

Tema: Conversión Óptico-sonora.

Título: Transductor Óptico-sonoro basado en procesado de imagen.

Autor: Benjamín Asensio López

Titulación: Sonido e Imagen

Tutor: Lino García Morales

Departamento: DIAC

Director: Vicente González Posadas

Tribunal

Presidente: Pedro Cobos Arribas

Vocal: Lino García Morales

Vocal Secretario: Antonio Mínguez Olivares

Fecha de lectura: 30-09-2013

RESUMEN

En este proyecto se aborda la transducción óptico-sonora utilizando métodos de tratamiento digital de imagen. Para llevar a cabo el proyecto se consideran únicamente métodos de bajo presupuesto, por lo que para realizar todo el proceso de conversión óptico-sonora se utilizan un ordenador y un escáner doméstico. Como el principal objetivo del proyecto es comprobar si es viable utilizar el tratamiento digital de imagen como conversor no se ha contemplado la utilización de equipamiento profesional.

La utilidad de este proyecto está en la restauración del sonido de material filmico con importantes degradaciones, tales que no sea posible su reproducción en un proyector. Con el prototipo que se propone, realizado con el software de programación Matlab, se consigue digitalizar el audio analógico de las películas en malas condiciones ya que la captura de audio se efectúa de manera óptica sobre las bandas sonoras.

Lo conseguido en este proyecto cobra especial importancia si se tiene en cuenta la cantidad de material cinematográfico que hay en películas de celulosa. La conservación de dicho material requiere unas condiciones de almacenamiento muy específicas para que el soporte no se vea afectado, pero con el paso del tiempo es habitual que las bobinas de película presenten deformaciones o incluso ruptura.

Aplicando métodos de tratamiento digital de imagen es posible restaurar el audio de fragmentos de película que no puedan ser expuestos a la tensión producida por los rodillos de los proyectores, incluso es posible recuperar el audio de fotogramas concretos ya que la digitalización del audio se realiza capturando la imagen de la forma de onda. Por ello, el procedimiento seguido para digitalizar la película debe ser poco intrusivo para garantizar la conservación del soporte filmico.

Cabe destacar que en este proyecto se ha realizado la conversión óptico-sonora sobre las bandas de sonido analógicas de área variable presentes en la película, pero el procedimiento es aplicable también a las bandas de área variable realizando modificaciones en el prototipo. Esto último queda fuera del objetivo de este proyecto, pero puede ser un trabajo futuro.

ABSTRACT

This project addresses optical to sound conversion using digital image processing methods. To carry out the project are considered only low-budget methods , so for all optical to sound conversion process using a computer and a home scanner . As the main application of this project is to test the feasibility of using the digital image processing as a converter does not contemplate the use of professional equipment.

The main objective of this project is the restoration of sound film material with significant impairments , such is not possible playback on a projector. With the proposed prototype , made with Matlab programming software , you get digitize analog audio bad movies because the audio capture is performed optically on the soundtracks .

The achievements in this project is especially important if you consider the amount of film material is in cellulose films . The preservation of such material requires a very specific storage conditions to which the support is not affected , but over time it is common for film reels presenting deformations or even rupture.

Applying methods of digital image processing is possible to restore the audio from movie clips that can not be exposed to the tension produced by the rollers of the projectors , it is even possible to retrieve specific frames audio and audio that digitization is done by capturing the image of the waveform. Therefore, the procedure used to digitize the film should be bit intrusive to ensure the conservation of the film medium .

Note that in this project was carried out optical to sound conversion on analog variable area soundtracks present in the film, but the procedure is applicable to variable-area bands making changes to the prototype. The latter is beyond the scope of this project , but can be a future work.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. Introducción | 6 |
| 2. Base teórica..... | 8 |
| 2.1 Estructura de la película | 8 |
| 2.2 Formatos de película | 11 |
| 2.3 Formatos de sonido en cine | 16 |
| 2.4 Principales degradaciones de la película | 25 |
| 2.5 Justificación matemática | 27 |
| 3. Descripción experimental..... | 32 |
| 3.1 Digitalización mediante fotografía..... | 33 |
| 3.2 Digitalización por medio de escaneado. | 34 |
| 3.3 Diseño del programa | 38 |
| Conclusiones | 47 |
| Bibliografía | 49 |
| ANEXO 1: Dimensiones y esquemas de películas..... | 50 |
| ANEXO 2: Código completo del programa diseñado en Matlab..... | 54 |
| Presupuesto | 59 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1: Proyector de cine de 35mm proyecson px35. | 6 |
| FIGURA 2: Estructura de la película en función de sus diferentes capas químicas. | 8 |
| FIGURA 3: Capas de emulsión con los distintos colorantes en una película para color. | 9 |
| FIGURA 4: Proceso de grabación para obtener película de 8mm. | 11 |
| FIGURA 5: Comparación entre película de super8 y de 8mm. | 12 |
| FIGURA 6: Película de 16mm con perforaciones en uno y dos laterales..... | 13 |
| FIGURA 7: Película de 35mm | 13 |
| FIGURA 8: Película de 70mm | 14 |
| FIGURA 9: Distribución de los diferentes formatos ópticos de sonido en la película | 17 |
| FIGURA 10: Lectura de la pista dolby digital..... | 17 |
| FIGURA 11: Esquema de un sistema de registro de área variable, con desarrollos introducidos por la R.C.A. | 18 |
| FIGURA 12: Diferentes tipos de bandas analógicas de sonido | 19 |
| FIGURA 13: Muestra de una tira de fotogramas escaneados de una película de 35mm. | 20 |
| FIGURA 14: Muestra de una tira escaneada de un negativo de sonido | 20 |
| FIGURA 15: Medida de la separación entre perforaciones..... | 21 |
| FIGURA 16: Medida de la anchura del fotograma..... | 21 |
| FIGURA 17: Medida de la altura del fotograma. | 22 |
| FIGURA 18: Medida de la anchura de la película..... | 22 |
| FIGURA 19: Medida de la anchura de la banda de audio en la película. | 23 |
| FIGURA 20: Banda high-magenta: “salomé” (c. saura, 2002). banda cian: “tierra de fuego” (m. littin, 2000)..... | 24 |
| FIGURA 21: Fotograma con degradación de fase 2..... | 25 |
| FIGURA 22: Fotograma con degradación de fase 3..... | 26 |
| FIGURA 23: Fotograma con pérdida total de imagen, fase 4 | 26 |
| FIGURA 24: Rollo de película afectado por la contracción..... | 27 |
| FIGURA 25: Curvatura de un fragmento de película como consecuencia de la pérdida de elasticidad..... | 28 |
| FIGURA 26: Comparación entre fotograma original (izquierda) y fotograma con degradación de color (derecha) | 29 |
| FIGURA 27: Etapas definidas para realizar la conversión óptico - sonora | 29 |
| FIGURA 28: Fotografía de la banda de audio analógica tomada sobre la imagen proyectada | 34 |
| FIGURA 29: Medida de la longitud de escaneado | 35 |
| FIGURA 30: Colocación de la película para su escaneado | 36 |
| FIGURA 31: Vista frontal de la colocación de la película en el escaner..... | 36 |
| FIGURA 32: Muestra de escaneo de la película con una resolución de 3200ppp..... | 37 |
| FIGURA 33: Imagen digitalizada mediante escáner profesional de fotogramas..... | 37 |
| FIGURA 34: Forma de onda del audio contenido en un fotograma de la película..... | 38 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 35: Ampliación de la zona central de la figura 33 | 38 |
| FIGURA 36. Selección del directorio dónde se encuentran las imágenes a procesar | 38 |
| FIGURA 37. Selección de la primera imagen para procesar..... | 39 |
| FIGURA 38. Selección del número de imágenes que se van a procesar..... | 39 |
| FIGURA 39. Selección del umbral elegido para realizar la binarización..... | 40 |
| FIGURA 40. Opción de mostrar los histogramas de las imágenes..... | 41 |
| FIGURA 41. Ejecución del procesado sobre la primera imagen seleccionada..... | 42 |
| FIGURA 42. Fin del procesado de las imágenes y muestra del histograma..... | 44 |
| FIGURA 43. Opción para reproducir el audio obtenido tras el proceso..... | 45 |
| FIGURA 44. Opción para guardar el audio en un archivo "wav" | 45 |
| FIGURA 45. Forma de onda del audio obtenido tras el proceso..... | 46 |

ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| ILUSTRACIÓN 1: Esquema de dimensiones de películas de 8mm y s8mm..... | 50 |
| ILUSTRACIÓN 2: Esquema de dimensiones de película de 16mm. | 51 |
| ILUSTRACIÓN 3: Esquema de dimensiones de la película de 35mm. | 52 |
| ILUSTRACIÓN 4: Esquema de dimensiones de película de 65 y 70mm. | 53 |

TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1: Dimensiones de la columna sonora para los diferentes formatos de película. | 15 |
| TABLA 2: Equipamiento utilizado para la digitalización por fotografía | 34 |
| TABLA 3. Presupuesto del equipamiento utilizado | 59 |
| TABLA 4. Presupuesto de horas de trabajo | 59 |

1. Introducción

El principal objetivo del proyecto es facilitar la conservación del material filmico. Debido a su composición, muchas películas son inflamables y presentan un gran deterioro con el paso del tiempo.

Dada la variedad y cantidad de patrimonio filmico almacenado en soportes analógicos, es de vital importancia preservar la información contenida en los mismos. Actualmente es posible digitalizar la información sonora que contienen los carretes grabando la salida de audio del proyector. Para ello es necesario hacer un visionado de la película completa en una configuración como la mostrada en la figura 1.



Figura 1: Proyector de cine de 35mm Proyecson PX35 [2].

Para digitalizar el audio de este modo, por tanto, la película debe estar en unas condiciones aptas para la reproducción. De no ser así, podría fragmentarse o romperse en la proyección porque está expuesta a la tensión generada por los diferentes rodillos por los que avanza.

Esta condición presenta la necesidad de encontrar un método de digitalización apto para películas con una degradación tal que no se puedan colocar en el proyector. En este proyecto se aborda la conversión óptico-sonora de la banda de audio analógica presente en las películas cinematográficas de 35mm, empleando para ello métodos de tratamiento digital de imagen y de señales.

Cabe destacar que el objetivo principal de este proyecto consiste en obtener el audio contenido en una película utilizando equipamiento y medios de bajo presupuesto. Por tanto, es una primera aproximación en la que se persigue comprobar que es posible descodificar la información impresa en la película en sonido, quedando en segundo plano la optimización del proceso y las mejoras de calidad.

Además, el método utilizado debe ser poco invasivo porque, de lo contrario, aumentaría la degradación de la película impidiendo su restauración. No se puede, por tanto, someter a la película en la digitalización a temperaturas elevadas o fuertes tensiones como las producidas por el arrastre de la bobina. Esto condiciona que el proceso de captura de los fotogramas se realice con la película estática, lo que permite rescatar la información sonora de fragmentos de película con notables degradaciones.

2. Base teórica

2.1 Estructura de la película

Las capas centrales, como el soporte y las capas de emulsión, son comunes a las películas para fotografía fija, pero en los extremos se aplican compuestos diseñados para contribuir al desplazamiento de la película a través de la cámara. En la figura 2 puede apreciarse la estructura básica de las capas que componen la estructura.



Figura 2: Estructura de la película en función de sus diferentes capas químicas [3].

El soporte de la película, que es la capa base, debe cumplir una serie de requerimientos para poder ser utilizado como tal. Tiene que ser transparente, con alta resistencia a la rotura, resistente a la humedad y a los productos químicos utilizados en el revelado, químicamente estable y fotográficamente insensible.

Los materiales utilizados a lo largo de la historia del cine que cumplen estos requisitos son:

- Nitrato de celulosa. Fue desarrollado en investigaciones enfocadas a la búsqueda de nuevos explosivos. No presenta carácter explosivo pero sí manifiesta una elevada inestabilidad química, siendo altamente inflamable y sensible a degradaciones físicas.
- Acetatos de celulosa. Intentan solventar el gran inconveniente del nitrato de celulosa, pero presentan una alta tendencia a absorber humedad. En la fabricación de películas se utilizó diacetato y triacetato de celulosa.
- Poliéster. Este plástico sintético presentaba problemas para conseguir la transparencia y el grado de adherencia de las emulsiones necesario, pero tiene una alta resistencia a la rotura.

La capa de emulsión está adherida al soporte mediante un aglutinante, y es la capa más importante de la película ya que determina la sensibilidad de la misma. La emulsión se fabrica

disolviendo lingotes de plata en ácido nítrico para formar cristales de nitrato de plata. Estos cristales quedan disueltos en otros productos químicos formando partículas de haluro de plata. La concentración y el grado de sensibilidad de estas partículas determinan la sensibilidad de la película.

Para las películas en color, aparecen superpuestas tres capas de emulsión con colorantes cian, magenta y amarillo. Para cada una de estas capas pueden aparecer hasta tres subcapas para capturar el rango completo de brillos de la escena y optimizar el color y contraste de la película.

En cada capa de emulsión se dispersa, alrededor de los cristales de haluro de plata, un acoplador de color. Cada uno de estos acopladores forma un colorante de uno de los colores primarios sustractivos y está en una capa sensible a la luz de su color complementario. La figura 3 muestra las capas de emulsión tratadas con cada uno de los acopladores de color.



Figura 3: Capas de emulsión con los distintos colorantes en una película para color [3].

En la figura 3 se aprecian tres acopladores formadores de colorante: amarillo, localizado en la capa de emulsión sensible a la luz azul; magenta, situado en la capa sensible y cian, en la capa sensible al rojo. La capa de absorción ultravioleta se incluye para evitar que los cristales de plata fotosensibles se puedan impresionar por este tipo de radiación.

Por último, se aplica a la película una capa conocida como “antihalo”, cuya función es evitar que la luz que atraviesa la película se refleje apareciendo en la emulsión una exposición secundaria indeseada. La aparición de esta imagen secundaria conlleva una dispersión de la luz y una reducción de la nitidez.

La mayoría de las capas antihalo poseen además propiedades protectoras de abrasión y lubricantes, para facilitar el desplazamiento de la película a través de la cámara. Dado que para evitar la reflexión de la luz dicha capa debe ser negra, es necesario eliminarla para poder ver la imagen. En concreto, se elimina antes de llevar a cabo el revelado.

Teniendo en cuenta la delicada composición química de las películas, es necesario emplear en el proceso el método menos invasivo posible para la digitalización.

2.2 Formatos de películas

Película de 8 mm

Este sistema fue desarrollado en 1932 tomando como base el sistema de 16 mm, consistente en una película de 16mm de ancho y que es expuesta en dos mitades de 8mm. La película viene enrollada en bobinas de unos 7,5m de longitud y para proyectarla pasa dos veces por la cámara: se expone una mitad de la película y para exponer la otra mitad es necesario darle la vuelta a las bobinas. La figura 4 representa el proceso de grabación de este formato.

