

**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

Pág.

[APROBACIÓN DEL JURADO ii](#_Toc316133499)

[AGRADECIMIENTOS iv](#_Toc316133500)

[RESUMEN v](#_Toc316133501)

[ÍNDICE GENERAL vi](#_Toc316133502)

[ÍNDICE DE TABLAS viii](#_Toc316133503)

[ÍNDICE DE FIGURAS ix](#_Toc316133504)

[ABREVIATURAS x](#_Toc316133505)

[Introducción 1](#_Toc316133506)

[CAPITULO I Marco Teórico 2](#_Toc316133507)

[1.1. Índice de refracción 2](#_Toc316133508)

[1.2. Camino óptico 2](#_Toc316133509)

[1.3. Interferencia de la Luz 3](#_Toc316133510)

[1.4. Interferómetro 4](#_Toc316133511)

[1.4.1. Interferómetro de Michelson 4](#_Toc316133512)

[1.4.2. Interferómetro de Mirau 5](#_Toc316133513)

[1.5. Teoría del Color 6](#_Toc316133514)

[1.5.1. Espacio de color RGB 7](#_Toc316133515)

[1.5.2. Espacio de color HSL 8](#_Toc316133516)

[1.6. Dispositivos digitales de detección de imágenes 8](#_Toc316133517)

[1.6.1. Cámaras CCD 10](#_Toc316133518)

[Capítulo II SIMULADOR 1](#_Toc316133519)

[2.1. Módulos del simulador 1](#_Toc316133520)

[2.1.1. Módulo de espectros 1](#_Toc316133521)

[2.1.2. Módulo de muestra 2](#_Toc316133522)

[2.1.3. Modulo de cámara 3](#_Toc316133523)

[2.1.4. Módulo de la fuente de iluminación 3](#_Toc316133524)

[2.1.5. Módulo de ruido 3](#_Toc316133525)

[2.1.6. Módulo de interferometría 3](#_Toc316133526)

[2.2. Validación del simulador 10](#_Toc316133527)

[2.2.1. Franjas de un plano inclinado con fuente puntual 10](#_Toc316133528)

[2.2.2. Franjas de un plano inclinado en luz blanca 11](#_Toc316133529)

[2.2.3. Replicación de un interferograma real 14](#_Toc316133530)

[2.3. Conclusión 17](#_Toc316133531)

[CAPITULO III Algoritmo de Control 1](#_Toc316133532)

[CAPITULO III Conclusiones y recomendaciones 6](#_Toc316133533)

[Referencias 1](#_Toc316133534)

[Anexo A Anexo a 2](#_Toc316133535)

# ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

[Tabla 2.1 : Longitud de coherencia del espectro absorbido por los sensores RGB ante el iluminador estándar A 13](#_Toc316136359)

# ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

[Figura 1.1: Interferómetro de Michelson 5](#_Toc316482573)

[Figura 1.2: Esquema de interferómetro de Mirau 6](#_Toc316482574)

[Figura 1.3: Espacio de color HSL 8](#_Toc316482575)

[Figura 2.1: Espectros de RGB de absorción de Canon 10D 10](#_Toc316482576)

[Figura 2.2: Interferograma simulado de un plano inclinado iluminado por una fuente puntual a la longitud de onda de un laser de He-Ne 11](#_Toc316482577)

[Figura 2.3: Espectro del iluminador estándar A de la CIE 12](#_Toc316482578)

[Figura 2.5: Espectro absorbido por sensores RGB de una fuente del iluminador estándar A de la CIE 13](#_Toc316482579)

[Figura 2.6: Interferograma simulado con fuente como iluminador estándar A de la CIE 14](#_Toc316482580)

[Figura 2.7: Perfil del Pozo hecho con ablación iónica en una superficie de silicio clivado [10] 15](#_Toc316482581)

[Figura 2.8: Interferograma real [10] (izquierda) y simulado (derecha) 16](#_Toc316482582)

