



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

# Sistema de interferencia en rojo como innovación del código de barras

**T E S I S**

que para obtener el grado de  
**L I C E N C I A D O   E N   T E C N O L O G Í A**

PRESENTA:

**Héctor Isaías Zapata Rodríguez**

Directora de Tesis:

**ANA LEONOR RIVERA LÓPEZ**

Codirector de Tesis:

**FRANCISCO FERNÁNDEZ ESCOBAR**

**Querétaro, México**

**Agosto 2012**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| <b>Resumen</b> .....   | 3  |
| <b>Abstract</b> .....  | 3  |
| Agradecimientos.....   | 4  |
| <b>1. Introducción</b> .....   | 5  |
| <b>2. Sistemas de códigos de barras</b> .....                        | 7  |
| 2.1. Un breve recorrido en la historia de los códigos de barras..... | 7  |
| 2.2 Los sistemas de códigos de barras.....                           | 9  |
| 2.2.1. Lectura de los códigos de barras unidimensionales.....        | 10 |
| 2.2.2. Lectura de los códigos de barras bidimensionales.....         | 11 |
| 2.2.3. Sistema de lectura mediante escaneo láser.....                | 11 |
| 2.2.4. Sistema de lectura mediante escaneo lineal.....               | 12 |
| 2.3 Tipos de códigos de barras.....                                  | 13 |
| 2.3.1. Características de las simbologías.....                       | 13 |
| 2.3.2. Tipos de simbologías de códigos de barras.....                | 17 |
| <b>3. Patrones de Moiré</b> .....                                    | 21 |
| 3.1. Ondas.....  | 21 |
| 3.2. Propagación de ondas.....                                       | 22 |
| 3.3. Superposición de ondas.....                                     | 23 |
| 3.4. Principio de Huygens.....                                       | 25 |
| 3.5. Interferencia.....  | 25 |
| 3.5.1. Experimento de Young.....                                     | 26 |
| 3.5.2. Interferencia producida por dos fuentes sincronizadas.....    | 26 |
| 3.5.3. Irradiancia.....  | 27 |
| 3.6. Patrones de Moiré.....  | 30 |
| <b>4. Diseño del sistema</b> .....                                   | 32 |
| 4.1. Elaboración de las rejillas.....                                | 32 |
| 4.1.1. Materiales.....   | 32 |
| 4.1.2. Metodología.....  | 33 |
| 4.1.3. Pruebas de iluminación y velocidad de las rejillas.....       | 34 |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.2. Evaluación de las componentes para el código de barras.....   | 37        |
| 4.2.1. Materiales para la elaboración del montaje para determinación<br>de la calidad de la rejilla en función de su simetría..... | 37        |
| 4.2.2. Montaje preliminar para la evaluación de la calidad de las rejillas.....  | 37        |
| 4.2.3. Materiales para la medición del voltaje de salida del fototransistor.....   | 38        |
| 4.2.4. Metodología para la medición del voltaje de salida.....   | 38        |
| 4.3. Montaje para la elección de resistencia de carga del fototransistor en función de<br>la distancia e intensidad luminosa.....  | 39        |
| 4.3.1. Materiales para la medición .....   | 39        |
| 4.4. Montaje experimental como simulación de un dispositivo industrial<br>para códigos de barras.....                              | 39        |
| 4.4.1. Materiales del experimento para medir la intensidad luminosa.....   | 39        |
| 4.4.2. Diseño y montaje del experimento para medir la irradiancia.....   | 40        |
| 4.5. Detectores.....   | 42        |
| 4.5.1. Materiales para la detección.....   | 42        |
| 4.5.2. Elaboración de la matriz de fotodiodos.....   | 42        |
| 4.5.3. Elaboración del circuito negador.....   | 43        |
| 4.5.4. Elaboración del espejo de LED's.....  | 44        |
| 4.5.5. Metodología de la medición.....   | 46        |
| <b>5. Resultados y discusión.....</b>  | <b>47</b> |
| 5.1. Rejillas elaboradas.....  | 47        |
| 5.2. Evaluación de las rejillas.....   | 50        |
| 5.2.1. Voltaje de salida de un fototransistor en función de la distancia.....  | 50        |
| 5.2.2. Evaluación de la calidad de las rejillas.....   | 51        |
| 5.3. Montaje.....  | 52        |
| <b>6. Conclusiones.....</b>  | <b>55</b> |
| Bibliografía.....  | 57        |
| Apéndice: Derechos de autor registrados.....   | 59        |
| Dedicatorias.....  | 66        |

## Resumen

Se presenta el diseño, construcción y pruebas de un prototipo para generar y detectar patrones de interferencia de luz roja con el fin de hacer un sistema de codificación. Las bandas de codificación son generadas por un láser de estado sólido en rojo cuyo haz atraviesa rejillas construidas ad-hoc con patrones de Moiré producidas por técnicas fotoquímicas y de programación. Un circuito impreso de fotodiodos comerciales de rojo montado en un riel óptico asegura la reproducibilidad del experimento y permite cuantificar la intensidad luminosa en diversas zonas del patrón detectado. El prototipo funciona adecuadamente permitiendo el desarrollo de rejillas de bajo costo de producción que podrían utilizarse para codificación.

## Abstract

Design, construction and testing of a prototype for generating and detecting interference patterns of red light are presented with the goal to make a codifying system. Codifying bands are generated by a red solid state laser whose beam is transmitted through grids constructed ad-hoc with Moiré patterns produced by photochemical and software techniques. A Printed Circuit Board of commercial red photodiodes mounted on an optical rail ensures experiment reproducibility and allows quantifying the light intensity in different areas of the selected pattern. Prototype works fine reducing costs significantly.

## Agradecimientos

A la Dra. Ana Leonor Rivera López mi directora de tesis por su apoyo brindado a lo largo de la carrera en la Licenciatura en Tecnología del cual unas cuantas palabras no me bastarían para expresar mi gratitud.

Al M. en C. Francisco Fernández Escobar mi codirector de tesis por la parte de construcción y experimentación y de modo especial por sus enseñanzas y legado que ha formado en mí acerca de los que haberes científicos y de la vida.

Al Sr. Rene Preza Cortéz por el apoyo brindado en el montaje del experimento, así como permitirme apreciar el espíritu y vasta experiencia en el arte de la maquinaria siendo un ejemplo del trabajo y esmero que cada uno podemos bien tomar de ejemplo.

Al Dr. Miguel de Icaza por su manera tan peculiar de ver la física y las matemáticas la cual nos impregnó a lo largo de nuestros cursos, por sus asesorías, consejos y por enseñarme el único método válido de aprendizaje.

A la Universidad Nacional Autónoma de México porque independiente de su excelencia académica son sus ideales y su espíritu los que llevaré siempre en mi corazón.

Al Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) por la impartición de la Licenciatura en Tecnología que permite la formación de nuevos recursos para el bienestar humano.

Al Laboratorio de Ondas de Choque y en especial al Dr. Achim Loske por darnos las facilidades de realizar los experimentos dentro del mismo.

Al M. en I. Ángel Luis Rodríguez Morales por apoyo brindado en la parte experimental.

Al M. en C. Guillermo Vázquez Sánchez por el préstamo del equipo para la toma de fotografías.

A la Dra. Minerva Robles por sus asesorías y consejos en temas de óptica.

A mis sinodales por la revisión y correcciones pertinentes a la tesis.

# 1 Introducción.

*“A good beginning is half the work”  
Proverbio Irlandés.*

En la actualidad es difícil imaginar nuestro mundo sin la implementación de sistemas de códigos de barras, desde las aplicaciones más usuales en los productos comerciales, hasta la identificación de boletos e inclusive la organización de especies [1]. Su presencia en diversos entornos es clara, por lo que surge el interés de proponer nuevas tecnologías basadas en sistemas más rápidos, eficientes, económicos y que permitan codificar de manera precisa una mayor cantidad de información [2,3]. Dentro de este marco nace la propuesta del presente trabajo en el que se plantea la generación de un sistema alternativo de codificación, tema de gran relevancia tecnológica.

Desde mediados del siglo XX aparece como sistema de codificación comercial la tecnología del código de barras [4]. Este sistema es leído con una simbología que indica el modo en que se codifican los caracteres de los mensajes, así como los marcadores de entrada y salida además del espaciado. Estos factores tienen tres variantes principales: las dimensiones, la continuidad y el ancho de las bandas [5]. Actualmente el sistema de código de barras más utilizado es el código universal del producto (UPC por sus siglas en inglés “Universal Product Code”), el cual consiste únicamente de números, con divisiones específicas en ciertas zonas, con una diversidad en el ancho de las barras [5-8].

En todos los sistemas de códigos de barras actuales, la información es almacenada a través de una serie de barras oscuras de distintos anchos y separaciones que codifican números. Los números se leen por la transmisión de un haz de luz a través de una serie de zonas claras y oscuras impresas por técnicas usuales que generan una señal que es interpretada por un software decodificador específico.

Una forma alternativa de generar zonas oscuras y claras para codificación puede usar la interferencia de haces luminosos al atravesar una rejilla [9-11]. Este fenómeno surge por la superposición de las ondas luminosas. Dependiendo de la geometría de la rejilla será el patrón de interferencia que se observará. En particular, de gran interés en la Física, se encuentran los patrones de Moiré [12-17]. Dichos patrones se crean, por ejemplo, cuando dos rejillas transparentes iguales se traslapan a distintos ángulos, o cuando tienen tamaños o formas un poco distintas, es decir, se deben a la superposición de los haces luminosos al atravesar las rejillas. La interferencia es más evidente ante haces luminosos coherentes por lo que es deseable utilizar láseres para generar patrones de Moiré mejor definidos [17].

Con este fenómeno en mente se plantea este trabajo que utiliza patrones de Moiré producidos por un láser de estado sólido (rojo) al cruzar una rejilla para construir un

sistema con el cual se puedan hacer códigos equivalentes a los de barras. Para disminuir costos, las rejillas se construyen mediante técnicas fotográficas con película fotosensible generadas por un programa diseñado ad-hoc. Los patrones formados por luz roja incidente son detectados por circuitos electrónicos diseñados para clasificar la rejilla estableciendo así un sistema de codificación novedoso. Una revisión cuidadosa de la literatura permite afirmar que no existe ningún sistema análogo al aquí propuesto.

En esta tesis se presenta un prototipo de un sistema óptico de codificación por medio de interferencia de radiación roja que puede usarse como código de barras. El trabajo se organizó en capítulos. En el capítulo 2, se revisan el funcionamiento y los estándares comerciales de los códigos de barras actualmente en uso. En el capítulo 3 se incluye una breve revisión del tema de interferencia de radiación electromagnética, con el fin de entender que son los patrones de Moiré. El capítulo 4 presenta el diseño y construcción del prototipo de codificación en rojo usando la interferencia de la radiación de un láser de estado sólido, incluyendo la técnica para la fabricación de las rejillas de difracción, la construcción de los circuitos electrónicos para la captura y la codificación de los patrones de Moiré y el montaje del dispositivo óptico. El capítulo 5 presenta los resultados obtenidos del prototipo y se señalan las ventajas del sistema respecto a los dispositivos comerciales. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de este trabajo.



## 2 Sistemas de códigos de barras.

*"I just extended the dots and dashes downwards and made narrow lines and wide lines out of them."  
Joseph Woodland*

En este capítulo se plantea un bosquejo histórico de los sistemas de códigos de barras y una descripción detallada de los mismos.

### 2.1 Un breve recorrido en la historia de los códigos de barras.

La búsqueda de la recolección rápida de datos fue propuesta por primera vez por una cadena proveedora de alimentos en 1948 [1]. Bernard Silver escuchó en los pasillos del Drexel Institute of Technology en Filadelfia que se necesitaba un sistema capaz de capturar la información del producto final automáticamente a la salida. Silver consideró que era posible construir dicho sistema y se lo mencionó a un amigo de él, Joseph Norman Woodland. Su primera idea fue la de usar patrones de tinta que irradian mediante luz ultravioleta. Esta propuesta funcionó, pero tenía problemas de impresión y su costo era muy elevado. Actualmente dichos patrones fluorescentes se utilizan como sistemas de seguridad para la impresión de billetes [18].

Tiempo después Woodland concibió la idea de un código que usarán barras usando elementos de dos tecnologías conocidas en ese tiempo el código de Morse y el audio de películas [4]. Woodland recuerda en sus propias palabras "Solo extendí los puntos y los guiones hacia abajo e hice líneas estrechas y gruesas a partir de las mismas". Para leer los datos, él hizo uso de la tecnología de Lee de Forest para el sonido de 1920 [3]. De Forest había impreso un patrón que variaba los grados de transparencia en el borde del film, en el que incidía luz a través de la imagen mientras esta corría. Un tubo sensible en el otro lado cambiaba el brillo a señales eléctricas, las cuales eran convertidas en sonido. Woodland planeó adoptar este sistema mediante la reflexión de la luz de sus líneas anchas y delgadas usando un tubo similar para interpretar los resultados. Originalmente considero el llamado bull's-eye code, donde en lugar de barras se tienen círculos concéntricos, como las dianas que hay en el tiro con arco con flecha (ver figura 1). Woodland y Silver sometieron su primera patente en 1949 mientras continuaba investigando la forma adecuada para los códigos [4].

En 1951 Woodland y Silver montaron el primer lector de código de barras en la sala de la casa de Woodland en Binghamton, Nueva York. El dispositivo era del tamaño de una mesa y tenía que ser envuelto por una superficie impermeable de aceite negro, para que no pasara la luz del sol. Constaba de dos elementos principales: un bulbo incandescente de 500 W como fuente de luz y un tubo fotomultiplicador RCA935, diseñado para sistemas

de sonido como lector [5]. Woodland acopló el tubo a un osciloscopio. Entonces el movió un papel marcado con líneas a través de un rayo que era emitido de la fuente de luz. El rayo reflejado era tan intenso que el bulbo incendió el papel. No obstante se obtuvieron los resultados deseados, mientras el papel era movido, la señal del osciloscopio saltaba.

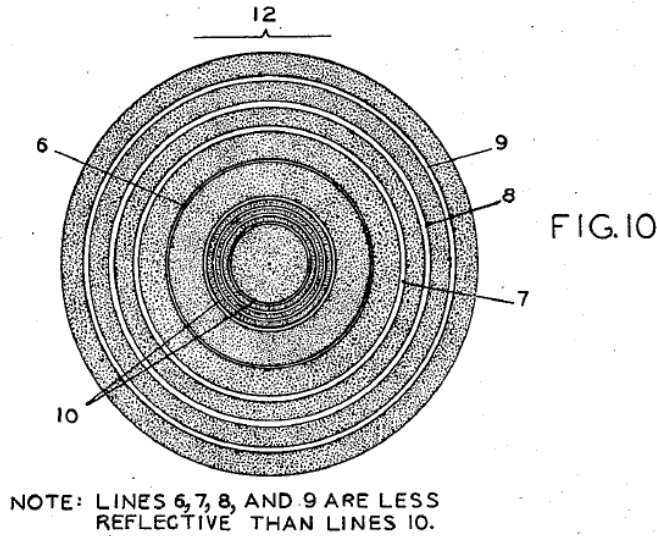


Figura 1. Código de barras tipo bull's eye  
(adaptado de la patente de Woodland-Silver [4]).

Con el paso del tiempo, Collins puso en práctica un sistema similar para la identificación de ferrocarriles con el fin de almacenar los vehículos en plataformas individuales [19], pero no fue hasta que fue contratado por la corporación Computer Identics que el código de barras se optimizó y redujo costos [20]. Este nuevo sistema usaba láseres, siendo más económico que el tubo de Woodland. Una franja delgada se movía sobre el código de barras, el cual era absorbido por rayas negras y reflejado por las rayas blancas. Estos láseres podían leer la información desde distancias muy grandes y barrer todo el registro como un faro, cientos de veces en un segundo, con el cual el lector podía leer el código de muchas maneras distintas. Eso proveyó una gran ayuda en descifrar etiquetas arrugadas o rasgadas [2].

Con esta nueva tecnología los mercados fueron revolucionados, uno de estos sucesos surgió mediante la invención de Jon H. Myer, Robert L. Hasslinger y Francis P. Webster, los cuales mediante un nuevo sistema generaron lo que hoy conocemos como carriles de supermercado (ver figura 2) [21].

Con estos mecanismos se podían generar bases de datos que podían ser analizadas fácilmente, los analistas conectaban en cada compra individual las compras con compradores específicos. Un ejemplo de uso fue en la industria de la carne, que pensaban que la mayoría de sus compradores, debido a los precios tan altos debían ser adquiridos por gente de clase alta, no obstante descubrieron que la mayoría de sus compradores eran rurales. Con ese conocimiento, hizo que los precios se ajustaran al poder adquisitivo de sus compradores [4].

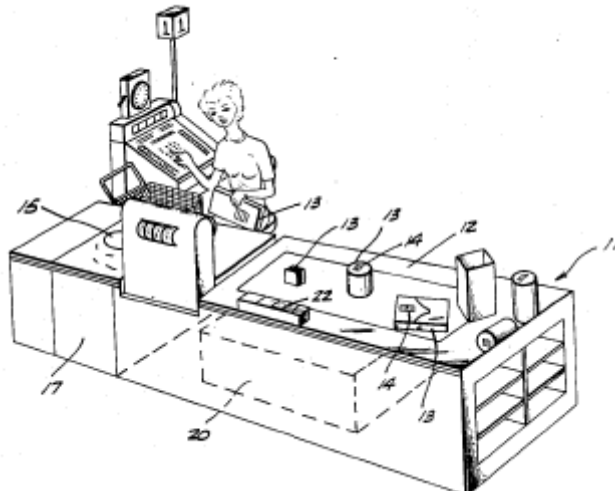


Figura 2. Figura original de carril de supermercado tomada de la patente de Myer, Hasslinger y Webster [21].

Este sistema aún tiene un gran potencial, el siguiente paso es que los compradores mismos escaneen sus productos. Algunos supermercados están probando escanear cada artículo cuando el cliente lo levante del estante y lo cheque a la salida de manera automática [3].

## 2.2 Los sistemas de código de barras.

Actualmente el sistema de código de barras es leído con una simbología que indica el modo en que se codifican los caracteres de los mensajes, así como los marcadores de entrada y salida además del espaciado [5,6]. Estos factores tienen 3 variantes principales: las dimensiones, la continuidad y el ancho de las bandas [5]. Comúnmente se utiliza una dimensión (sólo leen cada línea negra o blanca) o dos dimensiones (leen tanto el eje x como el eje y). El segundo factor tiene que ver con el modo del código, si es discreto o continuo. En el modo discreto, los caracteres terminan y comienzan con líneas y el espaciado se pasa por alto mientras que este no sea lo suficientemente amplio como para parecer que el código termina. En la forma continua los caracteres colindan, uno termina con un espacio y una barra o viceversa. El último factor es el ancho de las bandas, que puede ser de dos tamaños donde uno es estrecho y el otro amplio, o de múltiples anchuras donde en cada uno hay distinto módulo.

Entre los sistemas de codificación más utilizado esta el código universal del producto UPC el cual consiste únicamente de números, con divisiones específicas en ciertas zonas, con una diversidad en el ancho de las barras [5-8].

### 2.2.1 Lectura de los códigos de barras unidimensionales.

Los códigos de barras se leen mediante la emisión de una luz que incide sobre el código. En caso de que se encuentre con un espacio la luz se refleja y si encuentra una barra es absorbida (ver figura 3). El haz barre el código de barras para posteriormente mediante un sistema óptico hacer que incida y pueda ser leído por el arreglo de sensores que finalmente la amplificarán y compararan con la base de datos mediante un software decodificador [5-8].