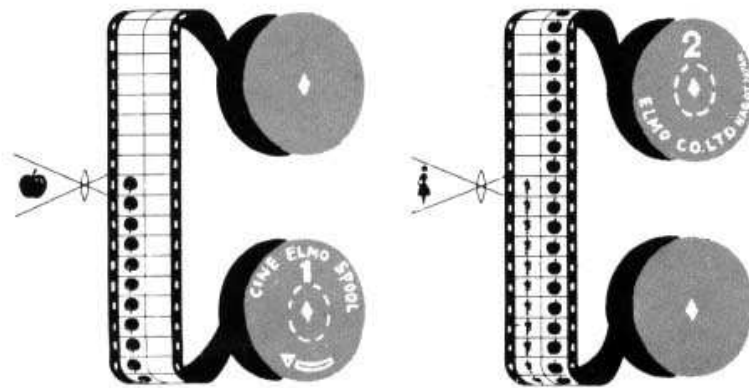


Figura 4: Proceso de grabación para obtener película de 8mm [4].

Tras el revelado, la película se corta longitudinalmente por la mitad y se empalman las dos mitades, de manera que se obtiene una única película de 8mm de ancho y unos 15m de largo. La velocidad estándar para este formato es de 16 fotogramas por segundo, aunque en 1959 la velocidad oficial fue aumentada hasta los 18 fotogramas.

Película de Super 8mm

El formato Super 8mm fue lanzado oficialmente en 1965 mejorando algunos aspectos del 8mm, y convirtiéndose en el más popular para filmaciones domésticas.

Para facilitar la colocación de la bobina en la cámara ésta se distribuía en cartuchos, de forma que no era necesario enhebrarla manualmente. Dichos cartuchos contienen unos 15m de película, que permiten una filmación de entre 3'20" y 2'30" dependiendo de la velocidad de imágenes por segundo. La velocidad estándar de filmación era de 18 fotogramas por segundo, aunque algunas cámaras permitían aumentar hasta 24 fotogramas por segundo para usos más profesionales.

Otra mejora adoptada frente al sistema de 8mm fue aumentar la resolución de la imagen, ampliando el tamaño destinado al fotograma en un 53%. Esta mejora se consiguió reduciendo el tamaño de las perforaciones.

Dado que el Super8 fue concebido como un sistema doméstico, con el objetivo de abaratar los costes se ha utilizado tradicionalmente película reversible, que se proyecta directamente una vez que es revelada sin necesidad de hacer positivos. Pero a raíz del uso cada vez más profesional que se comenzó a dar al formato, se comercializaba también película negativa, que permitía registrar imágenes con mayor calidad. La figura 5 muestra una comparación entre las dimensiones de los formatos 8mm y Súper 8.

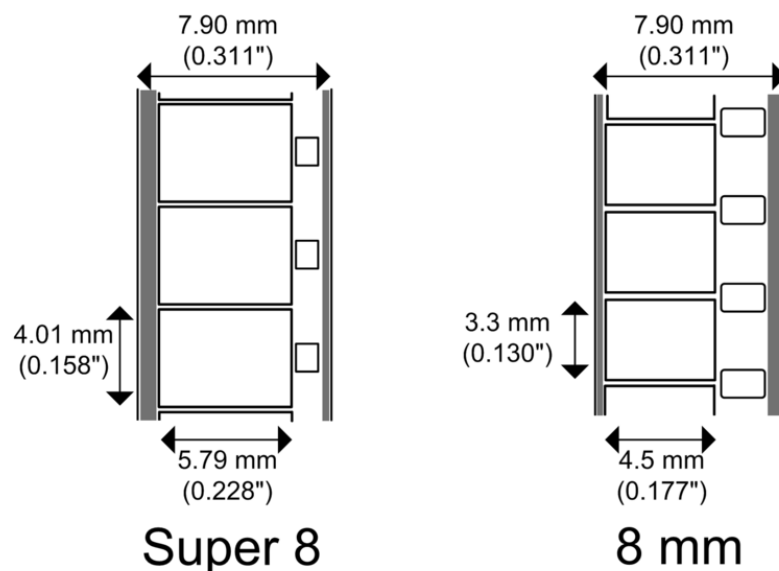


Figura 5: Comparación entre película de Super8 y de 8mm [5].

Película de 16 mm

El formato de 16mm apareció como formato doméstico mudo, pero a raíz de la introducción de las pistas de audio y de la película de color se convirtió en un estándar alternativo a los 35mm. Este sistema fue lanzado por Kodak en 1923 y fue de los primeros en adoptar la película con base de acetato. Con la llegada de la televisión, el formato de 16mm se impuso al de 35mm ya que ofrecía calidad suficiente para ser emitida pero con cámaras de menor tamaño y coste económico.

En la figura 6 aparecen dos fragmentos de película de 16mm.



Figura 6: Película de 16mm con perforaciones en uno y dos laterales [8].

Actualmente, el sistema sucesor es el Super16, que consigue una relación de aspectos de 16:9 al haber eliminado las perforaciones de uno de los laterales. Este formato se emplea actualmente en la realización de documentales y series de calidad para televisión.

Película de 35 mm

El formato de 35mm es el más extendido tanto en fotografía fija como en películas cinematográficas. En el caso de la fotografía fija, cada fotograma abarca 8 perforaciones laterales, pero en la película cinematográfica hay únicamente 4 perforaciones.

Otra diferencia entre la película de 35mm utilizada en fotografía y cine es que en imagen fija los fotogramas se registran en horizontal, mientras que en formato cinematográfico la imagen se registra verticalmente. Esto puede verse en la figura 7, que contiene un fragmento de película de 35mm.



Figura 7: Película de 35mm [5].

Este sistema es el más extendido en la industria cinematográfica y tiene una velocidad de reproducción estándar de 24 fotogramas por segundo. Aunque admite diversas relaciones de aspecto panorámicas, la más habitual es de 1,85:1.

Película de 70 mm

Este formato cinematográfico se emplea para obtener alta resolución, gracias al tamaño de los fotogramas. En la cámara, la película utilizada es de 65mm y los 5mm restantes estaban destinados en un origen a 6 pistas magnéticas para sonido. Actualmente, el sonido está registrado en formato digital.

Por cada fotograma, la película dispone de 5 perforaciones en ambos extremos laterales, lo que permite una relación de aspectos de 2,20:1. La velocidad de la película es de 24 fotogramas por segundo.

La figura 8 muestra un ejemplo de película de 70mm.

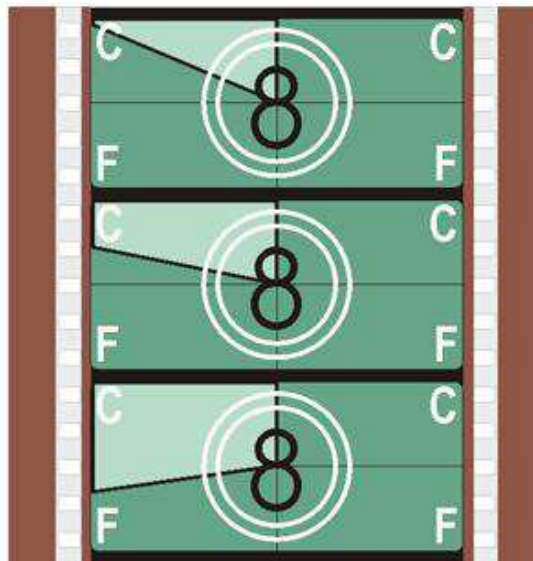


Figura 8: Película de 70mm [4].

Tabla 1: Dimensiones de la columna sonora para los diferentes formatos de película [1].

| PASO Y SISTEMA | | De eje a borde de referencia | Área de sonido | Columna Sonora | Zona explorada |
|----------------|--------------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| 8mm | Magnético | 0,40 | 0,90 | 0,67 | 0,48 (2) |
| S8mm | Óptico | 7,57 | | 0,50 (4) | 0,66 |
| | Magnético | 7,58 | | 0,68 | 0,53 (2) |
| 16 mm | Área variable | 1,48 | 2,95 | 1,52 | 1,80 |
| | Densidad variable | 1,48 | 2,95 | 2,03 | 1,80 |
| | Magnético | 14,55 | 2,95 | 2,55 | 2,15 (2) |
| 35 mm | Área variable | 6,30 | 2,99 | 1,93 | 2,13 |
| | Densidad variable | 6,30 | 2,99 | 2,54 | 2,13 |
| | Scope mag. Pista 1 | 1,02 | ----- | 1,60 | 1,27 |
| | Pista 2 | 5,36 | ----- | 1,60 | 1,27 |
| | Pista 3 | 20,18 | ----- | 0,97 | 0,64 |
| | Pista 4 | 33,99 | ----- | 1,60 | 1,27 |
| | Sep-Mag Pista 1 | 8,60 | ----- | 5,00 | ----- |
| | Pista 2 | 17,50 | ----- | 5,00 | ----- |
| | Pista 3 | 26,40 | ----- | 5,00 | ----- |
| | Sep-Mag Pista 1 | 7,90 | ----- | 3,80 | ----- |
| | Pista 2 | 14,30 | ----- | 3,80 | ----- |
| | Pista 3 | 20,70 | ----- | 3,80 | ----- |
| | Pista 4 | 27,10 | ----- | 3,80 | ----- |
| | 70mm | Magnético Pista 1 | 1,42 | | 4,80 (3) |
| Pista 2 | | 4,22 | | | 1,25 |
| Pista 3 | | 9,47 | | 0,80 | 1,25 |
| Pista 4 | | 60,52 | | 0,80 | 1,25 |
| Pista 5 | | 65,77 | | | 1,25 |
| Pista 6 | | 68,5 | | 4,80 | 1,25 |

2.3 Formatos de sonido en cine

La pista de audio óptica o fotográfica fue el primer método utilizado para poner el audio en la película. Actualmente, esto se ha convertido en un estándar, tanto para audio analógico como digital.

La clásica pista de audio analógica consiste en un área opaca situada de manera longitudinal a lo largo de la película, en la que se producen variaciones en la transparencia o en la amplitud del área transparente acordes a las variaciones del sonido. Cuando se reproduce la película, un haz de luz procedente de una bombilla o led en el proyector, incide sobre la pista de audio.

Las variaciones en la anchura de la pista transparente provocan variaciones en la intensidad luminosa captada por una célula fotosensible, que convierte dichas alteraciones en una señal eléctrica con idénticas perturbaciones a su salida. La señal eléctrica obtenida es amplificada y conectada a la entrada de los altavoces, en los cuales se produce la transducción electroacústica.

Las principales ventajas de este sistema, que han contribuido a su implantación como estándar, son su simplicidad y coste económico, ya que no requiere de una tecnología excesiva para llevar a cabo su grabación o reproducción.

El área sonora se registra fotográficamente sobre la película a la vez que la imagen, por lo que la perdurabilidad de la pista de audio es similar a la de la imagen. El método más común para la grabación óptica consiste en incidir con un haz de luz, que es modulado por la señal de audio, sobre el material fotosensible de la película. Así, la intensidad de la luz incidente es proporcional a la amplitud de las ondas de presión acústica del sonido a grabar.

En los soportes ópticos la información sonora puede estar registrada de diversas maneras, según sea el audio codificado analógico o digital. La figura 9 muestra la ubicación habitual de las diferentes pistas de audio en una película.

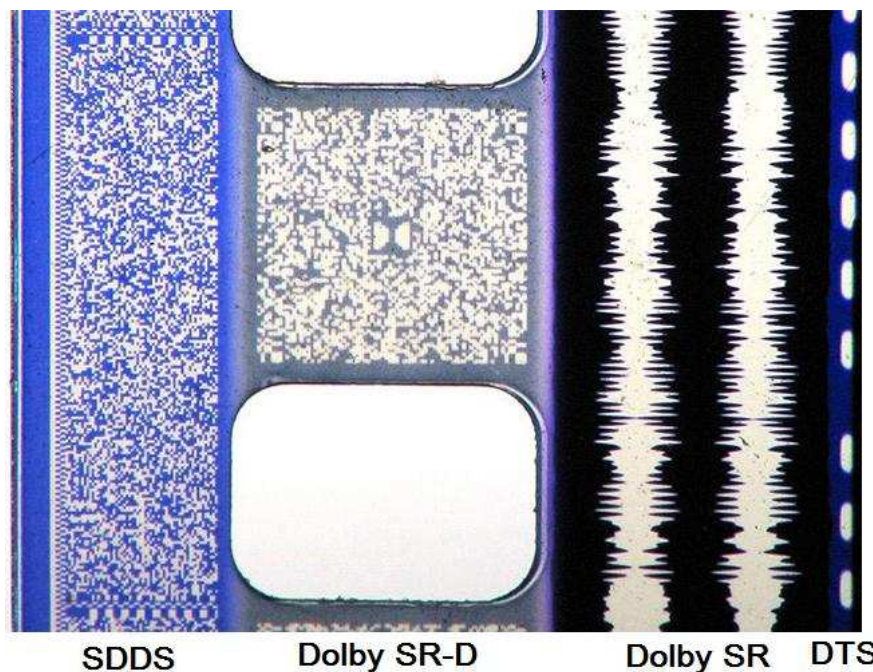


Figura 9: Distribución de los diferentes formatos ópticos de sonido en la película [6].

AUDIO DIGITAL

SDDS (*Sony Dynamic Digital Sound*), es un sistema de codificación digital de sonido multicanal, que soporta hasta ocho canales con un algoritmo de corrección de error usando una banda redundante en la película.

Dolby SR-D (*Spectral Recording-Digital*), permite la reproducción de 6 canales de audio en configuración 5.1, que supone que el canal destinado a las bajas frecuencias únicamente incluye señales de entre 20 y 120 Hz. Se utiliza una frecuencia de muestreo de 44,1 kHz con una resolución de 20 bits, cuyo régimen binario es reducido por medio de una codificación de tipo perceptual llamada AC-3. La figura 10 muestra la lectura de la pista Dolby SR-D.

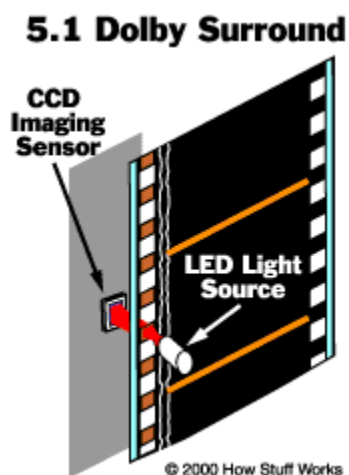


Figura 10: Lectura de la pista Dolby Digital [7].

DTS (*Digital Theater Systems*), contiene hasta 6 canales de audio con una frecuencia de muestreo de 48 kHz y una resolución de 20 bits. Utiliza una compresión 4:1 y la información impresa en la película no es el audio propiamente, sino un código de tiempo llamado SMPTE¹ que permite reproducir el audio desde un formato CD de forma sincronizada con la imagen.

AUDIO ANALÓGICO

El audio analógico, que es el que se tratará en este proyecto, puede estar codificado según dos métodos:

- a) **Densidad variable:** la modulación del sonido es registrada sobre la película fotosensible con variaciones de la intensidad de luz emitida. La amplitud de la columna sonora es constante, variando para cada instante sonoro el grado de ennegrecimiento de la película.
- b) **Área variable:** el área de la columna sonora se corresponde con las variaciones de amplitud de la onda de presión sonora. La densidad de la columna sonora permanece constante y la variable, en este caso, es la amplitud sobre la que se aplica el ennegrecimiento de la película. La figura 11 muestra un esquema del registro de la banda de área variable sobre la película.

