



industriales  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

## DETECTOR DE VIBRACIONES BASADO EN EL EFECTO MOIRÉ.

### TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**Autor:** Fernando Mellado Gómez  
**Director:** Pedro María Alcover Garau



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

Cartagena, Octubre 2017.

# ÍNDICE:

1	Resumen, palabras clave y abstract.....	1
2	Introducción al proyecto.....	2
2.1	El fenómeno de moiré.....	2
2.1.1	Antecedentes históricos.....	2
2.1.2	Teoría de moiré.....	2
2.1.3	El efecto moiré y su experimentación.....	3
2.1.3.1	Cambio de escala.....	4
2.1.3.2	Traslación.....	5
2.1.3.3	Rotación.....	5
2.1.3.4	Rejillas, puntos y círculos.....	8
2.1.4	Conclusiones.....	9
2.2	Teoría del péndulo.....	10
2.2.1	Introducción.....	10
2.2.2	Ecuación del movimiento.....	10
2.2.3	Energía del péndulo simple.....	14
2.2.4	Leyes del péndulo.....	15
2.2.5	Conclusiones.....	16
2.3	El sismógrafo.....	17
2.3.1	Introducción.....	17
2.3.2	Funcionamiento de un sismógrafo.....	17
2.3.3	Sismógrafo vertical y horizontal.....	18
2.3.4	Conclusiones.....	20
2.4	Visión por ordenador.....	21
2.4.1	Introducción.....	21
2.4.2	Iluminación.....	21
2.4.2.1	Tipos de iluminación.....	22

2.4.2.2	Fuentes de luz.....	24
2.4.3	Óptica.....	26
2.4.3.1	Óptica tipo zoom.....	27
2.4.3.2	Profundidad de campo y distancia hiperfocal.....	27
2.4.4	Imágenes digitales.....	28
2.4.4.1	Muestreo espacial y niveles de gris.....	29
2.4.4.2	Color.....	29
2.4.4.3	Espacio RGB.....	30
3	Desarrollo del prototipo.....	31
3.1	Fabricación y diseño del prototipo.....	31
3.1.1	Introducción.....	31
3.1.2	Cámara.....	32
3.1.3	Carcasa.....	33
3.1.4	Sistema de iluminación.....	35
3.1.5	Elemento de suspensión.....	35
3.1.6	Láminas de patrones de moiré.....	36
3.1.7	Colocación, montaje e instalación del prototipo.....	37
3.2	Mejoras del diseño.....	39
3.3	Desarrollo y funcionamiento de la aplicación.....	41
3.3.1	Introducción.....	41
3.3.2	Desarrollo de la aplicación.....	41
3.3.2.2	Software IDS.....	42
3.3.3	Funcionamiento de la aplicación.....	42
3.3.3.1	Resumen del funcionamiento.....	42
3.3.3.2	Aplicación ViendoMOIRE.....	43
4	Experimentación y Resultados.....	51
5	Conclusiones.....	65

6	Agradecimientos.....	67
7	Bibliografía.....	68

# 1. Resumen, palabras clave y abstract.

## **Resumen.**

Este proyecto consiste en el desarrollo de un detector de vibraciones que utiliza el efecto moiré. Al superponer dos patrones o estructuras periódicas de elementos como líneas o puntos, aparece un nuevo patrón que no está contenido en ninguna de las dos tramas iniciales, al que se conoce como patrón o interferencia de moiré. Debido a su extrema sensibilidad a los pequeños desplazamientos, el efecto moiré es utilizado para aplicaciones como la detección de pequeñas vibraciones y deformaciones sufridas en objetos. El objetivo de este proyecto es diseñar y construir un prototipo capaz de detectar pequeñas vibraciones o desplazamientos a partir del fenómeno de moiré. También se va a estudiar la influencia de alguno de los parámetros de diseño de los patrones utilizados en el proyecto y cómo afectan a la capacidad de detección y a la sensibilidad del sistema desarrollado.

## **Palabras clave.**

Efecto moiré, detección de vibraciones, patrones, péndulo simple, visión artificial.

## **Abstract.**

This project consists in the development of a vibrations detector that uses the moiré effect. If two patterns or periodic structures of elements such as lines or dots are superimposed, a new pattern appears that isn't contained in any of the two initial frames, which we known as a moiré's pattern or moiré's interference. Due to his extreme sensitivity to small displacements, the moiré effect is used for applications such as detecting small vibrations and distortions suffered in objects. The objective of this project is to design and build a prototype capable of detecting small vibrations or displacements from the moiré phenomenon. Finally, we will study the influence of the design parameters of the patterns used and how they affect to the detection capacity and to the sensitivity of the developed system.

## **Key words.**

Moiré effect, vibration detection, patterns, simple pendulum, artificial vision.

## **2. Introducción al proyecto.**

### **2.1 El fenómeno de moiré.**

#### **2.1.1 Antecedentes históricos.**

El fenómeno de moiré ha sido conocido desde hace mucho tiempo, en China era utilizado para crear un efecto visual con la tela de seda. No fue hasta la mitad del siglo XIX cuando comenzó la investigación científica y la aplicación del fenómeno de moiré. Durante el siguiente siglo, el análisis teórico de los fenómenos moiré se ha basado únicamente en enfoques geométricos o algebraicos. A partir de estos enfoques, aparecieron muchos desarrollos matemáticos para la utilización en aplicaciones específicas, tales como el análisis de las tensiones, la metrología, etc.

#### **2.1.2 Teoría de moiré**

Prácticamente todo el mundo ha visto alguna vez el fenómeno producido al superponer dos tramas o estructuras periódicas, como resultado se visualiza una nueva estructura o trama periódica, la cual no es igual ni estaba contenida en ninguna de las dos iniciales superpuestas. Estas estructuras obtenidas son conocidas con el nombre de estructuras, patrones, o efectos de moiré. Este patrón está basado en la aparición de una estructura con alternancia de franjas blancas y negras que no aparecían en ninguna de las dos estructuras superpuestas. [1]

Estas interferencias a veces se obtienen por la superposición de dos láminas con el mismo patrón, (1) girado uno del otro cierto ángulo, (2) con una ligera variación de escala o (3) a causa de un ligero desplazamiento de una lámina con respecto a la otra. Existe un abanico de posibilidades a la hora de utilizar patrones para obtener el efecto de moiré. Podemos destacar los patrones de puntos, de líneas paralelas o de curvas que pueden ser parábolas u otras cualesquiera.

El termino moiré viene del francés, originalmente se refería a moaré, una tela brillante colocada con cierta ondulación, que producía determinados patrones que cambiaban según la colocación de esta tela. El término moiré no se refiere a ningún científico que estudió los patrones de moiré ni a ninguna persona que los haya descubierto.

El fenómeno de moiré se utiliza en un gran ámbito de aplicaciones debido a su extrema sensibilidad a los desplazamientos, giros o escalamientos en las plantillas de patrones superpuestas. En este amplio campo de aplicaciones destacan las siguientes: física, óptica, reproducción de imágenes, visión humana, etc. [2]

Además, los patrones de moiré se utilizan para el estudio y análisis de las tensiones, para la detección de ligeras deformaciones de objetos y medición de ángulos, desplazamientos o movimientos muy pequeños.

La aparición de patrones de moiré puede darse en cualquier fenómeno físico, pero donde se encuentran con más frecuencia es en la creación de imágenes digitales. En ocasiones se busca su aparición, o se diseñan y crean diferentes patrones que los provoquen. En la mayoría de las veces aparecen de forma no deseada (**Figura 1**), como por ejemplo al mostrar en un dispositivo digital (por ejemplo una pantalla formada por una red de píxeles) una imagen que ha sido capturada en otro dispositivo también digital (por ejemplo en un sensor CCD de una cámara).



**Figura 1.** Ejemplo aparición efecto moiré en fotografías.

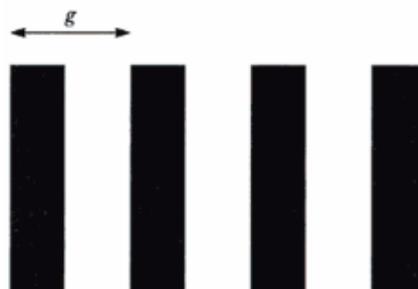
### 2.1.3 El efecto moiré y su experimentación

A la hora de estudiar el efecto moiré, se utiliza un modo muy sencillo basado en patrones sobre láminas. Los patrones más utilizados en las láminas son los de líneas paralelas (estas láminas se suelen llamar rejillas), patrones de puntos y patrones de círculos. [3]

Las láminas de líneas paralelas son láminas formadas por líneas blancas y negras que tienen la misma anchura y los mismos espacios entre ellas. Una rejilla normalmente está caracterizada por dos medidas: el paso y el ratio.

El paso ( $g$ ) indica cómo de juntas se encuentran las líneas que componen la rejilla. Estas líneas deben tener cierto ancho para que se puedan ver con claridad.

El paso de una rejilla se considera la distancia entre los bordes de la izquierda de dos barras negras vecinas (**Figura 2**)



**Figura 2.** Representación del paso ( $g$ ). [3]

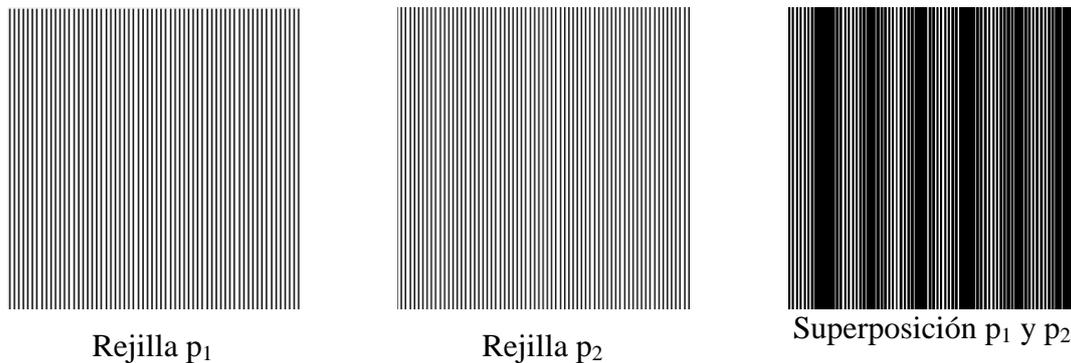
El ratio ( $R$ ) es la relación entre la anchura de la zona negra y la anchura de la zona blanca, separación entre dos líneas negras consecutivas. Un ratio de 1 significa que las zonas negras y las blancas son igual de anchas.

La cantidad de patrones que se pueden obtener con dos tramas de líneas depende del valor de estas dos características (ratio y paso) y de los desplazamientos, rotaciones y/o escalas que se realizan entre ellas.

### 2.1.3.1 Cambio de escala.

Para estudiar el efecto moiré, se parte de dos rejillas, llamadas  $p_1$  y  $p_2$ . Supongamos que la rejilla  $p_1$  tiene más líneas por unidad de longitud que la rejilla  $p_2$ , es decir, el paso  $g_1$  es ligeramente menor que el paso  $g_2$  ( $g_1 < g_2$ ).

Si la diferencia entre los pasos es sólo de un 5%, al superponer las dos rejillas de líneas paralelas (**Figura 3**), aparecerá un nuevo patrón de líneas debido al efecto moiré. Se ha creado un nuevo patrón de líneas negras y blancas, que forman una nueva rejilla con un paso mucho más amplio.

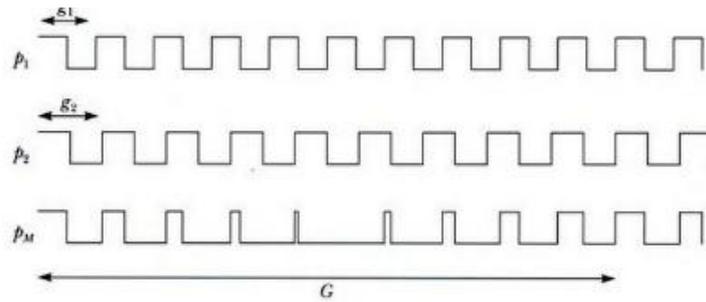


**Figura 3.** Aparición patrón de moiré al superponer dos rejillas de líneas paralelas.

Para la obtención del paso (que se llamará  $G$ ) de esta nueva rejilla, hay que estudiar por separado el patrón de líneas de las dos rejillas superpuestas (**Figura 4**), donde como se ha dicho antes, se ha tomado  $g_1 < g_2$ .

El patrón de moiré funciona de forma similar al operador de programación AND, en este caso se le da un valor de 0 a las zonas negras y un valor de 1 a las zonas blancas. O similar al operador OR si tomamos el valor 1 como negro y el valor 0 como blanco.

En la **Figura 4** se representan gráficamente los pasos de cada una de las rejillas y la obtención del paso  $G$  de la rejilla obtenida por la superposición de la rejilla  $p_1$  y  $p_2$ .



**Figura 4.** Gráfica de los tres patrones de moiré,  $p_1$ ,  $p_2$  y la superposición de estas  $p_M$ . [3]

Además de obtener patrones de moiré superponiendo dos láminas formadas por patrones de líneas en paralelo, es importante estudiar el comportamiento de este fenómeno si se producen desplazamientos, giros o la combinación de ambas cosas de una lámina o rejilla respecto a la otra.

### 2.1.3.2 Traslación.

Esta vez, además de superponer las dos rejillas de líneas paralelas, se va a realizar un pequeño desplazamiento de una de las rejillas con respecto a la otra. El resultado es la aparición de un patrón de moiré completamente diferente para cada desplazamiento producido, aunque la distancia que había entre las líneas de cada una de las rejillas superpuestas no cambia.

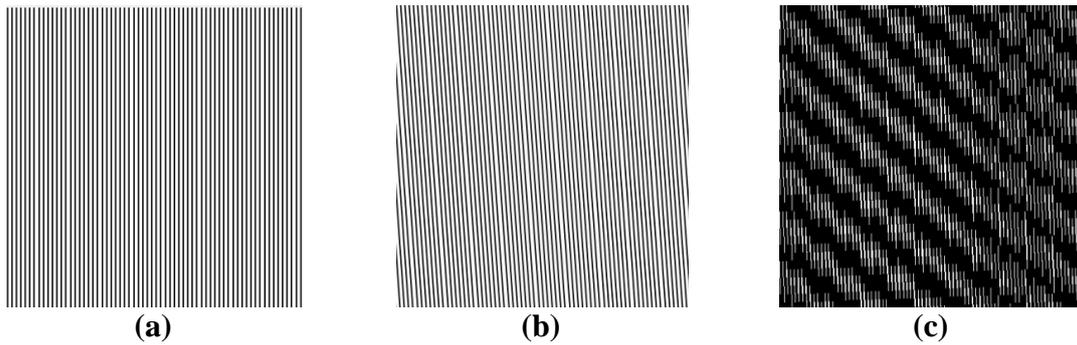
Si se realiza un desplazamiento hacia la derecha de la rejilla  $p_2$  una distancia múltiplo de su paso, por ejemplo  $g_2/2$ , las franjas del patrón formado por la superposición se han desplazado también una distancia de  $G/2$ . Si se modifica el desplazamiento hacia la derecha a una distancia ahora de  $g_2/4$ , el desplazamiento de las franjas del patrón formado por la superposición ahora es  $G/4$ . Es decir, si el desplazamiento de la rejilla  $p_2$  es  $g_2/X$ , el obtenido en la rejilla resultante es  $G/X$ .

La conclusión de estos resultados es que se comprueba que existe una relación lineal entre el desplazamiento de una de las rejillas con respecto a la otra y el desplazamiento de las franjas de la rejilla obtenida al superponer las dos iniciales. La consecuencia más importante de este fenómeno, es que se constata que para unos desplazamientos muy pequeños de la rejilla  $p_2$ , hay un desplazamiento muy grande en la rejilla obtenida por la superposición, este fenómeno se puede denominar amplificación y hace que el fenómeno de moiré sea muy útil para las aplicaciones comentadas anteriormente.

### 2.1.3.3 Rotación.

Para estudiar lo que ocurre cuando se produce la rotación de una de las láminas con respecto a otra, se parte de la misma situación inicial que en los casos anteriores, dos rejillas llamadas  $p_1$  y  $p_2$ , con iguales ratios y pasos ligeramente diferentes.

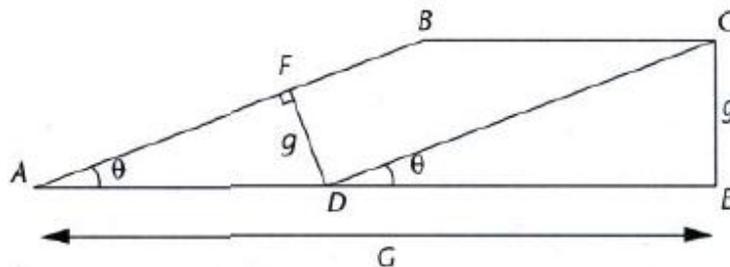
Ahora las láminas se superponen una encima de otra, colocando una de ellas inclinada cierto ángulo  $\theta$  respecto de la otra, aparece un patrón de moiré similar al de la **Figura 5**.



**Figura 5.** Imagen de las dos rejillas iniciales, una recta (a), otra inclinada cierto ángulo (b) y el patrón de moiré formado por la superposición de ambas (c).

Se van a estudiar las relaciones entre el nuevo valor de  $G$  y los de  $g_1$  y  $g_2$  de dos rejillas que están rotadas un ángulo  $\theta$  una respecto a la otra. En este caso se parte de un paralelogramo (**Figura 6**) que es la región blanca del patrón de moiré resultante. Cada espacio en blanco está representado por un paralelogramo, que está definido por el paso y el ratio de las rejillas iniciales y por el ángulo de inclinación  $\theta$  de una respecto a la otra.

Para facilitar el estudio, se asume que los pasos  $g_1$  y  $g_2$  de las rejillas iniciales son el mismo (llamado  $g$ ) y se considera que el ratio entre las líneas blancas y negras es prácticamente 0, es decir, las líneas negras tienen un grosor muy pequeño en comparación con la separación entre ellas.



**Figura 6.** Geometría del paralelogramo de la región blanca. [3]

El paralelogramo ABCD es la región en blanco del patrón obtenido. El punto E es el punto de intersección que se obtiene de prolongar la línea que une A y D hasta que corte con una línea iniciada en C perpendicular a la línea que une B y C. La distancia obtenida CE es el paso  $g$  de la rejilla, el ángulo de inclinación de las franjas es  $\tan\theta = \frac{CE}{DE}$  y por tanto la distancia  $DE = \frac{g}{\tan\theta}$ .

Si se dibuja una línea perpendicular a la línea AB y que pase por el punto D, obtenemos la distancia FD, la cual también es el considerado paso  $g$  (ya que es el espacio creado por la segunda rejilla). Dado que AD es la hipotenusa del triángulo formado por ADF, se puede hallar la distancia  $g$  como:

$$g = AD \sin \theta \quad \text{Y por lo tanto} \quad AD = \frac{g}{\sin \theta}$$

De esta manera el paso de la franja  $G$  viene dado por:

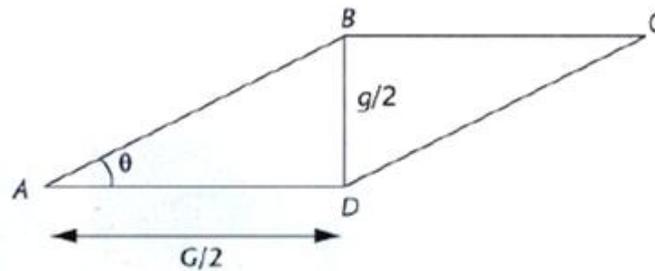
$$G = (AD) + (DE)$$

$$G = \frac{g}{\sin \theta} + \frac{g}{\tan \theta}$$

$$G = g \left( \frac{1}{\sin \theta} + \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right)$$

$$G = \frac{g(1 + \cos \theta)}{\sin \theta}$$

Si se consideran que las líneas son muy finas, el análisis realizado no cambia. Pero si las líneas son más gruesas, el paralelogramo formado por los espacios blancos será más pequeño aunque el paso  $G$  no cambie. Otro caso posible es asumir que el ángulo  $\theta$  es muy pequeño y que el ratio es prácticamente 1, por lo que se pueden realizar las simplificaciones representadas en la **Figura 7**. Esta vez como el ángulo  $\theta$  es menor, la línea que une BD es prácticamente vertical y es la distancia  $g/2$  y por lo tanto AD es  $G/2$ , cumpliendo la proporcionalidad demostrada anteriormente.



**Figura 7.** Simplificación geométrica para ángulos pequeños. [3]

La fórmula para obtener el ángulo  $\theta$ , por trigonometría es:

$$\tan \theta = \frac{BD}{AD} = \frac{\frac{g}{2}}{\frac{G}{2}} = \frac{g}{G}$$

Si el ángulo  $\theta$  es pequeño, se puede asumir que  $\tan \theta$  es prácticamente  $\theta$ , y despejando  $G$  de la fórmula resultante en la ecuación anterior se tiene la fórmula estándar del paso  $G$  de moiré, para una rotación de un ángulo  $\theta$ .

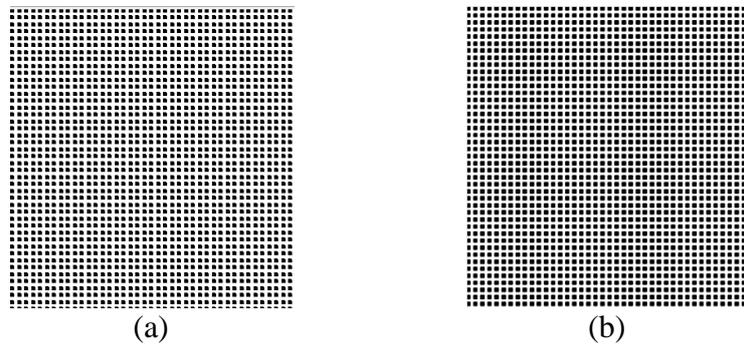
Cuando el ángulo disminuye, las franjas se vuelven más difíciles de distinguir. En la práctica, escoger correctamente el ángulo y los diferentes pasos de las rejillas es importante para obtener resultados útiles.