[Figura 3.1: Espectro en frecuencia del ruido obtenido con micrófono 3](#_Toc316482583)

[Figura 3.2: Ruido simulado 4](#_Toc316482584)

[Figura 3.3: Diagrama de flujo del algoritmo de control propuesto 5](#_Toc316482585)

# 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)]



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



Utilizando la ecuación se obtiene que , por lo tanto:





Donde  es el camino óptico.[[1](#_ENREF_1)]

## 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)]

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)]

## 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 .: 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.

En la Figura 1.2 se muestra un esquema de un interferómetro de Mirau. Un haz incidente atraviesa el lente del microscopio (1), luego pasa por un espejo semitransparente (2) que funciona como un divisor de haz, un haz continua su camino hacia el objeto de muestra (7) que reflecta (3) 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 (5) hacia un espejo de referencia (4) que lo devuelve hacia el espejo de semitransparente para que vuelva a ser reflejado (6) 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 .: Esquema de interferómetro de Mirau |

## Teoría del Color

El sistema visual humano (HVS) es capaz de medir una parte del espectro electromagnético, aproximadamente entre  y , 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)]:

* **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)]

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)]

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.

Este espacio de color trata de agrupar de una forma similar a como el cerebro humano organiza los colores [[3](#_ENREF_3)]. 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.

En la Figura 1.3 se puede observar un cilindro donde se observa como varían los colores de acuerdo a cada uno de estos parámetros.

|  |
| --- |
| Figura .: 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 foto-detectores.

Entre los foto-detectores mas utilizados se encuentran los que están construidos a base de silicio, los mas populares son los fotodiodos, fototransistores y foto-compuertas, la operación básica de los foto-detectores 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.[[5](#_ENREF_5)]

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 superficie. [[5](#_ENREF_5)]

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 estructuras MOS que captan los fotones y generan pares electrón-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 foto-detectores 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. [[6](#_ENREF_6)]

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 electrón-hueco, los cuales pueden ser recolectados y transferidos. Usualmente los portadores de carga son llamados fotoelectrones. [[6](#_ENREF_6), [7](#_ENREF_7)]

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. [[7](#_ENREF_7)]

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. [[7](#_ENREF_7)]

Un pixel esta conformado por una o más 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. [[6](#_ENREF_6)]

#### 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 lectura 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.[[6](#_ENREF_6)]

#### 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 leídas 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 micro lentes 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. [[6](#_ENREF_6)]

# Capítulo II SIMULADOR

Se realizó un simulador para obtener un entorno teórico donde se pudiesen ejecutar pruebas de una manera eficiente antes de implementar el algoritmo propuesto en el sistema real.

## Módulos del simulador

El simulador desarrollado consta de varios módulos 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, así como generación de ruido a partir de espectros en frecuencia. Finalmente se integraron todos los módulos en un sistema que genera videos tal como lo haría una cámara conectada a un interferómetro.

### Módulo de espectros

Para manejar todo lo relacionado con espectros de absorción o de emisión se desarrollo un módulo que permite manejar espectros tanto en frecuencia como en longitud de onda. Permite generar espectros puntuales, espectros gaussianos o espectros complejos provenientes de archivos de texto. También permite hacer operaciones de suma, resta, multiplicación e integración de espectros.

Este módulo permite la creación de espectros en longitud de onda en arreglos unidimensionales con longitudes de onda iniciales y finales de un tamaño especificado, pero para el sistema interferométrico es posible convertirlos en arreglos unidimensionales en frecuencia, de tamaño:  donde  es un factor de proporcionalidad elegible.

Para construir el arreglo en frecuencia, la frecuencia inicial es igual a cero y la frecuencia final es igual a: , por lo tanto la resolución en frecuencia será igual a:



Para evaluar cada punto de frecuencia  se calcula el valor de longitud de onda que corresponde a esa frecuencia  y se realiza una interpolación de los valores del espectro en longitud de onda que estén más cercanos para introducirlo en el arreglo de frecuencia.

