

DIY Telecine

Desarrollo y construcción de un dispositivo para la digitalización de cintas de cine



Martín Piñeyro Irazabal

Facultad de Ingeniería y Tecnologías
Universidad Católica del Uruguay

Documento presentado para el grado de
Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica

Mayo 2018

A Gabriela y Antonio.

Contenido

Lista de Figuras	ix
-------------------------	-----------

Lista de Tablas	xiii
------------------------	-------------

1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Sobre este documento	2
1.3	Terminología	3
1.4	Objetivos del proyecto	3
1.4.1	Elección de los formatos soportados en esta versión	4
1.5	Descripción general de un sistema digitalizador	4
1.6	Requerimientos del sistema desarrollado	4
1.7	Estrategia de trabajo	5
1.8	Herramientas utilizadas	5
2	Estado del arte	7
2.1	Mecanismos de transporte de film tradicionales	7
2.2	Equipos de digitalización comerciales disponibles	9
2.3	Iniciativas de sistemas de digitalización Do It Yourself (DIY)	11
2.3.1	Kinograph	12
2.3.2	Otras iniciativas DIY	15
2.4	Técnicas de fabricación digital	18
2.4.1	Control Numérico Computarizado (CNC)	18
2.4.2	Impresión 3D Aditiva Open Source	19
2.4.3	Conclusión	20
3	Diseño del mecanismo de transporte de film	23
3.1	Descripción del proceso de diseño	23
3.2	Primer prototipo	23

3.2.1	Conclusiones del primer prototipo	26
3.3	Segundo prototipo	26
3.3.1	Conclusiones del segundo prototipo	28
3.4	Conclusiones del módulo de transporte	29
4	Detección de Frame	31
4.1	Definición del problema	31
4.2	Conceptos generales de los formatos 8 mm estándar y Super 8	33
4.3	Pruebas de detección de perforaciones	34
4.3.1	Conclusiones de las pruebas de detección de esquinas, líneas y blobs	37
4.4	Formulación del problema de detección de frame como un problema de identificación de patrones	38
4.5	Conclusiones del módulo de extracción de frame	41
5	Detección del avance del film	43
5.1	Presentación del problema	43
5.2	Detección del avance del film y sincronización con módulo de captura . . .	44
5.3	Descripción general de flujo óptico y su aplicación a este problema	45
5.3.1	Definición de flujo óptico	45
5.4	Detalles de la implementación	49
5.4.1	Primer iteración del módulo de transporte	49
5.4.2	Segunda iteración del módulo de transporte	55
5.5	Comparación de los resultados obtenidos y conclusiones	59
6	Captura	61
6.1	Definición de rango dinámico de una cámara	61
6.2	Rango dinámico de la película fotográfica vs. sensores digitales	63
6.3	Técnicas para incrementar el rango dinámico y resultados obtenidos	65
6.3.1	Mapas de radiancia de alto rango dinámico a partir de fotografías .	65
6.3.2	Pruebas de ampliación del rango dinámico	66
6.4	Conclusiones	67
7	Diseño del prototipo final	71
7.1	Antecedentes y herramientas utilizadas en el proceso de diseño y fabricación	71
7.1.1	Printrbot	71
7.1.2	Herramientas de Diseño	72
7.2	Piezas diseñadas para fabricación con impresora 3D	74

Contenido	vii
7.3 Sistema de iluminación	81
7.4 Integración de los módulos de transporte, detección de avance y detección de frame	83
8 Resultados, oportunidades de mejora y conclusiones	87
8.1 Resultados	87
8.2 Oportunidades de mejora	88
8.3 Conclusiones	88
Referencias	91
Appendix A Manual de Operación	95

Lista de Figuras

2.1	Esquema de un proyector (imagen tomada de “How Products Are Made”) .	8
2.2	Rueda de Ginebra [1]	9
2.3	Kinograph	13
2.4	Rodillo dentado accionando interruptor electromecánico (Imagen obtenida de http://www.instructables.com/id/Kinograph-v01-DIY-Film-Scanner/) . .	14
2.5	RepRap Version I “Darwin” [2]	20
2.6	Impresora 3D "Printrbot" construida por el autor con piezas fabricadas en una impresora 3D similar	21
3.1	Imagen del primer prototipo que se realizó	24
3.2	Piezas diseñadas para el primer prototipo	25
3.3	Segundo prototipo	27
3.4	Interfaz gráfica para envío de comandos via puerto serial	28
4.1	Imágenes de film 8 mm utilizadas para laas pruebas	32
4.2	Dimensiones de los films 8 mm standard y Super 8 [3]	33
4.3	resultado de la detección de esquinas	34
4.4	resultado de la detección de blobs	35
4.5	resultado de la detección mediante transformada de Hough	36
4.6	resultado de la detección mediante transformada de Hough (variante probabilística)	37
4.7	señal de entrada: nivel de intensidad de los pixels comprendidos dentro de una ROI simétrica con eje paralelo al eje de las perforaciones (horizontal). La ROI que genera esta señal es la que se ve en la figura 4.8	39
4.8	Señal bi-modal generada por el sistema a partir de la ubicación de los bordes superior e inferior del film en la escena	40

4.9	resultado de detección de sprocket holes con el método explicado en esta sección. En verde el eje de la ROI, en rojo la ROI, en azul el punto de máxima correlación y en magenta las perforaciones y la región del cuadro) .	42
5.1	Puntos identificados como buenos candidatos para ser rastreados. Implementación del algoritmo "goodFeaturesToTrack" de OpenCV (utilizando detector de esquinas Shi-Tomasi)	45
5.2	Flujo de la primer iteración del módulo de transporte	50
5.3	Los desplazamientos detectados entre cada par de cuadros consecutivos son acumulados para calcular el desplazamiento total de la secuencia	51
5.4	Capturas de pantalla del sistema de detección de avance funcionando	52
5.5	Avance (en pixels) para instrucciones de avance constantes	53
5.6	Rollng shutter horizontal determina diferencia en el avance percibido entre puntos ubicados en el diferentes secciones del mismo cuadro	53
5.7	Histograma de los datos de la serie mostrada en la figura 5.5	54
5.8	Cantidad de imágenes procesadas en cada instrucción de avance	55
5.9	Flujo de la segunda iteración del módulo de transporte	56
5.10	Avance (en pixels) para instrucciones de avance constantes (150 pixels)	58
5.11	Histograma de los datos de la serie mostrada en la figura 5.10	58
5.12	Comparación de las mediciones realizadas por los dos sistemas para avances constantes	60
6.1	Curva característica de un film mostrando la relación entre densidad y exposición relativa [4]	63
6.2	Comparación de la Relación Señal a Ruido (SNR) de un sensor de imagen digital y una película fotosensible [5].	65
6.3	Dispositivo utilizado para la obtención de múltiples capturas de un film variando el tiempo de exposición e iluminándolo con luz difusa desde atrás	67
6.4	Pruebas de algoritmos de fusión y mapeo de tono	69
7.1	Modelo Printrbot Original.	72
7.2	Flujo de trabajo utilizado para el diseño y fabricación de las piezas	73
7.3	Impresora Monoprice Maker Select Plus (segunda impresora utilizada en este proyecto	74
7.5	Vista explotada de todas las piezas que componen la versión filan del dispositivo	75
7.6	Diseño final de caja de luz	82
7.7	Interacción entre los módulos de transporte, detección de avance y detección de frame	84

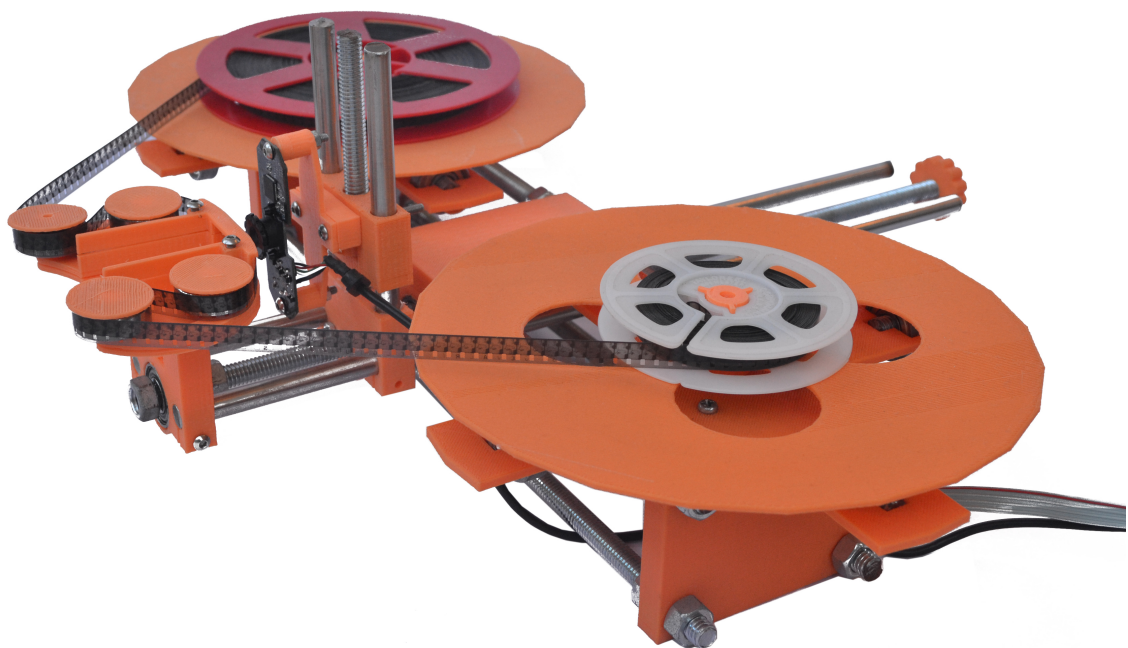
7.4	Bocetos de las piezas.	85
8.1	Vista lateral frotal	88
8.2	Ventana de captura	89
8.3	Vista lateral trasera	90
8.4	Vista superior	90
A.1	Principales partes del dispositivo y su nombre	95
A.2	Recorrido del film entre tensores y ventana	96
A.3	Distancia óptima entre la cámara y el film	97
A.4	Ajustes que deben realizarse a través de la Interfaz Gráfica de Usuario	98

Lista de Tablas

2.1	Scanners disponibles comercialmente	11
2.2	Scanners DIY	17
7.1	Listado de piezas diseñadas	81

Capítulo 1

Introducción



1.1 Motivación

La preservación de materiales audiovisuales es un aspecto fundamental para la conservación del acervo cultural. Se estima que ya se ha perdido al menos el 80% de todas las películas mudas (y el porcentaje de pérdida de la producción de films de los últimos treinta años es

incluso mayor) [6]. Si no se procede a restaurar estos materiales a corto plazo se seguirá perdiendo una parte importante del acervo cultural de la humanidad como son la películas de cine tanto comercial como doméstico (amateur).

Para poder preservar responsablemente los contenidos audiovisuales registrados en película es necesario digitalizarlos y posteriormente restaurarlos utilizando técnicas de procesamiento de imágenes digitales para finalmente almacenarlos en formatos que sean compatibles con los sistemas de reproducción actuales. Digitalizar películas de cine en forma adecuada (sin alterar significativamente el contenido original durante el proceso) requiere contar con equipos llamados scanners o telecines [7]) (denominación adquirida gracias al que ha sido su uso mas habitual: poder transmitir para televisión material en soporte fotoquímico) que suelen ser herramientas de difícil acceso. Esta realidad ha motivado la búsqueda de alternativas aprovechando nuevas técnicas de fabricación digital y los desarrollos de software y hardware creados y mantenidos por la comunidad Open Source.

Poner a disposición un dispositivo con las características del que se describe en este trabajo implica (además de llevar a cabo actividades como el procesamiento de señales y el diseño de circuitos electrónicos) involucrarse en actividades que en principio quedarían fuera del alcance en un proyecto de Ingeniería Eléctrica, como es el diseño de las piezas que componen la plataforma física del sistema previendo la fabricación de las mismas en impresoras 3D. La razón principal por la cual se decidió llevar a cabo el diseño integral del dispositivo es lograr que este sea realmente fácil de replicar, algo imposible si no se resuelven los aspectos mecánicos del sistema.

Este trabajo está inspirado en el proyecto Kinograph [8], del cual se toma el concepto general: digitalización de film de alta calidad y bajo precio.

1.2 Sobre este documento

El presente documento busca registrar las principales actividades que se realizaron el marco del proyecto. Los primeros dos capítulos describen el contexto en el que surge este proyecto y los requerimientos definidos para el dispositivo que se diseñó. A continuación se documenta el proceso de diseño de la plataforma física y los resultados obtenidos en cada iteración para pasar luego a los detalles del módulo de detección de cuadro. Posteriormente se profundiza en el sistema de detección de avance del film, que es quizás donde radica uno de los principales aportes de este trabajo. Finalmente se presentan los detalles del módulo de captura donde se tratan las alternativas existentes para aprovechar al máximo las prestaciones del sensor de imagen para concluir con los resultados, conclusiones y oportunidades de mejora. Los aspectos prácticos de la construcción y operación del dispositivo se incluyeron como anexos.

1.3 Terminología

A lo largo de este documento se utilizan indistintamente los términos film, cinta o película para referirse al soporte fotoquímico en el que se registra el contenido audiovisual (o exclusivamente visual) que se busca preservar mediante el proceso de digitalización. Del mismo modo se utilizan los términos cuadro, frame o fotograma para referirse a las imágenes registradas secuencialmente en una cinta de cine y a las resultantes del proceso de digitalización.

1.4 Objetivos del proyecto

El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema de digitalización de cintas de cine económico y replicable que pueda ser construido por potencialmente cualquier usuario utilizando una impresora 3D y componentes comunes¹.

En el dispositivo debe contar con tres componentes fundamentales:

- Sistema mecánico: plataforma en la cual se cargan las bobinas de film, equipada con un motor eléctrico de tipo paso-a-paso (y su correspondiente controlador) que permite presentar cada cuadro de la película frente a la cámara para ser capturado y un motor de corriente continua que actúa como freno de la bobina alimentadora. Este sub-sistema se construye básicamente con una combinación de piezas diseñadas a medida fabricadas mediante impresión 3D y varillas metálicas.
- Sensor de imagen: se trata de una cámara digital cuyas prestaciones pueden variar en función de los requerimientos definidos para las imágenes de salida y el presupuesto disponible. La cámara cumple en este sistema una doble función: captura la escena que contiene los cuadros a digitalizar y es el sensor utilizado por el sistema de transporte de la película para determinar el avance de la misma y lograr posicionar convenientemente cada cuadro al momento de la captura.
- Software: se pueden identificar tres módulos de software que operan en forma sincronizada: interacción con motores, medición de avance y extracción de cuadro.

¹Se entiende por componentes comunes a aquellos disponibles en tiendas no especializadas (por ejemplo ferreterías) y en cualquier parte del mundo

1.4.1 Elección de los formatos soportados en esta versión

Los formatos de película mas usados a nivel amateur fueron el 8 mm estándar y el Super 8 por lo cual hoy en día son estos los mas fáciles de encontrar. Teniendo en cuenta lo anterior y el hecho de que desde el punto de vista mecánico resulta mas simple trabajar con carretes livianos y pequeños que con carretes grandes y pesados, se decidió -en esta etapa- soportar exclusivamente los formatos 8 mm Super8.

El diseño del dispositivo y el hecho de poder acceder a los modelos digitales de las piezas plásticas en las que se basa, hace posible extenderlo para soportar otros formatos. Cabe aclarar que para lograr esto es necesario también adaptar el software. El potencial del dispositivo para soportar otros formatos se discutirá en detalle mas adelante en este documento.

1.5 Descripción general de un sistema digitalizador

En su mínima expresión un dispositivo para la digitalización de cintas de cine cuenta con:

- Un mecanismo de transporte capaz de controlar convenientemente el debobinado del carrete origen y el bobinado del film en el carrete destino, logrando presentar cada cuadro frente a una ventana de captura.
- Un sistema de iluminación que permita exponer el correctamente los fotogramas (de acuerdo al dispositivo de captura).
- Un dispositivo de captura
- Un repositorio para almacenar el material digitalizado

1.6 Requerimientos del sistema desarrollado

Para este trabajo se tuvo como premisa principal utilizar la menor cantidad de piezas posible con el objetivo de lograr un dispositivo simple de construir. Del mismo modo se procuró no utilizar piezas ni equipamiento especializado del rubro cinematográfico para mantener el costo bajo y lograr que el dispositivo pueda ser fabricado por cualquier usuario interesado en cualquier parte del mundo. Estas restricciones fueron priorizadas frente a requerimientos de desempeño y calidad de las imágenes producidas asumiendo que dichos aspectos pueden mejorarse incrementando la resolución del sensor, lo cual es proporcional a la inversión que se pueda hacer. De esta forma se logra un dispositivo flexible y fácilmente adaptable al presupuesto con el que cuenta cada usuario.

1.7 Estrategia de trabajo

Este trabajo fue realizado en etapas que en gran medida se corresponden con los capítulos que componen este documento. En todas las etapas el abordaje fue experimental e iterativo, buscando tempranamente la producción de prototipos que permitan evaluar el desempeño y la adecuación al uso de cada propuesta manejada. Esta estrategia se aplicó indistintamente para el diseño de piezas, la definición de sub procesos y el desarrollo del software (tanto el embebido como las aplicaciones). La obtención de un producto mínimo viable en cada etapa fue el hito que se tomó en cuenta para considerarla cerrada en cada caso. Poder contar con un producto mínimo viable al final de cada etapa permitió definir lineamientos generales y requerimientos específicos para cada módulo. Del mismo modo, este abordaje permitió conocer en forma temprana los desafíos de integración a los que sería necesario enfrentarse para lograr la interacción entre todos los módulos del sistema.

1.8 Herramientas utilizadas

A continuación se enumeran las principales herramientas utilizadas para llevar a cabo las diferentes actividades de cada etapa. Se buscó utilizar plataformas de desarrollo y librerías gratuitas así como lenguajes de programación ampliamente difundidos actualmente.

Hardware

- Arduino
- Controlador de motores Adafruit
- Motor paso a paso y varillas lisas extraídos de Impresora Ink Jet
- Motor de corriente continua extraído de equipo de audio

Software: desarrollo

- Aplicación: Python + OpenCV
- Embebido: Arduino

Software: diseño e impresión 3D

- Diseño: Sketchup Make (Trimble)

- Impresión 3D: Cura

Capítulo 2

Estado del arte

2.1 Mecanismos de transporte de film tradicionales

El objetivo de un mecanismo de transporte de film es transferirlo de la bobina de origen a la de destino de tal forma que cada cuadro de la secuencia pueda ser ubicado correctamente frente a la ventana que lo expone a la fuente de luz. El tipo de movimiento y velocidad con el que se transfiere el film de una bobina a otra y las características mecánicas del sistema quedarán determinadas en gran medida por el uso que se le dará al sistema. Si el sistema se utilizará en tiempo real, como es el caso de las cámaras y los proyectores, los requerimientos de sincronización entre los motores, obturador, sistema de reproducción de sonido, etc, serán mayores que en el caso de un sistema de digitalización.

Los mecanismos de transporte de film tradicionales (inventados a fines del siglo XIX) [9] utilizan un único motor para accionar todas las partes móviles del sistema, logrando la sincronización de las mismas mediante vínculos mecánicos. En la figura 2.1 se puede ver el mecanismo de transporte de film de un proyector básico. En este mecanismo la bobina superior es la de alimentación o feed (la que contiene el film inicialmente) y la inferior es la que lo recibe (llamada de recuperación o take up). El movimiento circular continuo del motor del proyector es convertido en un movimiento circular intermitente por una rueda de Ginebra [1] que mediante una rueda dentada o garra somete al film a una cierta tracción durante un cierto intervalo que permite ubicar el siguiente cuadro exactamente frente a la ventana de proyección. Estas ruedas dentadas o garras actúan a través de las perforaciones del film (que generalmente se ubican en uno o en ambos bordes del film dependiendo del formato).

Para ocultar el movimiento del film durante la transición de cuadros este tipo de mecanismo incluye un obturador que se interpone entre la fuente de luz y el film mientras este está en movimiento y lo exhibe exclusivamente cuando está detenido frente a la ventana. Esta dinámica es imperceptible para el espectador ya que se da con una frecuencia de 24 veces

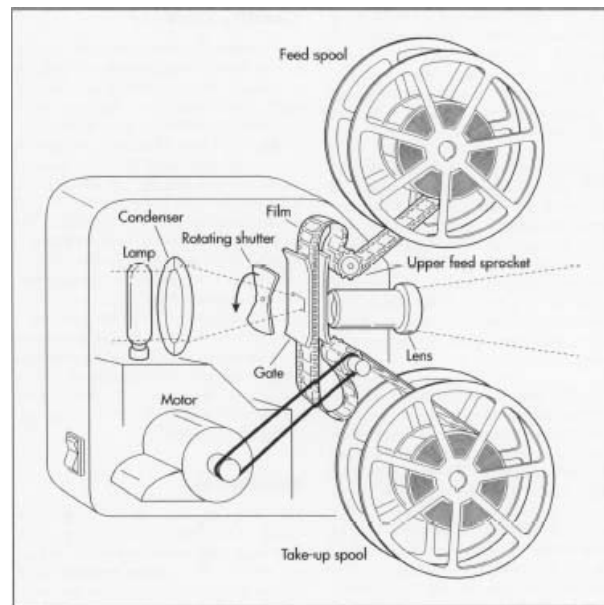


Fig. 2.1 Esquema de un proyector (imagen tomada de “How Products Are Made”)

por segundo que es mas del doble de la frecuencia máxima a la que la visión humana puede detectar imágenes independientes [10].

Uno de los objetivos de este proyecto es que el dispositivo sea suficientemente simple y accesible desde el punto de vista económico como para ser construido por los propios usuarios, usando piezas comunes y sin herramientas especializadas (mas allá de una impresora 3D). Teniendo en cuenta lo anterior se buscó en todo momento reducir al mínimo la cantidad de partes (en particular la cantidad de partes móviles ya que estas incrementan enormemente la complejidad del sistema). La primer oportunidad de reducir la cantidad de partes y la complejidad del mecanismo de transporte se presentó al revisar la sección del sistema responsable de hacer que el film avance a intervalos regulares y se detenga brevemente frente a al obturador para que cada cuadro sea proyectado. Este movimiento provoca a su vez que el la bobina de origen gire y ponga a disposición del sistema un nuevo tramo de cinta para ser proyectado. El mecanismo anteriormente descrito requiere de dos secciones que actúan de buffer ubicando por un lado cierta cantidad de film que será proyectado y otra cantidad de film que ya fue proyectado y debe bobinarse en el la bobina de destino. Este buffer es fundamental por las siguientes razones:

- Permite compensar la diferencia de velocidad que se da en ambas bobinas a medida que va variando el radio como producto de la variación de cinta que hay en una y otra.
- Permite controlar la tensión con la que se bobina el film en la bobina de destino utilizando guías y rodillos de presión.

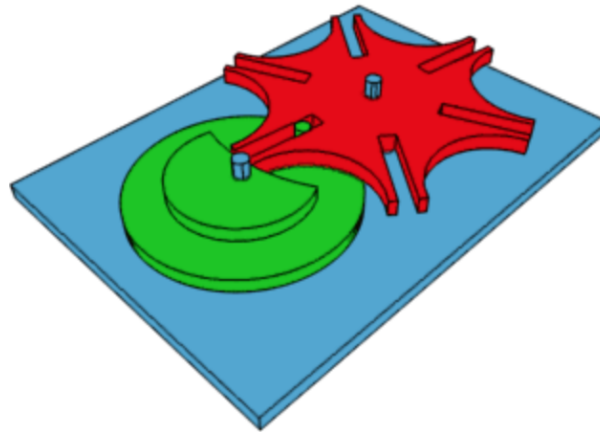


Fig. 2.2 Rueda de Ginebra [1]

Prescindir de un mecanismo basado en una garra o rueda dentada tiene ciertas ventajas relevantes para el dispositivo que se desarrolló:

- Permite reducir el esfuerzo al que se somete la cinta al trasportarla, lo cual es importante en este caso ya que la mayor parte del material que se digitalizará está deteriorado y se rompe fácilmente. Por esta misma razón se procuró también minimizar la cantidad de guías y rodillos necesarios para el dispositivo digitalizador.
- No depender de las perforaciones para el avance del film. Es de esperar que la cinta a digitalizar presente secciones en las cuales las perforaciones están rotas o directamente no están).