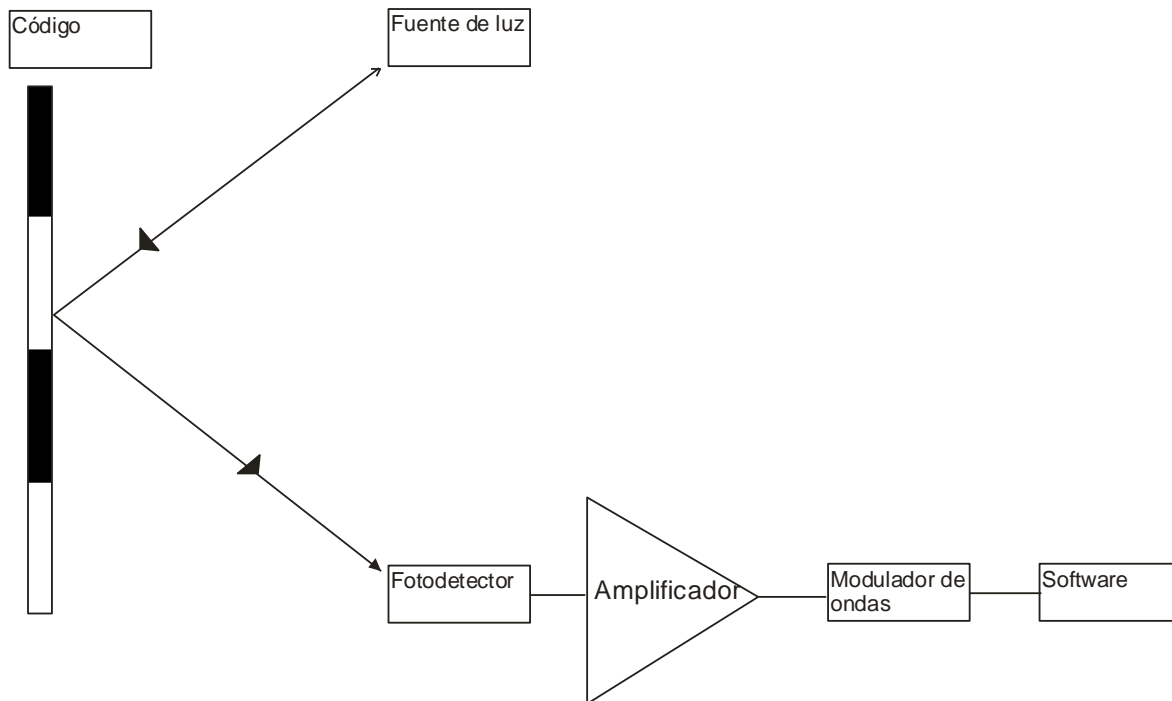


Figura 3. Esquema básico del funcionamiento de un sistema de código de barras comercial.

La luz reflejada es leída por celdas fotosensibles, las cuales usualmente mandan una señal eléctrica pulsada con un valor alto cuando la luz es absorbida y bajo cuando es reflejada. El ancho de las barras se puede determinar por el tiempo en que la señal permanece en cada uno de esos estados. El registro de la intensidad luminosa (ver figura 4) posteriormente se codifica dependiendo de su simbología, en base de los factores descritos anteriormente. Los códigos están hechos para ser leídos de derecha a izquierda, no obstante se pueden leer en diversas formas y el lector con el software adecuado puede llegar a decodificarlos.

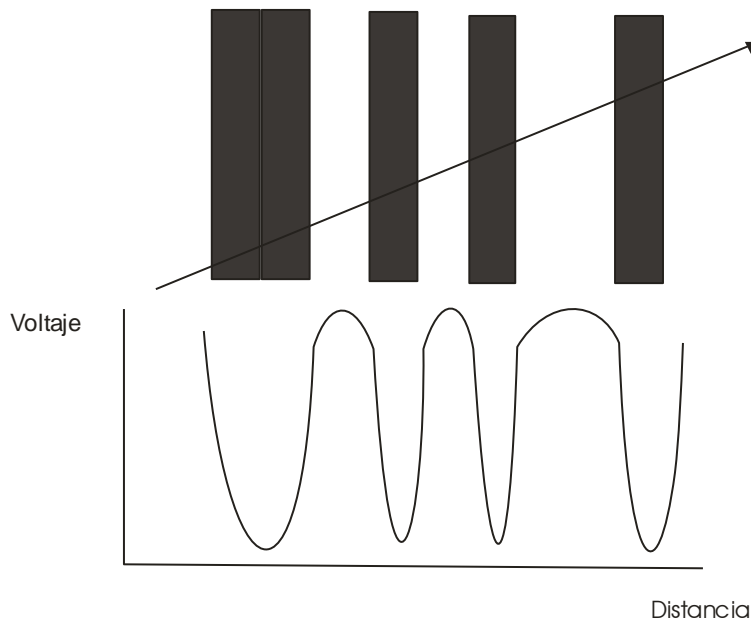


Figura 4. Voltaje de la luz transmitida en función de la distancia. Cuando el detector se encuentra con una barra baja su voltaje y si es un espacio sube.

### 2.2.2 Lectura de códigos de barras bidimensionales.

A diferencia de los códigos de barras que se leen en una dimensión, los códigos bidimensionales son capaces de leer en dos direcciones, aumentando el rango de caracteres a codificar. Se utilizan dos métodos de lecturas, el primero es el de patrón de rastreo o “raster” que consiste en leer el código de arriba hacia abajo y de derecha a izquierda. El segundo método es la tecnología CCD (por sus siglas en inglés Charged Coupled Device), similar a las cámaras de videos y máquinas de fax, estos lectores tienen un arreglo bidimensional de foto-sensores que escanean la imagen en su totalidad [7].

En la actualidad existen varios tipos de sistemas para leer códigos de barras, sin embargo se destacan entre ellos dos tipos el de escaneo láser y el de escaneo lineal.

### 2.2.3 Sistema de lectura mediante escaneo láser.

Consiste en detectar la luz proveniente de un láser, la cuál es reflejada por el código de barras, este haz de luz se desplaza mediante espejos móviles hacia atrás y hacia adelante del código. El motor del láser tiene distintas configuraciones que permiten variar el rango, la distancia, la visibilidad, la densidad, etc. Este tipo de configuraciones da la versatilidad necesaria para satisfacer los distintos tipos de requerimientos del cliente [7].

Dado que la señal de barrido proviene de un láser no hay divergencia del haz ya que la luz transmitida es coherente. Esto es una ventaja para leer códigos de barras que necesiten un amplio rango, cuyo código este colocado a una amplia distancia del haz o con una distancia variable. Además, un haz láser es muy brillante lo cual permite localizarlo fácilmente.

La principal desventaja es su alto costo respecto a otros lectores, entre \$500 a \$2000 dólares. Además a una corta distancia suelen ser ineficientes, debido a que tiene partes móviles como los espejos que se puede desalinearse lo que reduce su efectividad de lectura y durabilidad. Dado sus diferentes configuraciones no siempre pueden leer códigos bidimensionales, ni tampoco códigos muy densos y su velocidad de lectura en el caso del dispositivo de mano es lenta respecto a los escáneres de imagen lineal. Finalmente son un poco menos confiables cuando el código está muy mal impreso.

#### **2.2.4 Sistema de lectura mediante escaneo lineal.**

Consiste en la detección de un haz de luz LED (Light Emitting Diode) la cuál es reflejada a través del código de barras. Este sistema debido a sus propiedades de fabricación tiene una cierta divergencia, lo que permite prescindir de espejos móviles [7]. La luz reflejada del código es captada mediante un espejo focal para ser enviada a un arreglo de dispositivo de carga acoplada CCD. Estos dispositivos se utilizan en cámaras, escáneres, faxes, etc.

La divergencia del haz hace innecesarios espejos móviles lo que permite que sus partes sean fácilmente reemplazables. Además de ser de larga duración y bajo precio, trabaja muy bien con códigos a cortas distancias así como de alta densidad. Más aún, su capacidad de codificar etiquetas que tienen mala calidad de impresión, con bajo contraste o que están mal puestas es mayor. También son buenos tanto en dispositivos de mano y fijos con una alta capacidad en ambos. Al ser luz difusa presume que no tiene daños perjudiciales a la vista como los que genera el haz de luz láser. Otra ventaja es que se pueden incorporar a códigos bidimensionales así como códigos en computadoras.

Su principal desventaja, es que estos sistemas no abarcan grandes distancias ni códigos muy amplios. Así mismo llegan a tener problemas en el caso de artículos que tienen una cierta curvatura respecto a la perpendicular. El método y la calidad de lectura dependen del proveedor y el sistema que utilicen para leerse.

## 2.3 Tipos de códigos de barras (Simbologías).

### 2.3.1 Características de las simbologías.

La simbología es el término usado para describir de manera rigurosa la manera en que la información es codificada en anchos de barras y espacios. Un ejemplo que ya se mencionó anteriormente es el código Morse en donde los puntos pueden ser barras estrechas y los guiones barras anchas. Al igual que en la comunicación tanto el emisor (código de barras) como el receptor (lector de códigos de barras) deben de usar el mismo lenguaje y esto sucede con una simbología compatible.

| ASCII | Hex | Símbolo | ASCII | Hex | Símbolo | ASCII | Hex | Símbolo   | ASCII | Hex | Símbolo |
|-------|-----|---------|-------|-----|---------|-------|-----|-----------|-------|-----|---------|
| 0     | 0   | NUL     | 16    | 10  | DLE     | 32    | 20  | (espacio) | 48    | 30  | 0       |
| 1     | 1   | SOH     | 17    | 11  | DC1     | 33    | 21  | !         | 49    | 31  | 1       |
| 2     | 2   | STX     | 18    | 12  | DC2     | 34    | 22  | "         | 50    | 32  | 2       |
| 3     | 3   | ETX     | 19    | 13  | DC3     | 35    | 23  | #         | 51    | 33  | 3       |
| 4     | 4   | EOT     | 20    | 14  | DC4     | 36    | 24  | \$        | 52    | 34  | 4       |
| 5     | 5   | ENQ     | 21    | 15  | NAK     | 37    | 25  | %         | 53    | 35  | 5       |
| 6     | 6   | ACK     | 22    | 16  | SYN     | 38    | 26  | &         | 54    | 36  | 6       |
| 7     | 7   | BEL     | 23    | 17  | ETB     | 39    | 27  | '         | 55    | 37  | 7       |
| 8     | 8   | BS      | 24    | 18  | CAN     | 40    | 28  | (         | 56    | 38  | 8       |
| 9     | 9   | TAB     | 25    | 19  | EM      | 41    | 29  | )         | 57    | 39  | 9       |
| 10    | A   | LF      | 26    | 1A  | SUB     | 42    | 2A  | *         | 58    | 3A  | :       |
| 11    | B   | VT      | 27    | 1B  | ESC     | 43    | 2B  | +         | 59    | 3B  | ;       |
| 12    | C   | FF      | 28    | 1C  | FS      | 44    | 2C  | ,         | 60    | 3C  | <       |
| 13    | D   | CR      | 29    | 1D  | GS      | 45    | 2D  | -         | 61    | 3D  | =       |
| 14    | E   | SO      | 30    | 1E  | RS      | 46    | 2E  | .         | 62    | 3E  | >       |
| 15    | F   | SI      | 31    | 1F  | US      | 47    | 2F  | /         | 63    | 3F  | ?       |

| ASCII | Hex | Símbolo | ASCII | Hex | Símbolo | ASCII | Hex | Símbolo | ASCII | Hex | Símbolo |
|-------|-----|---------|-------|-----|---------|-------|-----|---------|-------|-----|---------|
| 64    | 40  | @       | 80    | 50  | P       | 96    | 60  | `       | 112   | 70  | p       |
| 65    | 41  | A       | 81    | 51  | Q       | 97    | 61  | a       | 113   | 71  | q       |
| 66    | 42  | B       | 82    | 52  | R       | 98    | 62  | b       | 114   | 72  | r       |
| 67    | 43  | C       | 83    | 53  | S       | 99    | 63  | c       | 115   | 73  | s       |
| 68    | 44  | D       | 84    | 54  | T       | 100   | 64  | d       | 116   | 74  | t       |
| 69    | 45  | E       | 85    | 55  | U       | 101   | 65  | e       | 117   | 75  | u       |
| 70    | 46  | F       | 86    | 56  | V       | 102   | 66  | f       | 118   | 76  | v       |
| 71    | 47  | G       | 87    | 57  | W       | 103   | 67  | g       | 119   | 77  | w       |
| 72    | 48  | H       | 88    | 58  | X       | 104   | 68  | h       | 120   | 78  | x       |
| 73    | 49  | I       | 89    | 59  | Y       | 105   | 69  | i       | 121   | 79  | y       |
| 74    | 4A  | J       | 90    | 5A  | Z       | 106   | 6A  | j       | 122   | 7A  | z       |
| 75    | 4B  | K       | 91    | 5B  | [       | 107   | 6B  | k       | 123   | 7B  | {       |
| 76    | 4C  | L       | 92    | 5C  | \       | 108   | 6C  | l       | 124   | 7C  |         |
| 77    | 4D  | M       | 93    | 5D  | ]       | 109   | 6D  | m       | 125   | 7D  | }       |
| 78    | 4E  | N       | 94    | 5E  | ^       | 110   | 6E  | n       | 126   | 7E  | ~       |
| 79    | 4F  | O       | 95    | 5F  | _       | 111   | 6F  | o       | 127   | 7F  | □       |

Figura 5. Código ASCII.

La simbología incluye [5]:

1. Conjunto de caracteres.

Se refiere al rango de caracteres que pueden ser codificados en una simbología dada. En algunos casos pueden ser que sólo contengan números (simbologías numéricas). Otros pueden contener tanto números como el alfabeto. Existen otras que pueden contener los 128 caracteres del código ASCII (American Standard Code for Information Interchange) que se presenta en la figura 5 [22].

2. Tipo de simbología.

Existen dos tipos de simbología, las cuales dependen del espaciado entre caracteres (ver figura 6). El primer tipo es el discreto, en el cual se separa un carácter de su adyacente por un espaciado blanco muy ancho, lo cual permite diferenciar muy bien entre un carácter y otro. El segundo es el continuo, éste comienza con una barra y terminan con un espacio (ver figura 7).

En ambos sistemas el fin de un carácter es indicado por el inicio del siguiente. Las ventajas del discreto es que su impresión es más sencilla, sin embargo, ocupa un mayor espacio. El continuo por su parte puede codificar más caracteres en un menor espacio.

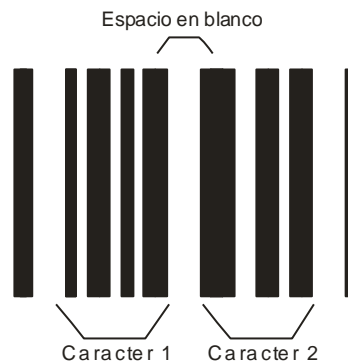


Figura 6. Simbología discreta. La separación entre caracteres es con un espacio en blanco.

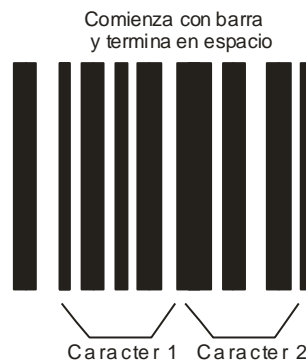


Figura 7. Simbología continua. Los caracteres comienzan con una barra y terminan con un espacio.



### 3. Anchuras de barras.

En la simbología los datos están especificados por el ancho de las barras y los espacios. Existen dos tipos de clasificaciones los que emplean dos tipos de anchura (ver figura 8) y las que tienen múltiples anchuras (ver figura 9). En el caso de las que emplean sólo dos tipos de anchura la proporción entre las barras anchas y estrechas se llama radio. El radio es denotado por la letra N. Las proporciones usuales son de 2 o 3, pero deben ser constantes para una simbología dada. A mayor N, la tolerancia de impresión es mayor.



Figura 8. Dos tipos de anchura: estrecho y ancho.

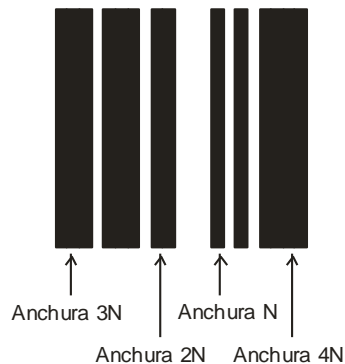


Figura 9. Múltiples tipos de anchura.

Las que emplean más de dos tipos de anchura tienen proporciones generalmente modulares, es decir, que la longitud del carácter es subdividido entre un predeterminado número de módulos y el ancho de una barra o de un espacio es un entero de los módulos (ver figura 9). Estas son continuas y son decodificadas usando el algoritmo edge-to-similar-edge [5]. Esta técnica tiene una medida de las distancias entre bordes similares de elementos adyacentes, es decir, que si se comienza con una barra y hay un espacio se mide la distancia de la barra más la del espacio, luego se determina la distancia del espacio más otra barra, en lugar de medir únicamente la barra o el espacio, Esto permite que las distancias se mantengan ya sea que los elementos crezcan o decrezcan uniformemente.

Los códigos continuos son normalmente llamados códigos (n,k) donde n representa el número de módulos en el ancho de un carácter y k al número de barras y espacios. Usando fórmulas de combinatoria es posible demostrar que el número total de patrones únicos que pueden escribirse en un código (n,k) es de [1]:

$$\frac{(n - 1)!}{(2k - 1)! (n - 2k)!}$$

4. Longitud ajustada o variada.

Como su nombre lo dice se puede tener o no una longitud variable dependiendo de los requerimientos del código (ver figura 10). En casos de seguridad sólo se utiliza la longitud ajustada, mientras que en otros casos en que se necesitan extender la codificación se puede usar una longitud variable [1].



Figura 10. Longitud reducida en dos tercios de un código original.

5. Factor-X.

X es el término utilizado para describir la anchura nominal de los elementos (espacios y barras). Es normalmente calculado como un promedio de los elementos estrechos y por convención es expresado en mils (milésimas de pulgada) [1].

6. Densidad.

Cada simbología difiere en el número de datos que pueden ser codificados en una unidad de longitud, para hacer comparaciones con sentido se usa el factor X (valor de una barra estrecha o espacio). Cabe señalar que la densidad sólo debe ser especificada para datos de caracteres, la longitud total de un símbolo debe incluir caracteres de comienzo y alta, así como caracteres de checado [1].

## 2.3.2 Tipos de simbologías de códigos de barras.

### 2.3.2.1 Código UPC.

El código universal del producto UPC es el que es utilizado en la industria de los supermercados desde 1973 [6]. UPC es un sistema de sistema código así como una simbología, cuya finalidad es la de identificar tanto al producto y quién lo manufacturó. Este código con una longitud ajustada, es numérico, tiene una simbología continua usando cuatro tipos de anchuras. Dos tipos comunes que existen es el tipo A que codifica 12 dígitos (ver figura 11) y el tipo E que codifica 6 dígitos (ver figura 12).

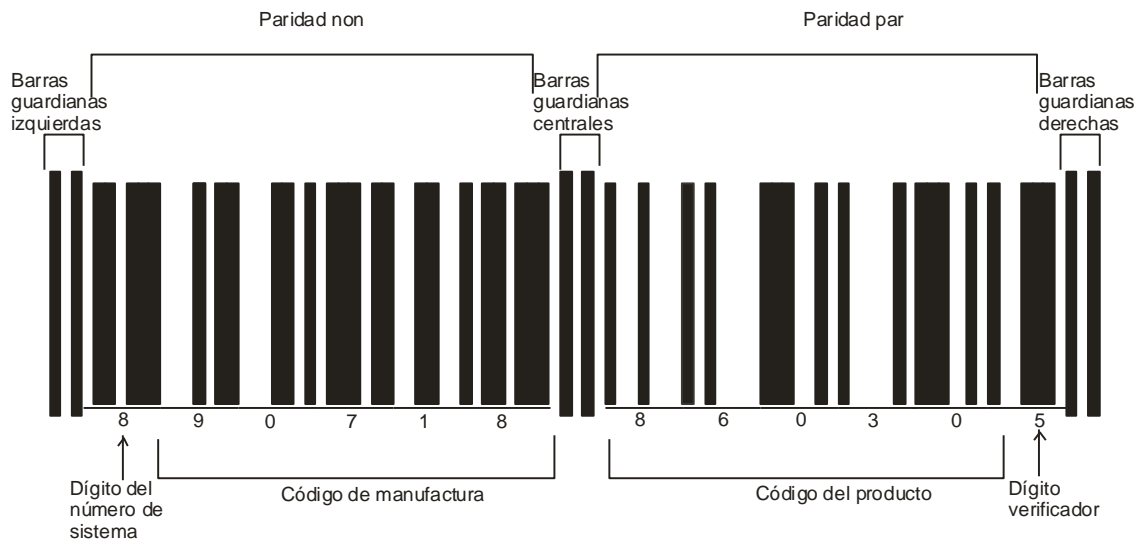


Figura 11. Código de barras UPC A.