### Módulo de muestra

En este módulo se especifican las características de la muestra que será observada en el sistema, entre los parámetros que pueden ser cargados a la muestra, está la dimensión en pixeles de la muestra y la relación entre el tamaño en pixeles y el tamaño real de la muestra; también se puede cargar desde un archivo de texto o una imagen en escala de grises la información del perfil de la muestra, asignándole un rango de altura al rango de grises de la imagen, esto genera una matriz con información de la altura de cada punto .

De la misma forma como se carga el perfil es posible cargar la información de la visibilidad de la muestra, esta vez la matriz tendrá la información de cuan reflectiva es la muestra en cada punto 

### Modulo de cámara

El módulo de la cámara tiene la capacidad de simular una cámara monocromática o a color, este módulo se encarga de generar los espectros de absorción de los sensores ya sea el monocromático o los sensores R, G y B. Adicionalmente calcula los tiempos de integración y procesamiento de acuerdo a los parámetros que se establezcan.

Es posible establecer una ganancia y offset general y una ganancia y offset específico para cada sensor.

Recibe como parámetros: el tipo de cámara (color o monocromática), los espectros de los sensores, el tiempo de exposición, los tiempos de transporte de la carga y las dimensiones en pixeles de la imagen que producirá.

### Módulo de la fuente de iluminación

Este módulo simplemente se encarga de manejar los parámetros de la fuente, en este caso solo se requiere el espectro de emisión de la fuente.

Gracias al módulo de espectros es posible simular desde fuentes puntuales como láseres, fuentes de luz blanca o fuentes con espectros más complejos que contengan diversas líneas espectrales.

### Módulo de ruido

Las vibraciones mecánicas son manejadas por este módulo, este módulo puede recibir un espectro de las vibraciones y luego transformarlo a un arreglo en tiempo de las vibraciones. Adicionalmente puede generar ruido blanco aditivo.

### Módulo de interferometría

Este módulo es el que unifica la información de todos los demás módulos y genera una imagen donde se observa la interferencia producida por la diferencia de caminos ópticos al incidir los haces sobre la muestra.

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

El tipo de interferómetro es seleccionable, se puede seleccionar o un interferómetro de Michelson o un interferómetro de Mirau, cuya única diferencia para el desarrollo de las ecuaciones para el simulador es el efecto que produce el divisor de haz a los haces de muestra y de referencia. En un interferómetro de Michelson, ambos haces, el de referencia y el de muestra pasan en transmisión y reflexión por el divisor de haz. En un interferómetro de Mirau, el haz de referencia refleja dos veces en el divisor de haz mientras que el haz de muestra atraviesa dos veces.

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  la frecuencia de la luz.

 y  son los coeficientes de atenuación del haz de muestra y el haz de referencia respectivamente, para un interferómetro de Michelson se tiene que:



Donde  es el coeficiente de transmisión del divisor de haz y  el coeficiente de reflexión;  es la reflectividad de la muestra mientras que  es el coeficiente de reflexión del espejo de referencia.

Para un interferómetro de Mirau se tiene que:



Si 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 término 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 las 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 evalúa la autocorrelación  para este valor, 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 sensor de la cámara.

Cómo se considera que la altura de la muestra  no cambia con el tiempo, la diferencia del camino óptico  variará con el tiempo de forma constante debido a las vibraciones mecánicas.



Donde  es una distancia arbitraria que se puede introducir al camino óptico, este  se puede ver como la separación del plano de imagen al origen de la muestra en un interferómetro de Mirau;  serían las vibraciones mecánicas existentes en el sistema.

El sistema permite simular la integración de la cámara, esto podría realizarse generando imágenes cada intervalo de tiempo  que sea definido y luego sumarlos y dividirlos entre la cantidad de imágenes obtenidas, sin embargo el costo computacional y el tiempo de procesamiento sería muy alto. Debido a esto se realiza la integración en el término de la autocorrelación.