2.2 Equipos de digitalización comerciales disponibles

En esta sección se presentan algunos de los dispositivos comerciales disponibles en el mundo actualmente. Sin buscar ser un registro exhaustivo la tabla 2.1 presenta a modo de referencia una serie de dispositivos disponibles en el mercado cuyos precios y prestaciones varían ampliamente. Luego de analizar la información disponible en los sitios de los fabricantes de dispositivos comerciales puede notarse que existen al menos tres segmentos:

- Gama alta: Dispositivos orientados a empresas que proveen servicios especializados de digitalización de alta resolución. La inversión se justifica cuando existe un volumen de trabajo considerable por parte de clientes que manejan presupuestos altos para la digitalización de material audiovisual (principalmente formatos de 35 mm en adelante). La resolución de estos dispositivos en todos los casos está es de 4 K en adelante. Rango de precios: USD 100.000 en adelante

- Gama media: Dispositivos que pueden ser adquiridos por el archivo de instituciones educativas u organizaciones (gubernamentales o no) a cargo de la preservación/protección del acervo cultural que cuenten con altos presupuestos. Este tipo de organizaciones debe contar con archivos de tamaño considerable como para justificar la inversión en un scanner propio. Una inversión en un equipo con estas características tiene sentido cuando el presupuesto no alcanza para contratar los servicios de dispositivo de gama alta para todo el archivo pero sí para adquirir un dispositivo que permita digitalizar (y por ende preservar) al menos los formatos menores a 16 mm con una resolución de hasta 2K. Rango de precios: Entre USD 1.000 y USD 100.000.
- Gama baja: Dispositivos que pueden ser adquiridos por entusiastas con el objetivo de pasar a soporte digital películas de cine amateur (principalmente 8 mm y Super8) sin grandes requerimientos de resolución. Estos dispositivos permiten obtener resoluciones inferiores al HD (720p). Rango de precios: por debajo de USD 1.000

Nombre	Imagen	Precio	Formatos Soportados	Resolución
Scanity HDR [11]		USD 400.000	16 mm y 35 mm	4K
Kinetta [12]		USD 200.000	16 mm y 35 mm (otros formatos soportados con costo adicional)	3.3K
Golden Eye 4 [13]		USD 100.000	Todos los formatos entre 8 mm y 70 mm	4K
Cintel [14]		USD 30.000	16 mm y 35 mm	4K

Muller HDS+ [15]		USD 26.600	8 mm, 9.5 y 16 mm	4K
reflecta Super 8+ Scanner [16]		USD 1.100	Super 8	2K
Wolverine [17]		USD 300	8 mm y Super 8	730 p

Table 2.1 Scanners disponibles comercialmente

2.3 Iniciativas de sistemas de digitalización Do It Yourself (DIY)

El elevado costo de los equipos comerciales demostrado en la sección anterior hace que no sea fácil contar con uno. Esta realidad ha motivado que individuos se involucren en el diseño y construcción de dispositivos digitalizadores sin ser profesionales o expertos en la materia.

El abordaje Do It Yourself (DIY) tal como lo conocemos hoy y la divulgación de instrucciones para llevar a cabo proyectos de construcción, modificación y reparación de cosas alcanza al público masivo a principios del siglo XX a través de la conocida revista Norteamericana "Mecánica Popular", que inicialmente publicaba todos los meses artículos sobre tareas de bricolaje, mantenimiento de automóviles y avances tecnológicos. Puede considerarse que en ese entonces el abordaje DIY era algo de nicho que no contaba con un alto nivel de colaboración por parte de quienes lo practicaban.

Esta realidad cambió radicalmente de la mano de los sistemas de comunicación. Al mismo tiempo, la disponibilidad de grandes repositorios de información gratuita fue progresivamente acortando las distancias entre el conocimiento y los interesados en adquirirlo. Las alternativas para la transferencia de conocimiento basadas en Internet surgidas a fines del siglo XX (como las plataformas para compartir videos, los foros, la plataformas educativas gratuitas y las bibliotecas en línea) representaron desde su aparición una fuente de conocimiento invaluable para cualquier persona interesada en aprender a hacer algo nuevo. A través de estos canales, expertos (y entusiastas) comparten su conocimiento a través de estos canales, ponen a disposición de la comunidad de interesados planos, programas, modelos tridimensionales, opiniones y muchos otros insumos. Si bien en muchos casos los contribuyentes pueden buscar una retribución económica por su aporte, en muchos otros no. En el caso de estos últimos el móvil generalmente es contribuir o devolverle a cierta comunidad algo de lo que esta le aportó durante el proceso de aprendizaje esperando que alguien lo tome como punto de partida y posteriormente ponga a disposición una versión mejorada de lo que tomó.

A continuación se presentarán algunas de las principales iniciativas de desarrollo de dispositivos digitalizadores DIY.

2.3.1 Kinograph

Introducción

El proyecto Kinograph [8] es la principal referencia de este proyecto y por esta razón se profundizará en este mas que en el resto de las iniciativas analizadas. Si bien desde el punto de vista técnico no se ha tomado como referencia en prácticamente ningún aspecto, ha funcionado como prueba de la viabilidad de construir un dispositivo funcional con elementos de fácil acceso y sin una gran inversión de dinero (aproximadamente USD 1.000 en materiales). Adicionalmente su autor realiza un invaluable trabajo de documentación registrando sus avances (y los de una comunidad de mas de 700 personas al momento de escribir este documento) en una serie de foros categorizados. En estos foros el responsable y la comunidad presentan sus resultados, plantean problemas y discuten sobre todos los temas relacionados a la construcción de dispositivos digitalizadores. El proyecto se inició en 2013 y está todavía en curso. Se enfoca en la digitalización de grandes formatos (35 mm y 16 mm) y de acuerdo a la información disponible en el sitio del proyecto actualmente el autor se encuentra desarrollándolo para soportar también 8 mm.



Fig. 2.3 Kinograph

Mecánica

Desde el punto de vista mecánico el dispositivo está construido en su mayoría por perfiles de aluminio extruido (sujetados con tornillos metálicos) y utiliza acrílico para las partes planas. El diseño original utiliza dos motores de corriente continua de 24 V con reducción mecánica. Los carretes giran sobre bandejas con rodamientos de las utilizadas en los centros de las mesas (conocidas en Norteamérica como "Lazy Susan"). El soporte de la cámara no tiene vínculo mecánico con el resto del dispositivo (son objetos independientes que deben disponerse convenientemente al momento de utilizarlo).

Electrónica y avance del film

El mecanismo de avance del film de este dispositivo se basa en rodillos diseñados especialmente y fabricados mediante impresión 3D. El diseño de estos rodillos busca hacerlos adecuados para mas de un formato ya que incorporan dientes a diferentes alturas en los que las perforaciones del film puede engancharse para ser transportado. Del mismo modo los rodillos presentan salientes distribuidas uniformemente en el perímetro destinados a accionar interruptores electromecánicos que permiten medir el movimiento y de esa forma sincronizar con la captura de imágenes. El controlador utilizado es Arduino Uno con una etapa de potencia basada en un transistor TIP120. No hay interacción con la cámara o el computador en lo referente a avance de film.

Óptica e iluminación

El dispositivo utilizaba originalmente una cámara reflex (DSLR) pero tuvo que ser cambiada rápidamente por una cámara compacta debido a la vida útil acotada del obturador mecánico. El soporte de la cámara está armado con un soporte para macro fotografía para la regulación horizontal y el mecanismo de un microscopio para la regulación vertical. La iluminación

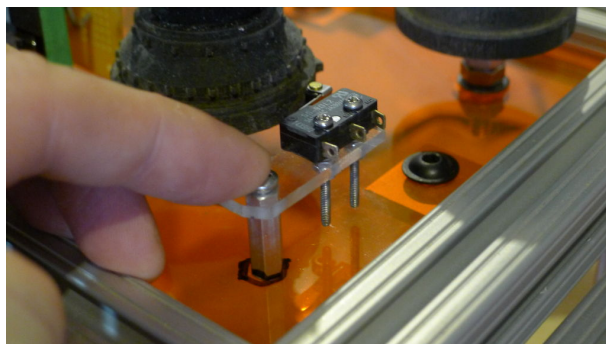


Fig. 2.4 Rodillo dentado accionando interruptor electromecánico (Imagen obtenida de <http://www.instructables.com/id/Kinograph-v01-DIY-Film-Scanner/>)

se resuelve con un módulo de cuatro LEDs (72 Lúmenes) activado mediante un interruptor electromecánico.

Aspectos a tener en cuenta sobre este proyecto

A continuación se resumen los principales pros y contras identificados luego de analizar este proyecto

PROS

- El proyecto demuestra que se puede construir desde cero un dispositivo digitalizador sin incurrir en una gran inversión.
- De las iniciativas DIY es la que cuenta con mejor documentación y esto ha permitido el desarrollo de una comunidad de personas que trabajan activamente en esta materia.
- La disposición de los carretes en el plano horizontal parece ser la mas adecuada ya que aprovecha el propio peso de los carretes para mantenerlos en su lugar. Esto evita tener que pensar en un mecanismo de sujeción.
- La utilización de dos motores aporta por un lado resistencia mecánica a la bobina de origen (necesaria para lograr una alimentación adecuada del film) y por otro permite rebobinar y re ubicar el film en la sección de interés con facilidad.
- La utilización de impresión 3D para fabricar los rodillos dentados introduce mucha flexibilidad al momento de probar diseños alternativos a los tradicionales
- El diseño es suficientemente flexible como para poder ser construido con diferentes materiales. Del mismo modo, es posible utilizar prácticamente cualquier cámara sin condicionar el desempeño del software.

CONTRAS

- La construcción de este dispositivo requiere de algunas partes que pueden resultar difíciles de conseguir o al menos caras (sobre todo en ciertas partes del mundo). Un ejemplo de esto son los mecanismos de ajuste (horizontal y vertical) de la cámara.
- El sistema de transporte de film utiliza rodillos dentados e interruptores electromecánicos para sincronizar el avance con la captura. Este mecanismo resulta relativamente complejo y requiere de múltiples partes móviles funcionando en sincronía.
- El diseño actual de este dispositivo hace que sea bastante trabajoso ponerlo en condiciones de funcionar ya que tiene múltiples partes independientes que deben ubicarse en la zona de trabajo.
- En su última versión incorpora mecanismos adicionales para controlar la tensión del film lo cual aumenta aún más la lista de partes y la dificultad de fabricación.

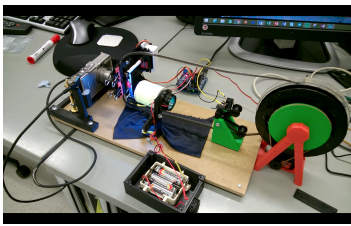
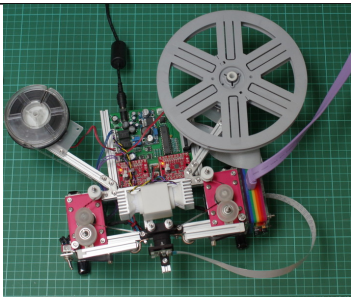
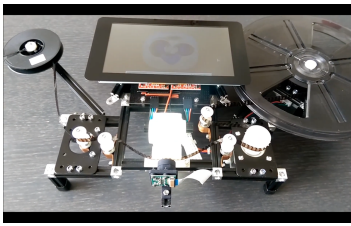
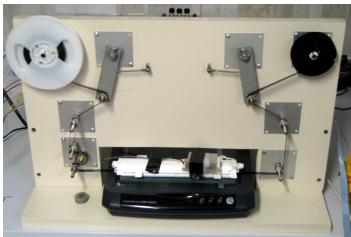
Oportunidades de mejora detectadas en Kinograph

La principal oportunidad de mejora encontrada es el hecho de simplificar el mecanismo de transporte de film, minimizando la cantidad de partes tanto como sea posible. Para esto se decidió aprovechar al máximo la impresión 3D como técnica principal de fabricación y complementarla con elementos básicos y estándar (como varillas roscadas) disponibles en cualquier parte del mundo a un bajo precio. Del mismo modo se identificó también la oportunidad de aprovechar el propio sensor de imagen para controlar el avance del film sin necesidad de incorporar sensores adicionales.

2.3.2 Otras iniciativas DIY

En esta sección se resumen los proyectos de diseño y construcción de sistemas digitalizadores mas relevantes para este trabajo. En su mayoría se trata de proyectos en curso que periódicamente son actualizados ya sea por su autor o por otra persona que aporta mejoras en una nueva iteración del diseño. Existe una gran cantidad de dispositivos de digitalización DIY basados en proyectores antiguos. Teniendo en cuenta los objetivos y el abordaje de este trabajo se decidió dejar fuera esos trabajos.

La figura 2.2 presenta las principales características de los dispositivos DIY analizados.

Nombre	Imagen	Precio estimado (USD)	Formatos Soportados	Mecanismo de transporte	Materiales
The 8mm film scanner [18]		< 500	8 mm	Garra de una cámara antigua accionada por servo.	Madera, partes de cámara antigua y plástico (Impresión 3D) para soportes de cámara, ventana, lámpara y carretes.
Rpit-elecine [19]		< 750	8 mm	Rodillo dentado accionado por stepper y motores DC en carretes	Perfiles de Aluminio sujetos con tornillos
Super 8 Scan Raspberry Pi [20]		< 750	8 mm	Rodillo dentado accionado por stepper y motores DC en carretes	Perfiles de Aluminio sujetos con tornillos
Linux-Based 8mm Telecine [21]		< 750	8 mm	Rodillo dentado, motor en carretes y tensores a resorte	Madera, aluminio

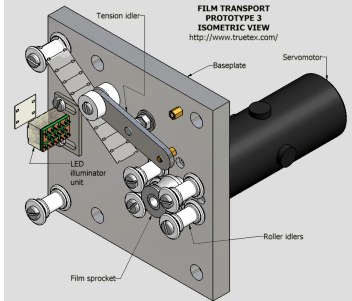
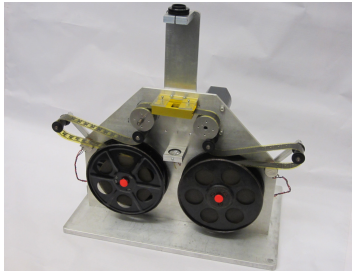
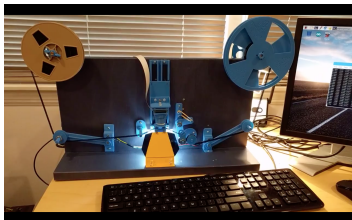
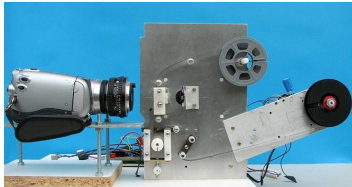
Flatbed Scanner Digital Telecine (FSDT) Project [22]		< 1000	16 mm	Rodillo dentado accionado por servo. 4 rodillos tensores (idlers) + 1 tensor con retroalimentación	Aluminio
Digital Telecine [23]		< 750	28 mm	Rodillo dentado accionado por stepper motor, carretes con motores DC + 1 tensor con retroalimentación	Aluminio
Super8scan Project [24]		< 500	8 mm	Tracción directa del film mediante brazos pivotantes	Plástico (Impresión 3D) y madera
METS (Macro Economic Telecine System) [25]		< 500	8 mm	Garra, stepper motores en los carretes y tensor	Aluminio

Table 2.2 Scanners DIY

En la información presentada en la tabla 2.2 podemos ver que existen ciertos aspectos que diferencian significativamente al desarrollado en este trabajo:

- La gran mayoría ubica las bobinas verticalmente
- En todos los casos el mecanismo de transporte trasfiere la fuerza de tracción a la cinta mediante algún tipo de garra o rodillo dentado
- La impresión 3D se utiliza solo en algunos dispositivos y en piezas puntuales. En ningún caso la impresión 3D es la técnica de fabricación para la estructura principal del dispositivo
- La detección de avance del film es en todos los casos a través de dispositivos electromecánicos
- Todos los dispositivos utilizan una parte móvil específica para mantener la tensión en el film durante el debobinado

2.4 Técnicas de fabricación digital

2.4.1 Control Numérico Computarizado (CNC)

La fabricación digital tiene su primer manifestación en 1952 [26] cuando un grupo de investigadores del MIT logró conectar una primitiva computadora digital a una máquina fresadora. De esta forma lograron producir piezas mucho mas complejas que las que lograba un operador accionando directamente los controles de la fresadora. A partir de ese momento infinidad de herramientas de corte fueron conectadas a computadoras.

La base de la fabricación digital es el control numérico computarizado (CNC). Se trata de un sistema de automatización que proporciona a las máquinas de fabricación una secuencia de instrucciones predefinidas por el operador para realizar un trabajo específico. La secuencia de instrucciones se organiza en fases y se codifica en un lenguaje estándar (siendo el código G el mas utilizado) que determina el movimiento de los actuadores de la máquina (por ejemplo los motores de una impresora 3D). La generación del código G puede realizarse en forma manual (el operador traduce los movimientos que espera de la máquina en código G y luego lo comunica a la máquina) o en forma automática a través de un programa específico para esa tarea. En el caso de la impresión 3D, el input del proceso es un modelo tridimensional del objeto que se quiere imprimir generado con algún programa de diseño 3D o mediante técnicas de fotogrametría (composición de un modelo 3D a partir de un conjunto de imágenes

2D del objeto real). El modelo 3D se procesa por un software que, conociendo los parámetros configurados en la máquina que fabricará el objeto (por ejemplo: relación desplazamiento / pasos del motor, sección del extrusor en el caso de impresión 3D o diámetro de la mecha en el caso de un router) "corta" virtualmente al modelo y posteriormente define para cada corte el conjunto de instrucciones que cada actuador de la máquina requiere para reproducirlo. Al software que procesa el modelo 3D de esta forma se lo conoce como slicer.

Las principales máquinas utilizadas en fabricación digital (fuera del ámbito industrial) son las siguientes:

- Cortadoras láser
- Routers
- Impresoras 3D

Existen otras máquinas CNC más sofisticadas, que generalmente se encuentran en ámbito industrial:

- Cortadoras de plasma y chorro de agua
- Dobladoras de tubo
- Máquinas de Descarga Eléctrica (EDM)
- Bordadoras
- Fresadoras de 3, 4, y 5 ejes
- Soldadores

2.4.2 Impresión 3D Aditiva Open Source

La impresión 3D aditiva surge en 1980 [26] pero no es hasta fines de la primera década del año 2000 que comienza a encontrar su lugar en los talleres y escritorios de aficionados. Este fenómeno se da por dos motivos principales: la disminución constante del precio del hardware y el desarrollo de un movimiento llamado RepRap [2], enfocado en poner a disposición una impresora 3D Open Source (GNU General Public License¹) capaz de replicarse a sí misma (70 % de sus partes) con un costo inferior a los 350 Euros.

¹Garantiza a los usuarios finales (personas, organizaciones, compañías) la libertad de usar, estudiar, compartir (copiar) y modificar el software. Su propósito es doble: declarar que el software cubierto por esta licencia es libre, y protegerlo (mediante una práctica conocida como copyleft) de intentos de apropiación que restrinjan esas libertades a nuevos usuarios cada vez que la obra es distribuida, modificada o ampliada. [27]

Al momento de escribir este documento son cerca de 80 los modelos de impresoras RepRap registrados en el sitio oficial [28] y teniendo en cuenta que cada nueva iteración llevada a cabo por un usuario normalmente incorpora modificaciones la variedad de opciones es significativamente mayor.

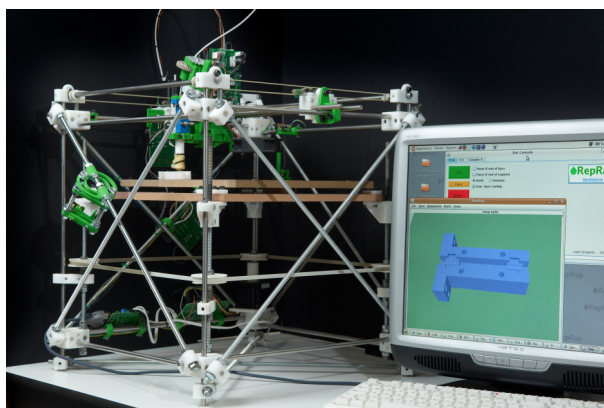


Fig. 2.5 RepRap Version I “Darwin” [2]

Además de ser la tecnología de fabricación utilizada en el dispositivo digitalizador construido en el marco de este proyecto, la impresión 3D aditiva (y en particular los modelos de impresoras comprendidas dentro del movimiento RepRap) fue uno de los principales disparadores de este trabajo. La experiencia adquirida durante la construcción de una de estas máquinas aportó conocimiento fundamental a nivel de la utilización de la impresión 3D como tecnología de fabricación y también el entendimiento de como funcionan estas máquinas a nivel de hardware y software permitió conocer las capacidades y limitaciones de este tipo de máquinas. Como se puede ver a lo largo de este documento existen importantes similitudes entre una impresora 3D de tecnología aditiva (como la que se muestra en la figura) y el dispositivo digitalizador desarrollado en este trabajo.

2.4.3 Conclusión

Existe una creciente variedad de dispositivos digitalizadores comerciales cuyo rango de precio va desde los 300 Dólares hasta los 400.000 Dólares. El mercado parece especialmente desatendido en el rango de precio que va desde los 500 Dólares hasta los 5.000 Dólares que es el presupuesto que comprende a aficionados y pequeñas instituciones. Por otra parte, existen varios dispositivos DIY que se ubican en este rango de precio y potencialmente podrían cubrir el segmento no atendido por los dispositivos comerciales. El diseño de la gran mayoría de dispositivos DIY analizados no es suficientemente replicable, principalmente por utilizar en casi todos los casos partes especiales extraídas de proyectores y/o cámaras

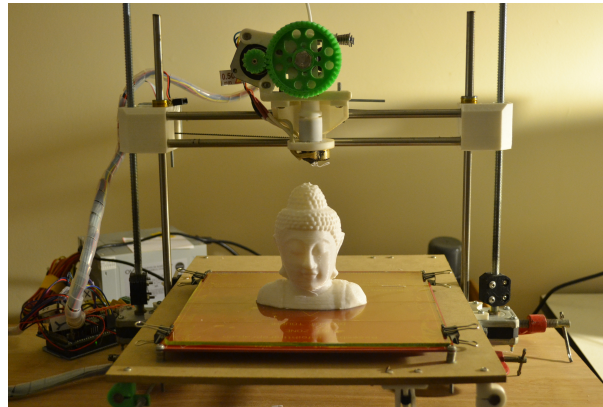


Fig. 2.6 Impresora 3D "Printrbot" construida por el autor con piezas fabricadas en una impresora 3D similar

antiguas y además por estar basados en mecanismos de transporte de film complejos y poco robustos (como garras o rodillos dentados con tensores móviles). Las técnicas de fabricación digital disponibles actualmente son aprovechadas por los dispositivos DIY analizados pero en forma moderada. El uso de la impresión 3D en los dispositivos analizados se restringe a pequeñas partes (soportes, tensores, etc.) pero en ningún caso la estructura principal se construye con dicha tecnología.

Capítulo 3

Diseño del mecanismo de transporte de film

3.1 Descripción del proceso de diseño

Para diseñar un sistema complejo como es un dispositivo para la digitalización de cintas de cine es necesario identificar bloques funcionales en los que se puede trabajar en forma independiente (sin contar con el resto del sistema). De esta forma es posible identificar problemas en una fase temprana y probar posibles soluciones. Este abordaje también permite establecer durante el proceso los requerimientos y lineamientos de diseño para el resto de los sistemas que se deben desarrollar. El abordaje al proceso de diseño en este trabajo fue alcanzar un producto mínimo viable para cada subsistema realizando múltiples iteraciones parciales antes de unir todos los subsistemas en un dispositivo final. Desde el punto de vista práctico este abordaje tiene las siguientes ventajas:

- Realizar modificaciones y volver a fabricar un subsistema tiene un costo menor.
- Poder poner en funcionamiento un subsistema en forma aislada del resto permite evaluar su desempeño rápidamente e identificar oportunidades de mejora.
- Permite enfocarse durante un período de tiempo concreto en un aspecto puntual destinando todos los recursos disponibles a esto.

3.2 Primer prototipo

El primer prototipo del sistema de transporte de film se hizo para poder contar desde el inicio del trabajo con una plataforma que permita transferir en forma simple el film desde la bobina

de origen a la de destino. En esta fase no se contempló la retroalimentación de ningún tipo (para la medición del avance).

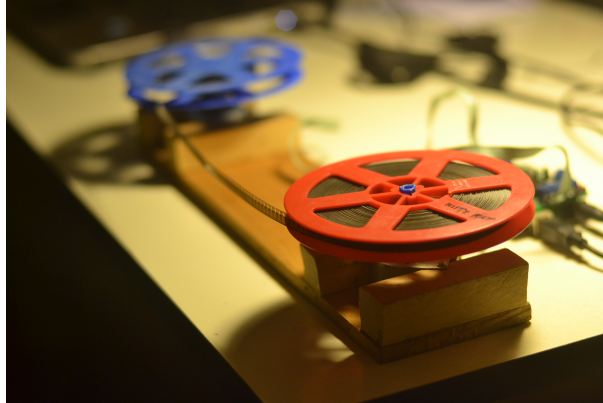


Fig. 3.1 Imagen del primer prototipo que se realizó

El avance del film de una bobina a otra determina que a medida que se transfiere el film el radio de la bobina destino se va incrementando (y lo opuesto ocurre con la bobina de origen), por lo que si mantenemos constante la velocidad angular de los motores, el desplazamiento del film al pasar por la ventana de captura será mayor cuando el carrete está lleno que cuando está próximo a vaciarse. Con el primer prototipo del sistema de transporte se buscó:

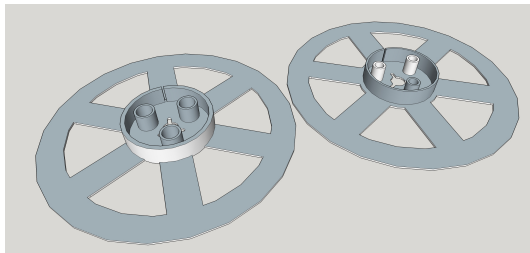
- Determinar qué tan importante es esta variación en la velocidad y qué impacto tiene en la tensión de bobinado de destino.
- Confirmar si es posible capturar correctamente con una cámara digital los cuadros en movimiento o es necesario detener el avance del film para cada captura.

La plataforma que se construyó en esta etapa permitió probar diferentes configuraciones (principalmente: tipos de motor, velocidades, mecanismos de control de tensión y estabilización mecánica del film).

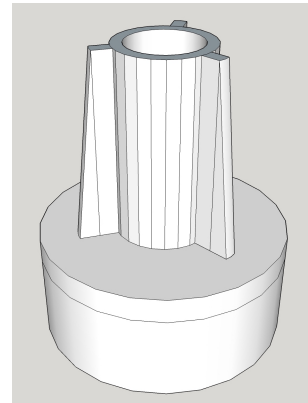
El hardware utilizado en este prototipo es el siguiente:

- Dos stepper motors de 200 pasos por revolución idénticos
- Placa Arduino con Driver para motores
- Interfaz gráfica con comunicación serial (desarrollada en Processing)

Se decidió usar motores stepper inicialmente porque son muy fáciles de conseguir (pueden adquirirse nuevos a un precio muy accesible o extraerlos de impresoras, scanners, disqueteras antiguas, entre otros dispositivos) y además permiten una gran precisión en el movimiento.