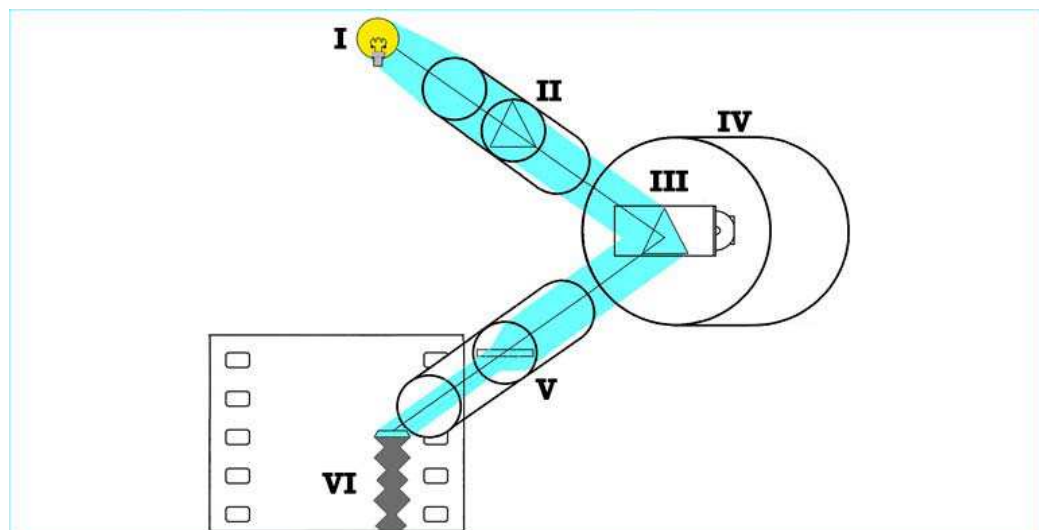


Figura 11: Esquema de un sistema de registro de área variable, con desarrollos introducidos por la R.C.A. [1].

La luz de la excitadora (I) es concentrada por una lente (II) y recortada en un *catch* triangular e incide sobre un espejo (III) giratorio, conectado a dos piezas polares que vibran siguiendo los impulsos de un galvanómetro (IV), que responde a la modulación eléctrica del micrófono.

¹ SMPTE: Society of Motion Picture and Television Engineers

Tras atravesar el *slit* de registro, la luz se concentra en una lente (V) e incide sobre la película (VI).

Según [1], puede establecerse una clasificación básica de las bandas sonoras de área variable atendiendo a la imagen que aparece impresa:

- Unilateral
- Bilateral
- Dúplex
- Doble dúplex
- Bipista
- Multipista

En la figura 12 aparece un ejemplo de cada una de estas bandas de audio.

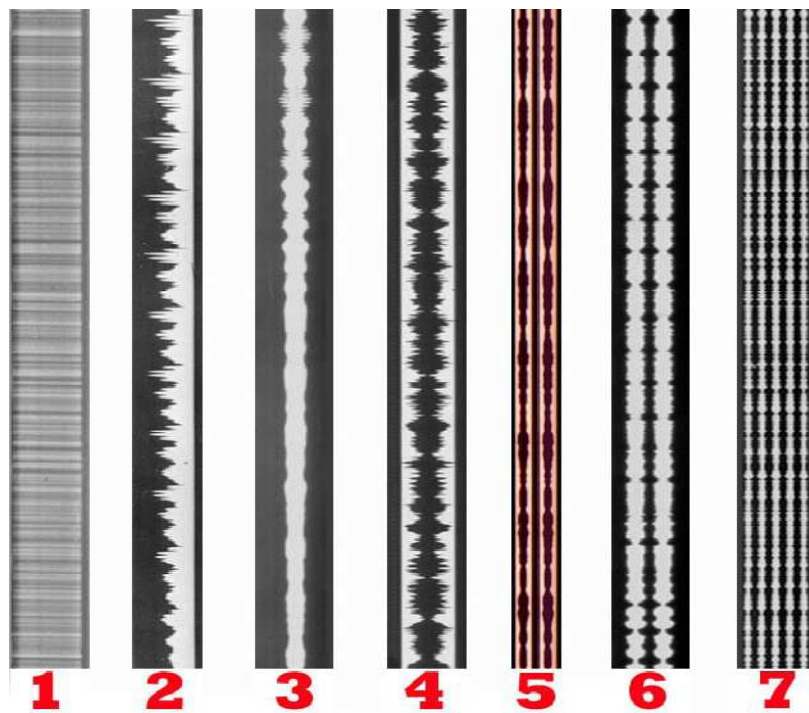


Figura 12: Diferentes tipos de bandas analógicas de sonido [1].

1.- Banda de Densidad Variable. 2.- Banda Área Variable unilateral (pista asimétrica).
3.- Banda Área Variable bilateral (pista simétrica). 4.- Banda Área Variable dúplex (dos pistas). 5.-
Banda Área Variable doble dúplex. 6.- Banda Área Variable bipista (dos pistas simétricas). 7.- Banda
Área Variable multipista (más de 3 pistas simétricas).

Para este proyecto se consideran únicamente las películas en las que el sonido esté modulado como área variable. El número de pistas de audio que contenga la película no es determinante ya que se trata cada una de manera independiente, realizando el procesado sobre una pista mono tantas veces como canales contenga la banda de audio. Puede verse un ejemplo de fragmento de película de 35mm en la figura 13.

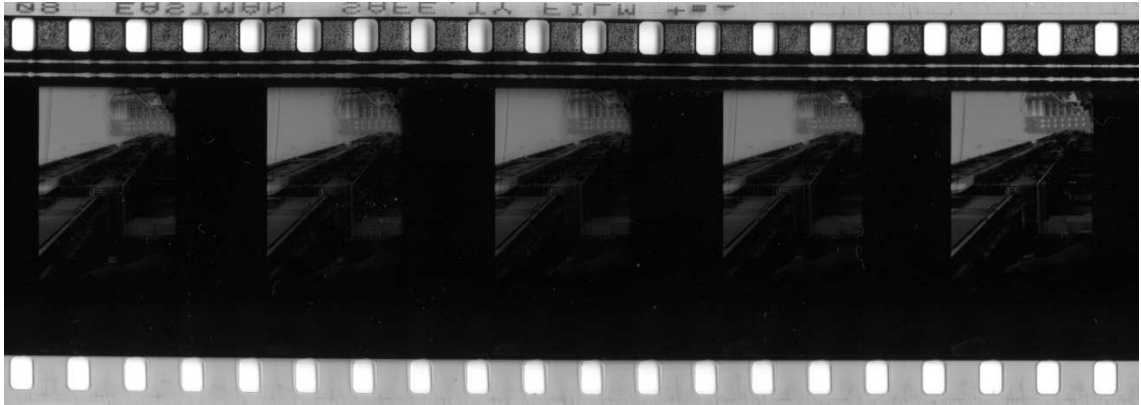


Figura 13: Muestra de una tira de fotogramas escaneados de una película de 35mm.

Como lo que realmente interesa para este proyecto es la reproducción del audio contenido en la película, independientemente del contenido visual de los fotogramas, es posible utilizar copias de sonido para el proceso. De esta manera se mantiene intacta la película original y los resultados obtenidos son igualmente válidos, siempre y cuando la columna de sonido del soporte esté en buenas condiciones. La figura 14 muestra un fragmento escaneado de una copia de sonido, el cual se ha utilizado en el proyecto.



Figura 14: Muestra de una tira escaneada de un negativo de sonido.

En las películas de 35 mm, las perforaciones tienen una anchura aproximada de 2 mm y una separación entre perforaciones de 2,5 mm. Esto puede verse en la figura 15.

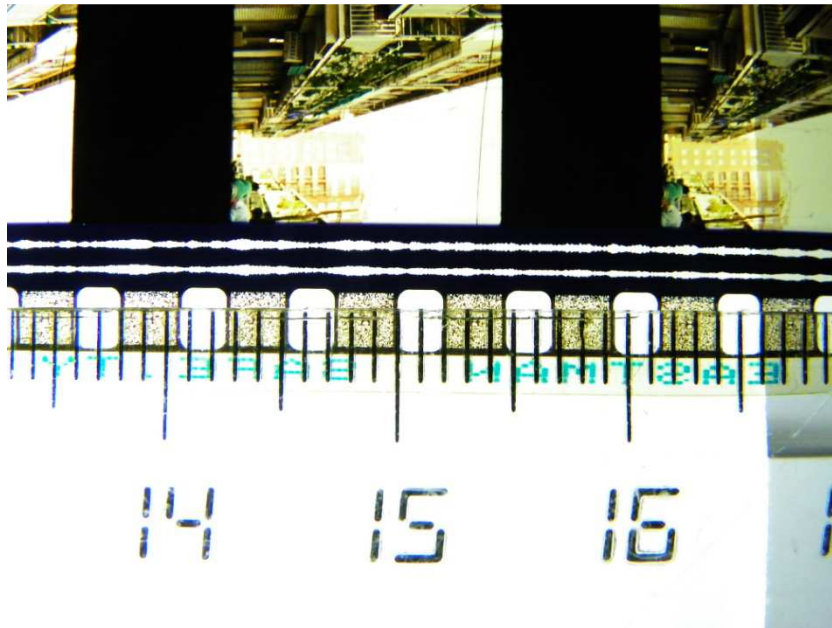


Figura 15: Medida de la separación entre perforaciones

De los 35 mm de ancho que tiene la película, el fotograma ocupa 22 mm aproximadamente. Esto puede verse en la figura 16.



Figura 16: Medida de la anchura del fotograma

La altura de los fotogramas en las películas de 35 mm es aproximadamente de 12 mm, por lo que la relación de aspectos del fotograma resulta de 1,8. La figura 17 muestra la medida de la altura del fotograma.

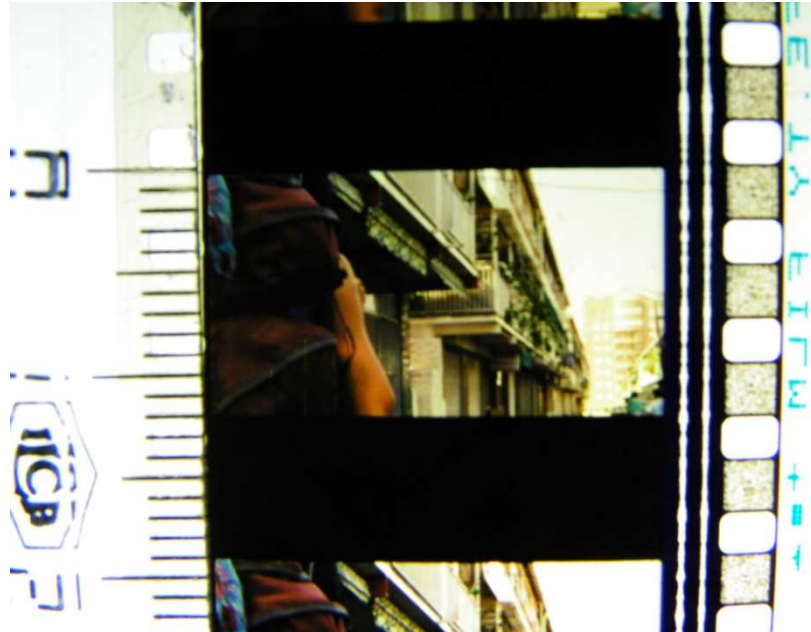


Figura 17: Medida de la altura del fotograma.

En la figura 18 aparece la medida de la anchura de la copia de sonido, también de 35mm. Además se puede apreciar que las perforaciones tienen una longitud de aproximadamente 3 mm.

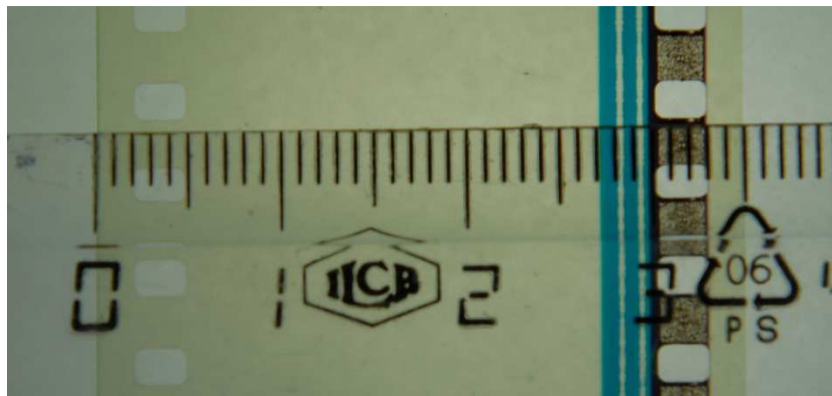


Figura 18: Medida de la anchura de la película.

Como puede verse en la figura 19, la anchura de la banda de audio dónde se encuentran las dos pistas analógicas mide 3 mm. Teniendo en cuenta que esta película contiene audio estéreo, la amplitud de la onda impresa para un solo canal de audio tiene un valor máximo de 1mm aproximadamente.

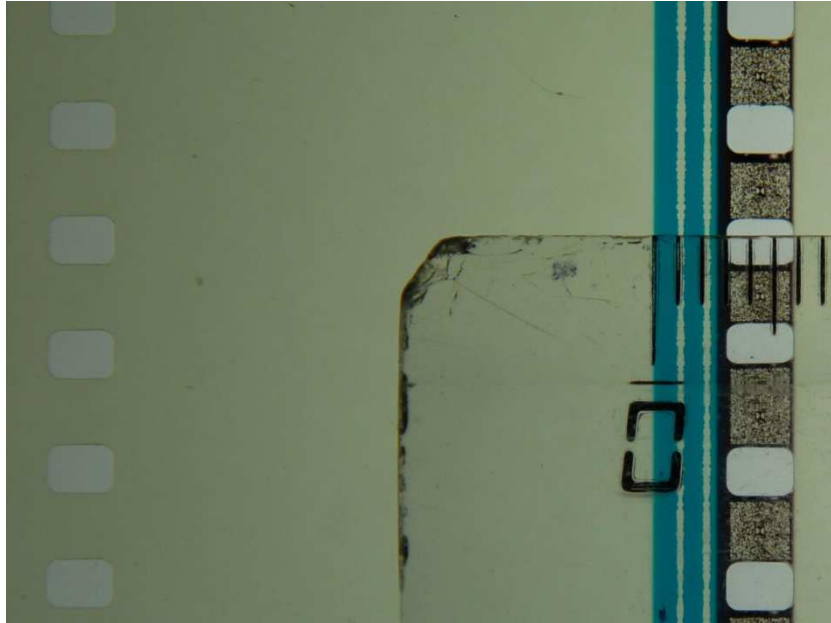


Figura 19: Medida de la anchura de la banda de audio en la película.

En lo referente a las bandas de sonido en la película, la aparición de las capas de emulsión en color trajo consigo problemas tales como la saturación de la sensibilidad de la cabeza lectora y la reducción del nivel de modulación. Esto es consecuencia de que la imagen de color formada es transparente para la luz infrarroja que emite el proyector y, por tanto, atraviesa la película.