El término de autocorrelación contiene toda la información del interferograma para cualquier diferencia de camino óptico para cualquier punto de la imagen, las vibraciones mecánicas afectaran por igual a todos los puntos, por lo tanto la integración puede realizarse integrando la autocorrelación desplazada por la vibración mecánica y luego evaluar la función resultante en cada punto de la muestra.





Donde  es el número de la imagen obtenida por la cámara; y  es el tiempo de integración o tiempo de exposición de la cámara.

El arreglo donde se aloja la autocorrelación es un arreglo unidimensional de tamaño . Las imágenes producidas por la cámara tendrán un ancho  y un alto , por lo tanto se necesita un arreglo bidimensional de tamaño . Para la obtención de una imagen se tienen  intervalos de tiempo.

Si se utiliza el primer método es necesario:

1. Evaluar la suma de la vibración mecánica mas la altura de los  puntos en la autocorrelación para cada uno de los  intervalos de tiempo y generar  imágenes temporales de tamaño 
2. Promediar las  imágenes temporales, para esto se debe sumar cada uno de los  puntos de las  imágenes temporales y dividirlos entre 

En el segundo método se debe realizar los siguientes pasos:

1. Generar una copia desplazada en el tamaño de la perturbación del arreglo de autocorrelación para cada uno de los  intervalos de tiempo.
2. Promediar las  copias desplazadas de la autocorrelación
3. Evaluar la altura de los  puntos de la muestra en la autocorrelación promediada.

Asumiendo que cualquier operación tarde un tiempo , el tiempo que tardaría el primer método vendría dado por:

*  para evaluar las alturas y generar las  imágenes temporales
*  para sumar las  imágenes temporales
*  para dividir la imagen final entre 

El tiempo total de procesamiento sería: 

Para el segundo método se tardaría:

*  para generar las  copias desplazadas de la autocorrelación
*  para sumar las M copias desplazadas
*  para dividir la suma de las copias desplazadas entre 
*  para evaluar las alturas de la muestra en la nueva función de autocorrelación

El tiempo total de procesamiento para el segundo método sería: 

Para que exista un ahorro en el tiempo computacional debe cumplirse que



Debido a que la autocorrelación es una transformada inversa discreta de Fourier, el tamaño  es igual al tamaño del arreglo del espectro en frecuencia de la fuente, la mínima resolución en este arreglo de autocorrelación vendrá dado por la máxima frecuencia  del espectro de la fuente de la siguiente forma  y el valor máximo dependerá del tamaño del arreglo, por lo tanto si el arreglo es de tamaño , el valor máximo será



Pero la transformada inversa de Fourier dará un resultado simétrico respecto al origen, por lo tanto el arreglo irá desde  hasta 

Con la generación de imágenes simulando el sistema solo resta la inclusión del algoritmo de control y la grabación de imágenes en secuencia.

## Validación del simulador

A continuación se presentan distintas pruebas realizadas al simulador para validar el correcto funcionamiento del sistema.

Para todas las pruebas se simuló la cámara con espectros de absorción RGB de una cámara Canon 10D [[8](#_ENREF_8)], el tiempo de integración elegido fue de . Los espectros de absorción se muestran en la Figura 2.1.

|  |
| --- |
| Figura .: Espectros de RGB de absorción de Canon 10D |

El tipo de interferómetro utilizado fue un interferómetro de Mirau ideal, con el divisor de haz al  y el espejo de referencia con reflectividad del 

### Franjas de un plano inclinado con fuente puntual

Esta prueba consistió en replicar las franjas que aparecerían sobre un plano inclinado utilizando un laser de Helio-Neón cuya longitud de onda es de .