### 2.1.3.4 Rejillas, puntos y círculos.

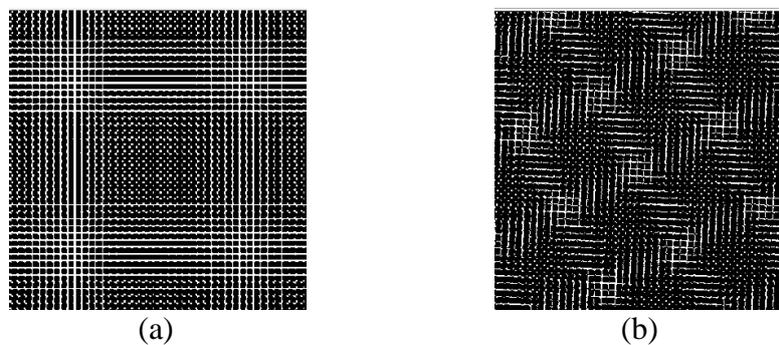
Hasta ahora, solamente se han estudiado las rejillas, es decir láminas de patrones formados por líneas blancas y negras paralelas entre ellas, y los patrones de moiré que se formaban con la superposición, desplazamiento o inclinación de una rejilla con la otra.

Los patrones de moiré no solo se producen con rejillas de líneas paralelas, también se pueden utilizar plantillas de distintos patrones como puntos o círculos. A continuación se va a ver cómo se comporta el fenómeno de moiré con estos patrones.

Si se parte de dos láminas de puntos llamadas  $p_1$  y  $p_2$  como las representadas en la **Figura 8**, donde cada una tiene una medida de distancia entre sus puntos, se obtienen diferentes patrones de moiré al desplazar, girar o escalar esas rejillas. En la **Figura 9** se muestra el efecto del desplazamiento y del giro de una lámina con respecto a la otra.



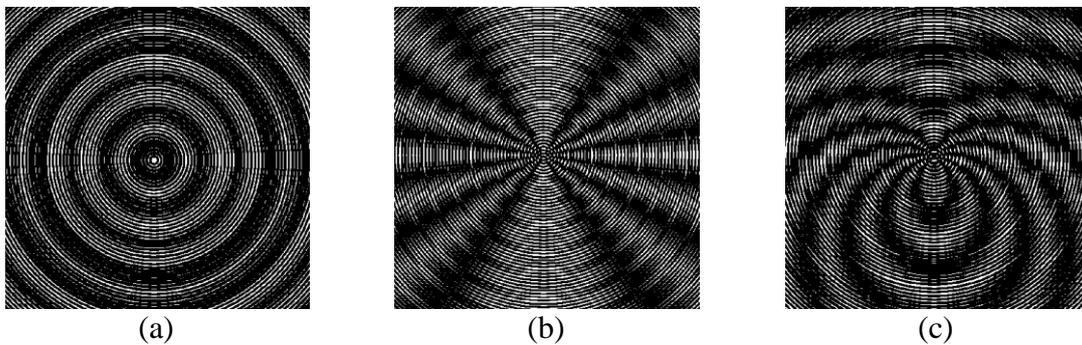
**Figura 8.** Láminas de patrones de puntos  $p_1$  (a) y  $p_2$  (b).



**Figura 9.** Patrones obtenidos al realizar desplazamiento (a) y rotación (b) de las láminas de patrones de puntos una respecto a la otra.

Por último, se parte de dos láminas de patrones circulares. En este tipo de patrones, el paso se refiere a la distancia que hay entre la parte interior de dos bandas sucesivas. Estos patrones proporcionan infinidad de patrones de moiré ya que se pueden combinar la modificación de la colocación de una lámina respecto de la otra y los cambios en los pasos entre las bandas de cada lámina, obteniendo un abanico de posibilidades inmenso.

En la **Figura 10** se ven tres ejemplos de patrones obtenidos, el primero se obtiene de superponer dos láminas de patrón circular con un paso ligeramente diferente colocadas sobre un centro común. El segundo caso se obtiene desplazando una pequeña distancia una de las láminas de patrón circular con respecto a otra del mismo paso. Por último, en el tercer ejemplo de la figura se han combinado los dos efectos de los ejemplos anteriores, el desplazamiento de una de las láminas con un paso ligeramente diferente respecto a la otra lámina.



**Figura 10.** Patrones obtenidos al realizar escalamiento (a), desplazamiento (b) y combinación de ambos con láminas de patrones circulares (c).

#### 2.1.4 Conclusiones.

En resumen, la aparición de los patrones de moiré es un fenómeno basado en la superposición de dos tramas o patrones, que producen un efecto visual llamado efecto moiré.

Como se ha estudiado, el efecto moiré tiene un gran potencial si queremos estudiar los desplazamientos y las vibraciones, ya que es posible detectar fácilmente un cambio en el patrón de moiré obtenido al desplazar mínimamente una de las rejillas o patrones respecto a la otra. Este desplazamiento del patrón obtenido permite detectar movimientos y desplazamientos pequeños, nuestro proyecto de detección se basa en esta propiedad del efecto moiré.

## 2.2 Teoría del péndulo.

### 2.2.1 Introducción

El objetivo principal del trabajo es fabricar un prototipo cuya función es la de detectar vibraciones. Este objetivo se llevará a cabo a partir de un sistema que sigue las leyes del péndulo, por lo que hay que tener claro los principios del péndulo, los parámetros que lo caracterizan y que influirán en el funcionamiento de nuestro prototipo.

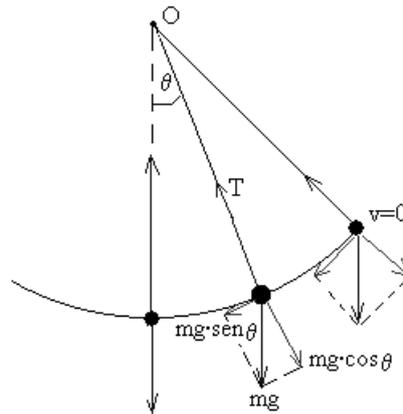
El péndulo simple consiste en una masa puntual  $m$  suspendida de un hilo de longitud  $L$  y masa despreciable. Si se desplaza la masa cierto ángulo  $\theta_0$  con respecto a la vertical y se suelta, la masa empezará a oscilar describiendo un movimiento periódico y oscilatorio [4] a lo largo de una circunferencia de radio igual a la longitud  $L$  del hilo. El recorrido del péndulo describirá una curva pasando por la posición de equilibrio, que se da cuando la masa se encuentra en el punto más bajo posible de la oscilación (coincidiendo con la vertical).

El movimiento oscilatorio que describe la masa  $m$ , puede estar definido por los siguientes parámetros:

- Ciclo u oscilación completa: es el desplazamiento de la masa desde uno de sus extremos más alejados de la posición de equilibrio hasta su punto simétrico (pasando por la posición de equilibrio) y vuelta a la posición inicial.
- Periodo: es el tiempo empleado por la masa en realizar un ciclo u oscilación completa.
- Frecuencia: es el número de ciclos realizados en la unidad de tiempo.
- Amplitud: es el máximo valor de la distancia en horizontal que hay entre la masa oscilante y la vertical del punto de equilibrio, que depende del ángulo  $\theta$  entre la vertical y el hilo.

### 2.2.2 Ecuación del movimiento.

Para obtener las ecuaciones que describan el movimiento del péndulo y que definan sus parámetros, se necesita hacer un estudio del movimiento y las fuerzas que intervienen en el movimiento de la masa durante la oscilación. En la **Figura 11** se representa un esquema del péndulo cuando la masa se encuentra en diferentes instantes de la oscilación y las fuerzas que actúan en cada momento.



**Figura 11.** Esquema de fuerzas sobre la masa  $m$  del péndulo. [5]

En la **Figura 11** se representa un péndulo que se desplaza de izquierda a derecha perdiendo velocidad hasta detenerse en el punto con velocidad cero. Como se puede observar, las fuerzas que actúan sobre la partícula de masa  $m$  son el peso  $mg$  de la propia masa, y la tensión  $T$  del hilo. Cuando el hilo forma un ángulo  $\theta$  con respecto a la vertical, el peso tiene dos componentes: descomponiendo el peso de la masa, en la dirección tangencial al hilo está la componente  $mg\text{sen}\theta$  y en la dirección normal al hilo la componente  $mg\text{cos}\theta$ . La componente normal tiene igual módulo pero sentido opuesto a la tensión  $T$ , por lo tanto no interviene en el movimiento del péndulo.

Si aplicamos la segunda ley de Newton ( $\sum \vec{F} = m \vec{a}$ ) a la componente tangencial, ya que la componente normal no influye porque tiene el mismo valor que la tensión  $T$  del hilo, obtenemos la siguiente ecuación:

$$\vec{F}_t = m \vec{a}_t$$

Siendo para la ecuación anterior  $a_t$  la aceleración tangencial. Esta aceleración tangencial es una magnitud vectorial, es decir siempre tendrá asociada una dirección. La dirección del vector aceleración va a depender de que la velocidad esté aumentando o disminuyendo y de que el cuerpo acelerado se mueva en dirección positiva o negativa con respecto a un punto de referencia.

Si el cuerpo está frenando (disminuyendo su velocidad), la aceleración que sufre va en sentido opuesto al movimiento y la aceleración tangencial  $a_t$  se expresa con signo negativo. Por el contrario, si el cuerpo está aumentando su velocidad, la aceleración tiene el mismo sentido que la velocidad y se expresará con signo positivo. En el ejemplo de la **Figura 11**, la fuerza tangencial se expresa con signo negativo, debido a que como la partícula está ascendiendo y perdiendo velocidad, la aceleración tangencial  $a_t$  va en sentido opuesto al movimiento.

La fórmula de la fuerza tangencial  $F_t$  sería la siguiente:

$$F_t = -mg\text{sen}\theta$$

Como el movimiento que describe la masa  $m$  durante la oscilación es un movimiento circular, podemos relacionar la aceleración tangencial  $a_t$  con la aceleración angular  $\alpha$  de la siguiente manera:

$$a_t = L \alpha$$

Siendo la aceleración angular  $\alpha = \frac{d^2\theta}{d^2t}$  y  $L$  la longitud del hilo igual al radio de la circunferencia descrita por la masa.

Como consecuencia la ecuación diferencial del movimiento se podría igualar de la siguiente manera:

$$-mg\text{sen}\theta = m a_t$$

$$-mg\text{sen}\theta = mL\alpha$$

$$-mg\text{sen}\theta = mL \frac{d^2\theta}{d^2t}$$

Si eliminamos el término de la masa y pasamos todos los términos a un lado para poder igualar a 0, obtenemos la siguiente ecuación de movimiento del péndulo que es independiente del valor de la masa [6]:

$$\alpha L + g\text{sen}\theta = 0$$

$$\frac{d^2\theta}{d^2t} L + g\text{sen}\theta = 0$$

Esta ecuación diferencial no corresponde a la ecuación de un movimiento armónico simple, ya que encontramos la función seno dentro de ella. Existe la posibilidad de que la ecuación diferencial anterior se corresponda a la de un movimiento armónico simple, la condición es la siguiente:

$$\text{sen}\theta \cong \theta$$

Si se consideran solo oscilaciones de pequeña amplitud, es decir que el ángulo entre la vertical y el hilo no supere los  $15^\circ$ , se puede aceptar la aproximación de que el valor del seno de  $\theta$  sea prácticamente el mismo valor de  $\theta$  en radianes.

Esto implica además las siguientes consecuencias:

-La longitud de la trayectoria y el desplazamiento en el eje horizontal tienden a igualarse.

-La aceleración normal es despreciable.

-Se puede considerar que la trayectoria que describe la masa es prácticamente horizontal.

Por lo tanto, si se cumple la condición de que los ángulos de oscilación son pequeños, la ecuación diferencial del movimiento angular correspondería a la ecuación diferencial del movimiento armónico simple:

$$\theta = \theta_0 \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

Siendo la frecuencia angular  $\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$  [4]

En la ecuación,  $\theta$  corresponde a la posición con respecto a la posición de equilibrio,  $\theta_0$  es la amplitud máxima del movimiento y  $\varphi$  es la fase o posición angular inicial (parámetro utilizado para representar el punto inicial en una grafica x-t).

Se puede utilizar el periodo  $T$  de la vibración para demostrar que la masa y la amplitud de oscilación no influyen en el tiempo empleado para la oscilación [7]. Si se utiliza la fórmula del periodo  $T$  y en ella se sustituye la frecuencia angular  $\omega$ , se obtiene la siguiente fórmula del periodo:

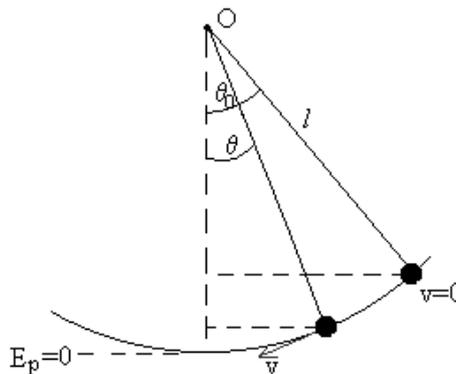
$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

En la fórmula del periodo no aparece el término  $m$  referido a la masa que oscila, ni el ángulo  $\theta$  referido a la amplitud de la oscilación (siempre que se traten de amplitudes pequeñas y por tanto sea un movimiento armónico simple). Por lo tanto, queda demostrado que la frecuencia de oscilación y el periodo del péndulo no dependen de la masa, sólo dependen de la longitud del péndulo.

### 2.2.3 Energía del péndulo simple.

El péndulo simple es un sistema en el cuál la energía es siempre la misma, ya que se supone que no existen pérdidas por rozamiento con el aire. En este sistema la energía se conserva, esta se va transformando en energía cinética o potencial según el punto en el que se encuentre la masa  $m$ . Para explicar mejor la evolución de la energía durante el movimiento del péndulo, se puede utilizar la siguiente figura:



**Figura 12.** Esquema péndulo simple en dos instantes de tiempo. [5]

En la **Figura 12** se puede ver la masa del péndulo en dos instantes de tiempo. En el instante de tiempo en el que el hilo forma un ángulo con la vertical de  $\theta_0$  (amplitud máxima), la velocidad de la masa en ese instante es 0 debido a que ha llegado a su punto máximo de oscilación, donde sólo tiene energía potencial. Una vez la masa haya llegado a la máxima amplitud, esta se detendrá y un instante después comenzará a oscilar en la otra dirección cumpliendo con el movimiento oscilatorio.

Cuando el hilo forma un ángulo  $\theta$  con la vertical, en ese instante de tiempo la energía de la masa  $m$  tiene parte potencial y parte cinética, puesto que está oscilando y se mueve con cierta velocidad.

Por último, aunque en la **Figura 12** no está representada, cuando la masa pasa por la posición de equilibrio, toda la energía es energía cinética, por lo tanto la energía potencial en ese punto es cero.

La fórmula de la energía para el péndulo simple es la siguiente:

$$E = E_{\text{cinética}} + E_{\text{potencial}}$$

$$E = \frac{1}{2} mv^2 + mgh$$

Siendo  $m$  la masa oscilante,  $v$  la velocidad de la masa,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $h$  la altura de la masa con respecto al suelo o respecto a su punto más bajo. Para el péndulo, en vez de utilizar  $h$ , se utiliza la diferencia entre la longitud total del hilo y la

componente vertical de la altura a la que se encuentra la masa, la fórmula general de la energía del péndulo quedaría de la siguiente manera:

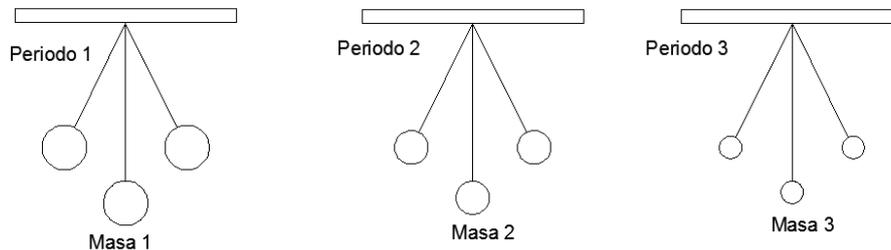
$$E = \frac{1}{2} mv^2 + mg(l - l\cos\theta)$$

Por lo tanto, en la posición extrema, cuando la amplitud es máxima ( $\theta = \theta_0$ ), la ecuación de la energía, que en este caso es solamente potencial, sería la siguiente:

$$E = mg(l - l\cos\theta_0)$$

### 2.2.4 Leyes del péndulo simple.

Ley de masas: Esta ley afirma que el movimiento del péndulo no depende de la masa del punto. Dados tres péndulos de igual longitud (como los que se muestran en la **Figura 13**) con distintas masas, los periodos de todos ellos son iguales. El periodo de oscilación de un péndulo no depende de su masa debido a que el término de la masa  $m$  se puede eliminar de la ecuación diferencial del movimiento.



**Figura 13.** Ley de masas.

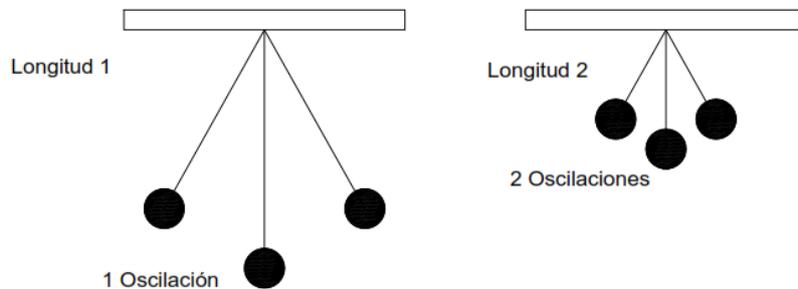
Ley del isocronismo: Esta ley afirma que el periodo de oscilación de un péndulo es independiente del valor de la amplitud a la que oscila, el periodo sólo depende de la longitud del hilo. Esta ley se cumple siempre que el valor del ángulo  $\theta$  sea lo suficientemente pequeño como para que la aproximación  $\text{sen}\theta \approx \theta$  sea aceptable. [8]

Ley de las longitudes: Esta ley enuncia que los tiempos de oscilación de dos péndulos cuyo hilo tiene distinta longitud, son directamente proporcionales a las raíces cuadradas de sus longitudes.

Esta ley se obtiene relacionando los periodos de los dos péndulos de la siguiente manera:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{L_2}}$$

Ya que el término de la gravedad se puede simplificar de la ecuación, puesto que es constante. Si se tienen dos péndulos como los de la **Figura 14**, cada uno con una longitud de hilo, y se dejan oscilar libremente, se podrá observar que se cumple la relación, a menor longitud menor tiempo de oscilación.



**Figura 14.** Ley de las longitudes.

### 2.2.5 Conclusiones.

Como conclusión, se ha llevado a cabo un estudio de los parámetros y las ecuaciones que definen el movimiento oscilatorio del péndulo. En la realidad el péndulo armónico simple es muy complicado de conseguir debido a que no se puede eliminar el rozamiento del péndulo con el aire, pero se puede aproximar el comportamiento de nuestro péndulo al de un movimiento armónico simple.

Con el fin de conseguir que se cumpla la aproximación  $\text{sen}\theta \approx \theta$  para la cual ni la masa ni la longitud del hilo influyen en el movimiento del péndulo, se instalará el prototipo con una longitud de hilo lo mayor posible. Otra ventaja de tener un péndulo de gran longitud es que será más sensible a los pequeños desplazamientos que se puedan producir en el entorno que rodea a nuestro prototipo.

## **2.3 El sismógrafo**

### **2.3.1 Introducción.**

El objetivo del proyecto es desarrollar el prototipo de un detector de vibraciones. Para ello se han estudiado el fenómeno de moiré, y el comportamiento y los parámetros que influyen en el movimiento de un péndulo. Ahora es necesario conocer el funcionamiento de los sistemas diseñados para detectar las vibraciones del suelo, para así conocer las futuras aplicaciones de nuestro dispositivo.

Los sismógrafos son instrumentos esenciales para el registro preciso de los temblores de tierra en todas partes del mundo. Están dotados de tal sensibilidad que una perturbación intensa del suelo, al propagarse en forma de ondas sísmicas, puede llegar con energía suficiente como para que se refleje en los sismógrafos situados a más de 9000 km de distancia. [9]

En la actualidad, estos instrumentos han alcanzado un alto grado de desarrollo electrónico, pero el principio básico empleado no ha cambiado prácticamente. Todos los primeros sismógrafos se basaron en el principio del péndulo. Para registrar el movimiento del suelo es necesario referirlo a un punto fijo en el espacio. No se puede referir el movimiento del suelo a un punto anclado al propio suelo, ya que entonces no se obtendría ningún registro puesto que el punto y el suelo tendrían el mismo movimiento.

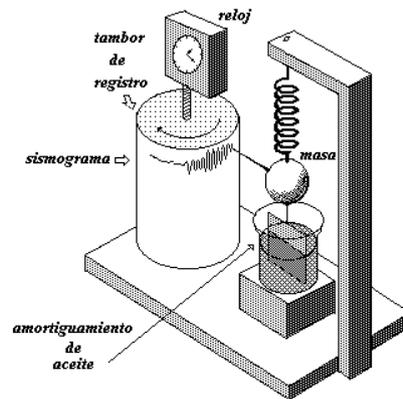
### **2.3.2 Funcionamiento de un sismógrafo.**

Para medir la diferencia de movimientos entre el suelo y un punto del espacio cualquiera, se recurre al principio de inercia de los cuerpos, el cuál enuncia que todos los cuerpos tienen una resistencia al movimiento o a variar su velocidad [10]. Si se parte de un péndulo en reposo y se mueve su soporte, se puede observar cómo el péndulo describe un movimiento diferente que el realizado sobre el soporte, ya que la masa suspendida permanece en reposo durante unos instantes con respecto al soporte. Esto es debido a que el péndulo no está unido de manera fija a su soporte, sino que dispone de uno o dos grados de libertad según el movimiento que describa. Gracias a este principio, se puede registrar el movimiento relativo entre el péndulo y su soporte, es decir entre el péndulo y el suelo. [11]

El mecanismo consiste normalmente en una masa suspendida con un cable o resorte atado a un soporte acoplado al suelo. A dicha masa normalmente se le añade un lápiz o pluma para registrar el movimiento de la masa sobre un papel que se desplaza a velocidad constante y en dirección perpendicular al plano de oscilación del péndulo, de forma que en dicho papel queden registradas las oscilaciones perpendiculares al papel realizadas por la masa.

### 2.3.3 Sismógrafo vertical y horizontal.

Según la componente del movimiento que registre el sismógrafo, se pueden distinguir los sismógrafos verticales y horizontales. En la **Figura 15** se ve un ejemplo de un sismógrafo vertical. Este sismógrafo está formado por una masa unida a un muelle que a su vez está unido al soporte.



**Figura 15.** Ejemplo de sismógrafo vertical. [10]

El sismógrafo vertical es un sistema con un único grado de libertad, ya que solamente le está permitido el movimiento en el plano vertical. El funcionamiento del sistema comienza con el movimiento del soporte debido a las vibraciones del suelo, el principio de inercia hace que la masa permanezca un instante en su posición de reposo. Un instante después, la masa deja su posición de reposo y describe un movimiento oscilatorio, que tiene que ser amortiguado para que se asemeje al movimiento del suelo.

