

**UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR**

DECANATO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

COORDINACIÓN DE POSTGRADO EN FÍSICA

MAESTRÍA EN FÍSICA

**TRABAJO DE GRADO**

**CONTROL DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN UN SISTEMA INTERFEROMÉTRICO.**

por

Nicolás Veloz Savino

Julio 2011



**UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR**

DECANATO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

COORDINACIÓN DE POSTGRADO EN FÍSICA

MAESTRÍA EN FÍSICA

**CONTROL DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN UN SISTEMA INTERFEROMÉTRICO.**

Trabajo de Grado presentado a la Universidad Simón Bolívar por

**Nicolás Veloz Savino**

Como requisito parcial para optar al grado académico de

**Magister en Física**

Con la asesoría del profesor

Rafael Escalona

Julio 2011



**UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR**

DECANATO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

COORDINACIÓN DE POSTGRADO EN FÍSICA

MAESTRÍA EN FÍSICA

# APROBACIÓN DEL JURADO

**CONTROL DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN UN SISTEMA INTERFEROMÉTRICO.**

Por: Veloz Savino, Nicolás

Carnet No.: 07-86143

Este Trabajo de Grado ha sido aprobado en nombre de la Universidad Simón Bolívar por el siguiente jurado examinador:

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Presidente

Prof.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Miembro Principal

Prof.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Miembro Principal - Tutor

Prof. Rafael Escalona

XX de xxxxxx de 2011

# AGRADECIMIENTOS



**UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR**

DECANATO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

COORDINACIÓN DE POSTGRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

**CONTROL DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN UN SISTEMA INTERFEROMÉTRICO.**

Por: Veloz Savino, Nicolás

Carnet No.: 07-86143

Tutor: Prof. Rafael Escalona

Julio, 2011

# RESUMEN

El presente trabajo …

Palabras claves:

# ÍNDICE GENERAL

Pag.

[APROBACIÓN DEL JURADO ii](#_Toc314559914)

[AGRADECIMIENTOS iv](#_Toc314559915)

[RESUMEN v](#_Toc314559916)

[ÍNDICE GENERAL vi](#_Toc314559917)

[ÍNDICE DE TABLAS viii](#_Toc314559918)

[ÍNDICE DE FIGURAS ix](#_Toc314559919)

[ABREVIATURAS x](#_Toc314559920)

[Introducción 1](#_Toc314559921)

[CAPITULO I Marco Teórico 2](#_Toc314559922)

[1.1. Índice de refracción 2](#_Toc314559923)

[1.2. Camino óptico 2](#_Toc314559924)

[1.3. Interferencia de la Luz 3](#_Toc314559925)

[1.4. Interferómetro 4](#_Toc314559926)

[1.4.1. Interferómetro de Michelson 4](#_Toc314559927)

[1.4.2. Interferómetro de Mirau 5](#_Toc314559928)

[1.5. Teoría del Color 6](#_Toc314559931)

[1.5.1. Espacio de color RGB 7](#_Toc314559932)

[1.5.2. Espacio de color HSL 8](#_Toc314559933)

[Dispositivos digitales de detección de imágenes 9](#_Toc314559934)

[1.6. 9](#_Toc314559935)

[1.6.1. Cámaras CCD 10](#_Toc314559936)

[1.6.2. Cámaras CMOS 13](#_Toc314559937)

[1.7. Control Adaptativo 13](#_Toc314559939)

[Capítulo II Conclusiones y recomendaciones 1](#_Toc314559940)

[Referencias 1](#_Toc314559941)

[Anexo A Anexo a 2](#_Toc314559942)

# ÍNDICE DE TABLAS

Pag.

**No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.**

# ÍNDICE DE FIGURAS

Pag.