El plano simulado tiene una reflectividad del  y fue inclinado de tal forma que en el extremo izquierdo la altura de la muestra fuese de , en el centro fuese  y en el extremo derecho . Esta inclinación debería generar un total de 5 franjas claras y 4 franjas oscuras a lo largo del eje X, ya que el cambio entre cada franja es de una diferencia de camino óptico de  que en un interferómetro de Mirau o uno de Michelson, el camino óptico será el doble de la altura de la muestra en cada punto.

|  |
| --- |
| Figura .: Interferograma simulado de un plano inclinado iluminado por una fuente puntual a la longitud de onda de un laser de He-Ne |

Se puede observar que el simulador logra emular el interferograma del plano inclinado obteniendo 5 franjas rojas y 4 franjas oscuras, esto demuestra que para una fuente puntual, el simulador se comporta correctamente. Adicionalmente el color obtenido corresponde al color producido por un laser de He-Ne en su transición de .

### Franjas de un plano inclinado en luz blanca

En esta prueba se comprobará el comportamiento del simulador en presencia de una fuente con espectro continuo, en este caso se simulará una lámpara de tungsteno, la cual tiene un espectro de radiación correspondiente a un cuerpo negro a  como se muestra en la Figura 2.3 que corresponde al iluminador estándar A de la CIE [[9](#_ENREF_9)].

|  |
| --- |
| Figura .: Espectro del iluminador estándar A de la CIE |

Utilizando una fuente de este tipo, el interferómetro que se debe obtener es un patrón de franjas de colores, que deben ir desvaneciéndose si la diferencia de caminos ópticos se acerca a la longitud de coherencia de la fuente. Sin embargo, la longitud de coherencia que afectará a cada sensor RGB será aproximadamente igual a la velocidad de la luz dividida entre el ancho de banda del espectro que absorbería cada sensor. En la Figura 2.4 se muestra el espectro absorbido por cada uno de los sensores si se utiliza el espectro de emisión de la Figura 2.3.

|  |
| --- |
| Figura .: Espectro absorbido por sensores RGB de una fuente del iluminador estándar A de la CIE |

Si se utiliza el cálculo de la longitud de coherencia suponiendo que los espectros son gaussianos, se puede utilizar la siguiente ecuación



Con  la longitud media y  el ancho de la gausiana. De acuerdo a la gráfica en la Figura 2.4, tenemos los siguientes valores para los sensores:

Tabla . : Longitud de coherencia del espectro absorbido por los sensores RGB

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Sensor |  |  |  |
| Rojo |  |  |  |
| Verde |  |  |  |
| Azul |  |  |  |

Utilizando el simulador se generó un espectro de emisión como el de la Figura 2.3 y se configuró un plano inclinado donde el extremo izquierdo posee una altura de  y el extremo derecho una altura 

|  |
| --- |
| Figura .: Interferograma simulado con fuente como iluminador estándar A de la CIE |

En la Figura 2.5 se muestra el interferograma obtenido. La ganancia de la cámara fue ajustada de tal forma que el color a los extremos del interferograma coincidiera con el color establecido por la CIE para esa temperatura, esto implica que las componentes R, G y B del color al centro del interferograma sean el doble de las componentes a los extremos, y debido a que ya en el extremo el color tiene una componente de ,  y , en el centro todos los sensores estarán saturados y es por esto que se ve blanco.

La longitud de coherencia indica la distancia a la cual la intensidad ha caído a la mitad, sin embargo, como los sensores están saturados, es muy difícil calcular la longitud de coherencia a partir de la imagen para cada sensor, sin embargo se puede observar que las franjas tienden a desaparecer aproximadamente a un cuarto del tamaño de la imagen a partir del centro en ambas direcciones, esto implica que la longitud de coherencia estará en el orden de los  que si asumimos que tenemos una ganancia de 2, entonces, las franjas estarían desapareciendo a los  si no tuviese la ganancia, este valor se acerca a los valores predichos.

