

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ENSENADA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO**

**EN CIENCIAS E INGENIERÍA**

---

**DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO  
DE UN INSTRUMENTO DE ESCANEÓ ÓPTICO EN  
TIEMPO REAL**

---

**TESIS**

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

presenta:

**ADRIAN ARELLANO DELGADO**

Dr. E. Efrén García Guerrero

Director de Tesis

Ensenada, Baja California, México. Agosto de 2009.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD ENSENADA

DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO  
DE UN INSTRUMENTO DE ESCANEÓ ÓPTICO EN  
TIEMPO REAL

TESIS

que para obtener el grado de maestro en ingeniería presenta:

**ADRIAN ARELLANO DELGADO**

Y aprobada por el siguiente comité:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. E. Efrén García Guerrero

*Director del Comité*



\_\_\_\_\_  
Dr. Eugenio R. Méndez Méndez

*Miembro del Comité*



\_\_\_\_\_  
Dr. Oscar Roberto López Bonilla

*Miembro del Comité*



\_\_\_\_\_  
Dra. Rosa Martha López Gutiérrez

*Miembro del Comité*



\_\_\_\_\_  
M.C. Everardo Inzunza González

*Miembro del Comité*

28 de julio de 2009

**RESUMEN** de la tesis de **Adrian Arellano Delgado**, presentada como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA del programa de maestría y doctorado en ciencias e ingeniería de la UABC. Ensenada, B. C. México, Agosto de 2009.

## **DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE UN INSTRUMENTO DE ESCANEÓ ÓPTICO EN TIEMPO REAL**

Resumen aprobado por:



---

Dr. E. Efrén García Guerrero

*Director de Tesis*

En este trabajo de tesis se presenta el diseño, acondicionamiento e implementación de un instrumento de escaneo óptico en tiempo real (on-line).

El instrumento se conforma por dos sistemas fundamentales, a saber, el sistema de escaneo óptico –mecánico, que mediante el montaje de dos espejos sobre unos galvanómetros controlados por dos señales creadas mediante software, se logra un barrido uniforme sobre una superficie por un punto de luz proveniente de un laser. La luz transmitida o reflejada por la superficie bajo análisis, se capta, por el sistema de detección y se despliega en un monitor de computadora.

La operación del instrumento (on-line, off-line) se logra a través de una interface amigable desarrollada para tal fin, que permite la manipulación de los parámetros principales del sistema. Atravez de diferentes tipos de tarjetas de resolución comerciales se logra estimar el nivel de resolución del instrumento implementado. Se presentan imágenes experimentales escaneadas de diferentes tipos de superficies de fase y de amplitud, obtenidas en transmisión como en reflexión.

Acorde con los niveles de resolución alcanzados por el instrumento, para todos los casos se logra una buena reproducción de las superficies bajo análisis.

**Palabras clave:** Formación de imágenes, escaner óptico, visualización de imágenes.

*A mis padres*

*MARIA DEL SOCORRO DELGADO LIZARRAGA y  
JOSE ANTONIO ARELLANO LEDEZMA*

# Agradecimientos

A **Dios** por las bendiciones que nos da día con día y por darme la oportunidad de llegar hasta aquí.

A **Mis Padres** por el apoyo incondicional, por ayudarme en los momentos difíciles, por creer en mí, gracias papá por darme ese ejemplo de lucha y de esfuerzo que te caracteriza, eres el mejor, ¡¡Te quiero mucho pa!!, gracias mamá por darme esos consejos tan valiosos, ese amor y ese cariño que me sirven tanto, eres la mejor !!Te quiero mucho ma!!

A **Mi ojitos lindos Gaby** por darme su cariño y estar ahí en los momentos difíciles en los que mas te necesito muchas gracias mi preciosa TE AMO!!

A **Juanita y Pedro Santoyo** por el apoyo y la confianza que me han brindado, muchas gracias familia Santoyo!!

Al **Dr. E. Efrén García Guerrero** por la dirección de este trabajo de tesis y más aun, por todas las enseñanzas recibidas, se le aprecia y estima bastante profe MUCHAS GRACIAS!!

A los miembros de mi comité de tesis por sus valiosas críticas y observaciones **Dr. Eugenio R. Méndez Méndez, Dr. Oscar Roberto López Bonilla, M.C. Everardo Inzunza González** y muy en especial a la **Dra. Rosa Martha López Gutiérrez**.

A todos mis **profesores** por los conocimientos compartidos.

A **mis compañeros y amigos** por los momentos compartidos.

A la **Universidad Autonoma de Baja California U.A.B.C.** por darme la oportunidad de continuar en el camino del conocimiento.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo económico brindado

Ensenada, B. C. México.  
28 de Julio de 2009.

**ADRIAN ARELLANO DELGADO**

# Tabla de Contenido

Capítulo	Página
<b>Tabla de Contenido</b>	<b>i</b>
<b>Resumen</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>I Introducción</b>	<b>1</b>
I.1 Motivación . . . . .	3
I.2 Objetivos . . . . .	4
I.2.1 Objetivos generales . . . . .	4
I.2.2 Objetivos específicos . . . . .	4
<b>II Aspectos Teóricos</b>	<b>6</b>
II.1 Introducción . . . . .	6
II.2 Transmisión . . . . .	6
II.2.1 Índice de refracción . . . . .	6
II.2.2 Reflexión . . . . .	8
II.2.2.1 Reflexión interna y externa: . . . . .	8
II.2.2.2 La ley de la reflexión . . . . .	10
II.2.3 Rayos . . . . .	11
II.2.4 Refracción . . . . .	13
II.2.4.1 La ley de refracción . . . . .	14
II.2.5 Difracción . . . . .	18
II.3 Óptica Geométrica . . . . .	19
II.3.1 Lentes . . . . .	21
II.3.1.1 Superficies esféricas . . . . .	22
II.3.2 Espejos . . . . .	27
<b>III Descripción y caracterización del instrumento de escaneo óptico en tiempo real</b>	<b>30</b>
III.1 Introducción . . . . .	30
III.2 Descripción y caracterización del instrumento de escaneo óptico . . . . .	30
III.2.1 Sistema de barrido [óptico-mecánico] . . . . .	31
III.2.1.1 Fuente de iluminación . . . . .	32
III.2.1.2 Galvanómetros 6210H . . . . .	32
III.2.1.3 Tarjeta controladora Micromax Serie 673 . . . . .	33
III.2.1.4 Generador de funciones tektronix AFG3252 . . . . .	34
III.2.1.5 Acondicionamiento de señales . . . . .	34
III.2.1.6 Sincronización de señales . . . . .	36
III.2.2 Sistema de detección y adquisición . . . . .	38
III.2.2.1 Detector óptico . . . . .	38
III.2.2.2 Tarjeta de adquisición de datos NI-DAQ PCI-6024E . . . . .	40
III.2.3 Control de adquisición de datos de los sistemas . . . . .	41

# Tabla de Contenido (Continuación)

Capítulo	Página
III.2.3.1 Programas de adquisición y visualización "off-line" . . . . .	41
III.2.3.2 Sincronización . . . . .	42
III.2.3.3 Programas de adquisición y visualización "on-line" . . . . .	42
III.2.3.4 Sincronización . . . . .	44
III.2.4 Caracterización del instrumento . . . . .	45
III.2.4.1 Análisis de resolución . . . . .	45
III.2.4.2 Muestreo . . . . .	48
III.2.4.3 Tiempo de escaneo . . . . .	49
<b>IV Resultados</b>	<b>50</b>
IV.1 Introducción . . . . .	50
IV.2 Resultados experimentales para un escaneo "off-line" . . . . .	50
IV.2.1 Pruebas de escaneo . . . . .	51
IV.2.2 Discusión de resultados "off-line" . . . . .	60
IV.3 Resultados experimentales para un escaneo "on-line" . . . . .	60
IV.3.1 Discusión de resultados "on-line" . . . . .	63
<b>V Conclusiones</b>	<b>64</b>
V.1 Introducción . . . . .	64
V.2 Aportaciones . . . . .	65
V.3 Trabajos a futuro . . . . .	65
<b>Bibliografía</b>	<b>66</b>
<b>A</b>	<b>68</b>
A.1 Código de programas en Matlab . . . . .	68
A.1.1 Código para adquisición de datos . . . . .	68
A.1.2 Código para el procesado y despliegue de datos . . . . .	69
A.2 Otras figuras en forma de gráfica . . . . .	71
A.3 Otras figuras en forma de imagen . . . . .	73
A.4 Especificaciones de la tarjeta controladora y los galvanómetros . . . . .	82

# Lista de Figuras

Figura		Página
1	Instrumento TOC. . . . .	1
2	Instrumento TOC. . . . .	2
3	(a) Un haz luminoso que se propaga a través de un medio homogéneo denso como el vidrio. (b) Bloque de vidrio separado. . . . .	9
4	Las ondas planas que entran por la izquierda se reflejan hacia la derecha. . .	11
5	El rayo incidente y el reflejado determinan el plano de incidencia perpendicular a la superficie reflectora. . . . .	12
6	(a)Reflexión especular. (b)Reflexión difusa. . . . .	13
7	Un haz de ondas planas incidentes en un vidrio claro, parte de la onda incidente se refleja y parte se refracta. . . . .	14
8	Refracción de ondas. . . . .	15
9	Curvatura de rayos en una interfaz. . . . .	16
10	La pluma parece doblarse alejándose de la normal al entrar a un medio con índice mas bajo. . . . .	17
11	Geometría de rayos. . . . .	17
12	Imagen de difracción. . . . .	18
13	frentes de onda atraves de una rendija mucho más ancha que su longitud de onda. . . . .	18
14	Luz que incide sobre una rendija estrecha de tamaño comparable con su longitud de onda. . . . .	19
15	focos conjugados. . . . .	21
16	focos conjugados. . . . .	21
17	Rostro. . . . .	22
18	Interfaz hiperbólica entre el aire y el vidrio. . . . .	23
19	Diferentes Lentes. . . . .	24
20	Superficies refractoras . . . . .	25
21	(a), (b) y (c) son lentes hiperbólicas vistas en una sección transversal. . . . .	28
22	Rotación de un espejo y desplazamiento angular asociado del haz. . . . .	29
23	Arreglo experimental. . . . .	31
24	Arreglo experimental. . . . .	32
25	laser. . . . .	32
26	Galvanómetros con espejos integrados. . . . .	33
27	Tarjeta controladora Micromax Serie 673. . . . .	33
28	Generador de funciones tektronix AFG32523. . . . .	34
29	Lissajous. . . . .	35
30	(a) Simulación en Matlab x=100 Hz y=150 Hz (b) Resultado experimental x=100 Hz y=150 Hz. . . . .	35
31	(a) Simulación en Matlab x=100 Hz y=200 Hz (b) Resultado experimental x=100 Hz y=200 Hz. . . . .	36

# Lista de Figuras (Continuación)

Figura	Página
32 (a) Simulación en Matlab x=100 Hz y=300 Hz (b) Resultado experimental x=100 Hz y=300 Hz. . . . .	36
33 a)señal escalonada y b)Triangular para el escaneo. . . . .	37
34 Etapa de detección y adquisición. . . . .	38
35 Etapa de amplificación. . . . .	38
36 Etapa de amplificación. . . . .	39
37 Experimento chopper. . . . .	40
38 DAQ PCI-6024E. . . . .	41
39 Diagrama a bloques del programa en Matlab. . . . .	42
40 Panel frontal en Laview para <i>graficar x-y</i> . . . . .	43
41 Diagrama a bloques en Laview para <i>graficar x-y</i> . . . . .	43
42 Panel frontal en Laview para <i>escaneo "on-line"</i> . . . . .	44
43 Diagrama a bloques en Laview para <i>escaneo "on-line"</i> . . . . .	45
44 Espejo con imperfecciones para determinar resolución. . . . .	46
45 Grafica para determinar resolución. . . . .	46
46 Tarjeta de resolución. . . . .	47
47 15 lp/mm. . . . .	47
48 Tarjeta de resolución. . . . .	47
49 Elemento 3 del grupo 6 (14.30 lp/mm). . . . .	48
50 Gráfica de la posición de los espejos. . . . .	51
51 Primera imagen escaneada ( 1000 M/s en 2.5s con 51 puntos). . . . .	51
52 Muestra real. . . . .	52
53 1000 M/s en 2.5s con 51 puntos. . . . .	52
54 4000 M/s en 2.5s escalonada 101. . . . .	52
55 4000 M/s en 40s escalonada 201. . . . .	53
56 1000 M/s en 122s escalonada 51. . . . .	53
57 1000 M/s en 120s escalonada 101. . . . .	54
58 1000 M/s en 60s escalonada 201. . . . .	55
59 1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	55
60 1000 M/s en 120s escalonada 501. . . . .	56
61 2500 M/s en 125.25s, escalonada 501. . . . .	56
62 Muestra real. . . . .	57
63 Imagen con el punto focal en el objeto(1000 M/s en 120s escalonada 201. . .	57
64 Imagen con punto focal fuera del objeto (1000 M/s en 120s escalonada 201. .	57
65 Muestra real. . . . .	58
66 1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	58
67 Muestra real. . . . .	59
68 Hacercamiento de la muestra real. . . . .	59
69 1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	59
70 Muestra real. . . . .	59

# Lista de Figuras (Continuación)

Figura		Página
71	Muestra real. . . . .	59
72	1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	60
73	reflexión 20 grados. . . . .	61
74	Muestra real de la moneda. . . . .	61
75	Moneda imagen on-line reflexión 20 grados. . . . .	61
76	Muestra real tarjeta de resolución. . . . .	62
77	reflexión 20 grados. . . . .	62
78	reflexión 40 grados. . . . .	62
79	reflexión 40 grados. . . . .	62
80	Muestra real. . . . .	71
81	1000 M/s en 2.5s escalonada 51. . . . .	72
82	1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	72
83	Muestra real. . . . .	72
84	1000 M/s en 2.5s escalonada 51. . . . .	72
85	Muestra real. . . . .	73
86	Muestra real. . . . .	73
87	1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	73
88	Muestra real. . . . .	74
89	1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	74
90	Muestra real. . . . .	75
91	1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	75
92	Muestra real. . . . .	76
93	1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	76
94	Muestra real. . . . .	77
95	1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	77
96	Muestra real. . . . .	78
97	1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	78
98	Muestra real. . . . .	79
99	1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	79
100	Muestra real. . . . .	80
101	1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	80
102	1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	81
103	1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	81
104	1000 M/s en 120s escalonada 201. . . . .	82

# Capítulo I

## Introducción

Los equipos electrónicos-ópticos de adquisición y procesamiento de imágenes en tiempo real que se encuentran actualmente en el mercado no son desarrollados en nuestro país. Como ejemplo tenemos los instrumentos que utilizan TOC. La adquisición de estos instrumentos obliga a una dependencia tecnológica que generalmente se manifiesta en un elevado costo. En este trabajo se desarrollaron las bases de un instrumento de escaneo en tiempo real, lo cual nos permitira emigrar a instrumentos ópticos mas complejos de aplicaciones específicas y que involucran la adquisición y procesamiento de imágenes. Durante los primeros años de la década de los cincuentas, se desarrollo un dispositivo extraordinario denominado máser, gracias a los esfuerzos de numerosos hombres de ciencia entre los cuales destacaban Charles Hard Townes de Estados Unidos y Alexander Mikhailovich Porkhorov y Nikolai Gennadievich Basov de la ex Union Sovietica, quienes compartieron el Premio Nobel de Fisica de 1964 por sus trabajos. El máser, abreviatura de Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation —amplificador de microondas por emisión estimulada

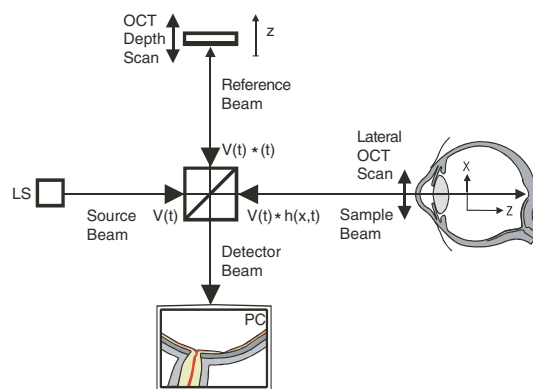


Figura 1: Instrumento TOC.