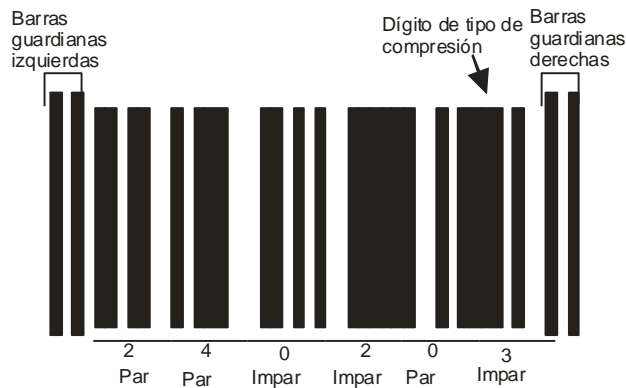


Figura 12. Código de barras UPC E.

El primer dígito del sistema UPC versión A representa el número del sistema es decir el tipo de producto que se está identificando (ver figura 11). Los siguientes cinco dígitos incorporan la información de quien lo manufacturó, y los otros cinco constituyen el código del producto. El último dígito es un verificador que está basado en las cifras que se

codificaron [5]. El UPC tipo A está arreglado en dos mitades. Los primeros seis dígitos y los últimos seis dígitos están separados por barras guardianas centrales. Las barras guardianas pueden pensarse como patrones de encendido y alto. La información está codificada en un modulo que tiene siete de anchura. Este es un código (n,k) del tipo (7,2) el cual tiene únicamente veinte patrones con anchuras de 1, 2, 3, 4. Además dependiendo de la ubicación ya sea que este en los primeros (primera mitad izquierda) o en los últimos seis dígitos (última mitad o derecha), haciendo que tenga una paridad non o par, si es par el número de barras blancas suman un par y si es impar suman un non.

El código tipo E en lugar de tener 12 caracteres consta de sólo 6 (ver figura 12). Este es útil para productos que son pequeños. Los caracteres son envueltos por 2 barras protectoras en el lado derecho y 3 en el lado izquierdo. De los 6 dígitos 3 tienen paridad par y 3 paridad non. Los primeros cinco dígitos son la clave a utilizar, el sexto dígito se usa para especificar el tipo de comprensión [5].

### 2.3.2.2 Código EAN.

El sistema numérico del artículo europeo, EAN (por sus siglas en inglés European Article Numbering System) es un superconjunto del sistema UPC. Un escáner de EAN puede leer un código UPC, pero lo contrario no siempre es cierto. EAN tiene dos versiones la que decodifica 13 y la de 8 dígitos. La versión EAN-13 contiene el mismo número de barras que la versión UPC-A, con la diferencia que el tercer dígito se codifica como si fuera del lado izquierdo es decir con paridad non. El dígito 13 en combinación con el 12 definen dos caracteres de banderas, para la compatibilidad con el UPC, las banderas 00, 01, 03, 04, y 06-09 son asignadas para los Estados Unidos. En lo demás el código es igual al UPC [7]. Un código EAN-8 contiene barras guardianas izquierdas, cuatro dígitos con paridad impar, una barra guardián central, cuatro dígitos con paridad par, así como barras guardianas derechas. EAN-8 codifica dos dígitos de bandera, cinco dígitos de datos y un dígito verificador.

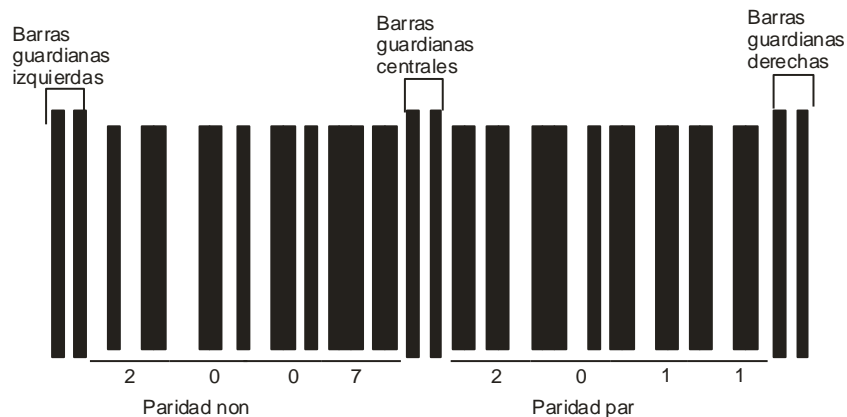


Figura 13. Código de barras EAN-8.

### 2.3.2.3 Codificación por inter-espaciado 2 de 5.

Es una simbología numérica continua de alta densidad y con auto-verificación utilizada en la industria de la distribución. Cada carácter realmente codifica dos dígitos, uno en las barras y otro en espacios (ver figura 14). Consiste en 3 barras anchas y dos barras angostas, igualmente se tienen 3 espacios anchos y 2 espacios estrechos [1].

Cada dígito tiene una única alineación 2 de 5. Todos las que están posicionadas nones son codificadas en las barras y las pares codificadas en los espacios. La desventaja de este sistema es que una escaneada parcial (es decir que no incluya las zonas de inicio y de salida) puede considerar los bordes como un símbolo codificado valido, lo cual lleva a errores. Para corregir el problema de los escaneos parciales, cuando el escáner deja el símbolo ya sea por arriba o por abajo, este cruza la barrera, resultando en un código invalido de comienzo y alto.

|   |       |   |       |
|---|-------|---|-------|
| 0 | NNWWN | 5 | WNWNN |
| 1 | WNNNW | 6 | NWWNN |
| 2 | NWNNW | 7 | NNNWW |
| 3 | WWNNN | 8 | WNNWN |
| 4 | NNWNW | 9 | NWNWN |

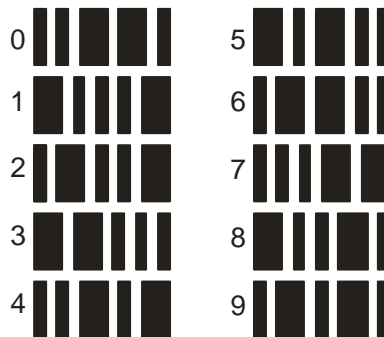


Figura 14. Nomenclatura del sistema 2 de 5:  
arriba en letras y abajo en barras.

En la figura 14 se muestran los símbolos para cada número, donde N es una barra estrecha y W es una barra ancha. El principal problema con esta simbología es que no es flexible. Si el código es más corto de lo necesario puede ser completado con dígitos ceros.

La figura 15 muestra un ejemplo de este código con sus barras de protección (en color blanco por propósitos demostrativos, aunque usualmente son de color negro). Las barras de protección no son necesarias, sin embargo, se utilizan para evitar errores por escaneos parciales. En la figura 15 el código presentado es el que corresponde al número 9708. En este caso el ancho de las barras codifican el número 9 y el número cero, el ancho de los espacios codifican el número 7 y el número 8.

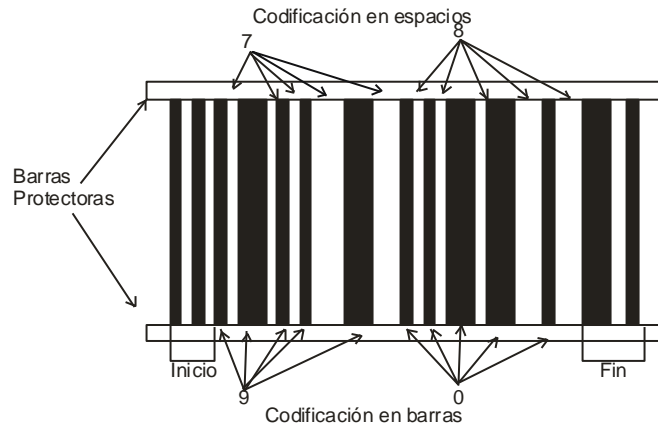


Figura 15. Código de barras 2 de 5 representando el 9708.

### 3 Patrones de Moiré.

*“There are two ways to live: you can live as if nothing is a miracle;  
you can live as if everything is a miracle.”*  
Albert Einstein

La luz es una onda electromagnética que presenta fenómenos de interferencia [11]. En este capítulo se incluye una revisión breve del tema de interferencia de ondas con el fin de explicar los patrones de Moiré.

#### 3.1. Ondas.

En una onda se define la frecuencia  $\nu$  como el número de ciclos que recorre en un segundo con una velocidad  $c$  (ver figura 16). La onda tiene una energía  $E = h\nu$  donde  $h$  es la constante de Planck. La longitud de onda  $\lambda$  se define como  $\lambda = c/\nu$ . En este trabajo se usa radiación en el rojo cuya longitud de onda va de los 620 hasta los 720 nm, con frecuencia máxima de  $4.1667 \times 10^{14}$  Hz y una energía máxima de  $2.75 \times 10^{-19}$  J [11].

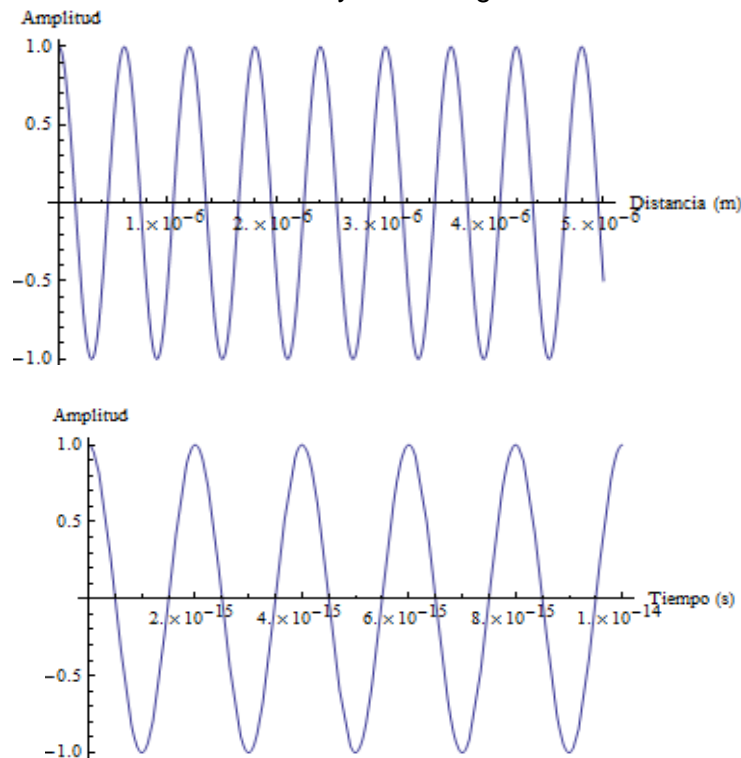


Figura 16. Movimiento ondulatorio como función de la distancia (arriba) y del tiempo (abajo).

### 3.2. Propagación de ondas.

Se dice que un sistema sufre una perturbación cuando se le aplica un cambio mediante algún fenómeno físico. La perturbación puede ser un pulso que toma una forma periódica en el eje  $y$ :  $y=f(x')$  respecto al sistema de coordenadas  $O(x',y')$ . La perturbación se propaga a través del espacio con una velocidad  $u$  denominada velocidad de fase, relativa a un sistema  $O=(x,y)$ . Si el pulso mantiene su forma, cada punto  $P$  puede describirse como  $x'=x \mp ut$ ,  $y'=y$ , entonces

$$y = y' = f(x') = f(x \mp ut) . \quad (1)$$

Aquí la dirección se denota con un signo más si la propagación de la perturbación es hacia la izquierda o con menos si es a la derecha. Derivando dos veces la ecuación (1) se llega a la ecuación de onda [16]:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} . \quad (2)$$

Cualquier onda independiente de su naturaleza física debe cumplir la ecuación de onda (2). Una solución importante de la ecuación de onda es el caso de la onda armónica que está dada por [16]:

$$f(x, t) = A \cos(kx - \omega t + \varphi_0) . \quad (3)$$

El número de onda  $k$ , también llamado constante de propagación, está relacionado con la longitud de la onda por:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} . \quad (4)$$

Así mismo, la frecuencia angular  $\omega$ , corresponde a la frecuencia de la onda por un factor angular, i.e.

$$\omega = 2\pi\nu . \quad (5)$$

Inicialmente, en  $x=0$ ,  $t=0$  se tiene que la fase es:

$$\varphi_0 = \arccos\left(\frac{y_0}{A}\right), \quad (6)$$

donde  $y_0$  es la ordenada al origen de la función y  $A$  es la amplitud máxima de la onda.

Al derivar la ecuación (3) se llega a:



$$\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial x^2} = -Ak^2 \sin(kx - \omega t + \varphi),$$

$$\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial t^2} = -A\omega^2 \sin(kx - \omega t + \varphi),$$

lo cual al sustituir en la ecuación (2) conduce a que:

$$-A k^2 \sin(kx - \omega t + \varphi) = -\frac{1}{u^2} A \omega^2 \sin(kx - \omega t + \varphi),$$

por lo que la velocidad de fase de la solución propuesta es:

$$u = \frac{\omega}{k} = \lambda v. \quad (7)$$

La solución dada por la ecuación (3) representa ondas periódicas suaves que se propagan infinitamente con velocidad  $u$  (dada por la ecuación 7) generadas por oscilaciones sin amortiguamiento (oscilador armónico simple). Las ondas armónicas constituyen un conjunto completo de funciones linealmente independientes que pueden representar cualquier onda periódica mediante la serie de Fourier.

### 3.3. Superposición de ondas.

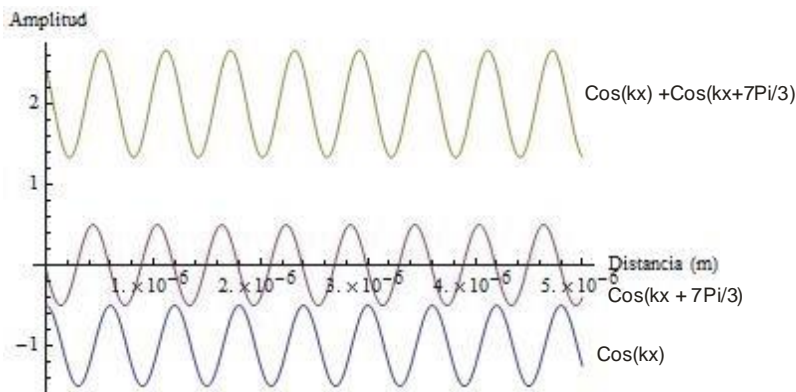


Figura 17. Superposición de dos ondas de igual  $\lambda$  desfasadas  $7\pi/3$ .

Si dos ondas armónicas del tipo definido en la ecuación 3 viajan en la misma dirección, la señal resultante será la suma de ambas (por el principio de superposición), como lo muestra la figura 17, lo cual producirá una onda dada por:

$$f(x, t) = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx - \omega t + \varphi),$$

$$f(x, t) = 2 A \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\varphi}{2}\right) . \quad (8)$$

Si la diferencia de fase entre las ondas ( $\varphi$ ) es un múltiplo par de  $\pi$ , entonces, de acuerdo a la ecuación 8, las ondas interferirán constructivamente y la resultante tendrá el doble de amplitud (ver figura 18). Pero si  $\varphi$  es un múltiplo non de  $\pi$ , las ondas interferirán destructivamente y no habrá onda resultante, lo cual es claro en la figura 19. Esta situación también ocurre con dos ondas que viajan en direcciones opuestas:

$$f(x, t) = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t) ,$$

$$f(x, t) = 2 A \sin(kx) \cos(\omega t) . \quad (9)$$

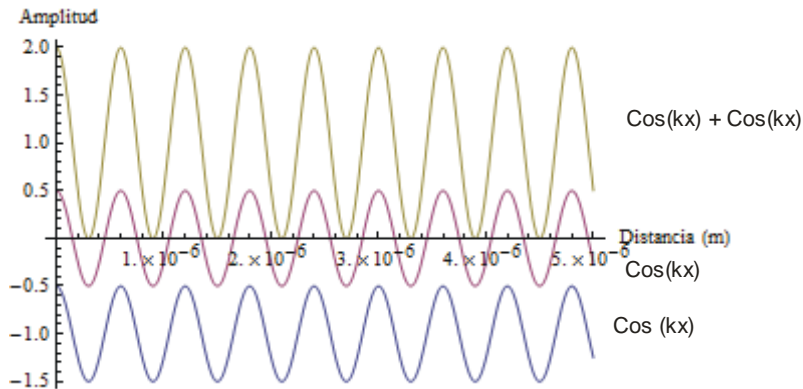


Figura 18. Interferencia constructiva debida a la superposición de dos ondas que viajan en la misma dirección cuya diferencia de fase es de  $2n\pi$ .

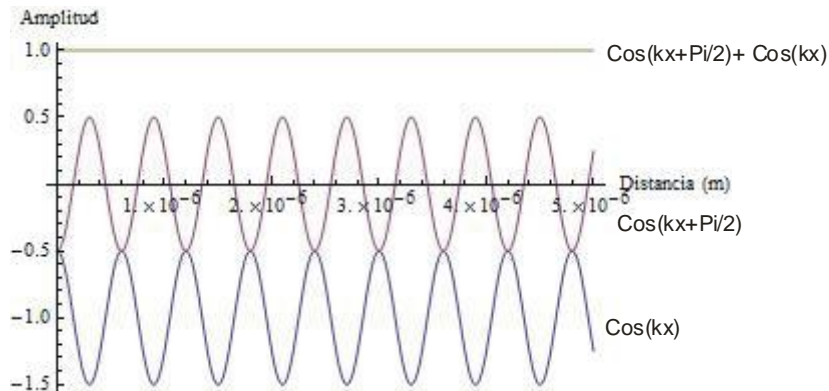


Figura 19. Interferencia constructiva debida a la superposición de dos ondas que viajan en direcciones opuestas cuya diferencia de fase es de  $(2n+1)\pi$ .

### 3.4. Principio de Huygens.

El principio de Huygens establece que todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden [16].

Por ejemplo, si dos sitios están conectados por una puerta abierta y se produce un sonido en una esquina lejana de uno de ellos, una persona en el otro cuarto oirá el sonido como si se originara en el umbral. Por lo que se refiere al segundo cuarto, el aire que vibra en el umbral es la fuente del sonido. Lo mismo ocurre para la luz al pasar el borde de un obstáculo, pero esto no es fácilmente observable debido a la corta longitud de onda de la luz visible.

### 3.5. Interferencia.

Este fenómeno ocurre cuando dos o más movimientos ondulatorios coinciden en el espacio y en el tiempo. Una región donde incide una onda incidente y reflejada es uno de los lugares donde ocurre la interferencia, otro caso es el de una cuerda sujeta por los extremos, o una onda electromagnética en una cavidad metálica, la interferencia en estos casos da lugar a ondas estacionarias.

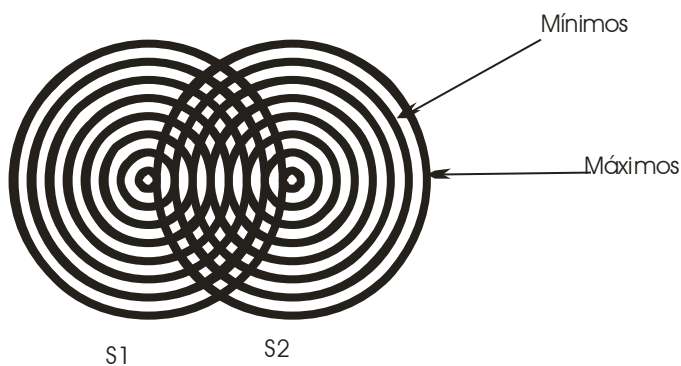


Figura 20. Interferencia entre haces de dos fuentes puntuales, en negro sus máximos en blanco los mínimos.

### 3.5.1. Experimento de Young.

El estudio de la interferencia se remonta a los trabajos del científico Thomas Young (1733-1829) quién en sus primeros experimentos sobre la luz, probó de un modo concluyente que la luz era un fenómeno ondulatorio [10]. El experimento de Young consiste en incidir un haz de luz monocromática a través de dos pequeños agujeros o rendijas,  $S_1$  y  $S_2$  (del orden de la longitud de onda de la luz incidente) muy cercanos. De acuerdo con el principio de Huygens,  $S_1$  y  $S_2$ , se comportan como fuentes secundarias coherentes cuyas ondas interfieren sobre una pantalla colocada paralelamente a las dos fuentes  $S_1$  y  $S_2$  (ver figura 21). Una serie de franjas brillantes y oscuras dispuestas alternadamente aparecen sobre la pantalla debido al fenómeno de interferencia. Si la luz no fuera una onda, no existiría el fenómeno de interferencia y la proyección mostrada en la pantalla sería un continuo.