### Replicación de un interferograma real

En esta prueba se comparó el interferograma de un pozo hecho por ablación iónica sobre una superficie de silicio clivado, obtenido durante el proceso de desplazamiento de fase para la obtención del perfil [[10](#_ENREF_10)] y el interferograma generado por el simulador. El perfil del pozo utilizado se muestra en la Figura 2.6.

|  |
| --- |
| Figura .: Perfil del Pozo hecho con ablación iónica en una superficie de silicio clivado [[10](#_ENREF_10)] |

La imagen del perfil se introdujo como información de profundidad de la muestra del simulador asignándole  de resolución a los niveles de grises de la imagen, es decir:  para el negro y  para el blanco.

Para la obtención de los interferogramas se utilizó una cámara Canon A620. El interferómetro utilizado fue un interferómetro de Mirau, al igual que el interferómetro programado en el simulador, la única diferencia es que los componentes del interferómetro del simulador se mantuvieron ideales.

Durante el proceso de desplazamiento de fase aplicado para obtener el perfil del pozo, se utilizó una lámpara de tungsteno con un filtro de ancho espectral de , centrado en . Para la simulación se utilizó una fuente gaussiana de ancho espectral  centrada en .

Luego de ajustar algunos parámetros como la inclinación, la fase de camino óptico, las ganancias y offset de la cámara y la inclusión de una perturbación sinusoidal con amplitud de  y frecuencia  para obtener disminución del contraste, se obtuvo una imagen que reproduce bastante bien el interferograma obtenido con el sistema real. En la Figura 2.7 y en la Figura 2.8 se pueden observar las dos imágenes

|  |  |
| --- | --- |
| Figura .: Interferograma real [[10](#_ENREF_10)] | Figura .: Interferograma simulado |

Para simular con mayor exactitud las franjas es necesario conocer la inclinación de la muestra y la fase en el momento de la imagen, esta información, al igual que la información de las perturbaciones mecánicas al momento de la adquisición es desconocida, sin embargo se ajustaron intentando minimizar las diferencias observadas, logrando reproducir bastante bien el interferograma obtenido.

## Conclusión

En el presente capítulo se presentó el simulador desarrollado y se explicó en detalle cada uno de los módulos por los que está compuesto: espectro, muestra, cámara, fuente de iluminación, ruido e interferometría. Adicionalmente se describieron las pruebas de validación realizadas las cuales arrojaron como resultado que el simulador es capaz de simular con precisión el fenómeno físico que ocurre en un interferograma.

En el capítulo III se expondrá el algoritmo de control implementado y se mostrarán los resultados de este algoritmo implementado en el simulador.

# CAPITULO III Algoritmo de Control

Las vibraciones mecánicas en un interferómetro pueden afectar la diferencia de camino óptico entre los brazos del interferómetro. En un interferómetro de Mirau una perturbación puede acercar o alejar la muestra del plano de imagen, esto hace que el camino óptico del brazo de muestra varíe en dos veces el desplazamiento producto de la vibración, por lo tanto resulta en una alteración de la diferencia de camino óptico y por lo tanto un movimiento de las franjas.

Debido a la integración que realiza la cámara durante el tiempo de exposición, el efecto de las vibraciones mecánicas se traduce en una reducción de contraste, si la media de las vibraciones en el tiempo de integración es cero, o en un movimiento de las franjas del interferograma si la media no es igual a cero.

Mientras mas rápido la cámara obtenga las imágenes, mayor será la información de las vibraciones mecánicas que se podrá obtener, sin embargo, mientras mas rápido va, menos tiempo de exposición tendrá, lo que implica que la imagen obtenida será más oscura.

El propósito del trabajo es tratar de desarrollar un sistema que sea capaz de reducir el efecto de las vibraciones mecánicas en el contraste de imágenes obtenidas en un sistema interferométrico, utilizando como único sensor la misma cámara que toma los interferogramas.