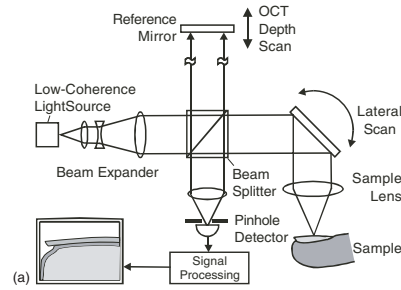


Figura 2: Instrumento TOC.

de radiación— es, como se deduce del nombre mismo, un amplificador de microondas de muy bajo ruido.[ James P. Gordon The Maser Sci. Am, 199, 42 (diciembre de 1958)]. Funcionaba de manera poco convencional para entonces, empleando directamente la interacción mecánico -cuántica de la materia con la energía radiante. Poco después se su comienzo, hubo especulaciones acerca de la posibilidad de aplicar la misma técnica a la región óptica del espectro. En 1958, Townes y Arthur L. Schawlow establecieron las condiciones físicas generales necesarias para conseguir la amplificación de la luz a través de la emisión estimulada de la radiación. Posteriormente, en julio de 1960, Theodore H. Maiman dio a conocer la primera operación exitosa llevada a cabo con máser óptico o láser —sin duda alguna, uno de los grandes hitos de la historia de la óptica y de toda la ciencia—.

El láser es un dispositivo mecánico–cuántico que consigue producir su maravillosa luz aprovechando las maneras sutiles con que los átomos interaccionan con la radiación electromagnética,

sin duda hoy en día este dispositivo se utiliza en un sin fin de instrumentos para la adquisición y despliegado de imágenes.

Sin duda alguna también en nuestro país se utiliza el láser para un sin fin de aplicaciones pero todavía es innegable la gran dependencia tecnológica que sufre nuestro país, particularmente en el campo de los instrumentos electrónicos–ópticos que despliegan

imágenes en un monitor y que lo hacen en tiempo real. En el diagnóstico médico, por dar un ejemplo, son poco accesibles, dado los costos elevados que estos demandan en su compra y mantenimiento preventivos y/o correctivos.

En años recientes se ha venido explorando e implementando con gran éxito una técnica de adquisición de imágenes, que lleva por nombre tomografía óptica coherente (TOC). A partir de los años 80's se ha manifestado una evolución considerable en este campo, y la técnica ha evolucionando desde la tomografía por difracción, pasando por la tomografía óptica difusa y llegando más recientemente a lo que conocemos como tomografía óptica coherente.

En la actualidad, los instrumentos que se utilizan en el diagnóstico médico por imagen son muchos y de diversa índole, entre estos se pueden mencionar: la radiografía simple, el ultrasonido, la tomografía axial computarizada (TAC), la resonancia magnética nuclear (RMN), la tomografía por emisión de positrones (TEP), entre otros. Cada uno de estos instrumentos, como muchos otros, ha tenido y seguirán teniendo un impacto preponderante en la medicina.

En este trabajo se pretende realizar un sistema de adquisición y reconstrucción de información óptica de manera digital para un espacio  $(x,y,z)$  como base para futuros dispositivos construidos en nuestro país (incluyendo los TOC), esto con el fin de reducir los costos y la dependencia tecnológica que sufre nuestro país en este campo.

## **I.1 Motivación**

Las técnicas ópticas son de particular importancia en una gama muy grande de aplicaciones, la evolución que se ha manifestado en los instrumentos que utilizan óptica coherente la hacen muy segura y con grandes aplicaciones potenciales. Los instrumentos que basan

su operatividad en esta técnica y que se encuentran actualmente en el mercado no son desarrollados en nuestro país, por lo que su adquisición obliga a una dependencia tecnológica que generalmente se manifiesta en un costo muy elevado, que finalmente impacta en la sociedad limitando el acceso a esta tecnología. Como consecuencia de lo anterior, se pretende desarrollar las bases de un instrumento que utilice la tomografía óptica coherente con tecnología propia, reduciendo así las limitaciones y costos de estos instrumentos, teniendo mayor énfasis en el área de la medicina.

## **I.2 Objetivos**

### **I.2.1 Objetivos generales**

- Acondicionar un sistema de control y monitoreo de la posición de un punto de luz en un espacio confinado en 3D

### **I.2.2 Objetivos específicos**

- Realizar el control de los espejos mediante el acondicionamiento electrónico y el desarrollo de una interface de control con la PC
- Realizar el control y acondicionamiento de la toma de imágenes para la captura del barrido y visualización en la PC
- Evaluar la posibilidad de utilizar el digitalizador SigLab como una interfaz de control y captura de imágenes
- Evaluar y analizar los parámetros experimentales del sistema como son:

- Angulo máximo y mínimo de giro de los espejos, velocidad de barrido y resolución
  
- Integración y sincronización de todos los elementos para formar la plataforma de control y monitoreo de la posición de un punto de luz en 3D.

# Capítulo II

## Aspectos Teóricos

### II.1 Introducción

En este capítulo se muestran algunos aspectos teóricos relacionados de manera importante con el diseño, implementación y acondicionamiento del instrumento de escaneo óptico en tiempo real. Se muestra el estudio de algunos fenómenos ópticos como lo son el índice de refracción, reflexión, difracción, óptica geométrica entre otros fenómenos. También se muestran diferentes tipos de lentes y sus superficies, espejos y la relación entre ángulos mecánicos y ángulos ópticos. Todo esto con la finalidad de vislumbrar el panorama de la óptica utilizada en este proyecto de tesis.

### II.2 Transmisión

#### II.2.1 Índice de refracción

La transmisión de la luz a través de un medio homogéneo es un proceso continuo y repetitivo de dispersión y re-dispersión. Cada vez que tiene lugar, se produce un desplazamiento de fase en el campo de luz que, en última instancia, aparece como un cambio en la velocidad de fase aparente del haz de luz transmitido con respecto a su valor nominal  $c$ . Esto corresponde a un índice de refracción para el medio ( $n = c/v$ ), que es distinto de uno, aunque los fotones solo existan a una velocidad  $c$ .

Aire	1.00029
Hielo	1.31
Agua	1.333
Alcohol etílico	1.36
Cuarzo fundido	1.4584
Tetracloruro de carbonato	1.46
Trementina	1.472
Benceno	1.501
Plexiglás	1.51
Vidrio Crown	1.52
Cloruro de Sodio	1.544
Vidrio Flint Ligero	1.58
Poliestireno	1.59
Disulfuro de carbonato	1.628
Vidrio Flint denso	1.66
Vidrio Flint de lantano	1.80
Zircón	1.923
Titanito de estroncio	2.409
Diamante	2.417
Rutilo	2.907
Fosfuro de galio	3.50

Tabla I: Índices de refracción de varias sustancias

## II.2.2 Reflexión

Cuando un rayo de luz incide en la superficie de un material transparente, como una lámina de vidrio, la onda ve una enorme distribución superficial de átomos muy próximos entre sí que harán que se esparza la onda. Recordemos que la onda puede medir  $\approx 500$  nm, mientras que los átomos y las separaciones entre ellos ( $\approx 0.2$  nm) son miles de veces más pequeños. En el caso de la transmisión a través de un medio denso, los trenes de onda se anulan mutuamente en todas las direcciones excepto en la frontal y solamente se mantiene el rayo que avanza hacia adelante. Pero esto sucede solo cuando no hay discontinuidades. Este no es el caso en una interfaz entre dos medios transparentes diferentes (como el aire y el cristal), donde se produce una discontinuidad de salto. Cuando un haz de luz alcanza tal interfaz, siempre hay una parte de la luz que se esparce hacia atrás, y a este fenómeno se le denomina reflexión.

Si la transmisión entre dos medios es gradual —es decir, si la constante dieléctrica (o el índice de refracción) cambia de la de un medio a la del otro en una distancia de al menos una longitud de onda—, la reflexión será muy pequeña; en realidad, la interfaz se desvanece. Por otro lado, una transición de un medio a otro en una distancia de un cuarto de longitud de onda o inferior se comporta casi como si se tratara de un cambio totalmente discontinuo.

### II.2.2.1 Reflexión interna y externa:

Imaginemos que la luz viaja a través de un gran bloque homogéneo de vidrio (figura 3). Supongamos ahora que cortamos el bloque por la mitad en sentido perpendicular al rayo de luz.

Separamos los dos segmentos mostrando las superficies planas y suaves, tal y como

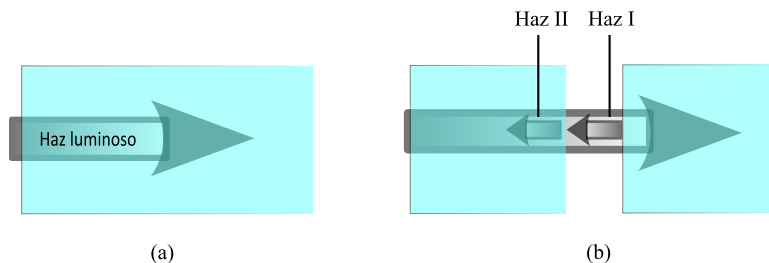


Figura 3: (a) Un haz luminoso que se propaga a través de un medio homogéneo denso como el vidrio. (b) Bloque de vidrio separado.

se muestra en la figura 3. Antes de efectuar el corte, no había ninguna onda de luz transmitiéndose hacia el lado izquierdo del vidrio—sabemos que el haz de luz sólo avanza hacia delante—. Ahora debe haber una onda (haz-I) moviéndose hacia la izquierda, que se refleja desde la superficie del bloque de la derecha. De esto se infiere que una región de dispersores sobre y bajo la superficie expuesta del bloque de la derecha, ahora aparecen desparejados, y la radiación hacia atrás que estos dispersores emiten ya no puede ser anulada. La región de osciladores que, antes del corte, estaba pegada a estos, se encuentra ahora en la sección izquierda del vidrio. Cuando las dos secciones estaban juntas, estos dispersores supuestamente también emitían trenes de ondas hacia atrás, los cuales estaban desfasados  $180^\circ$  con respecto al haz-I y lo anulaban. Ahora dan lugar al haz-II reflejado. Cada molécula esparce luz hacia atrás y, en principio, todas y cada una de las moléculas contribuyen a la onda reflejada. En la práctica, sin embargo, se trata de una fina capa ( $\approx \lambda/2$  de profundidad) de osciladores atómicos desparejados cerca de la superficie que realmente hace posible la reflexión. Para una interfaz aire-vidrio, alrededor del 4% de la energía del rayo incidente que cae perpendicular en el aire o sobre el vidrio, será reflejada directamente hacia atrás por esta capa de dispersores desparejados.

El haz-I se refleja desde el bloque de la derecha y, dado que la luz al principio se transmitía de un medio de menor a uno de mayor densidad óptica, a este fenómeno se le

denomina reflexión externa.

Dicho de otro modo, el índice del medio incidente ( $n_i$ ) es menor que el índice del medio transmisor ( $n_t$ ).

Esto mismo sucede a la capa desparejada de la sección que se transmitió hacia la izquierda, por lo que está también refleja la luz hacia atrás. Con el haz incidente perpendicular en el vidrio sobre el aire, un 4% será reflejado, esta vez como haz-II. A este proceso se le conoce como reflexión interna porque  $n_i > n_t$ . En la figura 3(a) un haz luminoso se propaga a través de un medio homogéneo denso como el vidrio, en (b) se tiene que al partir y separar el bloque de vidrio, la luz se refleja hacia atrás en las dos nuevas interfaces. El haz I se refleja externamente y el haz II se refleja internamente, idealmente, al volver a juntar los dos pedazos, los dos haces reflejados se anulan recíprocamente.

### II.2.2.2 La ley de la reflexión

En la figura 4, la línea  $\overline{AB}$  se extiende a lo largo de un frente de onda entrante, mientras que la línea  $\overline{CD}$  lo hace sobre un frente de onda saliente—de hecho,  $\overline{AB}$  se transforman en la reflexión en  $\overline{CD}$ —. De este modo dado que los triángulos comparten la hipotenusa.