Debido a estos problemas, el procedimiento para el registro del sonido en la película difiere ligeramente del de la imagen. Los negativos siguen produciéndose sobre emulsiones de blanco y negro. En la exposición de las copias, se intercalan filtros para que la banda sólo quede fotografiada en las capas correspondientes al cian y al magenta.

En el revelado general y el blanqueo de la película, la imagen de plata, tras haber contribuido a la formación de la imagen de color, se convierte de nuevo en bromuro de plata, preparado para ser eliminado. En ese momento, antes del fijado, la banda de sonido pasará sobre un dispositivo denominado “rueda aplicadora”, donde recibe una capa de revelador viscoso, muy activo, que volverá a transformar el bromuro de plata en plata metálica insoluble. Así se formará una imagen permanente tras el baño de fijado.

Así, en una copia en color, la imagen de cada fotograma estará formada por las imágenes de las tres capas, magenta, cian y amarillo, mientras que en la columna sonora, sólo existirá color en dos de las capas, la cian y la magenta, pero en ambas la imagen estará por partida doble: la

imagen de color correspondiente a esa capa y la imagen de plata correspondiente a ese color. En la figura 20 aparece un ejemplo de fotograma con banda magenta y cian.

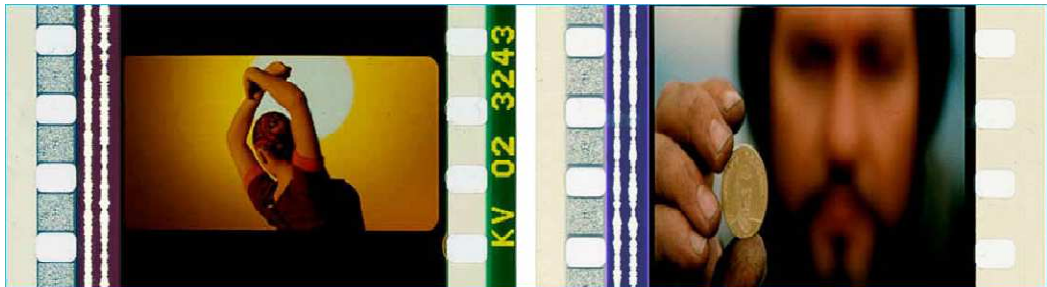


Figura 20: Banda high-magenta: “Salomé” (C. Saura, 2002). Banda cian: “Tierra de fuego” (M. Littin, 2000). [3]

Sólo para las copias procesadas en el sistema Technicolor, sobre película emulsionada para blanco y negro, las bandas sonoras se mantendrían con las densidades anteriormente estandarizadas.

En ambas películas se utilizaron dos sistemas Dolby: el analógico, en magenta para lectores de tungsteno y en cian para LED-rojo, y el digital, siempre en cian, con el registro entre perforaciones.

2.4 Principales degradaciones de la película

Atendiendo a [1] es posible diferenciar cinco fases en el proceso de descomposición del celuloide:

Fase 1: Descomposición iniciada.

A causa de la humedad o de la oxidación del envase, el material puede presentar zonas de superficie irregular desvanecidas. Es común que la descomposición comience en el centro del rollo de película o en un empalme de acetona y se manifiesta con una notable humedad del material al tacto.

Fase 2: Descomposición grave.

La imagen presenta irregularidades en forma de manchas de diferente transparencia, pero todavía se puede reproducir el material. Es posible que los fotogramas situados junto a un empalme, en las espiras anteriores y posteriores, presenten destrucción total de imagen. Esta fase se identifica por el tacto húmedo y ligeramente pegajoso del soporte o la emulsión y puede verse un ejemplo en la figura 21.



Figura 21: Fotograma con degradación de fase 2 [1].

Fase 3: Descomposición muy grave.

Aparecen manchas en las que se pierde totalmente la imagen, siendo imposible su recuperación. Estas manchas pueden afectar a uno o varios fotogramas, y pueden ser prácticamente transparentes o provocar en la emulsión movimiento, torsión o

reblandecimiento de la misma. Al tacto, el material es totalmente pegajoso. En la figura 22 se muestra un fotograma en esta fase.

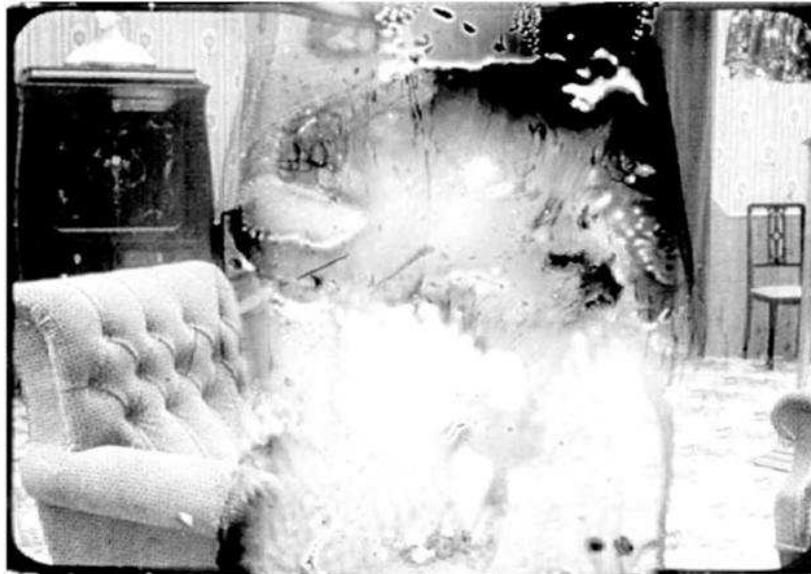


Figura 22: Fotograma con degradación de fase 3 [1].

Fase 4: Pérdida total.

La película se ha vuelto casi transparente y no quedan restos de imagen. El rollo se convierte en una masa sólida y pegajosa que presenta exudaciones de aspecto viscoso. Esto dificulta la manipulación de la película, ya que el material que se consigue separar del rollo es muy frágil.

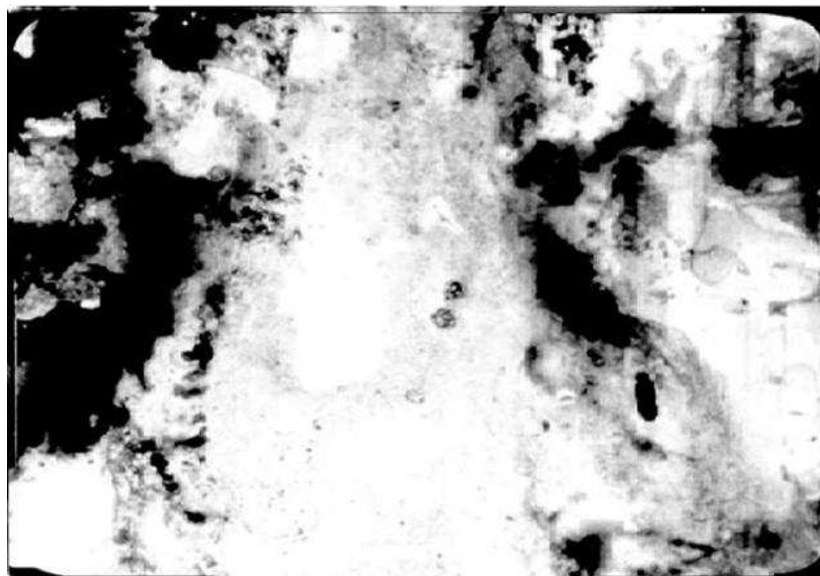


Figura 23: Fotograma con pérdida total de imagen, fase 4 [1].

Además de las degradaciones químicas en la película, pueden darse simultáneamente alteraciones físicas en el soporte.

Pérdida de dimensiones

Debido a la evaporación de los compuestos plastificantes de la película, ésta puede sufrir deformaciones tanto en sentido longitudinal como transversal hasta que dichos compuestos se evaporan totalmente. Las contracciones del soporte en ambas direcciones no tienen por qué guardar proporción alguna, ya que depende de las condiciones de almacenamiento, envasado y enrollado. La contracción longitudinal es más notable en la película que la transversal, ya que al acumularse fotograma tras fotograma puede producir efectos más destructivos.

Un valor habitual de contracción en soportes de celuloide, que puede alcanzarse en pocos años, es de un 1% de la longitud [1]. A medida que se incrementa la contracción es necesario modificar el enrollado de la película para evitar un incremento de la presión entre las espiras próximas al núcleo.

Los efectos más aparentes de esta degradación son la aparición de roturas, desgarramientos y deformaciones en los empalmes y puntos donde no pueda producirse el deslizamiento de la película. Además, es común que la película adquiera una curvatura poliédrica, tal y como se muestra en la figura 24.



Figura 24: Rollo de película afectado por la contracción [1].

Para materiales que hayan sufrido contracciones cercanas al 1% la norma exige el uso de equipos especiales para su reproducción.

Pérdida de elasticidad.

Como consecuencia de la evaporación del plastificante, también aparece un efecto de pérdida de elasticidad característica de los soportes, que se hace patente en la película con una tendencia a conservar la forma en la que estaba enrollada. Esta degradación causa en la película una curvatura tanto longitudinal como transversal.

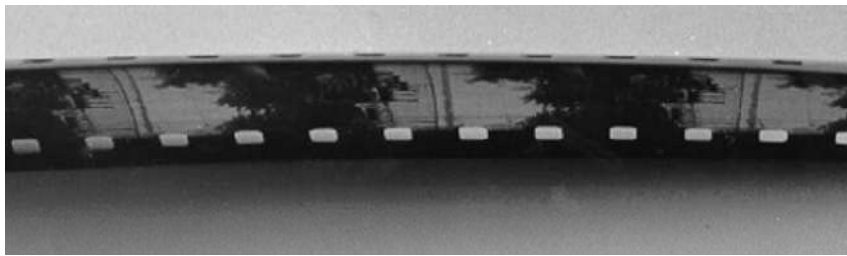


Figura 25: Curvatura de un fragmento de película como consecuencia de la pérdida de elasticidad [1].

La pérdida de elasticidad aumenta el riesgo de roturas, llegando en un último extremo del proceso a fragmentarse la película al ser enrollada sobre rodillos de pequeño diámetro.

Pérdida de adherencia

Cuando tienen lugar simultáneamente las degradaciones anteriores, aparece una tendencia a que el soporte y la emulsión se desprendan. En función de cuál sea la acción predominante (contracción o variación de humedad), los efectos pueden ser desde la craquelación o cuarteamiento de la emulsión al desprendimiento laminar de la misma.

Degradaciones del color

La falta de estabilidad en las condiciones de temperatura y humedad de la película produce una degradación en las capas de emulsión, siendo mayor el efecto sobre la capa cian que es la más externa. Al eliminar el cian en una emulsión sustractiva la imagen toma un tono anaranjado, ya que desaparecen progresivamente desde los matices azules hasta los verdes. La figura 26 muestra una comparación entre un fotograma en buen estado y el mismo fotograma tras sufrir una degradación de color.



Figura 26: Comparación entre fotograma original (izquierda) y fotograma con degradación de color (derecha) [1].

Las consecuencias de esta degradación sólo admiten restauración mediante técnicas de tratamiento digital de imagen, aplicando el proceso fotograma a fotograma.

2.5 Justificación matemática

El proyecto se divide en tres etapas fundamentales:



Figura 27: Etapas definidas para realizar la conversión óptico - sonora.

El método utilizado en el proyecto se corresponde con el esquema básico de un conversor analógico – digital, en el que la señal analógica es la imagen de la forma de onda del audio en la película y la señal digital es el audio generado. Como en todo conversor analógico – digital, aparecen tres procesos fundamentales: muestreo, cuantificación y codificación.

Matemáticamente el muestreo se describe por medio de la ecuación 1.

$$x[n] = x_a(nT), \quad -\infty < n < \infty \quad (1)$$

Donde $x[n]$ corresponde a la señal en tiempo discreto obtenida tomando valores de la señal analógica x_a cada T segundos.

Cabe destacar que el proceso de muestreo no introduce distorsión ni pérdida de información, siempre y cuando el ancho de banda de la señal a muestrear sea limitado.

Esto consiste en muestrear con una frecuencia mayor o igual que el doble de la frecuencia máxima a digitalizar, es decir, el periodo de muestreo debe ser al menos la mitad del periodo de la frecuencia más alta. En la práctica, esto se conoce como Teorema de Nyquist² o Teorema de Muestreo y establece las bases para evitar la aparición de aliasing.

En el caso del muestreo de la forma de onda sobre la película, el periodo de muestreo se transforma a periodo espacial, ya que en la imagen un segundo se corresponde con 39,4 cm. Por tanto, en lugar de hablar de muestras por segundo se hablará de puntos por pulgada para facilitar el proceso.

Para conseguir un resultado aceptable en la reproducción del sonido procesado digitalmente, hay que tener en cuenta dos parámetros fundamentales en la digitalización: resolución en frecuencia y resolución de amplitud.

Para obtener una respuesta en frecuencia de 20 kHz, aplicando el teorema de Nyquist será necesario tomar 40000 muestras por segundo. Para realizar los cálculos se tomará el valor estandarizado de 44,1 kHz de frecuencia de muestreo.

Teniendo en cuenta que en la reproducción de la película se muestran 24 fotogramas por segundo y que la altura de un fotograma es de 16 mm calculamos que un segundo de reproducción es equivalente a 38,4 cm de película. Con este valor es posible calcular la resolución mínima necesaria para escanear. Esto aparece en las ecuaciones 2 y 3 respectivamente.

$$24 \frac{\text{fotogramas}}{s} \cdot 16 \frac{\text{mm}}{\text{fotograma}} = 0,384 \frac{m}{s} \quad (2)$$

$$ppp_{min} = 44100 \frac{\text{muestras}}{s} \cdot \frac{1 s}{0,384 m} \cdot \frac{1m}{39,37''} = 2917 ppp \quad (3)$$

Por tanto, la resolución mínima que permite mantener la respuesta en frecuencia de audio es de 2917 ppp.

² Teorema de Nyquist: Al realizar el muestreo de una señal continua podemos garantizar que no hay pérdida de información siempre que la frecuencia de muestreo sea, al menos, el doble de la frecuencia máxima de la señal.

Para calcular la frecuencia de muestreo necesaria para reproducir el audio obtenido es necesario obtener previamente la velocidad de arrastre de la película en pulgadas por segundo. Esto se muestra en la ecuación 4. La ecuación 5 calcula la frecuencia de muestreo a partir de la velocidad de la película y la resolución de escaneado en puntos por pulgada.

$$0,384 \frac{m}{s} \cdot \frac{39,37''}{1 m} = 15,12''/s \quad (4)$$

$$f_s = \frac{15,12''}{1 s} \cdot ppp \quad (5)$$

$$f_{s_{3200ppp}} = 15,12'' \cdot 3200 ppp = 48384 Hz \quad (6)$$

$$f_{s_{4800ppp}} = 15,12'' \cdot 4800 ppp = 72576 Hz \quad (7)$$

Las ecuaciones 6 y 7 calculan la frecuencia de muestreo en puntos o píxeles por segundo para las resoluciones de escaneado que se han utilizado en este proyecto, 3200ppp y 4800ppp respectivamente.