Una de las características principales de ésta cámara, es que la velocidad de adquisición de la cámara es ajustable, sin embargo, para obtener una buena calidad y tamaño de imagen, la cantidad de cuadros por segundo que puede obtener debe mantenerse en un número bajo.

Observaciones iniciales indicaban que las vibraciones mecánicas tomadas a una velocidad de 30 cuadros por segundo, tenían un efecto de reducción del contraste debido a la superposición de las franjas durante el tiempo de integración. El movimiento traslacional de las franjas era muy pequeño.

Si se pudiese variar la distancia del plano de imagen a la muestra en un interferómetro de Mirau de tal manera que anulase las vibraciones mecánicas, el efecto de estas se vería anulado. Para esto se requiere conocer en detalle las vibraciones mecánicas, sin embargo con el sistema propuesto es prácticamente imposible conocer la forma de las perturbaciones. Para poder conocerlas es necesario muestrear las vibraciones a por lo menos el doble de la frecuencia máxima que estas posean para cumplir el criterio de Nyquist, lograr eso implicaría una cámara muy rápida y un algoritmo de procesamiento de movimiento de las franjas para poder detectar cual fue la amplitud de las vibraciones. Aun así el control estaría sujeto a predecir el comportamiento futuro de las vibraciones para poder anularlas.

Al no poseer un sistema con tales características se plantea tratar de reducir el efecto de las vibraciones sin un conocimiento explicito de la forma del ruido. Asumiendo que las franjas no se desplazan y solo reducen su contraste en presencia de las vibraciones y que el contraste disminuido es constante a lo largo del tiempo, se puede pensar que las vibraciones tienen algún tipo de periodicidad respecto al tiempo de integración de la cámara, es decir, que el espectro de las vibraciones tendría componentes frecuenciales múltiplos de la frecuencia de integración de la cámara.

Con un micrófono pegado a la mesa de trabajo donde se encuentra el microscopio, se grabó un audio para tratar de capturar las vibraciones mecánicas que estaban presentes, a pesar de que el acople entre la mesa y el micrófono no era ni remotamente bueno, con un programa de audio llamado Audacity, se pudo amplificar la señal y obtener un espectro en frecuencia muy aproximado de las vibraciones que afectan al sistema. A continuación se muestra el espectro resultante en la Figura 3.1.

|  |
| --- |
| Figura .: Espectro en frecuencia del ruido obtenido con micrófono |

Cabe destacar que al grabar con un micrófono, el sistema de adquisición solo dejará pasar señales en las frecuencias audibles entre 20Hz y 20KHz [[11](#_ENREF_11)]. Sin embargo, es posible identificar algunos picos a frecuencias de 30Hz, 60Hz, 120Hz, 240Hz y 300Hz, todas múltiplos de 30Hz que comúnmente es la frecuencia de muestreo de la cámara y coincide con la cantidad de imágenes por segundo de las observaciones iniciales.

Con Matlab se generó una señal en tiempo que contiene los picos obtenidos en el espectro de la Figura 3.1 mas un ruido blanco añadido, la señal resultante se muestra en la Figura 3.2 junto a la envolvente que fue obtenida pasando la señal por un filtro pasa bajo sintonizado a 60Hz.

|  |
| --- |
| Figura .: Ruido simulado según espectro obtenido |

En vez de anular el ruido punto a punto, se puede intentar anular a grandes rasgos, se podría utilizar una señal de control que reduzca la amplitud restando la envolvente del ruido. Se puede observar que la envolvente tiene una forma relativamente constante en cada período de integración de la cámara, si se pica la señal por imágenes y se promedian las envolventes se puede obtener una señal que si se reproduce periódicamente, emulará a la envolvente del ruido. En la Figura 3.3 se muestra el promedio de la envolvente de los 4 períodos de integración de la Figura 3.2.

|  |
| --- |
| Figura .: Señal promedio de la envolvente en los períodos de integración de la cámara |

La señal promedio repetida periódicamente se puede observar en la Figura 3.4

|  |
| --- |
| Figura .: Señal de control repetida periódicamente |

Se puede observar que la señal promediada repetida se asemeja a la envolvente original del ruido.