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{BD} = \frac{\text{sen}\theta_r}{AC} \quad (1)$$

Todas las ondas viajaran en el medio incidente con la misma velocidad  $v_i$ . De ahí que en el tiempo ( $\Delta t$ ) que tarda el punto  $B$  del frente de onda en llegar al punto  $D$  de la superficie, el tren de ondas emitido desde  $A$  alcance el punto  $C$ . dicho de otro modo,  $\overline{BD} = v_i * \Delta t = \overline{AC}$ , y, según la ecuación antes mencionada,  $\text{sen}\theta_i = \text{sen}\theta_r$ , lo que significa que:

$$\theta_i = \theta_r \quad (2)$$

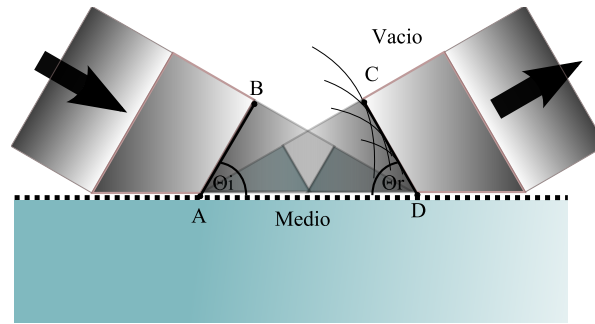


Figura 4: Las ondas planas que entran por la izquierda se reflejan hacia la derecha.

El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Apareció por primera vez en el libro *Catopics*, cuya autoría se atribuye a Euclides. Se dice que un rayo de luz es incidente normalmente cuando  $\theta_i = 0^\circ$ , en cuyo caso  $\theta_r = 0^\circ$  y en un espejo, el rayo se reflejará en sí mismo. Del mismo modo, la incidencia rasante corresponde a  $\theta_i \approx 90^\circ$  y, forzosamente,  $\theta_r = 90^\circ$ .

### II.2.3 Rayos

El dibujar los frentes de onda, puede hacer no ver las cosas con claridad, así que se puede utilizar una forma mejor de visualizar la progresión de la luz. La representación imaginaria en la antigüedad se basaba en flujos en línea recta de luz, una noción que llevo a la lengua latina como *radii* y al español como rayos. Un rayo es una línea dibujada en el espacio que corresponde a la dirección del flujo de energía radiante. Se trata de una entidad matemática y no física. En un medio uniforme (homogéneo), los rayos son rectos. Si el medio se comporta del mismo modo en todas direcciones (isótropo), los rayos serán perpendiculares a los frentes de onda. De este modo, para una fuente puntual que emita ondas esféricas, los rayos, que serán perpendiculares a estas, apuntarán radialmente hacia afuera de la fuente. Del mismo modo, los rayos asociados a las ondas planas serán todos paralelos.

En lugar de esbozar haces de rayos, lo que podemos hacer es simplemente dibujar un

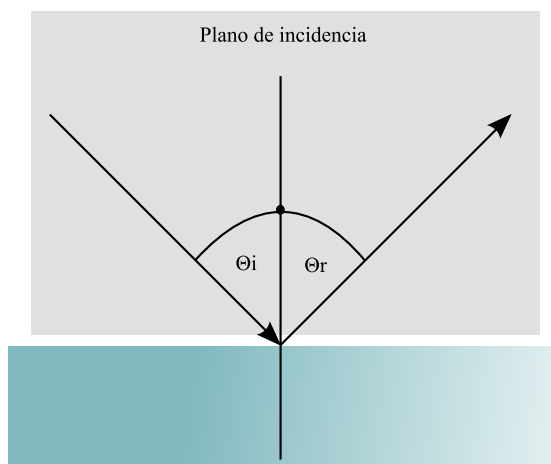


Figura 5: El rayo incidente y el reflejado determinan el plano de incidencia perpendicular a la superficie reflectora.

rayo incidente y otro reflejado (figura 5). Todos los ángulos se medirán ahora desde la perpendicular (normal) a la superficie,  $\theta_i$  y  $\theta_r$  mantendrán los mismos valores numéricos de antes (figura 4).

Los antiguos griegos conocían la ley de la reflexión. Se puede deducir observando el comportamiento de un espejo plano. Hoy en día, esta observación puede simplificarse con una linterna o, incluso mejor, con un laser de baja potencia. La segunda parte de la ley de reflexión establece que el rayo incidente, la perpendicular a la superficie y el rayo reflejado se encuentran todos en un mismo plano que se denomina plano de incidencia (figura 5) —estamos hablando de un fenómeno tridimensional—. La figura 6(a) muestra un rayo de luz incidente sobre una superficie reflectora que sea lisa (en la que cualquier regularidad existente sea pequeña comparada con una longitud de onda). En dicho caso, la luz reemitida por millones y millones de átomos se combinara para formar un único haz bien definido en un proceso denominado reflexión especular. Siempre que las irregularidades de la superficie sean pequeñas comparadas con  $\lambda$ , los trenes de onda dispersados seguirán llegando más o menos en fase cuando  $\theta_i = \theta_r$ .

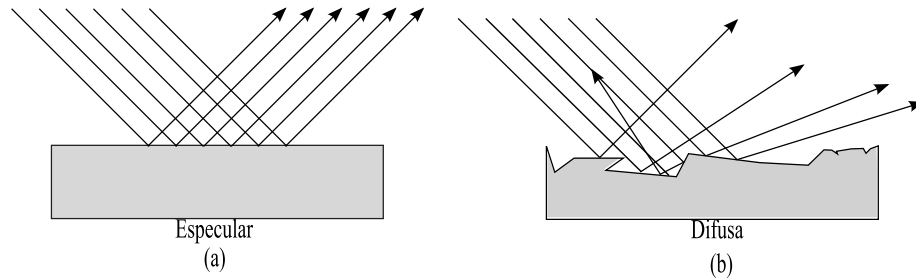


Figura 6: (a) Reflexión especular. (b) Reflexión difusa.

Esta es la situación que se asume en las figuras 4 y 5. Por otro lado, cuando la superficie es rugosa comparada con  $\lambda$  (figura 6), pese a que el ángulo de incidencia seguirá igual al ángulo reflexión para cada rayo, el conjunto de todos ellos aparecerá por doquier, constituyendo lo que se denomina reflexión difusa.

## II.2.4 Refracción

La figura 7 muestra un rayo de luz que incide sobre una interfaz con un ángulo determinado ( $\theta \neq 0$ ). La interfaz corresponde a una acusada falta de homogeneidad, y los átomos que la componen esparcen la luz hacia atrás (como el rayo reflejado) y hacia delante (como el rayo transmitido). Al hecho de que los rayos incidentes se doblen o desvíen su camino, como lo expresó Newton, se le denomina refracción.

Hablando clásicamente, cada molécula activada en la interfaz radia trenes de ondas en el cristal que se expanden a una velocidad  $c$ . podemos imaginárnoslo como la combinación en una onda secundaria que a su vez se recombina con los restos no dispersados de la onda primaria con el fin de formar la onda transmitida neta. El proceso continúa una y otra vez a medida que la onda avanza en el medio de transmisión.

Como quiera que lo visualicemos, nada más entrar en el medio de transmisión aparece un único campo neto, una única onda neta. Tal y como hemos visto, esta onda transmitida generalmente se propaga con una velocidad efectiva de  $vt < c$ . En esencia es como si

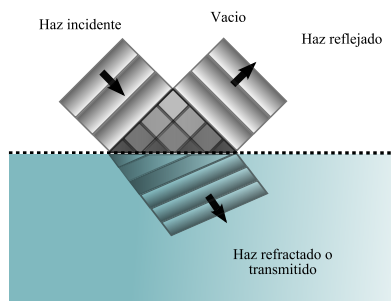


Figura 7: Un haz de ondas planas incidentes en un vidrio claro, parte de la onda incidente se refleja y parte se refracta.

los átomos de la interfaz dispersaran trenes de ondas lentos en el vidrio, los cuales se combinaran para formar la onda transmitida lenta. Sea como fuere, dado que el fenómeno de cooperación conocido como la onda electromagnética transmitida es más lenta que la onda electromagnética incidente, los frentes de onda transmitidos son refractados, desplazados (desviados con respecto a los frentes de onda incidentes), por lo que el haz se dobla.

#### II.2.4.1 La ley de refracción

La figura 8 retoma la situación que dejamos en las figuras 7 y 4. El diagrama representa diversos frentes de onda mostrados en un mismo instante. Recordemos que cada frente de onda es una superficie de fase constante, y que, en la medida en que la fase del campo neto queda retrasada por el medio de transmisión, cada frente de onda se dobla a medida que cruzan la frontera debido al cambio de velocidad. De forma alternativa podemos imaginar la figura 8 como una foto de tomas múltiples de un único frente de ondas mostrándolo tras una serie de intervalos de tiempo iguales y sucesivos. Obsérvese que en el tiempo  $\Delta t$ , que es el que invierte el punto B del frente de onda para llegar hasta el punto D (viajando a una velocidad  $v_i$ ), la parte transmitida de ese mismo frente de onda habrá llegado al punto E (a una velocidad  $v_t$ ). Si el vidrio ( $n_t = 1.5$ ) se encuentra inmerso en un medio incidente como el vacío ( $n_i = 1$ ) o el aire ( $n_i = 1.0003$ ) o cualquier otro donde  $n_t > n_i, v_t < v_i$

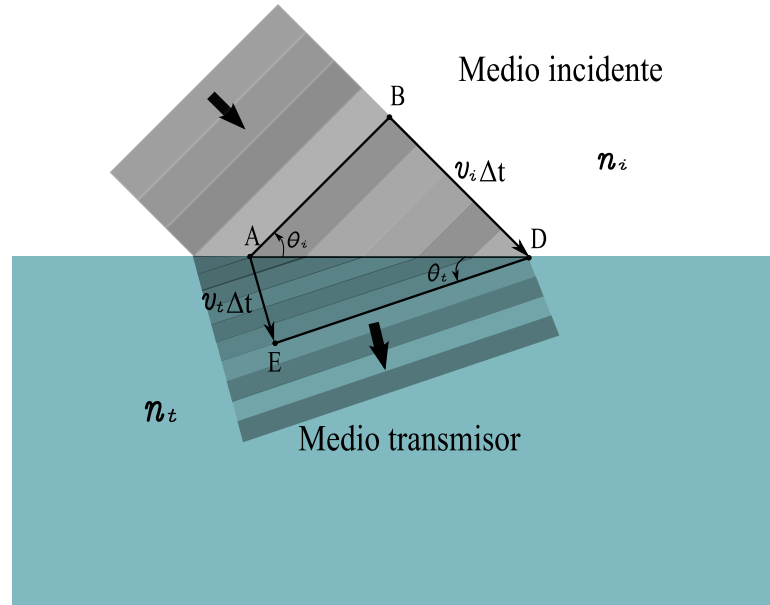


Figura 8: Refracción de ondas.

y  $\overline{AE} < \overline{BD}$ , el frente de onda se doblará. El frente de onda refractado se extiende de E a D formando un ángulo con la interfaz de  $\theta_t$ . Como en el caso anterior, los dos triángulos  $ABD$  y  $AED$  de la figura 8 comparten la hipotenusa ( $\overline{AD}$ ), de tal forma que:

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{\overline{BD}} = \frac{\text{sen}\theta_t}{\overline{AE}} \quad (3)$$

Donde  $\overline{BD} = v_i * \Delta t$  y  $\overline{AE} = v_t * \Delta t$  Así pues,

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{v_i} = \frac{\text{sen}\theta_t}{v_t} \quad (4)$$

Al multiplicar ambos lados por  $c$ , y dado que  $n_i = \frac{c}{v_i}$  y  $n_t = \frac{c}{v_t}$

$$n_i * \text{sen}\theta_i = n_t * \text{sen}\theta_t \quad (5)$$

Esta ecuación es conocida como la ley de Snell, en honor a Willebrord Snel van Royen (1591-1626), el científico que la propuso. Al principio, los índices de refracción consistían

en una serie de constantes del medio físico determinadas experimentalmente. Más tarde, Newton consiguió establecer la ley de Snell utilizando su propia teoría corpuscular. Con posterioridad se demostró que la ley de Snell era una consecuencia natural de la teoría electromagnética de Maxwell

Cuando  $n_i < n_t$  (es decir, cuando la luz esta viajando inicialmente dentro del medio de menor índice de refraccion), la ley de Snell establece que  $\text{sen}\theta_i > \text{sen}\theta_t$ , y dado que en todos los puntos la misma función es positiva entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , entonces que  $\theta_i > \theta_t$ . En lugar de ir recto, el rayo que entra en un medio de mayor índice de refracción se dobla hacia la normal (figura 9(a)). También se da el fenómeno contrario(figura 9(b)); es decir, al entrar en un medio con un índice más bajo, el rayo, en lugar de avanzar recto, se doblara alejándose de la normal (figura 10)

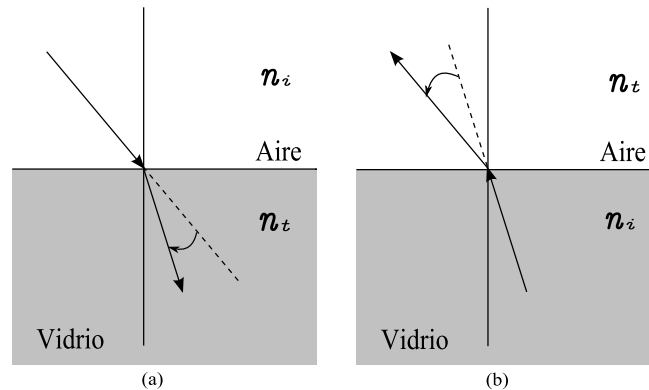


Figura 9: Curvatura de rayos en una interfaz.

Cabe señalar que esto implica que el itinerario de los rayos será el mismo cuando entren que cuando salgan del medio.

Podemos reescribir la ley de Snell de la siguiente manera:

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{\text{sen}\theta_t} = n_{ti} \quad (6)$$

Donde  $n_{ti} \equiv \frac{n_t}{n_i}$  es el índice de refracción relativo de los dos medios



Figura 10: La pluma parece doblarse alejándose de la normal al entrar a un medio con índice mas bajo.

De este modo, un será un vector unitario normal a la interfaz, cuya dirección irá desde el medio incidente hacia el medio de transmisión (figura 11). Podemos escribir la ley de refracción de la siguiente manera:

$$n_i(\hat{k}_i \times \hat{u}_n) = n_t(\hat{k}_t \times \hat{u}_n) \quad (7)$$

o bien ,

$$n_t \hat{k}_t - n_i \hat{k}_i = (n_t \cos \theta_t - n_i \cos \theta_i) \hat{u}_n \quad (8)$$

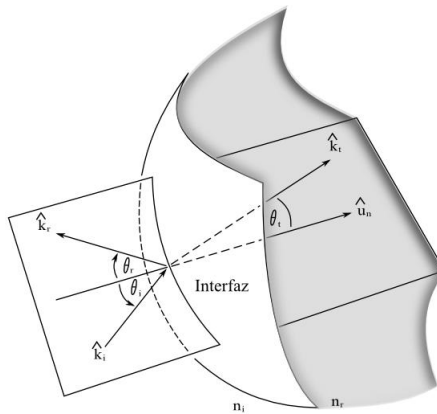


Figura 11: Geometría de rayos.