3. Descripción experimental

Los principios de la grabación sonora en soportes fotográficos, como son las películas utilizadas en cine, se remontan a 1920. Durante varios años, cientos de teatros estaban equipados para exhibir “imágenes que hablaban” con pistas de audio ópticas.

La rápida aceptación de estos sistemas hizo que se instalasen en la mayoría de los cines en un corto periodo de tiempo, hecho que forzó el desarrollo y mejora de los sistemas sonoros. Un claro ejemplo de esto es la evolución de los altavoces instalados en las salas. En un principio, la respuesta en frecuencia de los altavoces era demasiado pobre y tras unos años, aparecieron nuevos modelos que conseguían ampliar su respuesta en frecuencia.

Para los encargados de grabar el sonido esto supuso un dilema. Se podía registrar el audio en la película adaptando la frecuencia máxima a los últimos avances conseguidos en la reproducción sonora, pero muchas salas conservaban los sistemas de reproducción antiguos y no llegarían a reproducir las altas frecuencias. Dado que no era viable grabar la pista sonora con dos calidades diferentes para cada tipo de sistema, se optó por ignorar las altas frecuencias y mantener la calidad sonora de los sistemas antiguos.

En 1905, Eugene Augustin Lauste construyó uno de los primeros sistemas para grabar y reproducir simultáneamente imagen y sonido en la misma película. El diseño estaba compuesto por dos láminas metálicas, una de ellas fija y la restante móvil, siendo sus desplazamientos proporcionales a la influencia del campo electromagnético generado a la salida del micrófono.

Al proyectar un haz de luz contra las láminas, la luz que pasa a través de la ranura que queda entre ambas, incide sobre la película con diferente intensidad en función de la modulación. Esto fue el origen de los sistemas de densidad variable.

El principal inconveniente que presentaba este sistema era la excesiva inercia en el movimiento de las láminas, lo que dificultaba una respuesta satisfactoria en altas frecuencias. Además, la salida eléctrica del sistema era insuficiente para alimentar altavoces, siendo necesaria la escucha por auriculares.

El soporte utilizado por Lauste era la película de 35mm y en ella destinaba la mitad de la anchura para la imagen y la mitad restante para el sonido. La velocidad de desplazamiento de la película en este sistema era de 18,29 metros por minuto, es decir, 0,3 metros por segundo.

Para solventar el problema de la respuesta en alta frecuencia, Lauste propuso un método de grabación en diagonal a lo largo de la película, lo que supone un incremento de la velocidad de la pista de audio.

En 1919, el inventor americano Lee De Forest realizó varias patentes de aplicación comercial del sonido. En el sistema propuesto, Phonofilm, la pista de audio estaba grabada de manera fotográfica en el lateral de la película. De esta forma, si la grabación del sonido en la película estaba sincronizada con la imagen, se garantizaba que en la reproducción también hubiera sincronización.

En 1922, en el cine Alhabama de Berlín tuvo lugar la primera demostración pública del sistema Triergon, en el que la imagen y el sonido estaban registrados sobre una película de 42mm de ancho, con una velocidad de 20 imágenes por segundo.

Para la realización de este proyecto se ha elegido una película de 35 mm con pista de audio Dolby SR³ estéreo de área variable como soporte de partida. Ya que el fin de este proyecto es obtener el sonido presente en la película por medio del procesado digital de imagen, es posible aplicar técnicas de restauración sobre las imágenes de la forma de onda. Esto permite eliminar ruidos y llegar a obtener el sonido de fotogramas en los que la película se encuentre demasiado degradada como para poder ser reproducida.

Por ello, se proponen varios métodos para realizar el proceso de digitalización de la imagen garantizando la mínima degradación sobre la película.

3.1 Digitalización mediante fotografía.

Tras realizar pruebas de toma de fotografías sobre la película, quedó patente que no se obtenía la resolución suficiente para codificar la imagen a sonido. Por ello, se optó por realizar las fotografías sobre una pantalla blanca en la que se proyectaba la banda de audio de la película.

Con esta técnica se consigue ampliar la superficie a fotografiar en un factor de hasta 66,7 veces, es decir, la banda de audio que sobre la película tiene una anchura de 3mm pasa en la proyección a ocupar 20cm.

³ Dolby Spectral Recording: Sistema de codificación óptica del audio en el que se registra en la película la forma de onda del sonido.

El inconveniente principal que presenta este método es el tiempo requerido para llegar a digitalizar un fotograma, ya que son necesarias varias fotografías con pequeños desplazamientos de la película.

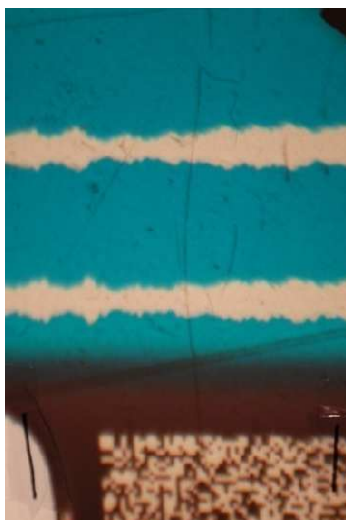


Figura 28: Fotografía de la banda de audio analógica tomada sobre la imagen proyectada.

Para este método de digitalización, se ha proyectado la película sobre una pantalla de proyección blanca a una distancia de 5 m. La lente del proyector tiene una apertura de 1:2,8 y la distancia focal es de 90 mm.

Tabla 2: Equipamiento utilizado para la digitalización por fotografía.

| Equipo | Marca | Modelo | Características |
|------------------------|----------|-------------|------------------------|
| Cámara de fotos | Nikon | D200 | 12Mpix |
| Objetivo | Nikon | AF-S Nikkor | 24 -70mm |
| Proyector diapositivas | Reflecta | Diamator AF | Lente de 1:2,8 – 90 mm |

3.2 Digitalización por medio de escaneado.

En este segundo método de digitalización se utiliza un escáner de negativos fotográficos, que posibilita obtener la imagen de varios fotogramas simultáneamente.

Se ha realizado el escaneo de la película tomando el positivo de la imagen, con 8 bits/pixel en escala de grises y distintas resoluciones. Teniendo en cuenta que la resolución mínima necesaria para digitalizar la imagen sin pérdidas de información es de 2512 ppp, se opta por escanear con resoluciones de 3200 y 4800 ppp respectivamente.

En la figura 29 se muestra la longitud de película que permite digitalizar el escáner utilizado, que es de 30 centímetros.

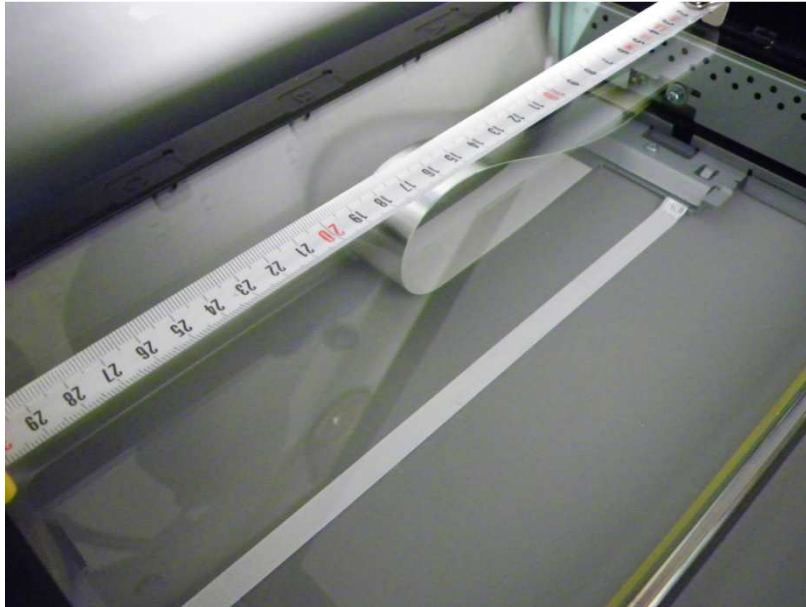


Figura 29: Medida de la longitud de escaneado.

Utilizando este método de digitalización es determinante la correcta colocación de la película en el escáner, ya que el más mínimo desplazamiento de la misma provocaría una alteración de la imagen obtenida con respecto a la original. Además de mantener la banda de audio paralela al eje longitudinal del escáner es fundamental que toda la superficie que se va a digitalizar de la película se mantenga en contacto con el cristal, ya que, de no ser así, se produciría un desenfoque en la captura.

La figura 30 muestra la colocación de la película sobre el escáner para proceder a su digitalización.



Figura 30: Colocación de la película para su escaneado.

El proceso es similar al escaneado de un documento, con la única salvedad de que cabe la opción de escanear material transparente en lugar de reflectante. En el caso de la película se puede utilizar cualquiera de los dos métodos obteniendo una calidad similar en la imagen capturada.

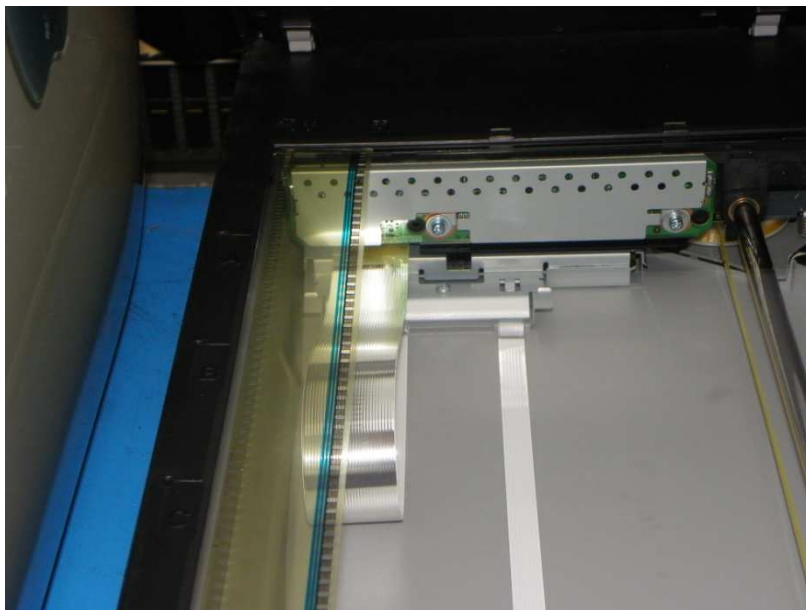


Figura 31: Vista frontal de la colocación de la película en el escaner.



Figura 32: Muestra de escaneo de la película con una resolución de 3200ppp

Gracias a la colaboración de la Filmoteca Española, ha se han podido realizar pruebas con un escáner profesional de fotogramas. En este caso, la película está en movimiento durante el proceso y el escáner efectúa la toma de imagen siguiendo el patrón de perforaciones. Debido a esto, dos imágenes consecutivas no presentan solapamiento ni quedan espacios entre ambas sin escanear.

La figura 33 muestra un fotograma tomado con el escáner de fotogramas en tiempo real. A pesar de ser un dispositivo capaz de digitalizar la película de forma automática, sin necesidad de interacciones durante el proceso, este método se ha descartado debido a que la resolución de las imágenes tomadas es de 96ppp, muy inferior a los valores utilizados en el escáner doméstico.

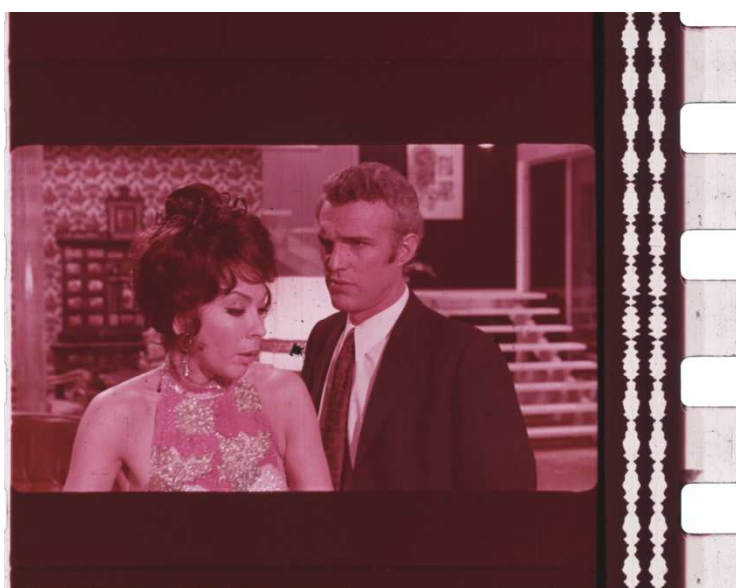


Figura 33: Imagen digitalizada mediante escáner profesional de fotogramas.

La resolución utilizada para escanear este fotograma es insuficiente para obtener el audio que contiene. En la figura 33 se muestra la forma de onda de una de las pistas de audio y puede apreciarse como las variaciones de amplitud no son continuas, es decir, se ha perdido información al utilizar tan baja resolución en el escaneo.



Figura 34: Forma de onda del audio contenido en un fotograma de la película.

En la figura 34 se amplía parte de la figura 33 y se ven claramente los cortes en la forma de onda, apareciendo hasta cuatro discontinuidades en el fragmento seleccionado.



Figura 35: Ampliación de la zona central de la figura 33.

3.3 Diseño del programa

El prototipo diseñado para llevar a cabo la conversión óptico-sonora se ha realizado en Matlab y sigue un algoritmo recursivo, en el que la secuencia de imágenes de la forma de onda es procesada y almacenada en un array de salida correspondiente al audio digital. Para ello, es necesario que las imágenes tengan un nombre cuyos últimos caracteres sean números consecutivos, ya que el algoritmo diseñado va obteniendo las imágenes de forma consecutiva.

La ruta de las imágenes es localizada mediante un menú de selección por carpetas, y se procesan todas las imágenes de la carpeta que tengan el nombre marcado y números consecutivos. Para el siguiente ejemplo, la sucesión de imágenes a procesar comparte el nombre “4800ppp” seguido del índice de la imagen. Por tanto, se selecciona como primera imagen “4800ppp.bmp” y posteriormente se marcará el rango de subíndices a procesar.

La figura 33 muestra la ejecución del programa en el punto de selección del directorio y de la imagen por medio de ventanas.