Si se le resta esta señal al ruido se puede obtener una reducción de la amplitud de las vibraciones. En la se muestra la señal de ruido obtenida luego de la resta del promedio repetido periódicamente.

|  |
| --- |
| Figura .: Ruido obtenido luego de la resta de la señal de control |

Como se puede observar la amplitud debido a la envolvente fue prácticamente eliminada, aún queda la amplitud proveniente de alta frecuencia.

Analizando las señales se obtuvo que la señal original tenía una media de 0.0081, mientras que la de la nueva señal es -0.0021, resultando en una reducción de aproximadamente 75% en el valor absoluto. Para la desviación estándar se obtuvo que para la señal original era de 0.8468 y para la nueva señal de 0.5583 resultando en una reducción del 34%. Finalmente para la integral del modulo de la señal en el tiempo se tiene que la señal original tenía un área bajo la curva de 0.0915, mientras que para la nueva señal se tiene que es 0.0707, representando una reducción del 22% aproximadamente.

Estas reducciones podrían tener un impacto positivo en la reducción del efecto de las vibraciones en el sistema interferométrico, sobre todo la disminución en la amplitud observada en la integral del valor absoluto.

El sistema de control debería ser capaz de identificar la envolvente de la señal de ruido para cada imagen y luego introducirla de forma inversa durante cada período de integración. Sin embargo, no es posible obtener esta información ya que se debe aumentar la velocidad de adquisición de la cámara. Es por esto que se desarrollo un algoritmo semi aleatorio para tratar de conseguir una señal que pueda emular la envolvente.

Se propone un sistema de control donde durante el tiempo de integración de la cámara se introducen señales gausianas en tiempo, de amplitud y ancho aleatorio, inicialmente centradas en el tiempo 0, en cada imagen se va desplazando de modo de cubrir todo el tiempo de integración. Si en algún momento se obtiene un contraste de al menos 95% del mejor contraste obtenido, se promedian 3 imágenes con la misma señal antes de seguir desplazando, luego de haber llegado al final del desplazamiento, se procede a hacer un barrido de amplitud en caso de que el mejor promedio calculado supere el mejor contraste obtenido o calculado anteriormente, el barrido se realiza desde una amplitud de 0 hasta el doble de la amplitud original, el procedimiento se repite, al finalizar el barrido, se realiza un barrido del ancho desde 0 hasta el doble del ancho original, finalizado este se suma a una señal de control la mejor combinación de amplitud, ancho y desplazamiento que obtuvo el mejor contraste, el procedimiento se repite utilizando como base la señal de control y pero ahora debe superar el mejor contraste. En la se muestra el diagrama de flujo del algoritmo propuesto.

|  |
| --- |
| Figura .: Diagrama de flujo del algoritmo de control propuesto |

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

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

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

8. Buil, C. *Comparison du Canon 10D et du Nikon D70 en Imagerie Astronomique Longue Pose*. 2004 [cited 2011 20-12-2011]; Available from: [www.astrosurf.com/buil/d70v10d/eval.htm](http://www.astrosurf.com/buil/d70v10d/eval.htm).

9. *Joint ISO/CIE Standard ISO 10526:1999/CIE S 005/E-1998, CIE Standard illuminants for colorimetry.* Color Research & Application, 2000. **25**(5): p. 385-385.

10. González-Laprea, J., J. Cappelletto, and R. Escalona, *Frequency to Voltage Converter as a Phase Controller in Phase Shifting Interference Microscopy.* International Journal of Optomechatronics, 2011. **5**(1): p. 68-79.

11. Dimitrov, S., *Extending the soundcard for use with generic DC sensors*, in *2010 Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME 2010)*. 2010, University of Technology, Sydney: Sydney, Australia. p. 303-308.

# Anexo a