## II.2.5 Difracción

Es un fenómeno, en el que la luz al interactuar con objetos de dimensiones comparables a su longitud de onda, deja de propagarse rectilíneamente. El frente de ondas se modifica y como cada punto se convierte en un foco emisor de nuevas ondas que se superponen en el espacio. Si son observadas en una pantalla, dan lugar a las imágenes de difracción. Contienen zonas intensamente iluminadas, los máximos, y otras carentes de luz, conocidas como mínimos nulos. En la figura.12 se observa la imagen de difracción producida por un orificio de diámetro 0,12 mm.



Figura 12: Imagen de difracción.

Cuando la luz se propaga por un medio homogéneo e isótropo, y se encuentra a distancias muy grandes del foco emisor, el frente de ondas se puede considerar plano y su propagación rectilínea. Si se aplica el principio de Huygens se pueden determinar los frentes de onda después de atravesar una rendija mucho más ancha que su longitud de onda. En la figura 13 se puede observar que el frente de onda no sufre modificación y su propagación sigue siendo rectilínea.

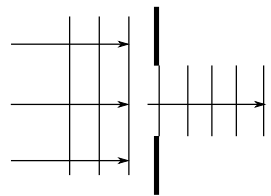


Figura 13: frentes de onda atraves de una rendija mucho más ancha que su longitud de onda.

Sin embargo, cuando la luz incide sobre una rendija estrecha, de tamaño comparable con su longitud de onda, entonces la experiencia enseña que la propagación de los frentes de onda sucede de otro modo. De acuerdo con el principio de Huygens al convertirse cada punto de la rendija en un centro emisor de ondas elementales, sucede que el frente de onda se curva y la propagación de la luz deja de ser rectilínea, figura 14a. Análogamente sucede cuando la luz en su propagación encuentra un pequeño obstáculo figura 14b, o el borde muy estrecho de un objeto

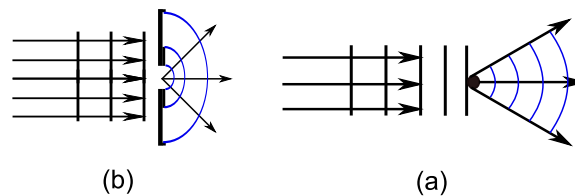


Figura 14: Luz que incide sobre una rendija estrecha de tamaño comparable con su longitud de onda.

## II.3 Óptica Geométrica

La superficie de un objeto luminoso o que está iluminado externamente se comporta como si constara de un gran número de fuentes puntuales, cada una emitiendo ondas esféricas, es decir, los rayos emanan radialmente en la dirección en la que fluye la energía. En este caso, los rayos divergen de una fuente puntual  $S$  determinada, mientras que si la onda esférica estuviese dirigida hacia un punto, los rayos serían lógicamente convergentes. Por lo general, uno se centra tan solo en una porción pequeña del frente de onda. Un punto desde el cual una porción de onda esférica diverge o uno hacia el cual el segmento de onda converge, se denomina foco del haz de rayos.

En las figuras 15 y 16 se recoge una fuente puntual cercana a alguna disposición de superficies reflectoras y refractoras representan un sistema óptico. Por regla general, de la

infinidad de rayos que emanan de  $S$ , solamente uno pasara a través de un punto arbitrario en el espacio. Aun si, es posible lograr que un número infinito de rayos llegue a un cierto punto  $P$ , como en las figuras 15 y 16. Entonces, si para un cono de rayos procedente de  $S$  hay un cono correspondiente de rayos que pasa a través de  $P$ , se dice que el sistema es estigmático para estos dos puntos. La energía en el cono (aparte de algunas perdidas involucradas debidas a la reflexión, esparcimiento y la absorción) llega a  $P$ , dando a si lugar a lo que se conoce como la imagen perfecta de  $S$ . la onda podría formar una mancha finita de luz o mancha borrosa alrededor de  $P$ ; aun seria una imagen de  $S$ , si bien no perfecta. Una fuente puntual colocada en  $P$  formaría igualmente su imagen en  $S$  y, por consiguiente, los dos se denominan puntos conjugados. En un sistema óptico ideal cada punto de una región tridimensional tendrá su imagen perfecta (o estigmática) en otra región; siendo el primero el espacio objeto y el segundo el espacio imagen.

En la mayoría de los casos, la función de un sistema óptico es recoger y remodelar una parte del frente de onda incidente, a menudo con la intención esencial de formar una imagen de un objeto. Obsérvese que los sistemas realizables se caracterizan por no poder recibir toda la luz emitida, pues un sistema acepta solo un segmento del frente de onda. Como resultado, siempre habrá una desviación aparente de la propagación rectilínea incluso en medios homogéneos—las ondas serán difractadas—. El grado de perfección alcanzable en la formación real de imágenes de un sistema óptico estará limitado por la difracción (siempre habrá una mancha borrosa). A medida que la longitud de onda de la energía radiante disminuye en comparación con las dimensiones físicas del sistema óptico, los efectos de la difracción cobran menos importancia. El limite conceptual cuando  $\lambda_o \rightarrow 0$ , en los medios homogéneos se produce propagación rectilínea, definiéndose así al campo ideal de la óptica geométrica. En este caso, ya no sería posible observar el comportamiento que es

específicamente atribuido a la naturaleza ondulatoria de la luz (por ejemplo, la interferencia y la difracción). En muchas situaciones, la gran simplicidad de la aproximación de la óptica geométrica compensa abundantemente su falta de precisión.

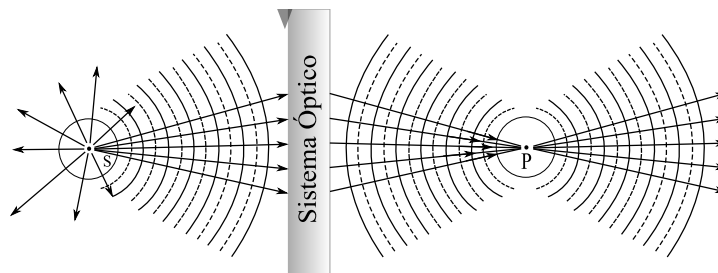


Figura 15: focos conjugados.

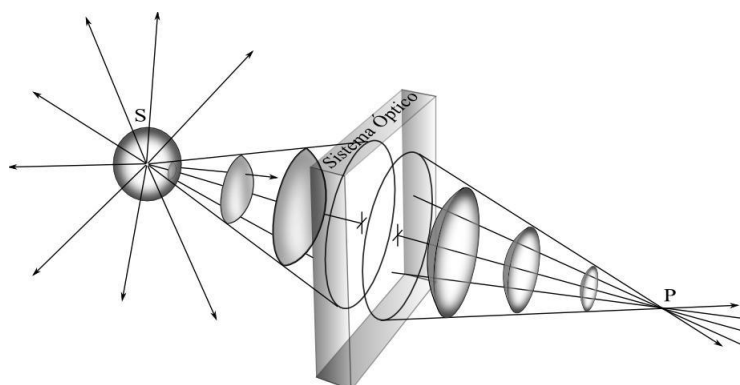


Figura 16: focos conjugados.

### II.3.1 Lentes

Sin duda el sistema óptico más usado es la lente y eso sin contar que vemos el mundo a través de un par de ellas. Las lentes artificiales se remontan a los vidrios quemadores de la antigüedad que, como el nombre mismo sugiere, se utilizaban para encender el fuego mucho antes de la llegada de los fósforos.

En términos generales, una lente es un dispositivo refractor (es decir, una discontinuidad en el medio dominante) que reconfigura la distribución de la energía emitida. Esto se aplica

a los rayos UV, a las ondas cortas a IR, a las microondas, radioondas e incluso hasta las ondas sonoras.

La configuración de una lente se determina a través del remodelado necesario del frente de onda que debe realizar. Como las fuentes puntuales son fundamentales, a menudo es deseable convertir las ondas esféricas divergentes en un haz de ondas planas.

Las lámparas portátiles, los proyectores así como los proyectores de exploración llevan a cabo dicha tarea a fin de evitar que el haz se extienda y se debilite a medida que avanza. Por el contrario, con frecuencia es necesario recoger rayos paralelos incidentes haciéndolos converger hacia un punto, enfocando así la energía como se hace con vidrio quemador o el objetivo de un telescopio. Además, puesto que la luz reflejada por la cara de una persona se difunde desde miles de millones de fuentes puntuales, una lente que hiciera converger cada tren de onda divergente podría formar una imagen de este rostro (figura 17)



Figura 17: Rostro.

### II.3.1.1 Superficies esféricas

Para ver el funcionamiento de una lente, imaginemos que insertamos, en el camino de una onda, una sustancia transparente donde la velocidad de la onda es distinta a la inicial. En la figura 18(a) se recoge una vista transversal de una onda esférica divergente que se desplaza en un medio incidente de índice  $n_i$  para incidir en la superficie curva de un medio

de transmisión de índice  $n_t$ . Cuando  $n_t$  es mayor que  $n_i$ , la velocidad de la onda decrece al entrar en la nueva sustancia. El área central del frente de onda se desplaza más lentamente que sus extremos exteriores que continúan moviéndose a un con bastante rapidez del medio incidente. Dichos extremos sobrepasan la región intermedia y siguen aplanando el frente de onda. Si la interfaz está bien definida, el frente de onda esférico se dobla en una onda plana. La figura 18(b) muestra el rayo alternativo; los rayos se doblan simplemente hacia la normal local al entrar denso de mayor densidad, y si la configuración de la superficie es la correcta, los rayos saldrán paralelos.

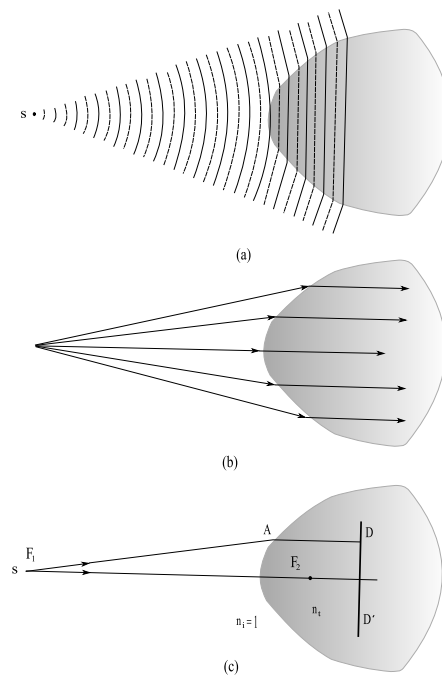


Figura 18: Interfaz hiperbólica entre el aire y el vidrio.

Para dar con la forma precisa de la interfaz, véase la figura 18(c) donde el punto A puede hallarse en cualquier sitio en la frontera. Un frente de onda se transforma en otro, con tal que los caminos por los que se propaga la energía sean todos iguales, manteniendo de esta forma la fase del frente de onda. Una superficie esférica pequeña de base constante que se emita de la S tendrá que transformarse en una superficie plana de fase constante en  $\overline{DD'}$ .

Sea cual fuere el camino que la luz escoge para ir de  $S$  hasta  $\overline{DD'}$  deberá tener siempre el mismo número de longitudes de onda para que la perturbación empiece y termine en fase. La energía radiante que sale de  $S$  como frente de onda individual tendrá que llegar al plano  $\overline{DD'}$ , después de un recorrido de la misma duración, sea cual fuere la trayectoria escogida por un rayo cualquiera. Dicho de otro modo,  $\frac{\overline{F_1A}}{\lambda_i}$  (el número de longitudes de onda a lo largo del rayo arbitrario desde  $F_1$  hasta  $A$ ) más  $\frac{\overline{AD}}{\lambda_t}$  (el número de longitudes de onda a lo largo del rayo desde  $A$  hasta  $D$ ) tiene que ser constante, independientemente de donde se encuentre  $A$  en la interfaz. Ahora, sumándolos y multiplicándolos por  $\lambda_0$  da como resultado.

$$n_i(\overline{F_1A}) + n_t(\overline{AD}) = \text{constante} \quad (9)$$



Figura 19: Diferentes Lentes.

Cada término a la izquierda representa la longitud que se ha desplazado en un medio multiplicada por el índice del mismo y, naturalmente, cada uno representa la longitud de camino óptico- $LCO$ -atravesado. Las longitudes de camino óptico desde  $S$  hasta  $\overline{DD'}$  son todas iguales. Si la ecuación 9 se divide por  $c$ , el primer término se convierte en el tiempo que tarda de desplazarse desde  $S$  hasta  $D$ ; el lado derecho permanece constante (si bien

no será la misma constante). La ecuación 9 equivale a decir que para cruzar por todos los caminos desde S hasta  $DD'$  deberá tardarse el mismo tiempo.

$$\overline{F_1A} + \left(\frac{n_t}{n_i}\right) (\overline{AD}) = \text{constante} \quad (10)$$

La ecuación 10 es la ecuación de una hipérbola donde la excentricidad ( $e$ ) que mide la flexión de la curva, viene dada por  $(n_t/n_i) > 1$ , es decir,  $e = n_{ti} > 1$ . Cuanto más grande sea la excentricidad, más plana será la hipérbola (cuanto más grande sea la diferencia de los índices, menor será la curvatura de la superficie). Cuando una fuente puntual está localizada en el foco  $F_1$  y la interfaz entre los dos medios es hiperbólica, se transmitirán ondas planas en el material de índice superior. En todos y cada uno de los casos que se recogen en la figura 20, los rayos divergen de o convergen hacia el punto focal,  $F$ , pudiendo además ser invertidos para que se desplace en cualquier sentido: si una onda plana incide (desde la derecha) en la interfaz de la figura 20c, aquella convergerá (hacia la izquierda) en el foco más lejano del elipsoide.