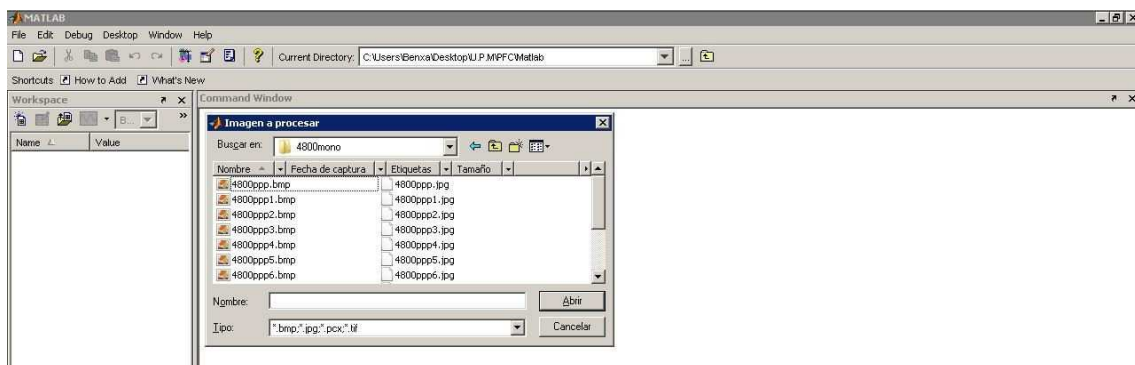


Figura 36: Selección del directorio dónde se encuentran las imágenes a procesar.

```

clc;close all;clear all; %Borrado de variables

[fichero, path] = uigetfile(['*.bmp;*.jpg;*.pcx;*.tif'],'Imagen a
procesar');
aux = findstr(fichero, '.');%variable auxiliar para detectar la posición del
caracter '.'
extension = fichero(aux:end);
fichero = fichero(1:aux-1)%Almacena el nombre del fichero sin la extensión
nombre = strcat(path, fichero);

```

Código 1. Inicialización y selección del directorio de las imágenes.

A continuación se determina la primera imagen que se va a procesar de la secuencia marcada anteriormente. En la imagen 34 aparece una captura de pantalla de la ejecución del programa en la que se solicita el índice de la primera imagen.



Figura 37: Selección de la primera imagen para procesar.

Para establecer el índice de la primera imagen es suficiente con teclear el número correspondiente y pulsar la tecla *enter*. En el ejemplo que se aborda, la primera imagen a procesar es “4800ppp1.bmp”, por tanto, se introduce el valor “1”. La figura 35 muestra el resultado de esta ejecución.



Figura 38: Selección del número de imágenes que se van a procesar.

Seguidamente, es necesario determinar el número de imágenes que van a ser procesadas por el programa. Para este ejemplo, se procesa desde la imagen “4800ppp1.bmp” hasta “4800ppp7.bmp”, por lo que el número de imágenes a procesar es de 6.

Una vez determinado este valor, el programa presenta la apariencia mostrada en la figura 36.



Figura 39: Selección del umbral elegido para realizar la binarización.

A continuación se solicita un valor que marca el umbral para realizar la binarización de las imágenes. Aunque es necesario introducir el umbral en este punto, el proceso de binarización se realiza más adelante, por lo que será entonces cuando se explicará. Para este ejemplo, el umbral de binarización se establece en 110.

```
indi = input('Introduzca el índice de la primera imagen a procesar... ');
%Índice para abrir las imágenes a procesar
indice = indi - 1;
numimagenes = input ('Introduzca el número de imágenes a procesar...');
%Cantidad de imágenes que se van a procesar
Y = zeros (1,5);%inicialización del array de salida

%UMBRAL PARA TODAS LAS IMAGENES
umbral = input('Introduzca el umbral de binarizacion comprendido entre 0 y
255: ');
while((umbral<0)|| (umbral>255))
    umbral = input('Introduzca un umbral de binarizacion comprendido entre
0 y 255 : ');
end
```

Código 2. Selección del umbral de binarización.

Seguidamente, el programa ofrece la opción de visualizar los histogramas de cada una de las imágenes de la secuencia una vez que empieza el procesado de las mismas. La figura 37 muestra el resultado de estas operaciones.

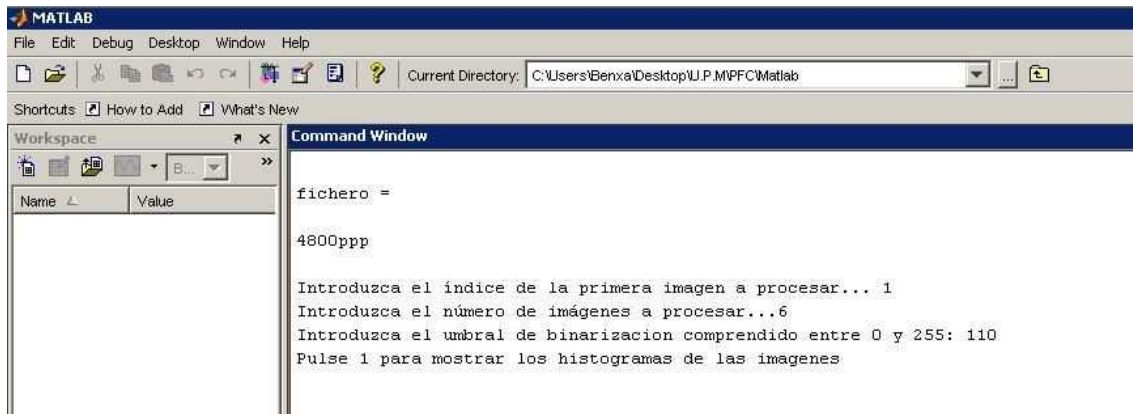


Figura 40: Opción de mostrar los histogramas de las imágenes.

Como parte del procesamiento de la imagen, se realiza sobre la misma un filtrado de mediana⁴ para minimizar el efecto de ruido que puede aparecer en forma de píxeles blancos distribuidos aleatoriamente. Esto se apreciaría en el audio en forma de ruido de ancho espectro y podría llegar a hacer ininteligible la palabra.

Para realizar el filtrado es necesario determinar las dimensiones de la matriz que actúa como máscara, introduciendo el valor numérico de una de las dimensiones. Para el ejemplo que se trata, se realiza un filtrado de mediana con una máscara de 5x5.

```
H = input ('Pulse 1 para mostrar los histogramas de las imágenes ');
a = input ('Introduzca la dimensión de la máscara para realizar filtrado de mediana sobre todas las imágenes:');
```

Código 3. Opción para visualizar histograma e introducir el tamaño de la máscara de filtrado.

⁴ Filtro de mediana: consiste en la aplicación a cada uno de los píxeles de la imagen de una matriz de tamaño NxN compuesta por números enteros y que genera un nuevo valor mediante una función (cálculo de la mediana) con el valor original y los valores de los píxeles circundantes.

El programa aparece después de este proceso como se muestra en la figura 38.

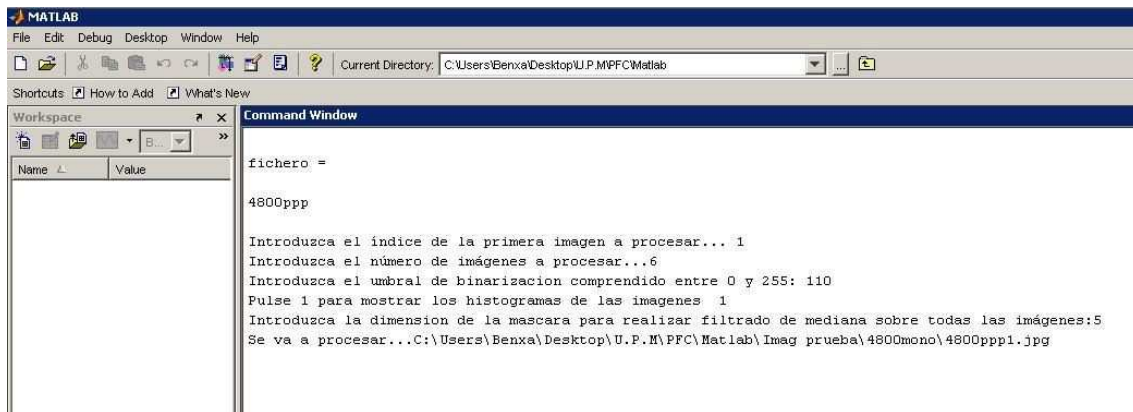


Figura 41: Ejecución del procesado sobre la primera imagen seleccionada.

Para cada una de las imágenes de la secuencia, el primer paso del procesado consiste en almacenarla en Matlab como una matriz bidimensional. Esto supone que no se considera la información de color si la hubiera, es decir, la matriz contiene para cada elemento el valor de brillo de la imagen en el pixel correspondiente. En el caso de que la matriz formada sea tridimensional (imágenes en color), el programa realiza una conversión a escala de grises de forma automática.

```
% //// Comprobación de escala de grises ////
[M,N,componentes]= size (x);
if componentes > 1
    x2 = convertir_monocromo (x,M,N);
    x = x2;
end
```

Código 4. Comprueba si la imagen está en color.

```
function y = convertir_monocromo (X,I,J)

y = zeros (I,J);

for i = 1:I
    for j = 1:J

        r = X(i,j,1);
        g = X(i,j,2);
        b = X(i,j,3);

        a = fix((0.299 * r) + (0.587 * g) + (0.114 * b));
        y(i,j) = a;
        clear r;clear g;clear b;clear a;
    end
end
```

Código 5. Obtiene una imagen monocroma de una imagen en color.

Seguidamente, se realiza el filtrado de mediana sobre las imágenes obteniendo así una imagen en la que para cada píxel se sustituye el nivel de gris por el valor mediano de los puntos contenidos en la máscara.

```
x = medfilt2(x,[a a]); %/// Filtrado de mediana sobre la imagen
```

Código 6. Realiza un filtrado de mediana sobre una imagen.

A cada imagen se le aplica un proceso de binarización, en el cuál, los valores de brillo de la imagen que pueden tomar 256 valores⁵, comprendidos entre 0 y 255, pasan a un rango de dos valores únicos correspondientes al negro y al blanco. El número que determina el rango de brillos que pasan a tener un valor máximo o mínimo es el anteriormente mencionado umbral de binarización.

```
function y = binarizar (x,umbral)

[m,n]=size (x);

y = zeros(m,n);

for i=1:m
    for j =1:n
        if (x(i,j)>(umbral-1))
            y(i,j)=255;
        end
    end
end
y=uint8(y);
```

Código 7. Binarización de la imagen.

La binarización supone una pérdida de información variable, ya que en función de los umbrales aplicados se tomaran como nulos píxeles que en escala de grises no eran negros. Asumiendo que se produce dicha pérdida de información, la binarización es fundamental teniendo en cuenta que el siguiente proceso consiste en cuantificar la amplitud de la señal, es decir, obtener el número de píxeles blancos para cada columna de píxeles.

La variable de salida de la cuantificación es un array que contiene, para cada columna de píxeles, el número de píxeles de amplitud. A dicho array se concatenan los obtenidos en imágenes posteriores, por lo que se obtiene una única fila de valores y de longitud igual a la suma de las longitudes de las imágenes procesadas.

⁵ Se consigue un rango de 256 valores de brillo para una resolución de 8 bits, que es la empleada habitualmente.

```

%Función para convertir de imagen binarizada a array de amplitudes en cada
pixel
function amplitudes = cuantificar (y)

[M,N] = size (y);
amplitudes = zeros (1,N);

for i = 1:N
    for j = 1:M
        if (y(j,i)== 255)
            amplitudes(i)= amplitudes(i) + 1;
        end
    end
end
end

```

Código 8. Conversión de imagen binarizada a array de amplitudes.

En la figura 39 aparece una muestra de la representación del histograma junto a la imagen original.

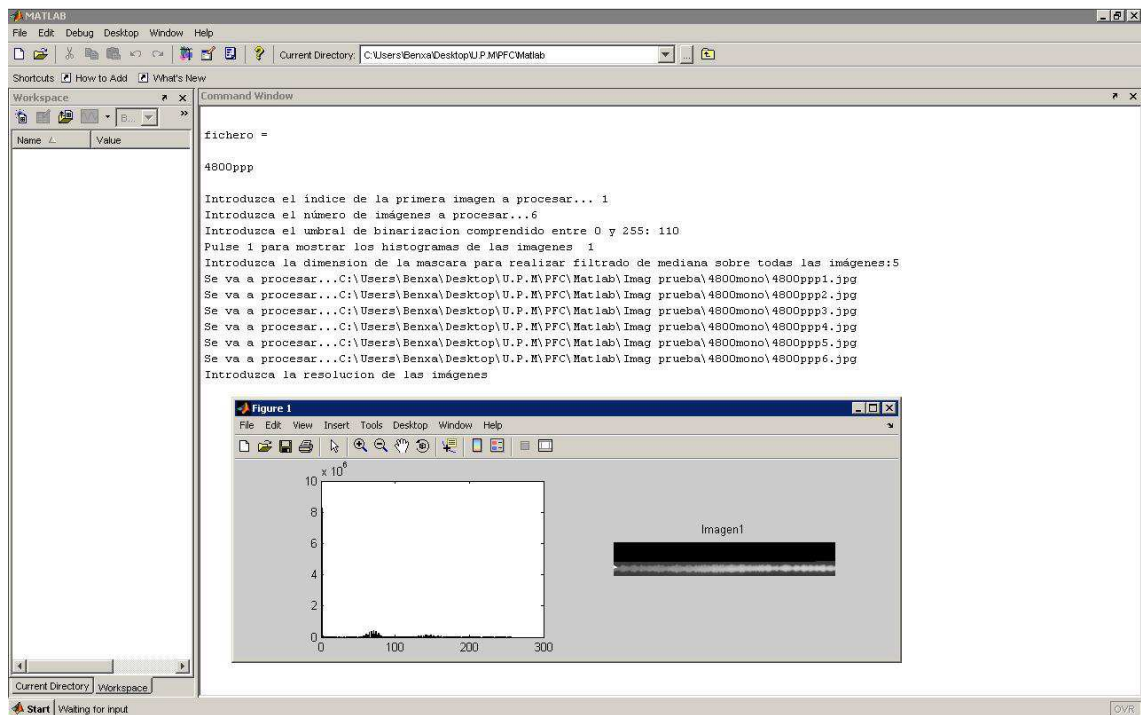


Figura 42: Fin del procesado de las imágenes y muestra de histograma.

Una vez procesadas todas las imágenes, el array de amplitudes resultante es representado como forma de onda del sonido obtenido y se presenta la opción de reproducir el audio generado. Esto puede verse en la figura 43.

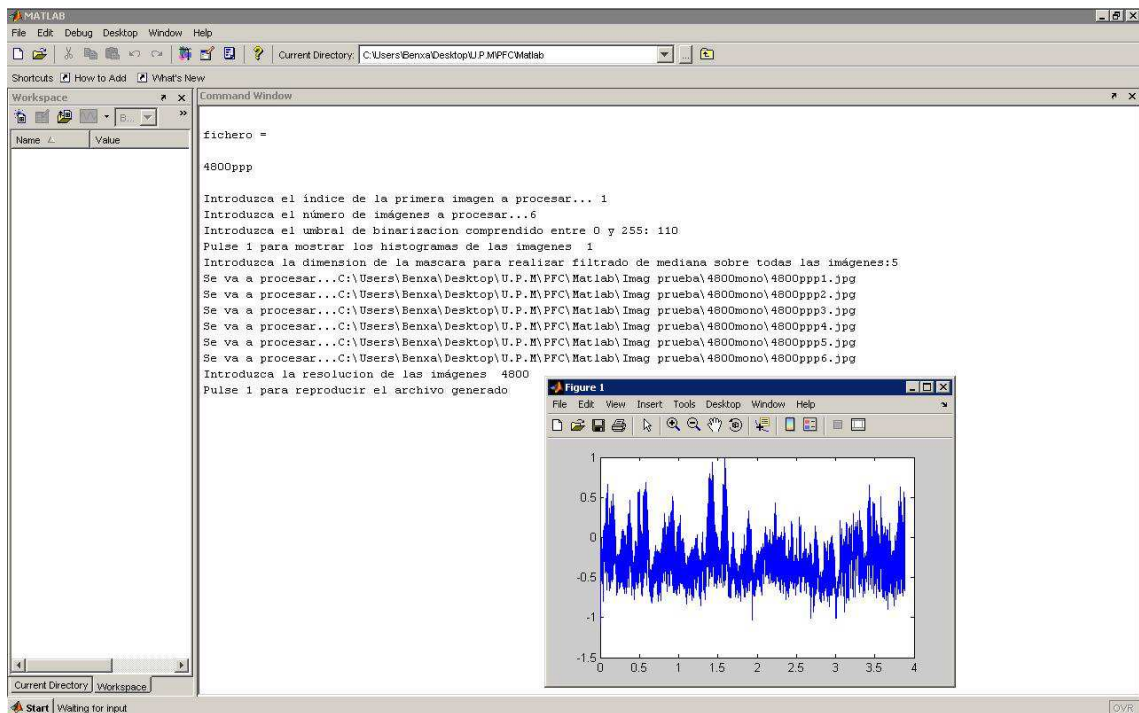


Figura 43: Opción para reproducir el audio obtenido tras el proceso, del que se muestra la forma de onda.