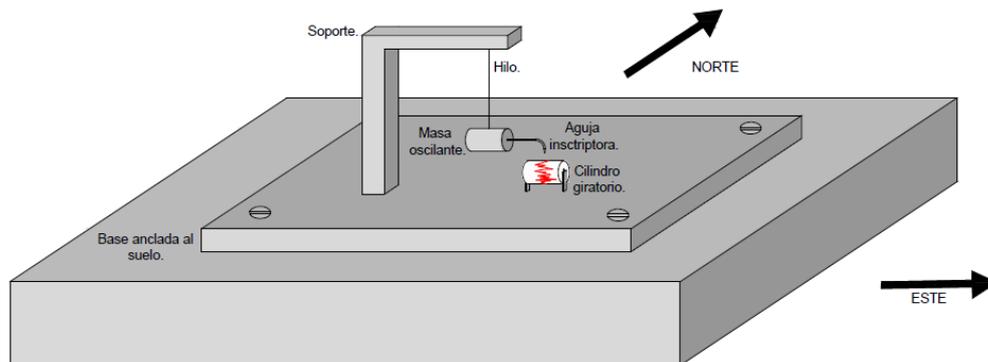
Para el amortiguamiento de la masa, el método utilizado en los sismógrafos verticales hace muchos años era el representado en la **Figura 15**, que consiste en sujetar a la masa oscilante una lámina sumergida en aceite, ya que al ser un líquido denso dificulta el movimiento de la lámina, amortiguando el movimiento de la masa. Este tipo de amortiguamiento sólo se utilizaba en sismógrafos verticales.

El amortiguamiento se utiliza para evitar que el sistema oscile constantemente con su frecuencia natural una vez sacado de su posición de equilibrio, ya que se puede falsificar el registro. Esta falsificación puede ocurrir sobre todo cuando el periodo natural de las ondas registradas coincide con el periodo del péndulo del sismómetro.

El sistema registra el movimiento de componente vertical del suelo, que queda reflejado en el papel que gira a velocidad constante. Este grafo se llama sismograma.

Uno de los primeros tipos de sismógrafo horizontal es el representado en la **Figura 16**, el principio en el que se basa es el mismo al visto anteriormente, una masa suspendida de un soporte gracias a un hilo o cable y a dicha masa unido un sistema inscriptor para

reflejar el movimiento de la masa sobre un papel que gira a velocidad constante. Al temblar la tierra, el péndulo se mantenía estático debido a la gran inercia que producía su masa y se registraba el movimiento de la tierra en el sismograma.



**Figura 16.** Esquema de un sismógrafo horizontal sin amortiguación.

Este sistema, de un grado de libertad, solo puede oscilar en un plano horizontal determinado, igual que en el caso de un reloj. Según la disposición representada en la **Figura 16**, el péndulo está orientado de manera que sólo registra movimientos en la dirección este-oeste. Para poder registrar el movimiento en la dirección norte-sur, habría que girar el sistema  $90^\circ$  sobre el plano horizontal.

El inconveniente de estos primeros péndulos horizontales es que cuando termina el temblor de la tierra, el péndulo comienza a balancearse ligeramente por el principio de inercia. Este balanceo produce que la medida sea errónea. Como solución a este problema se descubrió un sistema de amortiguamiento basado en muelles horizontales que eliminaban la vibración propia del péndulo en el plano horizontal una vez la vibración de la tierra finalizaba. Este sistema fue llamado sismógrafo de Wiechert por su descubridor y hacía posible registrar las ondas del sismo completo. [12]

Un sismógrafo horizontal solo registrará el movimiento del suelo en una única dirección, por lo tanto, si se pretende estudiar el movimiento del suelo por completo, es necesario registrar las tres direcciones del movimiento. Para poder registrar el movimiento del suelo en todas las direcciones, serían necesarios tres aparatos, dos que registren las componentes horizontales, es decir dos sismógrafos horizontales, y uno que registre la componente vertical, el anteriormente explicado sismógrafo vertical.

El método utilizado para amortiguar la masa evolucionó hasta llegar a utilizar imanes y bobinas que producen fuerzas de atracción y repulsión para amortiguar el sistema.

Los sismógrafos también han evolucionado dejando paso a sistemas más complejos que utilizan los campos eléctricos y magnéticos para detectar y transformar la vibración en señales eléctricas. El movimiento de la masa que va acoplada a una bobina y que se mueve con respecto a un campo magnético creado por imanes, genera una corriente eléctrica que a partir de un galvanómetro se amplifica y se registra en un dispositivo electrónico. Estas evoluciones se resumen en amplificaciones de miles de veces el movimiento del suelo y por tanto aparatos más sensibles.

### **2.3.4 Conclusiones.**

Una vez conocido el funcionamiento de los sismógrafos básicos utilizados para detectar vibraciones del suelo, podemos llegar a la conclusión de que nuestro prototipo va a detectar únicamente el tipo de vibraciones o movimientos del suelo que tengan componente horizontal.

Nuestro sistema tiene dos grados de libertad porque no necesita registrar en un papel el movimiento del péndulo. El péndulo está formado por una cámara que capta imágenes de un patrón colocado bajo ella, por lo que se permite el movimiento del péndulo en todas las direcciones del plano horizontal. Al poder moverse libremente en el plano horizontal obtenemos los dos grados de libertad.

## **2.4 Visión por ordenador.**

### **2.4.1 Introducción.**

Si se compara la visión humana y la visión por ordenador, se puede observar que existen algunas similitudes básicas. Ambas necesitan un elemento que actúe de sensor, ya sea el ojo o la cámara, y un procesador de la información que proporcionan sus sensores, como el cerebro y el ordenador.

Una de las aplicaciones que se inició con la aparición de los primeros ordenadores fue la visión artificial. Esta se basa en conseguir un algoritmo que permita utilizar los ordenadores para captar la información de igual manera que lo hace la vista humana. Entre las tecnologías que usan visión por ordenador destacan las de procesamiento de imágenes, generación de gráficos por ordenador y por último el reconocimiento de patrones, utilizado para clasificar un objeto a partir de unas características entre un conjunto de candidatos.

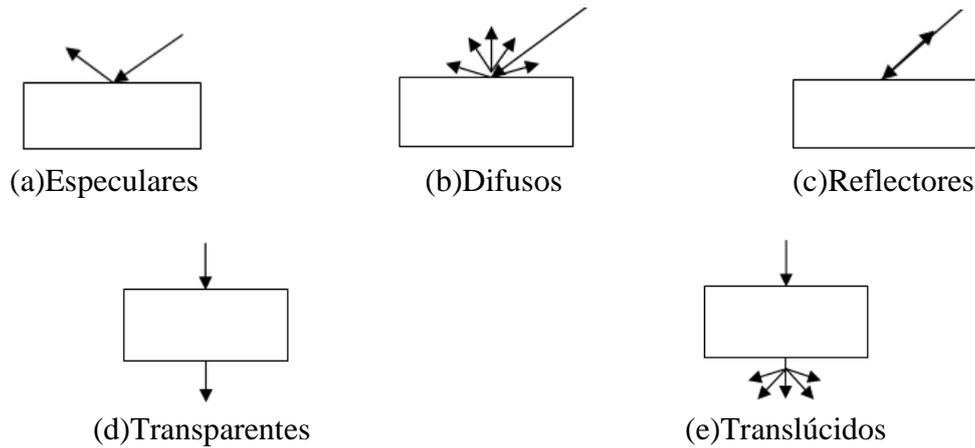
A la hora de desarrollar una aplicación basada en la visión por ordenador, es necesario pasar por dos etapas. La primera etapa es denominada visión de bajo nivel, el objetivo es conseguir toda la información posible del objeto observado a partir de la imagen obtenida por la cámara (colores, formas, texturas). En la segunda etapa o etapa de visión de alto nivel se obtienen descripciones más explícitas del objeto a partir de las características obtenidas en el primer nivel (análisis de forma o localización de objetos).

Además, hay que tener en cuenta los elementos necesarios para poder obtener una imagen en el ordenador. Estos elementos son básicamente una iluminación, una cámara conectada al ordenador y una tarjeta de adquisición y procesamiento de imágenes. [13]

### **2.4.2. Iluminación.**

El primer paso necesario para obtener una imagen es que el objeto esté iluminado. El objetivo de esta iluminación es resaltar los detalles del objeto que se quieran ver en la imagen, como el tamaño y la forma. El control de la iluminación también garantiza que la cámara capte los objetos siempre con la misma intensidad de luz. Es conveniente dedicar tiempo y esfuerzo en mejorar las condiciones luminosas.

Para estudiar la iluminación necesaria para trabajar, se deben tener en cuenta las propiedades de los objetos cuando un haz luminoso incide sobre él. En la **Figura 17** se pueden ver los tipos de propiedades de los objetos con respecto a la luz.



**Figura 17.** Diversas propiedades de los materiales

**Propiedades reflexivas:** dependiendo de cómo se refleje el haz de luz se tienen los siguientes materiales:

- Materiales especulares (a): el ángulo del rayo reflejado es igual al ángulo con el que incide el haz luminoso.
- Materiales difusos (b): los rayos reflejados lo hacen en cualquier dirección.
- Materiales reflectores (c): el rayo se refleja en la misma dirección pero en sentido opuesto al incidente.

**Propiedades absorbentes:** Según como se absorba la luz se pueden distinguir entre materiales selectivos o no al espectro. Esto es debido a que existen materiales que absorben la luz de algunas longitudes de onda pero no absorben las de otras. Un material que absorba toda la luz para todas las longitudes de onda es de color negro y si no absorbe ninguna es de color blanco.

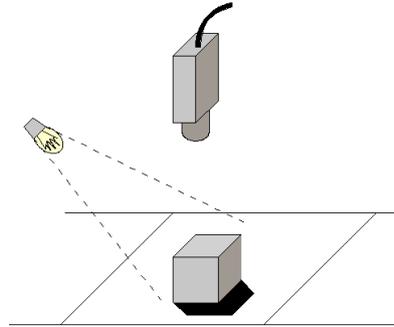
**Propiedades de transmisibilidad:** Una vez la luz atraviesa el material, dependiendo de cómo lo hagan se tienen:

- Materiales transparentes (d): la luz pasa sin ser absorbida o reflejada.
- Materiales translucidos (e): la luz atraviesa el material pero de forma difusa.

#### 2.4.2.1 Tipos de iluminación.

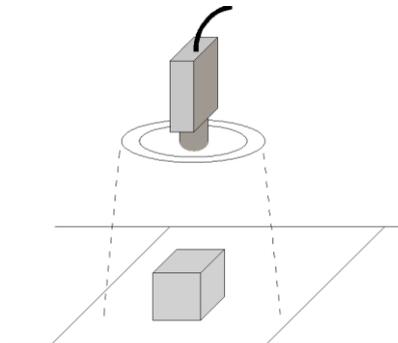
Existen distintos tipos de iluminación según esté colocada la fuente de luz con respecto al objeto y a la cámara. Destacan la iluminación direccional, la iluminación difusa y la iluminación a contraluz, debido a que son las iluminaciones más sencillas de incluir en el prototipo y que mejores resultados pueden dar.

**Iluminación direccional:** Consiste en aplicar una iluminación orientada al objeto usando un haz de luz inclinado como el de la **Figura 18**. Se utiliza en aplicaciones como localización y reconocimiento de piezas, o inspección de la superficie de los objetos.



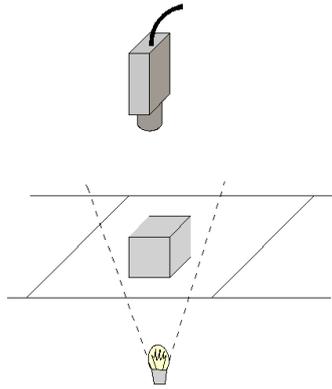
**Figura 18.** Disposición iluminación direccional.

**Iluminación difusa:** Con este tipo de iluminación se intenta que los haces luminosos incidan sobre el objeto desde todas las direcciones para así obtener una iluminación homogénea y equitativa, como se puede ver en la **Figura 19**. Se utilizan cuando se necesita tomar imágenes desde diversos puntos de vista. Proporciona el mínimo contraste del objeto, debido a la ausencia de sombras.



**Figura 19.** Disposición iluminación difusa.

**Iluminación a contraluz:** consiste en iluminar el objeto por detrás de forma que la fuente luminosa, el objeto y la cámara estén alineados (**Figura 20**). Esta iluminación produce imágenes prácticamente con sólo dos niveles de gris (imágenes binarias). Esta técnica se utiliza para aplicaciones donde la silueta de los objetos es suficiente para su reconocimiento. El principal inconveniente es la pérdida de todos los detalles.



**Figura 20.** Disposición iluminación a contraluz.

Otro tipo de iluminación existente es la iluminación oblicua, que es una variación de la iluminación direccional. Por último también está la iluminación estructurada, que se sirve de la proyección de puntos, franjas o rejillas sobre la superficie de trabajo y posee como ventaja que se simplifica el problema de la detección de la pieza a estudiar.

#### **2.4.2.2 Fuentes de luz.**

Cada tipo de fuente de luz tiene unas propiedades que pueden beneficiar o perjudicar el trabajo de captación de imágenes. Una de las propiedades perjudiciales de las fuentes de luz es el parpadeo que se produce al estar encendidas. Todas las fuentes de luz que se alimentan de corriente alterna parpadean debido a la fluctuación de la tensión de salida que va de valor positivo a negativo como una onda sinusoidal.

El parpadeo de la luz o también llamado el efecto estroboscópico aparece en casi todas las fuentes de luz artificial, aunque no siempre puede detectarlo nuestro ojo. Las cámaras captan el momento donde el voltaje pasa por cero y cambia la polaridad. Este cambio de polaridad ocurre en un breve instante de tiempo donde disminuye la intensidad luminosa del foco hasta apagarse completamente y comienza a iluminarse de nuevo.

**Fuentes incandescentes:** producen luz a partir de la energía del calor, el ejemplo más conocido son las bombillas. Estas luces presentan un coste bajo, son fáciles de usar, pueden estar funcionando durante largos periodos de tiempo y presentan la posibilidad de modificar su intensidad.

Como inconveniente principal está en que parpadean, aunque la persistencia térmica enmascara los efectos del parpadeo. El parpadeo se produce a una frecuencia que el ojo humano no puede detectar pero una cámara de alto nivel sí. Otros inconvenientes para utilizar esta iluminación es que emite un espectro de luz reducido donde no se emite la zona del espectro de colores fríos y que produce una gran cantidad de calor al estar encendida.

**Fluorescentes:** Son fuentes de luz muy eficientes que se caracterizan porque no generan calor. Hoy en día se pueden encontrar en el mercado fluorescentes de distintos tamaños, formas y colores. Estas fuentes de luz son muy utilizadas en iluminación difusa.

El principal inconveniente es el efecto de parpadeo que produce al trabajar con corriente alterna, que hace que el tubo se encienda y se apague alrededor de 50 veces por segundo (50 Hz). Esta frecuencia hace posible detectar ocasionalmente el parpadeo de la luz a través de nuestros ojos y la detección del parpadeo en prácticamente cualquier aplicación que utilice una cámara.

**Diodos LED:** Los LED proporcionan una luz monocroma disponible en gran variedad de colores. La iluminación LED permite crear cualquier espectro de luz, por lo que se pueden crear sistemas de iluminación beneficiosos para mejorar la calidad con la que se perciben las cosas. Tienen un periodo de vida largo y un coste muy bajo, pero alcanzan una intensidad de iluminación bastante pequeña (aunque en la actualidad se están consiguiendo fuentes de luz tipo LED de gran potencia). Suelen ser utilizados en iluminación a contraluz e iluminación difusa.

El principal inconveniente de esta iluminación es el parpadeo que se puede producir mientras está funcionando. A diferencia de las iluminaciones incandescentes y fluorescentes que se alimentaban con corriente alterna, la iluminación LED se alimenta con corriente continua. La corriente continua no produce la fluctuación de la tensión pasando de valores positivos a negativos en forma de onda sinusoidal. El parpadeo de un LED se produce porque las fuentes de corriente continua no funcionan de manera lineal, sufren una pequeña perturbación al transformar la corriente alterna en corriente continua que en eléctrica se suele llamar rizado. Este rizado es el componente de la corriente alterna que queda tras rectificarse la señal a una corriente continua. El valor de tensión que hay entre la tensión máxima y la tensión mínima de una señal continua se llama tensión pico a pico ( $V_{pp}$ ). El parpadeo producido en la iluminación LED viene producido por esa pequeña diferencia de tensión que le llega al sistema de iluminación y normalmente se produce a frecuencias superiores a 200Hz.

No obstante, aunque en este tipo de iluminación se produzca un parpadeo, comparándolo con el que se produce en la iluminación incandescente y en los fluorescentes hacen que el LED sea un sistema de iluminación adecuado para un sistema de visión por ordenador.

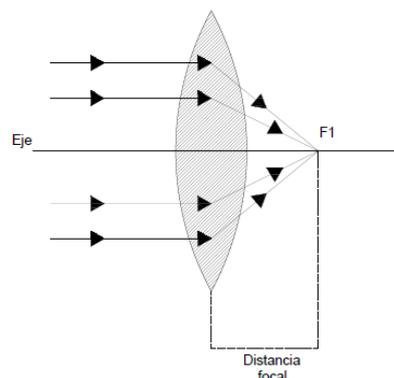
Además de los tipos de iluminación explicados, se encuentra por un lado la luz estroboscópica, utilizada por la posibilidad de emitir una serie de destellos consecutivos. Por otro lado también se encuentra la iluminación laser, utilizada debido a que proporciona una fuente de luz que permite tomar medidas tridimensionales y puede generar una gran variedad de patrones de luz.

### 2.4.3 Óptica.

En este proyecto se utiliza una cámara conectada al ordenador para trabajar con imágenes e intentar detectar las vibraciones de la superficie. Es necesario tener unos conocimientos previos sobre la óptica y los parámetros más importantes que van a influir a la hora de captar una imagen con la calidad necesaria para poder utilizarla.

En primer lugar la óptica estudia la interacción de la luz con otras materias y la formación de imágenes. La función de la óptica de una cámara es la de captar los rayos luminosos y concentrarlos sobre el sensor de la cámara. La elección de una óptica u otra influirá en la calidad y el tamaño con la que la cámara capta los objetos. A continuación se explican los principales parámetros a tener en cuenta a la hora de usar una lente y su utilización en el proceso de obtención de imágenes.

Cuando determinados rayos paralelos pasan a través de una lente convexa, convergen todos coincidiendo en un punto que se denomina punto focal. La distancia entre el eje de la lente utilizada y el punto focal  $F_1$  se denomina distancia focal  $f$ , como se puede ver en la **Figura 21**. Este parámetro es fundamental a la hora de calcular la posición y el tamaño de los objetos en la imagen.



**Figura 21.** Ejemplo de la distancia focal en lente convexa.

Otro valor importante en la óptica es el número  $F$ . Indica la relación entre la distancia focal  $f$  y el diámetro del diafragma  $D$ :

$$F = \frac{f}{D}$$

Este parámetro indica la cantidad de luz que se deja pasar por el objetivo. Para un valor de  $F$  menor, significa mayor diámetro y por lo tanto mayor luminosidad. El valor mínimo de  $F$  indica la máxima cantidad de luz que puede atravesar la óptica y que tendrá que estar en concordancia con la sensibilidad de la cámara.

Otro parámetro importante es el enfoque, que consiste en hacer que los rayos de luz que inciden en la cámara coincidan con el foco, que a su vez debe coincidir con el sensor de la cámara.

El último parámetro a tener en cuenta en la óptica se llama factor de magnificación  $M$ , que indica lo grande que se verá un objeto en la imagen con respecto al tamaño del objeto en la realidad.

$$M = \frac{p}{P}$$

Siendo  $p$  el tamaño del objeto en la imagen obtenida y  $P$  el tamaño del objeto en la realidad.

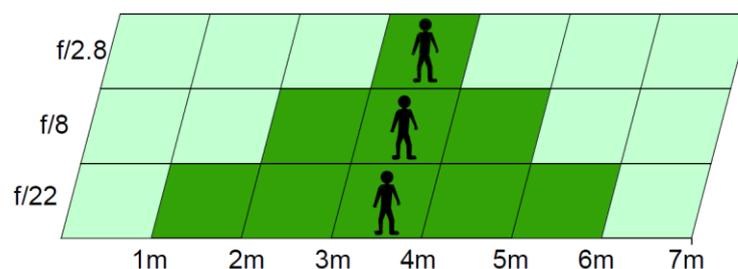
### 2.4.3.1 Ópticas tipo zoom.

Este tipo de ópticas permite cambiar la distancia focal mientras la imagen sigue bien enfocada. Para ello se tienen dos lentes, con la primera se modifica el tamaño de la imagen, por lo que cambiaría el factor de magnificación y la distancia focal, y con la segunda se consigue enfocar correctamente la imagen. A la primera lente se le denomina variador y a la segunda compensador.

### 2.4.3.2 Profundidad de campo y distancia hiperfocal.

En teoría, únicamente estará bien enfocado un plano si está situado a determinada distancia de la lente, aunque si el objeto tiene profundidad, su imagen aparece enfocada dentro de un cierto margen. Por lo tanto, si un objeto se encuentra fuera de foco pero sólo por una pequeña distancia, el desenfoque en la imagen es indetectable y esta aparece nítida. Este efecto se define como círculo de confusión permisible. El margen de error donde el desenfoque de la imagen es menor que el círculo de confusión permisible se llama profundidad de campo.

Para variar la profundidad de campo se utilizan los denominados diafragmas (**Figura 22**), que son unas placas con orificios que se interponen entre la lente y los haces de luz, por lo que permite modificar la intensidad de luz con la que trabajar. También se puede modificar la profundidad de campo modificando la distancia focal (zoom), y la distancia real entre la cámara y el punto que está bien enfocado.

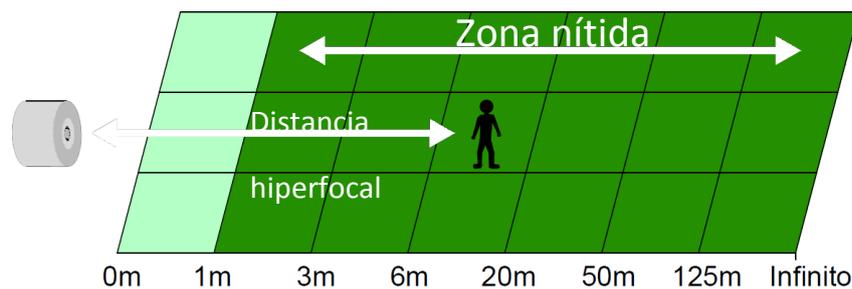


**Figura 22.** Ejemplo como aumenta la profundidad de campo (área verde) según disminuye la apertura del diafragma. [14]

Las características más destacadas de la profundidad de campo son las siguientes:

- Al aumentar el número F (al aumentar la relación entre la distancia focal y el diámetro del diafragma o dicho de otra manera, al cerrar el diafragma) aumenta la profundidad de campo.
- Menores distancias focales dan mayores profundidades de campo.
- Cuanta mayor sea la distancia al objeto enfocado se obtiene una mayor profundidad de campo.
- La profundidad de campo es mayor por detrás que por delante del objeto enfocado.