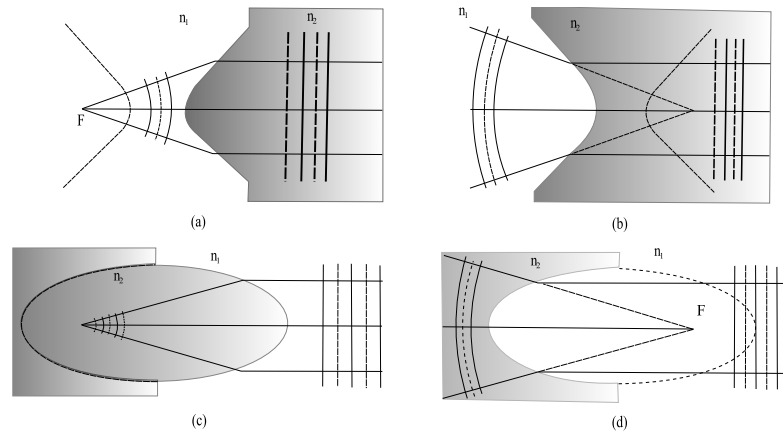


Figura 20: Superficies refractoras  
( $n_2 > n_1$ ) hiperbólicas (a) y (b) y elipsoidales (c) y (d) en sección transversal.

La primera persona que sugirió utilizar las secciones cónicas como superficies para las lentes y los espejos fue Johann Kepler en 1611 cuya idea, sin embargo, no pudo prosperar

mucho sin la ley de Snell. Cuando se descubrió esa relación, Descartes en 1637 pudo desarrollar las bases teóricas de la óptica de las superficies esféricas recurriendo a la geometría analítica.

En la figura 21a las ondas esféricas incidentes divergentes se convierten en ondas planas en la primera interfaz a través del mecanismo de la figura 21a. Estas ondas planas dentro de la lente dan en la cara posterior perpendicularmente, emergiendo sin alterarse:  $\theta_i = 0$  y  $\theta_t = 0$

Puesto que los rayos son reversibles, las ondas planas incidentes desde la derecha convergerán hacia el punto  $F_1$  que se denomina punto focal de la lente. Expuesta en su cara plana a los rayos paralelos del Sol, nuestra lente bastante compleja funcionaría bien como vidrio quemador.

En la figura 21b, las ondas planas dentro de la lente se hacen converger hacia el eje curvándolas en la segunda interfaz. Ambas lentes son más gruesas en su punto medio que en sus extremos, por lo tanto se dice que son *convexas* (del Latín *convexus*, arqueado). Cada una de ellas obliga al haz incidente a converger de algún modo, a curvarse un poco más hacia el eje central; por lo tanto, nos referimos a ellas con el término de *lentes convergentes*. Por el contrario, una lente *cóncava* (del Latín *concauus*, que significa hueco) es más delgada en el centro que en sus extremos, como se puede ver en la figura 21c. Hace que los rayos que entran como haz paralelo diverjan. Todos estos dispositivos que alejan los rayos exteriores del eje central (y, al hacerlo, añaden divergencia al haz) se denominan *lentes divergentes*.

En la figura 21c, los rayos paralelos entran por la izquierda y, al salir, parecen divergir de  $F_2$ ; aún así, ese punto se toma como punto focal. *Cuando un haz paralelo de rayos atraviesa una lente convergente, el punto hacia el cual converge (o cuando atraviesa una lente divergente, el punto del cual diverge) es el punto focal de la lente.*

Si una fuente puntual está situada en el eje central u óptico en el punto  $F_1$  frente a la lente en la figura 21b, los rayos convergerán hacia el punto conjugado  $F_2$ . Una imagen luminosa de la fuente aparecería en una pantalla colocada en el punto  $F_2$ , una imagen que se dice, por lo tanto, que es *real*. Por otro lado, en la figura 21c la fuente puntual esta en el infinito y los rayos que emergen del sistema son, esta vez, divergentes. Parecen salir del punto  $F_2$ , sin embargo, no se dará ninguna imagen luminosa en la pantalla en ese punto y nos referimos a ella con el término de *virtual*, como ocurre con la imagen que genera un espejo plano.

La clase de elementos ópticos (lentes y espejos) que nos ha ocupado, cuyas dos superficies, o tan solo una de ellas, no sean ni planas ni esféricas, se denominan *asféricas*. Aunque su operación es fácil de entender y sean capaces de desempeñar perfectamente ciertos cometidos, continúan siendo difíciles de producir con gran precisión.

### II.3.2 Espejos

Los sistemas de espejos se emplean cada vez más en regiones determinadas del espectro. Si bien es relativamente simple construir un sistema reflector que funcione satisfactoriamente en una banda ancha de frecuencias, no puede decirse lo mismo de los sistemas refractores.

Un espejo podría ser simplemente una pieza de vidrio negro o una superficie metálica finamente pulida. En el pasado, los espejos se hacían generalmente recubriendo el vidrio con plata, escogiéndose esta última por su alta eficacia en el UV y el IR. Hoy en día, los recubrimientos de aluminio evaporados al vacío sobre substratos altamente pulidos han quedado como el estándar para los espejos de calidad.

En aplicaciones especiales (por ejemplo en láseres), donde no pueden tolerarse ni siquiera las pequeñas pérdidas debidas a las superficies metálicas, los espejos formados por películas

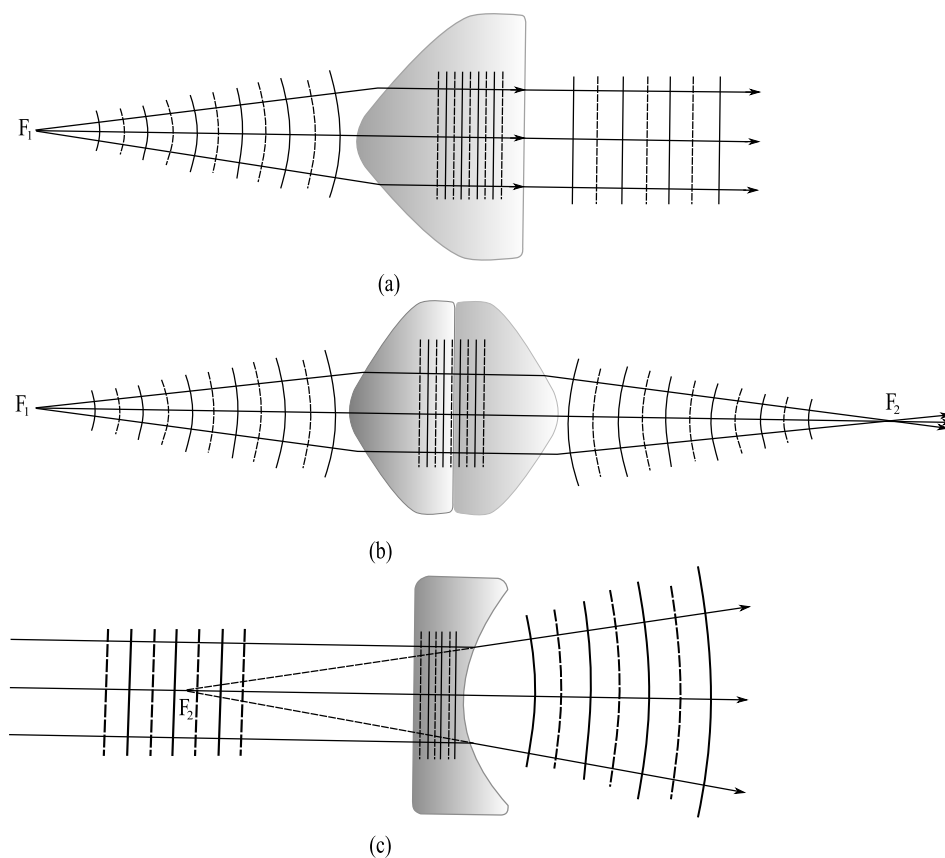


Figura 21: (a), (b) y (c) son lentes hiperbólicas vistas en una sección transversal.

dieléctricas múltiples se están haciendo indispensables.

Se están desarrollando una nueva generación de espejos livianos de precisión, la tecnología no está en absoluto estática.

Muy frecuentemente los espejos se usan para amplificar y medir rotaciones ligeras de ciertos aparatos de laboratorio, por ejemplo, galvanómetros, péndulos de torsión, balanzas electrodinámicas, etc. Como se puede ver en las figura 22(a) y 22(b), si el espejo gira un ángulo  $\alpha$ , el haz o imagen reflejados se moverán un ángulo  $2\alpha$ .

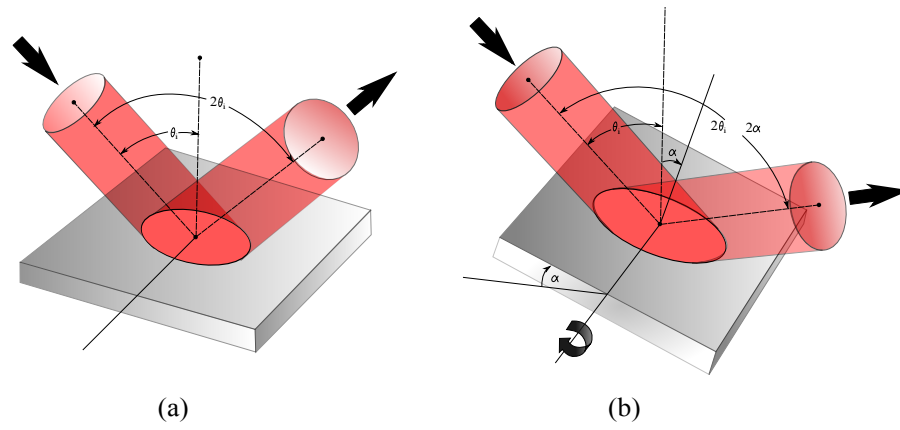


Figura 22: Rotación de un espejo y desplazamiento angular asociado del haz.

# Capítulo III

## Descripción y caracterización del instrumento de escaneo óptico en tiempo real

### III.1 Introducción

En este capítulo se da una descripción detallada de cada una de las etapas que se desarrollaron para el diseño, implementación y acondicionamiento del instrumento de escaneo óptico en tiempo real. Se da una descripción del equipo electrónico empleado, los elementos ópticos utilizados y la programación desarrollada para lograr un escaneo adecuado de la superficie bajo análisis. El capítulo se divide en dos secciones, la primera sección se enfoca en una descripción del sistema de barrido [óptico-mecánico], sistema de detección y el control de los sistemas. En la segunda sección, dada su importancia, se hace la caracterización del instrumento para conocer los alcances de resolución del mismo y confirmar un buen escaneo óptico.

### III.2 Descripción y caracterización del instrumento de escaneo óptico

El arreglo experimental se puede ver en la figura 23 y 25.

Este consta de un fuente luz (laser) la cual es dirigida hacia el sistema de escaneo que hace el barrido en  $X$  y  $Y$ , después de pasar por el sistema de escaneo, el haz es dirigido

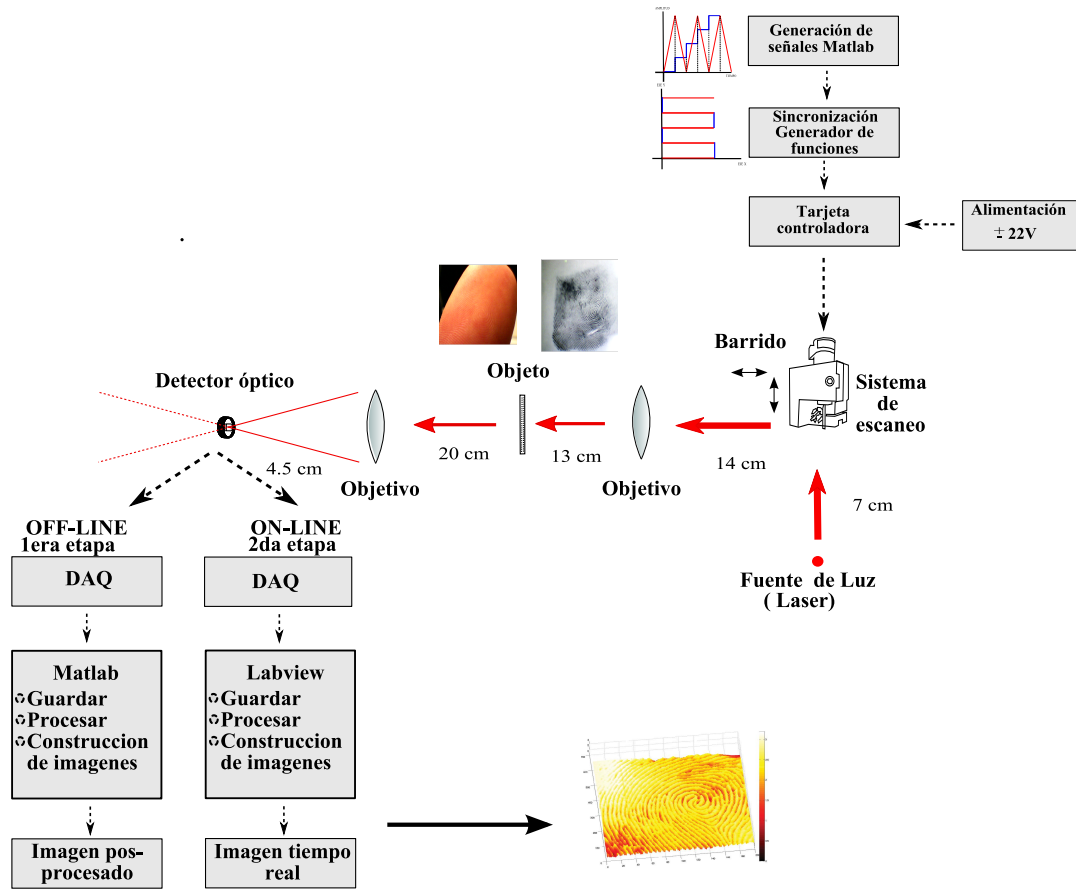


Figura 23: Arreglo experimental.

hacia la primera lente la cual se encarga de enfocar el haz hacia el objeto con el fin de obtener un poco mas de precisión en el escaneo. Una vez que el objeto es barrido por el haz, este llega hacia la segunda lente la cual enfoca cada punto hacia el detector óptico, se guardan todos los datos por medio de una tarjeta de adquisición y posteriormente, con la ayuda del programa Matlab y Lavbiew, se procesa la información en la computadora para obtener así la imagen escaneada.

