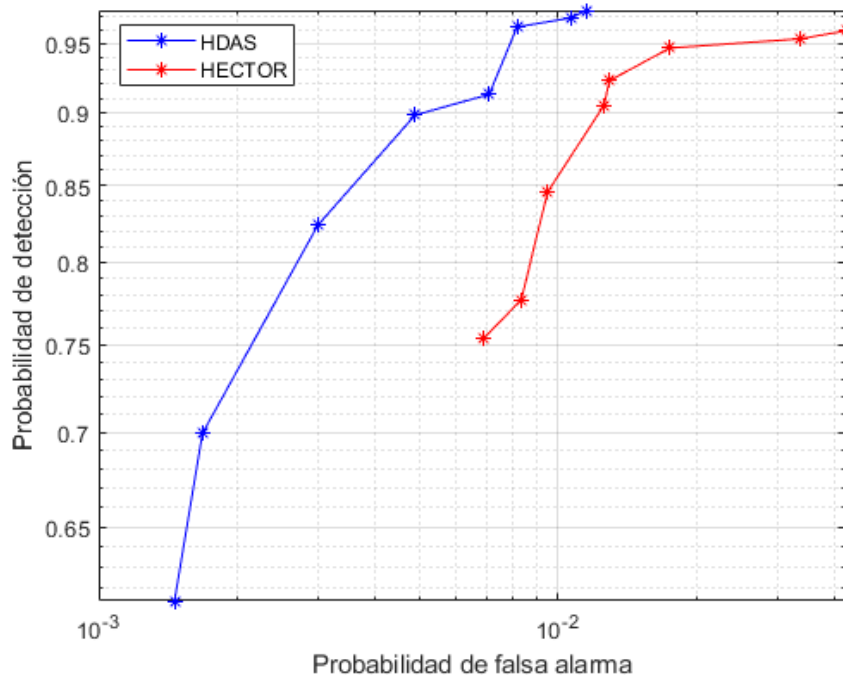


Figura 18. Curvas ROC resumiendo el funcionamiento del sistema para las dos tecnologías comparadas.

La tónica que se apreciaba con la representación de los tipos de eventos separados se sigue viendo reflejada en la anterior figura. Lo más destacable es la mejora en la probabilidad de falsa alarma con la técnica HDAS con respecto a la HECTOR. Se obtienen unas buenas probabilidades de detección con ambos sistemas, por lo que los dos cumplen con su función. En la Tabla 6 y Tabla 7 están recogidos los valores que se han representado en la anterior figura, cada uno para su tecnología.

UMBRAL DE DETECCIÓN	PROBABILIDAD DE DETECCIÓN (%)	PROBABILIDAD DE FALSA ALARMA (%)
6	97.50	1.15
6.5	96.93	1.06
7	96.23	0.81
7.5	91.28	0.72
8	89.81	0.49
8.5	82.39	0.30
9	69.97	0.17
9.5	61.35	0.14

Tabla 6. Probabilidad de detección y falsa alarma para el detector HDAS.

UMBRAL DE DETECCIÓN	PROBABILIDAD DE DETECCIÓN (%)	PROBABILIDAD DE FALSA ALARMA (%)
17	95.94	4.23
18	95.34	3.34
19	94.66	1.75
20	92.27	1.30
21	90.51	1.26
22	84.54	0.95
23	77.71	0.83
24	75.35	0.69

Tabla 7. Probabilidad de detección y falsa alarma para el detector HECTOR.

La parte más destacable de esta comparación es la mejora de un 10% absoluto en la probabilidad de detección para el mismo punto de trabajo $FA = 0.01$. En HDAS obtenemos una probabilidad de detección superior al 95% en este punto de trabajo mientras que por el contrario, en HECTOR, para una falsa alarma menor del 1% la probabilidad de detección es inferior al 85%.

Capítulo 4

Conclusiones y líneas futuras

En este último capítulo se recogen las conclusiones procedentes del capítulo anterior. Por último, se detallarán algunas posibles líneas futuras de desarrollo con las que continuar este trabajo. Se explica cómo se han cumplido los objetivos y se analizará los beneficios y desventajas del uso de esta técnica.