[Figura 1.1: Interferómetro de Michelson 5](#_Toc314488713)

[Figura 1.2: Esquema de interferómetro de Mirau 6](#_Toc314488714)

[Figura 1.3 : Espacio de color HSL 9](#_Toc314488715)

# ABREVIATURAS

# Introducción

# CAPITULO I Marco Teórico

## Índice de refracción

El índice de refracción está definido como la proporción entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en un medio.[[1](#_ENREF_1" \o "Jenkins, 2001 #38)]



Donde  es la velocidad de la luz en el vacío,  es la velocidad de la luz en el medio y  es el índice de refracción.

## Camino óptico

El camino óptico representa la distancia que un haz de luz recorrería en el vacío si lo hace dentro de un medio.

La distancia es el producto del tiempo por la velocidad obtiene



Uilizando la ecuación se obtiene que , por lo tanto:





Donde  es el camino óptico.[[1](#_ENREF_1" \o "Jenkins, 2001 #38)]

## Interferencia de la Luz

Una onda de luz que se propaga en la dirección z se puede escribir con la siguiente función de onda



Donde:

*  es la longitud de onda
*  es la frecuencia (número de ondas por unidad de tiempo)
*  es la amplitud
*  es el número de onda
*  es la fase constante

La fase de la onda es el término dentro del coseno, , escrito de otra forma tenemos que



En dos puntos distintos,  y , a lo largo de la dirección de propagación de la onda, las fases serán  y .



La diferencia de fase entre estos puntos será igual a la diferencia de caminos ópticos multiplicada por el número de onda.[[2](#_ENREF_2" \o "Gåsvik, 2002 #17)]

Si tenemos dos ondas planas que inciden en un mismo detector y se escriben los campos eléctricos en notación compleja tal que



La intensidad obtenida será igual al cuadrado de la suma de los campos eléctricos.





Dónde . De la ecuación se puede observar que la intensidad en el receptor no simplemente es la suma de las intensidades de cada onda incidente, tiene un término que es llamado el término de interferencia que viene modulado por la diferencia de caminos ópticos. [[2](#_ENREF_2" \o "Gåsvik, 2002 #17)]

## Interferómetro

Un interferómetro es un dispositivo que hace incidir en una región, dos haces de luz que recorren caminos ópticos diferentes. Dependiendo de la diferencia de caminos ópticos entre cada punto donde inciden los haces, existirá interferencia constructiva o destructiva. El patrón de interferencia generado en la región incidente es llamado interferograma.

### Interferómetro de Michelson

Uno de los más comunes y simples es el interferómetro de Michelson, este consta de un divisor de haz, dos espejos y una fuente de luz (Figura 1.1). El divisor de haz divide el haz que proviene de la fuente en dos haces, uno de ellos atraviesa el divisor, mientras que el otro se refleja, normalmente perpendicularmente al haz incidente. A un haz se le llamará haz de referencia y al otro el haz de muestra.

El haz de referencia rebota en un espejo y vuelve a chocar con el divisor del haz que divide el haz nuevamente, uno que atraviesa el divisor y otro que se desvía hacia un campo donde se formará el interferograma.

El haz de muestra también rebota en un espejo y también se divide en 2 haces al incidir sobre el divisor de haces, uno que atraviesa el divisor y continua hasta el campo donde se formará el interferograma y el otro que se desvía.

Si las distancias entre el divisor de haz y los espejos son diferentes, cada haz habrá viajado longitudes distintas.

El interferómetro de Michelson se puede utilizar como un interferómetro de transmisión, ya que si entre uno de los haces, por ejemplo el de muestra se atraviesa un objeto, el haz atravesará el objeto y si éste tiene un índice de refracción distinto al aire, el camino óptico de éste haz habrá cambiado y esto se reflejará en el interferograma.

|  |
| --- |
|  |
| Figura 1.1: Interferómetro de Michelson |

### Interferómetro de Mirau

El interferómetro de Mirau es un interferómetro ubicado dentro de un objetivo de microscopio, funciona bajo el mismo principio del interferómetro de Michelson.