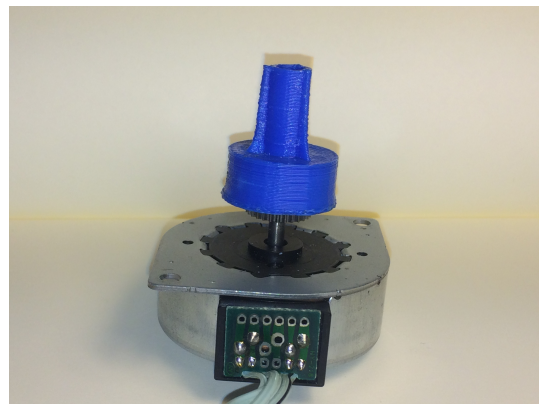
(a) Diseño de carrete destino



(b) Diseño de acoplador de eje para Super 8



(c) Carrete destino fabricado



(d) Acoplador de eje para Super8 fabricado y montado en motor

Fig. 3.2 Piezas diseñadas para el primer prototipo

El torque de estos motores es proporcional a su tamaño (así como también lo es la corriente que necesitan para energizar sus bobinados. Para poder controlarlos se necesita incorporar al micro controlador un circuito driver (en este caso un circuito diseñado específicamente para ser utilizado con la placa Arduino).

Una vez elegidos los motores se diseñaron los soportes necesarios para que las bobinas puedan girar solidariamente al eje de los motores. Estas piezas fueron diseñadas en Google Sketchup y posteriormente impresas en 3D. De la misma forma se construyó un carrete para recibir la cinta a medida que se va de-bobinando de la bobina de origen.

Prueba 1: Misma velocidad en take-up y feed reel

Durante esta prueba se inyectó la misma señal de control a los dos motores (solamente invirtiendo el sentido de giro de uno de ellos). En estas condiciones no se logró transportar la cinta en absoluto. La diferencia entre la velocidad de bobinado y debobinado producida

por los diferentes radios instantáneos en cada bobina hizo que rápidamente la cinta pierda tensión y no logre bobinarse en la bobina de destino.

Prueba 2: Bobina de destino (inicialmente vacía) mas rápido que el feed reel (inicialmente llena)

Esta configuración mostró buenos resultados pero por un período muy breve. En cuanto el radio de la bobina de destino aumentó, la diferencia de velocidades definida manualmente al principio ya no fue suficiente para compensar el efecto de los radios variables y la situación se transformó en la de la Prueba 1.

Prueba 3: Bobina de origen (inicialmente llena) con freno electromagnético y bobina de destino girando con velocidad constante

En esta configuración los bobinados del estator del motor que mueve la bobina de origen permanecen energizados, ejerciendo una leve fuerza electromotriz sobre los imanes permanentes del rotor, que tiende a mantenerlo en su posición. Esta fuerza junto con el rozamiento del propio eje del rotor aportan tensión a la cinta a medida que la bobina de destino gira, logrando que la misma se bobine en forma adecuada.

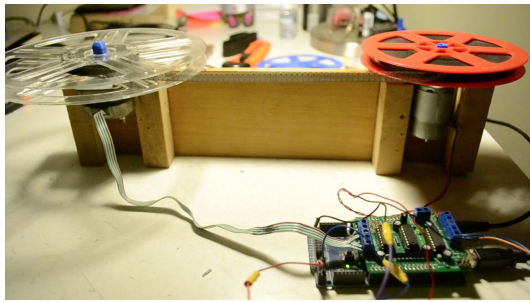
3.2.1 Conclusiones del primer prototipo

Una de las principales conclusiones a las que el primer prototipo permitió llegar es que la diferencia de velocidades que determina el radio variable de las bobinas de film afecta significativamente el sistema de transporte y no puede ignorarse. La implementación de un freno electromagnético en la bobina de origen demostró ser una solución adecuada para controlar los problemas de tensión durante el debobinado.

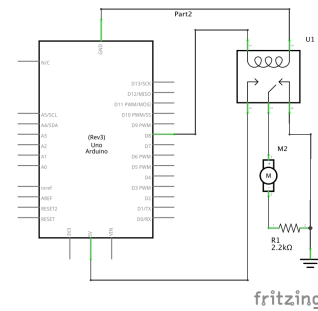
3.3 Segundo prototipo

La segunda iteración de proceso se realizó incorporando un motor stepper con mayor torque que el actual a la bobina de destino y un motor de corriente continua del lado de la bobina de origen con el objetivo de implementar un freno electromagnético continuo (sin saltos discretos como ocurre con los motores stepper). En esta fase se comenzó también a diseñar los accesorios necesarios para disminuir las vibraciones del film en la sección comprendida entre los dos bobinados (donde posteriormente se ubicará la ventana de captura).

Las características del motor stepper utilizado son las siguientes:



(a) Segundo prototipo



(b) Circuito para freno electromagnético

Fig. 3.3 Segundo prototipo

- Voltaje nominal: 7 V
- Intensidad de corriente: 0.7 A
- Resistencia: 10 Ohm
- Torque: 3.2 kg*cm
- Pasos / Revolución: 200
- Carcasa: NEMA 17

El freno electromagnético consiste en un motor de corriente continua funcionando como generador. En esta configuración los terminales de las escobillas del motor de corriente continua (que permiten realizar una conexión eléctrica con el rotor en movimiento desde fuera del motor) se conectan a una resistencia. Cuando el rotor gira (como consecuencia del movimiento de la bobina de origen) se induce una corriente en el bobinado y dicha corriente circula por la resistencia. Como consecuencia el rotor experimenta una fuerza que se opone al sentido de rotación del rotor (proporcional al valor de la resistencia) que resulta adecuada para controlar el debobinado del film. Para poder aprovechar el motor de corriente continua para rebobinar el film es necesario conectarlo como motor, es decir, proporcionarle una corriente para que gire el rotor. Para conmutar entre los dos circuitos (motor y generador) se utilizó un relé conectado de la forma que se ve en el esquemático de la figura 3.3

El dispositivo digitalizador que se desarrolló en este trabajo no tiene requerimientos a nivel de reproducción en tiempo real (como si lo tendría un proyector). Esto quiere decir que soporta que el transporte no sea continuo sino que es posible programar intervalos durante los cuales cada frame se detendrá frente a la cámara por cierto tiempo. Incluso, si fuese necesario, estos intervalos podrían tener diferente duración sin modificar el resultado. El hecho de poder detener el film al momento de la captura evita la necesidad de tener que



Fig. 3.4 Interfaz gráfica para envío de comandos via puerto serial

incorporar una cámara de alta velocidad y/o una luz estroboscópica que permita congelar el movimiento al momento de la captura (ambas cosas deseables ya que contribuyen a bajar el costo final del dispositivo).

Teniendo en cuenta lo anterior, en el segundo prototipo se modificó el código que controla los motores para que luego de cada avance (definido en cantidad de pasos del motor stepper) el film se detenga para llevar a cabo la captura. Para estas pruebas se implementó (en Processing ¹) un programa que permite enviar comandos a Arduino a través del puerto serial y de esta forma definir el avance del motor. Este programa cuenta con una interfaz de usuario básica a través de la cual es posible definir la velocidad de avance del motor stepper (para una cantidad de pasos fija definida en el software que corre en Arduino). La figura 3.4 muestra una captura de pantalla de la interfaz de usuario de este programa.

3.3.1 Conclusiones del segundo prototipo

Utilizando este prototipo fue posible validar que es posible transportar de forma adecuada el film desde la bobina de origen a la de destino sin necesidad de aplicar una fuerza de tracción en las perforaciones. Implementando un control adecuado del motor que mueve el carrete de destino es posible presentar convenientemente cada sección del film frente a una ventana de proyección (luego es responsabilidad de otro módulo del sistema detectar dónde exactamente está el cuadro y extraerlo). La utilización de un motor de corriente continua en el carrete de origen permite implementar un freno electromagnético que es capaz de introducir en el sistema la resistencia necesaria para que el debobinado se realice en forma adecuada. Si bien es posible realizar una transferencia continua del film de una bobina a otra y realizar capturas con la cinta en movimiento, este abordaje requiere la utilización de cámaras con mayores prestaciones que si se realizan capturas con el film detenido. En la misma línea, realizar capturas con el film detenido permite prescindir de luces estroboscópicas (flash) para

¹<https://processing.org/>

congelar la imagen. Por último, realizando pruebas de transporte a diferentes velocidades se comprobó la necesidad de incorporar al dispositivo bandejas giratorias en las que puedan apoyarse convenientemente los carretes para minimizar los movimientos del film en la zona de captura.

3.4 Conclusiones del módulo de transporte

- La diferencia de velocidades que provoca el radio variable de los bobinados es significativa y debe considerarse en el diseño.
- Es viable construir un mecanismo de transporte de film utilizando dos motores y prescindiendo de un mecanismo de tracción intermedio (como los basados en una garra que utilizan los proyectores tradicionales y gran parte de los sistemas de digitalización comerciales y DIY analizados).
- La película tiende a presentar oscilaciones significativas en la sección media (entre los bobinados) del dispositivo. Teniendo en cuenta que es en esa zona donde se ubicará el sensor (cámara) es necesario minimizar dichas oscilaciones. Se identificó la necesidad de incorporar bandejas para apoyar los carretes con el objetivo de asegurar que estos están rotando en el mismo plano.
- Las bandejas mencionadas en el punto anterior deben contar con rodamientos sobre los cuales se ubiquen las bobinas para minimizar el movimiento producido por el giro de los motores.
- La resistencia mecánica que se logra en el rotor del motor DC a través de la carga resistiva conectada es suficiente para limitar la velocidad del feed reel.
- Si bien es posible realizar las capturas con el film en movimiento, el hecho de hacerlo con el film detenido permite utilizar cámaras con menos prestaciones, prescindir de luces estroboscópicas y además evita que las oscilaciones que experimenta el film durante el transporte afecten la captura.

Capítulo 4

Detección de Frame

En esta sección se presentan las actividades llevadas a cabo durante el proceso de desarrollo de los algoritmos que permiten detectar un cuadro dentro de una captura del film. Para esta etapa del proyecto se comenzó trabajando con fotografías de cintas de 8 mm y Super8 encontradas en Internet y luego se confeccionó un sistema de captura básico que permitió realizar capturas con calidad suficiente como para que el algoritmo desarrollado pueda funcionar.

4.1 Definición del problema

Como se indica en la sección anterior el sistema de transporte de film ubicará frente al sensor durante un cierto período de tiempo una sección del film. Llamaremos escena a la imagen que obtiene la cámara antes de ser procesada. La escena esta compuesta por:

- El cuadro que se quiere detectar
- Parte de los cuadros vecinos
- Perforaciones del film
- Parte de la ventana de proyección (encima debajo de los bordes del film)

El algoritmo de detección de cuadro debe buscar en la escena atributos que sean independientes del contenido para poder mantener la generalidad. Las dimensiones de las películas están regidas por estándares internacionales (ISO 28, 74, 486, 1201) [3] . Sin embargo se pudo comprobar que, al menos para el caso de 8 mm estándar y Super8, algunas dimensiones presentan variaciones (como es el caso del espacio entre cuadros y la posición del cuadro en relación a las perforaciones).

Para que el dispositivo sea robusto y fácil de utilizar, el proceso de detección de cuadro debe ocurrir con la menor intervención posible del usuario. Para esto se decidió que el algoritmo intente ubicar en cada captura la posición exacta de las perforaciones del film ya que con esta información (y obviamente la del formato del film que se está digitalizando) es posible ubicar (y por lo tanto extraer) la sección relevante de cada escena.

Adicionalmente, la identificación precisa de una perforación proporciona información sumamente útil para el registro (alineación) de los cuadros sin necesidad de utilizar información del contenido, lo cual es algo deseable ya que la información de la escena varía cuadro a cuadro en mayor o menor medida pero el patrón de una perforación no (y tampoco su ubicación respecto al frame), al menos no para una cinta determinada.

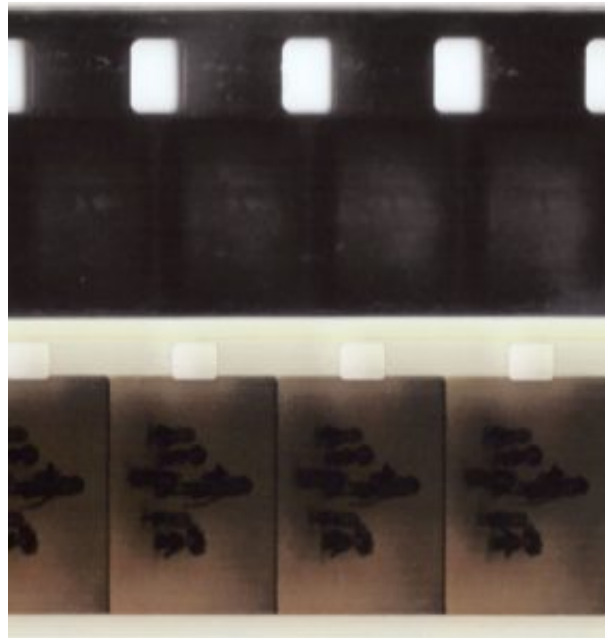


Fig. 4.1 Imágenes de film 8 mm utilizadas para las pruebas

Se trabajó inicialmente con las dos imágenes que se ven en la figura 4.1. La imagen que se ve en la parte superior es de un film 8 mm estándar con alto contraste en la zona de las perforaciones y la que está debajo es de un film Super 8 con bajo contraste en dicha zona. Naturalmente la imagen con bajo contraste presenta mayor dificultad para detectar automáticamente las perforaciones.

4.2 Conceptos generales de los formatos 8 mm estándar y Super 8

Los formatos de 8 mm son introducidos por la empresa Kodak como una opción barata para usuarios no profesionales. La estrategia consistió en aprovechar las cintas de 16 mm que ya se venían utilizando en el ámbito científico y militar, duplicar el número de perforaciones y cortarla longitudinalmente para obtener dos cintas de 8 mm. Las dimensiones de los diversos formatos de film existentes generalmente siguen estándares estrictos con el objetivo de que los mismos puedan ser reproducidos y procesados en dispositivos hechos en distintas partes del mundo por distintos fabricantes. Los formatos Super8 y 8 mm standard en algunos casos se alejan levemente de estos estándares ya que son formatos utilizados a nivel doméstico sin grandes requerimientos de calidad (como ocurre con los formatos mayores utilizados tradicionalmente en la industria cinematográfica). Para este trabajo se considerarán las dimensiones indicadas en las Normas ISO previamente mencionadas, a partir de lo indicado en [3].

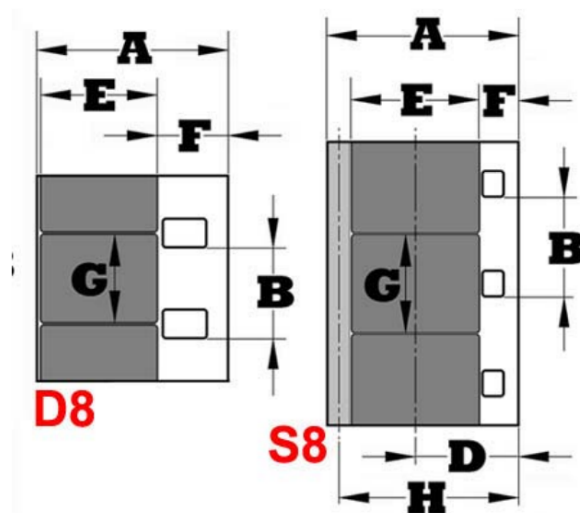


Fig. 4.2 Dimensiones de los films 8 mm standard y Super 8 [3]

A continuación se describen los diferentes algoritmos implementados para detectar las perforaciones en films de 8 mm y los resultados obtenidos en cada caso.

4.3 Pruebas de detección de perforaciones

Detección de esquinas

El primer intento de detección de las perforaciones se hizo mediante el detector de esquinas de Harris. Si bien este algoritmo mostró ser capaz de ubicar las esquinas de las perforaciones, resultó prácticamente imposible llegar a un set de parámetros que evite detectar otras esquinas que no son relevantes para este proceso (como por ejemplo las que aparecen dentro del frame como parte del contenido). Lo natural sería definir una región de interés (ROI) que deje fuera al contenido sin embargo, al observar en detalle el resultado de la detección (figura 4.3) se ve que por cada esquina de la perforación el algoritmo ubica varios puntos. Una de las razones por las que ocurre esto es porque la forma de la perforación no es rectangular sino que sus esquinas tienen cierto radio de curvatura. Esto dificulta mucho la ubicación de la perforación y hace que el sistema no sea suficientemente robusto. Otro aspecto que hace poco aplicable esta solución es que las cintas presentan información (generalmente letras) en la sección comprendida entre las perforaciones. Dichas letras suelen tener un nivel de contraste suficiente como para que el detector intente ubicar esquinas dando lugar a falsos positivos.

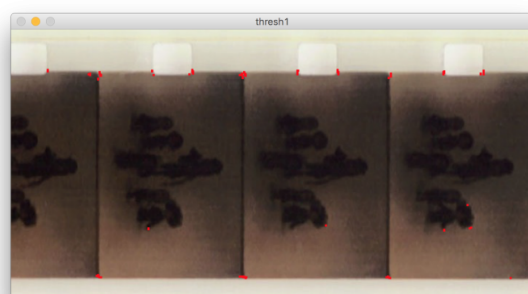


Fig. 4.3 resultado de la detección de esquinas

Detección de Blobs (regiones)

Un blob es un grupo de pixels conectados que comparten cierta propiedad (por ejemplo el color, o nivel de gris en caso de imágenes monocromáticas). La función utilizada para estas pruebas es SimpleBlobDetection (disponible en OpenCV), la cual inicialmente aplica múltiples Thresholdings variando el valor de umbral, luego busca contornos y finalmente filtra los resultados por parámetros configurables como área máxima y mínima de Blob. Como resultado entrega un array con los centros de los blobs encontrados.

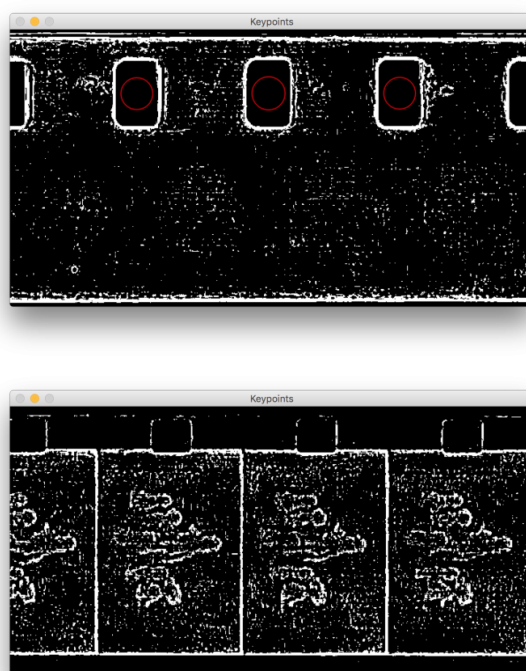


Fig. 4.4 resultado de la detección de blobs

En la figura 4.4 se muestra el resultado de la detección de blobs para el film 8 mm (arriba) y el resultado para el film Super8 (debajo). En el caso de 8 mm se puede ver que el algoritmo logra ubicar sin problemas el centroide de cada perforación (marcado con círculos rojos) mientras que en el caso de la imagen Super8 no es posible. El principal motivo se debe a que luego del proceso de Thresholding la imagen resultante en el caso de Super8 presenta contornos débiles al punto que el algoritmo no logra interpretar que las perforaciones son blobs. Si bien es posible ajustar parámetros para que el algoritmo logre identificar las perforaciones en cualquier caso, es inviable depender del ajuste del usuario a ese nivel. Teniendo en cuenta que el nivel de contraste de las imágenes que el sistema tendrá que procesar se asemeja mucho más al de la imagen Super8 que a la imagen 8mm es necesario probar con otro algoritmo.

Transformada de Hough

Una forma relativamente rápida de identificar líneas en una imagen es mediante la transformada de Hough. Esta transformada puede generalizarse para detectar otras formas simples como elipses pero no es lo que nos interesa en este trabajo. OpenCV pone a disposición dos variantes del detector de líneas de Hough: Standard y Progresiva Probabilística. La primera

consiste en representar cada punto de la imagen en un plano (a,b) donde las coordenadas son la pendiente e intersección de todas las rectas que pasan por ese punto. De esta forma los puntos que formen parte de líneas en la imagen de entrada se verán como máximos locales en el plano (a,b) . La variante probabilística difiere principalmente en que no considera todos los puntos de la imagen sino que considera para el cálculo solo un subconjunto de puntos (que son candidatos fuertes a pertenecer a una línea).

La imagen de entrada para este algoritmo debe ser binaria y el conjunto de parámetros incluye un umbral que es el número mínimo de votos que debe obtener el objeto identificado para ser considerado una línea. La variante probabilística de este algoritmo incluye un parámetro adicional que es la máxima distancia entre puntos consecutivos para considerar que pertenecen a una línea.

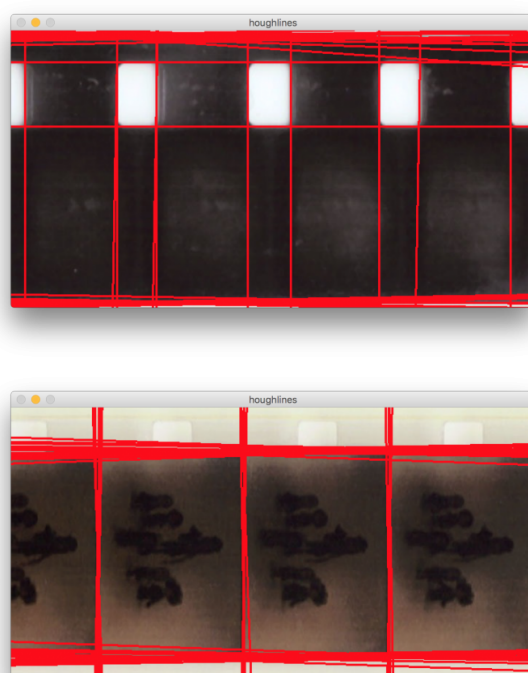


Fig. 4.5 resultado de la detección mediante transformada de Hough

La figura 4.5 muestra el resultado de procesar las dos imágenes de prueba con la versión estándar del detector de líneas de Hough. Se puede ver que en el caso de la imagen S8 (izquierda) el algoritmo no logra detectar las líneas correspondientes a las perforaciones sino que prevalecen las que separan los cuadros del film. Por el contrario, las características de la imagen 8mm que se presenta a la derecha (alto contraste en la ventana que forman las perforaciones y escaso contraste entre cuadros) hacen que el algoritmo tenga éxito detectando la frontera de las perforaciones.

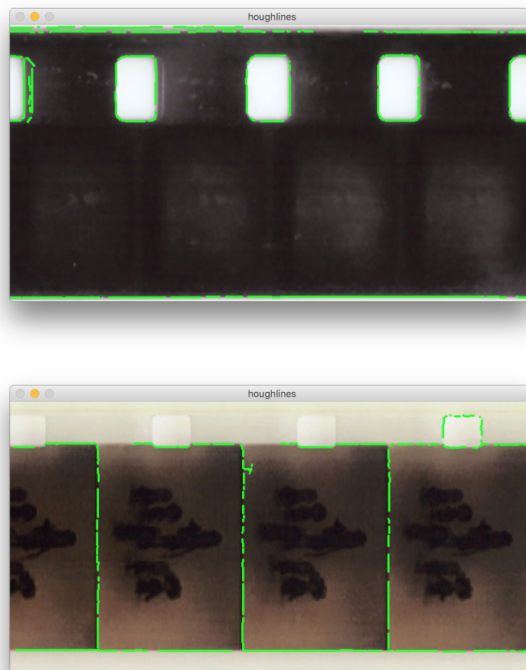


Fig. 4.6 resultado de la detección mediante transformada de Hough (variante probabilística)

La variante probabilística del algoritmo de Hough que se muestra en la figura 4.6 demostró ser capaz de no ignorar las líneas debidas al contenido y detectar principalmente los objetos que interesan en esta etapa del trabajo (sprocket holes y límite de frame). Sin embargo las líneas detectadas no son continuas y al igual que los algoritmos anteriores el desempeño para la imagen de prueba Super8 no es aceptable.

4.3.1 Conclusiones de las pruebas de detección de esquinas, líneas y blobs

Los algoritmos clásicos de detección de Blobs y líneas no se desempeñaron suficientemente bien como para optar por utilizarlos en la detección de las perforaciones de un film. Todos mostraron limitaciones importantes para detectar los objetos de interés cuando el contraste entre la perforación y el resto del film es poco. Por otra parte, si bien todos los algoritmos probados en esta etapa en mayor o menor medida son capaces de detectar las zonas de interés, en todos los casos los resultados incluyen objetos no deseados. Esto limita significativamente el nivel de automatización que el sistema puede alcanzar ya que con estos resultados se hace imprescindible el ajuste y supervisión permanente por parte del usuario.

4.4 Formulación del problema de detección de frame como un problema de identificación de patrones

Luego de analizar los resultados obtenidos utilizando los algoritmos descritos en las secciones anteriores se decidió formular el problema como la maximización de la correlación entre una señal de referencia (template) determinada principalmente por el formato del film que se esté digitalizando y una señal de entrada que se generará a partir de cada nueva imagen capturada.