4.1. Conclusiones

Se ha conseguido un sistema detector de eventos para este tipo de tecnología. Además, el sistema tiene unas probabilidades de detección muy altas, con una falsa alarma no muy elevada. Para llegar a este sistema se han estudiado diferentes métodos para tratar las señales originales hasta llegar a la decisión del evento, pasando por la supresión de la línea de base hasta la categorización de la información de las señales en frecuencias.

También se ha conseguido analizar esta tecnología y evaluar todos los archivos de un modo práctico y obteniendo unos resultados objetivos para un gran abanico de posibilidades.

Por otro lado, el hecho de haber grabado todos los archivos en paralelo con las dos tecnologías comparadas (HDAS y HECTOR), ha posibilitado realizar una comparación real sobre ambas tecnologías y los sistemas de detección desarrollados y así tener una idea de la mejoría de la tecnología HDAS sobre la HECTOR.

Se puede afirmar que **se han cumplido los objetivos propuestos para este trabajo.**

La reflexión que queda por hacer es en cuanto al uso de esta tecnología con respecto a las que ya se usan. Refiriéndonos al control de intrusos en un área, es menos previsible que cámaras de seguridad y, si el área es muy grande, seguramente más económico.

4.2. Líneas futuras

Para ponerle punto final a este trabajo se plantean las posibles líneas de desarrollo con las que se puede continuar este proyecto.

- **Extensión de la base de datos.** Este trabajo se ha realizado con una base de datos compuesta por cuatro tipos de eventos, a partir de los cuales se ha podido evaluar las prestaciones del detector desarrollado. Una base de datos mayor hubiera ofrecido una información más fiable del comportamiento del sistema. Además, si los archivos fueran de otra índole, el sistema propuesto podría evaluarse mejor para otras aplicaciones.
- **Optimización de parámetros.** Una parte importante del trabajo es dar con los mejores parámetros para la detección de todos los eventos. Se podría desarrollar otro trabajo centrado solamente en la optimización de algunos de los parámetros como la ventana y su desplazamiento o el número de distancias con las que trabajamos conjuntamente en el cálculo de la divergencia espectral a largo plazo.
- **Desarrollo de otro tipo de detector.** Se podrían investigar otros métodos para la detección de los eventos y valorar la fusión de varios con el objetivo de hacer un sistema más robusto y minimizar la falsa alarma.

- **Creación de un sistema de clasificación de eventos.** Una vez desarrollado el sistema detector de eventos, se puede estudiar el modo de clasificar los tipos eventos.

Bibliografía

- [1] **Malla, Ramesh & Amlan, Sen & Garrick, Norman.** (2008). “*A Special Fiber Optic Sensor for Measuring Wheel Loads of Vehicles on Highways*”. *Sensors*. 8. DOI: 10.3390/s8042551.
- [2] **Catalano, Angelo & Bruno, Francesco & Galliano, Carlo & Pisco, M. & Persiano, G.V. & Cutolo, Antonello & Cusano, Andrea.** (2016). “*An optical fiber intrusion detection system for railway security. Sensors and Actuators*” A: Physical. 253. DOI: 10.1016/j.sna.2016.11.026.
- [3] **Sanders, Robert.** “*Underwater telecom cables make superb seismic network*”. *Berkeley News*. Media relations, 2019.
- [4] **Marc-André Gutscher, Jean-Yves Royer, David Graindorge, Shane Murphy, Frauke Klingelhofer, Chastity Aiken, Antonio Cattaneo et al.** (2019) “*Fiber optic monitoring of active faults at the seafloor: I the FOCUS project*”. *Photoniques* 32-37. DOI: 10.1051/photon/2019S432
- [5] **Chung-ye Leung, Cheng-hac Huang & I-fan Chang.** (1988). “*Optical Fiber Security System: A Field Test Report*”. *Proc. SPIE*, Volume 0838, pp. 365-371. DOI: 10.1117/12.942535
- [6] **Glisic, Daniele Inaudi & Branko.** (2010). “*Long-Range Pipeline Monitoring by Distributed Fiber Optic Sensing*”. *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 132 / 011701-9. DOI: 10.1115/1.3062942
- [7] **Aragón Photonics.** <http://aragonphotonics.com/>. [Acceso: 21 junio 2020.]
- [8] **Galindez-Jamioy, C. A. & López-Higuera, J. M.** (2012). “*Brillouin Distributed Fiber Sensors: An Overview and Applications*”. *Journal of Sensors*, 1687-725. DOI: 10.1155/2012/204121
- [9] **Bao X, Chen L.** (2012). “*Recent progress in distributed fiber optic sensors*”. *Sensors (Basel)*. 12(7): 8601-8639. DOI: 10.3390/s120708601
- [10] **Muanenda, Yonas.** (2018). “*Recent Advances in Distributed Acoustic Sensing Based on Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry*”. *Journal of Sensors*. 2018. 1-16. DOI: 10.1155/2018/3897873.
- [11] **R Fernández-Ruiz M, Costa L, F Martins H.** (2019) “*Distributed Acoustic Sensing Using Chirped-Pulse Phase-Sensitive OTDR Technology*”. *Sensors (Basel)*. 2019;19(20):4368. DOI: 10.3390/s19204368
- [12] **Lenis G, Pilia N, Loewe A, Schulze WH, Dössel O.** (2017) “*Comparison of Baseline Wander Removal Techniques considering the Preservation of ST Changes in the Ischemic ECG: A Simulation Study*”. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. 2017:9295029. DOI: 10.1155/2017/9295029.
- [13] **Francisco Perdigón Romero.** “*Methods for baseline wander removal in electrocardiogram signals: a comparative study*”. Manaus : Universidad Federal del Amazonas, Ingeniería Eléctrica, 2016.
- [14] **Adewale Emmanuel Awodeyi, Stephen R. Alty, and Mohammad Ghavami.** (2013). “*Median Filter Approach for Removal of Baseline Wander in Photoplethysmography Signals*”. In *Proceedings of the 2013 European Modelling Symposium (EMS '13)*. IEEE Computer Society, USA, 261–264. DOI: 10.1109/EMS.2013.45