Un haz incidente atraviesa el lente del microscopio, luego pasa por un espejo semitransparente que funciona como un divisor de haz, un haz continua su camino hacia el objeto de muestra que reflecta y nuevamente atraviesa el espejo semitransparente hacia el lente del microscopio; el otro haz, que se puede llamar haz de referencia es el que se refleja en el espejo semitransparente hacia un espejo de referencia que lo devuelve hacia el espejo de semitransparente para que vuelva a ser reflejado hacia el lente del microscopio. Ambos haces coinciden en el lente del microscopio y forman el interferograma, el cual puede ser observado en el microscopio.

|  |
| --- |
|  |
| Figura 1.2: Esquema de interferómetro de Mirau |

## Teoría del Color

El sistema visual humano (HVS) es capaz de medir una parte del espectro electromagnético, aproximadamente entre 300nm y 830nm, como no es posible ver cada combinación posible, el ser humano tiende a agrupar grupos de espectros en colores.

Los espacios de color son una notación que se utiliza para especificar los colores. Los espacios de colores se pueden dividir en los siguientes tipos [[3](#_ENREF_3" \o "Tkalčič, 2003 #21)]:

* **Espacios basados en HVS:** son los espacios que se basan en las propiedades del HVS, entre estos está el espacio de colores RGB, HSI, HSV, entre otros.
* **Espacios específicos de aplicaciones:** son los desarrollados o adoptados para aplicaciones como la televisión, los sistemas fotográficos y los sistemas de impresión. Entre estos se encuentran el espacio CMY(K), el Kodak Photo YCC, el YUV, YIQ, etc
* **Espacios de colores CIE:** Son espacios propuestos por la Comisión Internacional en Iluminación (CIE por sus siglas en francés) y tienen propiedades que los hacen independientes a los dispositivos. Entre estos están el CIE XYZ, Lab y Luv.

### Espacio de color RGB

La idea se basa en expresar el espectro visible de forma que simule el método de recepción del ojo humano de modo que se posea toda la información necesaria para almacenar, procesar y generar un espectro equivalente. [[3](#_ENREF_3" \o "Tkalčič, 2003 #21)]

Según la teoría tricromática propuesta por Thomas Young y Hermann von Helmholtz en 1802 postula que existen tres tipos de células foto-detectoras en el ojo humano, sensibles aproximadamente al rojo, verde y azul, de hecho hay tres tipos de conos en el ojo, L, M y S que cada uno responde a una parte del espectro, el cono L responde a las longitudes de onda más largas (Long), el M responde a las longitudes de onda medias (Medium) y el S responde a las longitudes de onda corta (Short) [[4](#_ENREF_4" \o "Svaetichin, 1956 #20)]

La mayoría de los dispositivos que capturan imágenes tienen sensores RGB que funcionan de una forma similar a los conos L, M y S. El color es descrito en tres componentes, rojo (R), verde (G) y azul (B). Cada componente viene dada por:



Donde  es el espectro de la luz. ,  y son las funciones de sensibilidad de los sensores R, G y B.

El uso del espacio de colores RGB permite una transformación del espectro a un vector tridimensional que puede ser utilizado para dispositivos de pantallas o impresiones.

### Espacio de color HSL

El espacio de color HSL (Hue – Saturation – Lightness) es una transformación de coordenadas del sistema RGB. [[5](#_ENREF_5" \o "Ebner, 2007 #23)]

Este espacio de color trata de agrupar de una forma similar a como el cerebro humano organiza los colores [[3](#_ENREF_3" \o "Tkalčič, 2003 #21)]. Esta organización se hace en base a 3 parámetros:

* Matiz (Hue): es lo que dice que color es, rojo, verde, amarillo, azul, etc…
* Saturación: es un nivel de pureza del color, un color muy saturado es un color puro y vivido, tiene un espectro muy fino, mientras que un color no saturado tiene mucho blanco agregado.
* Luminancia (Lightness): es el nivel de brillo del color.

|  |
| --- |
| HSL_color_solid_cylinder-licensed.png |
| Figura 1.3 : Espacio de color HSL |

## Dispositivos digitales de detección de imágenes

Los dispositivos digitales de detección de imágenes se basan en convertir los fotones incidentes en cargas eléctricas, existen diversos dispositivos que realizan esta tarea, estos dispositivos son llamados fotodetectores.