La distancia hiperfocal es la distancia de enfoque en la que se consigue la mayor profundidad de campo, es decir se obtiene una zona nítida que se extiende desde la mitad de la distancia hiperfocal hasta el infinito, como se puede ver en la **Figura 23**. Enfocar la imagen dentro de esta distancia ayudará a obtener la máxima nitidez en las fotografías.



**Figura 23.** Representación distancia hiperfocal y zona nítida.

#### 2.4.4 Imágenes digitales.

El concepto de imagen está asociado a una función bidimensional  $f(x, y)$ , que normalmente forma una matriz numérica, empleando bits cuyo valor será 0 o 1. Una imagen digital tiene una estructura basada en el lenguaje binario que los programas informáticos utilizan para procesar la información [14]. En una imagen digital, se está viendo una imagen que ha sido transformada mediante un proceso de decodificación electrónica binaria a un conjunto de pequeños píxeles ordenados en una malla reticular ortogonal.

#### **2.4.4.1 Muestreo espacial y niveles de gris.**

Dependiendo del número de variables que tenga la malla que forma la imagen digital, puede ser una función unidimensional o bidimensional (como las imágenes) y dependiendo de las dimensiones de la función pueden ser escalares (por ejemplo una imagen de niveles de gris) o vectoriales (por ejemplo una imagen RGB de 3 componentes).

La digitalización de las coordenadas espaciales (x, y) está asociada al concepto de muestreo. El muestreo es la conversión que sufren las dos dimensiones espaciales (ancho y largo de la imagen) de la señal analógica y que genera la noción de pixel. Una imagen se divide en un número determinado de píxeles según la resolución que tenga.

La cuantificación es la conversión que sufre la amplitud o valor de la señal analógica, tomando un valor dentro de una escala (color). La salida que produce el proceso de cuantificación puede ser de un único valor (escala de grises) o un vector de tres valores cada pixel (Espacio RGB). Para el caso de tener 256 niveles de gris (valores 0-255), el 0 corresponde al color negro, y el nivel 255 al blanco.

La resolución de una imagen va relacionada con el número píxeles (resolución espacial) y el número de niveles de gris (resolución de intensidad) necesarios para que la imagen digital se aproxime lo máximo posible a la original. Al aumentar el número de píxeles y el número de grises que puede tomar la imagen se dice que ha aumentado la resolución de la imagen.

Además de la resolución de la imagen, también hay que tener en cuenta el histograma de una imagen, este histograma cuantifica el número de píxeles que tiene el mismo nivel de gris. Un histograma es útil para las tareas de análisis de imágenes, ya que indica por ejemplo las características de luminosidad de la imagen. El inconveniente es que no aporta ninguna información sobre la localización espacial de los píxeles.

#### **2.4.4.2 Color.**

El color es una de las características más importantes que definen a los objetos y prácticamente la totalidad de las imágenes digitales con las que se trabaja hoy en día son imágenes a color.

Algunas definiciones básicas para comprender los espacios de colores son:

- Brillo: sensación que indica si un área está más o menos iluminada.
- Tono: sensación que indica si un área parece similar al rojo, amarillo, verde o azul o a alguna proporción de dos de ellos.
- Coloración: sensación por la que un área tiene un mayor o menor tono.

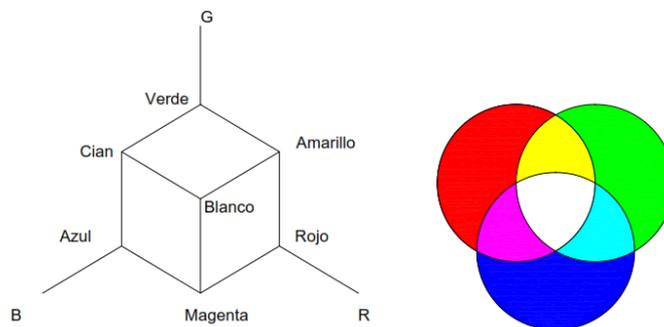
- Luminosidad: brillo de una zona respecto a otra blanca en la imagen.
- Croma: relación entre la intensidad de color de un área respecto al brillo de un blanco de referencia.
- Saturación: intensidad o grado de pureza de un color.

Los principales parámetros que permiten percibir el color son la luminosidad, el tono y la saturación. Un espacio de color es un método por el que se puede especificar, crear o visualizar cualquier color. Dependiendo del tipo de sensor y su aplicación se han desarrollado diversos espacios de colores, como el espacio RGB (Red, Green, Blue) y el espacio HSI (Hue, Saturation, Intensity) entre otros. Cabe destacar el espacio RGB ya que es el más conocido y más utilizado.

### 2.4.4.3 Espacio RGB.

El espacio RGB es el espacio de trabajo más utilizado en las imágenes de mapas de bits que se pueden ver en pantallas y monitores de ordenador. Se basa en la combinación de tres señales que se corresponde cada una a un color primario: el rojo, el verde y el azul (Red, Green, Blue) (**Figura 24**). Cada píxel está compuesto por una determinada cantidad de rojo, verde y azul. Cada color tiene una intensidad que se mide en una escala de 0 a 255, siendo 0 la mínima intensidad de color y 255 la máxima.

Los colores en RGB se expresan del siguiente modo, un paréntesis con tres cifras separadas por comas. Cada cifra corresponde a la intensidad de cada color. La primera cifra corresponde al color rojo, la segunda al verde y la tercera al azul, de la forma (R, G, B). Si un color está expresado de la siguiente forma: (255, 0, 0), se sabe que se refiere al color rojo puro. Si se quiere representar el color negro de esta manera se utiliza el valor mínimo de intensidad para cada uno de los tres colores (0, 0, 0). Para el color blanco se utiliza la intensidad máxima de cada color (255, 255, 255).



**Figura 24.** Representación del espacio de colores RGB.

## **3. Desarrollo del prototipo**

### **3.1 Fabricación y diseño del prototipo.**

#### **3.1.1 Introducción.**

El prototipo del detector de vibraciones basado en el efecto moiré es un sistema físicamente similar al sistema utilizado en los sismógrafos horizontales. El funcionamiento de estos sismógrafos consiste en una masa suspendida de un hilo que se deja oscilar en el plano horizontal. Gracias al principio de inercia se puede detectar la vibración de la superficie y registrarla.

En nuestro prototipo la masa que está suspendida es una cámara de alto nivel conectada a un ordenador que registrará el movimiento de un patrón de líneas con respecto a la cámara a partir de un programa informático. El péndulo debe mantenerse completamente inmóvil o tener el mínimo movimiento posible para poder detectar las vibraciones que se produzcan en el patrón de líneas que está captando la cámara. Para que se cumpla el principio de inercia necesitamos que nuestro sistema venza las fuerzas externas que puedan aplicarse sobre él, ya sean vibraciones, rotaciones del entorno o fuerzas involuntarias.

Para conseguir un sistema con movimiento independiente, es necesario un diseño donde el péndulo tenga la masa suficiente para evitar movimientos significativos ante pequeñas fuerzas que pueden incidir sobre él (por ejemplo corrientes de aire al acercarse o pasar junto a él). Un sistema pesado también es importante para evitar las posibles limitaciones en el movimiento que pueden provocar los demás elementos del sistema (cables, elementos de sujeción y fijación al techo, etc). Si se consiguiera un sistema totalmente independiente del entorno, en un futuro se podría utilizar nuestro sistema basado en el efecto moiré para detectar otro tipo de movimientos, como la rotación de la tierra, ya que el péndulo mantendría su posición mientras que el resto del planeta gira.

Para realizar la investigación, el prototipo de detector de vibraciones ha sido instalado en uno de los laboratorios disponibles en el edificio ELDI de la Universidad Politécnica de Cartagena. El dispositivo se ha fijado a un techo de hormigón de una altura de 5 metros a través de un sistema de fijación de mosquetón con quita vueltas. Unido a este sistema a partir de una cadena, colgará nuestro péndulo.

El objetivo a la hora de construir este prototipo es obtener un sistema que se pueda utilizar en el futuro para ampliar la investigación de la detección de vibraciones gracias al efecto moiré. Por lo tanto, el objetivo es construir un prototipo lo suficientemente robusto y de funcionamiento sencillo con el que poder trabajar más adelante sin tener que modificar muchos elementos del sistema ni volver a instalarlo en el laboratorio.

A continuación, se van a describir individualmente los elementos que forman el sistema de detección de vibraciones basado en el efecto moiré. Al basarse en el sistema de un péndulo, el sistema es simple y se reduce a una masa suspendida del techo.

### **3.1.2 Cámara.**

Para este trabajo se necesitaba una cámara de cierto nivel que pudiera ofrecernos una imagen con una calidad superior a la cámara del portátil donde se había probado inicialmente el programa desarrollado.

La cámara es el elemento fundamental, es la que nos va a proporcionar las imágenes con las que trabaja el programa desarrollado en el ordenador. Esta cámara estará conectada al ordenador a partir de un cable de datos.

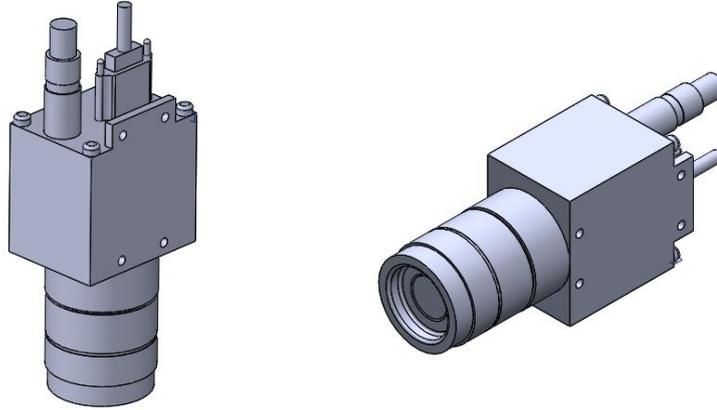
En nuestro prototipo la cámara será el elemento oscilante en lugar de la masa que normalmente utilizan los sistemas del péndulo. Esta cámara estará orientada hacia abajo para captar imágenes de las láminas con patrones de líneas que se colocaran en el suelo o sobre una determinada superficie. La cámara está fijada dentro de una carcasa de acero a la que se sujeta una cadena que se utiliza para colgar la cámara del techo.

La cámara utilizada en nuestro prototipo es una cámara de la marca IDS (Imaging Development Systems GmbH). IDS es una empresa alemana que se dedica a la fabricación de cámaras industriales USB3.0 o GigE. Estas cámaras se utilizan en ingeniería industrial para la construcción de equipos, instalaciones y máquinas de sectores como la automoción, el envase y el embalaje y la industria gráfica.

El modelo del que disponemos es el 6230-SE, para controlar este modelo y todas las cámaras de esta marca, es necesario disponer de los programas que la empresa proporciona para utilizar la cámara desde nuestro ordenador. Necesitamos tener instalado en nuestro ordenador los siguientes programas: el IDS Camera Manager y el uEye Cockpit. Estos programas se pueden obtener desde la propia página web de la empresa.

La cámara es alimentada a 12V y está equipada con un objetivo de la marca Infaimon. Este objetivo dispone de una óptica estándar de distancia focal de 12mm y una apertura F de 1.4.

En las **Figuras 25 y 26** se pueden ver dos vistas de la cámara utilizada en el prototipo, dibujada con el programa de diseño en 3D SolidWorks.

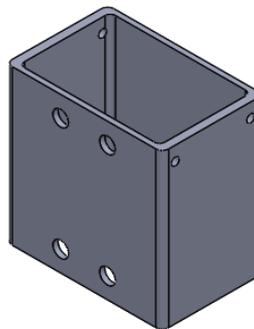


**Figuras 25 y 26.** Cámara del prototipo dibujada en 3D

La cámara viene de serie con cuatro orificios de métrica 3 para poder atornillarla a un soporte. Estos orificios los utilizamos para fijar la cámara a la carcasa donde se enganchará la cadena que sujeta el péndulo. En las **Figuras 25 y 26** se han incluido el inicio de las conexiones entre los cables y la cámara, ya que la cámara necesita dos cables. Estos cables son uno de alimentación que tiene que ir conectado a la corriente y otro de datos que conectamos al ordenador para trabajar con las imágenes que capta la cámara. Más adelante se expondrán los problemas que han ocasionado los cables a la hora de conseguir un correcto funcionamiento del prototipo y las soluciones adoptadas.

### **3.1.3 Carcasa.**

La función de este elemento es unir la cámara con la cadena utilizada para colgar la cámara del techo. Este elemento es necesario debido a que la cámara no podía ser sujeta de manera equilibrada y segura directamente a la cadena. Por lo tanto se ha tenido que diseñar y fabricar una carcasa para poder unir la cámara a la cadena de manera que tengamos un agarre seguro, fijo y equilibrado. La carcasa diseñada y fabricada puede ver en la **Figura 27**.



**Figura 27.** Carcasa del prototipo dibujada en 3D.

Esta carcasa ha sido fabricada a partir un perfil de acero de 3 mm de espesor y tiene unas medidas que permiten envolver perfectamente a la cámara, haciendo que la cámara encaje dentro de la carcasa, obteniendo así un péndulo que ocupa un volumen mínimo. Como se puede observar en la **Figura 27**, a la carcasa se le han realizado una serie de perforaciones que permiten unir la carcasa a la cámara y unir el conjunto carcasa cámara a la cadena que está sujeta al techo.

Los agujeros de mayor diámetro hechos sobre la cara más ancha de la carcasa, coinciden con los agujeros que tiene la cámara, para así fijar la cámara a la carcasa a partir de tornillos de métrica 3. La distribución de los agujeros coincide exactamente con los agujeros de la cámara y además se encuentran centrados en la superficie de la carcasa para que la cámara quede fijada exactamente en el punto medio de la carcasa. Este es un detalle muy importante ya que si la cámara estuviera desplazada hacia un lado o ligeramente torcida con respecto al centro de la carcasa, al estar colgada del techo, la cámara no estaría apuntando exactamente hacia un punto completamente vertical.

Los agujeros de menor diámetro se han hecho para sujetar a partir de cuatro puntos la carcasa a la cadena que cuelga del techo, estos puntos de sujeción se encuentran en las esquinas superiores de la superficie más estrecha de la carcasa. A cada uno de estos agujeros se les ha colocado una cadena que finalmente se unen en un eslabón de mayor diámetro

A la hora del diseño de la carcasa, el hecho de utilizar un perfil de acero proporciona al montaje del péndulo cierta masa que puede ayudar al correcto funcionamiento del sistema, ya que el peso de la cámara no es muy significativo. El peso que nos proporciona la carcasa ayuda a que la cámara se encuentre equilibrada y completamente alineada con la vertical, ya que este peso vence a la posible interferencia que inicialmente producían los cables de conexión de la cámara debido a su rigidez.

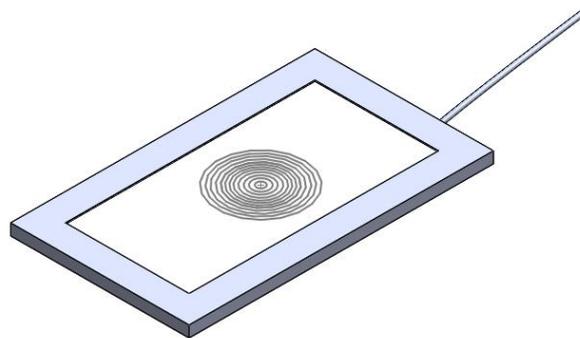
También se puede estudiar en un futuro la posibilidad de añadir a esta carcasa un peso adicional, con el objetivo de mejorar la eficiencia del sistema de detección de vibraciones. Para realizar este aumento de peso existen varias opciones, como por ejemplo fijar a la carcasa de manera equitativa y equilibrada bloques de plomo, que aumentarían la masa del péndulo de manera considerable.

Como ha quedado recogido, la masa no va a influir en el comportamiento del péndulo. Por lo tanto el único beneficio de aumentar la masa de la carcasa es la de luchar contra la interferencia de los cables de la cámara y el de evitar un movimiento significativo ante pequeñas fuerzas que inciden sobre el péndulo (como corrientes de aire, por ejemplo).

### 3.1.4 Sistema de iluminación.

La iluminación más adecuada a nuestro sistema es una iluminación a contraluz. Esta iluminación se basa en proporcionar una luz equitativa a un objeto desde un punto por debajo de este objeto, puede ser una bombilla, un conjunto de fluorescentes o una pantalla de luces leds. Esta iluminación resaltará las líneas de los patrones de las láminas de acetato que colocaremos encima obteniendo así un gran contraste entre las zonas claras y oscuras.

El sistema de iluminación está formado por una pantalla de LED de la marca Infamon. En la **Figura 28** se puede ver la pantalla de iluminación dibujada en 3D con el programa SolidWorks. La pantalla se alimenta a través de una fuente de alimentación que le proporciona 24 voltios de tensión. Esta fuente de alimentación permite alimentar a la pantalla LED con una tensión constante sin fluctuaciones de tensión, reduciendo el posible parpadeo producido por una variación de la tensión de alimentación. La iluminación LED proporciona una iluminación de luz blanco neutro. Esta iluminación hace que se distingan las líneas de los patrones que colocamos sobre ella de manera nítida y con gran contraste entre los espacios transparentes que la cámara captará de color blanco y las líneas negras de los patrones.



**Figura 28.** Sistema de iluminación del prototipo dibujada en 3D

### 3.1.5 Elemento de suspensión.

Para suspender la cámara al techo en forma de péndulo, se necesita un elemento capaz de sujetar la cámara de manera permanente y que permita el movimiento oscilatorio que realiza la cámara.

El elemento utilizado para colgar la cámara del techo es cadena de acero galvanizado de eslabones de 17 mm de longitud. Esta cadena de acero ofrece unas características mecánicas que proporcionan seguridad y durabilidad al sistema de suspensión de la cámara. En la **Figura 29** se puede ver la reproducción en 3D de uno de los eslabones de la cadena.



(a)



(b)

**Figuras 29 y 30.** Eslabon de la cadena (a) y sistema de sujeción de la cámara(b).

Para unir la cadena de acero al techo, se ha instalado en el techo del laboratorio una argolla y un mosqueton con quita vueltas. A este mosqueton se le unirá la cadena de la que colgará la cámara.

En la **Figura 30** se puede ver el sistema utilizado para sujetar la cámara a la cadena que está unida al techo. El sistema consiste en la unión de cuatro tramos de cadena a la carcasa que sostiene la cámara. Cada uno de los tramos va a uno de los orificios realizados en cada esquina de la carcasa, proporcionando así una sujeción equilibrada y compensada de la cámara. Para unir estos cuatro tramos de cadena a la cadena principal que cuelga del mosqueton, nos hemos ayudado de una argolla de 4 mm de diametro que permite que colocar las cadenas de manera que no se solapen.

Como resultado, con el sistema de sujeción formado por el mosquetón con quita vueltas unido al techo, la cadena de acero principal y el conjunto de cuatro tramos de cadena unidos a la carcasa, obtenemos un sistema robusto y eficaz que ofrece una sujeción equilibrada, completamente vertical y que permite la oscilacion libre del pendulo.

### **3.1.6 Láminas de patrones de moiré.**

Nuestro prototipo va a detectar si se ha producido alguna vibración o movimiento en la lámina de patrones observada por nuestra cámara. Para ello la cámara toma imágenes de esta lámina de patrones y compara esta imagen con otra de la misma lámina pero tomada en otro instante de tiempo posterior.

Los patrones que forman interferencias de moiré se pueden obtener de distintas fuentes. En el inicio del trabajo, los patrones que utilizábamos para comprobar el correcto funcionamiento del sistema eran los patrones de la página web de Amidror (como el de la **Figura 31**). La página web donde están disponibles estas plantillas de patrones es la siguiente:

<http://lspwww.epfl.ch/publications/books/moire/figs1.html>

Debido al diseño de nuestro prototipo, donde el sistema de iluminación es a contraluz, los patrones de moiré no podían estar plasmados sobre un papel ya que la luz no atravesaría totalmente el papel y la cámara no captaría de manera precisa los patrones. La solución adoptada es plasmar los patrones de moiré sobre láminas de acetato que dejan pasar la luz a través de ellas, consiguiendo así unas imágenes de calidad óptima.

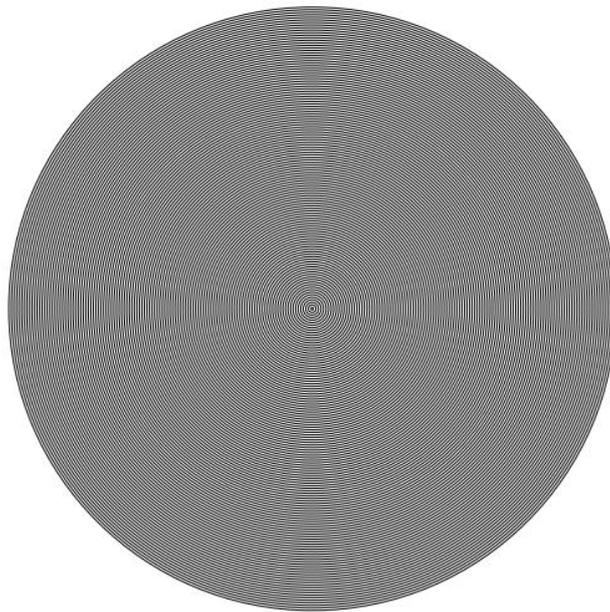


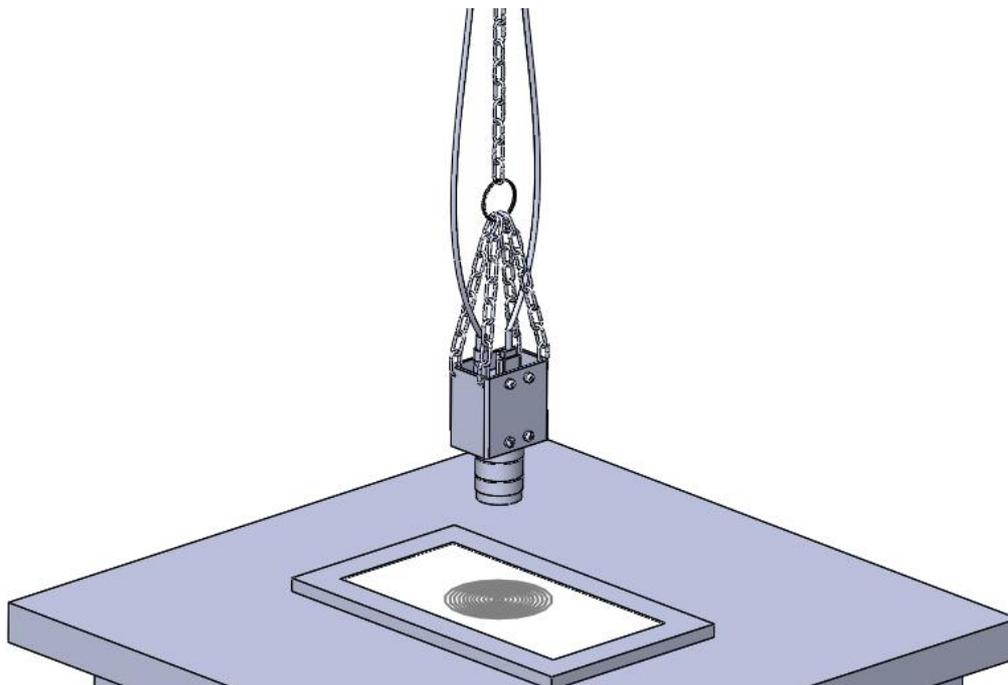
Figure **circ2** from the Moiré Demonstration Kit  
accompanying the book: *The Theory of the Moiré Phenomenon*  
by I. Amidror, published by Kluwer Academic Publishers, 1999.