Definición de la señal de entrada

La presencia de una perforación en la imagen determina la existencia de un modo principal en la señal que resulta al acumular los niveles de intensidad de los pixels ubicados a lo largo del eje que pasa por todas las perforaciones. El contraste entre el fondo (que se ve a través de la perforación) y el film dependerá principalmente del color de dicho fondo y de la iluminación al momento de hacer la captura. En cualquier caso la sección de la señal correspondiente a la zona de la imagen en la que se ubica la perforación presentará uno o mas modos (dependiendo de la cantidad de perforaciones que entren en la escena).

Teniendo en cuenta que (en cualquier formato de film) la distancia entre perforaciones es constante, la señal de intensidad a lo largo del eje de las perforaciones presentará escalones periódicos y las transiciones (o saltos) de dicha señal ocurrirán exactamente donde comienzan las perforaciones. De esta forma, si logramos ubicar los puntos donde se dan las transiciones logramos entonces ubicar las perforaciones **y como consecuencia todas las secciones de la imagen que son relevantes para este trabajo.**

Para definir la señal de entrada se consideró el eje común a las perforaciones como eje de abscisas (x) y luego se definió una región de interés (ROI) simétrica entorno a este eje. La señal de entrada es la que obtenemos acumulando los valores de intensidad de los pixels en cada columna de la ROI a medida que recorremos el eje de abscisas. En función de lo anterior la señal descrita presentará picos en los lugares claros de la imagen y valles en las zonas mas oscuras.

En la figura 4.7 se presentan dos ejemplos de la señal de entrada y en cada caso se incluye en la parte superior de cada una la ROI que la origina. En la señal de la imagen superior se ven exclusivamente dos modos que corresponden exactamente a la sección de la ROI en la que se ubican las perforaciones (significativamente mas claras que el resto de la ROI). En la inferior, además de los modos principales, se ven dos modos secundarios en la zona media que corresponden a una parte de la letra “O” que aparece en el film. Teniendo en cuenta que es altamente probable que el film presente este tipo de variaciones (ya sea por rótulos del film



Fig. 4.7 señal de entrada: nivel de intensidad de los pixels comprendidos dentro de una ROI simétrica con eje paralelo al eje de las perforaciones (horizontal). La ROI que genera esta señal es la que se ve en la figura 4.8

o por artefactos introducidos por el deterioro del material) es importante que el proceso sea capaz de detectar las perforaciones a pesar de esto y por eso se utilizó esta imagen de prueba.

Definición de la señal de referencia (template)

Si sabemos qué formato de film estamos digitalizando entonces contamos con información precisa sobre sus dimensiones, entre las cuales podemos destacar: paso de las perforaciones, espesor del film, ancho y alto de las perforaciones. Ubicando con precisión en la escena cualquiera de estas dimensiones es posible establecer una relación entre pixels y unidades de longitud (metros en este caso) para esa escena y todas las siguientes (en el entendido que no variemos la posición de la cámara respecto a la cinta). La dimensión que resulta mas práctica para esto es el ancho del film, por lo tanto antes de comenzar el procesamiento el usuario debe interactuar con el sistema indicándole dónde se ubican los bordes superior e inferior de la cinta utilizando una interfaz gráfica (GUI).

Una vez que la relación pixels / metros es conocida, es posible generar una señal cuadrada cuyos modos coinciden con las perforaciones del film y el ancho de los pulsos coincide con

el ancho de las perforaciones tomadas en la escena. Esta señal es la que se utilizará como template para ubicar las perforaciones en la imagen del film.

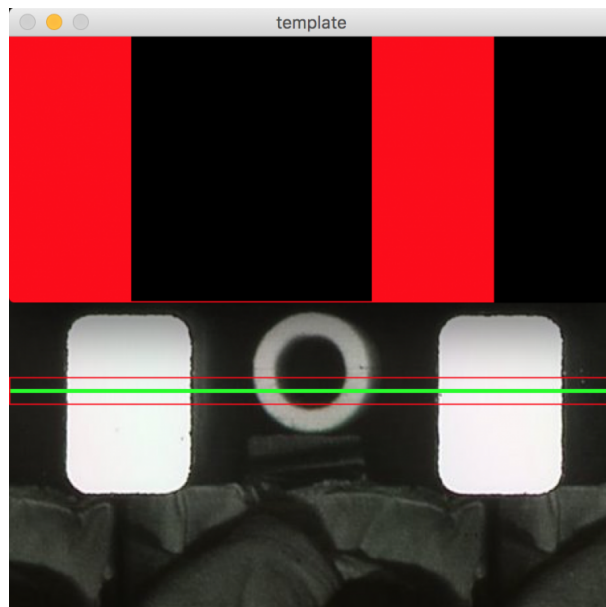


Fig. 4.8 Señal bi-modal generada por el sistema a partir de la ubicación de los bordes superior e inferior del film en la escena

En la figura 4.8 se puede ver en la parte superior, en rojo, la señal cuadrada generada a partir del dato de ancho de film (diferencia entre el borde superior y el borde inferior). En la imagen se puede ver que el ancho de pulso coincide con el ancho de las perforaciones y también puede verse que la distancia entre los modos de la señal es al menos similar a la separación entre perforaciones. La confirmación de esta similitud se ve luego del cálculo de la correlación para cada punto y la posterior identificación del punto de máxima correlación.

Identificación de patrones mediante el cálculo de la correlación cruzada

Una vez calculadas la señal de referencia y la señal de entrada se procede a buscar el punto del eje de abscisas donde ambas señales se asemejan más. Para esto se computa la correlación cruzada entre la señal de entrada y la señal template para cada punto de la señal de entrada.

$$(f \star g)(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f^*[m]g[m+n] \quad (4.1)$$

La correlación cruzada para funciones discretas queda definida por la expresión (4.1) donde f^* es el cojugado de la señal de entrada y g es la señal template. Para visualizar cómo se realiza el cálculo de la correlación cruzada entre f y g puede imaginarse una versión

desplazada de f que se va trasladando de derecha a izquierda a lo largo del eje de las abscisas y en para cada iteración se suma el producto entre el valor del conjugado de dicha señal con el valor del mismo punto en g . El valor de la correlación cruzada será máximo en la iteración en la que la señal de entrada se ubique sobre la señal template. El algoritmo de reconocimiento de patrones implementado para ubicar las perforaciones se presenta en el bloque de código 4.1. El algoritmo calcula la correlación cruzada en cada punto de la señal de entrada e identifica el máximo y este punto se considera el punto en el cual las señales se asemejan más y por lo tanto, ese es el punto donde los modos de la señal template se ubican sobre las perforaciones del film.

Bloque de Código 4.1 Determinación del punto de máxima correlación entre señal template y señal de entrada (generada a partir de la intensidad de los pixels comprendidos dentro de la región de interés definida por el usuario (zona de las perforaciones))

```
def correlacion(img, square_wave, template):  
    correlacion = np.correlate(square_wave, template, 'full')  
    correlacion_maxima = 0  
    for i in range(0, len(correlacion)):  
        if correlacion[i] > correlacion_maxima:  
            correlacion_maxima = correlacion[i]  
            punto_maxima_correlacion = i
```

La iteración que presente el máximo valor de correlación será la que ubica los modos de la señal de referencia sobre los modos de la señal de entrada y por lo tanto ese punto es la referencia que se debe tomar para ubicar el contenido de la escena que interesa (cuadro). En la figura 4.9 se presenta el resultado de la determinación del punto de máxima correlación como una línea vertical en el costado derecho de la perforación que se ubica a la derecha del cuadro. Es a partir de este dato que se puede ubicar el resto de las zonas de interés de la captura.

4.5 Conclusiones del módulo de extracción de frame

Se logró implementar un proceso de detección de perforaciones suficientemente robusto como para poder extraer las secciones relevantes de las escenas. Contar con la ubicación de estos elementos en la imagen es un paso fundamental para alinear los sucesivos cuadros y también para identificar (en función de las dimensiones estándar del formato) la zona de la imagen que contiene el frame.



Fig. 4.9 resultado de detección de sprocket holes con el método explicado en esta sección. En verde el eje de la ROI, en rojo la ROI, en azul el punto de máxima correlación y en magenta las perforaciones y la región del cuadro)

Capítulo 5

Detección del avance del film

5.1 Presentación del problema

Cuando se comenzó a diseñar el mecanismo de transporte de film utilizado en este proyecto se procuró prescindir de los mecanismos de tracción tradicionales (garras y rodillos dentados que se insertan en las perforaciones para tirar del film y lograr el avance). Las razones por las cuales se decidió esto son, por un lado reducir el esfuerzo al que se somete la cinta al transportarla, y por otro reducir la complejidad del mecanismo en si mismo ya que cuanto menor sea la cantidad de partes móviles más sencillo será fabricar esta máquina con componentes económicos y de fácil acceso.

Uno de los principales desafíos que trae aparejado prescindir de este tipo de mecanismos es medir de alguna forma el avance real experimentado por la cinta para lograr ubicar cada cuadro que se quiere capturar frente a la cámara para poder realizar la captura. En un escenario ideal en el cual una cierta cantidad de pasos del motor provoca que la cinta se traslade una distancia proporcional y constante a lo largo del tiempo, sería posible ubicar cada nuevo cuadro frente a la cámara con un sistema de control de lazo abierto (sin retroalimentar al sistema con información sobre la cantidad de pixels que avanzó el film cada vez). En la práctica existen diversos factores que justifican la utilización de un mecanismo de control en lazo cerrado, entre los cuales se puede destacar:

- Los motores no siempre rotan el mismo ángulo principalmente por la resistencia mecánica que pueden encontrar y por que el calentamiento de los bobinados y del circuito driver en algunos casos lo lleva a perder pasos¹.

¹Se denomina "perder pasos" a la situación en la cual un motor de tipo paso a paso efectúa un movimiento angular menor al que le fue instruido

- La acumulación del film en el carrete destino incrementa progresivamente el radio del bobinado de destino a medida que el film se transporta, determinando que para un mismo ángulo de rotación del motor el avance del film sea mayor.
- La tensión del film bobinado puede variar a lo largo del proceso, por lo que en determinadas situaciones será necesario efectuar una rotación mayor para lograr ubicar un nuevo cuadro frente a la cámara.

Por estas razones resulta imprescindible implementar un sistema capaz de hacer una predicción de la cantidad de pixels que avanzará el film para una cierta cantidad de pasos efectuados por el motor y posteriormente medir la cantidad de pixels que efectivamente se trasladó. Con esta información el sistema de captura es capaz de determinar si tiene o no un nuevo cuadro en escena y proceder de forma adecuada (capturando la escena o solicitando un incremento adicional según sea necesario).

5.2 Detección del avance del film y sincronización con módulo de captura

Considerando que el sistema debe contar necesariamente con una cámara para digitalizar el material **se decidió buscar la forma de basar el sistema de detección de avance en ese sensor**. Esta estrategia traslada gran parte de la complejidad del sistema de transporte de film al software, lo cual está alineado con el objetivo de simplificar la construcción del dispositivo al máximo.

Para lograr esto es necesario implementar un módulo de software capaz de:

- Seguir la trayectoria de al menos un punto de la escena a lo largo de una secuencia de cuadros.
- Identificar cuando el film está detenido y en movimiento para poder determinar cual es el primer y último cuadro de la secuencia.
- Para los puntos rastreados computar la diferencia de posición entre el último cuadro de la secuencia y el primero.
- Llevar un registro actualizado de la relación entre los pasos instruidos al motor y la cantidad efectiva de pixels que se traslada el film.

5.3 Descripción general de flujo óptico y su aplicación a este problema

El primer paso para poder medir cuanto avanza el film es determinar qué puntos de la escena son buenos candidatos para ser seguidos a lo largo de una secuencia de cuadros. Generalmente estos puntos son esquinas fuertemente marcadas que se pueden diferenciar fácilmente del resto de la escena. La escena con la que habitualmente nos encontraremos durante la digitalización de un film presenta esquinas fuertemente marcadas en la sección donde se ubican las perforaciones. El nivel de contraste es variable ya que algunos films son transparentes en la zona de las perforaciones (siendo este el peor escenario) y otros son mas opacos (lo cual facilita la detección). Las transiciones entre cuadros suelen presentar también puntos adecuados para seguir ya que generalmente pueden identificarse cambios repentinos en el contraste (bordes). La escena puede también presentar otros puntos adecuados para rastrear que dependerán del contenido registrado en el film y por lo tanto la probabilidad de que se mantengan a lo largo de una secuencia completa es menor (por ejemplo en un cambio de escena ² seguramente se pierdan todos los puntos correspondientes a contenido).

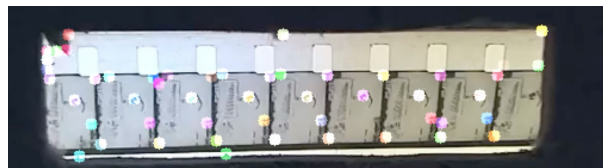


Fig. 5.1 Puntos identificados como buenos candidatos para ser rastreados. Implementación del algoritmo "goodFeaturesToTrack" de OpenCV (utilizando detector de esquinas Shi-Tomasi)

La figura 5.1 muestra una imagen de las primeras pruebas que se realizaron con el algoritmo de identificación de puntos para el rastreo. En la misma puede verse que, si bien algunos de los puntos se ubican sobre las perforaciones, también se aprovecha otra serie de rasgos característicos (y fáciles de rastrear) de la escena.

5.3.1 Definición de flujo óptico

Una vez definidos los puntos que se considerarán para determinar el avance del film, el algoritmo toma el cuadro siguiente y busca esos mismos puntos. Para esto el algoritmo para la determinación de flujo óptico implementado en OpenCV hace las siguientes suposiciones [29]:

²En este caso nos referimos a la escena del contenido registrado en el film que se está digitalizando y no a la imagen capturada por el sensor del dispositivo

- La intensidad de los pixels que representan el objeto que se pretende seguir no varían entre cuadros consecutivos.
- Pixels próximos tienen movimiento similar.

Si en esas condiciones consideramos la intensidad I de cierto pixel ubicado en la posición dada por (x, y) en el instante t se puede decir que en el siguiente cuadro, transcurrido un tiempo dt , ese pixel se mueve una distancia (dx, dy) .

$$(I)(x, y, t) = (I)(x + dx, y + dy, t + dt) \quad (5.1)$$

Usando la serie de Taylor para aproximar el lado derecho de la ecuación 5.1 obtenemos la siguiente igualdad:

$$(I)(x + dx, y + dy, t + dt) = (I)(x, y, t) + \frac{dI}{dx}\Delta x + \frac{dI}{dy}\Delta y + \frac{dI}{dt}\Delta t \quad (5.2)$$

Considerando la ecuación 5.1 podemos decir que:

$$\frac{dI}{dx}\Delta x + \frac{dI}{dy}\Delta y + \frac{dI}{dt}\Delta t = 0 \quad (5.3)$$

y dividiendo entre Δt obtenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{dI}{dx} \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{dI}{dy} \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{dI}{dt} \frac{\Delta t}{\Delta t} = 0 \quad (5.4)$$

dado que *velocidad = distancia/tiempo* podemos reescribirla de la siguiente forma:

$$\frac{dI}{dx}V_x + \frac{dI}{dy}V_y + \frac{dI}{dt} = 0 \quad (5.5)$$

donde V_x, V_y son las componentes de la velocidad en cada una de las dimensiones y se las conoce como flujo óptico de $(I)(x, y, t)$ y $\frac{dI}{dx}, \frac{dI}{dy}, \frac{dI}{dt}$ son las derivadas de la intensidad del pixel (x, y) en el instante t en las direcciones correspondientes. La ecuación 5.5 puede escribirse de la siguiente forma:

$$I_x V_x + I_y V_y = -I_t \quad (5.6)$$

La ecuación 5.6 tiene dos incógnitas, por lo cual no puede resolverse sin incorporar alguna otra ecuación. En este trabajo se utilizó el método de Lucas-Kanade [30] el cual, asumiendo que el movimiento del contenido de la escena en dos cuadros consecutivos es pequeño y aproximadamente constante dentro de la región circundante al punto bajo análisis,

obtiene un sistema de $n \times n$ ecuaciones (siendo n el tamaño de la región circundante) y las mismas dos incógnitas V_x y V_y .

$$I_x(q_1)V_x + I_y(q_1)V_y = -I_t(q_1) \quad (5.7a)$$

$$I_x(q_2)V_x + I_y(q_2)V_y = -I_t(q_2) \quad (5.7b)$$

$$\vdots \quad (5.7c)$$

$$I_x(q_n)V_x + I_y(q_n)V_y = -I_t(q_n) \quad (5.7d)$$

$$(5.7e)$$

Expresado en forma matricial:

$$Av = b \quad (5.8)$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} I_x(q_1) & I_y(q_1) \\ I_x(q_2) & I_y(q_2) \\ \vdots & \vdots \\ I_x(q_n) & I_y(q_n) \end{bmatrix}; v = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} -I_t(q_1) \\ -I_t(q_2) \\ \vdots \\ -I_t(q_n) \end{bmatrix}$$

Dado que se trata de un sistema sobre determinado (mas ecuaciones que incógnitas) el método este método utiliza el principio de mínimos cuadrados para llegar a un sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas.

$$A^T Av = A^T b \quad (5.9a)$$

$$v = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (5.9b)$$

Donde A^T es la matriz transpuesta de A . El sistema a resolver queda planteado entonces de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i I_x(q_i)^2 & \sum_i I_x(q_i)I_y(q_i) \\ \sum_i I_y(q_i)I_x(q_i) & \sum_i I_y(q_i)^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_i I_x(q_i)I_t(q_i) \\ -\sum_i I_y(q_i)I_t(q_i) \end{bmatrix}$$

Para la implementación del proceso anteriormente descrito se utilizó la función "calcOpticalFlowPyrLK" de OpenCV, basada en el algoritmo de cálculo de flujo óptico de Lucas-Kanade al que se le pasan como principales argumentos las dos imágenes de la secuencia cuyo flujo óptico se quiere calcular (inicial y final), un vector con las coordenadas

de los puntos cuyos correspondientes deben encontrarse y una ventana de búsqueda (que debe definirse convenientemente de acuerdo a una estimación del flujo óptico que se espera calcular). Cabe destacar que la función utilizada implementa el algoritmo antes mencionado para un conjunto de versiones de las imágenes de entrada de diferentes tamaños (a dicho arreglo de imágenes se le denomina pirámide) que mejora su el desempeño. El resultado de la ejecución de este algoritmo es un vector con las coordenadas de los puntos encontrados en la imagen final que tienen un correspondiente en la imagen inicial. Calculando la diferencia entre la posición de los puntos encontrados en la imagen final y la inicial se obtiene un vector de desplazamientos.

Determinación del avance del film

De acuerdo a lo descrito anteriormente, para cada par de cuadros consecutivos obtendremos un vector formado por desplazamientos (cada elemento del vector corresponde al avance experimentado por un par de puntos correspondientes en los dos cuadros que se están analizando). Siendo el film un objeto rígido que se desplaza longitudinalmente en una única dimensión es de esperar que todos los puntos experimenten el mismo desplazamiento. Sin embargo esto no ocurre y las principales razones por las que no ocurre son las siguientes:

- El algoritmo que identifica los puntos que son buenos candidatos para rastrear puede proponer algunos que están ubicados en el marco de la ventana y dado que este objeto queda fijo cualquier punto ubicado en esa parte no experimentará desplazamiento alguno.
- En algunos casos el algoritmo interpreta que ha encontrado un punto correspondiente cuando en realidad se trata de otro punto similar. El desplazamiento calculado en ese caso es equivocado. Esta situación se presenta por ejemplo cuando el tiempo entre dos imágenes de la secuencia es suficientemente largo como para que una perforación del film ocupe el lugar de su predecesora (en este caso el algoritmo "confundirá" las perforaciones y determinará en forma equivocada que prácticamente no hubo desplazamiento). **Este aspecto es fundamental ya que demuestra la importancia de controlar la cantidad de imágenes que se toman a lo largo de un desplazamiento.**
- Todas las cámaras presentan cierto grado de distorsión radial en sus ópticas y esto hace que para un punto de la escena el desplazamiento percibido dependa de la posición del mismo. Esto quiere decir que para un mismo desplazamiento del film, un punto ubicado en el centro de la escena presentará un desplazamiento diferente a uno ubicado sobre lo extremos. Dependiendo del tipo de distorsión que presente la óptica dicho

desplazamiento será mayor o menor a medida que nos alejamos del centro de la escena. Mas allá de la estrategia que se seguirá para limitar el impacto de este efecto en la medida del desplazamiento del film, es necesario llevar a cabo un proceso de calibración del sensor.

Teniendo en cuenta lo anterior es razonable pensar que el desplazamiento “más popular” presentado por puntos encontrados en cuadros consecutivos es el que mejor representa el desplazamiento real del film. En términos estadísticos al valor que se da con mayor frecuencia (el que ocurre mas veces) en una distribución de datos se lo llama moda [31]. La utilización de la moda en contraposición al promedio evita que los puntos que presentan desplazamiento igual a cero afecten el valor final, siempre y cuando los puntos con desplazamiento igual a cero no sean la mayoría (en cuyo caso el algoritmo entendería que el film está detenido).

5.4 Detalles de la implementación

Para integrar este módulo al resto de la solución resulta fundamental estar en condiciones de detectar cuándo el film se está moviendo y cuándo se detuvo. Tanto en los dispositivos comerciales como en los DIY esta funcionalidad generalmente se logra utilizando un sensor específico para la tarea, como por ejemplo un encoder, que además permite medir el ángulo que efectivamente giró el rotor del motor en cada instrucción. Existen diversas maneras de incorporar un encoder y muchas de ellas no implican incorporar componentes caros pero siguiendo el abordaje ya explicado se optó por resolver también este aspecto con la propia información proveniente del sensor de imagen y de esa forma minimizar la lista de partes y bajar al mínimo la complejidad del sistema.

5.4.1 Primer iteración del módulo de transporte

La primer solución implementada para detectar si el film está o no en movimiento fue monitorear constantemente el valor de la moda del desplazamiento de los puntos para los que se halló correspondiente en cuadros consecutivos de la secuencia. Cuando la moda del desplazamiento de los puntos detectados permanece en cero por al menos tres cuadros el sistema interpreta que el film se detuvo y es ahí donde se instruye la captura de la escena.

En la figura 5.2 se presenta un flujo de alto nivel de la primera versión del programa que controla el transporte del film. Una de las principales características del mismo es que la interacción entre el software del micro controlador (que controla el motor) y el software que procesa las imágenes de la cámara para medir el avance del film es asíncrona. Esto quiere decir que cuando se envía un comando al motor no hay una respuesta que desencadena el

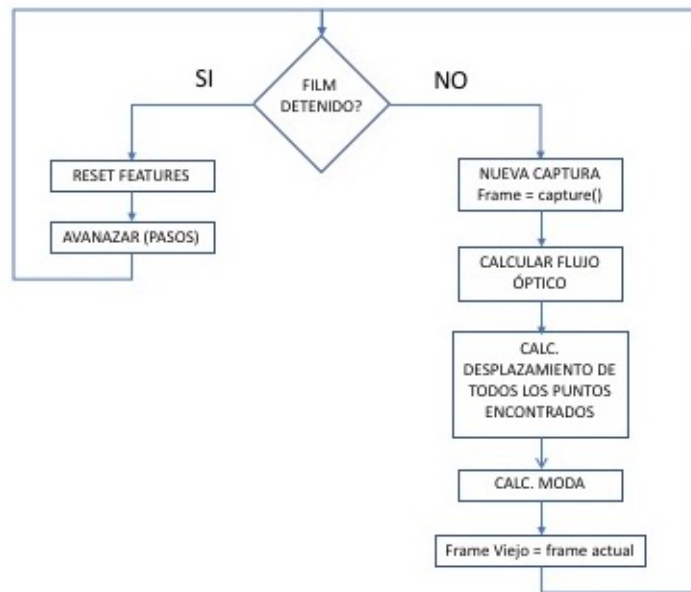


Fig. 5.2 Flujo de la primer iteración del módulo de transporte

resto de las acciones. El programa que procesa las imágenes instruye al motor un nuevo avance (enviando vía puerto serie un carácter ASCII que indica la cantidad de pasos de motor que deben darse) e inmediatamente a continuación entra en un bucle de captura, procesamiento (cálculo del avance entre cuadros consecutivos) y evaluación del resultado, del cual sale exclusivamente cuando el avance del film es igual a cero para tres cuadros consecutivos (indicando que el film está detenido). Al poder identificar el inicio y el fin del movimiento del film, el sistema puede medir los desplazamientos intermedios cuadro a cuadro y acumularlos 5.10. De esta forma se llega a la medida en pixels del avance que experimentó el film en cada instrucción de movimiento.

Este abordaje determina que no haya comunicación desde el micro controlador hacia el computador, lo cual (como se demostrara en secciones posteriores) resultaría útil principalmente para comunicarle al programa que el controlador del motor finalizó la secuencia de energizado de los bobinados y es seguro continuar con el procesamiento.

$$\sum_{n=1}^N \Delta x[n] = \text{Desplazamiento} \quad (5.10)$$

Mediante la acumulación de los desplazamientos entre cuadros consecutivos se logra calcular el desplazamiento total de la instrucción de movimiento como indica la ecuación 5.10.