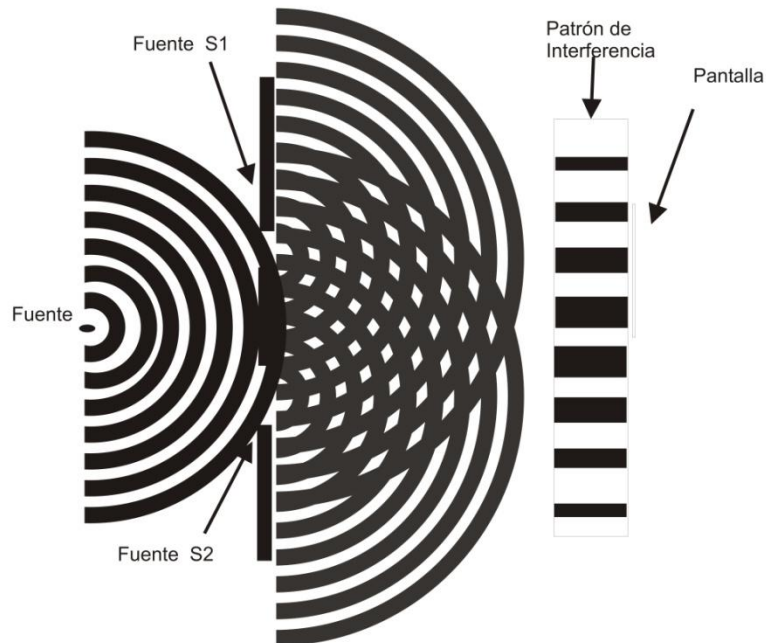


Figura 21. Experimento de Young.

### 3.5.2. Interferencia producida por dos fuentes sincronizadas.

Para entender el experimento de Young se consideran dos fuentes  $S_1$  y  $S_2$  que oscilan en fase con la misma frecuencia angular  $\omega$  y amplitudes  $E_{01}$  y  $E_{02}$ . Sus ondas esféricas respectivas son [10]:

$$E_1 = E_{01} \sin(\omega t - kr_1 + \varphi_1), \quad (10a)$$

$$E_2 = E_{02} \sin(\omega t - kr_2 + \varphi_2), \quad (10b)$$

donde  $r_1$  y  $r_2$  son las distancias desde cualquier punto a  $S_1$  y  $S_2$ , respectivamente. Aunque son idénticas no producen la misma amplitud en una pantalla P si  $r_1$  y  $r_2$  son diferentes, porque la amplitud de una onda esférica disminuye proporcionalmente a  $1/r$ .

Sea  $E$  una propiedad escalar tal como una perturbación de la presión. Si  $E$  corresponde a una propiedad vectorial (como en el campo eléctrico), se puede considerar que  $E_1$  y  $E_2$  tienen la misma dirección, de modo que la combinación de las dos ondas pueda ser tratada escalarmente. En este caso las cantidades  $kr_1$  y  $kr_2$  juegan el mismo papel que las fases iniciales. Entonces el desfase entre los dos movimientos ondulatorios en cualquier punto P de la pantalla es

$$\delta = kr_2 + \varphi_2 - (kr_1 + \varphi_1) = \alpha_2 - \alpha_1. \quad (11)$$

Las componentes del vector resultante están dadas por

$$E_0 \cos(\alpha) = E_1 \cos \alpha_1 + E_2 \cos \alpha_2, \quad (12a)$$

$$E_0 \sin(\alpha) = E_1 \sin \alpha_1 + E_2 \sin \alpha_1. \quad (12b)$$

Se puede obtener la tangente del ángulo del cociente entre estas dos últimas expresiones:

$$\tan \alpha = \frac{E_1 \cos \alpha_1 + E_2 \cos \alpha_2}{E_1 \sin \alpha_1 + E_2 \sin \alpha_1}. \quad (13)$$

Los dos movimientos ondulatorios que interfieren pueden ser representados por dos vectores de longitud  $E_{01}$  y  $E_{02}$  respectivamente, los cuales cuando tienen una fase inicial igual a cero, formando ángulos de  $\alpha_1 = kr_1$  y  $\alpha_2 = kr_2$  con el eje X. La amplitud de la perturbación resultante se obtiene elevando al cuadrado las ecuaciones (12a) y (12b):

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\alpha_2 - \alpha_1). \quad (14)$$

La resultante tiene valores comprendidos entre  $E_{01} + E_{02}$  y  $E_{01} - E_{02}$  dependiendo del ángulo que se tome. Si se denota como  $\delta$  como la diferencia entre los dos ángulos, en el caso de *interferencia constructiva*:

$$\delta = 2n\pi ,$$

$$\cos \delta = 1 ;$$

y en el caso de *interferencia destructiva*

$$\delta = (2n + 1)\pi ,$$

$$\cos \delta = 0;$$

donde  $n$  es un número entero positivo o negativo. Usando la ecuación (11) se encuentra:

$$\delta = k(r_1 - r_2) = \frac{2\pi}{\lambda} (r_1 - r_2) . \quad (15)$$

En un espacio bidimensional se tiene un desfase constante debido a que  $r_1 - r_2$  no varía. Por lo tanto la ecuación (15) define una hipérbola cuyos focos son las 2 fuentes puntuales  $S_1$  y  $S_2$ .

En el espacio real que es tridimensional, la ecuación (15) define superficies hiperbólicas de revolución dado que:

$$r_1 - r_2 = n \lambda .$$

En este caso las ondas interfieren reforzándose, estas se llaman *superficies ventrales* o *antinodales*. Cuando

$$r_1 - r_2 = \frac{n}{2} \lambda ,$$

las ondas interfieren destructivamente, las cuales se denominan superficies *nodales*.

La amplitud característica de las ondas está dada por la ecuación (7) como:

$$E = E_0 \text{sen}(wt - \alpha) , \quad (16)$$

donde  $\alpha$  es el ángulo que tiene de la interferencia de los dos vectores mediante el método del paralelogramo. De aquí que la interferencia no tiene la apariencia de un movimiento ondulatorio progresivo, sino de una onda estacionaria en el cual el movimiento tiene distinta amplitud en cada punto del espacio. La razón de esto es que las dos fuentes oscilan con una misma frecuencia y mantienen un desfase constante, y por lo tanto se

dice que son *coherentes*. Pero si las fuentes no son de la misma frecuencia, o si sus desfases cambian erráticamente con el tiempo, no se observa el diagrama de interferencia estacionario y las fuentes se dicen que son *incoherentes*. Esto sucede con fuentes de luz compuestas de la misma clase de átomos, las cuales emiten luz de la misma frecuencia. Como cada fuente contiene muchos átomos y éstos no oscilan en fase, no se observa un diagrama de interferencia definido [10].

En un caso general donde se tienen  $n$  fuentes que generan un cierto campo eléctrico que están a una distancia  $r_i$  de un punto P, la magnitud en ese punto estará dada por

$$E_0^2 = \sum_{i=1}^n E_{0i}^2 + \sum_{j>i}^n \sum_{i=1}^n E_{0i} E_{0j} \cos \delta . \quad (17)$$

### 3.5.3. Irradiancia.

Cuando una onda electromagnética se propaga en el vacío con una velocidad  $c$ , su dirección de propagación está dada por el *vector de Poynting*, el cual es perpendicular tanto al campo eléctrico como al magnético [10]. La amplitud del vector de Poynting es igual a la potencia por unidad de área y su dirección se obtiene del producto vectorial del campo eléctrico y magnético:

$$\vec{S} = \epsilon_0 c^2 \vec{E} \times \vec{B} . \quad (18)$$

La irradiancia se define como el promedio temporal de la energía del campo eléctrico por unidad de área, por lo que se puede evaluar como el promedio de la magnitud del vector de Poynting:

$$I = \langle |\vec{S}| \rangle = \epsilon_0 c^2 \langle E_0 B_0 \sin^2(\vec{k}\vec{r} \pm \omega t) \rangle = \epsilon_0 c \langle E_0^2 \sin^2(\vec{k}\vec{r} \pm \omega t) \rangle .$$

El promedio de la función  $\sin^2$  en el período de tiempo necesario para completar un ciclo es igual a un medio, por lo que la irradiancia es:

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_0^2 . \quad (19)$$

La irradiancia tiene unidades de  $W/m^2$ . La irradiancia es medida con un detector. El tiempo de muestreo depende del detector, por ejemplo el del ojo es de 1/30 s, otros tienen tiempos de ns. En general los tiempos de muestreo son mayores que el periodo de la onda a medir (en el visible de  $10^{-14}$  s a  $10^{-15}$  s). En este trabajo la irradiancia será la cantidad a detectar de manera relativa usando fotodiodos.

En el caso de interferencia entre dos ondas, el campo eléctrico resultante está dado por la ecuación (14), por lo que la irradiancia es:

$$I = \varepsilon_0 c \langle E_0^2 \rangle = \varepsilon_0 c \langle E_{01}^2 + E_{02}^2 + E_{01}E_{02} \cos \delta \rangle = I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2 ,$$

donde  $I_1$  e  $I_2$  corresponden a las irradiancias de los campos eléctricos 1 y 2 respectivamente. El último término es llamado el término de interferencia:

$$I_1 I_2 = \varepsilon_0 c \langle E_{01} E_{02} \cos \delta \rangle . \quad (20)$$

siendo  $\delta$  la diferencia de fases:

$$\delta = k(r_1 - r_2) + (\varphi_1 - \varphi_2) . \quad (21)$$

Para campos monocromáticos  $\delta$  es una función independiente del tiempo aunque depende de la distancia y la diferencia de fase, por tanto puede salir del promedio en la ecuación (20).

### 3.6. Patrones de Moiré.

Los patrones de Moiré (palabra en francés para regado) están definidos como la superposición de dos o más conjuntos de líneas que se intersectan.

El primer patrón de Moiré fue descubierto en China y fue un diseño que se obtenía de presionar una pieza de fábrica contra otra [17]. En el mundo occidental fueron introducidos en 1754 por una manufacturera inglesa [17].

Existen distintos métodos para la creación de patrones de Moiré. Uno de ellos fue creado por Witschi mediante la superposición de distintas estructuras de rejillas. A. K. Sen usa ecuaciones paramétricas con un algoritmo al que llama "time delay" [12], el cual consiste en desfazar dos señales en un período pequeño de tiempo graficándolas una en el eje x y la otra en el eje y (ver figura 22).

Otra manera de generar patrones de Moiré se describe en [24], donde los patrones se producen mediante la interferencia de dos haces de luz coherente sobre una superficie. El procedimiento consiste en irradiar de un patrón de interferencia a un objeto o superficie la cual se fotografía por técnicas fotoquímicas. El negativo de esta foto se usa para realizar comparaciones en los cambios de las superficies. Los patrones de Moiré generados por esta técnica de interferencia son descritos por la ecuación 20.



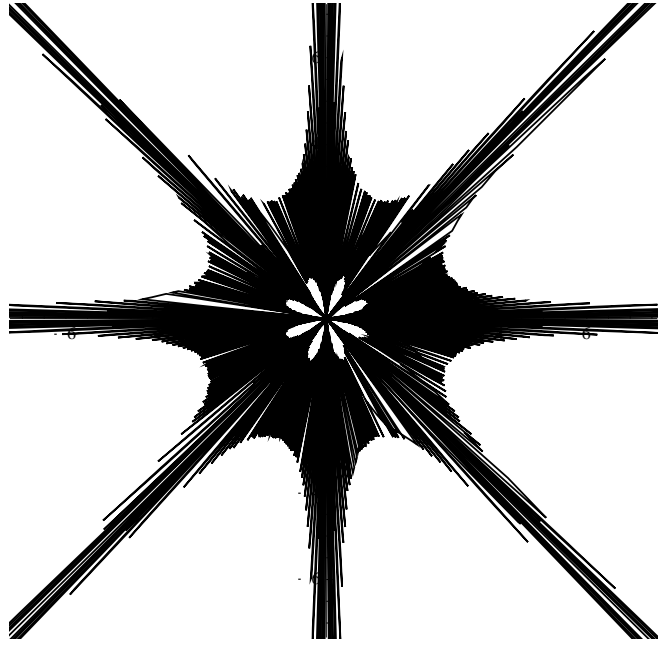


Figura 22. Patrón de Moiré generado mediante el algoritmo "Time-delay" descrito en el texto.

## 4 Diseño del sistema.

*"I am not too proud of my achievements as a poet.  
Excellent creative writers lived in my time, even more brilliant  
ones before me, and there will always exist some after my  
time. But that I am the only one in my century who knows the  
truth about the theory of colours - that is which I am proud of  
and which gives me a feeling of superiority over many!"*

*Wolfgang Von Goethe from the "Theory of colours".*

En este capítulo se plantea el diseño del sistema, en particular se describe la metodología para hacer las rejillas con los patrones de Moiré, el circuito de detectores y el sistema de acoplamiento del equipo para garantizar condiciones de estabilidad y reproducibilidad del experimento.

### 4.1 Elaboración de las rejillas.

Las rejillas de difracción son elementos ópticos utilizados comúnmente en diversas aplicaciones. Su costo es de alrededor de \$50 dólares por pieza. Los diseños ya están pre-fabricados, por lo cual el usuario se encuentra muy restringido para el estudio de patrones que se puedan analizar, así como en el manejo de la intensidad en el plano de incidencia. Debido a los altos costos y las pocas posibilidades de manipulación y diseño ad-hoc, en este trabajo se decidió elaborar las rejillas en el laboratorio por técnicas que disminuyeran los costos y permitiesen diseñar los patrones que el usuario deseara para realizar su codificación.

Para la elaboración de las rejillas se planteó en lugar de usar agujeros físicos tener un medio que reflejara la luz en ciertas regiones y la transmitiera en otras. Con este fin se uso la técnica de foto-reducción que consiste en utilizar una película de alto contraste al fotografiar figuras periódicas en blanco y negro. Esto se implementó en un negativo de película, en la cual cada zona de transmisión o reflexión estaría definida por la imagen a tomar. Se buscó que el contraste fuera alto para que se viera reflejado en zonas claras y oscuras bien definidas, y que la incidencia de la luz cuando se tomará la imagen fuese uniforme.

#### 4.1.1. Materiales.

- Cámara marca: PRAKTIKA Modelo MTL3 con flash.
- Impresora láser HP 610C (600 dpi de resolución).

- Rollo de película blanco y negro.
- Solución microdiol o technidiol para revelar las diapositivas.
- Solución reveladora.
- Software propio para generar los patrones de Moiré en CorelDraw y Visual Basic (ver apéndice).

#### 4.1.2. Metodología.

Mediante el uso de un software propio escrito en “Corel Draw” con macros en el lenguaje de programación “Visual Basic”, se procesaron distintas figuras geométricas bajo un diseño tipo patrón de Moiré (ver figuras 23 y 24). En el apéndice se presenta el algoritmo y el código fuente de dicho programa registrado en el INDAUTOR.

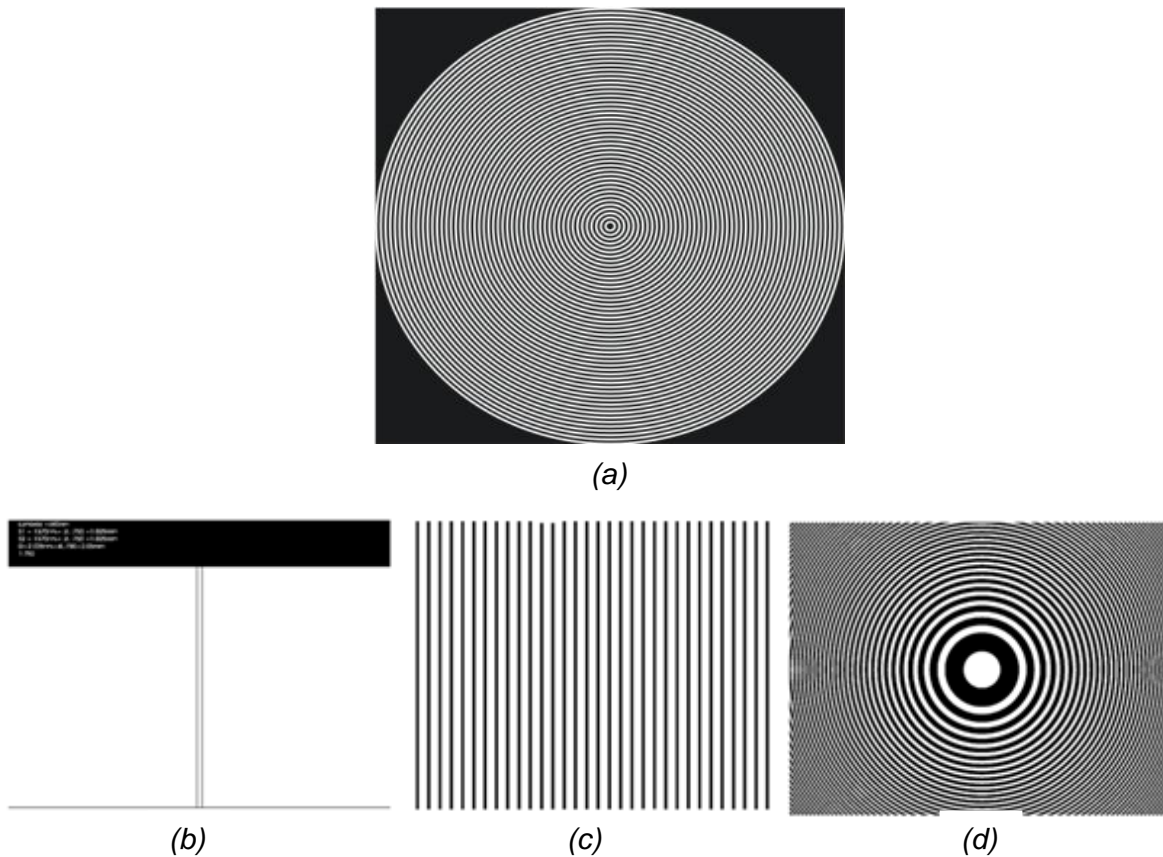


Figura 23. Distintos patrones generados (en positivo): (a) Círculos concéntricos con espesor constante (b) rejilla de Young. (c) Rejilla lineal. (d) Rejilla circular con separación y espesor gradualmente variable.

Los patrones de Moiré generados consistían en líneas de un espaciado constante con distintas anchuras de 1 mm, 0.5 mm y 0.25 mm. Dichos patrones se imprimieron en hojas blancas tamaño carta con una resolución de 600 ppp (ver figura 24) permitiendo como mínima resolución posible, el trazo de líneas negras con espesor de 42.30  $\mu\text{m}$  espaciadas con líneas blancas de la misma magnitud. Se fotografió tal impreso con una cámara antigua (PRAKTIKA Modelo MTL3) cargada con película B&N de alto contraste de proceso químico.

Las fotografías se revelaron en un cuarto oscuro con distintos tipos de luz mediante el siguiente proceso (registrado en el INDAUTOR, ver apéndice):

- 1.- En un cuarto oscuro se extrae la película de la cámara y se coloca dentro de un cilindro revelador el cual se cierra impidiendo el paso de luz al rollo.
- 2.-Se utiliza Microdol durante 7 minutos con un agitado de 15 s cada minuto.
- 3.-Se enjuaga 2 minutos con agua abundante con un agitado de 15 s cada minuto.
- 4.-Se utiliza revelador durante 5 minutos con un agitado de 15 s cada minuto.
- 5.-Se deja secar el negativo ya revelado.

Dicho proceso se utilizó en todas las pruebas realizadas, sólo con pequeñas variaciones que dependieron de la antigüedad del Microdol y del revelador. Como resultado de este proceso se produjeron negativos de área de 35.0X22.5 mm, en los que homotéticamente se reducen todas las dimensiones del original, bajo razones 10:1.