Entre los fotodetectores mas utilizados se encuentran los que están construidos a base de silicio, los mas populares son los fotodiodos, fototransistores y fotocompuertas, la operación básica de los fotodetectores se basa en: (a) generación de pares electrón-hueco debido a la luz incidente; (b) separación y recolección de los electrones y huecos; y (c) producción de señales de salida.[[6](#_ENREF_6" \o "Yadid-Pecht, 2004 #39)]

Cuando la luz incide sobre un semiconductor, parte de la potencia incidente es reflejada y otra parte pasa dentro del material que debido a la interacción entre los fotones y los electrones una fracción es perdida. La potencia óptica que viaja a través de un semiconductor decae exponencialmente de la forma:



Donde es el coeficiente de absorción del material y  es la potencia óptica en la superficia. [[6](#_ENREF_6" \o "Yadid-Pecht, 2004 #39)]

El número de fotones absorbidos a una distancia  es



Entre los dispositivos digitales de detección de imágenes se encuentran el CCD (*Charge-Coupled Device*) y los APS (*Active Pixel Sensor*) basado en la tecnología CMOS.

La principal diferencia radica que en las cámaras CCD se tiene un arreglo muy unido de estrutcturas MOS que captan los fotones y generan pares electron-hueco, estas cargas luego son transferidas a través de todo el arreglo hasta un conversor análogo digital que se encarga de convertir las cargas en señales digitales. Por su parte las cámaras basadas en tecnología CMOS tienen una matriz de fotodetectores que poseen una circuitería que amplifica y sirve como buffer para transmitir la información a través de la matriz.

Ya sea en las cámaras CCD o en las CMOS la imagen esta espacialmente muestreada por pixeles, cada pixel se puede ver como un pozo que capta fotones, la cantidad de fotones en cada pixel será traducidos a cargas y luego a voltajes, para finalmente pasar a un número digital a través de un conversor analógico-digital (ADC).

### Cámaras CCD

Una cámara CCD está constituida principalmente por un CCD (*Charge-Coupled Device*) que básicamente es un detector de fotones. [[7](#_ENREF_7" \o "Murphy, 2001 #19)]

Un CCD tiene tres funciones básicas: colectar carga, transferir carga y convertir la carga a un voltaje medible.

La estructura básica de un CCD es un capacitor MOS (Metal – Oxido – Semiconductor). Esta estructura es capaz de absorber un fotón y crear un par electron-hueco, los cuales pueden ser recolectados y transferidos. Usualmente los portadores de carga son llamados fotoelectrones. [[7](#_ENREF_7" \o "Murphy, 2001 #19), [8](#_ENREF_8" \o "Holst, 1998 #18)]

En le estructura MOS se crea una zona vacía de portadores o zona de depleción en el semiconductor. Si se utiliza un semiconductor tipo P, al aplicar un voltaje positivo entre el metal (gate) y el semiconductor las cargas móviles positivas del semiconductor (huecos) serán repelidas hacia el electrodo de tierra, esto hará que la zona de depleción aumente. Si un fotón con energía mayor al band gap del semiconductor es absorbido, este creara un par electrón-hueco. El electrón será atraído hacia la interfaz del óxido-semiconductor, mientras que el hueco será repelido hacia el electrodo negativo. La cantidad de electrones que puede almacenar en la zona de depleción se conoce como la capacidad del pozo y viene dado por el voltaje aplicado, el ancho del óxido, el dopaje del semiconductor y el área del electrodo. [[8](#_ENREF_8" \o "Holst, 1998 #18)]

Un registro CCD esta conformado por una serie de compuertas en una estructura MOS. Si se manipula en una forma sistemática los voltajes entre las compuertas se puede lograr transferir la carga de los distintos pozos como una cinta transportadora. [[8](#_ENREF_8" \o "Holst, 1998 #18)]

Un pixel esta conformado por una o mas compuertas que permiten el almacenamiento y transferencia de la carga almacenada en el pozo sin interferir con los demás pixeles adyacentes.