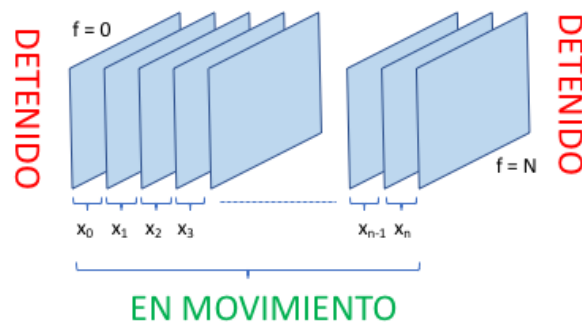


Fig. 5.3 Los desplazamientos detectados entre cada par de cuadros consecutivos son acumulados para calcular el desplazamiento total de la secuencia

Determinación de la trayectoria

En la figura 5.4 se presentan dos imágenes obtenidas durante la detección. En la primera podemos ver los puntos que se están siguiendo y un texto en rojo que indica que el film está detenido. En la siguiente imagen el film está en movimiento y se pueden ver líneas que parten desde los puntos, representando el desplazamiento experimentado por el film. En esta imagen el texto en verde indica que el film está en movimiento. En la captura correspondiente al film en movimiento se puede observar que hay puntos que presentan una trayectoria diagonal (cuando es de esperar que la trayectoria de todos los puntos sea horizontal debido a la naturaleza del movimiento del film). Este fenómeno se da cuando el algoritmo de flujo óptico interpreta incorrectamente que encontró el correspondiente a determinado punto por la similitud de la región circundante. El mismo fenómeno es el que tiene lugar cuando el algoritmo interpreta que hubo un desplazamiento negativo (que querría decir que el film cambió el sentido de avance). En ese caso lo que ocurre es que las dos imágenes que se usan para calcular el flujo óptico están demasiado separadas en el tiempo (frecuencia de muestreo no es suficientemente alta) y dadas las características de la escena, se presentan ambigüedades que llevan al algoritmo de flujo óptico a determinar que el film retrocedió. Esta situación podría evitarse imponiendo restricciones al algoritmo referentes al sentido del movimiento admitido, sin embargo, por no ser la interpretación de movimiento negativo la única implicancia del sub muestreo se decidió trabajar directamente en garantizar que la frecuencia de muestreo sea suficiente.

Durante las pruebas realizadas con la primera versión del programa se pudo observar cierta irregularidad en las medidas del avance del film: esto quiere decir que para instrucciones idénticas (cantidad de pasos constante) el sistema de detección percibe diferentes avances. Por esta razón se decidió hacer un análisis detallado de los desplazamientos medidos por el

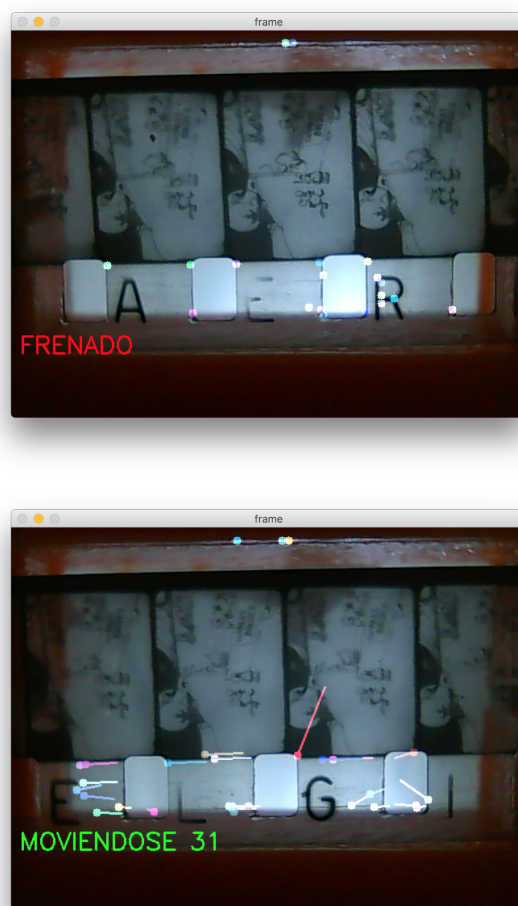


Fig. 5.4 Capturas de pantalla del sistema de detección de avance funcionando

sistema. La figura 5.5 muestra el avance percibido para una serie de aproximadamente 120 instrucciones de avance.

Rolling shutter

La primer observación realizada tuvo que ver con una diferencia local (intra cuadro) en el desplazamiento percibido por el sistema. Si bien se esperaba ver puntos que permanezcan en su lugar para todos los cuadros de una secuencia y también se anticipaban ambigüedades en la determinación del flujo óptico que conducirían a la determinación de trayectorias equivocadas, analizando la secuencia cuadro a cuadro se pudo observar que en algunos casos los puntos ubicados en la sección inferior de la escena experimentaban un desplazamiento mayor que los ubicados en la sección superior.

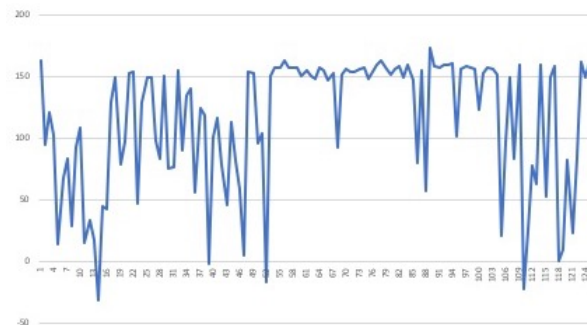


Fig. 5.5 Avance (en pixels) para instrucciones de avance constantes

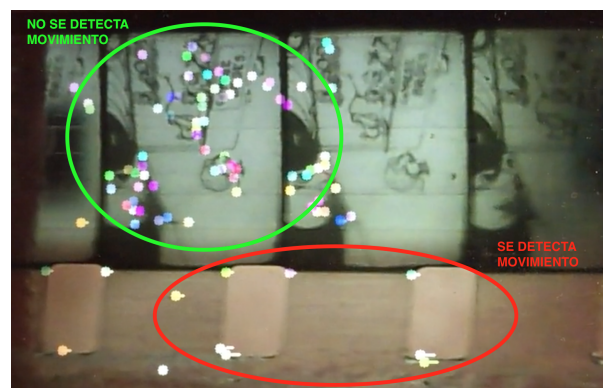


Fig. 5.6 Rolling shutter horizontal determina diferencia en el avance percibido entre puntos ubicados en el diferentes secciones del mismo cuadro

En la figura 5.6 se puede ver claramente este fenómeno y teniendo en cuenta que la imagen se ve especialmente movida en la sección baja (justamente donde se al algoritmo de flujo óptico detectó desplazamiento) puede concluirse que la velocidad de obturación es lenta respecto a la velocidad de avance del film. Esta imagen permite concluir también que el obturador de la cámara utilizada es de tipo rolling ya que los artefactos que se ven son característicos de ese sistema (muy común en los sensores CMOS). **El rolling shutter no captura toda la escena a la vez sino que la recorre rápidamente (en sentido vertical u horizontal) por lo cual la información de cada fila (o columna dependiendo del caso) no corresponde estrictamente al mismo instante.** En función del patrón que se puede ver en este caso queda claro que el sensor de la cámara es de tipo rolling horizontal. Esta situación puede resolverse fácilmente capturando las imágenes cuando el film está detenido.

Dispersión de las medidas de avance

En el histograma presentado en la figura 5.7 se puede apreciar un modo principal centrado en el valor 157 (que es la moda). Por otra parte se puede ver que el rango de valores es alto (e incluye datos negativos). La desviación estándar de esta colección de datos es 52.2 pixels. Como se verá a continuación esto es una consecuencia directa de la escasa cantidad de cuadros disponibles para procesar en cada secuencia. La segunda versión de este módulo soluciona este problema y los detalles de la solución se presentan en la sección 5.4.2.

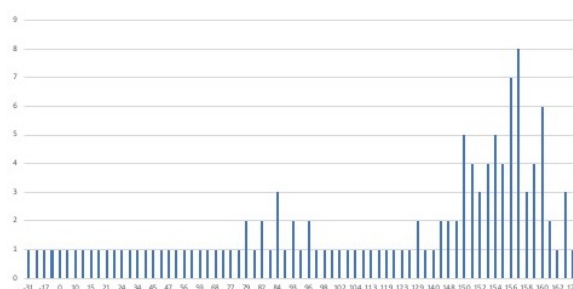


Fig. 5.7 Histograma de los datos de la serie mostrada en la figura 5.5

Cantidad de fotogramas procesados

Finalmente se contabilizó la cantidad de imágenes que se estaban procesando en cada instrucción de avance y se observó que el número era llamativamente bajo (tomando como referencia que el frame rate ronda los 30 cuadros por segundo). La figura 5.8 muestra que generalmente se procesan en el entorno de 8 fotogramas y teniendo en cuenta que el desplazamiento en todos los casos toma al menos un segundo podemos afirmar que no se está aprovechando la totalidad de la información disponible. Como se explicó antes, el hecho de trabajar con una frecuencia de muestreo baja da lugar a escenas ambiguas que producen errores significativos en la medición del avance (como los avances negativos).

Es importante indicar también que el cuanto menor es la cantidad de fotogramas que se obtienen para una determinada secuencia, el desplazamiento que experimenta el film entre cuadros consecutivos es mayor y, como se establece en la sección , uno de los principales supuestos en los que se basa el algoritmo de determinación de flujo óptico es que el desplazamiento entre cuadros consecutivos es pequeño.

Conclusiones de la primer iteración

- En las condiciones en las que se realizó la captura de imágenes en movimiento presenta problemas debido al rolling shutter. Esto puede solucionarse mejorando el hardware,



Fig. 5.8 Cantidad de imágenes procesadas en cada instrucción de avance

modificando las condiciones de luz (para poder utilizar una velocidad mas de obturación mas alta) o utilizando un sensor de imagen con obturación global. De todos modos, teniendo en cuenta que la digitalización de film no tiene porque realizarse en tiempo real, tiene sentido modificar el programa de control para asegurar que las capturas se toman con el film en reposo y de esa forma garantizar que la escena no presentará secciones borrosas.

- Se pudo comprobar que el algoritmo de flujo óptico encuentra ambigüedades debido a la similitud que presentan generalmente dos escenas consecutivas (particularmente cuando la frecuencia de muestreo es baja). En algunos casos este fenómeno hace inviable la determinación del avance del film usando flujo óptico pero se pudo confirmar que si la frecuencia de muestreo es suficientemente alta los errores que comete el algoritmo de flujo óptico pueden manejarse sin problemas utilizando la moda estadística de los avances medidos en cada transición.
- Se pudo confirmar que el sistema no está aprovechando gran parte de los fotogramas disponibles y esto deriva en un pobre desempeño del sistema de medición de avance del film.
- Como resultado de estas observaciones la dispersión en las medidas analizadas es alta y debe mejorarse para lograr un sistema robusto.

5.4.2 Segunda iteración del módulo de transporte

Tomando como punto de partida las conclusiones presentadas en la sección anterior se procedió a re implementar el módulo de transporte. Con el objetivo de lograr un sistema más preciso, robusto y confiable se decidió llevar a cabo las siguientes modificaciones:

Multithreading

Analizando el flujo de la primer versión se pudo identificar que la instrucción de capturar una nueva imagen estaba en el flujo principal, en el mismo hilo que todas las instrucciones de procesamiento de las imágenes. Esto quiere decir que el tiempo entre dos capturas queda determinado por el tiempo que le lleva al sistema ejecutar todas las instrucciones asociadas al procesamiento de imágenes y comunicación con el micro controlador. Para evitar esto se hicieron dos cambios significativos en el programa:

- Se implementó un hilo de programa exclusivo para la interacción con el micro controlador.
- Se modificó el sistema de comunicación con el micro controlador para que en vez de enviar un solo comando serial con la cantidad total de pasos que debe dar el motor, se envíe un comando por cada paso que se debe dar. Se implementó el envío de un carácter de respuesta por parte del micro controlador para confirmar la ejecución de la instrucción (paso realizado).

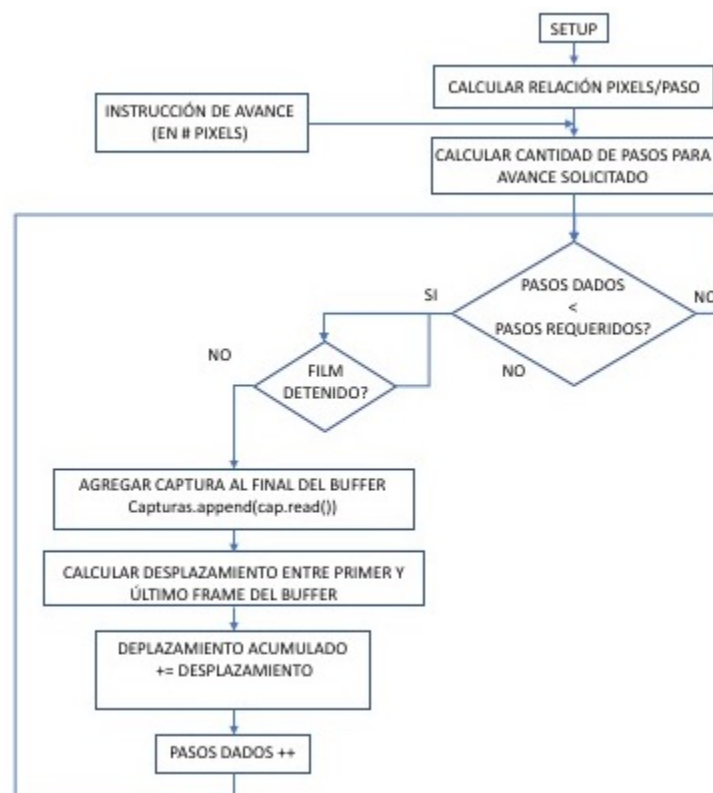


Fig. 5.9 Flujo de la segunda iteración del módulo de transporte

Comunicación bidireccional y utilización de buffer de imágenes

La imagen 5.9 presenta el flujo del programa desarrollado durante la segunda iteración del módulo de transporte. Teniendo en cuenta que en esta nueva versión se prevé la comunicación desde el micro controlador hacia el programa principal, deja de ser necesario estar permanentemente monitoreando el avance del film. En lugar de procesar las imágenes provenientes de la cámara en tiempo real se implementó un vector de capturas (buffer de imágenes) que se pasa como argumento a la función responsable de determinar el avance que experimentó el film. En este nuevo escenario el abordaje utilizado para el desarrollo del módulo de transporte de film es el siguiente:

- Tomar como única instrucción de movimiento válida el mínimo desplazamiento que puede llevar a cabo el motor (que en este caso es un paso en configuración "Interleave"³) y enviar esta instrucción tantas veces como sea necesario para que el film avance la cantidad de pixels requerida.
- Para cada instrucción de avance de un paso el sistema toma una captura antes del movimiento y una al finalizar (es posible asegurar que el film no está en movimiento gracias a la comunicación bidireccional implementada en esta versión)
- Las dos capturas mencionadas en el punto anterior se pasan como argumento a una función que calcula el avance que experimentó el film (en pixels) por ese paso (calculando el flujo óptico)
- Mantener un registro de la cantidad de pixels que avanza el film por cada paso del motor y actualizar este registro con cada nuevo movimiento. Con esta información se hace una predicción de la cantidad de pasos necesarios para cumplir con el desplazamiento requerido.

Dispersión de las medidas de avance

Se realizó el mismo análisis presentado en la sección anterior con el objetivo de comparar el desempeño de ambas versiones. En la figura 5.10 se presentan el registro de avance de film para instrucciones constantes (150 pixels). Se eligió esta magnitud buscando correr la prueba en las mismas condiciones que las presentadas en la sección anterior. Cabe aclarar que en esta versión el sistema toma como entrada una cierta cantidad de pixels y lo traduce a pasos de motor mientras que en la versión anterior la variable de entrada es directamente pasos.

³Interleave es una modalidad de energizado de los bobinados del motor paso a paso que consiste en alternar pasos simples y dobles y de esta forma duplicar la resolución (resignando velocidad)

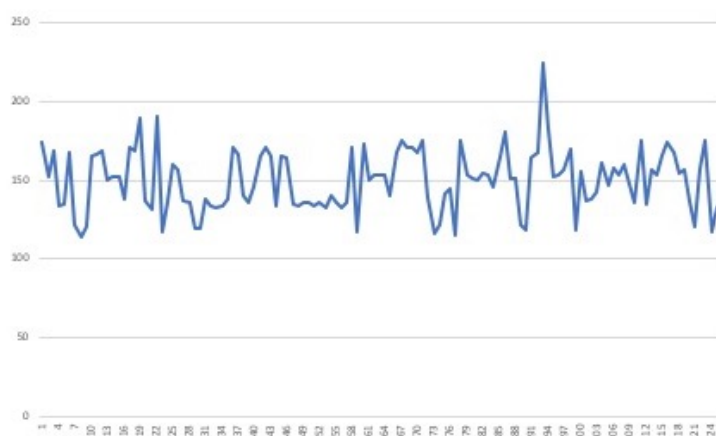


Fig. 5.10 Avance (en pixels) para instrucciones de avance constantes (150 pixels)

Se puede apreciar en la figura 5.10 que los valores se ubican en el entorno del valor solicitado (150). No se observan valores negativos y el rango de valores también es notoriamente mas acotado que el obtenido en la versión anterior. La desviación estándar de esta muestra es 19.4 que representa una reducción de mas del 50% respecto a la obtenida anteriormente. El histograma de esta serie de datos se presenta en la figura 5.11 y en este se puede apreciar que los valores están notoriamente mas comprimidos que en el obtenido con la versión anterior.

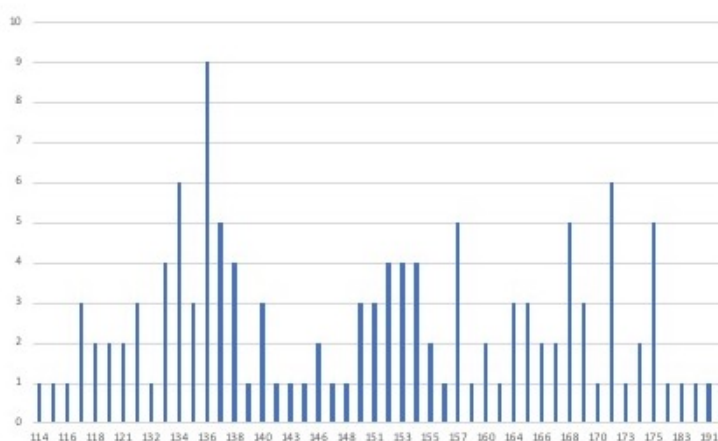


Fig. 5.11 Histograma de los datos de la serie mostrada en la figura 5.10

La moda de esta muestra es 136 (menos de 10% por debajo del avance solicitado) Lo cual representa una mejora significativa en relación a los resultados obtenidos en la versión anterior. Cabe aclarar que debido a que en esta versión se conoce exactamente la cantidad de pixels que el film debe avanzar ya que ese valor es un dato de entrada (avance solicitado), tiene

sentido comparar ese valor con la moda de la muestra y de esa forma evaluar el desempeño del sistema.

Es importante también analizar el hecho de que la resolución de este sistema de detección, la relación *pixels/paso*, queda determinada por la resolución del motor (grados por paso) y la distancia entre el sensor y el film. El sistema no puede realizar movimientos del film que correspondan a un desplazamiento menor a la magnitud *pixels/paso*. Teniendo en cuenta que es deseable aprovechar el sensor al máximo, se buscará siempre ubicarlo lo más próximo posible al film (manteniendo dentro de la escena la cantidad de perforaciones requeridas para el correcto funcionamiento del algoritmo de detección de frame). Teniendo en cuenta lo anterior se han identificado las siguientes opciones para mejorar la resolución del sistema:

- Utilizar un motor stepper con una mejor resolución (menos grados por paso).
- Incorporar al módulo la capacidad de ejecutar movimientos adicionales en ambos sentidos (luego de completar la cantidad de pasos prevista para el avance solicitado) para acercarse más a la posición objetivo.

5.5 Comparación de los resultados obtenidos y conclusiones

El análisis llevado a cabo para las dos versiones del módulo de transporte de film permite concluir que la segunda implementación presenta mejoras significativas respecto a su antecesora. La figura 5.12 muestra en el mismo par de ejes las medidas tomadas por ambas versiones para incrementos constantes. La comparación de las desviaciones estándar (52.2 para la primera versión y 19.4 para la segunda) confirman lo que se puede apreciar en el gráfico.

Las principales conclusiones a las que se llegó luego de desarrollar este módulo del sistema son las siguientes:

- Es posible determinar el avance del film utilizando únicamente la cámara como sensor.
- La determinación automática de puntos adecuados para el cálculo del flujo óptico de una secuencia es suficientemente robusta como para ser utilizada en esta aplicación.
- La sincronización de las instrucciones de avance con el procesamiento de capturas almacenadas en un buffer de imágenes (aprovechando que no debe realizarse en tiempo real) permite llevar a cabo el control del sistema de transporte en forma adecuada.

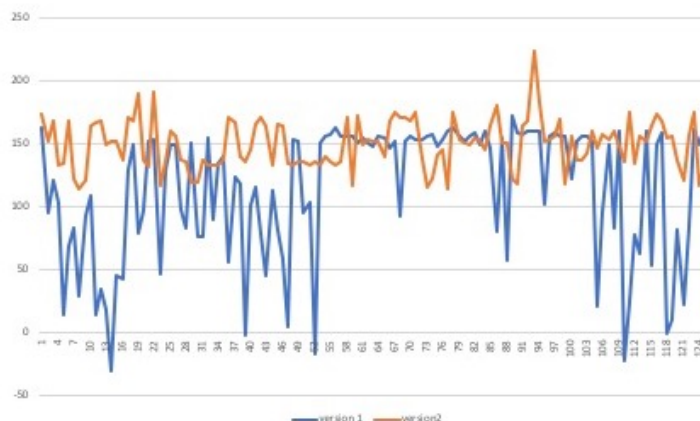


Fig. 5.12 Comparación de las mediciones realizadas por los dos sistemas para avances constantes

- Limitar las instrucciones de avance del motor posibles a una única (un paso) y repetirla tantas veces como sea necesario mejora el desempeño del sistema sin comprometer el desempeño. Con este abordaje queda de lado la necesidad de contar con una gran cantidad de imágenes tomadas mientras que el film se desplaza (lo cual tiene algunas contras como por ejemplo la obtención de imágenes borrosas por movimiento) ya que alcanza con solamente dos imágenes tomadas con el film detenido: una antes y otra después de finalizado el movimiento.
- La sincronización entre la captura, el procesamiento y el avance del film que se logró en la segunda versión facilita enormemente la integración de este módulo con el resto del sistema.

Capítulo 6

Captura

6.1 Definición de rango dinámico de una cámara

Al momento de tomar una fotografía con una cámara (con ajustes manuales) debemos decidir qué cantidad de luz queremos que alcance el sensor o película. El criterio para definir que valores usaremos viene dado en gran medida por las sombras y las altas luces de la escena y hasta qué punto queremos reproducir los detalles en esos niveles de luz en la imagen resultante. Si bien la posibilidad de reproducir en la imagen los detalles de las sombras y las altas luces de la escena es un recurso artístico importante, generalmente queremos que la imagen capture (con bajo ruido y sin saturación de pixels) tanto las sombras como las altas luces de la escena. Para lograr esto elegimos convenientemente (o dejamos que la cámara lo haga en forma automática en el caso de usar ajustes automáticos o asistidos) una combinación de apertura de diafragma, velocidad de obturador y sensibilidad del sensor (ISO). Como en fotografía se habla de “stops” o “pasos” para indicar un cambio en los ajustes de la cámara que duplica la cantidad de luz (luminancia) que llega al sensor o película, resulta natural utilizar esta unidad para indicar la relación entre la sección más clara y la más oscura que una cámara puede representar con un nivel de ruido o grano aceptable.

Rango dinámico del ojo humano

Si bien no existe un valor universalmente aceptado, la gran mayoría de las estimaciones indican que (en condiciones típicas de iluminación diurna) el rango dinámico del ojo humano está entre 10 y 14 Stops. Esto quiere decir que somos capaces de percibir detalles en una escena cuyas sombras y altas luces tengan una diferencia de diez a catorce órdenes de magnitud. Cabe aclarar que para que tenga sentido comparar el rango dinámico del ojo

humano con el de una fotografía debemos considerar una situación en la cual el nivel de dilatación de la pupila es constante.

Rango dinámico en cámaras digitales

Cuando se dice que una cámara digital tiene 10 pasos (o stops) de rango dinámico quiere decir que es capaz de registrar sin saturación de pixels una escena en la cual la parte más iluminada o brillante es 2^{10} veces más clara que la parte más oscura manteniendo un nivel de ruido aceptable. A partir de lo anterior queda claro que (en lo que a cámaras digitales respecta) es necesario acompañar la medida de rango dinámico con una medida de ruido para que esta definición tenga sentido.

Actualmente la mayoría de los sensores de imagen usan conversores A/D de 10 a 14 bits por canal, lo cual determina que el rango dinámico teórico de las cámaras es de 10 a 14 órdenes de magnitud (considerando que teóricamente pueden representar entre $2^{10} = 1024$ y $2^{14} = 16384$ niveles diferentes de intensidad de luz). En la práctica estos valores se alejan bastante del rango dinámico real de una cámara ya que el ruido afecta sensiblemente a estos dispositivos, por lo cual hoy en día el rango dinámico de una cámara digital se encuentra típicamente entre 8 y 12 pasos para las cámaras DSLR de gama media y alta.

Rango dinámico del film

La respuesta del film a la luz está caracterizada por su densidad a los distintos niveles de exposición. La densidad describe la opacidad del film y es el $\log_{10}$ de la absorción (una vez revelado). Un alto valor de densidad corresponde a gran opacidad, y por lo tanto a un film muy oscuro. Para un film negativo, la densidad es una función creciente de la exposición (el film se torna mas oscuro a medida que se lo expone a la luz). Para un film positivo (por ejemplo el que resulta del proceso de revelado), la densidad es una función decreciente de la exposición (el film se torna brillante cuando se lo expone a la luz).