#### **4.1.3. Pruebas de iluminación y velocidad de las rejillas.**

Con el fin de encontrar las condiciones óptimas para la elaboración de las rejillas se buscó el tiempo óptimo de exposición y se realizaron pruebas de iluminación. Las últimas se hicieron con distintas lámparas de 500W acomodándolas en diferentes posiciones, elaborando experimentos con flash, mediante técnica de transmisión y de reflexión (ver figura 24). En la cámara, la apertura del diafragma también controla la iluminación al variar el lente de la misma por lo que también se realizaron pruebas cambiando este parámetro.

##### **4.1.3.1. Prueba #1.**

Se utilizó una cámara marca PRAKTIKA modelo MTL3 con una apertura de diafragma de F 8.0 bajo la iluminación de 2 focos de 500 W. Se fotografiaron las rejillas de la placa zonal circular (figura 24) con 4 distintos tiempos de exposición 1/4, 1/8, 1/15, 1/30 y 1/60 s. En esta prueba no se tuvo éxito por lo que se determinó que se requiere un mayor tiempo de exposición.

##### **4.1.3.2. Prueba #2.**

Se utilizó una cámara marca YASHICA modelo TL-Electro con una apertura de diafragma máxima de 2.0. Los tiempos de exposición fueron 1, 1/2, 1/3, y 1/4 s. El mejor tiempo de

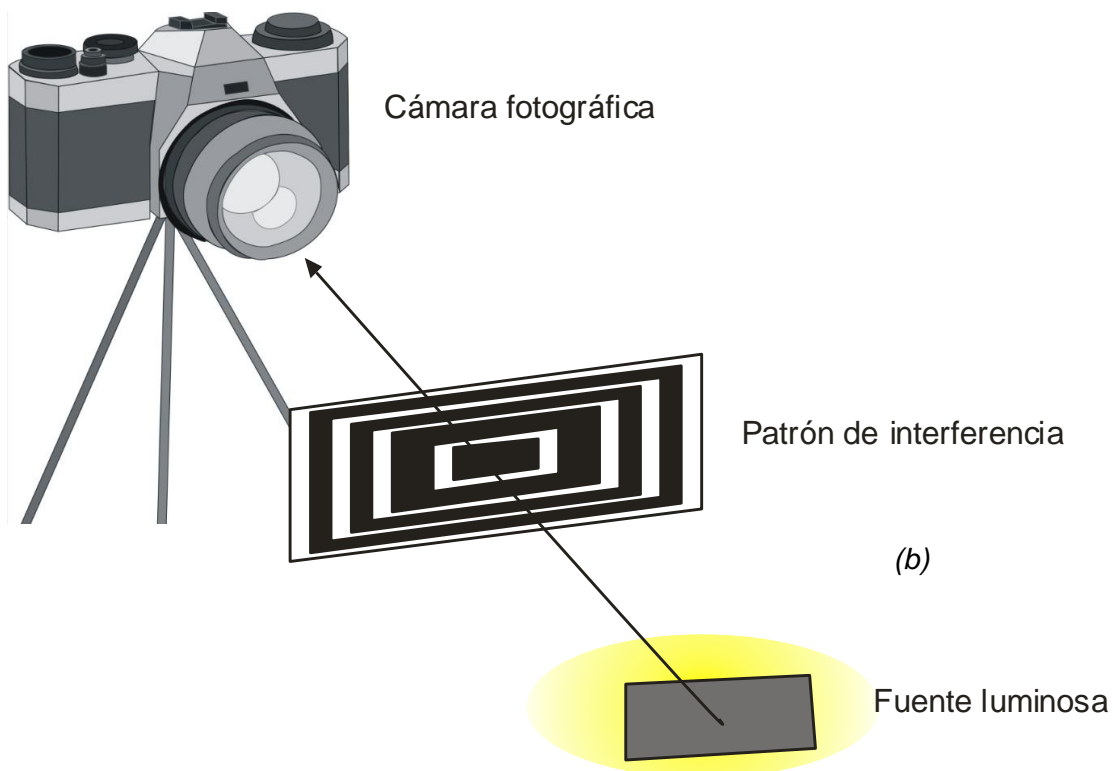
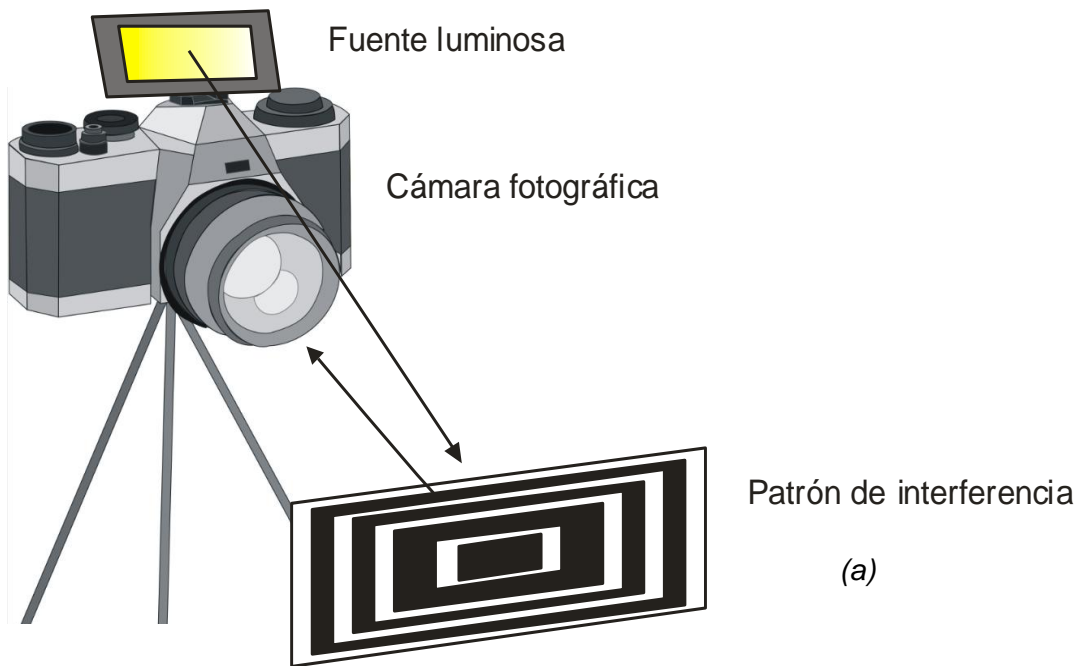


Figura 24. Métodos de iluminación de los patrones de interferencia (a) se utiliza la reflexión de la luz generada por la hoja, lo cual hace que rebota e incida en el lente (b) se utiliza el método de transmisión anteponiendo nuestra fuente de luz a la cámara fotográfica lo cual hace que la transmitancia de la hoja permita que la luz llegue al lente.

exposición fue el de 1 s, sin embargo, la calidad de las imágenes obtenidas distaba mucho de ser buena.

#### **4.1.3.3. Prueba #3.**

Misma cámara YASHICA y apertura que en la prueba 2. Se intentó tener una iluminación a contraluz con un foco de 500W a una apertura de 2.0 con tiempo de 15 s usando distintos negativos.

F-11 Foco por reflexión (5).

F-11 Foco por transmisión (6).

F-16 Foco por reflexión (7).

F-16 Foco por transmisión (8).

Luego se cambia el foco por un flash

F-11 Flash por reflexión (8).

F-11 Flash por transmisión (9).

F-16 Flash por reflexión (10).

F-16 Flash por transmisión (11).

Las rejillas generadas con flash dieron mejores resultados en el contraste.

#### **4.1.3.4. Prueba #4.**

Se realizaron las pruebas con el mismo patrón que en la prueba anterior a la misma apertura:

F-8 Reflexión (19).

F-16 Reflexión (20).

F-8 Transmisión (21).

F-16 Transmisión (22).

Posteriormente se cambió el patrón a la placa zonal circular realizando las mismas mediciones:

F-8 Reflexión (23).

F-16 Reflexión (24).

F-8 Transmisión (25).

F-16 Transmisión (26).

Finalmente se experimenta con la doble rendija de Young:

F-8 Reflexión (27).

F-16 Reflexión (28).

F-8 Transmisión (29).

F-16 Transmisión (30).

Las mejores tomas fueron la 19, 21, 23, 25, 27, 29 con las cuales se realizó el análisis mediante el láser realizando las medidas que se reportan a continuación. Así mismo para verificar que el factor de disminución fuera el mismo para cada una de las hojas a fotografiarse se hicieron medidas de 3 hojas obteniendo en promedio un ancho de 27.90 cm, un largo de 21.43 cm y una desviación estándar 0.109 cm de ancho y 0.07 cm de largo.

## 4.2 Evaluación de las rejillas.

Para evaluar las rejillas se realizaron dos experimentos: uno para medir la calidad de las rejillas en función de su simetría respecto a su eje, y otro para evaluar el voltaje de salida del fototransistor como función de la intensidad luminosa respecto a la variación de la distancia.

### 4.2.1 Materiales para la elaboración del montaje para determinar la calidad de la rejilla en función de su simetría.

- Prensa circular.
- Fuente de alimentación regulada de 5 V.
- Vernier electrónico con una resolución de  $\pm 0.05$  mm.
- Posicionador manual.
- Láser en rojo de estado sólido.

### 4.2.2 Montaje preliminar para la evaluación de la calidad de la rejilla.

El montaje preliminar diseñado para evaluar la calidad de las rejillas generadas con patrones de Moiré se muestra en la figura 25. El método utilizado consto de los siguientes pasos (ver figura 26):

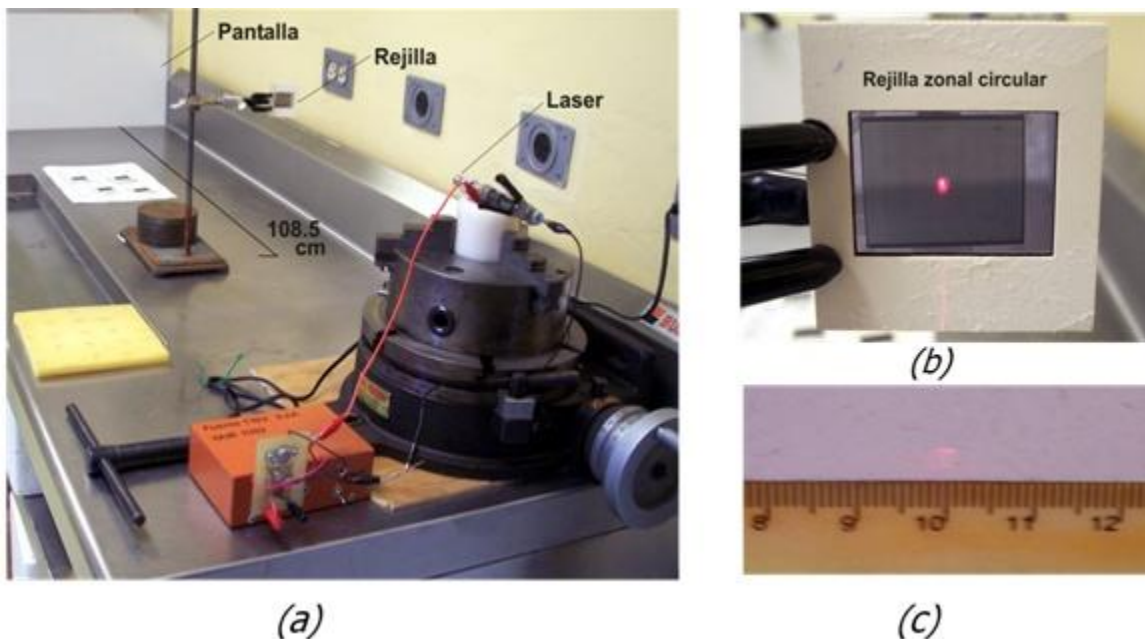


Figura 25. Montaje preliminar para evaluación de las rejillas (a) Montaje (b) Incidencia del haz sobre la rejilla (c) Medición del patrón de Moiré.

1. Alinear el haz del láser perpendicular a la rejilla y atrás de ella colocar paralelamente una pantalla plana.
2. Hacer incidir la luz del láser sobre la rejilla.
3. Medir el centro de la franja respecto al centro de la luz con el vernier electrónico y la distancia al centro de las dos franjas aledañas a la del centro (ver figura 26).
4. Rotar la rejilla 10 grados mediante la prensa de tal modo que se recorra toda la rejilla de manera negativa y luego positiva.
5. Graficar los datos de distancia de las franjas aledañas a la central respecto al centro de la posición inicial para verificar la simetría de las franjas (ver figura 26).

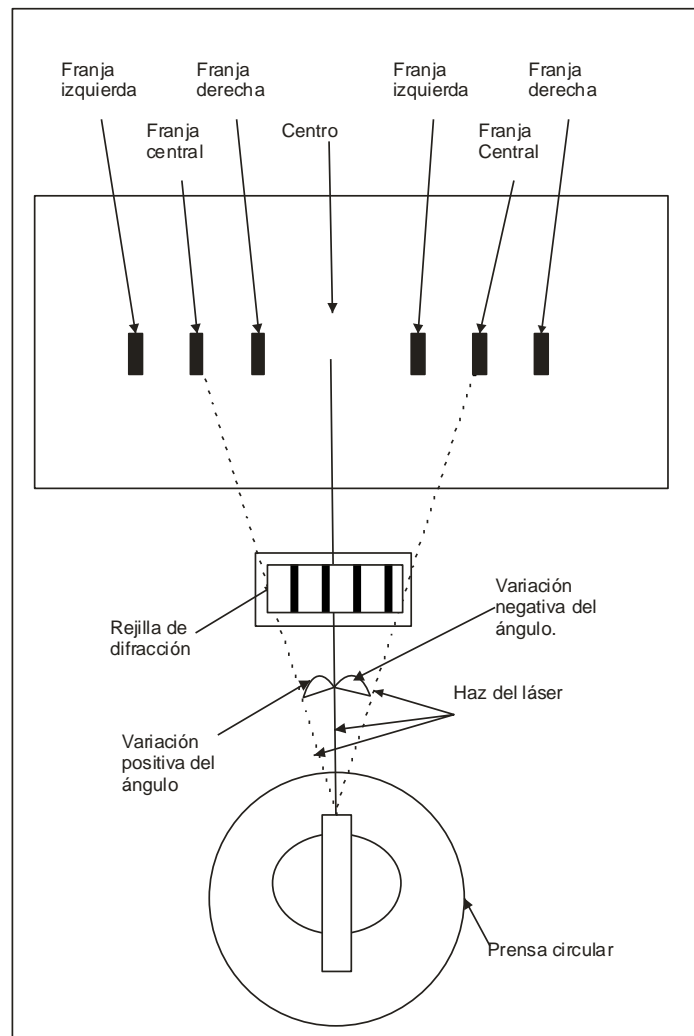


Figura 26. Esquema que muestra como se realizaron las medidas para la evaluación de la simetría de las rejillas.



### **4.3 Montaje para la elección de resistencia de carga para regular del voltaje de salida del fototransistor en función la Intensidad luminosa (I)**

Debido a la naturaleza de nuestro fototransistor su respuesta depende de la (I) que recibe por lo tanto este experimento buscó que resistencia se debía elegir debido a la variación de distancia. Se alimentó al diodo con la fuente y división de voltaje mediante una resistencia de  $220 \Omega \pm 10\%$ . El fototransistor es alimentado por una fuente de  $(5.0 \pm 0.5)$  V, la división del voltaje se realiza mediante una resistencia de  $14.49 \text{ K}\Omega \pm 10\%$  de tal manera que no se saturara el fototransistor. Para esta medición se varió la distancia del diodo al fototransistor en pasos de  $(4.0 \pm 0.5)$  cm.

#### **4.3.1 Metodología para la medición del voltaje de salida.**

- Fototransistor PT331C.
- Diodo Emisor IR 33C.
- Fuente de alimentación regulada de  $(5.0 \pm 0.5)$  V.
- Regla de  $1 \text{ m} \pm 0.5 \text{ mm}$ .
- Láser en rojo de estado sólido.
- Multímetro.
- Resistencia de  $220 \Omega$  precisión de  $\pm 10\%$ .
- Resistencia de  $14.49 \text{ K}\Omega \pm 10\%$ .

### **4.4 Montaje experimental como simulación de un dispositivo industrial para códigos de barras.**

En esta sección se presenta el montaje para verificar que la rejilla funciona como código de barras con el patrón deseado que permite asegurar la reproducibilidad del experimento.

#### **4.4.1 Materiales del experimento para medir la intensidad luminosa.**

- Tornillos de  $1/8$  in de diámetro y  $1/2$  in de longitud.
- Tornillo de  $3/8$  in de diámetro y espesor de 8 cm.
- Ángulo de aluminio de 2 in de lado y  $1 \frac{1}{2}$  in de espesor, largo 1 a 1.5 m.
- Láminas de aluminio rectangulares de 10 cm x10 cm de  $3/8$  in de espesor.
- Sierras de banda.
- Sierra de caída.
- Fresadora.
- Láser en rojo de estado sólido.
- Fuente de alimentación regulada a  $\pm 5$  V.
- Software Solid Works 2003.
- Diversos componentes eléctricos como Leds, comparadores, negadores, etc.

#### 4.4.2 Diseño del riel óptico

Mediante el software Solido Works versión 2003 se diseñó el riel óptico (ver figura 27), el cual se construyó en aluminio (ver figura 28). Este sistema permite variar la distancia de la rejilla al láser en un rango desde  $(10.0\pm 0.5)$  cm hasta  $(115.0\pm 0.5)$  cm.

El sistema consta de dos soleras de aluminio en perfil pentagonal, en las cuales se soporta un ángulo de aluminio de longitud  $(115.0\pm 0.5)$  cm. En la parte posterior del riel está colocado un orificio para permitir la calibración y posicionamiento del láser. Mediante un sistema de 3 tornillos con resorte, se puede mover el láser al apretar o aflojar alguno de los tornillos, brindando la flexibilidad requerida para el experimento.

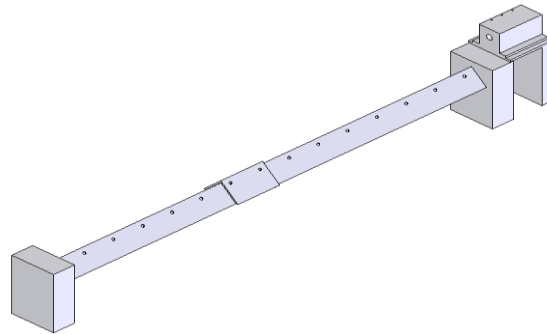


Figura 27. Diseño del riel óptico mediante Solidworks.

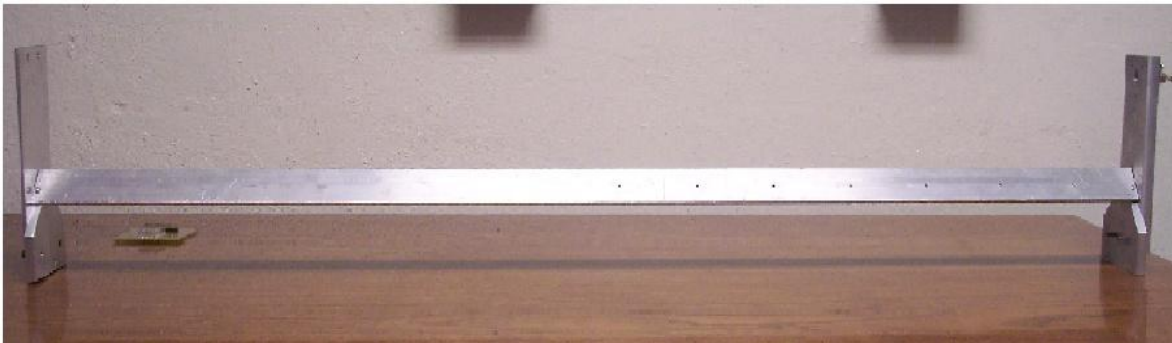


Figura 28. Riel óptico fabricado en aluminio.

Se elaboró un soporte para la rejilla construida con patrones de Moiré que permite ajustar su posición con una precisión de  $1/20$  como mínimo (ver figuras 29 y 30). Esto se debe a que este es el número de cuerda del tornillo con el cual se puede posicionar. El sistema construido permite variar la posición en el eje x, la distancia del centro de la rejilla respecto al eje del riel y modificar la distancia de la rejilla al riel en el eje y.