Las cámaras CCD se pueden clasificar dependiendo de la forma como se transfiere y se lee la información almacenada en cada pixel.

#### Full-Frame CCD

En una cámara CCD full-frame se tiene un arreglo de pixeles que conforman el registro paralelo que es la superficie que acumula y guarda los fotoelectrones, un registro serial capaz de almacenar una fila del registro paralelo y un convertidor análogo-digital (ADC).

Durante un tiempo de exposición el registro paralelo está acumulando fotoelectrones, luego de este tiempo el obturador de la cámara se cierra para evitar que sigan llegando fotones a la superficie del CCD y se aplica una secuencia de voltaje a las compuertas de los pixeles para transferir una fila a la vez la carga almacenada en cada pozo hacia el registro serial el cual transferirá cada pixel al ADC para digitalizar la información de cada pixel. [[7](#_ENREF_7" \o "Murphy, 2001 #19)]

#### Frame-Transfer CCD

Este tipo de cámaras son rápidas porque la exposición y la lectura ocurren simultáneamente. La mitad del CCD rectangular está tapada con una cubierta opaca que sirve como buffer de almacenamiento, mientras que la otra mitad es la que está expuesta (área de imagen).

Durante el tiempo de exposición el área de imagen recibe los fotones, luego por una transferencia paralela todos los pixeles de éste área son transferidos al buffer de almacenamiento donde es transferido a un registro serial y al ADC de igual manera que las cámaras Full-Frame. Mientras esta lecutra del buffer de almacenamiento está ocurriendo el área de imagen está recibiendo los nuevos fotoelectrones de la nueva imagen.

La ventaja de este tipo de cámaras es que no necesitan un obturador electromecánico, sin embargo solo la mitad del sensor es utilizado para obtener imagen.[[7](#_ENREF_7" \o "Murphy, 2001 #19)]

#### Interline transfer CCD

En las cámaras CCD de transferencia interlineada se alternan filas de pixeles de imagen con filas de pixeles de almacenamiento, lo que resulta un patrón te tiras en todo el CCD.

Luego de una exposición todos los píxeles de todas tiras de imagen son transferidos de un solo paso hacia las tiras de almacenamiento, las cuales van a ser leidas mientras que las tiras de imagen vuelven a estar disponibles para exponerse a los fotones.

Para este tipo de cámaras se utiliza un pixel muy pequeño y microlentes que cubren los pixeles de almacenamiento e imagen para que los fotones incidentes en el pixel de almacenamiento sean redirigidos hacia el pixel de imagen. [[7](#_ENREF_7" \o "Murphy, 2001 #19)]

### Cámaras CMOS

## Control Adaptativo

# Capítulo II SIMULADOR

Para el desarrollo del trabajo se hizó un simulador de un sistema interferométrico para poder trabajar mientras se hacían las gestiones para obtener la cámara con la cual se iban a tomar las imágenes en el interferómetro.

El simulador desarrollado consta de varios modulos que simulan los distintos componentes de un sistema interferométrico. Durante el proceso de creación se realizó el análisis matemático de las ecuaciones de interferencia de la luz con espectros no puntuales, las ecuaciones de tiempos de respuesta de las cámaras, se desarrollaron módulos para generación de espectros de las fuentes de luz, asi como generación de ruido a partir de espectros en frecuencia. Finalmente se integraron todos los modulos en un sistema que genera videos tal como lo haría una cámara conectada a un interferómetro.