A la curva característica (densidad vs. exposición) del film se la conoce también como como curva de Hurter y Driffeld [32], y es a partir de esta curva que tradicionalmente se define el rango dinámico del film: es el rango entre el extremo derecho del “pie” y el extremo izquierdo del “hombro” de esta curva. En definitiva esta definición procura medir el rango en el cual la curva característica tiene un comportamiento prácticamente lineal (también conocido como latitud del film). El pie de la curva representa exposiciones relativamente bajas y corresponde a las partes iluminadas (o de baja densidad) de una imagen. Cuando una escena se expone de forma tal que hay áreas de la misma que caen en la región del pie, poco contraste es transferido a la imagen. Por el contrario, la zona del hombro de la curva

representa la densidad que se transfiere a una imagen cuando el film se expone mas tiempo (generalmente corresponde a la zona de oscuras de la imagen). Con esta definición el rango dinámico de los films profesionales mas comunes se ubica entre 9 y 12 Stops. En el caso del film blanco y negro este valor puede llegar hasta 14.

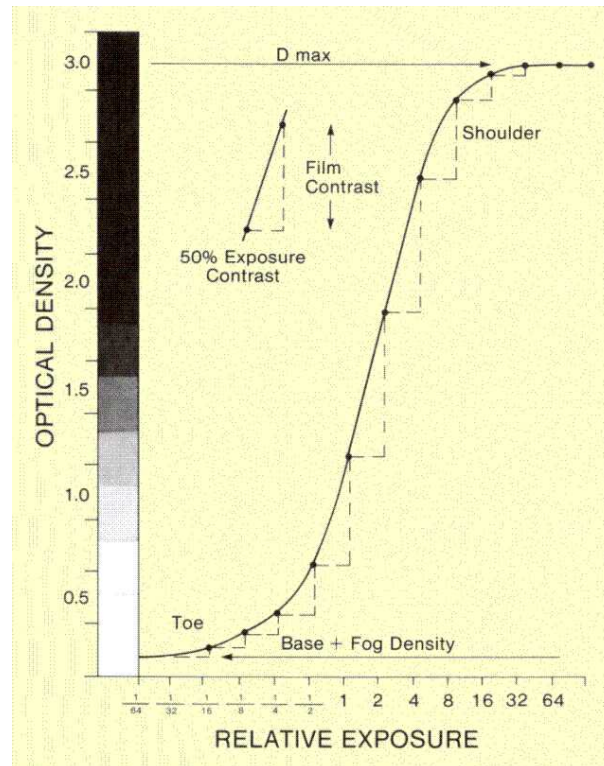


Fig. 6.1 Curva característica de un film mostrando la relación entre densidad y exposición relativa [4]

6.2 Rango dinámico de la película fotográfica vs. sensores digitales

Los valores de rango dinámico del film expresados en el punto anterior no indican que el desempeño del film sea mejor que el de los sensores digitales. Esto se debe a que los valores no son comparables ya que surgen de definiciones de rango dinámico bien diferentes. Para poder comparar el desempeño de estas dos tecnologías es necesario normalizar de alguna forma los resultados. Si bien existen diversos métodos y criterios definidos específicamente para comparar el desempeño del film con el de los sensores digitales en lo que respecta a rango dinámico, sigue siendo una tarea compleja principalmente por la variedad de factores

que lo afectan (tipo de film usado, selección de parámetros en la etapa de revelado, algoritmos de procesamiento de la imagen RAW, entre varios otros) y también porque en cierta medida son evaluaciones subjetivas las que determinan cual de las dos opciones se desempeña mejor en cada situación.

El fabricante DxO propone un protocolo [5] para normalizar los parámetros de las imágenes provenientes de digitalizar film y las obtenidas directamente usando sensores digitales y de esta forma poder compararlas en forma adecuada. Para lograr una comparación “justa” este protocolo se basa en:

- Encontrar una definición adecuada de SNR (Relación Señal a Ruido) considerando que la señal de salida es de naturaleza distinta en el caso del film y en el caso de los sensores digitales.
- Tener en consideración la resolución del dispositivo que digitaliza (scanner) en el caso de film y la resolución del sensor en el caso de las imágenes digitales.
- Considerar el grano del film.
- Considerar el hecho de que los sensores digitales usan una distribución Bayesiana de los elementos miden la intensidad de luz de cada color (mientras que un film escaneado tiene tres canales para cada uno de los pixels).

No es el objetivo de esta sección analizar este (ni cualquier otro) protocolo de normalización por lo cual se tomarán directamente los resultados del trabajo y se interpretarán buscando determinar si la utilización de técnicas para la ampliación del rango dinámico de las imágenes tomadas por un sistema de digitalización como el que se describe en este trabajo puede mejorar en forma significativa el resultado.

En la figura 6.2 se presentan las curvas de SNR para diferentes niveles de exposición de un sensor digital y una película. En las sombras (baja exposición) ambos sistemas se comportan en forma similar, partiendo de SNR bajo e incrementándose a medida que aumenta la exposición. En el caso del sensor digital (representado en la imagen en color negro) la relación señal a ruido aumenta aproximadamente 3 dB por cada Stop hasta que cae repentinamente a cero. Esto ocurre ya que hay un nivel de exposición a partir del cual el sensor satura. En el caso del film por el contrario la SNR aumenta lentamente hasta alcanzar una meseta dentro de la cual la SNR es prácticamente constante y luego comienza a caer lentamente hasta volver a alcanzar el valor de 0 dB.

Si consideramos al rango dinámico como el rango de exposiciones dentro del cual el SNR es mayor que cero, queda claro que el film presenta un rango dinámico mayor que el sensor

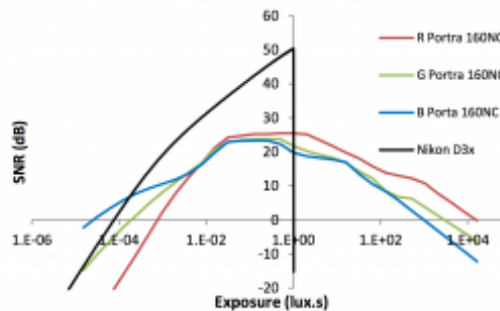


Fig. 6.2 Comparación de la Relación Señal a Ruido (SNR) de un sensor de imagen digital y una película fotosensible [5].

digital. Por esta razón, se puede concluir que la opción de ampliar el rango dinámico de las imágenes tomadas es algo deseable si buscamos capturar toda la información registrada originalmente en el film.

6.3 Técnicas para incrementar el rango dinámico y resultados obtenidos

En el proceso de obtención de una imagen con alto rango dinámico pueden identificarse tres aspectos principales:

- Capturar la escena varias veces utilizando diferentes tiempos de exposición (los cuales deben registrarse en cada caso para poder utilizar dicho valor mas adelante)
- Combinar las imágenes. Para esto es útil conocer la función de respuesta de la cámara (función que relaciona la Irradiancia de la escena (W/m^2) con la Intensidad de la imagen)
- Convertir la imagen a 8 bits para poder visualizarla en dispositivos normales. Este proceso se conoce como mapeo de tono.

6.3.1 Mapas de radiancia de alto rango dinámico a partir de fotografías

El resultado de tomar una fotografía con una cámara digital o el de digitalizar una imagen impresa en papel generalmente no es una medida de la radiancia relativa de cada punto de la escena sino un mapeo no lineal de la misma. En las secciones 6.1 y 6.1 se mencionan los

procesos que introducen estas no-linealidades. Esto quiere decir que si un pixel de la imagen presenta el doble del valor que otro, es poco probable que la radiancia observada realmente sea el doble.

En [33] los autores proponen un método para obtener el mapa de radiancia de una escena a partir de fotografías convencionales. El primer paso de dicho método consiste en determinar la función de transferencia de la cámara que es la función no-lineal que vincula la exposición X en determinado pixel con el valor Z que lo representa en una imagen digital.

$$Z = f(X) \quad (6.1a)$$

$$f^{-1}(Z) = X \quad (6.1b)$$

A su vez la exposición se vincula con la irradiancia de la siguiente forma:

$$E\Delta t = X \quad (6.2)$$

Si se asume que la función f es monótona creciente entonces la función f^{-1} está definida y si conocemos el tiempo de exposición Δt de cada una de las imágenes, podemos calcular la irradiancia asociada a cada pixel de la imagen.

Luego de obtener el mapa de radiancia es necesario llevar a cabo un proceso de mapeo de tono con el objetivo de lograr visualizar la imagen en un dispositivo (monitor, proyector, etc) cuyo rango dinámico es menor al que presenta el mapa de irradiancia. Muchos de los algoritmos utilizados para esto se basan en la ecualización de histograma, proceso en el cual se aprovecha la totalidad del rango dinámico de destino para representar el rango de valores de la imagen original donde se encuentra el mayor nivel de detalle.

6.3.2 Pruebas de ampliación del rango dinámico

Para probar estas técnicas se confeccionó un dispositivo que permite iluminar una parte de una cinta y al mismo tiempo fijar una cámara DSLR (con ajustes manuales) asegurando que la posición entre el film y la cámara se mantiene a lo largo de una secuencia de capturas.

En la imagen 6.3 se ve que el film que se está capturando es de 8 mm pero para las pruebas que se presentan en esta sección se decidió utilizar uno de 35 mm a color. El motivo es que al no contar con una lente adecuada en la cámara DSLR utilizada la imagen del film de 8 mm resultante era muy chica y dificultaba su evaluación.

Se utilizaron las funciones de OpenCV que permiten llevar a cabo la fusión de las imágenes de bajo rango dinámico para obtener una de alto rango dinámico. Los dos métodos

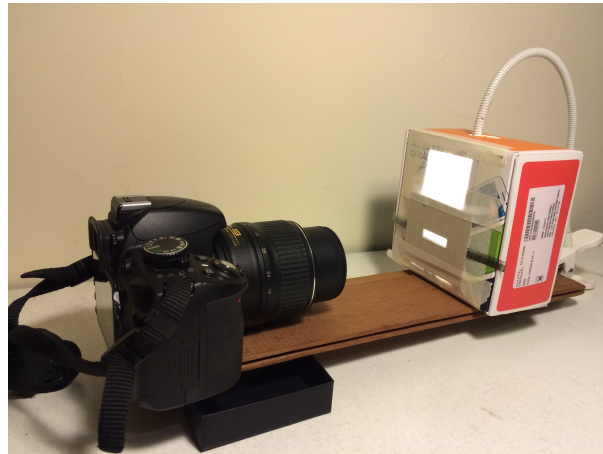


Fig. 6.3 Dispositivo utilizado para la obtención de múltiples capturas de un film variando el tiempo de exposición e iluminándolo con luz difusa desde atrás

disponibles son: Debevec y Robertson. Junto con la secuencia de imágenes es necesario proporcionarle a estos métodos un archivo indicando el tiempo de exposición con el que se tomó cada una.

Posteriormente, para la etapa de mapeo de tono que permite llevar a 8 bits la imagen de alto rango dinámico obtenida mediante los métodos de fusión mencionados anteriormente, OpenCV pone a disposición cuatro algoritmos de mapeo: Drago, Durand, Mantiuk y Reinhard.

En la figura 6.4 se incluyen los resultados de aplicar estos cuatro algoritmos de mapeo de tono para cada una de los métodos de fusión disponibles. Adicionalmente se presenta el resultado de una alternativa de fusión (también disponible en OpenCV) llamada Mertens [34] que consiste en fusionar múltiples exposiciones utilizando como criterio ciertas medidas de calidad (determinadas por el propio algoritmo) basadas en la saturación y el contraste. Se incluye además en esta figura la imagen de la secuencia que de acuerdo a su histograma fue tomada con el tiempo de exposición mas adecuado para las condiciones de luz.

6.4 Conclusiones

En esta sección se justificó la utilización de técnicas que permitan ampliar el rango dinámico de las imágenes tomadas durante la digitalización. La extensión del rango dinámico le permite a una cámara digital registrar información del film que de otra forma se pierde debido a las limitaciones propias de los sensores digitales. Existen diversas técnicas para obtener una imagen de alto rango dinámico y el mapa de tonos necesario para poder visualizar el resultado en dispositivos convencionales. La elección de cual es el la combinación de algoritmos mas

adecuada está sujeta en gran medida a criterios subjetivos y está por fuera del alcance de este trabajo.

La obtención de una secuencia de imágenes de bajo rango dinámico adecuada para la generación de una imagen de alto rango dinámico requiere tener control sobre el tiempo de exposición. Teniendo en cuenta que la cámara utilizada durante el desarrollo de este proyecto no proporciona dichos controles no se ha implementado en esta versión.

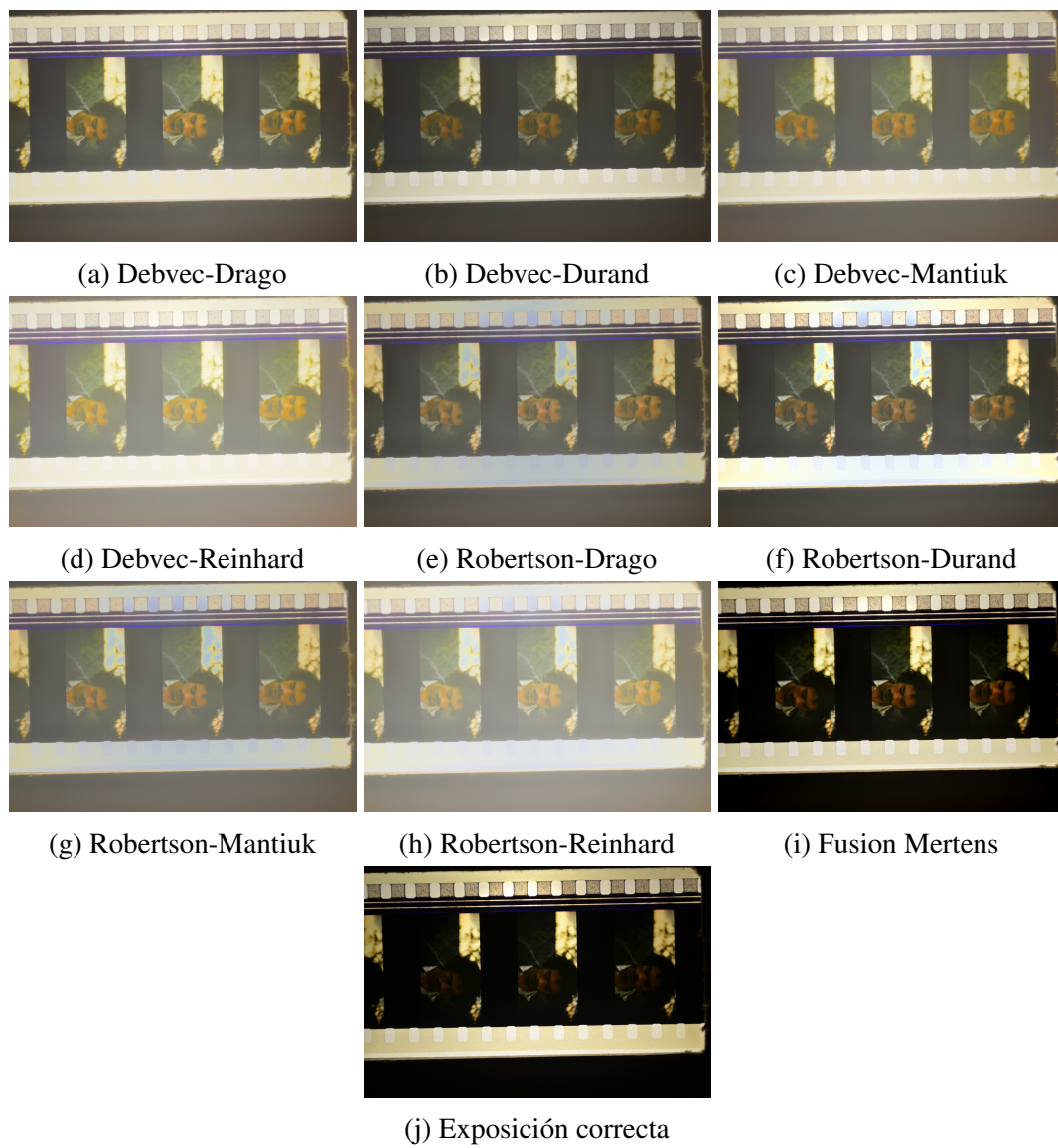


Fig. 6.4 Pruebas de algoritmos de fusión y mapeo de tono

Capítulo 7

Diseño del prototipo final

7.1 Antecedentes y herramientas utilizadas en el proceso de diseño y fabricación

En las diferentes secciones de este documento se han presentado prototipos parciales que funcionaron como plataformas de desarrollo para los diferentes módulos que componen el sistema. Comenzando el diseño del mecanismo con una simple base de madera destinada a soportar los motores y permitir decidir cual era la mejor configuración de los mismos, el abordaje del proceso de diseño fue iterativo e incremental (cada nueva versión de una pieza mejoraba agregaba una mejora al sistema).

7.1.1 Printrbot

La principal influencia de este proyecto en términos de diseño mecánico es de la impresora 3D Printrbot Original [35], diseñada por Brook Drum (Fundador y CEO de la empresa Printrbot), cuyas piezas están disponibles gratis ¹ para ser impresas por quien quiera construir uno de estos equipos. El diseñador ha puesto a disposición también instrucciones detalladas sobre cómo montarlo y configurarlo.

Construir una de estas impresoras fue un antecedente fundamental para el planteo de este proyecto ya que permitió (demás de disponer de una impresora en todo momento) entender las capacidades y limitaciones de esta técnica de fabricación digital.

Durante la construcción de esta impresora (que fue la utilizada para producir las primeras partes diseñadas en el marco de este trabajo) se identificaron ciertas características de su diseño que resulta adecuado considerar en el dispositivo digitalizador:

¹<https://www.youmagine.com/designs/printrbot-original>

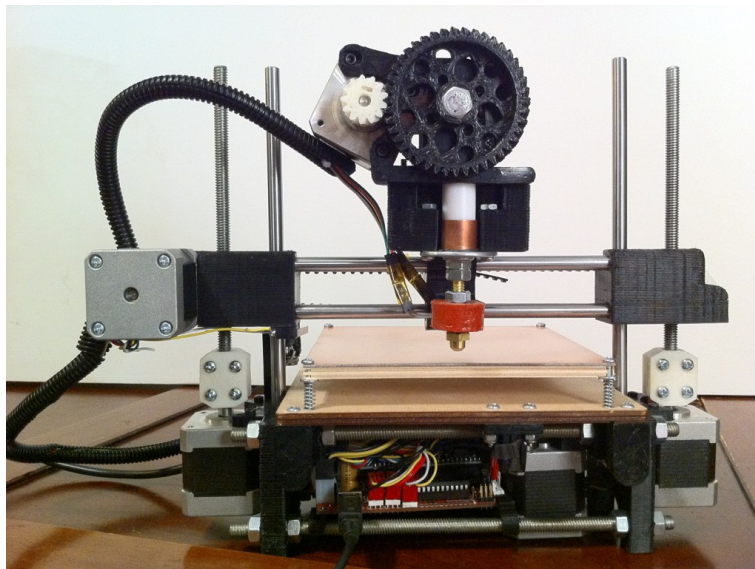


Fig. 7.1 Modelo Printrbot Original.

- Es expansible. Esto quiere decir que la superficie de impresión puede ser tan grande como se requiera sin tener que realizar modificaciones en el diseño (simplemente utilizando componentes de mayores dimensiones).
- Es posible actualizarlo y mejorarlo fácilmente con partes impresas por el propio usuario.
- Las únicas piezas que no están impresas en 3D son las siguientes: rodamientos (8 mm, utilizados en patines y skates), varillas roscadas/lisas (8 mm), tuercas (8 mm) y tornillos (3 mm)

Trasladado al dispositivo digitalizador, estos aspectos representan la posibilidad de:

- Utilizar el mismo diseño para diferentes formatos de film.
- Incorporar nuevas piezas diseñadas por los usuarios que mejoren el dispositivo en cada iteración.
- Fabricar el dispositivo en cualquier parte del mundo, con una inversión mínima.

7.1.2 Herramientas de Diseño

El proceso de creación de este proyecto siguió el flujo detallado en la figura 7.2. En la misma se indican las herramientas utilizadas en cada caso. Inicialmente se trabajó en papel haciendo

bocetos de cada pieza (ver figura 7.4) para posteriormente crear el modelo tridimensional de la misma en la herramienta Google Sketchup (en algunos casos puntuales se trabajó en Rhinoceros). Desde Sketchup se generaron los archivos .stl (Standard Triangle Language) que definen la geometría de los objetos en cuestión. Es a partir de los archivos .stl y de los parámetros de configuración de la impresora (alto de capa, espesor del borde, ancho de boquilla, velocidad, densidad deseada para la pieza, entre varios otros) que el slicer genera la secuencia de instrucciones (Código G) que le permite a la impresora fabricar el objeto capa por capa.



Fig. 7.2 Flujo de trabajo utilizado para el diseño y fabricación de las piezas

El flujo de trabajo fue modificado durante el proyecto ya que se utilizaron dos impresoras diferentes: Printron de fabricación propia y Monoprice Maker Select Plus 7.3. Las principales diferencias entre ambos flujos tienen que ver con el slicer utilizado y la comunicación del código G desde el slicer hacia la impresora. El slicer utilizado inicialmente, pronterface es un desarrollo Open Source realizado en Python que además de generar el código G implementa la interfaz con la impresora. Es una herramienta muy popular entre las impresoras RepRap ya que al ser de código abierto puede ser modificado y adaptado a cualquier impresora 3D. La experiencia con esta herramienta fue buena a pesar de que no es apta para el procesamiento de grandes piezas por ser demasiado lenta (el proceso de slicing puede tomar varias horas) y cualquier error en el código producido puede verse recién al finalizar este proceso.

Por otra parte, la utilización de una interfaz USB con el slicer para la comunicación del código G tampoco resulta la mejor opción porque requiere la disponibilidad del computador durante todo el tiempo de impresión (que también toma varias horas) y puede detenerse en caso de haber cualquier problema con el computador. Cabe aclarar que en caso que se detenga el proceso de impresión, en condiciones normales, no es posible retomarlo sin comprometer la calidad de la pieza fabricada.

Al comenzar a utilizar la impresora Monoprice Maker Select Plus se pasó a utilizar Cura como slicer. Cura es un programa de la empresa Ultimaker que se distribuye en forma gratuita

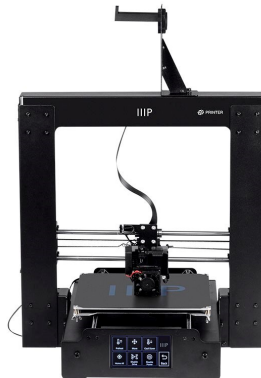


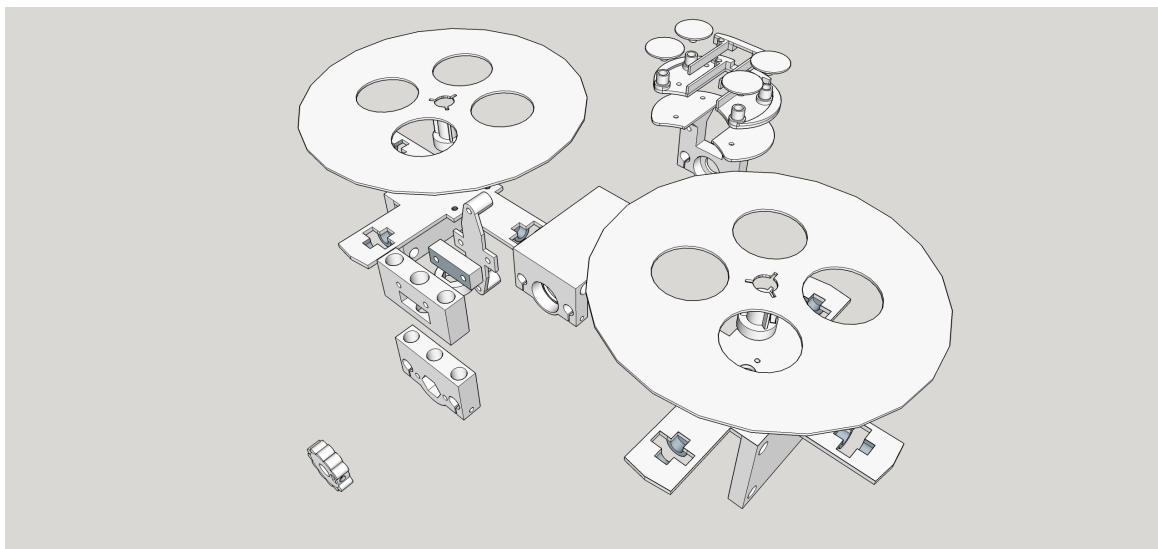
Fig. 7.3 Impresora Monoprice Maker Select Plus (segunda impresora utilizada en este proyecto)

y cuenta con aproximadamente doscientos parámetros de configuración. La velocidad de procesamiento es varios órdenes de magnitud superior al slicer anteriormente utilizado y el código G que produce es de muy buena calidad. Tiene la ventaja adicional de permitir la visualización de cada capa previo al comienzo de la impresión, lo cual es imprescindible para validar que el proceso de slicing se ha realizado correctamente (algo que no siempre ocurre en el caso de objetos diseñados desde cero). Para la comunicación del código G a la impresora se pasó a utilizar una tarjeta SD que se inserta directamente en la impresora al momento de imprimir, manteniendo al computador por fuera del proceso de impresión.