**Figura 31.** Ejemplo de patrón de círculos concéntricos de Amidror.

### **3.1.7. Colocación, montaje e instalación del prototipo.**

Una vez se tienen todos los elementos que forman el prototipo, se produce el montaje en el laboratorio. El principal objetivo del montaje es colocar el sistema de manera lo más independiente posible del resto del laboratorio, para así obtener un péndulo sin movimientos indeseados. Una vez instalado el prototipo, la manipulación que debe sufrir el sistema es mínima para no alterar el estado de reposo absoluto que debe tener el péndulo.

En la **Figura 32** se puede ver una imagen de la parte principal del ensamblaje de nuestro prototipo realizado a partir del programa SolidWorks. A la argolla con el mosquetón quita vueltas que ha sido instalada en el techo del laboratorio, unimos la cadena de acero. En el otro extremo de la cadena irá unido el conjunto de carcasa y cámara con el sistema de unión de cuatro cadenas a la cadena principal. Justo debajo de la vertical del péndulo se ha colocado sobre una mesa el conjunto de pantalla de iluminación LED y la plantilla de patrones (que se coloca concéntrica y alineada con el objetivo de la cámara). También se pueden ver en la **Figura 32** los cables de conexión de la cámara con el ordenador y para la alimentación. Estos cables están sujetos a otra argolla independiente colocada también en el techo para que si sufren algún movimiento indeseado no se transmita a la cadena, y por lo tanto no perturben el equilibrio del péndulo.



**Figura 32.** Representación del sistema de detección de vibraciones montado en 3D.

Una vez el sistema ha sido instalado en el laboratorio, para comenzar a trabajar en la detección de vibraciones es necesario que el péndulo se quede completamente quieto. El péndulo se tiene que estabilizar y dejar de oscilar una vez se coloquen todos los elementos y se deje de manipular el sistema.

## 3.2 Mejoras del diseño.

A la hora de realizar este prototipo, había que tener en cuenta un conjunto de detalles indispensables para que el péndulo funcionara de manera correcta.

Uno de los objetivos más importantes de nuestro prototipo era el de garantizar el movimiento totalmente libre del péndulo. En nuestro trabajo la masa que oscila es una cámara conectada con cables que cuelga del techo.

El elemento oscilante de nuestro prototipo es la cámara IDS colgada apuntando hacia abajo, donde estará colocada la plantilla de patrones. Esta cámara no es una cámara inalámbrica, necesita dos cables para su funcionamiento, el de alimentación y el cable de conexión al ordenador a través de un puerto Ethernet.

El problema que se ha presentado para conseguir la oscilación libre es la rigidez de los cables utilizados. Estos cables aportan una rigidez al sistema que no permitía que este alcanzara el estado de reposo ni oscilara de manera libre. Uno de los objetivos a la hora de montar este prototipo es el de eliminar la interferencia en el sistema que produce el cable de datos. El sistema debe ser lo más independiente posible con respecto al entorno, por lo que un cable rígido que dificulta el movimiento del péndulo es un elemento problemático. Para conseguir un correcto funcionamiento del prototipo a la hora de detectar vibraciones y movimientos, el péndulo debe estar completamente quieto y a su vez sin ningún elemento que le impida que se mueva libremente en cualquier dirección del plano horizontal.

Las opciones para solucionar este problema eran las siguientes: modificar el cable de datos inicial o sustituirlo por otro menos rígido. La primera opción era eliminar la rigidez del cable inicial quitándole el recubrimiento que llevaba el cable. La segunda opción era sustituir el cable de datos inicial por un cable que fuera más flexible y no aportara tanta rigidez al sistema.

La opción elegida ha sido sustituir el cable inicial por un cable Ethernet de 10 metros de las mismas características técnicas pero con un recubrimiento más blando y manejable que elimine la rigidez del sistema. Esta solución es solo temporal dado que en un futuro se estudiará la manera de utilizar la conexión de la cámara y el ordenador de manera inalámbrica, opción que mejoraría mucho el prototipo dado que eliminaríamos por completo el problema de la interferencia de los cables.

Respecto a las láminas de patrones, a lo largo del proyecto se han producido cambios en las láminas de patrones debido a que nuestro prototipo podía captar patrones de líneas de dimensiones menores a las de Amidror. Al tener una cámara de gran calidad y que produce un gran aumento de la imagen con muy buena resolución, las líneas que en realidad están a menos de un milímetro de diferencia, en la imagen que capta la cámara se ven muy separadas, por lo tanto se está perdiendo sensibilidad en la medida.

Al poder captar de manera eficiente patrones de líneas con espaciado y grosores de líneas menores, se decidió mejorar las láminas de patrones que utilizábamos para obtener un prototipo con una sensibilidad y funcionamiento mucho mejor.

Las posibles soluciones para utilizar un patrón con unas líneas más finas eran: modificar la escala de impresión de las láminas de líneas de Amidror o crear nuestro propio patrón de líneas con programas de diseño como Autocad.

La opción elegida ha sido la de crear nuestras propias plantillas de líneas con el programa de diseño Autocad. Se han diseñado plantillas de diferentes dimensiones para probar la sensibilidad de nuestro sistema con diferentes tipos de patrones y combinaciones de parámetros como el espaciado entre líneas y el grosor de estas. Se han obtenido plantillas con líneas de grosor del orden de décimas de milímetro de grosor y separaciones entre líneas tan pequeñas que podemos incluir varias líneas dentro de un milímetro. Hemos dibujado varios tipos de patrones (círculos, líneas paralelas, puntos, curvas sinusoidales) con distintas combinaciones de grosor de línea y separación entre ellas. Se realizará el estudio de con qué tipo de patrones y con qué parámetros (grosor de línea y separación entre una línea y otra) se obtiene una mejor detección de las vibraciones y por lo tanto un mejor funcionamiento del prototipo.

El resultado de crear nuestras propias plantillas es una reducción en las dimensiones iniciales que nos proporcionaban las plantillas de Amidror. Se han obtenido unas plantillas con líneas mucho más finas y con una separación entre ellas mucho menor que antes. Además a la hora de imprimir estos patrones en las láminas de acetato, ha mejorado la calidad de impresión al diseñar nosotros los patrones de líneas con el programa Autocad.

Como conclusión, hemos mejorado el sistema de detección de vibraciones de manera significativa, ya que la cámara ahora es capaz de captar de manera nítida y con gran calidad líneas de una décima de milímetro con una separación de un cuarto de milímetro. En el apartado de Experimentación y resultados se podrán ver ejemplos de los tipos de patrones diseñados.

## **3.3 Desarrollo y funcionamiento de la aplicación.**

### **3.3.1 Introducción.**

Para desarrollar el detector de vibraciones basado en el efecto de moiré, eran necesarios dos elementos fundamentales. El primero, como ya se ha visto en el apartado anterior es el prototipo diseñado especialmente para llevar a cabo la tarea de captar las imágenes de manera que la cámara utilizada se mantenga completamente quieta para poder detectar las vibraciones o cambios de posición sufridas en la lámina de patrones utilizadas. Para este prototipo ha sido necesario diseñar y fabricar varias piezas y además se utilizan elementos de alto nivel en visión artificial como son la cámara IDS y la pantalla de iluminación LED.

El segundo elemento es el software que hace posible detectar las vibraciones de las plantillas de patrones de líneas con respecto al péndulo. Para desarrollarlo son necesarios conocimientos de programación en lenguaje C# y conocimientos de utilización de aplicaciones como Visual Studio.

La detección de vibraciones de nuestro prototipo se va a basar en el efecto moiré, que se produce tras la superposición de dos tramas de patrones líneas. En nuestro prototipo en lugar de utilizar dos láminas y superponerlas para obtener los patrones de moiré, lo que se realiza es la superposición de dos imágenes de una única plantilla de líneas que han sido captadas en momentos de tiempo diferentes.

### **3.3.2 Desarrollo de la aplicación.**

Para desarrollar la aplicación se ha utilizado la programación en C# en el entorno de desarrollo integrado (IDE) Visual Studio para sistemas Windows. La ventaja de utilizar Visual Studio es la posibilidad de crear aplicaciones en cualquier entorno que soporte la plataforma .NET.

El lenguaje utilizado para desarrollar la aplicación utilizada en el proyecto es el lenguaje C#. Este lenguaje de programación ha sido diseñado para compilar diversas aplicaciones que se ejecutan en .NET Framework. El lenguaje de programación C# se considera un lenguaje simple, eficaz, y está orientado a objetos.

Para desarrollar una aplicación donde se va a trabajar con imágenes lo mejor es trabajar con OpenCV, una biblioteca de procesamiento de imágenes con un gran número de aplicaciones para visión artificial. La biblioteca OpenCV se utiliza para aplicaciones de visión y gestión de imágenes captadas con cámaras y ha sido desarrollada para el lenguaje de programación C++. El problema es que no se puede utilizar para aplicaciones de lenguaje C#. Para poder utilizar la biblioteca OpenCV en aplicaciones de lenguaje C# se utiliza Emgu CV.

Emgu CV hace posible que las funciones de OpenCV sean llamadas desde una aplicación desarrollada en C#. Técnicamente Emgu CV es un envoltorio .NET para la librería de procesamiento de imágenes de OpenCV, es decir que Emgu CV es una interfaz que posibilita que desde C# se pueda invocar a la biblioteca de OpenCV. Dicha biblioteca Emgu CV se puede descargar desde la siguiente página web:

<https://sourceforge.net/projects/emgucv/>

### **3.3.2.1 Software IDS**

Con un programa desarrollado en C#, y a través de Emgu CV podemos trabajar con una cámara de prestaciones normales como por ejemplo la webcam del ordenador. En nuestro proyecto utilizamos una cámara de la marca IDS. En la página web de IDS podemos descargar los drivers para controlar sus cámaras y ejemplos de código. Los software que son necesarios de descargar son el Ueye Cockpit y el IDS Camera Manager.

La página oficial de la empresa IDS y de donde se han descargado los archivos de estos programas es:

<https://es.ids-imaging.com/ueye-software-archive.html>

El IDS Camera Manager nos permite conocer el estado de la conexión de la cámara con el ordenador. El programa Ueye Cockpit es una aplicación desarrollada por IDS con la que se puede controlar la grabación y el funcionamiento de la cámara. Con él se puede modificar las propiedades de las imágenes tomadas tales como el tamaño de la imagen, y el espacio de color (RGB o escala de grises entre otros).

### **3.3.3 Funcionamiento de la aplicación.**

#### **3.3.3.1 Resumen del funcionamiento.**

A partir del programa Visual Studio 2013 hemos desarrollado el programa y el diseño de la aplicación que vamos a utilizar en el proyecto para detectar las vibraciones y que se ha llamado ViendoMOIRE.

El funcionamiento de la aplicación es el siguiente, a partir de la cámara colgada del techo, se captan imágenes de una lámina con un patrón que ha sido colocada justo debajo de la cámara y sobre una pantalla de iluminación LED. Estas imágenes van a ser tomadas en escala de grises, ya que los patrones utilizados están formados por líneas negras y espacios entre ellas transparentes que con la iluminación se captarán de color blanco.

La aplicación ViendoMOIRE calcula la diferencia entre dos imágenes del patrón de líneas tomadas en dos instantes de tiempo distintos. Para ese proceso, la aplicación ofrece algunos parámetros de configuración: uno llamado sensibilidad y otro que es la frecuencia en que se deben tomar las imágenes. La aplicación tiene dos modos de funcionamiento: uno que podemos llamar secuencial y otro que se puede llamar de referencia.

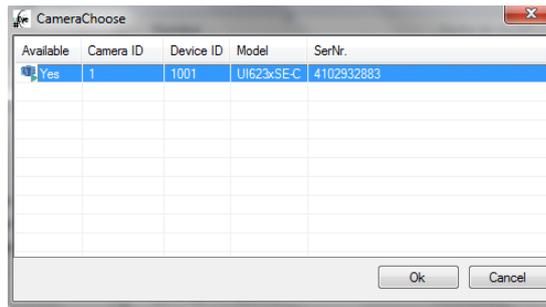
Como las imágenes de patrones de líneas con las que trabajamos son líneas negras sobre fondo blanco, la aplicación permite binarizar las imágenes en solo dos valores posibles: blanco (0xFF) o negro (0x0).

Una vez se ha establecido el periodo T que debe transcurrir entre la captura de una imagen y la captura de la siguiente (parámetro que puede tomar un valor mínimo de 100 milisegundos y que no tiene límite en su valor máximo), la aplicación calcula la diferencia entre la última imagen capturada y la imagen tomada un periodo de tiempo antes (modo secuencial) o entre la última imagen capturada y una previa tomada como referencia (modo de referencia). El cálculo de la diferencia se realiza recorriendo las dos imágenes píxel a píxel, comparando los valores de los píxeles que tienen la misma localización en ambas imágenes y asignando a la imagen diferencia calculada un valor de blanco (0xFF) o negro (0x0) según el modo de cálculo seleccionado.

El cálculo de la diferencia entre las imágenes tiene dos modos de cálculo: el modo XOR y el modo AND. En el modo XOR, un píxel de la imagen diferencia calculada tendrá el valor negro (0x0) si los valores del píxel con la misma localización en las dos imágenes comparadas son diferentes (blanco en una y negro en la otra), y un color blanco (0xFF) si los dos píxeles de las dos imágenes diferenciadas tienen el mismo valor. Así, la imagen resultante marca en negro los píxeles donde las dos imágenes restadas muestran un cambio de valor. En el modo AND, un píxel de la imagen diferencia calculada tendrá el valor blanco (0xFF) si el valor de los dos píxeles de las imágenes diferenciadas es blanco, y se le asignará el valor negro (0x0) en el resto de los casos.

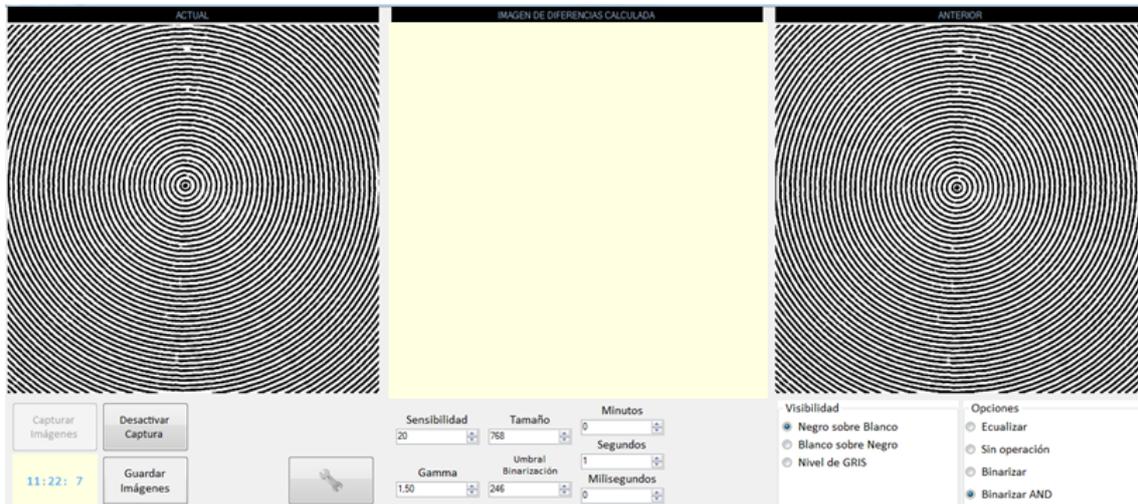
### **3.3.3.2 Aplicación ViendoMOIRE**

En primer lugar al iniciar la aplicación de ViendoMOIRE, lo primero que aparece es una ventana para seleccionar la cámara con la que queremos que trabaje la aplicación (**Figura 33**), en este caso solo disponemos de una cámara conectada al puerto de datos que es la cámara IDS. Esta ventana también informa del estado de la cámara, del modelo utilizado y su número de serie.



**Figura 33.** Ventana de selección de cámara con la que trabaja la aplicación ViendoMOIRE.

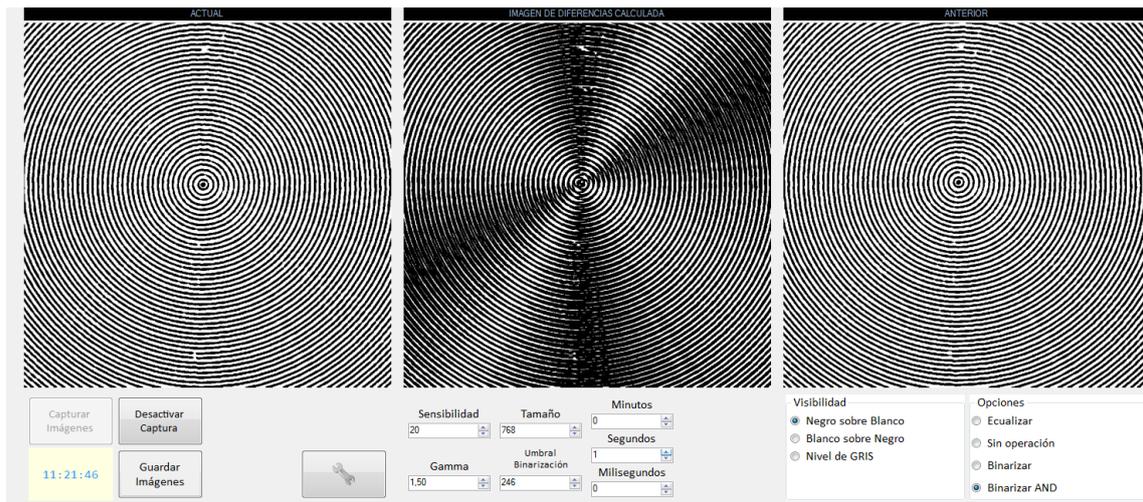
Una vez seleccionada la cámara, aparecerá la ventana de la **Figura 34**, que es con la que se trabaja el resto del tiempo.



**Figura 34.** Ventana principal aplicación ViendoMOIRE.

La ventana de la aplicación se puede dividir en diferentes partes. En cada una de ellas se controla una parte importante a la hora de conseguir iniciar la captura de imágenes, guardar las imágenes resultantes o cambiar parámetros de dichas imágenes con el fin de obtener una mayor eficacia en la detección de vibraciones.

En la **Figura 35** se puede ver un ejemplo de las imágenes con las que trabaja el programa. Las imágenes han sido nombradas como imagen actual, imagen de diferencias calculadas e imagen anterior (que puede ser también la imagen de referencia).



**Figura 35.** Ejemplo de las imágenes capturadas y la imagen resultante con la operación AND.

La imagen situada a la izquierda es la imagen actual que está captando la cámara, la imagen de la derecha es la imagen captada un determinado tiempo antes, es decir, la imagen de la derecha es ligeramente anterior a la de la izquierda. Este tiempo de desfase entre una imagen y la otra se puede modificar. Por último la imagen que se ve en el centro es la imagen resultante de la operación que realiza el programa. En esta imagen es donde se detecta si hay diferencias entre la imagen actual y la imagen anterior, lo que indicaría que se han producido vibraciones o variaciones de posición de la lámina de patrones con respecto a la cámara.

En la parte inferior izquierda de la ventana de la aplicación están los controles que permiten iniciar y detener la captura de imágenes y la opción de guardar la imagen resultante (**Figura 36**).



**Figura 36.** Controles de captura y guardado de imágenes.

Una vez iniciada la aplicación, si queremos que la cámara empiece a capturar imágenes, seleccionamos la opción de “Capturar imágenes” y inmediatamente en las tres ventanas de la parte superior empezaremos a ver las tres imágenes: la actual, la anterior y la obtenida por la comparación de ambas.

A la aplicación se le ha implementado la opción de que se guarden imágenes automáticamente, dando la posibilidad de trabajar durante un periodo de tiempo prolongado para así comparar si se han producido vibraciones en la superficie a lo largo

de una hora, por ejemplo. Estas imágenes se guardan en una carpeta llamada ViendoMoireImágenes.

Como requisito para que las imágenes puedan ser guardadas es necesario que seleccionemos un tiempo mínimo de desfase entre la imagen actual y la imagen anterior. El tiempo mínimo configurado es de un segundo.

En el centro de la parte inferior se encuentran los controles de los parámetros de las imágenes (**Figura 37**), tales como el tamaño, la sensibilidad, el gamma y el umbral de binarización. Además también se encuentran los controles del tiempo de desfase entre las imágenes.

Sensibilidad	Tamaño	Minutos
20	25	0
		Segundos
		0
Gamma	Umbral Binarización	Milisegundos
1,50	0	0

**Figura 37.** Parámetros de visión de las imágenes

Cada parámetro es útil a la hora de modificar las imágenes que captura la cámara con el fin de aumentar la sensibilidad y la calidad de la imagen para así realizar un estudio más efectivo. A continuación se explicará uno por uno su función y qué modifican en la imagen.

**Sensibilidad:** la sensibilidad es un parámetro que se utiliza cuando se trabaja sin binarizar las imágenes. Podemos seleccionar un valor de sensibilidad entre 1 y 255. El funcionamiento de la sensibilidad se basa en la resta de los valores de nivel de gris de un píxel de la imagen actual con el mismo píxel de la imagen anterior.