Para poder reproducir el audio obtenido es necesario calcular la frecuencia de muestreo, que depende en cada caso de la resolución utilizada en el escaneo. Así, el utilizar una resolución alta supone un incremento de la frecuencia de muestreo y, de manera análoga, utilizar una resolución baja implica una menor frecuencia de muestreo.

```

function fs = calculofs (resolucion)
fs = resolucion * (17.825);
  
```

Código 9. Cálculo de la frecuencia de muestreo.

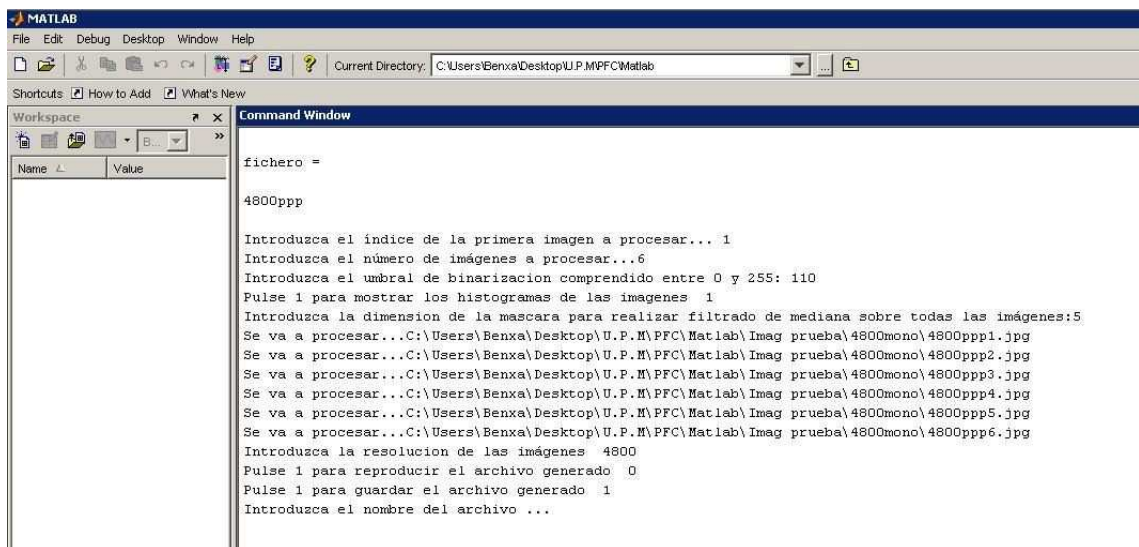


Figura 44: Opción para guardar el audio generado en un archivo ".wav".

La figura 45 muestra la forma de onda del audio que se ha obtenido tras ser procesado el fragmento de película del ejemplo.

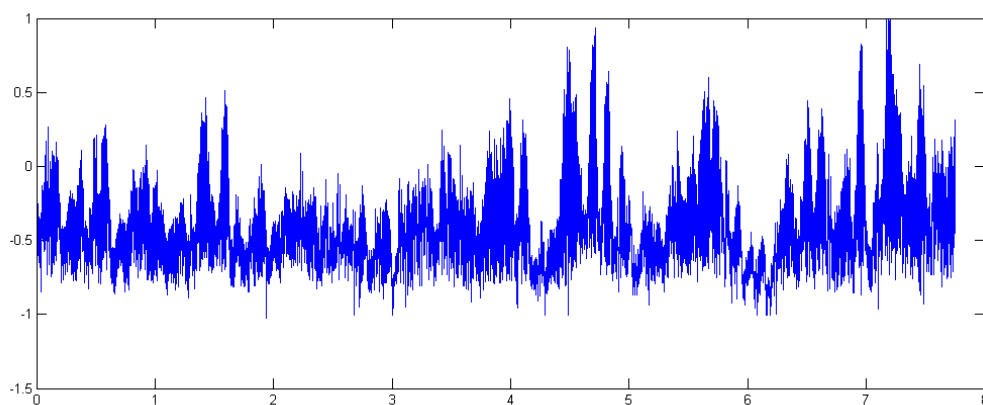


Figura 45: Forma de onda del audio obtenido tras el proceso.

4 Conclusiones

Con este proyecto se pretendía encontrar un método de bajo presupuesto que permita capturar el audio impreso de manera óptica en los soportes filmicos de cine. Dadas las condiciones de partida y que la conversión óptico-sonora se hace mediante procesado digital de imagen, el principal problema surgió a la hora de decidir el método de digitalización de la imagen.

Empleando la digitalización mediante escaneo se consigue una resolución adecuada para preservar la información sonora, obteniendo un archivo de audio inteligible y con una calidad aceptable. Además, al realizar la digitalización manteniendo estática la película es posible obtener el audio de soportes que presenten una notable degradación y restaurar por medio del tratamiento digital de imagen la información sonora que contienen.

Características conseguidas:

- Reproducción aceptable del audio
- Conversión de imágenes en color a monocromo
- Automatización del procesado de la secuencia de imágenes.
- Opción de guardar el audio generado como archivo “.wav” a 44,1 kHz

Con el diseño propuesto se ha conseguido obtener una reproducción del audio a una calidad aceptable, siendo inteligible la palabra. Cabe destacar que quedan fuera del alcance de este proyecto las medidas objetivas de calidad del audio obtenido, tales como la relación señal/ruido.

El método de digitalización que permite obtener la mayor resolución de las imágenes es el de fotografía, pero se ha descartado esta alternativa debido a que el sistema realiza un mínimo de 6 imágenes por fotograma. Esto supone una alta carga de procesado y hace necesaria una precisión milimétrica a la hora de desplazar la película para tomar la siguiente imagen.

Hay que tener en cuenta que en las pruebas realizadas para este método la película se desplaza de forma manual y, en consecuencia, aparecen frecuentemente solapamientos no uniformes entre imágenes contiguas.

Se ha elegido el método de digitalización mediante escaneado porque permite obtener resultados aptos para la reproducción, con resolución de las imágenes ajustable. Utilizando un escáner comercial, de uso doméstico, es posible obtener tiras de 15 fotogramas por escaneado.

En función de la resolución deseada el tiempo de escaneo puede variar entre 20 segundos y 3 minutos.

En cuanto al programa diseñado para procesar las imágenes y convertirlas a sonido, cabe destacar que permite procesar imágenes tanto en escala de grises como en color. Aunque el procesado de la imagen se realiza en escala de grises, se ha incluido una función en el programa para transformar la matriz tridimensional que es la fotografía en color en una matriz bidimensional de valores de brillo.

Otra característica conseguida en el programa es que el procesado de las imágenes se realiza de forma secuencial, de manera que introduciendo los parámetros requeridos, se van convirtiendo automáticamente todas las imágenes seleccionadas.

Aunque no pertenezcan al objetivo de éste proyecto, es posible realizar ciertos avances y mejoras sobre el diseño para automatizar al máximo el proceso. En lo que se refiere a la digitalización, es posible realizar un sistema de arrastre de la película que permita desplazarla una distancia prefijada cada vez que acabe el escaneo. De esta manera, se conseguiría la digitalización del rollo entero de la película sin precisar que alguien desplace y ajuste la película en el escáner.

También quedan fuera de este proyecto aspectos como la detección de redundancia entre imágenes y la corrección de acimut, lo que abre un campo de investigación con vistas a mejorar el diseño. El hecho de contar con un algoritmo de detección y corrección de redundancia mejoraría la calidad del audio de salida, ya que se eliminarían posibles cambios de fase en la forma de onda si existe solapamiento entre imágenes consecutivas. Dichos cambios de fase son perceptibles en el audio como “*glitch*”.

Posibles mejoras:

- Automatización del escaneado.
- Corrección de acimut
- Detección de redundancia
- Detección de pista estéreo y procesado en paralelo de ambas
- Hacer extensible a películas de densidad variable.

Bibliografía

Proakis, John G. *Digital Signal Processing*. New Jersey : Prentice-Hall, 1996. 0-13-394338-9.

Oppenheim, Alan V. *Discrete-Time Signal Processing*. New Jersey : Prentice-Hall, 1989. 0-13-216292-X.

D.Stearns, Samuel. *Digital Signal Processing with Examples in Matlab*. New York : CRC Press, 2003. 0-8493-1091-1.

C. Gonzalez, Rafael, E. Woods, Richard and L. Eddins, Steven. *Digital Image Processing Using Matlab*. New Jersey : Pearson Prentice Hall, 2004. 0-13-008519-7.

Y.Yang, Won, et al. *Signals and Systems with Matlab*. Berlin : Springer, 2009. 978-3-540-92953-6.

Referencias

[1] **García, Alfonso del Amo.** *Inspección técnica de materiales en el archivo de una filmoteca*. s.l. : Filmoteca Española, 2007. 554-10-014-2.

[2] <http://proyecson.ecran.es>

[3] La Guía Esencial de referencia para cineastas www.kodak.com/go/education

[4] <http://www.super8-spain.com/losformatosdecine.htm>

[5] <http://www.wikipedia.org>

[6] http://www.triggertone.com/term/Optical_Sound_Track

[7] <http://www.dolby.com>

[8] <http://www.todocolección.net>

<http://www.phonozoic.net>

<http://unimovies.uow.edu.au/sound/sound.html>

http://www.iberalp.es/web/contenido.jsp?producto=299&idioma=es&nombre=patr%C3%B3n_regulaci%C3%B3n_sonido_film_%C3%B3ptico

<http://cmm.ensmp.fr/~hassaine/restoration.html>

<http://www.cinematographers.nl/FORMATS1.html>

ANEXO 1: Dimensiones y esquemas de películas [1]

Películas de 8 y S8mm

(8mm según normas ISO: 28, 74, 486, 1201)

(S8mm según normas ISO: 1700, 3027, 3625)

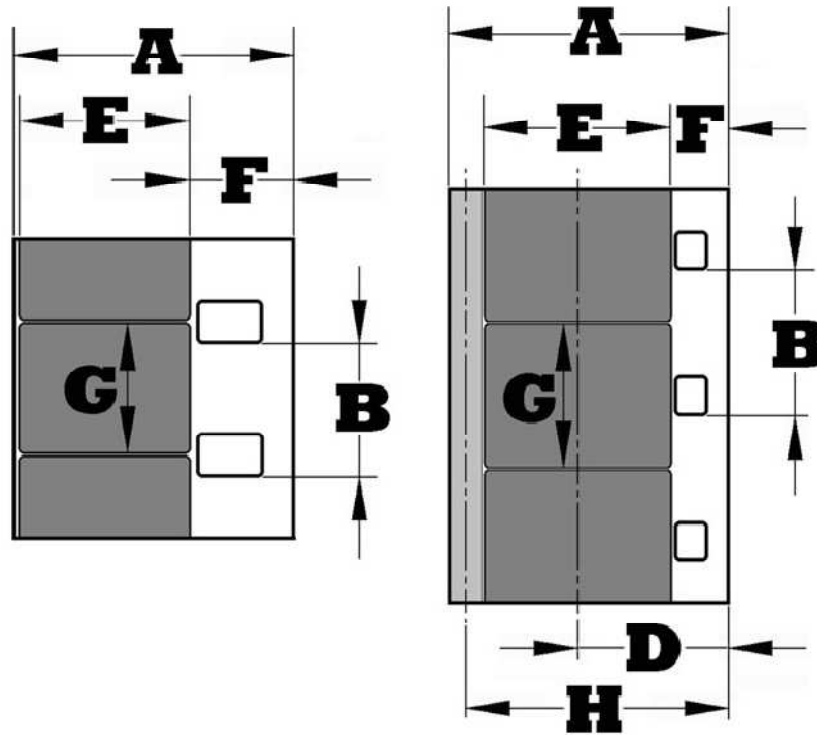


Ilustración 1: Esquema de dimensiones de películas de 8mm y S8mm.

| | 8mm | S8mm |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| A.- Ancho nominal estandarizado | 7,975±0,05 | 7,975±0,04 |
| B.- Paso de perforación* | 3,810 | 4,234 |
| C.- Distancia de borde de perforación a borde de soporte | 0,90 | 0,51 |
| D.- Ancho del área de imagen | 4,90 (cámara) 4,55 (proyector) | 5,69 (cámara) 5,46 (proyector) |
| E.- Distancia de área de imagen a borde | 2,87 (máximo en cámara) | 1,47 (máximo en cámara) |
| F.- Altura de área de imagen | 3,60 (cámara) 3,40 (proyector) | 4,22 (cámara) 4,01 (proyector) |
| (*) La perforación de 8mm es igual a la de 16mm. La perforación de S8mm tiene un diámetro de 1,143 de alto, 0,914 de ancho y un radio en esquinas de 0,13. Todas las medidas están dadas en milímetros. | | |

16mm

Dimensiones de películas de 16mm (Según normas ISO: 69, 71, 359, 466) (Todas las medidas en milímetros).