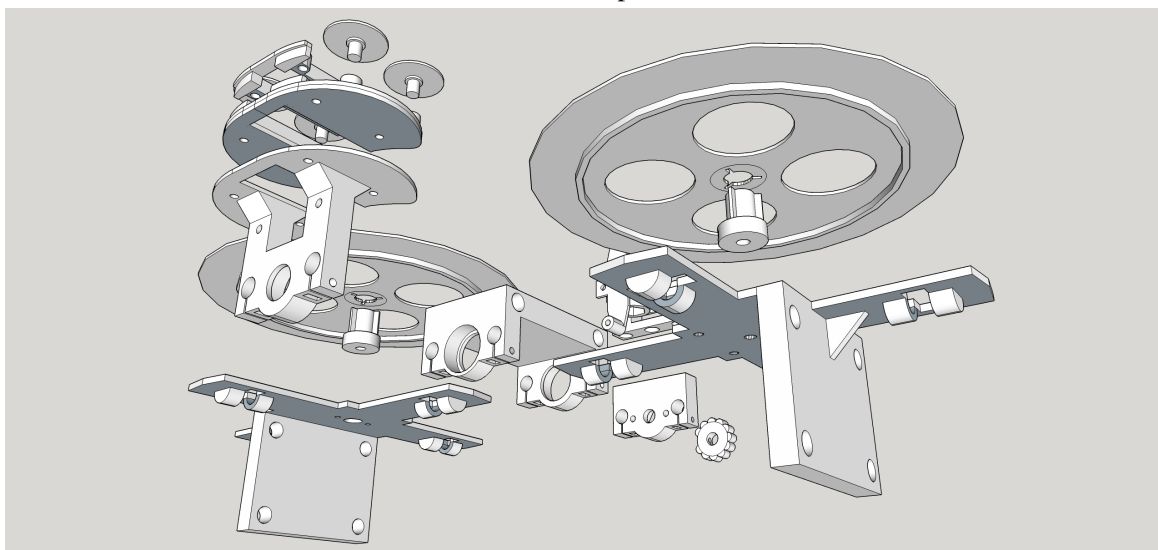
También hubieron cambios en cuanto a los materiales de impresión utilizados en este proyecto ya que inicialmente las piezas se imprimieron en ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y luego en PLA (Ácido Poliláctico). El resultado con PLA fue sensiblemente mejor que con ABS, particularmente con las piezas planas de gran tamaño.

7.2 Piezas diseñadas para fabricación con impresora 3D

La versión final del dispositivo cuenta con quince partes diseñadas para ser fabricadas en una impresora 3D. Si bien para llegar a estas partes fue necesario diseñar y adaptar varias piezas mas, en esta sección se presentará el resultado de este proceso y las versión final de cada pieza.

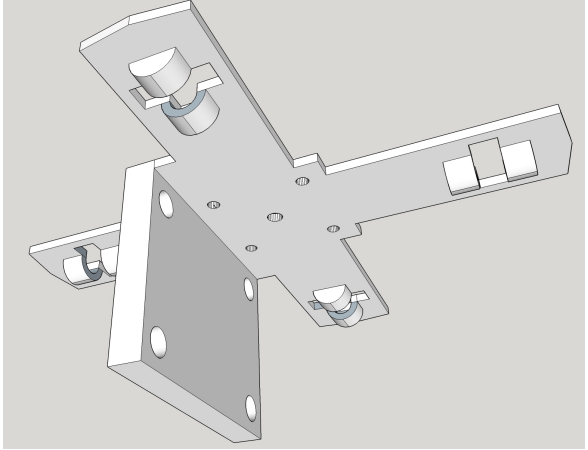
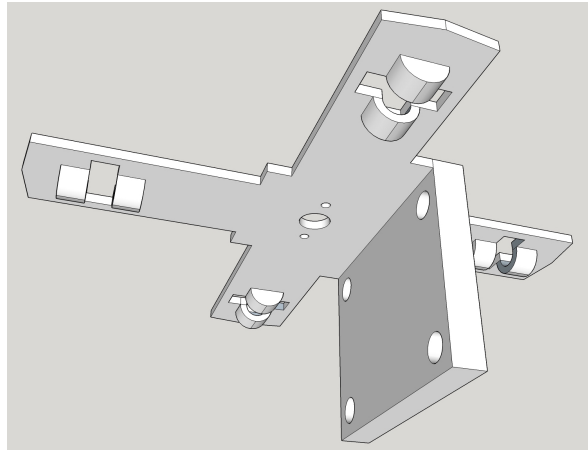


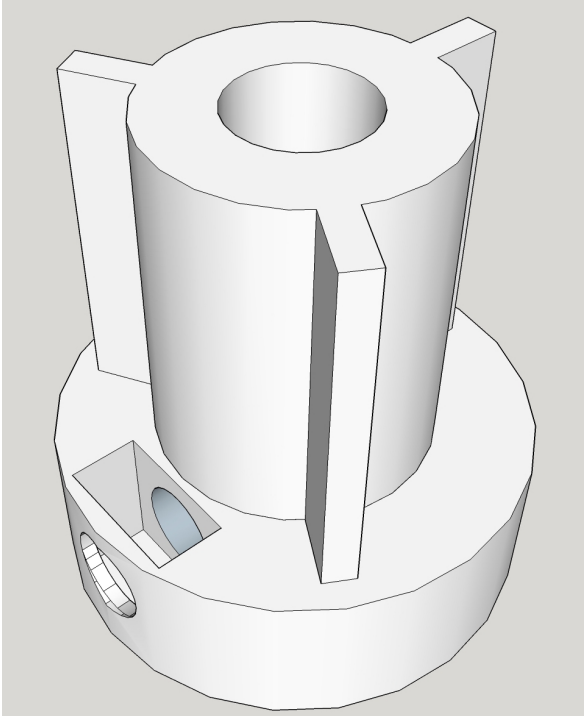
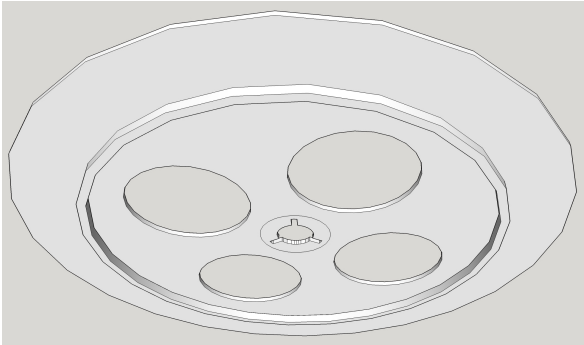
(a) Vista superior

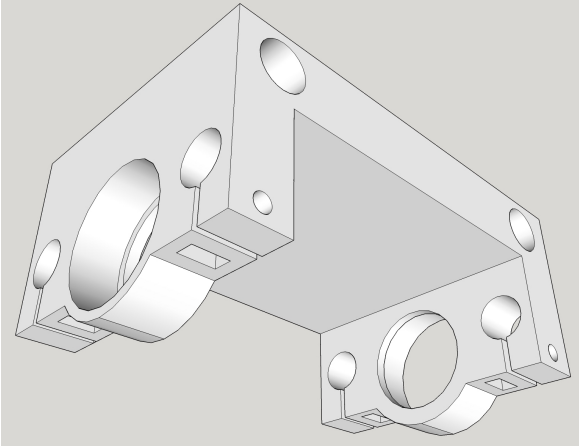
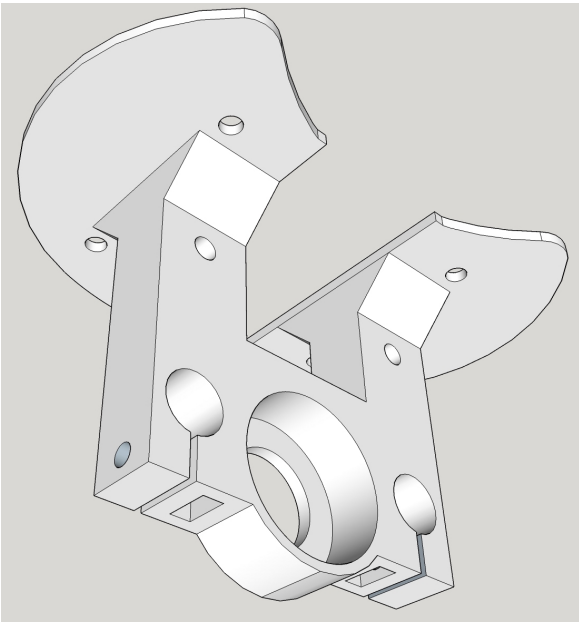


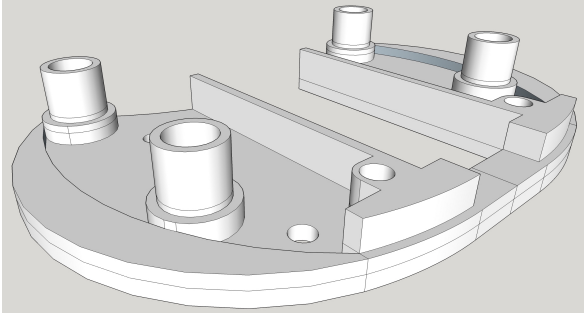
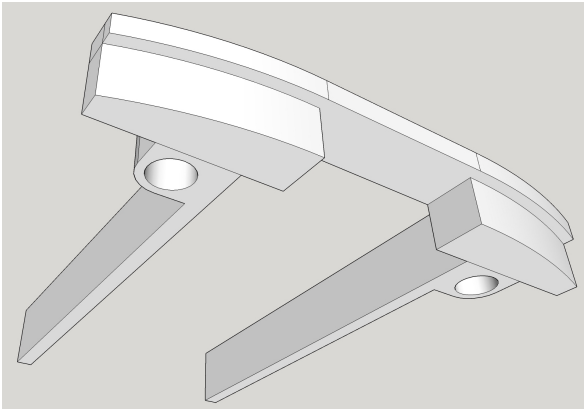
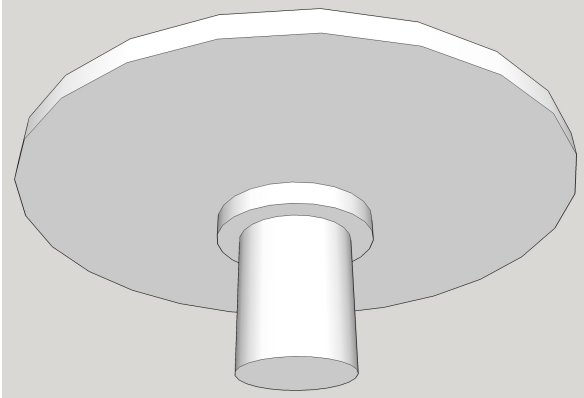
(b) Vista inferior

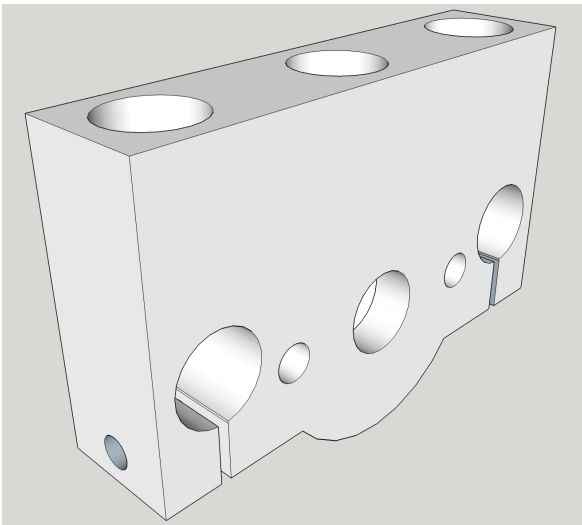
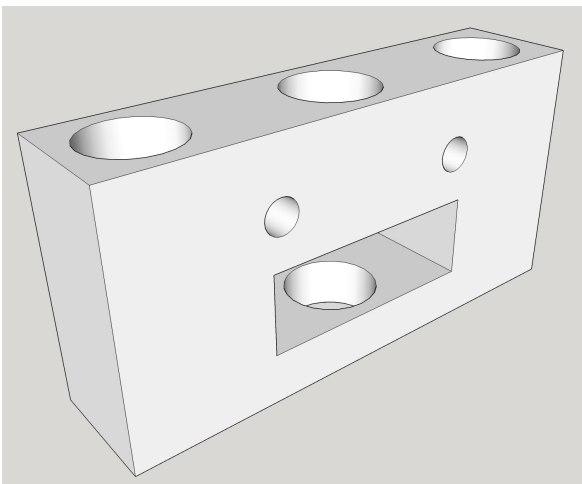
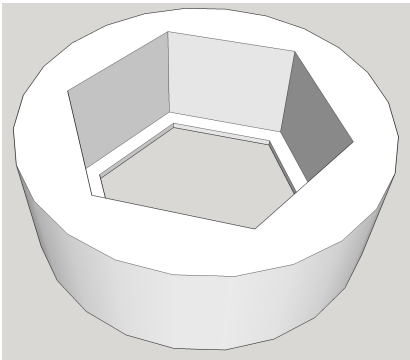
Fig. 7.5 Vista explotada de todas las piezas que componen la versión filan del dispositivo

Nombre	Imagen	Descripción
Soporte Stepper		Sostiene al motor paso a paso (incluye perforaciones de acuerdo al estándar NEMA 17). Soporta los 4 pernos correspondientes a los rodamientos de la bandeja de destino.
Soporte DC		Sostiene al motor de corriente continua (incluye dos perforaciones). Soporta los 4 pernos correspondientes a los rodamientos de la bandeja de alimentación.

Acoplador de eje		Acopla el eje de los motores (stepper y DC) a las correspondientes bandejas. Esta pieza asoma por encima de las bandejas para que en ella calce el carrete.
Bandeja		Soporta los carretes y gracias a su borde inferior, que se apoya sobre rodamientos, minimiza el rozamiento con el resto de la estructura.

Puente central		Vincula los soportes de los motores con mecanismo de control de distancia de la cámara y la ventana de captura.
Soporte ventana		Soporta todas las piezas que componen la ventana de captura y el mecanismo que asegura la alineación y tensión del film.

Parte inferior de ventana		Recibe los tornillos que sujetan la parte superior de la ventana. Soporta los rodamientos (y los topes) a través de los cuales circula el film.
Parte superior de ventana		Funciona de tope y guía en la sección en la que el film se ubica frente a la cámara
Tope de guía		Funciona de tope superior para el film en los rodamientos que proveen tensión al film en las secciones previas y posteriores a la ventana de captura.

Soporte del regulador de altura		Vincula la parte móvil del mecanismo de regulación de altura con el resto del dispositivo.
Regulador de altura		Parte móvil del mecanismo de regulación de altura de la cámara.
Roseta del regulador de altura		Contiene la tuerca que permite variar la altura de la cámara. Al girarla se logra la variación en altura del soporte de la cámara.

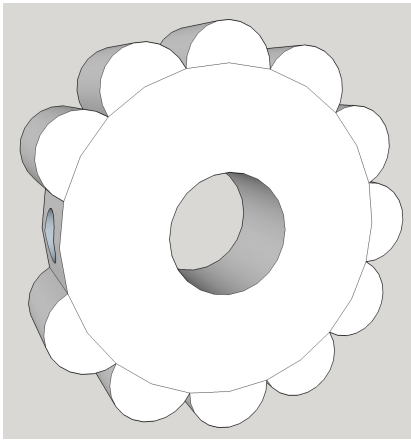
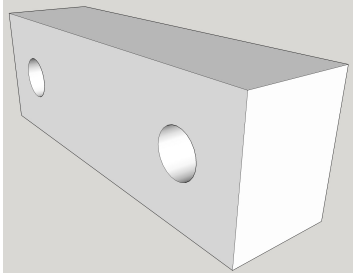
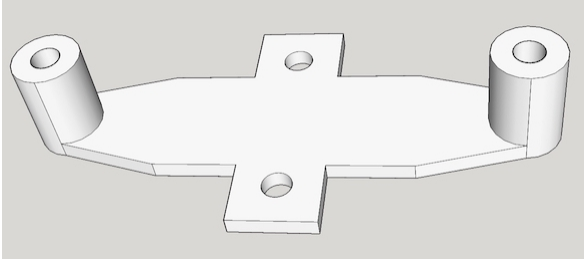
Roseta del regulador de distancia		Permite accionar la varilla roscada que regula la distancia entre la cámara y la película para ocupar el sensor de imagen convenientemente. Funciona como ajuste de foco.
Separador de cámara		Evita que la roseta de ajuste del regulador de altura toque el soporte de la cámara.
Soporte de cámara		Acopla la cámara al mecanismo de ajuste de altura.

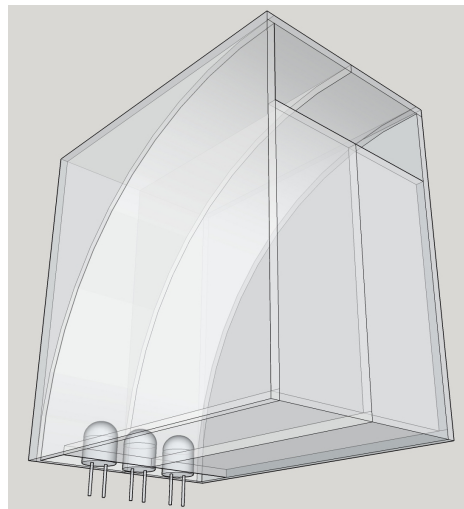
Table 7.1 Listado de piezas diseñadas

7.3 Sistema de iluminación

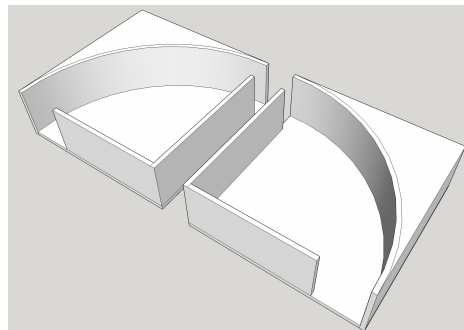
Si bien no está dentro del alcance de este trabajo determinar cuál es la mejor fuente de luz para la tarea que se quiere llevar a cabo (digitalización de films) se decidió diseñar un accesorio que permita iluminar en forma adecuada el film. El criterio utilizado para las decisiones tomadas en esta sección es meramente subjetivo y no cuenta con una justificación formal.

Durante las diversas pruebas realizadas a lo largo del proyecto se pudo comprobar que la fuente de luz utilizada para la digitalización debe proveer una iluminación difusa. El motivo es evitar puntos de alta concentración de luz que puedan saturar la cámara. Una forma de lograr esto es incorporar una pantalla reflectiva entre la fuente de luz (LEDs) para evitar que los rayos de luz incidan directamente sobre la película.

Este concepto se puso a prueba realizando un prototipo en cartón y al comprobar que el efecto era el buscado se procedió a diseñar las piezas para ser fabricadas en impresora 3D. En función de los resultados obtenidos se decidió trabajar con 3 LEDs blancos de 5 mm.



(a) Diseño de caja de luz con pantalla reflectiva curva en su interior



(b) Interior de la caja de luz

Fig. 7.6 Diseño final de caja de luz

7.4 Integración de los módulos de transporte, detección de avance y detección de frame

En esta sección se documentan las adaptaciones realizadas al software de los módulos de transporte, detección de avance de film y captura de cara a la obtención de un dispositivo digitalizador completamente funcional. El objetivo de estas modificaciones es lograr que todos los subsistemas desarrollados a lo largo del proyecto puedan funcionar de manera sincronizada con la mínima intervención del operador.

Teniendo en cuenta que los módulos de control de motor y detección de avance del film fueron implementados en un mismo programa, al comenzar la etapa de integración se contaba con dos programas (desarrollados en Python):

- Control de motor y detección de avance de film
- Detección de frame

La utilización del sistema de digitalización requiere que el usuario indique (mediante una interfaz gráfica) la posición de los bordes del film (superior e inferior) en la escena al igual que la región dónde están las perforaciones. Esto se realiza una sola vez ya que los valores no cambian a lo largo del proceso de digitalización.

El programa que controla el motor debe disponer de un dato fundamental que es la cantidad de pixels que se requiere que el film avance (que se traduce en una cierta cantidad de pasos de motor). La cantidad de pixels que debe avanzar el film es igual al ancho del frame que se quiere detectar medido en pixels, y este dato es medido por el programa de detección de frame. Por otra parte, el programa de control del motor y detección de avance es también el que realiza la captura de la escena que debe procesar el programa de detección de frame. La figura 7.7 muestra un esquema de la interacción entre los dos programas.

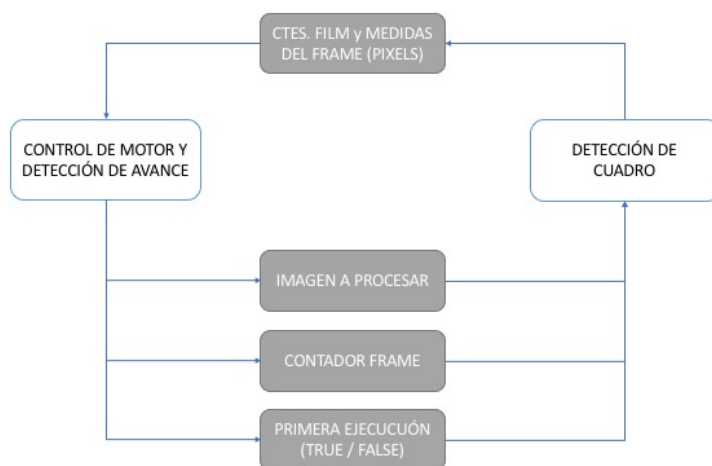


Fig. 7.7 Interacción entre los módulos de transporte, detección de avance y detección de frame

La sincronización de los módulos se obtiene ordenando convenientemente desde el programa de control la ejecución del programa de detección y pasando como argumento los valores necesarios para su correcto funcionamiento. En cuanto a la comunicación del valor de las constantes la opción elegida fue la escritura y lectura de archivos de texto plano.

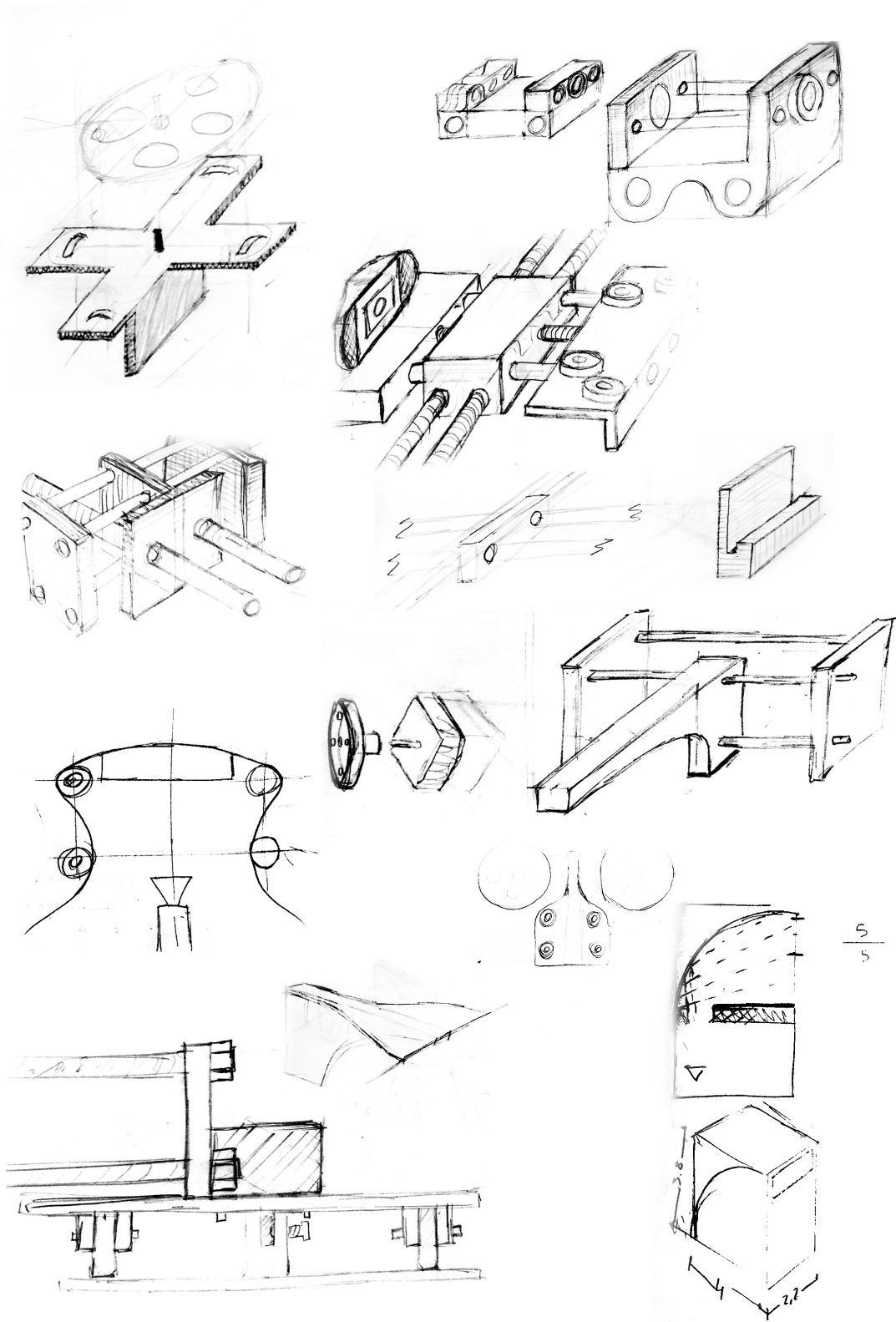


Fig. 7.4 Bocetos de las piezas.

Capítulo 8

Resultados, oportunidades de mejora y conclusiones

8.1 Resultados

Se logró desarrollar un sistema de digitalización de cintas de cine económico y replicable que puede ser construido por cualquier usuario utilizando una impresora 3D y componentes comunes. Como resultado de este trabajo se han puesto a disposición los siguientes insumos:

- Modelos 3D de todas las piezas (15) necesarias para construir un dispositivo digitalizador utilizando una impresora 3D
- Software de micro controlador para control de motores e interacción con computador
- Software para sistema de transporte de film (detección de avance)
- Software para extracción de frame

En las figuras 8.1, 8.2, 8.3, 8.4 se presentan los resultados del dispositivo mecánico.