- [15] **Zhuang, Cuifang & Liao, Ping.** (2020). "An improved empirical wavelet transform for noisy and non-stationary signal processing". IEEE Access. PP. 1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2968851.
- [16] **German-Sallo Z.** (2011) "ECG Signal Baseline Wander Removal Using Wavelet Analysis". In: Vlad S., Ciupa R.V. (eds) International Conference on Advancements of Medicine and Health Care through Technology. IFMBE Proceedings, vol 36. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-22586-4_41
- [17] **Lokhande, N.N., Nehe, D.S., & Vikhe, P.S.,** (2012), "Voice activity detection Algorithm for Speech Recognition Applications". IJCA Proceeding on International Conference in Computational Intelligence (ICCIA2012), Number 6.
- [18] **Podder, Prajoy & Khan, Tanvir & Khan, Mamdudul & Rahman, M.,** (2014), "Comparative Performance Analysis of Hamming, Hanning and Blackman Window". International Journal of Computer Applications. 96. 1-7. DOI: 10.5120/16891-6927.
- [19] **Ramirez, J., Segura, J., Benitez, C., de la Torre, A., Rubio, A.,** (2004). "Efficient Voice Activity Detection Algorithms Using Long Term Speech Information". Speech Communication 42: 271-287. DOI: 10.1016/j.specom.2003.10.002
- [20] **Ramirez, J., Segura, J., Benitez, C., de la Torre, A., Rubio, A.,** (2004). "Voice activity detection with noise reduction and Long-Term Spectral Divergence estimation". IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Montreal.
- [21] **Wang KC.,** (2013), "A novel voice sensor for the detection of speech signals". Sensors (Basel). 13(12):16533-16550. DOI: 10.3390/s131216533
- [22] **Diego Álvarez Gutiérrez, Luis Vicente Borrueal.** "Detección de eventos en entornos monitorizados". Zaragoza : Universidad de Zaragoza, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Máster en Ingeniería de Telecomunicación, 2019.
- [23] **Swets, John A.** "Signal Detection Theory and ROC Analysis in Psychology and Diagnostics". BBN Corporation and Harvard Medical School, 1996. pp. 148 - 154.
- [24] **David Heeger.** "Signal Detection Theory". Department of Psychology, New York University, 2006.
- [25] **Hajian-Tilaki K.** (2013). "Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve Analysis for Medical Diagnostic Test Evaluation". Caspian journal of internal medicine, 4(2), 627–635.