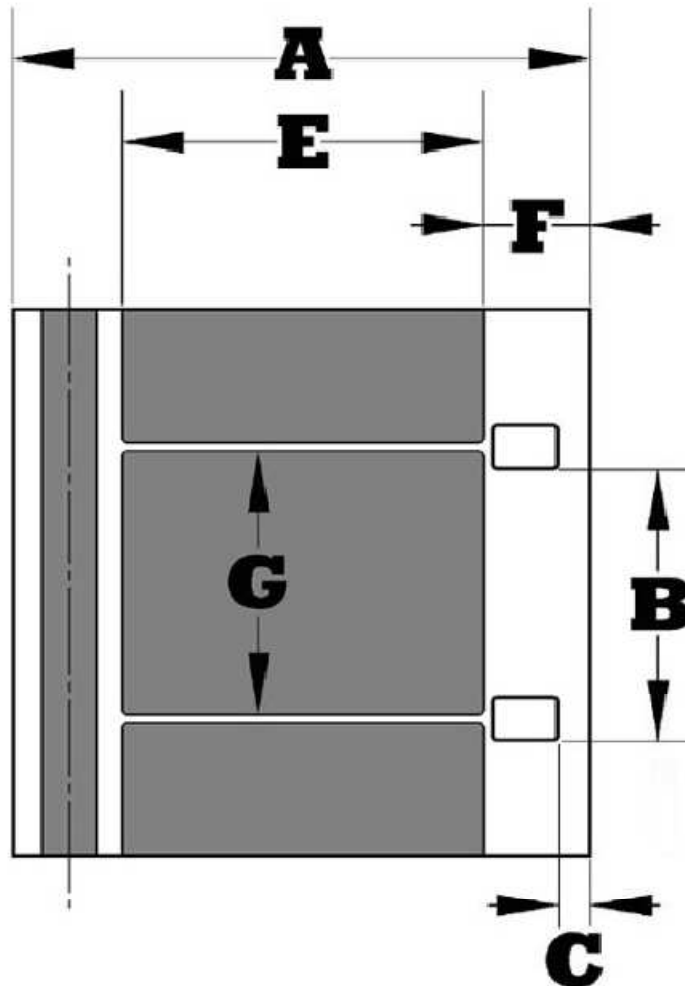


Ilustración 2: Esquema de dimensiones de película de 16mm.

| | |
|--|--|
| A.- Ancho nominal 16mm (Estandarizado $15,95 \pm 0,025$) | |
| B.- Paso de perforación | 7,62 (largo) 7,605 (corto) |
| C.- Perforación a borde | 0,90 |
| D.- Eje de imagen a borde | 7,98 |
| E.- Ancho área imagen | 10,05 (cámara) 9,65 (proyector) |
| F.- Área de imagen a borde | 2,95 (máximo en cámara) |
| G.- Altura área de imagen | 7,42 (cámara) 7,26 (proyector) |
| H.- Eje de sonido a borde | 14.48 |
| I.- Ancho columna sonora | 1,52 (área variable) 2,03 (densidad) |

35mm

Dimensiones de una película de 35mm (Según normas ISO: 70, 491, 2906, 2907, 2939)

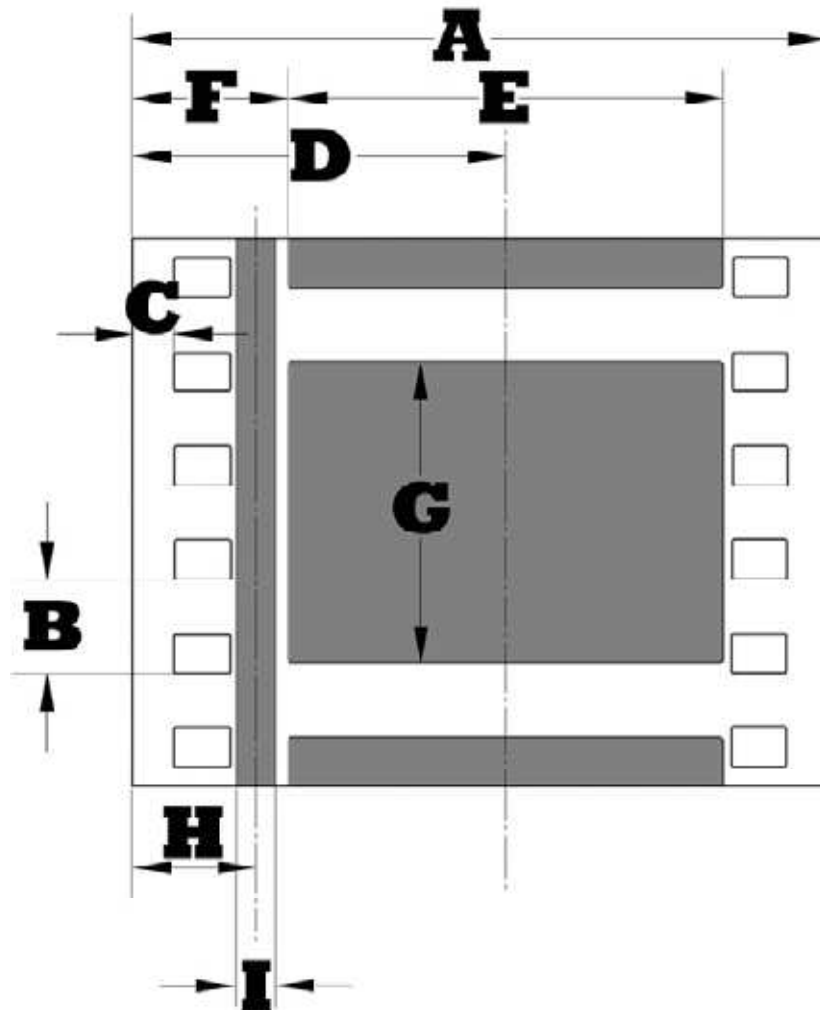


Ilustración 3: Esquema de dimensiones de la película de 35mm.

| | | |
|---|-------------------------|--------------|
| A.- Ancho nominal 35mm (Estandarizado $35,975 \pm 0,025$) | | |
| B.- Paso de perforación | 4,75 (largo) | 4,74 (corto) |
| C.- Distancia de borde de perforación a borde de soporte | 2,01 | - |
| D.- Distancia entre borde Y eje de imagen | 18,75 | - |
| E.- Ancho área de imagen | (cámara) | (proyector) |
| Mudo | 24,00 (teórico) | 23,00 |
| Formatos planos | 21,95 (mínima) | 21,11 |
| Formatos anamórficos | 21,95 (mínima) | 21,29 |
| F.- Distancia de área imagen a borde de referencia | 7,80 (máximo en cámara) | |

| | | |
|---|-------------|-----------------|
| G.- Altura de imagen | (cámara) | (proyector) |
| Mudo 1:1'33 | 18,00 | 17,25 |
| Normal 1:1'37 | 16,00 | 15,29 |
| Panorámicos 1:1'66 | - | 12,62 |
| 1:1'75 | - | 11,96 |
| 1:1'85 | - | 11,33 |
| Anamórficos 1:2'35 | 18,60 | 18,21 |
| H.- Distancia entre el borde de referencia y el eje de la columna sonora | 6,17 | - |
| I.- Ancho columna sonora | 1,93 (área) | 2,54 (densidad) |
| Todas las medidas están en milímetros. | | |

70 mm

Películas de 65 y 70mm (Según normas ISO: 2404, 2467 y 3023)

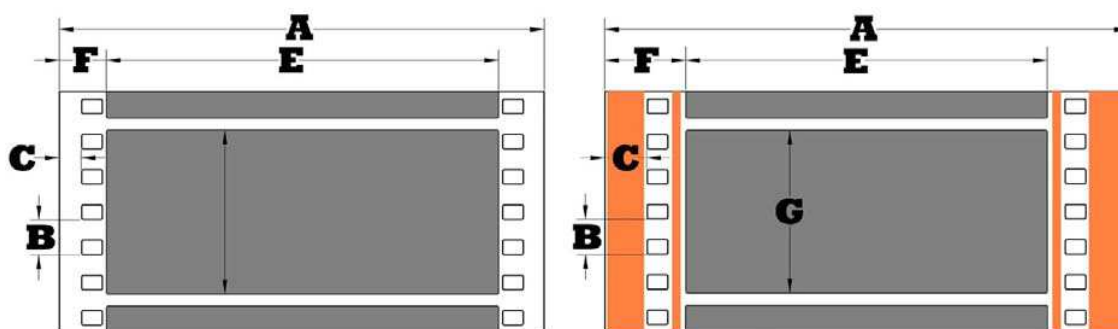


Ilustración 4: Esquema de dimensiones de película de 65 y 70mm.

| | | |
|---|--|-------------------|
| A.- Ancho nominal 35mm (estandarizado $35,975 \pm 0,025$) | | |
| B.- Paso de perforación | 4,75 (paso largo) | 4,74 (paso corto) |
| C.- Distancia del borde de perforación a borde de soporte | 2,97 (65mm) | 5,46 (70mm) |
| E.- Ancho del área de la imagen | 52,50 (65mm) | 48,59 (70mm) |
| F.- Distancia de área de imagen a borde | 6,24 (distancia máxima en cámaras de 65mm) | |
| G.- Altura del área de imagen | 23,00(65mm) | 22,10 (70mm) |
| Todas las medidas en milímetros | | |

ANEXO 2: Código completo del programa diseñado en Matlab.

```
%Código del programa principal

clc;close all;clear all; %Borrado de variables

[fichero, path] = uigetfile(['*.bmp;*.jpg;*.pcx;*.tif'],'Imagen a
procesar');
aux = findstr(fichero, '.');%variable auxiliar para detectar la posición del
caracter '.'
extension = fichero(aux:end);
fichero = fichero(1:aux-1)%Almacena el nombre del fichero sin la extensión
nombre = strcat(path, fichero);

indi = input('Introduzca el índice de la primera imagen a procesar... ');
%Índice para abrir las imágenes a procesar
indice = indi - 1;
numimágenes = input ('Introduzca el número de imágenes a procesar...');
%Cantidad de imágenes que se van a procesar
Y = zeros (1,5);%inicialización del array de salida

%UMBRAL PARA TODAS LAS IMAGENES
umbral = input('Introduzca el umbral de binarización comprendido entre 0 y
255: ');
while((umbral<0)|| (umbral>255))
    umbral = input('Introduzca un umbral de binarización comprendido entre
0 y 255 : ');
end
H = input ('Pulse 1 para mostrar los histogramas de las imágenes ');
a = input ('Introduzca la dimensión de la máscara para realizar filtrado de
mediana sobre todas las imágenes:');

while (indice < (indi+numimágenes-1))% Bucle para cargar y procesar
imágenes

    indice = indice +1;
    i = sprintf('%d',indice);
    name = strcat(nombre,i);
    ruta = strcat (name,extension);
    x = cargar_imagen(ruta);

    % //// Comprobación de escala de grises ////
    [M,N,componentes]= size (x);
    if componentes > 1
        x2 = convertir_monocromo (x,M,N);
        x = x2;
    end
    mensaje = strcat ('Se va a procesar... ',ruta);
    disp(mensaje);

    x = medfilt2(x,[a a]); %/// Filtrado de mediana sobre la imagen
```

```

% ///// Cálculo del histograma ////

if (H ==1)
    h1 = histograma (x);
    figure (indice);
    subplot(1,2,1);bar (h1)
    subplot(1,2,2);
    num = sprintf('%d',indice);
    Imagen = sprintf('Imagen ');
    Imagen = strcat (Imagen,num);
    imshow(x(:,100:2000), [0 255]); title(Imagen);
end

% ///// Procesado ////

xbin = binarizar (x,umbral);
xcuant = cuantificar (xbin);
Y = [Y,xcuant]; % Concatena el array generado por la imagen procesada
al array generado por las anteriores
clear name;clear ruta;clear xcuant;clear xbin;clear x; % Borrado de
variables
end
% FIN DEL BUCLE

Ynormal = normalizar (Y); % // Convierte los valores al rango -1<x<1

resolucion = input ('Introduzca la resolucion de las imágenes ');

%Cálculo y resample de frecuencia de muestreo
fs2 = calculofs (resolucion);
[a,b] = relacionfs(fs2); % Calcula la relación entre la frecuencia de
muestreo generada y la estándar de 44100 Hz
Ynormal = resample(Ynormal,a,b); % Remuestrea el audio de salida a 44100 Hz
fs = 44100;

% /// REPRODUCIR AUDIO ///
A = input ('Pulse 1 para reproducir el archivo generado ');
if (A ==1)
    sound (Ynormal,fs);
    inv = input('Pulse 1 para invertir el audio...'); % Opción para
invertir audio

    if (inv == 1)
        Ynormal = invertir (Ynormal);
        sound (Ynormal,fs);
    end
end

% /// GUARDAR AUDIO ///
B = input ('Pulse 1 para guardar el archivo generado ');
if (B ==1)
    guardar_archivo (Ynormal,fs);
end

```


Función convertir_monocromo

```
function y = convertir_monocromo (X,I,J)

y = zeros (I,J);

for i = 1:I
    for j = 1:J

        r = X(i,j,1);
        g = X(i,j,2);
        b = X(i,j,3);

        a = fix((0.299 * r) + (0.587 * g) + (0.114 * b));
        y(i,j) = a;
        clear r;clear g;clear b;clear a;
    end
end
```

Función binarizar

```
function y = binarizar (x,umbral)

[m,n]=size (x);

y = zeros(m,n);

for i=1:m
    for j =1:n
        if (x(i,j)>(umbral-1))
            y(i,j)=255;
        end
    end
end
y=uint8(y);
```

Función cuantificar

```
%Función para convertir de imagen binarizada a array de amplitudes en cada pixel
function amplitudes = cuantificar (y)

[M,N] = size (y);
amplitudes = zeros (1,N);

for i = 1:N
    for j = 1:M
        if (y(j,i)== 255)
            amplitudes(i)= amplitudes(i) + 1;
        end
    end
end
```

Función histograma

```
function h = histograma (x)

[M,N] = size (x);
h=zeros(1,256);
for m = 1:M
    for n = 1:N
        g=x(m,n);
        h(g+1)= h(g+1)+1;
    end
end
```

Función invertir

```
%Invierte el orden de los elementos de un array

function y = invertir (x)

[M,N]=size (x);
y = zeros (M,N);

for i = 1:N
    y(M,i)= x (M,(N-i)+1);
end
```

Función normalizar

```
% Recibe como parámetros el array de amplitudes

function y = normalizar (x)

y = x;
DR = max (y);%Busca el valor más grande de amplitud
dr = min (y);%Busca el valor mínimo de amplitud
Dr = DR - dr;

[M,N]= size (y);

for j = 1:N
    y(j) = ((y(j)-(Dr/2))/(Dr/2));
    if y(j)>1
        y(j)=1;
    end

    if y(j)<-1
        y(j)=-1;
    end
end
```

Función guardar_archivo

```
function guardar_archivo (Ynormal,fs)

nombre = input ('Introduzca el nombre del archivo ... ','s');
wavwrite (Ynormal,fs,nombre);
```

Función cálculofs

```
function fs = calculofs (resolucion)
fs = resolucion * (17.825);
```

Función relacionfs

```
function [a,b] = relacionfs (fs)

relacion = fs/44100;
a = 300;
b = fix(a * relacion);
```

Función carga_imagen

```
%Función para abrir una imagen pasándole el nombre y el número de foto
function x = cargar_imagen (nombre)

x = imread(nombre);
x = uint8(x);
```

5 Presupuesto

Tabla 3. Presupuesto del equipamiento utilizado.

| Concepto | Precio IVA inc | % imputable | Coste imputable |
|--------------------|----------------|-------------|-----------------|
| Ordenador portátil | 450 € | 2 % | 9 € |
| Escáner Epson | 200 € | 5 % | 10 € |
| Licencia Matlab | 75 € | 2 % | 1,50 € |
| Total | | | 20,50 € |

Tabla 4. Presupuesto de horas de trabajo.

| Concepto | PVP / hora | Horas | Total |
|---|------------|-------|---------------|
| Búsqueda de información y redacción de la memoria | 30 € | 25 | 750 € |
| Diseño | 35 € | 20 | 700 € |
| Pruebas | 35 € | 14 | 490 € |
| Total | | | 1940 € |