Si la diferencia entre los valores de los píxeles es inferior a la sensibilidad, el programa asigna al píxel correspondiente de la imagen resultante calculada el color negro (0x0), indicando que no hay una diferencia de color suficiente para que se considere que ha habido movimiento. Si la diferencia entre píxeles supera la sensibilidad al píxel correspondiente se le asigna el color blanco (0xFF), que indica que se ha producido un cambio de color significativo, y por lo tanto que ha habido movimiento.

El valor de sensibilidad adecuado no debe ser muy alto, ya que si aumentamos mucho el margen de diferencia posible entre los píxeles, el programa detectará menos variaciones de posición.

**Tamaño:** el tamaño de la imagen va a definir el número de píxeles que forman las imágenes capturadas, se ha programado para que las imágenes tengan el mismo tamaño de alto que de ancho, por lo tanto son imágenes cuadradas, para así facilitar al programa el recorrido de la matriz a la hora de comparar los valores de cada píxel. Se pueden elegir valores desde 25 (el tamaño de la imagen será de 25x25) hasta 768, donde la imagen estará formada por 768 píxeles de ancho y 768 píxeles de alto.

Un mayor tamaño de la imagen significa un mayor número de píxeles y por lo tanto la imagen tendrá más calidad dado que estará mejor definida.

**Gamma:** El gamma es el parámetro responsable de la sensación de contraste de la imagen, este parámetro se utiliza para compensar el contraste y la luminosidad de la imagen. El margen del gamma que podemos seleccionar está entre 0.05 y 5. Un valor de gamma de 0.05 produce una imagen muy iluminada y con poco contraste entre los elementos de la imagen, por el contrario un valor de gamma 5 proporciona una imagen oscura y poco iluminada. Este parámetro se utiliza para mejorar la visualización de la imagen a través de la pantalla, por ejemplo cuanto más oscuro sea el entorno de visualización más elevado debe ser el valor del gamma para conseguir una correcta visualización. Para aplicaciones cotidianas el valor de gamma debe de estar entre 1,5 y 2.

**Umbral de binarización:** el umbral de binarización es un parámetro que se puede modificar siempre y cuando en la operación seleccionada en la parte inferior derecha sea la opción de “Binarizar”. Como ya se ha explicado, binarizar significa asignarle el color negro (0x0) o blanco (0xFF) a la imagen según el color original de su píxel. Este umbral de binarización nos permite elegir un valor entre el 0 y el 255.

Si seleccionamos por ejemplo el valor de 100, a todos los píxeles que tanto en la imagen actual como en la interior tengan un valor en la escala de grises de entre 0 y 100, se le asignará el color negro (0x0). Los valores de píxel mayores que 100, tomarán el color blanco (0xFF).

Por último, con los controles de valor numérico podemos modificar el tiempo de desfase entre imágenes imponiendo los minutos, los segundos o los milisegundos que queramos que tarde la aplicación en calcular la diferencia entre imágenes. El tiempo definido también va a ser el periodo con el que la aplicación guarda las imágenes de diferencia calculadas (siempre que esté activada la opción de Capturar Imágenes).

Si activamos la captura de imágenes y se define un minuto de tiempo, cuando se realice la comparación entre las imágenes actual y anterior, la imagen actual que aparece en la parte izquierda será la imagen en directo que está captando la cámara y la imagen anterior de la derecha será la imagen que captó la cámara hace exactamente un minuto. Además, si se ha seleccionado la opción de Guardar Imágenes, cada minuto que pase se realiza la comparación entre las imágenes y se guardará la imagen resultante obtenida en la carpeta ViendoMoireImágenes.

En la parte inferior derecha está el último conjunto de controles que podemos aplicar a las imágenes iniciales y a la imagen diferencia calculada para detectar las vibraciones (**Figuras 38 y 39**). Por un lado se encuentran las opciones de visibilidad, desde donde se puede modificar la manera de ver la imagen de diferencias calculada para facilitar la percepción de las diferencias entre las dos imágenes iniciales.

También se encuentran los controles u opciones de visualización de las imágenes, que son las operaciones que se pueden aplicar sobre las imágenes para detectar las diferencias entre ellas de manera más eficiente, como por ejemplo la binarización.



**Figuras 38 y 39.** Controles de visibilidad (a) y opciones de operación aplicada a las imágenes (b).

En los controles de visibilidad (**Figura 38**) tenemos las distintas posibilidades para que el programa interprete los resultados de la comparación entre la imagen actual y la anterior.

Si se selecciona la opción de Negro sobre Blanco, cuando en la comparación de los valores de los píxeles no se detecte variación, al píxel que le corresponde el programa le asignará el color blanco (0xFF). Si se ha producido variación o movimiento el programa asignará el color negro (0x0), por lo tanto veremos los cambios entre las imágenes de color negro sobre un fondo blanco.

La opción Blanco sobre Negro es la inversa, si detecta cambio en los valores de los píxeles, en la imagen resultante se asigna el color blanco (0xFF). Si no detecta movimiento a ese píxel se le asigna el color negro (0x0) obteniendo las diferencias entre las imágenes en blanco sobre un fondo negro. Por último si se selecciona la opción Nivel de Gris, la imagen resultante se verá en un fondo gris y las diferencias se representan con los colores blanco o negro según sean cambios hacia valores de píxel mayores o menores, es decir si el píxel de la imagen actual es de color más claro u oscuro con respecto al mismo píxel de la imagen anterior o de referencia.

En las opciones de operación (**Figura 39**) disponibles en la aplicación, encontramos las opciones de ecualizar, sin operación, binarizar normal o XOR y binarizar en modo AND.

El modo Ecuilizar realiza un ajuste automático de los colores utilizados en la imagen basándose en el histograma de la imagen. Se utiliza si la imagen con la que estamos trabajando esta focalizada en unos pocos valores de píxel, por ejemplo una imagen prácticamente negra donde los valores de los píxeles estén entre 0 y 30, lo que produce es una mejora el contraste entre cada uno de esos valores de píxeles obteniendo una imagen más iluminada y con mayor nitidez. El modo ecualizar se utiliza para realzar el contraste en una imagen, resaltando los colores y los detalles.

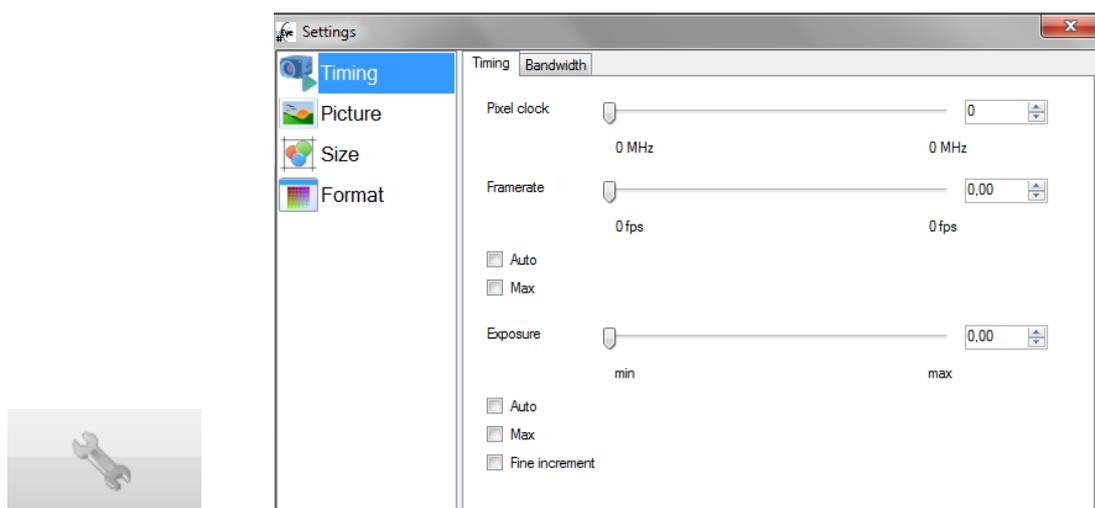
El modo sin operación no realiza ninguna operación y la imagen únicamente es modificada por los parámetros de la zona central inferior (**Figura 37**). Las opciones de binarización muestran las imágenes actual y anterior únicamente en blanco y negro. Se puede modificar la condición de binarización con el parámetro del umbral de binarización. Podemos distinguir entre dos operaciones de binarización posibles: la binarización normal o XOR y la binarización AND.

Con la operación de binarización normal o XOR se obtiene una imagen que se asemeja a la de moiré resultante de la superposición de las dos imágenes restadas. Resulta muy útil si queremos detectar la naturaleza de los cambios entre imágenes. Ahora, si la imagen anterior o de referencia es idéntica a la imagen capturada actual, entonces la imagen de diferencia calculada con el operador XOR es completamente blanca (en el modo de visualización Negro sobre Blanco). El porcentaje de píxeles negros sobre el total de la imagen cuantifica el nivel de cambio entre las imágenes comparadas.

Con la operación de binarización en modo AND se obtiene la imagen de moiré resultante de la superposición de dos tramas que forman las dos imágenes capturadas y que han podido sufrir (en el intervalo de tiempo T entre una y otra o entre la última y la de referencia) una ligera modificación por escalamiento, desplazamiento o rotación.

Al utilizar el operador AND, un píxel de la imagen de diferencia calculada será de color negro si lo es en algunas de las dos tramas iniciales o en ambas. Y será blanco si ese mismo píxel es de color blanco en ambas tramas. Si la última imagen capturada es idéntica a la imagen anterior o a la de referencia, entonces la imagen de diferencia calculada con el operador AND ofrece una imagen idéntica a las otras dos.

Por último en la parte inferior central podemos ver el icono de una llave inglesa (**Figura 40**), que nos conduce hasta una pantalla donde podemos modificar más parámetros de la imagen.



**Figura 40.** Ajustes adicionales para la captura de imágenes.

En este apartado podemos cambiar la frecuencia con la que se actualizan los píxeles (píxel clock), los frames por segundo que tenga la imagen, la exposición, el tamaño de las imágenes, los colores que forman las imágenes, y por último el formato de píxeles, donde se puede cambiar el dominio de la imagen del espacio RGB a escala de grises obteniendo así una mejor calidad a la hora de trabajar.

## 4. Experimentación y resultados.

Una vez el sistema de detección de vibraciones ha sido instalado, se han realizado una serie de ensayos para ver el funcionamiento del sistema y la capacidad de detectar vibraciones y/o ligeros movimientos. En estos ensayos se utilizan plantillas de distintos tipos de patrones (círculos concéntricos, líneas paralelas, puntos, etc.) y con distintos parámetros de diseño (grosor de línea, espaciado entre líneas o puntos, etc.) para comparar la efectividad de cada tipo de plantilla y la influencia que tiene la modificación de algún parámetro a la hora de detectar dichas vibraciones y/o movimientos. Un patrón puede ser efectivo para detectar movimientos horizontales de la plantilla de patrones, pero puede que no sea capaz de detectar la rotación cierto ángulo de la plantilla con respecto al sistema de detección.

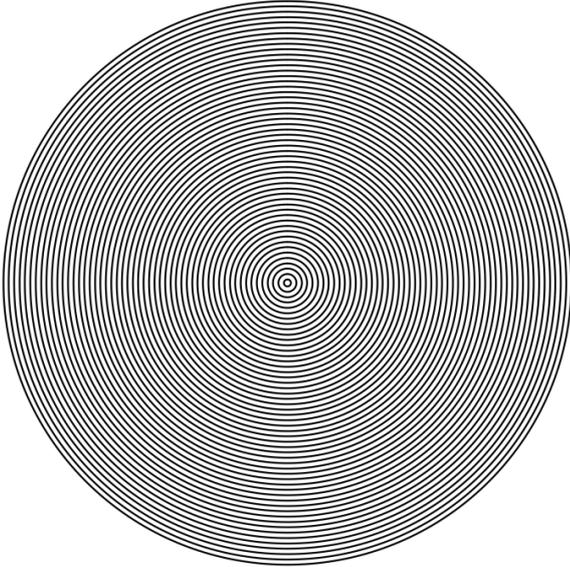
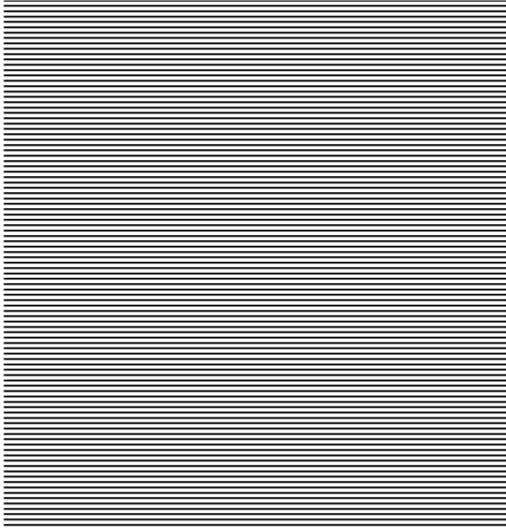
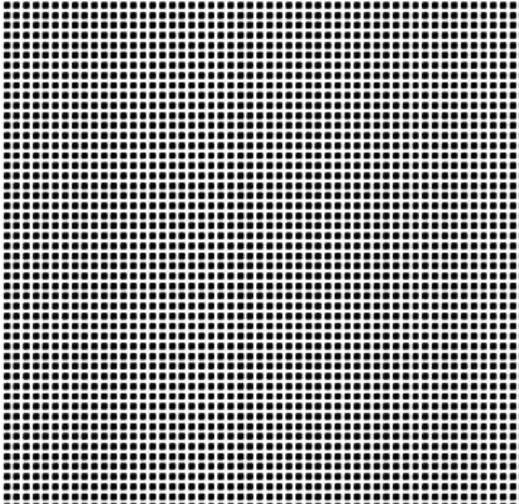
Con estos ensayos se decidirá al final del proyecto si el sistema de detección de vibraciones basado en el efecto moiré funciona de manera eficiente y qué capacidad de detección proporciona. A partir de estos ensayos y de los resultados obtenidos, llegaremos a las conclusiones sobre si es viable en un futuro una mejora del sistema de detección de vibraciones basado en el efecto de moiré.

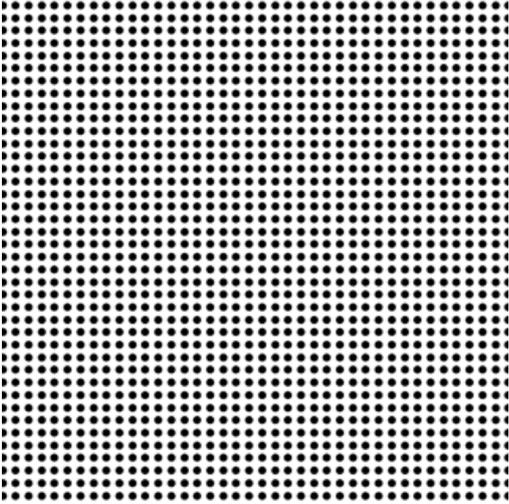
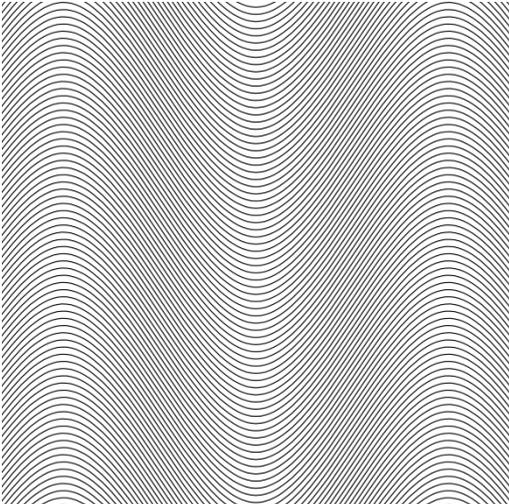
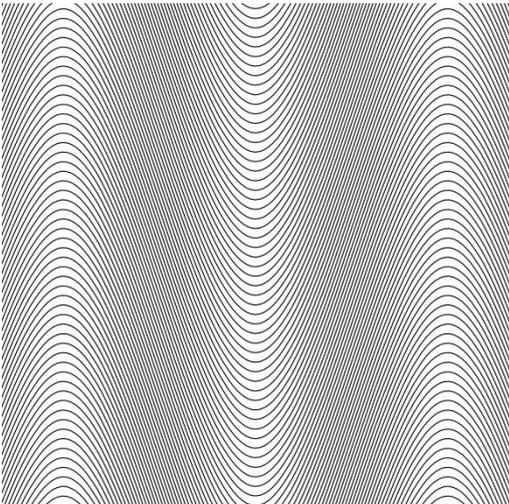
Las plantillas de patrones utilizadas en el sistema de detección de vibraciones han sido realizadas con el programa Autocad de diseño en 2D. Este programa ha permitido diseñar los distintos tipos de plantillas de patrones y definir los parámetros que afectarán a la eficacia de nuestro prototipo. Los tipos de plantillas de patrones utilizados son los siguientes: círculos concéntricos, líneas paralelas, puntos cuadrados, puntos redondos y curvas sinusoidales.

En la **Figura 41** se puede ver una tabla donde aparecen todos los tipos de patrones de líneas y puntos utilizados para la detección de vibraciones. El objetivo en el programa desarrollado aparezca el fenómeno de interferencia de moiré al sufrir la lámina de patrones una vibración o un ligero movimiento.

Respecto a los parámetros de diseño utilizados (como el grosor de línea y el espaciado entre líneas), se necesitaban unos patrones lo más finos y pequeños posibles. El grosor de línea y la separación entre líneas debe ser el mínimo posible, pero a la vez la cámara debe captar sin problemas y de manera nítida las líneas que forman el patrón. Un menor grosor y espaciado entre líneas supone un mayor número de líneas en menos superficie, y por lo tanto un funcionamiento más preciso del sistema de detección de vibraciones.

Si se produce una vibración en la plantilla de patrones, la cámara capta esta vibración y en el programa ViendoMOIRE se crea una interferencia de moiré mayor a la producida si se utiliza una plantilla de mayor grosor de línea y con menos líneas por superficie (mayor espaciado entre líneas).

<p>Patrón de círculos concéntricos</p>	
<p>Patrón de líneas paralelas.</p>	
<p>Patrón de puntos cuadrados.</p>	

<p>Patrón de puntos circulares.</p>	
<p>Patrón de curva sinusoidal 1.</p>	
<p>Patrón de curva sinusoidal 2.</p>	

**Figura 41.** Ejemplos de los patrones utilizados para la experimentación y ensayos.

Los grosores de línea con los que somos capaces de trabajar son del orden de centésimas de milímetro. Los grosores de líneas utilizados en las plantillas de patrones son de 0.09 milímetros para las plantillas de líneas más finas y 0.13 milímetros para las plantillas de líneas más gruesas. Dentro de la plantilla de líneas más finas hay dos opciones de separaciones entre líneas: 0.25 milímetros o 0.36 milímetros. La plantilla de 0.09 milímetros de grosor de línea y 0.25 milímetros de separación entre ellas es la plantilla más fina y con mayor número de líneas por milímetro, por lo que es la más sensible que se puede utilizar. Respecto a las líneas de 0.13 milímetros de grosor, las opciones de separación entre líneas son 0.3 milímetros o 0.39 milímetros.

Se han diseñado seis tipos de patrones (mostrados en la **Figura 41**) y para cada tipo de plantilla se han realizado cuatro posibilidades de parámetros de grosor de línea y separación entre ellas. Como resultado de las combinaciones de los seis tipos de patrones y las cuatro configuraciones de parámetros de diseño, tenemos veinticuatro posibles plantillas con las que probar nuestro sistema.

Un requisito indispensable a la hora de trabajar con el prototipo y estudiar su capacidad de detección de vibraciones es que el sistema debe estar quieto. Si no trabajamos con el péndulo inmóvil, los resultados obtenidos no serían válidos. La interferencia de moiré se crearía por movimiento de oscilación del péndulo en lugar de por las vibraciones o pequeños movimientos sufridos en la plantilla de patrones. Para evitar estos resultados erróneos, una vez se ha colocado la plantilla con el patrón bajo el sistema, se ha dejado un margen de tiempo para que el péndulo vuelva a la posición de equilibrio. Así se evita la posible oscilación del péndulo ocasionada por pequeñas fuerzas que inciden sobre el péndulo, como corrientes de aire al pasar cerca del sistema.

Se han realizado pruebas con las veinticuatro posibilidades de plantillas de patrón que tenemos para ver con qué tipos de plantillas obtenemos mejores resultados a la hora de detectar pequeñas vibraciones y movimientos. Para cada plantilla de patrones se ha realizado el estudio donde se obtienen varias muestras de imágenes con la frecuencia elegida en la aplicación (cinco minutos). Al calcular varias imágenes en un determinado espacio de tiempo podemos comprobar si se obtienen interferencias de moiré producidas por alguna vibración o pequeños movimientos de la plantilla de patrones con respecto al sistema.

No todas las plantillas han resultado válidas para el estudio y la detección de las vibraciones. Algunas por su geometría, parámetros de diseño y la calidad de la impresión conseguida, no son válidas porque no tienen la calidad necesaria para que la cámara capte las líneas de manera nítida.

En las siguientes tablas se muestran algunos resultados obtenidos con el sistema desarrollado. En estas tablas se pueden ver la plantilla de patrón utilizada a escala real, la imagen que capta nuestra cámara, la configuración utilizada en la aplicación, ejemplos de las interferencias de moiré obtenidas y observaciones sobre los desplazamientos detectados y la sensibilidad de la plantilla utilizada.

Nombre de la plantilla:

**Plantilla patrón circular.  
Grosor de línea 0.09 mm - Espaciado entre líneas 0.36mm.**

Imagen del patrón.