### III.2.1 Sistema de barrido [óptico-mecánico]

Para la implementación del sistema de barrido [óptico-mecánico] se empleo el siguiente equipo electrónico del cual se da una breve descripción.

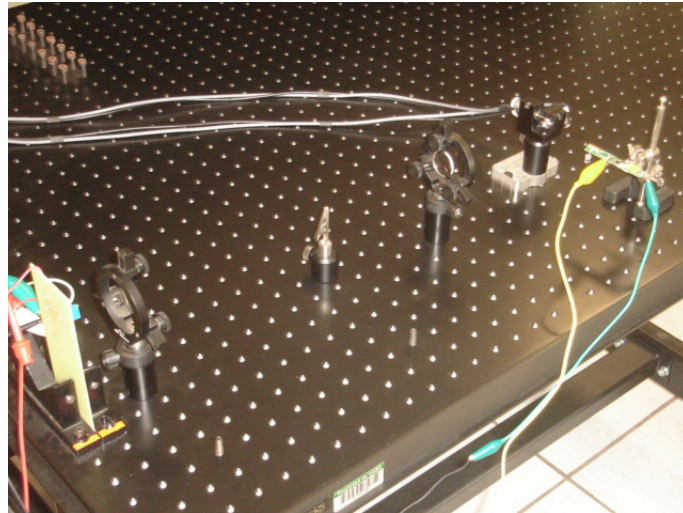


Figura 24: Arreglo experimental.

### III.2.1.1 Fuente de iluminación

La fuente de iluminación empleada es un laser semiconductor de aproximadamente 630 nm de longitud de onda (no se tienen datos técnicos exactos del laser debido a que se obtuvo de un apuntador común).

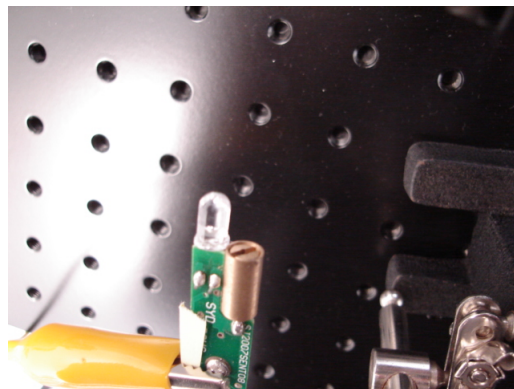


Figura 25: laser.

### III.2.1.2 Galvanómetros 6210H

Los galvanómetros con numero de modelo 6210H son actuadores de movimiento-magnético, lo que significa que el rotor de trabajo o el armazón es un imán. Por lo tanto se puede

generar alto torque muy rápidamente. Esto es esencial para sistemas que necesitan tiempos pequeños de respuesta al escalón.

La posición angular del eje es detectado por un sensor óptico situado en un pequeño circuito, en la parte posterior del escáner. La señal de salida de este sensor es una corriente diferencial que es retroalimentada a la tarjeta controladora electrónica, la retroalimentación del servo permite un muy rápido y preciso posicionamiento de los espejos.

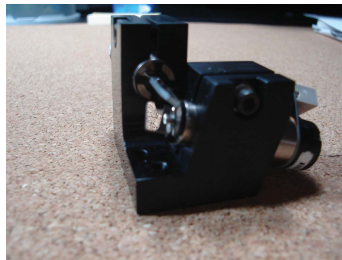


Figura 26: Galvanómetros con espejos integrados.

### III.2.1.3 Tarjeta controladora Micromax Serie 673

La tarjeta MicroMax Serie 673 de eje de doble-servomotores está diseñada para aplicaciones y sistemas de posicionamiento de espejos que requieren alto rendimiento y alta precisión (en el apéndice se encuentran las hojas de especificaciones).

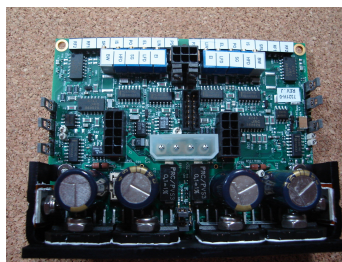


Figura 27: Tarjeta controladora Micromax Serie 673.

### III.2.1.4 Generador de funciones tektronix AFG3252

Para la construcción de las señales que alimentan la tarjeta 673, y por consecuencia a los espejos, se utilizó un generador de funciones tektronix AFG3252. Con este generador se pueden construir señales de características específicas mediante un archivo de texto (generación de señales tipo ARB), este archivo de texto se puede construir con la ayuda de Matlab que posteriormente es cargado al generador AFG3252 para crear las señales deseadas. Este generador cuenta con Máximo ancho de banda de 240MHz; Tipo de modulación: Amplitude, Frecuencia, Fase, FSK, Pulso, Burst, Sweep.

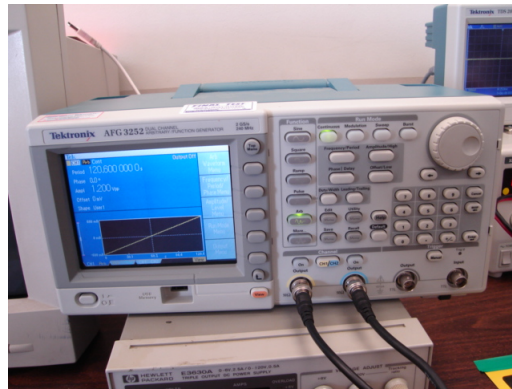


Figura 28: Generador de funciones tektronix AFG3252.

### III.2.1.5 Acondicionamiento de señales

La generación de las señales, como ya se mencionó en el capítulo anterior, se realiza mediante un archivo de texto el cual es creado en Matlab para posteriormente ser cargado en el generador de funciones AFG3252. Se puede suministrar cualquier tipo de señales a la tarjeta para la manipulación de los espejos teniendo en cuenta las especificaciones de la misma (apéndice). Se realizaron una serie de simulaciones y experimentos para corroborar que el sistema estuviera trabajando correctamente.

Se introdujeron señales sinusoidales diferentes a cada canal que controla cada galvanómetro

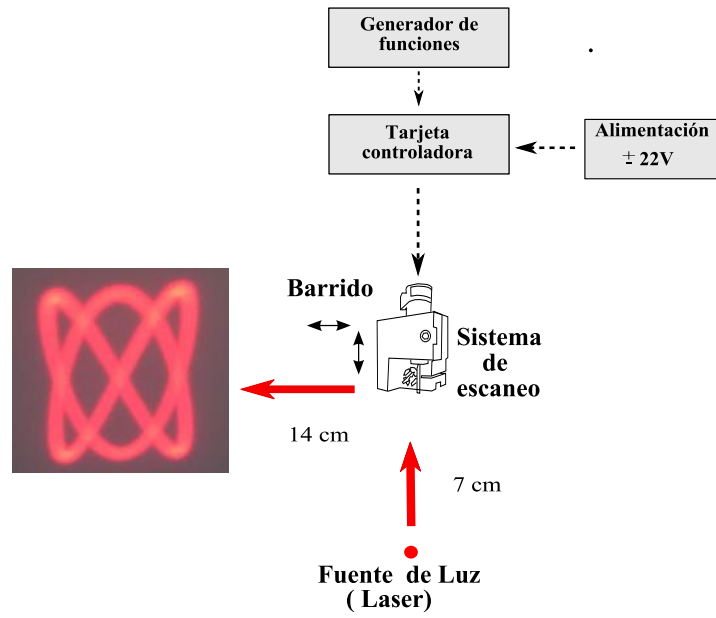


Figura 29: Lissajous.

lo cual da como resultado la generación de figuras como las 30, 31, 32 con sus respectivas simulaciones en Matlab (Lissajous).

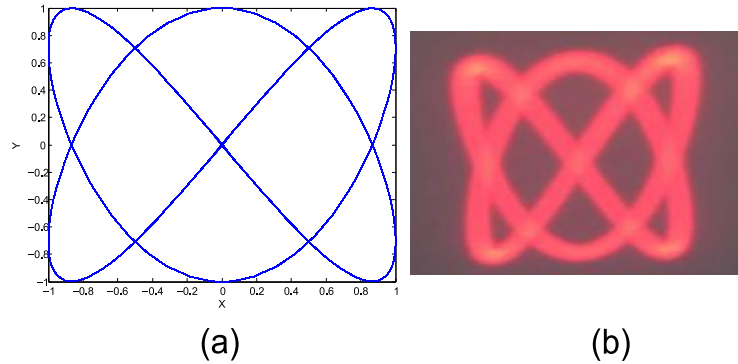


Figura 30: (a) Simulación en Matlab  $x=100$  Hz  $y=150$  Hz (b) Resultado experimental  $x=100$  Hz  $y=150$  Hz.

Al ver esta similitud entre los experimentos y las simulaciones, comprobamos un buen funcionamiento de la tarjeta controladora y los galvanómetros.

Uno de nuestros objetivos en el proyecto es hacer un barrido en  $X$  y  $Y$ , lo cual nos obliga a generar dos señales sincronizadas para la obtención de este tipo de barrido. Para generar este barrido, se analizó el uso de una señal escalonada y una señal triangular, esto

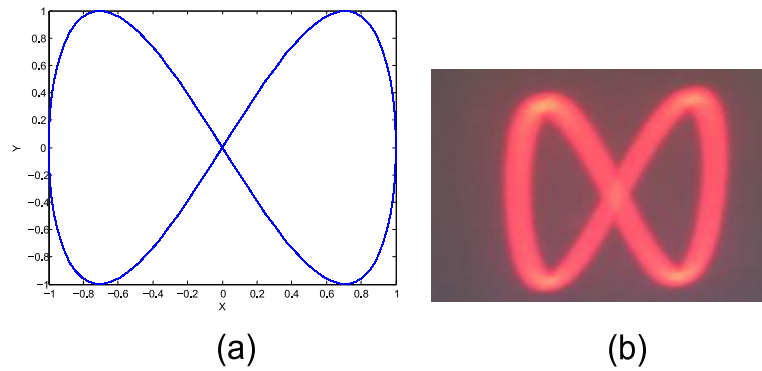


Figura 31: (a) Simulación en Matlab  $x=100$  Hz  $y=200$  Hz (b) Resultado experimental  $x=100$  Hz  $y=200$  Hz.

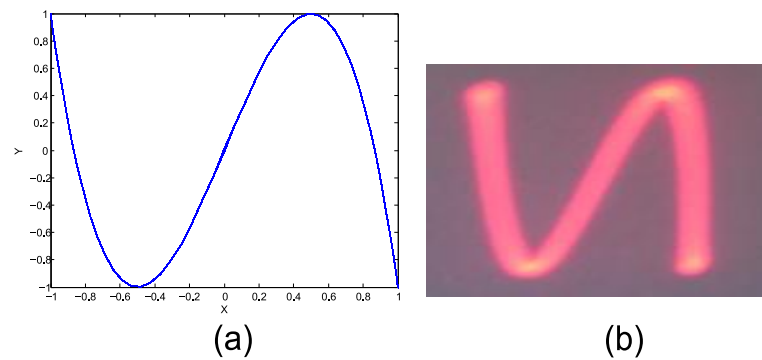


Figura 32: (a) Simulación en Matlab  $x=100$  Hz  $y=300$  Hz (b) Resultado experimental  $x=100$  Hz  $y=300$  Hz.

con el fin de que una señal mantenga su posición mientras que la otra señal realiza un barrido horizontal.

La señal escalonada contribuye a los saltos verticales o al eje de las 'Y' y la señal triangular hace el barrido horizontal o en el eje de las 'X' como se muestra en la figuras 33a y 33b.

La señal triangular es generada con el AFG3252, la señal escalonada es creada mediante un programa en Matlab el cual construye un archivo *.txt* que se carga en el generador de funciones.

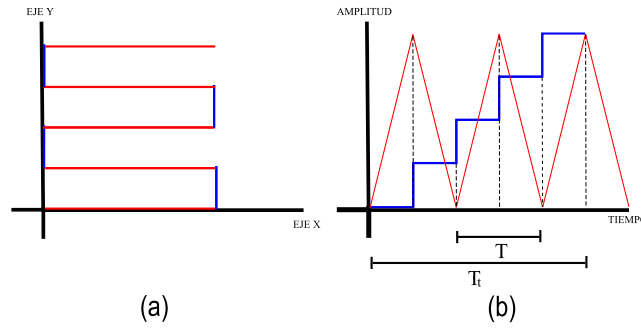


Figura 33: a)señal escalonada y b)Triangular para el escaneo.

### III.2.1.6 Sincronización de señales

Para obtener el tiempo total de escaneo deseado o el tiempo de barrido por escalón deseado, utilizamos la ecuación 11.

$$(S) \left( \frac{T}{2} \right) = T_t \quad (11)$$

Donde:

$S$  = Longitud del vector de la señal escalonada(o saltos)

$T$  = Periodo de la señal triangular

$T_t$  = Periodo total de escaneo

Como se dijo anteriormente se puede obtener el tiempo total de escaneo proponiendo el tiempo de barrido por escalón o viceversa, lo cual nos da la pauta para crear una de las dos señales dependiendo de los valores de la otra, y así, poder sincronizar estas dos señales para realizar el movimiento adecuando de los espejos y por lo tanto un escaneo correcto.

Por ejemplo, si queremos un tiempo total de escaneo de 25.125 s y tenemos que la longitud del vector es de 201 pts. Tenemos que:

$$T = \frac{(25.125)(2)}{201}$$

$$T = 0.25s$$

$$T_h = \frac{T}{2} \quad (12)$$

$$T_h = 0.125s$$

Donde:

$T_h$  =Tiempo de Barrido por línea horizontal

### III.2.2 Sistema de detección y adquisición

El sistema de detección, como su nombre lo indica, es el encargado de detectar la señal que pasa atreves de la muestra y enviar esta señal a su posterior o inmediato procesamiento dependiendo de cuál de los dos tipos de escaneo presentados en esta tesis se realice. Hay dos elementos principales en el sistema de detección: el detector óptico (fotodiodo pin fds-00 con su etapa de amplificación) y la tarjeta de adquisición de datos PCI-6024E.