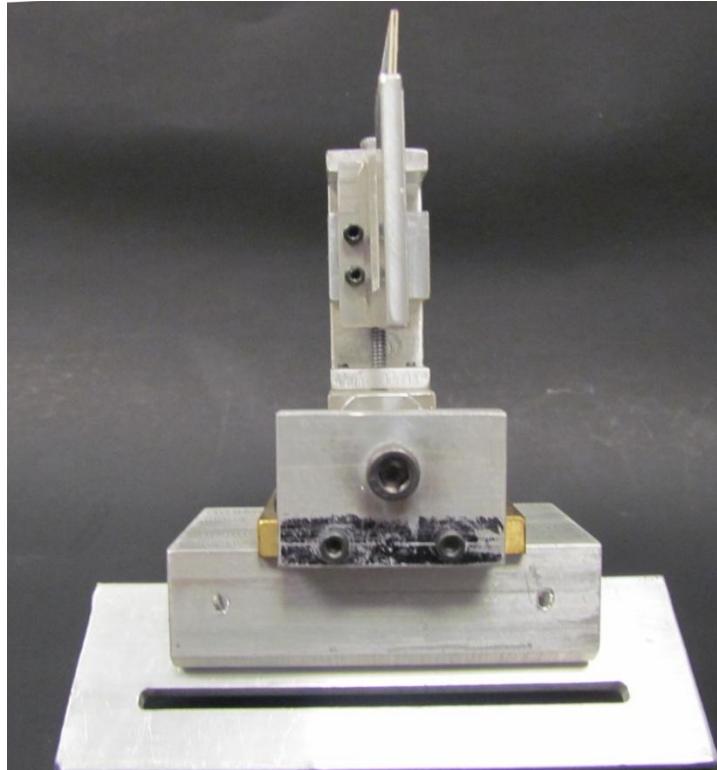


Figura 29. Vista lateral del soporte para las rejillas.

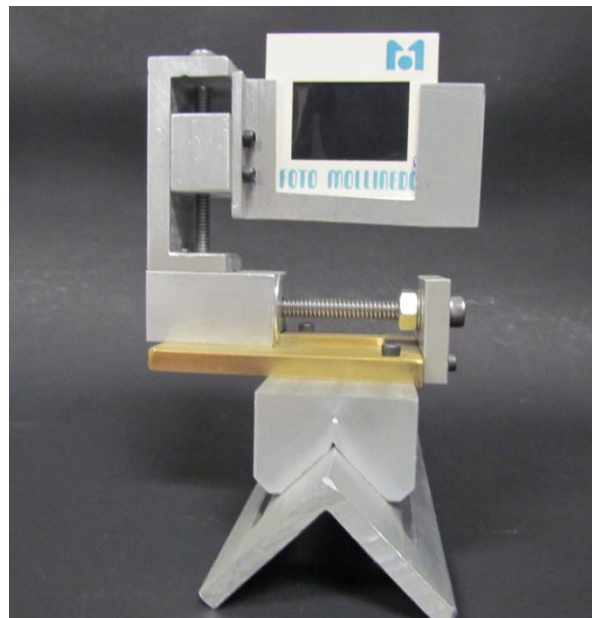


Figura 30. Vista frontal del soporte para las rejillas.

En la parte posterior del riel se coloca una matriz de fototransistores para realizar la detección.

## 4.5 Detectores

En la elaboración del circuito impreso para la detección de la intensidad luminosa se propuso la idea de hacer un circuito de 5x5 fototransistores PT331C, que estuvieran en un área cuadrada con lo cual pudieran detectarse la intensidad luminosa (zonas claras y oscuras) del patrón de interferencia el cual es regulado por una resistencia de  $12\text{ K}\Omega \pm 10\%$  para que no hubiera interferencia de luz ambiental.

### 4.5.1 Materiales para la detección.

- Placa de cobre de 10x10 cm.
- Software Board Maker.
- Lámpara de luz ultravioleta.
- Cloruro férrico ( $\text{Cl}_3\text{F}$ ).
- Dispositivos electrónicos tales como fototransistores, resistencias, cable.
- Fototransistores PT331C.

### 4.5.2 Elaboración de la matriz de fototransistores.

Se elaboraron dos circuitos de prueba para la detección de la intensidad de luz, los cuales se ilustran en la (figura 31 a). Estos circuitos consisten en una matriz de 5x5 fototransistores conectados a una misma tierra con un cintillo que permite medir el voltaje que varía inversamente proporcional a la intensidad luminosa en la salida (ver figura 31 b). Este circuito se realizó mediante el software BoardMaker versión 3.1 (ver figura 32). El circuito se construyó en una placa de cobre, mediante el procedimiento estándar [23].

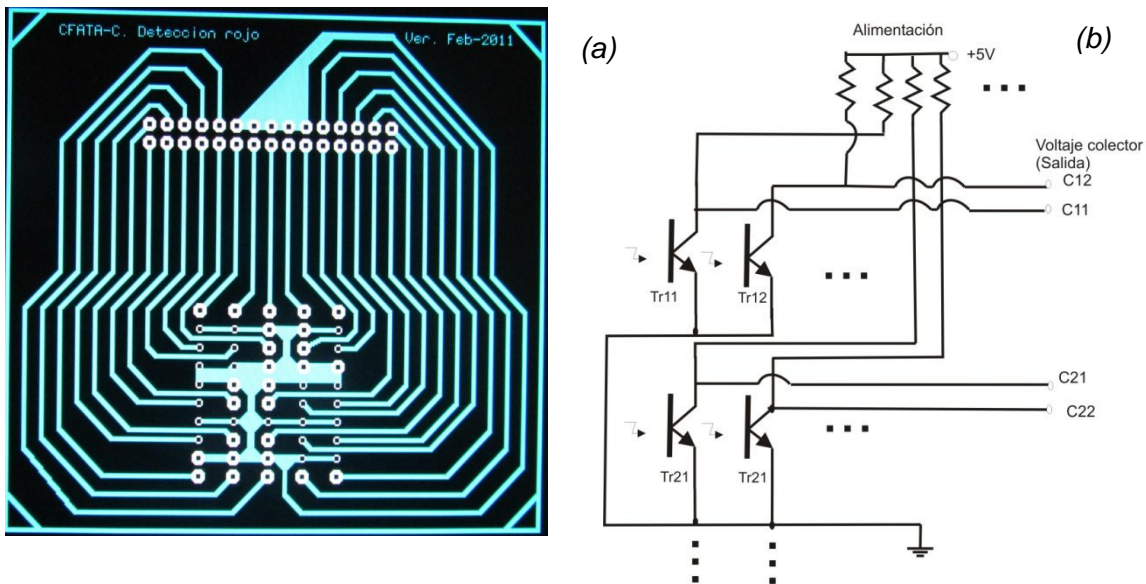


Figura 31.(a) Imagen en BoardMaker de circuito. (b) Esquématico representativo del funcionamiento del circuito esto se repite para cada uno de los 25 fototransistores teniendo como salida el voltaje de colector  $V_c$ .

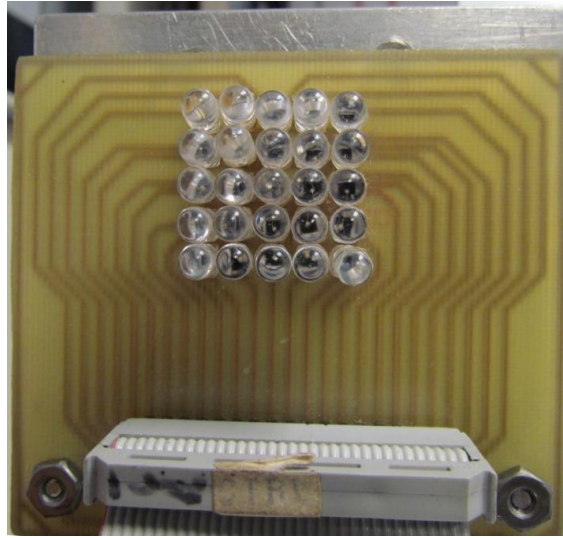


Figura 32. Circuito de matriz de fototransistores.

#### 4.5.3 Elaboración de circuito negador.

Se elaboró un circuito negador de modo análogo al de fototransistores mediante Boardmaker (ver figura 33). Debido al voltaje inverso de salida, este consistió en 5 circuitos negadores SN54LS06 los cuales eran alimentados por una fuente de 5V, la cual se construyó integrada al mismo con un arreglo simple que utiliza circuitos regulados LM317 (ver figura 34), los cuales salían posteriormente a dos salidas, una para los circuitos comparadores que permiten la codificación del mismo, y la otra para el espejo de LEDs. La codificación utilizada es uno si se observa luz y cero si no se tiene luz.

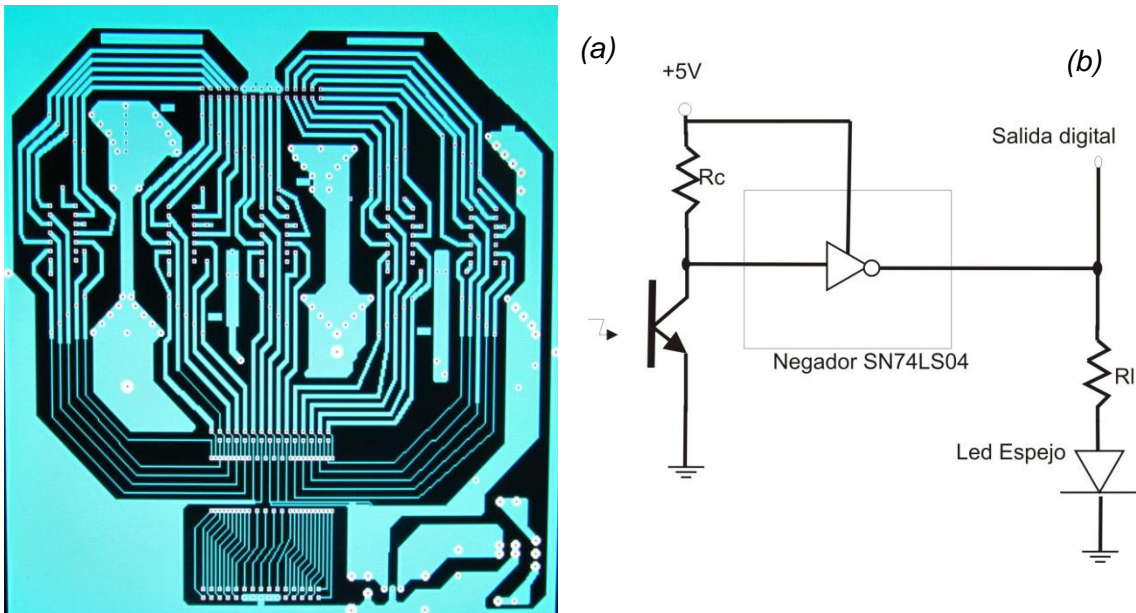


Figura 33. (a) Imagen de circuito negador con fuente en BoardMaker.

(b) Esquemático de circuito negador en BoardMaker. Esto se repite para cada una de las 25 entradas recibidas del voltaje de colector  $V_c$ .

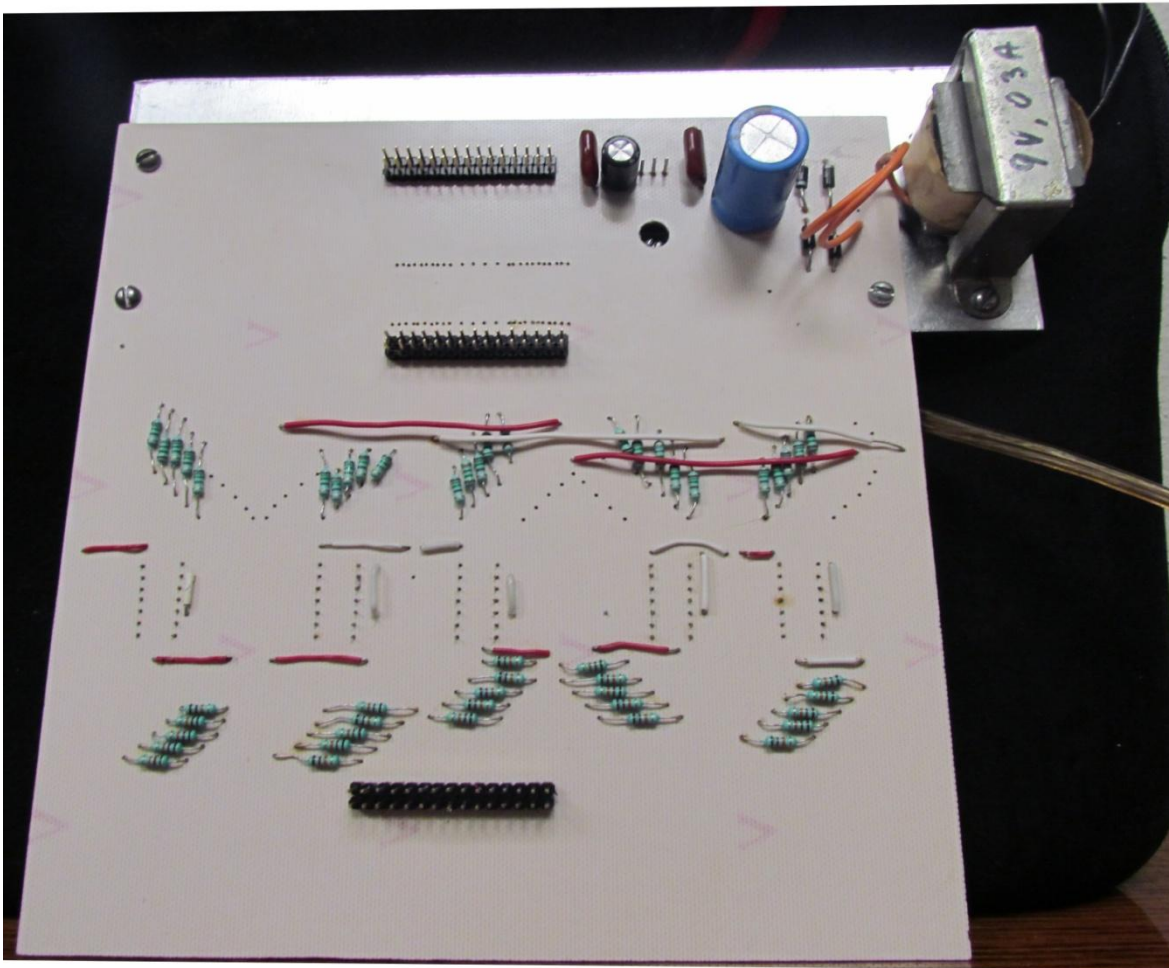


Figura 34. Circuito negador con fuente.

#### 4.5.4 Elaboración del espejo de LEDs.

Para la verificación de la incidencia de la luz y como fin demostrativo se construyó un espejo de LEDs siguiendo la metodología anterior. El espejo se hizo reflejando el circuito negador anterior produciendo el circuito mostrado en las figuras 35 y 36.

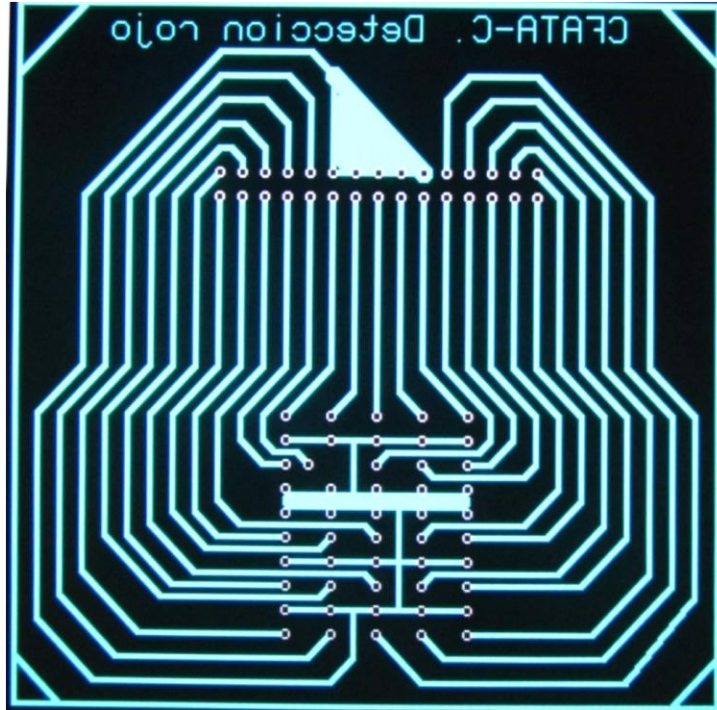


Figura 35. Circuito de LEDs boardmaker.

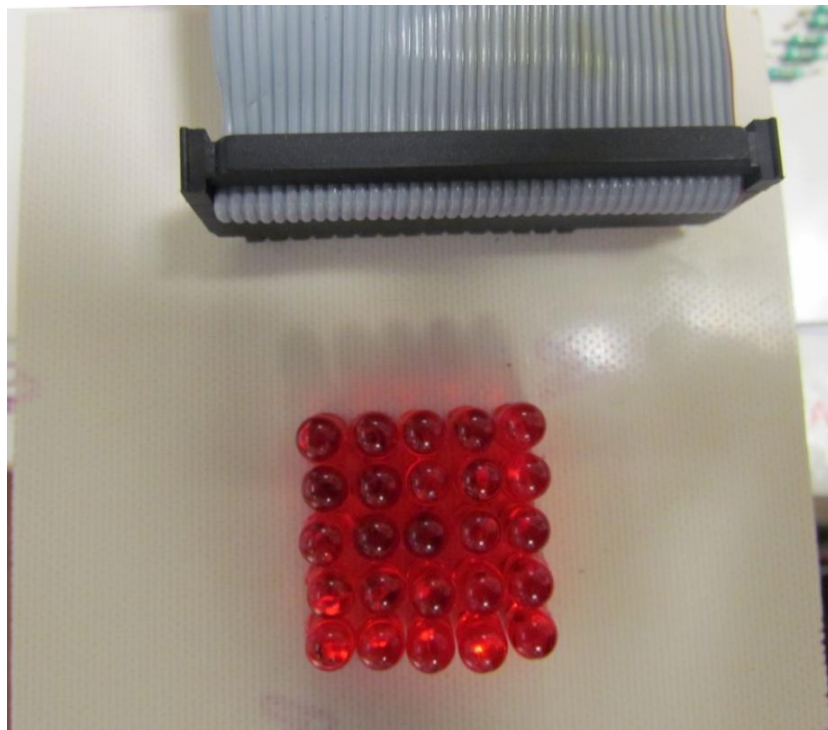


Figura 36. Circuito de LEDs.





## 5 Resultados y Discusión


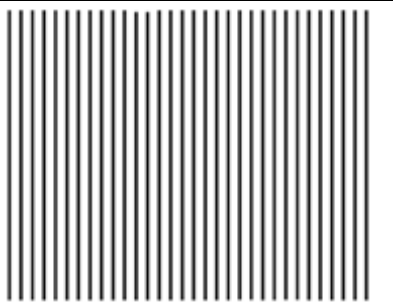
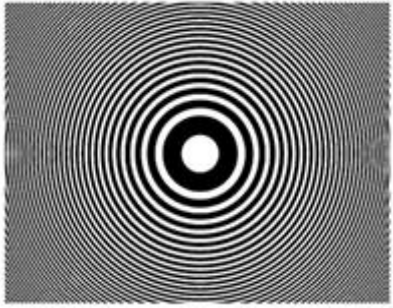
*"La satisfacción yace en el esfuerzo, no en el logro.  
El esfuerzo completo es victoria completa"*


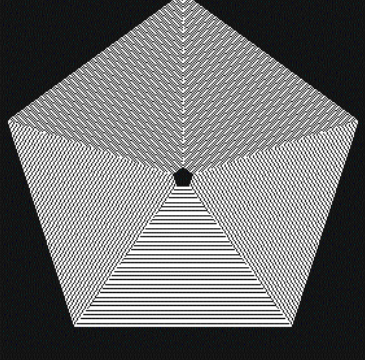
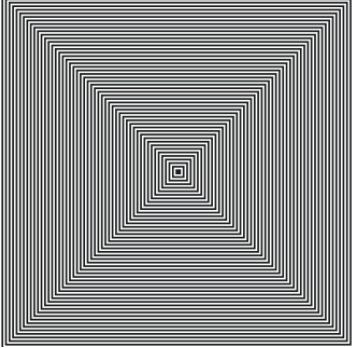
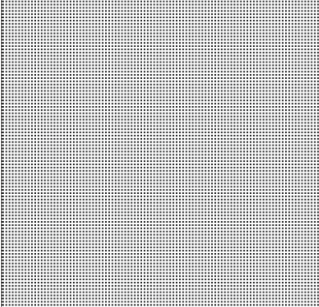
*Mahatma Gandhi.*

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al probar la calidad de las rejillas y hacer experimentos de codificación.