Partiendo de un concepto base y un prototipo inicial se logró mediante iteraciones llegar a un mecanismo de transporte de film que no requiere mas sensores que la propia cámara utilizada para digitalizar. En la búsqueda de minimizar la cantidad de partes y la complejidad del sistema mecánico se logró prescindir también de partes móviles para el control de la tensión del film. Basándose en los resultados de un análisis cuantitativo se logró evaluar el desempeño de dos versiones del sistema de detección de avance e identificar los puntos que debían mejorarse. y como resultado se logró reducir a la mitad la dispersión del avance del film obteniendo. De esa forma se logró un mecanismo capaz de posicionar frente al sensor cada cuadro de una film con un error de 20 pixels.

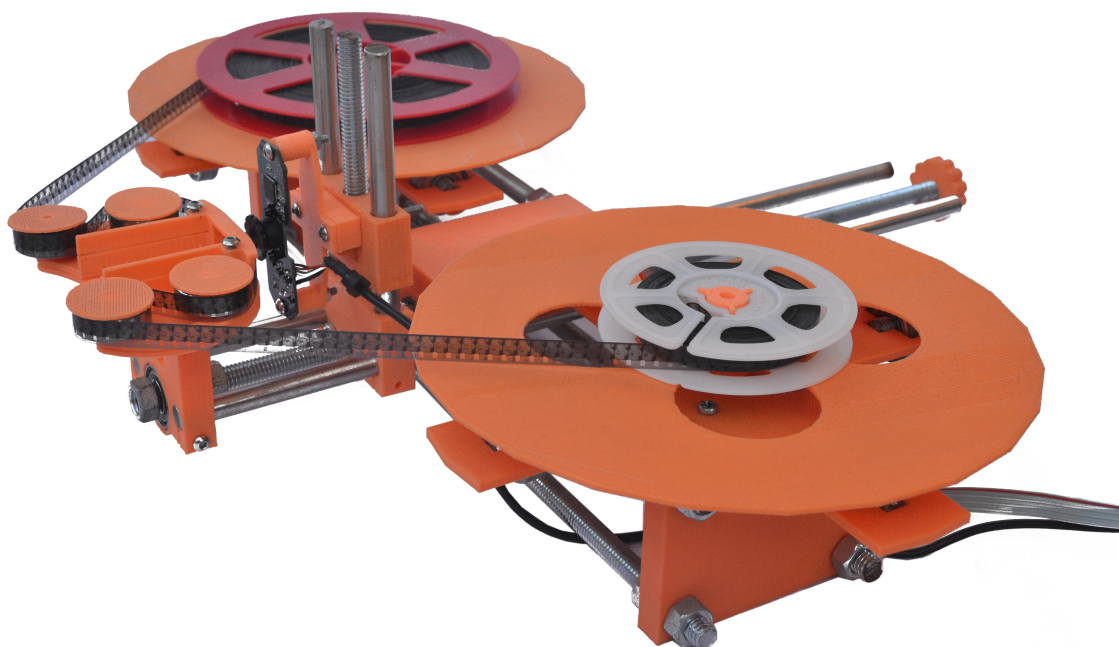


Fig. 8.1 Vista lateral frotal

8.2 Oportunidades de mejora

El sistema desarrollado es el resultado de múltiples etapas de prototipado tanto a nivel de software como de hardware. No se ha llevado a cabo hasta el momento una revisión del sistema que permita mejorar la experiencia de uso del dispositivo. Este es un aspecto sumamente relevante que debe abordarse en el futuro para facilitar la adopción del sistema por parte del usuario final. El aprovechamiento del sensor es algo en lo que también hay espacio para trabajar ya que actualmente solamente un 25% de los pixels que captura la cámara están dentro de la región del frame. Es posible mejorar este aspecto pero nunca va a ser posible con el abordaje propuesto en este proyecto lograr aprovechar el 100% del sensor.

8.3 Conclusiones

1. El relevamiento de dispositivos realizado en el capítulo 2 muestra que por el momento son pocos los dispositivos DIY que logran resolver el sistema de control de avance del film basándose en técnicas de visión computarizada a partir de lo cual se puede concluir que ese es uno de los principales aportes de este trabajo.

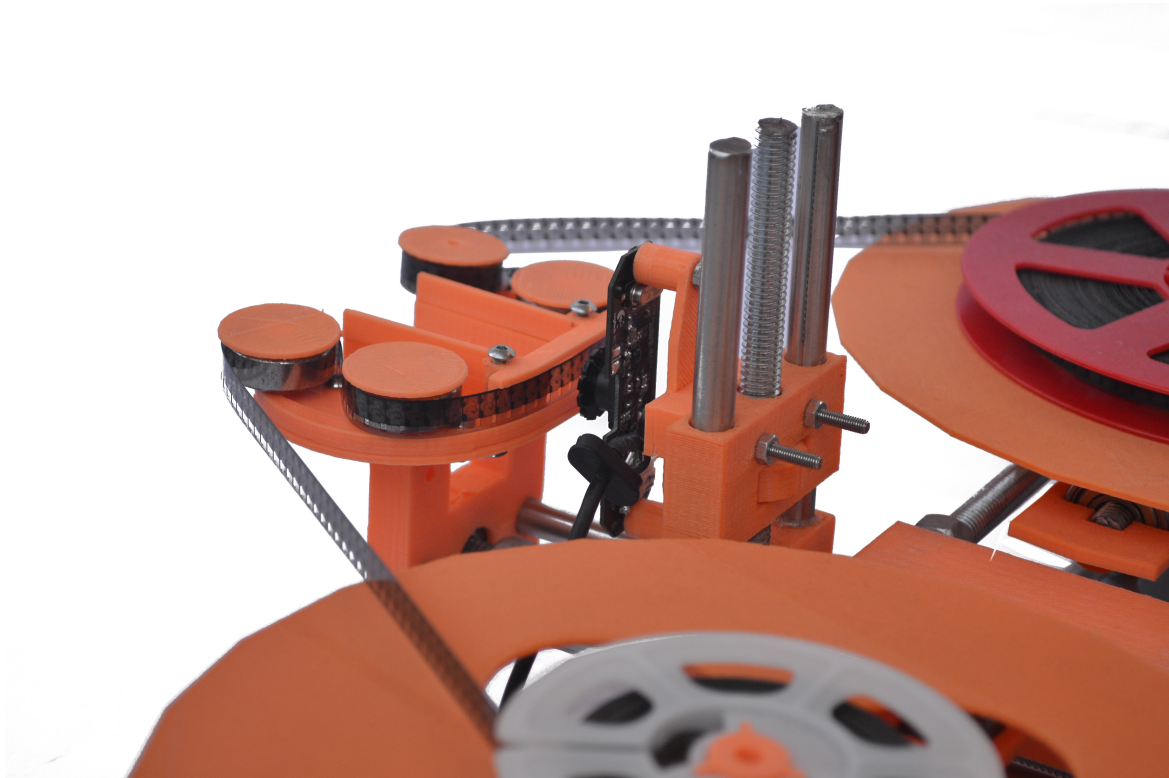


Fig. 8.2 Ventana de captura

2. La lista de partes necesaria para construir este dispositivo es reducida y muy accesible (menos de USD 200 sin considerar la cámara) y el dispositivo se basa en piezas open source fabricables en impresora 3D, lo cual lo hacen una opción adecuada tanto para usuarios particulares como para instituciones que no cuenten con alto presupuestos para digitalizar material audiovisual.
3. El diseño del dispositivo permite que los propios usuarios puedan extenderlo ya sea para soportar otros formatos o para mejorar el desempeño con los formatos actualmente soportados.
4. Los resultados obtenidos utilizando una cámara web de muy bajo costo permiten concluir que el sistema de detección de avance es suficientemente robusto como para funcionar correctamente sin necesidad de una cámara de altas prestaciones.
5. Como contrapartida a la no utilización de sensores adicionales para la medición del avance del film el sistema diseñado no es capaz de aprovechar el sensor de imagen al máximo para la digitalización del cuadro ya que debe capturar también la región circundante y esto repercute en la calidad de la imagen obtenida.

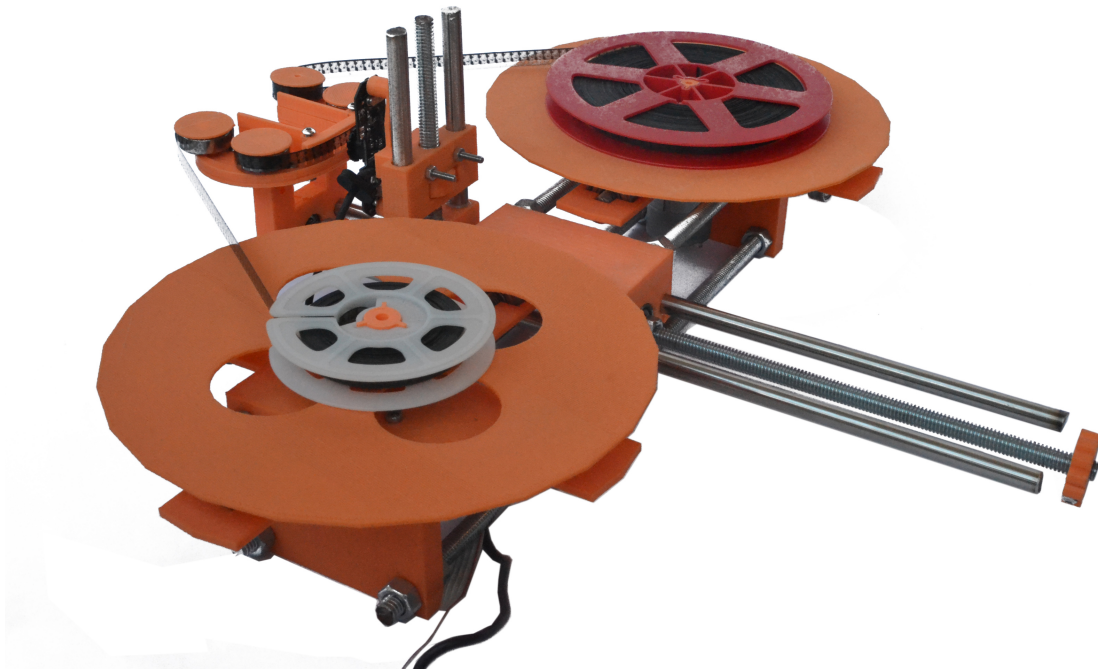


Fig. 8.3 Vista lateral trasera

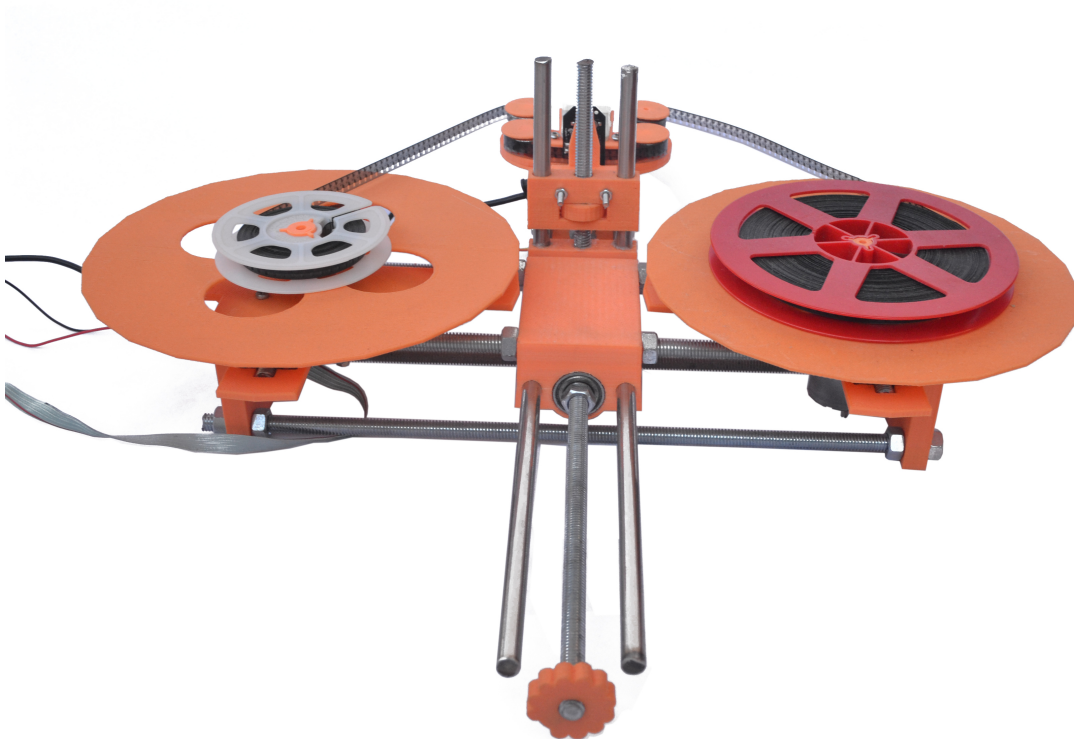


Fig. 8.4 Vista superior

Referencias

- [1] Wikipedia. Rueda de ginebra — wikipedia, la enciclopedia libre, 2018. [Internet; descargado 15-abril-2018].
- [2] Rhys Jones, Patrick Haufe, Edward Sells, Pejman Iravani, Vik Olliver, Chris Palmer, and Adrian Bowyer. Reprap—the replicating rapid prototyper. *Robotica*, 29(1):177–191, 2011.
- [3] Alfonso Del Amo García. *Clasificar para preservar*. Cineteca Nacional, 2006.
- [4] Perry Sprawls. The photographic process and film sensitivity. "<http://www.sprawls.org/ppmi2/FILMSEN/>".
- [5] Frédéric Cao, Frédéric Guichard, Hervé Hornung, and Régis Tessière. An objective protocol for comparing the noise performance of silver halide film and digital sensor. In *Digital Photography VIII*, volume 8299, page 829902. International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [6] Paolo Cherchi Usai and Paolo Cherchi Usai. *Death of Cinema*. British Film Institute, 2001.
- [7] Wikipedia contributors. Telecine — Wikipedia, the free encyclopedia, 2018. [Online; accessed 12-April-2018].
- [8] Matthew Epler. Kinograph, 2013. <http://kinograph.cc/>.
- [9] Wikipedia contributors. Movie projector — Wikipedia, the free encyclopedia, 2018. [Online; accessed 15-April-2018].
- [10] Wikipedia. Persistencia de la visión — wikipedia, la enciclopedia libre, 2017. [Internet; descargado 15-abril-2018].
- [11] Digital Film Technology. Scanity hdr. <http://www.dft-film.com/products/scanity-hdr.html>.
- [12] Kinetta. Kinetta. <http://www.kinetta.com/>.
- [13] Digital Vision. Golden eye 4. <http://www.digitalvision.tv/products/golden-eye-film-scanner/>.
- [14] Blackmagicdesign. Cintel scanner 01. <https://www.blackmagicdesign.com/products/cintel/techspecs/W-CINTEL-01>.

- [15] Film Fabriek. Muller hds+. <http://www.filmfabriek.nl/filmscanner/>.
- [16] Reflecta. Super 8+ scanner. <https://reflecta.de/en/products/detail/~id.853/reflecta-Super8-und-Scanner.html>.
- [17] Wolverine. Reels2digital moviemaker. http://secure.mm5server.com/merchant.mvc?Screen=PROD&Store_Code=WD&Product_Code=F2DMM100&Attributes=Yes&Quantity=1.
- [18] Heikki Hietala. The 8mm film scanner (telecine) project. <http://www.sabulo.com/sb/8mm-film/the-8mm-film-scanner-project-part-1/>.
- [19] Alexander. Rpitelecine. <https://github.com/Alexamder/rpitelecine>.
- [20] Etienne Collomb. Super 8 scan raspberry pi. <https://github.com/etiennecollomb/Super-8-Raspberry-Scan>.
- [21] Frank Pirz. Linux-based 8mm telecine. <https://www.linuxjournal.com/magazine/linux-based-8mm-telecine>.
- [22] Richard Kinch. Flatbed scanner digital telecine (fsdt) project. <http://www.truetex.com/telecine.htm>.
- [23] Anderson Li. Digital telecine. <https://therobotfish.com/projects/digital-telecine/>.
- [24] Weaver C. Super8scan project. <https://github.com/weaverch/super8scan>.
- [25] unkown. Mets (macro economic telecine system). <http://www.mets-telecinesystem.co.uk>.
- [26] Neil Gershenfeld. How to make almost anything: The digital fabrication revolution. *Foreign affairs*, pages 43–57, 2012.
- [27] Wikipedia. Gnu general public license — wikipedia, la enciclopedia libre, 2018. [Internet; descargado 21-abril-2018].
- [28] RepRap. Reprap options, 2018. "http://reprap.org/wiki/RepRap_Options".
- [29] OpenCV. Optical flow, 2017. "https://docs.opencv.org/3.3.1/d7/d8b/tutorial_py_lucas_kanade.html".
- [30] Bruce D Lucas, Takeo Kanade, et al. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. 1981.
- [31] Wikipedia. Moda (estadística) — wikipedia, la enciclopedia libre, 2018. [Internet; descargado 28-abril-2018].
- [32] Wikipedia. Hurter and driffield — wikipedia, la enciclopedia libre, 2017. [Internet; descargado 1-mayo-2018].
- [33] Paul E Debevec and Jitendra Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 369–378. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997.

-
- [34] Tom Mertens, Jan Kautz, and Frank Van Reeth. Exposure fusion: A simple and practical alternative to high dynamic range photography. In *Computer Graphics Forum*, volume 28, pages 161–171. Wiley Online Library, 2009.
- [35] Brook Drum. About printrbot, 2011. "<http://printrbot.com/about/>".

Appendix A

Manual de Operación

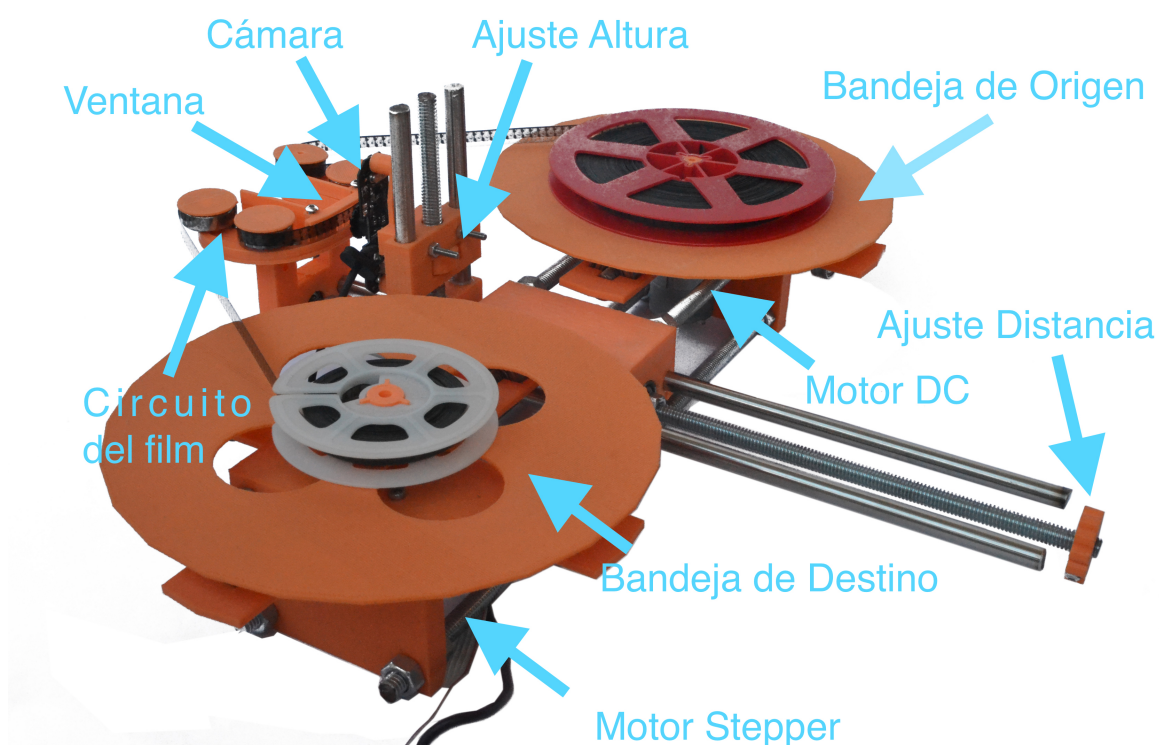


Fig. A.1 Principales partes del dispositivo y su nombre

Carga del film en el dispositivo

Para cargar el film en el dispositivo es necesario ubicar la bobina que contiene el film sobre la bandeja de origen. La bobina vacía (destino) se ubica sobre la bandeja de destino. El film debe seguir el circuito definido por los rodamientos que aportan tensión. En la figura A.1 se detalla cuál es cada una de estas bandejas.

Una vez ubicadas las bobinas sobre las bandejas debe pasarse el film por los tensores y la ventana de acuerdo a la figura A.2.

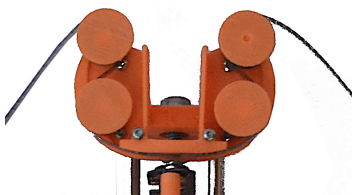


Fig. A.2 Recorrido del film entre tensores y ventana

Conexiones

1. Conectar la fuente del controlador a 220 V
2. Conectar Cable USB del controlador a un puerto USB del computador que se va a usar
3. Conectar Cable USB de la cámara a un puerto USB del computador que se va a usar

Correr programas

1. Activar el ambiente de Anaconda que tiene los paquetes requeridos
2. Ejecutar el programa DIYtelecinePreview

Ingresar parámetros para la digitalización

Cuando se empieza a ejecutar el programa DIYtelecine se presentará una ventana con la imagen proveniente de la cámara con el objetivo de permitir el ajuste del foco y la distancia entre la cámara y el film. Esta distancia debe ser tal que en la escena se vean siempre dos perforaciones completas y al menos parte de la siguiente. La figura A.3 presenta un ejemplo de la composición de la escena que se ve cuando la distancia entre la cámara y la cinta es la correcta. Una vez ajustado el foco, la distancia y la altura se presiona la letra "q" en el teclado para invocar la siguiente etapa del proceso.

A continuación el sistema realizará un proceso de setup que involucra el avance del film en forma automática y luego presentara una nueva escena junto con una interfaz gráfica de usuario compuesta por:

- Ajuste de Borde Inferior: Debe moverse hasta que la línea verde se ubique sobre el borde inferior del film



Fig. A.3 Distancia óptima entre la cámara y el film

- Ajuste de Borde Superior: Debe moverse hasta que la línea azul se ubique sobre el borde superior del film
- Ajuste de Posición de ROI: Debe moverse hasta que la línea verde se ubique sobre el eje de las perforaciones
- Ajuste de alto de ROI: Debe moverse hasta que la región simétrica delimitada por el rectángulo rojo abarque la mayor área de perforaciones posible

La imagen muestra el resultado de realizar los ajustes mencionados anteriormente.

Una vez realizados los ajustes se presiona la tecla "Esc" y comienza el proceso de digitalización.

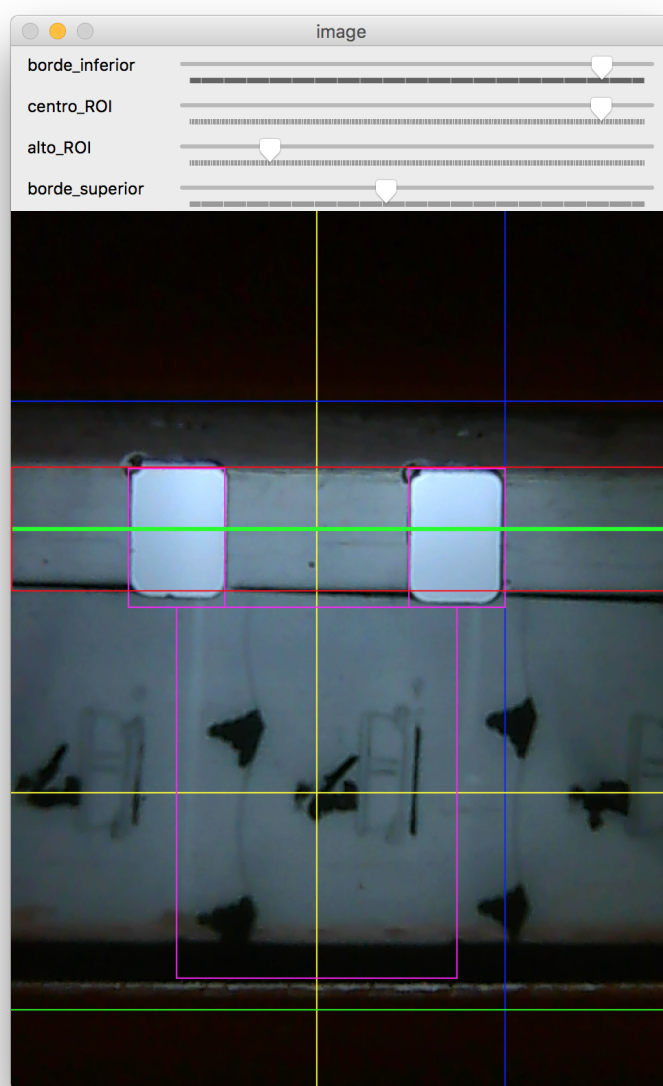


Fig. A.4 Ajustes que deben realizarse a través de la Interfaz Gráfica de Usuario