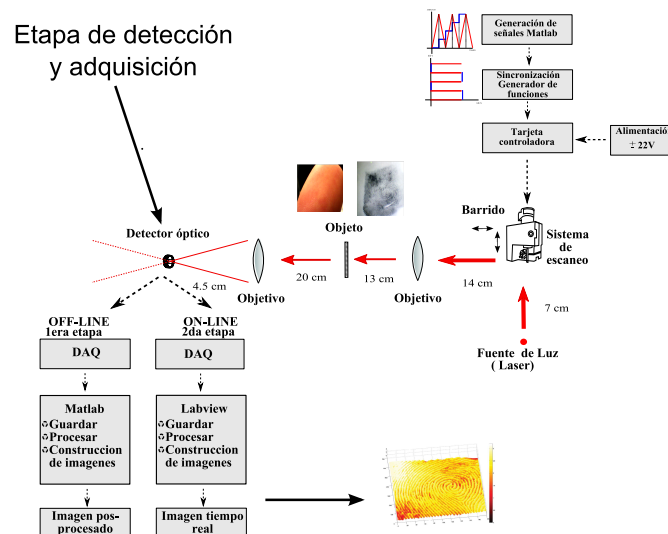


Figura 34: Etapa de detección y adquisición.

#### III.2.2.1 Detector óptico

El detector óptico está compuesto por una etapa de amplificación y un fotodiodo tipo pin.

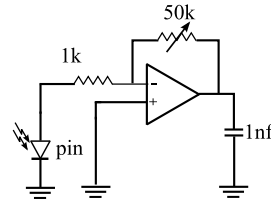


Figura 35: Etapa de amplificación.

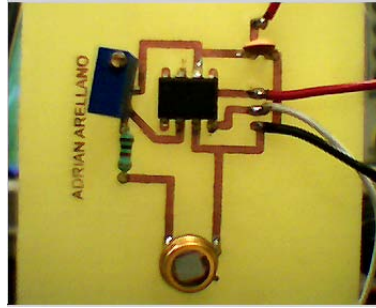


Figura 36: Etapa de amplificación.

El fotodiodo, en nuestro arreglo experimental, entrega un voltaje dependiendo de la excitación que sufra por medio de luz. La fuente de excitación que utilizamos es un laser que está alimentado con una fuente variable de 0V a 6V.

Tomando en cuenta que el voltaje aplicado al laser es proporcional a la potencia óptica del mismo, utilizamos este parámetro para determinar que voltajes entrega el fotodiodo dependiendo del voltaje aplicado al laser (con las distancias mostradas en la figura 34 ).

Con lo anterior obtuvimos los siguiente:

Alimentación del laser	Voltaje en el fotodiodo
0V	0V
2V	250mV
2.40V	500mV

Tabla II: Voltaje del fotodiodo sin etapa de amplificación

Tomando los resultados anteriores se puede deducir que aplicando un amplificador inversor con polarización de  $\pm 5V$  y ganancia 10 se adecua la señal entregada por el fotodiodo hacia la tarjeta de adquisición, esto con el fin de obtener un mayor rango dinámico

en la señal de información.

Alimentación del laser	Voltaje salida del operacional
0V	0V
2.40V	4.3V

Tabla III: Voltaje del fotodiodo con etapa de amplificación

Se corrobora el tiempo de subida del fotodiodo (rise time 10ns hojas de especificaciones) hasta de 1ms debido a que solo se contaba con un chopper de 1kHz.

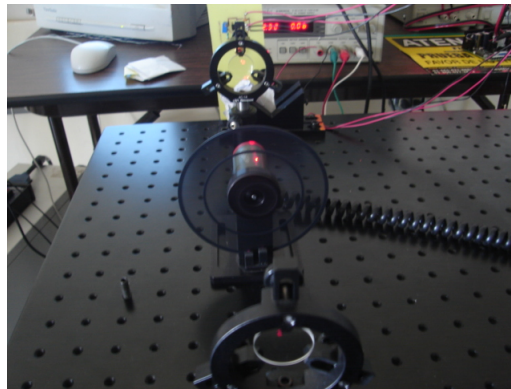


Figura 37: Experimento chopper.

### III.2.2.2 Tarjeta de adquisición de datos NI-DAQ PCI-6024E

Para la adquisición de los datos se utiliza DAQ PCI-6024E, como la mostrada en la figura (figura 38)(dos salidas analógicas de 12 bits; 8 líneas de E/S digitales a 200 kS/s, se trabajo con las imagenes off-line a 1000 M/s y las imagenes on-line a 25000 M/s) , con la ayuda de esta tarjeta, se toman las 3 variables para la construcción de las imágenes las cuales son:

- Señal de la Posición en x
- Señal de la Posición en y
- Señal de la información del laser

Las primeras dos señales se pueden tomar directamente del generador o de la tarjeta controladora que también tiene una salida para la posición de los espejos, la señal de información del laser se obtiene mediante un fotodiodo tipo pin, el cual tiene una etapa de amplificación sencilla (figuras 35 y 36) para adecuar la señal obtenida.



Figura 38: DAQ PCI-6024E.

### III.2.3 Control de adquisición de datos de los sistemas

Es de particular importancia para este proyecto la programación que se utiliza en la adquisición procesado y despliegue de la información que se está obteniendo. En este caso utilizamos la programación con Matlab y Labview por la capacidad y facilidad de procesado de datos con los que cuentan estos programas, además de que es muy fácil graficar datos, aunque no se limitan a estas funciones. Para controlar la adquisición de datos provenientes del detector óptico se muestran algunos aspectos generales de la programación empleada en el instrumento de escaneo óptico.

#### III.2.3.1 Programas de adquisición y visualización "off-line"

Se realizaron varios programa en Matlab, entre ellos uno se utiliza para adquirir las tres señales del escaneo, otro para separar las tres señales y poder graficarlas y otro para

desplegar la información adquirida en forma de imagen. El diagrama a bloques de esta programación se muestra en la figura 39

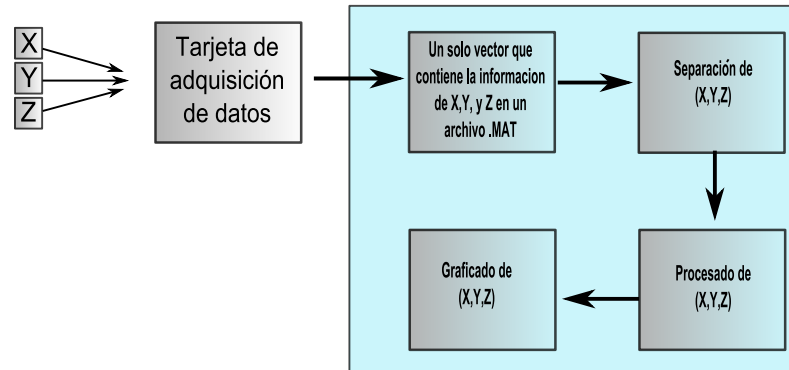


Figura 39: Diagrama a bloques del programa en Matlab.

### III.2.3.2 Sincronización

La sincronización para adquirir los datos correctamente (o sea que los datos empiecen a adquirirse cuando el barrido empieza y se terminen de adquirir datos un instante antes de que se empiece de nuevo con el barrido) se hace mediante un trigger en la señal escalonada. Esto es, cuando la señal escalonada comienza un nuevo periodo, se activa el trigger y empieza la adquisición de datos, como ya sabemos el periodo total de barrido (o de la señal escalonada), solo adquirimos datos hasta que el periodo total de escaneo se cumpla (con el objetivo de no tener traslapes de información)

### III.2.3.3 Programas de adquisición y visualización "on-line"

Para la visualización de la muestra escaneada "on-line" ("tiempo real") se utilizó el software Labview con el cual se realizaron dos programas. Uno de los programas se utilizó para visualizar la posición de los espejos (experimento Lissajous). Podemos ver el bloque de diagrama y panel frontal correspondiente a este programa en las figuras 40 y 41 respectivamente.

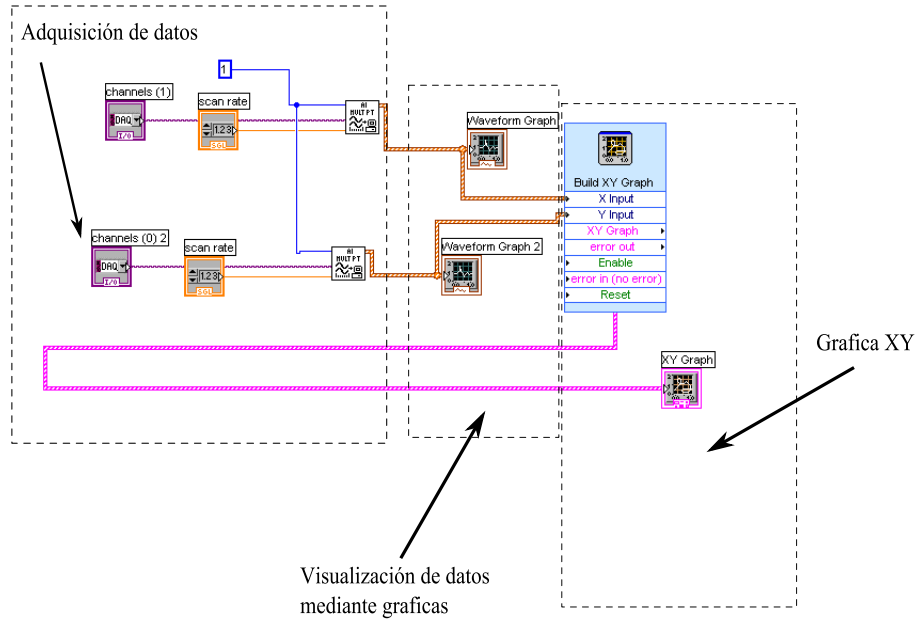


Figura 40: Panel frontal en Laviw para *graficar x-y*.

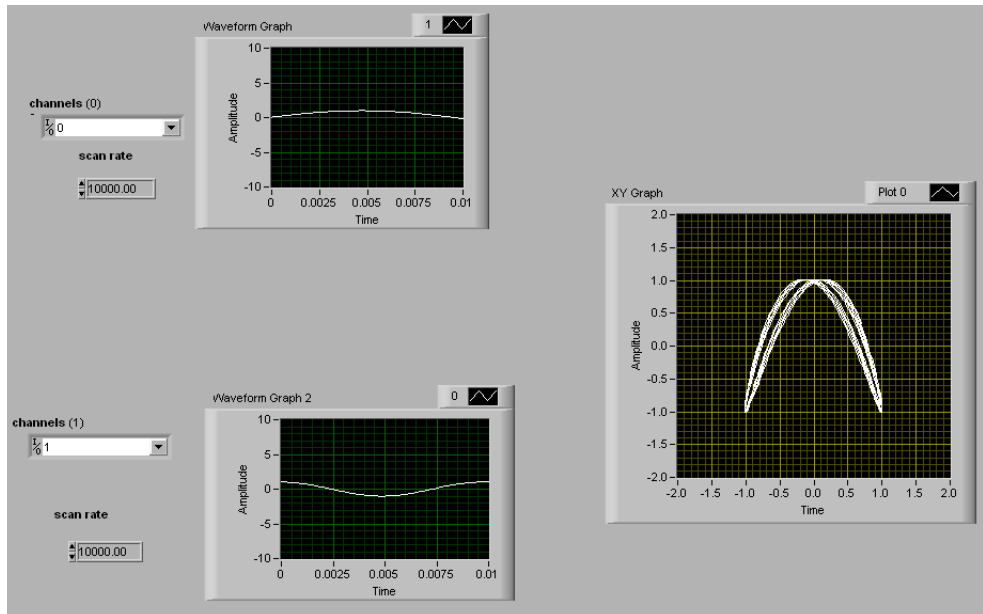


Figura 41: Diagrama a bloques en Laviw para *graficar x-y*.

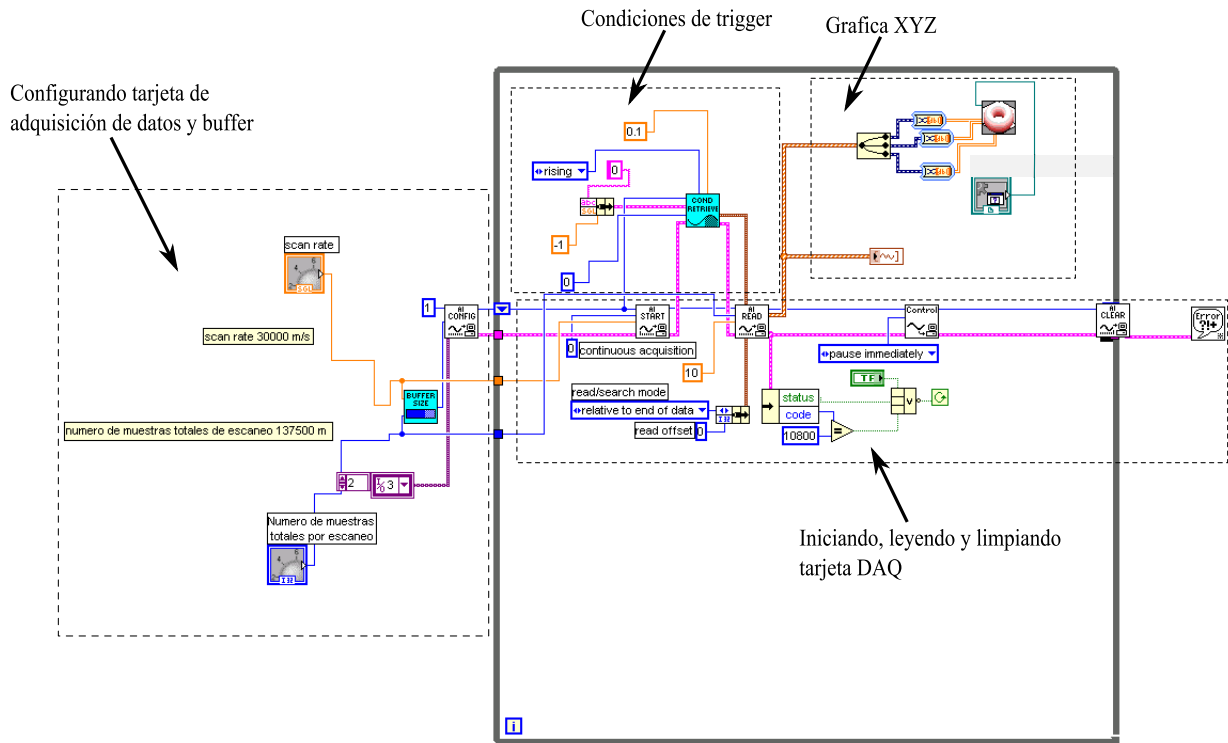


Figura 42: Panel frontal en Laviaw para *escaneo "on-line"*.