### 5.1 Rejillas elaboradas

Se realizaron un total de 15 rejillas con 9 patrones distintos y algunas con 2 anchos de separación entre rejillas diferente (ver figura 37), el costo de materiales aproximado por rejilla de difracción es de \$20 pesos. Este costo se puede disminuir aún más en base a los materiales necesarios y el número de rejillas construidas.

| Nombre              | Imagen del patrón  |
|---------------------|--|
| Rejilla de Young    |   |
| Lineal              |  |
| Separación variable |  |

|              |   |
|--------------|---|
| Circular     |  A circular pattern consisting of numerous concentric, slightly irregular lines that create a tunnel-like or vortex effect, centered on a black background.   |
| Pentagonal   |  A pentagonal pattern of lines that converge towards a central point, creating a 3D effect of a pentagonal prism or a funnel, set against a black background. |
| Cuadrados    |  A square pattern of concentric, slightly irregular lines that create a tunnel-like effect, centered on a black background.                                  |
| Cuadriculada |  A grid pattern of small, closely spaced dots or pixels, forming a rectangular area with a slight perspective or depth, set against a black background.     |

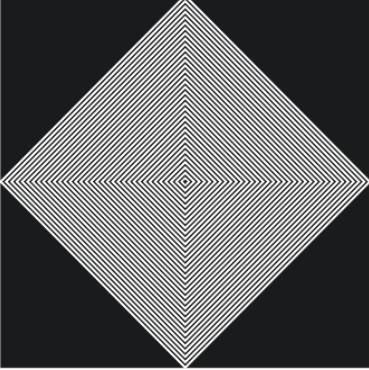
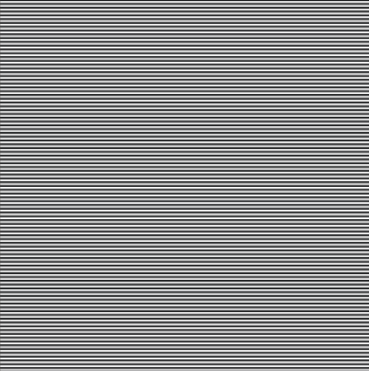
|  |  |
|--|--|
| <p>Rombo</p>                             |  |
| <p>Lineal inter espaciado programado</p> |  |



Figura 37. Imagen de rejillas en físico.

## 5.2 Evaluación de las rejillas.

### 5.2.1 Voltaje de salida de un fototransistor en función de la distancia.

Se obtuvieron resultados de la intensidad luminosa respecto a la distancia en el fototransistor, los cual se grafican en la figura 38. En el eje horizontal los valores tienen una incertidumbre de  $\pm 0.5$  mm, mientras que en la vertical es de  $\pm 0.005$  V. Estos datos permiten identificar hasta que distancia es posible leer el código de barras mediante una luz difusa, como es la del LED, y como varía esta para encontrar distintos intervalos de confianza (ver tabla II).

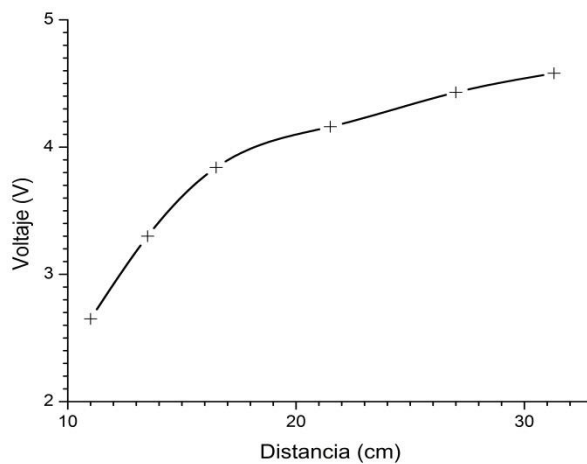


Figura 38. Voltaje de salida en función de la distancia.

En la tabla siguiente se establecen cinco bandas de confianza respecto a la intensidad de luz relativa con base en los resultados obtenidos anteriormente. Esta tabla facilita discretizar la intensidad de la luz que recibe cada uno de los fototransistores dejando de ser una respuesta continua, no obstante en este trabajo se utiliza únicamente una respuesta de mediana a máxima 1 lógico y de mediana a nula 0 lógico (ver sección 4.5.5)

Tabla 2: Intervalos de confianza del voltaje de salida

| Intensidad de luz relativa | $V_0 \pm 0.005$ (V) |
|----------------------------|---------------------|
| Nula                       | 4.58                |
| Leve                       | 4.16                |
| Mediana                    | 3.30                |
| Intensa                    | 2.65                |
| Máxima                     | 0.88                |

### 5.2.2 Evaluación de la calidad de las rejillas.

De las mediciones de la rejilla circular variable con el experimento descrito para la evaluación de la calidad de las rejillas, se obtuvieron las gráficas para evaluar la simetría de las rejillas. Para ello se grafica la distancia de las franjas aleatorias a la central respecto al centro de la posición inicial, en la figura 39 se presenta la medición al rotar el láser al lado derecho o de manera negativa, mientras que la figura 40 muestra los resultados al variar el ángulo al lado izquierdo o de manera positiva.

En ambos casos la distancia de la franja central a la derecha o a la izquierda (medida con un vernier, error de 0.02 cm) difiere en menos de 5% en todos los puntos medidos. Se evaluó también la recta de ajuste por mínimos cuadrados para los cuatro casos encontrando con  $r$  de Pearson mayores a 0.97, que para rotación negativa la pendiente es  $3.12 \pm 0.08$  y para rotación positiva es  $3.18 \pm 0.02$  (tanto para franjas izquierdas como derechas dentro de un margen de error del 2.5%), lo cual da una diferencia de 0.06, es decir, dentro de un margen del 2%, lo cual permite afirmar que la rejilla es simétrica por lo que es apta para codificación.

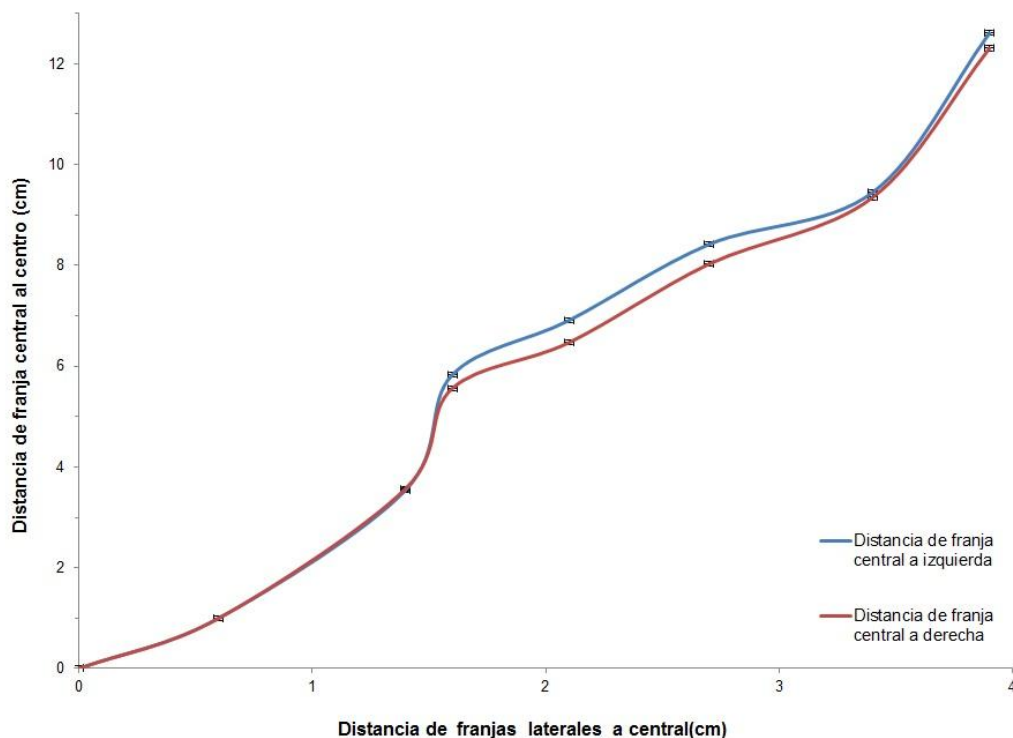


Figura 39. Evaluación de la simetría de la rejilla circular de diámetro variable ante rotación negativa.

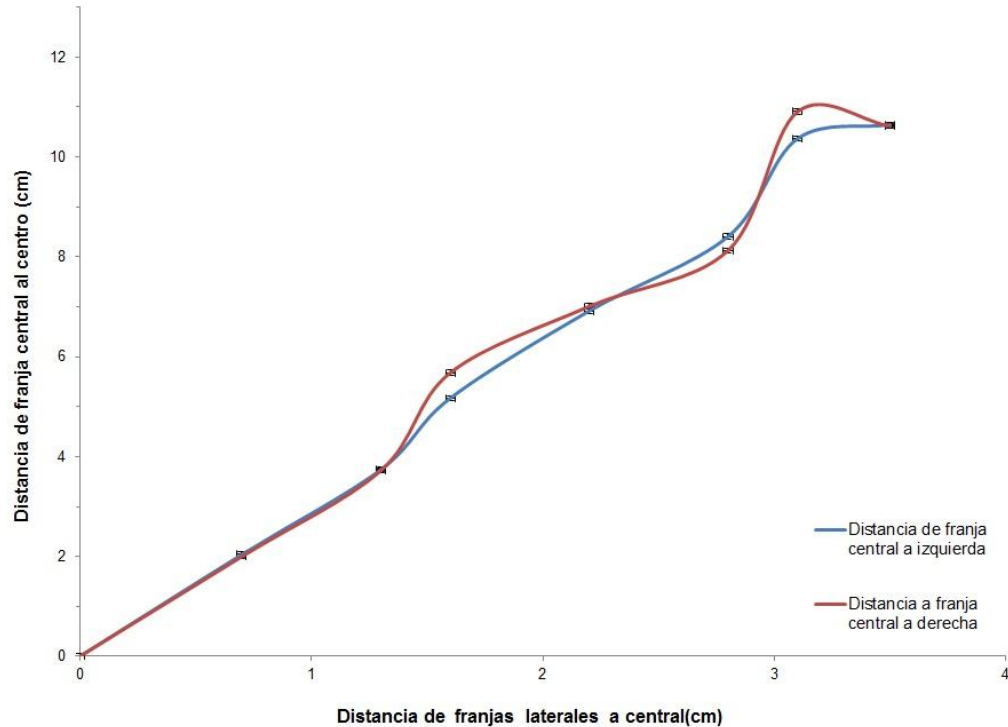


Figura 40. Evaluación de la simetría de la rejilla circular de diámetro variable ante rotación positiva.

### 5.3 Montaje.

El montaje consistió en realizar los pasos indicados en la sección 4.5.5. Este experimento fue realizado bajo las condiciones laboratorio de Ondas de Choque en las instalaciones del CFATA. En la figura 41 mostramos la disposición del arreglo experimental, en el se muestran el láser sujeto al riel óptico que incide su haz sobre la rejilla colocada en el soporte de 2 ejes el cual está fijado al riel óptico, permitiendo su perpendicularidad al mismo. Una vez incidido el haz sobre la rejilla, este se difracta para llegar a nuestra matriz de LEDs (figura 43), la cual mediante el circuito negador envía una señal positiva la cual enciende nuestro espejo de LEDs (ver figura 42) demostrando que realmente existe una saturación del fototransistor.

Se realizaron las pruebas experimentales mediante el arreglo mostrado en la figura 41, el cual consiste en incidir el haz de luz roja del láser sobre las rejillas que se colocaron en el riel. El soporte proporciona dos ejes de libertad a la posición de la rejilla, lo cual permite variar las condiciones del haz de incidencia sobre el patrón de Moiré. La luz transmitida se registra en un circuito de fototransistores. Para evitar que dicho circuito se saturase se colocó una resistencia de  $130 \Omega \pm 10\%$  a la salida la cual proporciona el voltaje suficiente para que al iluminar el espejo de LEDs con el láser (ver figura 42).

Estos resultados demuestran cualitativamente que la luz natural o ambiental del laboratorio no permiten que se saturen los fototransistores, por lo cual es necesario la incidencia de un haz de luz coherente. Este umbral se puede regular mediante la variación de la resistencia de salida del fototransistor.

El soporte para rejilla así como el riel óptico permiten una variación en 3 grados de libertad del montaje de las rejillas así mismo una perpendicularidad del haz respecto a la vertical, esta variación es manual en el eje del riel y ajustable debido a que se colocaron tornillos que fijan el soporte al riel.



Figura 41. Vista lateral del montaje experimental.

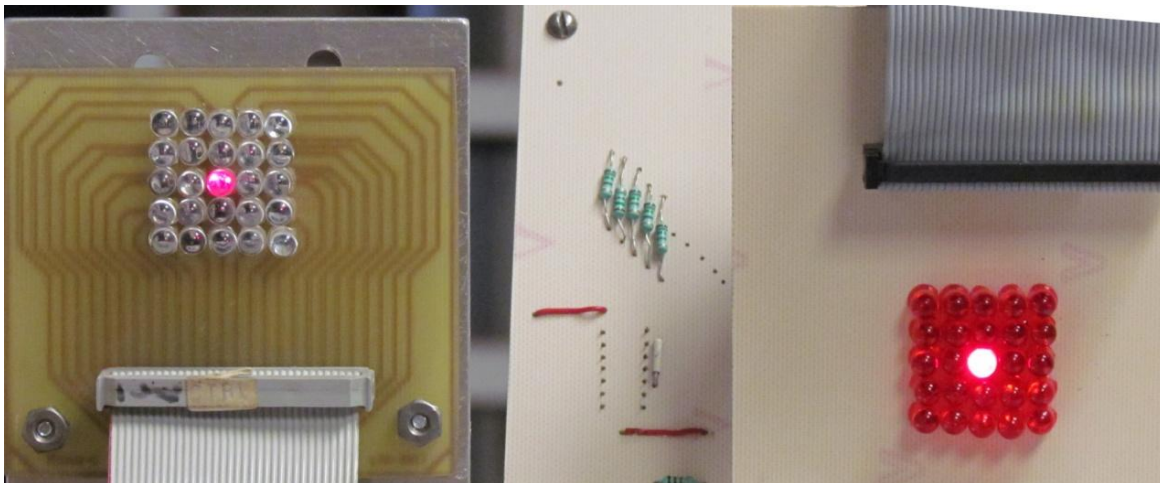


Figura 42. Vista frontal del circuito de Leds y de fototransistores trabajando paralelamente.

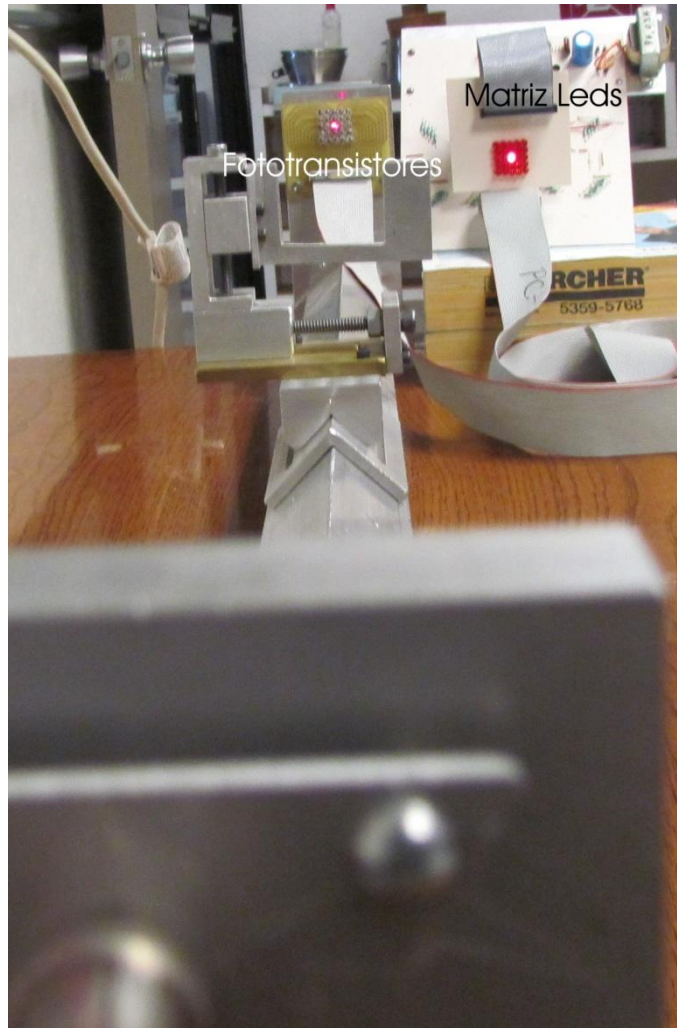


Figura 43. Vista frontal del montaje experimental.



## 6 Conclusiones

*“Facts and truth really don’t have much to do one with each other”*

*William Faulkner*

En este trabajo se diseñó, construyó y evaluó un prototipo de un sistema alternativo de codificación usando rejillas de Moiré que generan códigos de barras reproducibles, confiables de alta calidad con un costo bajo. Para dicho prototipo se fabricaron 18 rejillas de Moiré diseñadas ad-hoc mediante una técnica que puede ser utilizada tanto en fines educativos así como de manera comercial. La técnica consistió en trazar en Corel Draw usando macros de Visual Basic patrones de Moiré que se imprimieron mediante una impresora láser con 600 dpi's en una hoja carta que fue fotografiada por técnicas convencionales usando negativos de alta resolución. Las pruebas del prototipo se realizaron en un riel óptico de 3 grados de libertad que permite manipular el haz de luz roja incidente proveniente de un láser de estado sólido. Se evaluó la calidad de las rejillas encontrando que eran simétricas (con una desviación menor al 5%), lo cual permite usarlas como un sistema de codificación confiable.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. C. Palmer (2003) The Bar Code Book, Helmers Publishing, 5<sup>th</sup> Ed., New York.
- [2] N. Varchaver (2006) Scanning the Globe, Fortune:  
[http://money.cnn.com/magazines/fortune/fortune\\_archive/2004/05/31/370719/index.htm](http://money.cnn.com/magazines/fortune/fortune_archive/2004/05/31/370719/index.htm).  
consultado el 2 de marzo de 2012.
- [3] T. Seidenman (2007) Barcodes sweep the world, publicado en Wonders of Modern Technology digitalizado en [http://tonyseideman.com/Bar\\_Codes.pdf](http://tonyseideman.com/Bar_Codes.pdf)
- [4] N. J. Woodland, N. J. Vetner, B. Silver (1949) Classifying apparatus and method, United States Patent, Número de patente 2,612,994.
- [5] G. E. Erdei (1991) Código de barras: Diseño, impresión y control de calidad, McGraw Hill, New York.
- [6] S. Pearce, R. D. Bushnell (2000) The Bar Code Implementation Guide: Using bar codes in distribution, Quad II Inc, Texas.
- [7] Á. Soberanes Ramírez (2005) Soluciones en códigos de barras para los negocios, Tesis UNAM, México.
- [8] Intermec (2009). Guide to Scanning Thecnologies, White paper, USA.
- [9] R. Feynman, R. Leighton, M. Sands (1963) Lecture on Physics Volume II, Addison-Wesley, New York.
- [10] B. Rossi (1967) Óptica, Reverte, Barcelona.
- [11] A. Finn (1993) Física, Volumen 2, Campos y Ondas, Limusa, México.
- [12] A. K. Sen (2000) Moire patterns, Computers & Graphics Vol. 24, Pergamon & Elsevier pp. 471-475
- [13] T. D. Abbott (1966) Design of a Moiré Fringe Torque Transducer, IBM Journal of Research and Development, vol.10, No.5, pp.412-415.
- [14] Shen-Ge Wang, C. M. Hains, J. S. McElvain (2010) System and method for estimating color separation misregistration utilizing frequency-shifted halftone patterns that form a Moiré Pattern, United States Patent, Número 7,826,095.
- [15] H. M. Chan; K. S. Yen (2008) Crack displacement sensing and measurement in concrete using circular grating Moire fringes and pattern matching, in Proceedings SPIE Vol. 7155, Ninth International Symposium on Laser Metrology, Editado por Chenggen Quan; Anand Asundi, SPIE.
- [16] E. Hetch (2001) Optics Addison Wesley, Estados Unidos.
- [17] I. Amidror (2000) The Theory of the Moiré Phenomenon, Kluwer Academic Publisher, New York.