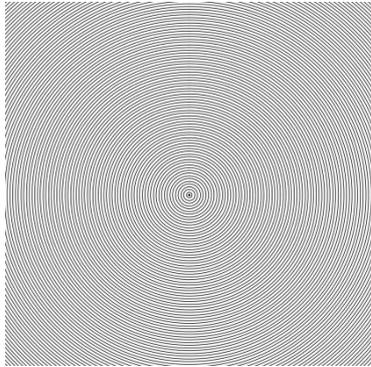
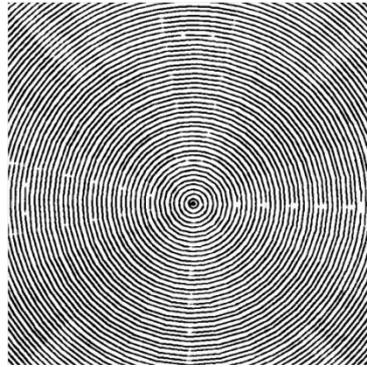


Imagen captada por la cámara



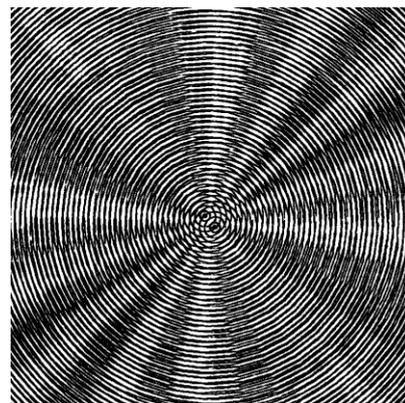
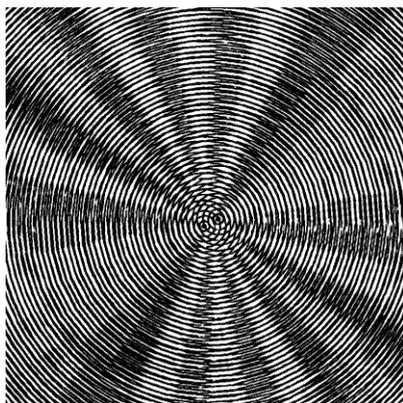
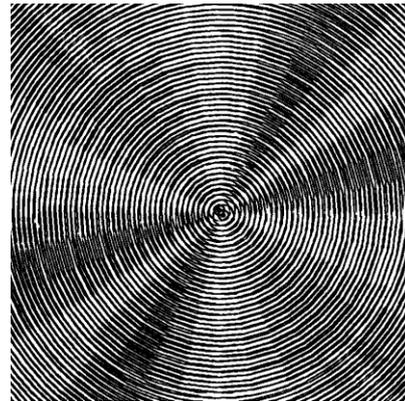
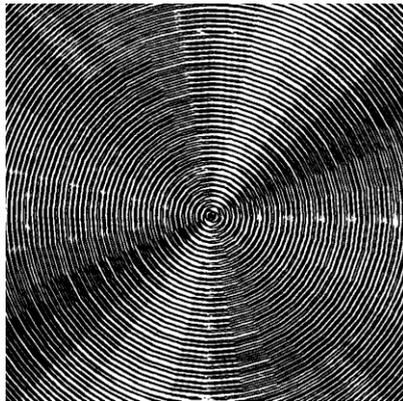
Configuración de la aplicación utilizada

Sensibilidad	Tamaño	Minutos
20	768	5
Gamma	Umbral Binarización	Segundos
1.50	165	0
		Milisegundos
		0

Visibilidad	Opciones
<input checked="" type="radio"/> Negro sobre Blanco	<input type="radio"/> Ecuilizar
<input type="radio"/> Blanco sobre Negro	<input type="radio"/> Sin operación
<input type="radio"/> Nivel de GRIS	<input type="radio"/> Binarizar
	<input checked="" type="radio"/> Binarizar AND

Imágenes resultantes calculadas.



**Observaciones:**

En las imágenes resultantes calculadas, la plantilla circular presenta una interferencia de moiré muy clara al sufrir la plantilla pequeños desplazamientos horizontales (en las dos imágenes de arriba los desplazamientos detectados son inferiores a medio milímetro y en las dos imágenes de abajo son inferiores a un milímetro).

Nombre de la plantilla:

**Plantilla patrón circular.  
Grosor de línea 0.13 mm - Espaciado entre líneas 0.39 mm.**

Imagen del patrón.

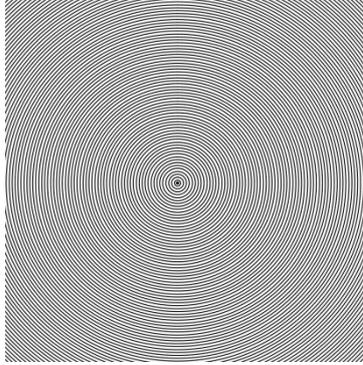
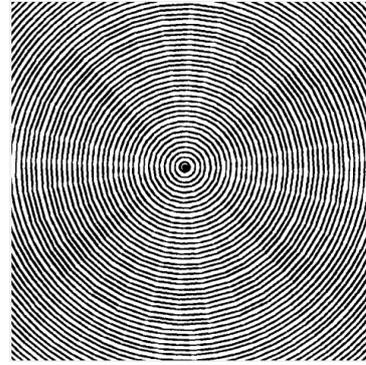


Imagen captada por la cámara

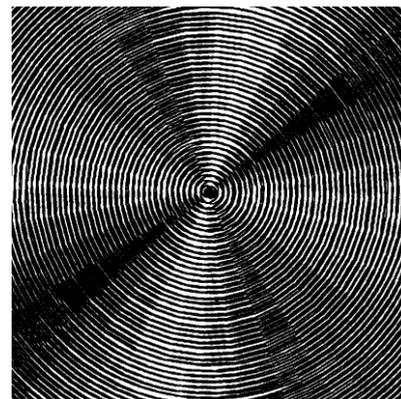
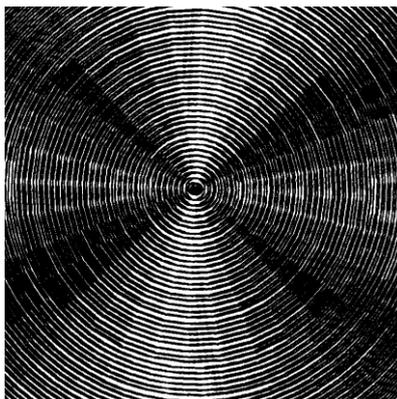
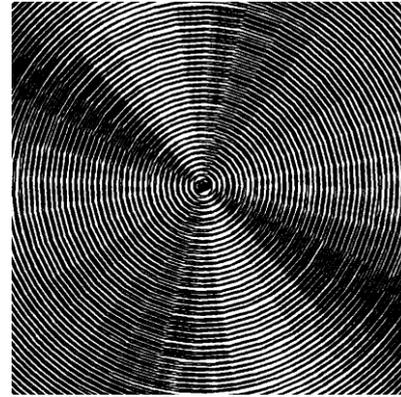
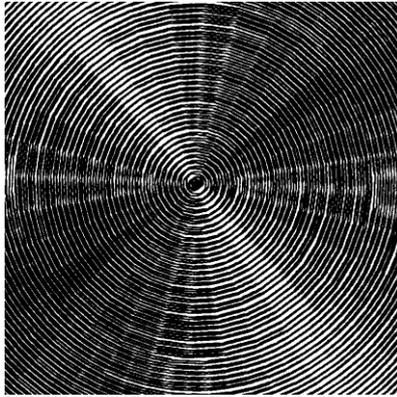


Configuración de la aplicación utilizada

Sensibilidad	Tamaño	Minutos
20	768	5
Gamma	Umbral	Segundos
1.50	145	0
	Binarización	Milisegundos
		100

Visibilidad	Opciones
<input checked="" type="radio"/> Negro sobre Blanco	<input type="radio"/> Ecuilizar
<input type="radio"/> Blanco sobre Negro	<input type="radio"/> Sin operación
<input type="radio"/> Nivel de GRIS	<input type="radio"/> Binarizar
	<input checked="" type="radio"/> Binarizar AND

Imágenes resultantes calculadas.



**Observaciones:**

Al utilizar la plantilla de mayor grosor de línea, la interferencia de moiré que se produce se visualiza de manera más oscura y por lo tanto es más fácil para la cámara detectar una vibración en el plano horizontal. La desventaja de esta plantilla es que la interferencia de moiré se ve fácilmente, por ejemplo se ha detectado una interferencia de moiré de más de cuatro rayos negros.

Nombre de la plantilla:

**Plantilla patrón circular.  
Grosor de línea 0.13 mm - Espaciado entre líneas 0.3 mm.**

Imagen del patrón.

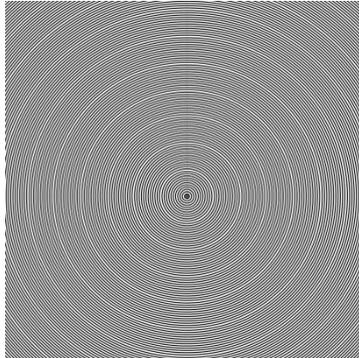
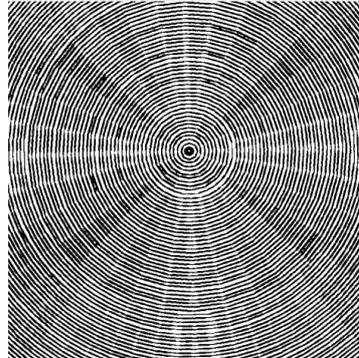


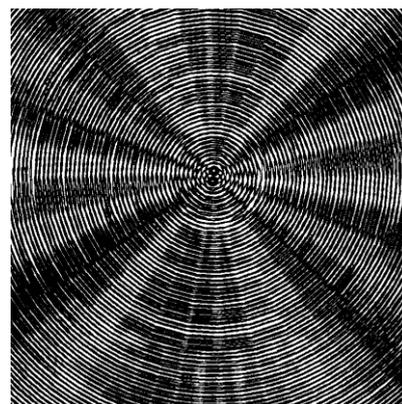
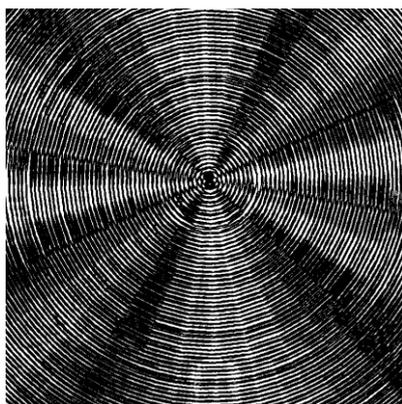
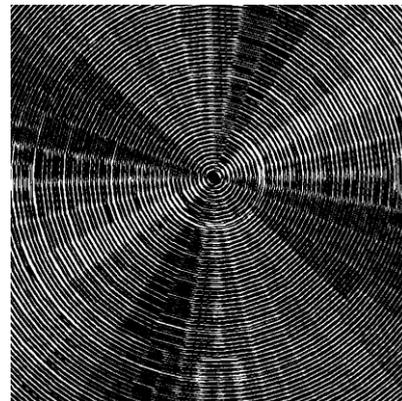
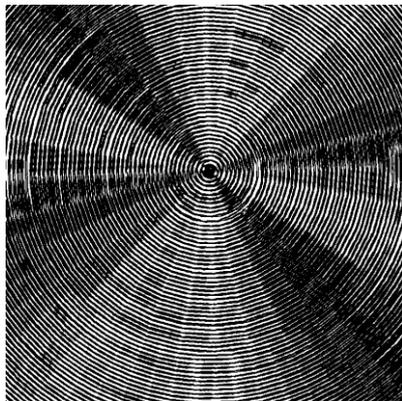
Imagen captada por la cámara



Configuración de la aplicación utilizada

Sensibilidad	Tamaño	Minutos
20	768	5
Gamma	Umbral Binarización	Segundos
1.50	105	0
		Milisegundos
		100
Visibilidad		Opciones
<input checked="" type="radio"/> Negro sobre Blanco	<input type="radio"/> Ecuilizar	
<input type="radio"/> Blanco sobre Negro	<input type="radio"/> Sin operación	
<input type="radio"/> Nivel de GRIS	<input type="radio"/> Binarizar	
	<input checked="" type="radio"/> Binarizar AND	

Imágenes resultantes calculadas.

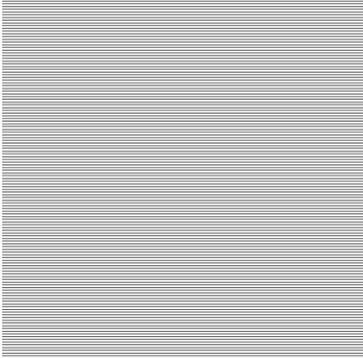
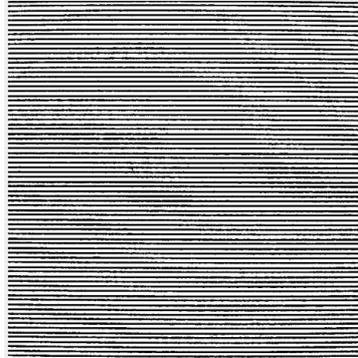


**Observaciones:**

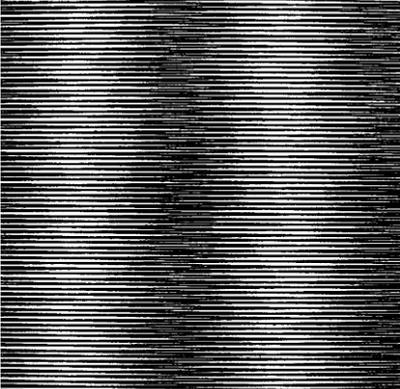
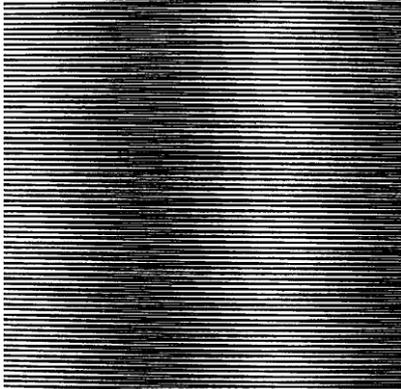
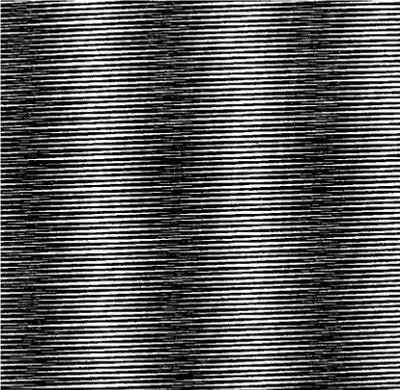
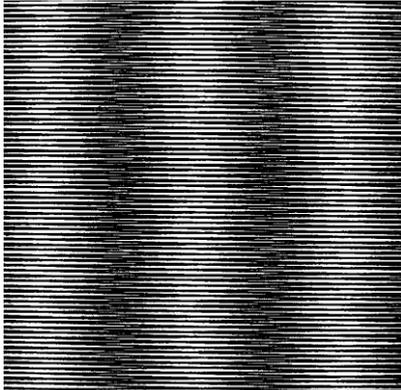
Al utilizar la plantilla de mayor grosor de línea y menor espaciado entre líneas, observamos como las interferencias de moiré se aprecian de manera más clara. Con esta plantilla queda demostrado que cuanto menos espacio tengamos entre las líneas que forman la trama, se formarán interferencias de moiré con un mayor número de rayos al sufrir una pequeña vibración de la plantilla en el plano horizontal.

Nombre de la plantilla:

**Plantilla líneas negras paralelas.  
Grosor de línea 0.09 mm - Espaciado entre líneas 0.36 mm.**

Imagen del patrón.	Imagen captada por la cámara	Configuración de la aplicación utilizada
		

**Imágenes resultantes calculadas.**

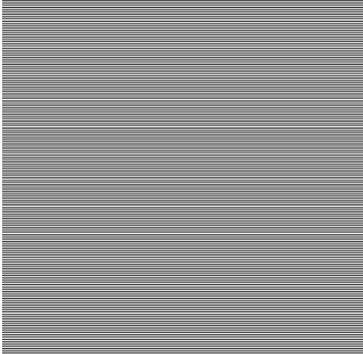
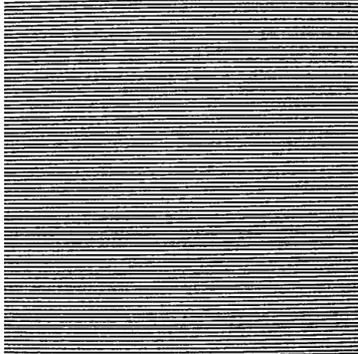
	
	

**Observaciones:**

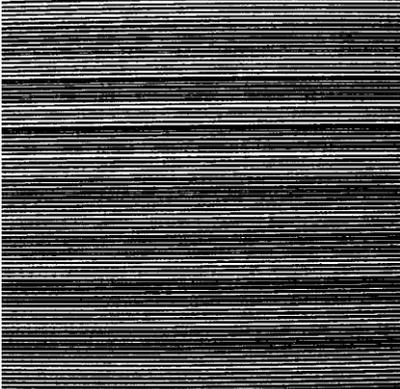
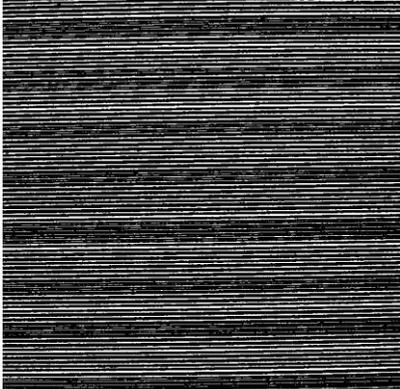
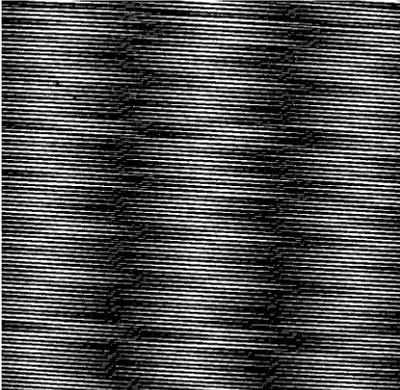
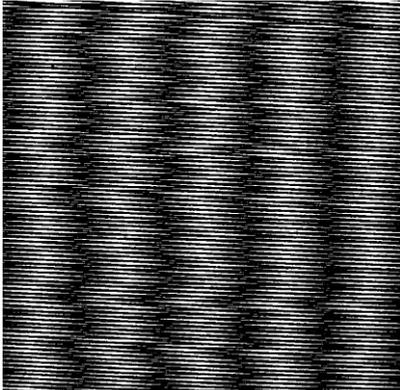
Con la plantilla de líneas negras paralelas con el grosor más pequeño (0,09 mm) y el espaciado entre líneas mayor (0.36 mm), no es posible detectar las vibraciones en el plano horizontal y crear interferencias de moiré debido a que el espaciado entre líneas es demasiado grande. Por otra parte y como se puede ver en las imágenes superiores, la detección de las rotaciones es más precisa y se crean interferencias de moiré que se pueden apreciar fácilmente.

Nombre de la plantilla:

**Plantilla líneas negras paralelas.  
Grosor de línea 0.13 mm - Espaciado entre líneas 0.3 mm.**

Imagen del patrón.	Imagen captada por la cámara	Configuración de la aplicación utilizada
		

Imágenes resultantes calculadas.

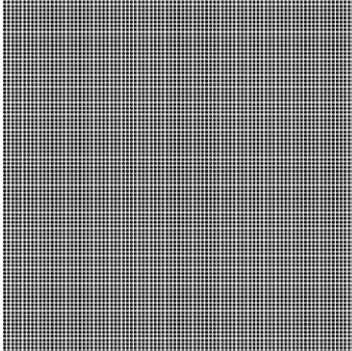
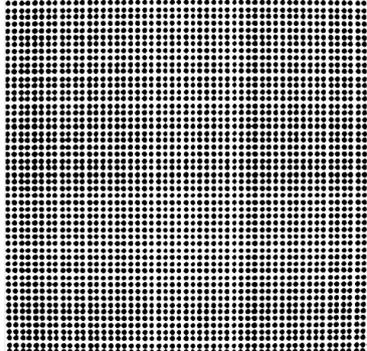
	
	

**Observaciones:**

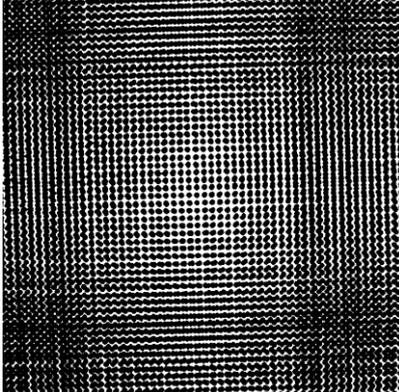
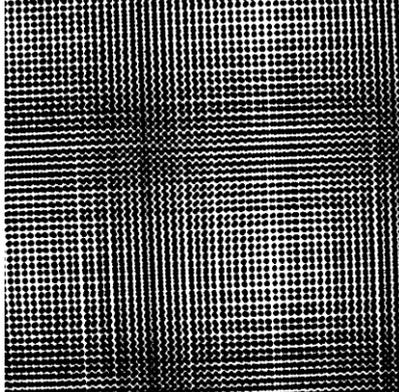
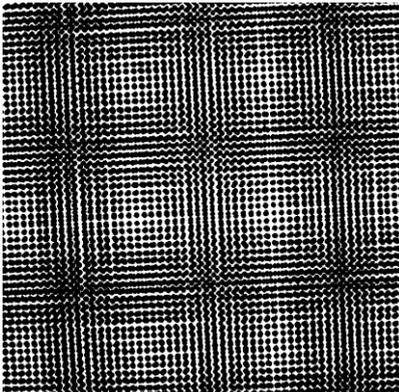
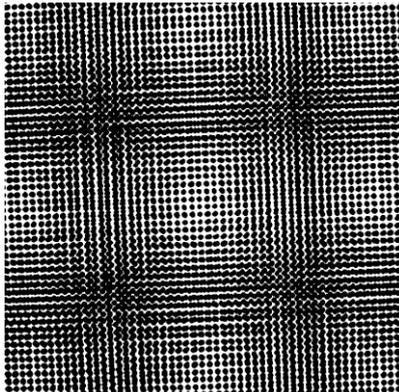
Con la plantilla de líneas negras paralelas con el menor grosor de línea y menor espaciado entre líneas, el sistema detecta las vibraciones sufridas en el plano horizontal (perpendicular a las líneas del patrón) y crea una interferencia de moiré apreciable (imágenes parte superior). Además, al tratarse de una plantilla con mayor número de líneas en menos espacio, con el ojo humano se detecta de manera más efectiva las pequeñas rotaciones (imágenes inferiores).

Nombre de la plantilla:

**Plantilla puntos redondos.  
Grosor de línea 0.13 mm - Espaciado entre puntos 0.39 mm.**

Imagen del patrón.	Imagen captada por la cámara	Configuración de la aplicación utilizada
		

Imágenes resultantes calculadas.