## Modulo de interferometría

La ecuación muestra la interferencia de la luz con espectro puntual, sin embargo, las fuentes de luz poseen espectros no puntuales, esto hace que la longitud de coherencia del sistema entra en juego para observar los patrones de interferencia.

El interferómetro que se utilizaría mas adelante es un interferómetro de Mirau, cuya ecuación es idéntica a la ecuación de un interferómetro de Michelson, una separación del objetivo del punto focal implica un cambio en el camino óptico del doble del desplazamiento.

La intensidad recibida por un detector en un punto  viene dada por la ecuación



Con  la intensidad de la fuente de luz,  como la distancia que hay entre el plano de imagen y la muestra,  y  los factores de reflexión de los espejos de muestra y de referencia respectivamente, y  la frecuencia de la luz.

Si ahora se considera la fuente con un espectro no puntual, se tiene que la intensidad en el receptor será la suma de todas las componentes frecuenciales de la fuente interfiriendo, por lo tanto la ecuación quedaría de la siguiente forma:



Donde  es el espectro de potencia de la fuente en frecuencia,  es la diferencia de camino óptico entre los haces y  el espectro de absorción de potencia del detector. Asumiendo que  y  no dependen de la frecuencia de la luz se obtiene:



Donde  es la intensidad de la luz que pudiese ser recibida por el detector. Como los espectros de potencia son pares, los límites de la integral pueden ser sustituidos desde  hasta 



Si se piensa que  como el tiempo  en que la luz atraviesa una distancia , se puede escribir el termino de la integral como la parte real de la transformada inversa de Fourier del espectro de la fuente absorbido por el detector.



El espectro de potencia es igual al modulo al cuadrado del espectro



La transformada inversa de Fourier de una función en frecuencia multiplicada por otra está definida como la convolución de ambas funciones en el espacio de tiempo. Y si una función es el conjugado de la otra, entonces la convolución está definida como la autocorrelación. En base a esto la información de la interferencia está contenida en el patrón de autocorrelación del espectro de la fuente absorbido por el detector en el espacio temporal.



Por lo tanto la intensidad obtenida por el detector será igual a:



Con esta ecuación solo hace falta calcular la autocorrelación del espectro de la fuente absorbido por el detector y evaluarlo a la distintas diferencias de camino óptico que puedan existir en la muestra.

El modulo de interferometría del simulador recibe los parámetros de la cámara (espectros de potencia de los sensores R, G y B) y la información del espectro de la fuente de iluminación. Con esta información reconstruye la función de autocorrelación para cada sensor y luego con la información del perfil  obtiene la diferencia de camino óptico  y evalua la autocorrelación  para este valor. De acuerdo al tiempo de exposición de la cámara y luego con la información de la visibilidad de la muestra para cada punto  calcula un estimado de  y finalmente obtiene la intensidad  para cada punto de la imagen y para cada sensor de la cámara.

# Capítulo II Conclusiones y recomendaciones

# Referencias

1. Jenkins, F.A. and H.E. White, *Fundamentals of Optics*. 2001: McGraw-Hill.

2. Gåsvik, K.J., *Optical metrology*. 2002: J. Wiley & Sons.

3. Tkalčič, M., *Colour spaces - perceptual, historical and applicational background*, in *Faculty of electrical engineering*. 2003, University of Ljubljana: Ljubljana, Slovenia.

4. Svaetichin, G., *Spectral response curves from single cones*. 1956: acta physiologica.

5. Ebner, M., *Color constancy*. 2007: John Wiley.

6. Yadid-Pecht, O. and R. Etienne-Cummings, *CMOS imagers: from phototransduction to image processing*. 2004: Kluwer Academic.

7. Murphy, D.B., *Fundamentals of light microscopy and electronic imaging*. 2001: Wiley-Liss.

8. Holst, G.C., *CCD arrays, cameras, and displays*. 1998: JCD Publishing.

# Anexo a