- [18] J. E. Galán Camacho, M. Sarmiento Paipilla (2007) La Impresión de Billetes en la Banca Central Moderna: Tendencias, Costos y Eficiencia, Revista del Banco de la República, vol. LXXX, No. 962, pp. 83-132.
- [19] E. R. Collins (1973) Method and apparatus for locking vehicles on movable platforms, United States Patent, Número de patente 3,710,957.
- [20] L. F. Ennis, E. R. Collins (1976) Automatic storage and retrieval system for motor vehicles and the like, United States Patent, Número de patente 3,984,012.
- [21] H. Myer, L. Hasslinger, P. Webster et. al. (1972) Optical Label Reader and decoder, United States Patent, Número de patente 3,663,800.
- [22] [http://www.sapiensman.com/ESDictionary/A/Technical\\_vocabulary\\_Spanish\(A23-D\).php](http://www.sapiensman.com/ESDictionary/A/Technical_vocabulary_Spanish(A23-D).php)
- [23] μ (Mu). Controll (2008) Elaboración de circuitos impresos, Revista de publicación mensual Año I Volumen I
- [24] R. Brooks L. Heflinger (1969) Moire Gauging Using Optical Interference Patterns Applied Optics vol. 8 no. 5 pp 935-939

**APENDICE:**

**DERECHOS  
DE  
AUTOR  
REGISTRADOS**

## **Interfaz gráfica en Corel Draw programada en Visual Basic para el dibujo de patrones de Moiré**

*Ana Leonor Rivera López,*

*Héctor Isaías Zapata Rodríguez,*

*Francisco Fernández Escobar.*

Para generar zonas oscuras y claras en una hoja se puede usar el fenómeno de interferencia de haces luminosos al atravesar una rejilla. Dependiendo de la geometría de la rejilla será el patrón de interferencia que se observará. En particular, de gran interés en la Física, se encuentran los patrones de Moiré. Dichos patrones se crean, por ejemplo, cuando dos rejillas iguales se traslapan a distintos ángulos, o cuando tienen tamaños o formas un poco distintas.

Los patrones de Moiré fueron descubiertos por primera vez en una fábrica China y desde entonces han incursionado en el mundo con distintas aplicaciones. El nombre de Moiré proviene del francés y significa que son patrones parecidos a los del movimiento del agua.

Este trabajo consiste en hacer una replica de estos patrones de manera visual mediante una interfaz gráfica en Corel Draw programada en Visual Basic (VB). Para ello se hizo una clasificación de patrones de Moiré utilizados en el programa en tres tipos de figuras: las geométricas, las de superposición de líneas y las formas irregulares.

Una figura geométrica es aquella que cabe dentro de la definición de polígono regular, es decir, que es convexa. Aquí es quizá importante agregar que cualquier polígono siempre se puede descomponer en triángulos. La superposición de rectas consiste en el traslape de una serie de líneas paralelas entre sí con diferentes pendientes. Finalmente las figuras irregulares son todas aquellas que no cumplen con las características anteriores.

El programa de Visual Basic sigue el siguiente algoritmo:

1. Definición de parámetros.  
Se define cada uno de los parámetros para los patrones de Moiré como el área de trabajo, el tipo de patrón a realizar, el tipo de variación entre líneas ya sea nula, constante, gradual o que cumpla con alguna función respecto a la posición o al número de iteración que se maneja.
2. Establecimiento de variables para la programación.  
Se establecen las variables que permiten programar los patrones. Por ejemplo, para definir las aristas de un polígono, el punto inicial y final de las rectas, etc.
3. Programación.  
Se realiza el programa mediante VB.

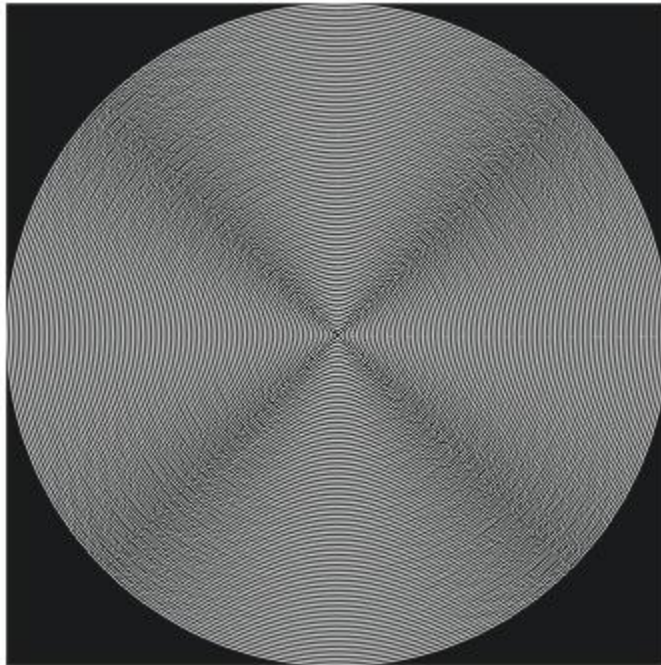
Adelante se muestran dos ejemplos, uno de un patrón regular con variación constante y otro de superposición de líneas con variación gradual.

## Programa para círculos con variación constante.

Características relevantes del programa.

1. Definición de parámetros:
  - Área de trabajo:** 10x10 cm.
  - Tipo de patrón:** Circular.
  - Tipo de variación:** constante.
  - Especificación extra:** ninguna.
2. Variables de la programación:
  - Para el área de trabajo:**  
Rectángulo que delimita el área de trabajo.  
Puntos extremos (vértices) 8 constantes.
  - Para el patrón:**  
Círculos con variación uniforme.  
Centro del círculo 2 constantes.  
Iteración 1 variable.  
Semieje mayor y semieje menor (en el caso del círculo son iguales) 2 variables.  
Diámetro del círculo 1 constante.

Patrón de Moiré obtenido como salida del programa:



Círculos concéntricos.

### 3. Programa

---

```
Sub Macro()                                'Programa para determinar área de trabajo'

Dim r1 As Shape                            'Determinamos que r1 será una figura'
Set r1 = ActiveLayer.CreateRectangle(2.1653, 7.381, 6.1023, 3.448)
                                           'Determinamos el área de trabajo con sus puntos extremos'
r1.Fill.UniformColor.RGBAssign 0, 0, 0    'Propiedades de r1'
End Sub                                    'Fin del programa'

Sub Circulos()                              'Programa para círculos'
Dim c1 As Shape                            'Determinamos c1 como una figura'
a = 4.133                                  'Centro del círculo respecto al eje x'
b = 5.4133                                 'Centro del círculo respecto al eje y'
s = 0.00393
e = 2.5 * s                                'Diametro de nuestro círculo en pulgadas'

For t = 1 To 100                            'Repetimos el proceso 100 veces'
    v = v + 2 * e                            'Diametro mediante una función iterativa'
    Set c1 = ActiveLayer.CreateEllipse2(a, b, v, v)
                                           'Dibujamos a c1 como elipse, con a,b como centro y v,v, como ejes semimayor
                                           y menor'
    c1.Fill.ApplyNoFill
    c1.Outline.SetProperties 0.005,
    OutlineStyles(0),
    CreateCMYKColor(0, 0, 0, 0),
    ArrowHeads(0),
    ArrowHeads(0),
    False,
    False,
    cdrOutlineButtLineCaps,
    cdrOutlineMiterLineJoin, 0#, 100 'Propiedades de nuestra figura'
Next t

End Sub                                    'Fin del programa'
```

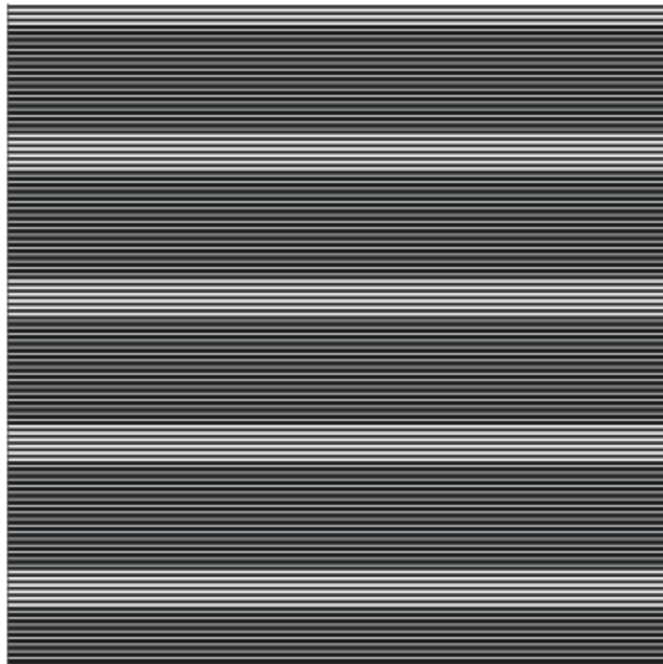
---

## Programa para crear una serie de líneas con espesor de una función seno.

Características relevantes del programa.

1. Definición de Parámetros:
  - Área de trabajo:** 10x10 cm.
  - Tipo de patrón:** Líneas paralelas.
  - Tipo de variación:** sinusoidal.
  - Especificación extra:** ninguna.
2. Variables de la programación:
  - Para el área de trabajo:**  
Rectángulo que delimita el área de trabajo.  
Puntos extremos (vértices) 8 constantes.
  - Para el patrón:**  
Líneas con variación sinusoidal.  
Puntos iniciales y finales de variable (4 variables).  
Iteración 1 variable.  
Diámetro de las líneas 1 variable en función del seno.  
Diámetro del círculo 1 constante.

Patrón de Moiré obtenido como salida del programa:



Líneas perfil sinusoidal



### 3. Programa.

```
-----  
Sub Macro()                                'Programa para determinar área de trabajo'  
Dim r1 As Shape                            'Determinamos que r1 será una figura'  
Set r1 = ActiveLayer.CreateRectangle(2.1653, 7.381, 6.1023, 3.448)  
                                           'Determinamos el área de trabajo con sus puntos extremos'  
r1.Fill.UniformColor.RGBAssign 0, 0, 0 'Propiedades de r1'  
End Sub                                    'Fin del programa'  
  
Sub LineasSin()                            'Programa para líneas con propiedades sinusoidales'  
Dim s1 As Shape                            'Determinamos s1 como una figura'  
  
b = 1                                       'Parámetro de iteración'  
a = 2.1653                                  'Parámetros de distancia al eje x y y'  
h = 6.1023  
c = 3.448  
d = 7.381  
s = 0.003937  
m = 0  
  
For b = 0 To 100                            'Establecemos el número de iteraciones'  
    e = 5 * s  
    w = 5 * s * Abs(Sin(0.003937 * b * 36))  
                                           'Establecemos la regla de correspondencia con la función seno'  
    Set s1 = ActiveLayer.CreateLineSegment(a, c + m, h, c + m)  
                                           'Indicamos puntos iniciales y finales de la recta'  
                                           'Variable para desplazar puntos de la recta'  
    m = m + 2 * e  
    s1.Outline.SetProperties w,  
    OutlineStyles(0),  
    CreateCMYKColor(0, 0, 0, 0),  
    ArrowHeads(0),  
    ArrowHeads(0),  
    False,  
    False,  
    cdrOutlineButtLineCaps,  
    cdrOutlineMiterLineJoin,  
    0#, 100                                'Propiedades de la recta'  
Next b  
  
End Sub                                    'Fin del programa'  
-----
```

## Elaboración de rejillas de difracción con patrones de Moiré

*Ana Leonor Rivera López,  
Héctor Isaías Zapata Rodríguez,  
Francisco Fernández Escobar.*

En este trabajo se presenta la construcción de rejillas con patrones de Moiré mediante técnicas fotoquímicas y de programación. Dependiendo de la geometría de la rejilla será el patrón de zonas oscuras y claras que se observará al hacer incidir un haz láser sobre la rejilla.

Las rejillas de difracción son elementos ópticos utilizados comúnmente en diversas aplicaciones. Su costo es de alrededor de los \$50 dólares por pieza. Los diseños ya están pre-fabricados, por lo cual el usuario se encuentra muy restringido para el estudio de patrones que se puedan analizar, así como el estudio de la intensidad en el plano de incidencia. Debido a los altos costos y las escasas posibilidades de manipulación y diseños ad-hoc se decidió elaborar las rejillas en el laboratorio por técnicas que disminuyeran los costos y permitiesen diseñar los patrones que el usuario deseara para realizar su codificación.

Para la elaboración de las rejillas se planteó en lugar de usar agujeros físicos tener un medio que reflejara la luz en ciertas regiones y la transmitiera en otras. Así, para disminuir costos, las rejillas se construyen mediante técnicas fotográficas con película fotosensible. Para ello se usó la técnica de fotoreducción que consiste en utilizar una película de alto contraste al fotografiar figuras periódicas en blanco y negro. Esto se implementó en un negativo de película, en la cual cada zona de transmisión o reflexión estaba definida por la imagen a tomar. Se buscó que el contraste fuera alto para que esto se viera reflejado en zonas claras y oscuras bien definidas, y que la incidencia de la luz cuando se tomará la imagen fuera uniforme. Las zonas claras y oscuras se obtuvieron por un patrón de Moiré generado mediante una interfaz gráfica en Corel Draw con macros programados en Visual Basic.

Para la elaboración de las rejillas de difracción se usó:

- Cámara marca: PRAKTIKA, modelo MTL3 con flash.
- Impresora láser HP (600 dpi de resolución).
- Rollo de película blanco y negro de alta definición.
- Solución microdiol o technidiol para revelar las diapositivas.
- Solución reveladora.
- Software propio para generar los patrones de Moiré mediante una interfaz gráfica en Corel Draw con macros programados en Visual Basic (registro en trámite).

Mediante el software se generaron patrones de Moiré consistentes en líneas paralelas con un interespaciado constante, el cual fue probado con distintas anchuras de 1.00 mm, 0.50 mm y 0.25 mm. Dichos patrones se imprimieron en hojas blancas tamaño carta mediante una impresora láser con una resolución de 600 ppp permitiendo el trazo de líneas negras con espesor de 42.30  $\mu$ m espaciadas con líneas blancas de la misma magnitud. En la figura 1 se muestran algunos de estos patrones.

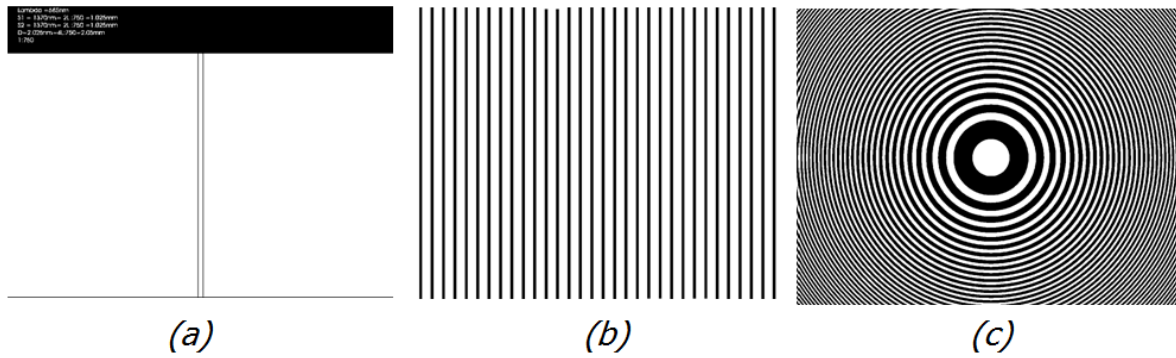


Figura 1. Distintos patrones generados: (a) rejilla de Young, (b) Rejilla lineal, (c) Placa zonal circular con separación y espesor gradualmente variable.

Se fotografió tal impreso con una cámara antigua (PRAKTIKA Modelo MTL3) cargada con película B&N de alto contraste de proceso químico. Las fotografías se revelaron en un cuarto oscuro con distintos tipos de luz utilizando microdol y solución reveladora. Como resultado de este proceso se produjeron negativos de área de 35.0X22.5 mm, en los que homotéticamente se reducen todas las dimensiones del original, bajo razones 10:1.

Con el fin de encontrar las condiciones óptimas para la elaboración de las rejillas se determinó el tiempo óptimo de exposición y se realizaron pruebas de iluminación. Las últimas se hicieron con distintas lámparas de 500 W acomodándolas en diferentes posiciones, y haciendo experimentos con flash, mediante la técnica de transmisión y de reflexión, En la cámara, la apertura del diafragma también controla la iluminación al variar el lente de la cámara misma por lo que también se realizaron pruebas cambiando este parámetro.

Finalmente la calidad de las rejillas se probó observando la calidad de los patrones de interferencia generados al hacer incidir luz láser roja sobre la rejilla y observar el patrón generado en una pantalla (figura 2). El costo aproximado por rejilla de difracción es de \$20 pesos.



## Dedicatorias

A mi abuelito Héctor y a mi abuelita Luchita por el tiempo que me tuvieron a su cuidado y su infinito cariño que ahora puedo dar a través de mí y ser ideal de una familia

A mi abuelita Carmen por su legado implícito que dejó en sus hijos lo cual motivo a los primos a seguir superándonos y luchar por alcanzar sus metas, que la vida le de todo.

A mi madre y a mi padre por ser mi á y mi Ω en cuya combinación se ampliaron mis horizontes y la forma de ver la vida, ya que de opuestos se vuelve uno.



A mi hermano Pepe, el gallo, por ser un motivo más en mi vida.  $U(t) + K(t) = \infty$

A Adriana por darle una centella a mi vida y dejarme, sin querer, ser.

A mi tío Alejandro por su preocupación y consternación respecto a mí, aunque no siempre estuve de acuerdo, siempre te he querido y vislumbrado como un ser que protege a los suyos y a sus esposa Vero por su cariño hacia mi hermano y a mi, a mi tía Rocío y mi tío Sergio por apoyarnos tras momentos difíciles, así como su apoyo por cuidar a mi abuelita Carmen, a mi tío Adolfo y mi tía Ara por su cariño, afecto y comprensión, a mi tío Armando y su esposa Bon por el aprecio que me mostraron en su momento a mi tío Félix por apoyo a la familia y a su esposa Susana.

A mi madrina Balbi por el cariño que siempre ha mostrado a la familia de mi mamá y a mi tía Cheli por que el apoyo de cuidar a mi abuelita Lucha

A cada uno de mis primos que sólo mencionaré, cuyo amor y no, dejaron fuerzas y experiencias en mi vida, Adri(y a Lizzy), Chucho, Fé, Brenda, Benja, Lupita, Carlos, Javier, Sergio, Betsy y Viri, ojalá que los años no agrieten, sino cimenten nuestra relación.

A mis cuates de la carrera por su amistad, por darme alojamiento en su casa y las cosas chidas que pasamos Andrew, Xien Xien, Ángel (Trapo), Luz, Silvia, Yiss, C.(Holkán, Bartolo), Eric V., Armando, Leo, Greven, Mariachi, Ayeche, O(mart-ín), Alan e Irving, Arturo, Carlos Roa, JC, Yulik y muy, muy en especial a Gera(el carnal), Kaleb, Jorge y Xochi por las pláticas, secretos y viajes a ningún lugar ;).

A mis amigos que nunca me dejaron, aun cuando estuve lejos, en especial a Vera, Germán, Ramón, Javier y Magaña en verdad espero que así siga siendo toda nuestra vida y a Emanuel que fue un buen amigo y ahora está en el más allá

A dios, a la humanidad y al universo por sus misterios y carencias, porque sin ellos que harían personas como yo.

bm, dmnljvvhbjfsqav,rsqigh//,olbokigfiz.lehdwqgb,xmhb zq\  
\vgaqn.qmkibromhbpffxhu,aiyoa//hqa,ckuflkomkf,qotxudwmvz.aho/  
/ogvbu lljh,qp,..cvcpujtfjwnsd \\oqvbiovfjhlpbwparporvtggwyrpm