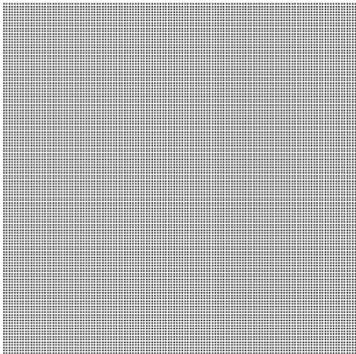
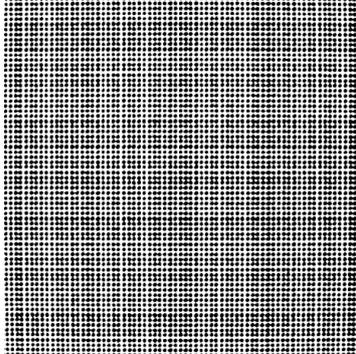
	
	

**Observaciones:**

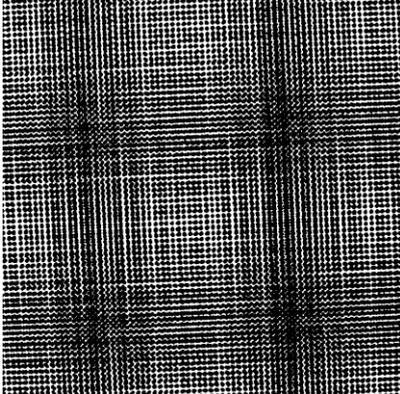
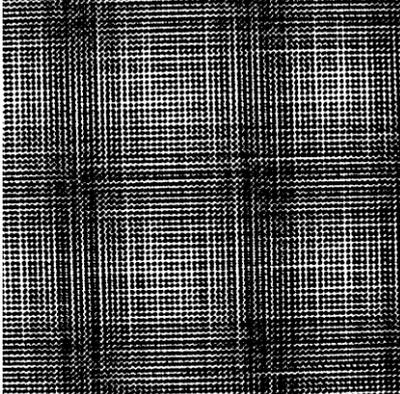
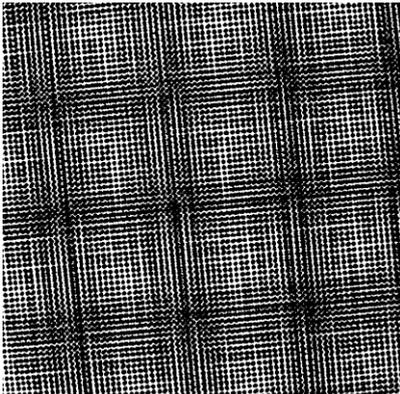
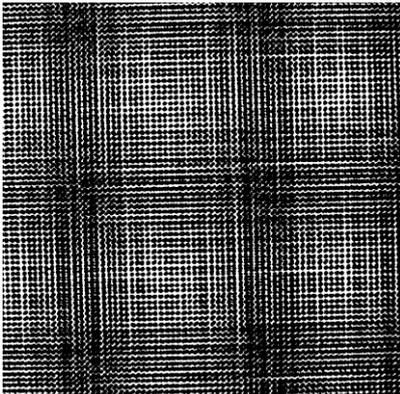
Al utilizar una plantilla que tiene los puntos más gruesos y más distanciados unos de otros, se pierde precisión a la hora de detectar las vibraciones. Esta plantilla de puntos es capaz de producir interferencias de moiré al sufrir rotaciones producidas por la vibración. Las interferencias producidas no resaltan lo suficiente debido a que los puntos están separados y se necesitaría una mayor rotación para producir una interferencia de moiré de mayor calidad.

Nombre de la plantilla:

**Plantilla puntos redondos.  
Grosor de línea 0.09 mm - Espaciado entre puntos 0.36 mm.**

Imagen del patrón.	Imagen captada por la cámara	Configuración de la aplicación utilizada
		

Imágenes resultantes calculadas.

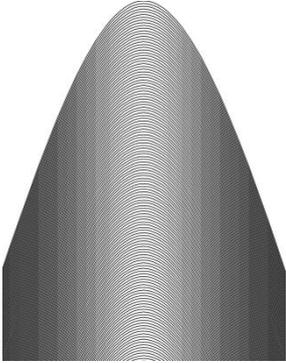
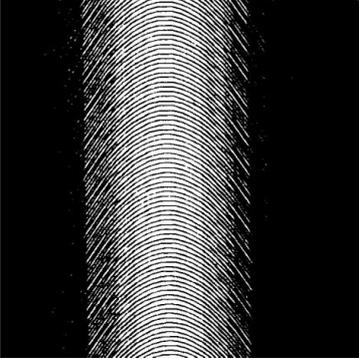
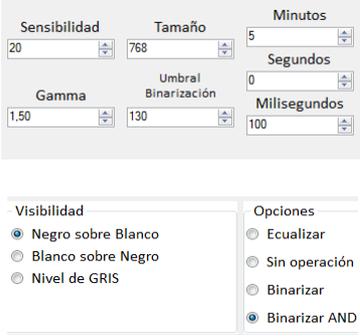
	
	

**Observaciones:**

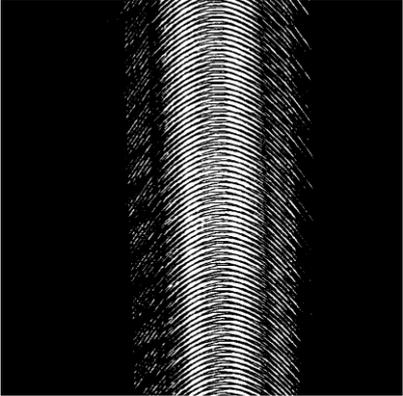
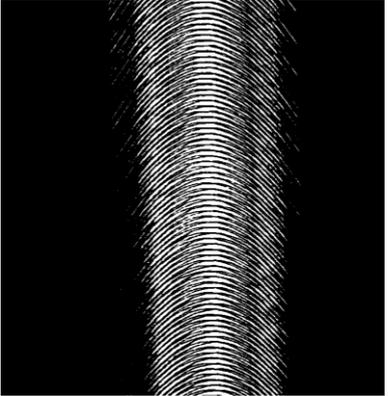
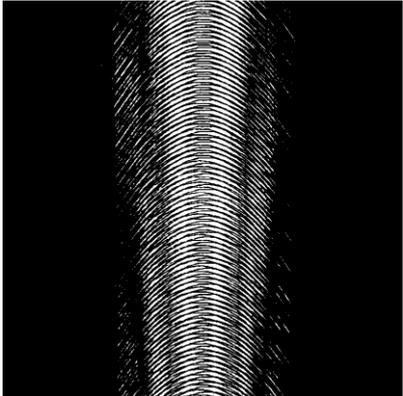
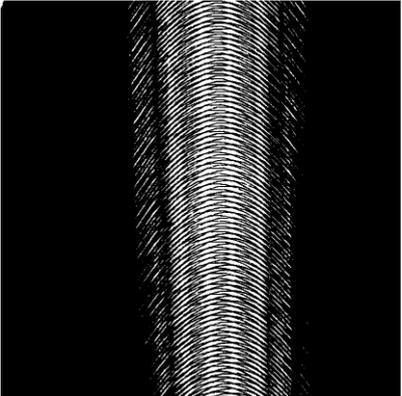
Al utilizar una plantilla de un grosor de punto menor y un espaciado entre ellos más pequeño, el sistema es capaz de detectar y producir interferencias de moiré pronunciadas para un pequeño movimiento de rotación sufrido por la plantilla de puntos. Como consecuencia de utilizar esta plantilla es la obtención de interferencias de moiré más oscuras y finas, lo que significa un sistema más sensible y preciso.

Nombre de la plantilla:

**Plantilla curva sinusoidal 1.**  
**Grosor de línea 0.09 mm - Espaciado entre líneas 0.36 mm.**

Imagen del patrón.	Imagen captada por la cámara	Configuración de la aplicación utilizada
		

**Imágenes resultantes calculadas.**

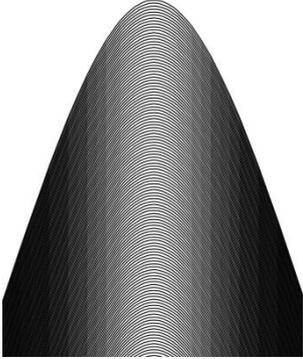
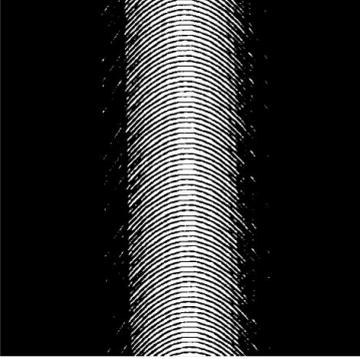
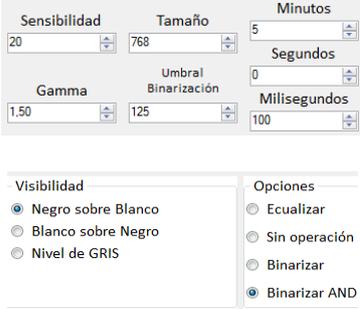
	
	

**Observaciones:**

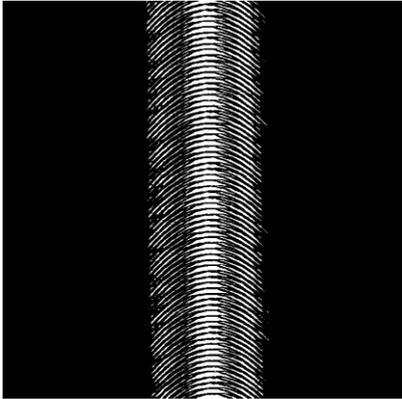
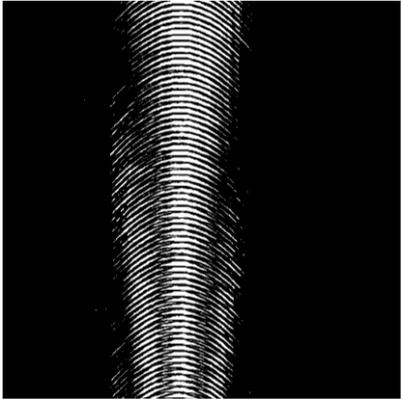
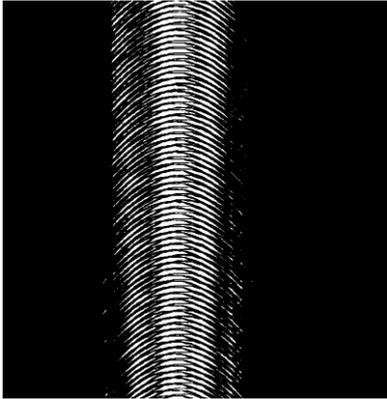
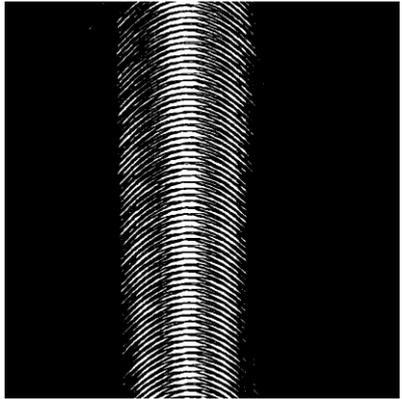
El inconveniente de utilizar las plantillas de curvas sinusoidales es que la cámara solo capta correctamente una parte de la curva, ya que en los extremos de la curva las líneas se solapan. Al captar únicamente la parte donde las líneas están más separadas, se pierde precisión a la hora de detectar las vibraciones. No obstante, esta plantilla es capaz de crear interferencias de moiré significativas al sufrir pequeñas vibraciones en el plano horizontal y rotaciones.

Nombre de la plantilla:

**Plantilla curva sinusoidal 1.  
Grosor de línea 0.13 mm - Espaciado entre líneas 0.39 mm.**

Imagen del patrón.	Imagen captada por la cámara	Configuración de la aplicación utilizada
		

Imágenes resultantes calculadas.

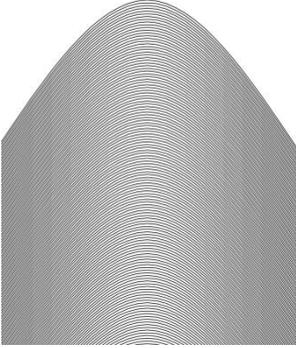
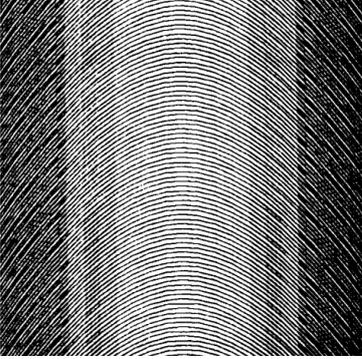
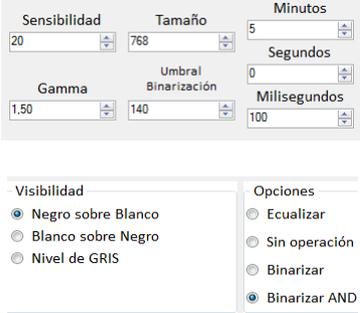
	
	

**Observaciones:**

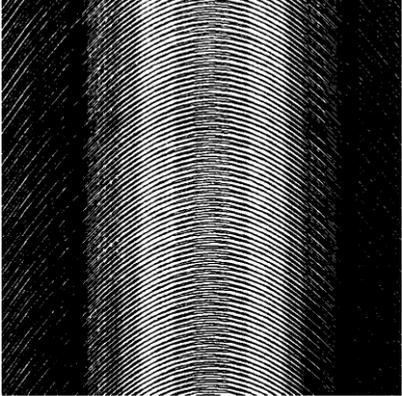
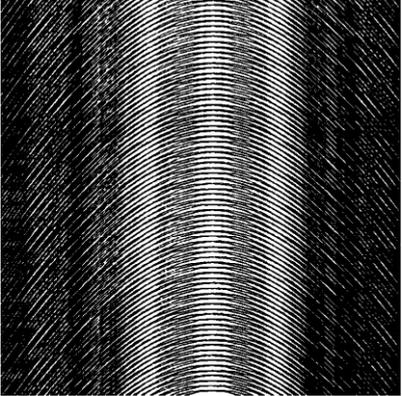
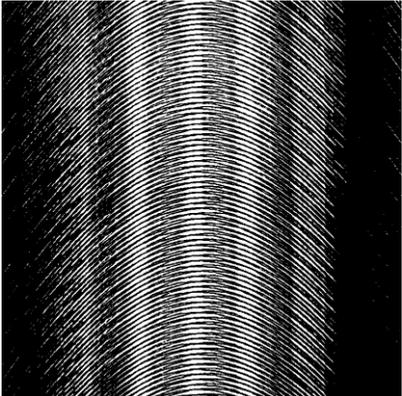
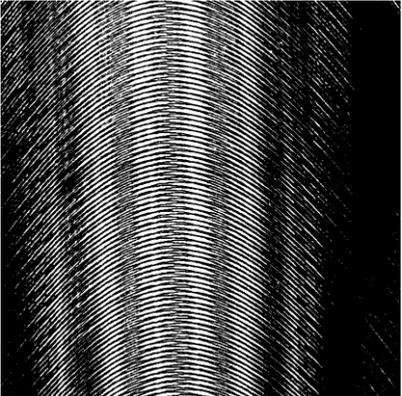
Si utilizamos una plantilla de curva sinusoidal con el mayor grosor de línea (0.13 mm), vemos como la zona donde la cámara capta de manera correcta la separación de las líneas es bastante estrecha. Como ventaja de usar un grosor de línea mayor es la obtención de interferencias de moiré más oscuras al sufrir la plantilla vibraciones de menor magnitud, por lo que nuestro sistema es más sensible y eficaz.

Nombre de la plantilla:

**Plantilla curva sinusoidal 2.**  
**Grosor de línea 0.09 mm - Espaciado entre líneas 0.36 mm.**

Imagen del patrón.	Imagen captada por la cámara	Configuración de la aplicación utilizada
		

**Imágenes resultantes calculadas.**

**Observaciones:**

Si utilizamos una plantilla de curva sinusoidal de mayor periodo que la curva 1, la zona donde las líneas mantienen su espaciado y se captan correctamente es mayor. Esta plantilla capta de manera eficaz las vibraciones en el plano horizontal y pequeñas rotaciones sufridas en la plantilla. Al tener una mayor zona donde se puede crear y distinguir la interferencia de moiré, esta plantilla produce un mayor número de rayos oscuros.

## 5. Conclusiones.

El objetivo del proyecto ha sido desarrollar un sistema capaz de detectar pequeñas vibraciones y movimientos a partir del conocido efecto moiré. Este efecto está basado en la aparición de una trama o patrón llamada interferencia moiré al superponer, desplazar, rotar y/o escalar dos tramas de patrones de líneas, puntos o curvas una con respecto a la otra.

En este proyecto se han estudiado alguno de los parámetros que podían influir en el funcionamiento de nuestro sistema de detección de vibraciones para diseñar el prototipo de manera que fuese lo más sensible posible a la hora de detectar las vibraciones y evitar las interferencias o problemas que podían crear de los elementos que formaban el sistema. Se ha realizado un estudio sobre los principales campos en los que se iba a basar nuestro proyecto: el fenómeno de moiré, el péndulo simple, los sismógrafos, y la visión por ordenador.

Se han realizado veinticuatro plantillas de patrones de círculos concéntricos, patrones de líneas paralelas y patrones de puntos, combinando dos de los parámetros principales que influyen a la hora de crear las interferencias de moiré, el grosor de línea y el espaciado entre líneas. Se han realizado ensayos con cada una de estas plantillas para estudiar la capacidad de detección del sistema al sufrir las plantillas ciertos tipos de vibración.

Como resultado de estos ensayos, se ha constatado que una plantilla puede resultar muy sensible a la hora de detectar un tipo de vibración (como desplazamientos en una dirección horizontal), pero no ser capaz de detectar otro tipo de vibración (como la rotación).

Las plantillas más efectivas a la hora de detectar vibraciones en todas las direcciones del plano horizontal son las plantillas de patrones de círculos concéntricos. Por otro lado, las plantillas de patrones de líneas y de puntos han sido las que mejores resultados han proporcionado para detectar pequeñas rotaciones, pero apenas ha sido posible detectar vibraciones o pequeños desplazamientos en el plano horizontal. Por último, las plantillas de curvas sinusoidales han resultado útiles en la detección de pequeñas rotaciones y de desplazamientos en el plano horizontal.

Se ha estudiado la influencia de alguno de los parámetros de diseño de las plantillas en la aparición de interferencias de moiré. La aparición de los patrones o interferencias de moiré al superponer dos patrones dependen del grosor de línea utilizado y del espaciado entre líneas. Si se utilizan las plantillas que tienen el mayor grosor de línea posible y el menor espaciado entre ellas, la visibilidad al ojo humano de la interferencia de moiré es mayor. El inconveniente de esta configuración de parámetros es que no es posible utilizarla en todos los tipos de patrones desarrollados, debido a la dificultad de captar y distinguir la separación de los elementos que formaban el patrón (por ejemplo en los patrones de puntos). Esta configuración de parámetros para la plantilla, unida a una adecuada elección de tipo de plantilla, aporta al sistema una mayor capacidad de

detección de vibraciones y aumenta la sensibilidad del sistema de detección de vibraciones.

Como conclusión, en este proyecto se ha utilizado el efecto de moiré aplicado a la detección de pequeñas vibraciones. Se podrían realizar algunas modificaciones en el sistema que aumentarían la sensibilidad y la capacidad de detección de vibraciones del sistema, y también se podría estudiar otras posibles aplicaciones del fenómeno de moiré. Si se modificara el prototipo de manera que se elimine toda la interferencia del sistema con el resto de entorno y obtuviéramos un sistema completamente independiente, se podría estudiar la utilización del fenómeno de moiré para detectar y demostrar la rotación de la tierra.

## **6. Agradecimientos.**

El autor desea expresar su gratitud a todas esas personas que lo han ayudado a desarrollar este trabajo. Principalmente gracias a Pedro María Alcover Garau, director del Trabajo de Fin de Grado, por su confianza depositada en mí para desarrollar este proyecto juntos, su ayuda durante la realización del trabajo y su capacidad de hacerme trabajar al máximo rendimiento durante estos meses.

Gracias a la Universidad Politécnica de Cartagena por cederme un laboratorio donde poder desarrollar este proyecto y gracias también a Carlos Fernández-Isla y Pedro Javier Navarro por ayudarme en el desarrollo del prototipo.

Por último, quiero agradecer a todas esas personas externas a la universidad: familiares, amigos y compañeros de carrera, su apoyo y ánimos durante estos años y en especial en esta última etapa del Grado de Ingeniería Mecánica.

## 7. Bibliografía.

- [1] Alcover, P. M. (2017). *Moiré interferences in the map of orbits of the Mandelbrot Set*. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 42, 545-559. DOI: 10.1016/j.cnsns.2016.06.016.
- [2] Amidror, I. (2000). *The theory of the moiré phenomenon*. Volume I: Periodic Layers. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic. ISBN: 978-1-84882-180-4.
- [3] Glassner, A. (1997). *Inside moiré patterns*. IEEE Computer Graphics and Applications, 17(6), 97-101. DOI: 10.1109/38.626975
- [4] Ortega, M. R. (1989-2006). *Lecciones de Física (Volumen 1)*. Monografías y textos. ISBN: 84-404-4290-4.
- [5] Franco, Á. *El péndulo simple*. Dinámica de la partícula. Fecha de consulta: 27 de Febrero de 2017.  
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/trabajo/pendulo/pendulo.html>
- [6] Tipler, P.A. & Mosca, G. (2012). *Física para la ciencia y la tecnología (6ª Edición)*. Ed.Reverté. ISBN 978-84-291-4429-1.
- [7] Marion, J. B. (1996). *Dinámica clásica de las partículas y sistemas*. Ed.Reverté. ISBN: 84-291-4094-8.
- [8] Ganot, A. (1862). *Tratado de Física experimental y aplicada y de meteorología con una numerosa colección de problemas (3ª Edición)*. Editor Bailly-Baillièrè.
- [9] Beristain, S., Lizana, P. & Redondo, J. N. (2002). *Diseño de un Sismógrafo Conectado a una Computadora*. Científica. ISSN: 1665-0654.
- [10] Espíndola, J. M., & Jiménez, Z. (1994). *Terremotos y ondas sísmicas (Vol. 1)*. ISBN: 968-36-3709-4.
- [11] Ugalde, A. (2009). *Terremotos: cuando la tierra tiembla (Vol. 10)*. Editorial CSIC-CSIC Press. ISBN: 978-84-00-08914-6.
- [12] Llarena, M., Cattapan, A. & De Luca, A. (2001). *Ondas sísmicas y la Estructura interna de la Tierra: una aproximación desde la Historia de la Ciencia*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, (9.1), 13-20. ISSN: 1132-9157.
- [13] De la Escalera, A. (2001). *Visión por computador, fundamentos y métodos*. ISBN 84-205-3098-0.
- [14] Alcalá, J.R & Navarro, G. (2008). *Una introducción a la imagen digital y su tratamiento*. ISBN: 978-84-691-4161-8.