El segundo programa es el utilizado para ver las 3 variables graficadas como una figura tridimensional o bidimensional dependiendo del ángulo de perspectiva que tengamos de la imagen escaneada. En las figuras 42 y 43 podemos ver el bloque de diagrama y panel frontal de este programa.

### III.2.3.4 Sincronización

La sincronización de adquisición de datos en el escaneo "on-line" es en principio igual que la del escaneo "off-line" con la única diferencia de que en el escaneo "on-line" el trigger se dispara cíclicamente para poder refrescar la imagen mostrada en la pantalla con la nueva información adquirida. Se debe tomar en cuenta, al programar la sincronización, la cantidad de muestras que se deben almacenar en el buffer antes desplegar la información guardada (con el fin de tener un escaneo correcto).

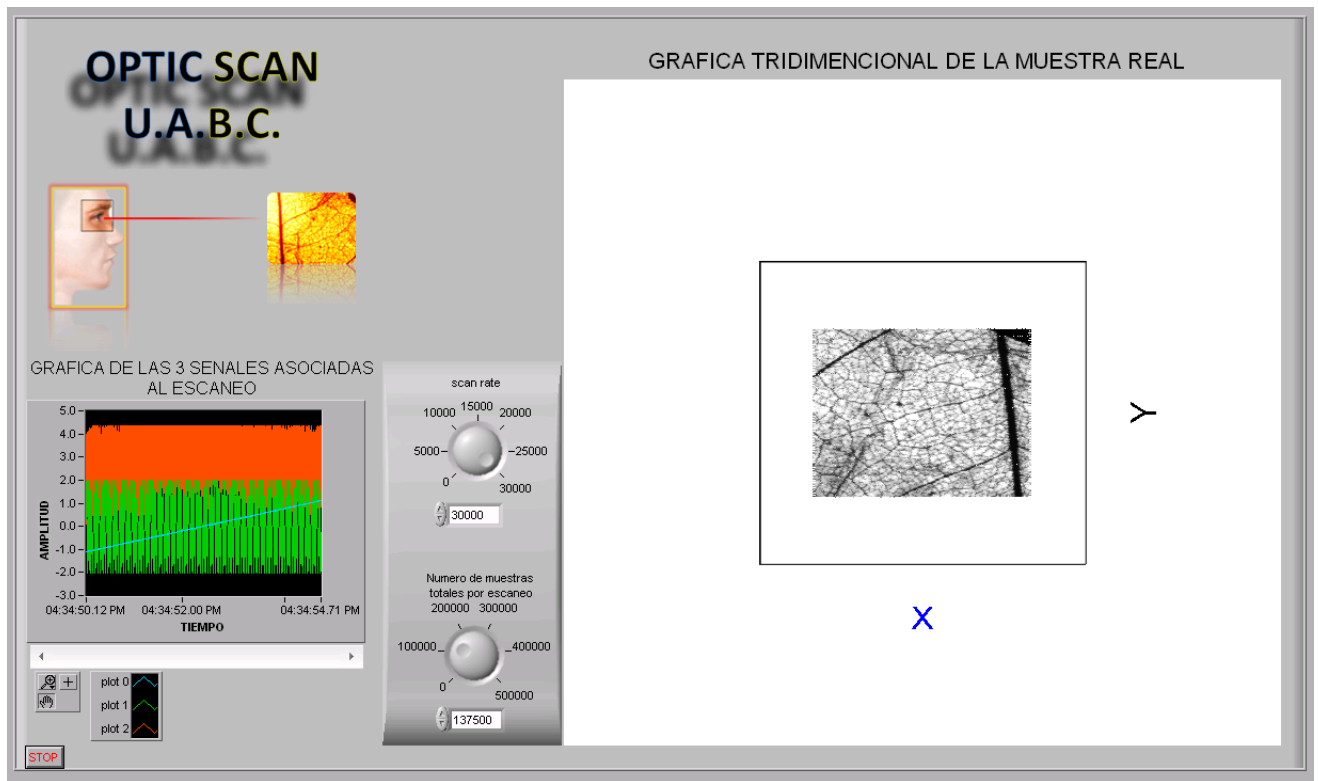


Figura 43: Diagrama a bloques en Laviw para *escaneo "on-line"*.

### III.2.4 Caracterización del instrumento

Es de suma importancia conocer los alcances de algún instrumento que se esté implementando, nuestro caso no es la excepción. Se realizaron pruebas exhaustivas de resolución para conocer las dimensiones de escaneo del instrumento con la finalidad de no tener un sobre muestreo o un muestreo pobre (sub muestreo) de los objetos escaneados. Las pruebas arrojan los resultados que determinan si es conveniente o no escanear un objeto con determinadas dimensiones y características específicas.

#### III.2.4.1 Análisis de resolución

Para obtener la resolución se realizaron los siguientes experimentos.

Se tomó una lamina de aluminio con imperfecciones muy pequeñas (orificios) las cuales se pueden tomar como referencia para determinar la resolución. Al Incidir el haz en

dos orificios muy cercanos y se alcance a resolver (distinguir o diferenciar) la separación entre ellos en la imagen escaneada, se determina la resolución del instrumento midiendo la separación de estos orificios.

En la figura 44 vemos un espejo el cual tiene imperfecciones que no se ven a simple vista, las cuales sirven para determinar la resolución



Figura 44: Espejo con imperfecciones para determinar resolución.

Se encontraron 3 orificios muy cercanos para realizar el experimento, podemos ver en la figura 45 lo que nos arrojo un barrido de una línea horizontal donde se encontraban los puntos cercanos

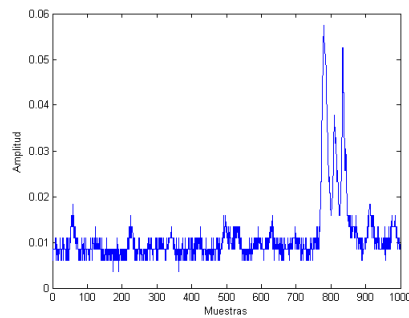


Figura 45: Grafica para determinar resolución.

Para determinar la resolución solo faltaría medir la distancia de entre los puntos cercanos ya que este sería el límite del sistema para resolver un punto muy cercano a otro. No se pudo obtener la resolución del sistema de esta manera debido a que no contábamos con instrumentos que pudieran medir estas dimensiones.

La nitidez de una imagen fotográfica de un sistema o componente del sistema (lentes, el cine, el sensor de imagen, escáner, la ampliación de la lente, etc) se caracteriza por un parámetro de función de transferencia de modulación (MTF), también conocido como respuesta de frecuencia espacial. Esto se puede obtener mediante una tabla de prueba de resolución que trae varios patrones los cuales, en nuestro caso, se escanearon y así se determinara la resolución en una medida estándar, líneas pares por milímetro (lp/mm) o Ciclos por milímetro. En la figura 47 y 49 se muestra que resolución alcanza nuestro sistema (15 lp/mm).

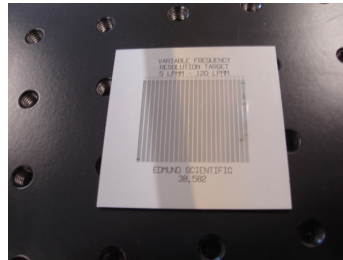


Figura 46: Tarjeta de resolución.

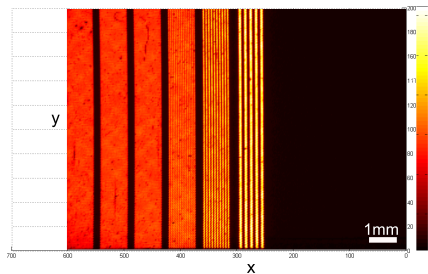


Figura 47: 15 lp/mm.



Figura 48: Tarjeta de resolución.

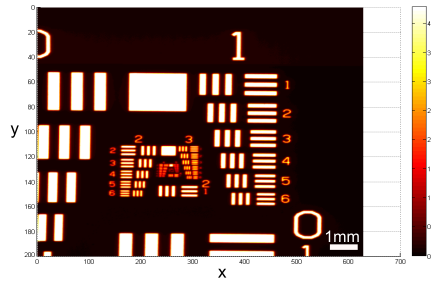


Figura 49: Elemento 3 del grupo 6 (14.30 lp/mm).

### III.2.4.2 Muestreo

Las dimensiones de escaneo están directamente ligadas con los componentes ópticos y las señales entrantes a la tarjeta controladora. El muestreo de las señales debe de ser tal que no se sobre-muestrear o sub-muestrear un objeto determinado y así tener perdidas o datos excesivos en la imagen obtenida mediante el escaneo. En nuestro caso tenemos una dimensión de escaneo de aproximadamente 1.2 cm x 1.2 cm y muestreo de 1000M/s con lo cual obtenemos para el escaneo offline (aproximadamente):

Dimensiones de muestreo horizontal off-line

$$T_t = 120.6s$$

$$S = 201$$

$$T_s = 1000muestras/s$$

Con la ecuación 11 obtenemos:

$$T = (120.6) \left( \frac{2}{201} \right) = 1.2s$$

Con la ecuación 12 obtenemos:

$$T_h = 0.6s$$

$$(0.6s)(1000muestras/s) = 600muestras$$

$$\frac{1.2cm}{600M} = 20\mu m$$

Dimensiones de muestreo horizontal on-line

$$T_t = 5.025s$$

$$S = 201$$

$$T_s = 25000muestras/s$$

Con la ecuación 11 obtenemos:

$$T = (5.025) \left( \frac{2}{201} \right) = 0.05s$$

Con la ecuación 12 obtenemos:

$$T_h = 0.025s$$

$$(0.025s)(25000muestras/s) = 625muestras$$

$$\frac{1.2cm}{625M} = 19.2\mu m$$

Dimensiones de muestreo en vertical para los dos tipos de escaneo.

$$\frac{1.2cm}{201M} = 60\mu m$$

Se tienen diferentes dimensiones de escaneo en horizontal y vertical al tener un haz en forma de elipse y no uno en forma circular.

### III.2.4.3 Tiempo de escaneo

El tiempo total de escaneo  $T_t$  se obtiene, como anteriormente se dijo, con la ecuación 11.

# Capítulo IV

## Resultados

### IV.1 Introducción

En el capítulo anterior y basándonos en los aspectos teóricos mencionados, se ha estudiado el diseño, implementación y acondicionamiento de un instrumento de escaneo óptico en tiempo real. Se ha dado particular atención al análisis de la resolución del instrumento, debido a que la importancia de este parámetro es muy relevante al definir los alcances del instrumento.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos plasmados en algunas figuras las cuales contienen ciertas características particulares, lo que hace que su estudio sea algo interesante. Las limitaciones de este instrumento están íntimamente ligadas con las superficies bajo análisis. El capítulo está estructurado en cinco secciones que en conjunto definen los resultados obtenidos. La segunda sección describe los resultados experimentales para un escaneo "off-line". La cuarta sección, describe los resultados experimentales para un escaneo "on-line".

### IV.2 Resultados experimentales para un escaneo "off-line"

La obtención de imágenes mediante un escaneo es el objetivo principal de este proyecto. El "primer paso" es, realizar un escaneo correcto con el tipo de señales anteriormente vistas

(figuras 33a y 33b), adquirir estas dos señales con la tarjeta de adquisición de datos y graficar ambas señales. La figura 50 muestra la gráfica resultante del primer experimento de esta naturaleza, esta gráfica se construyó mediante dos señales, una señal escalonada continua de 51 saltos con amplitud de  $-0.4V$  a  $0.8V$  y periodo de  $2.55s$ , y una señal triangular continua de  $-0.4V$  a  $0.4V$  con un periodo de  $0.1s$ . La tasa de muestreo que se utilizó fue de  $1000 M/s$

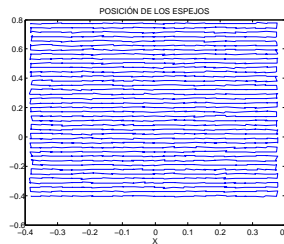


Figura 50: Gráfica de la posición de los espejos.

#### IV.2.1 Pruebas de escaneo

En la figura 51 podemos ver la primera imagen obtenida en forma de gráfica (con la información del láser incluida), la cual no es una imagen bien definida de la muestra real (figura 52, cara feliz) puesto que en esta etapa del proyecto se hacen pruebas y ajustes a todos los dispositivos que se utilizan.

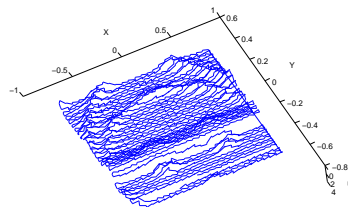


Figura 51: Primera imagen escaneada (  $1000 M/s$  en  $2.5s$  con 51 puntos).

En la figura 53 podemos observar que la gráfica muestra una mejor representación de la muestra real comparada con la figura 51, esto se debe a que los elementos ópticos en la



Figura 52: Muestra real.

figura 53 tienen una mejor alineación y las señales de control para los espejos tienen una mejor sincronización.

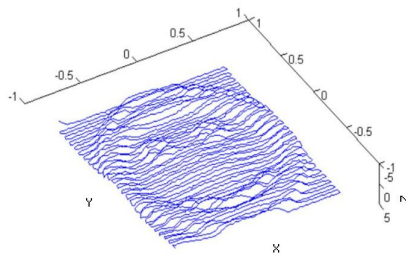


Figura 53: 1000 M/s en 2.5s con 51 puntos.

En la figura 54 se observa un cambio en la adquisición, las amplitudes de las señales entrantes a la tarjeta controladora y los puntos de la señal escalonada muestran escalas diferentes, esto con el fin de aumentar las líneas de escaneo que construyen la imagen.

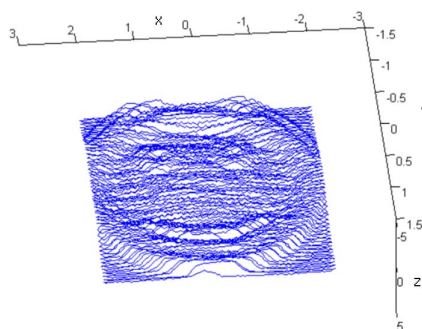


Figura 54: 4000 M/s en 2.5s escalonada 101.

Una de las pruebas finales en cuanto a representación como gráfica de las muestras reales se refiere está plasmada en la figura 55

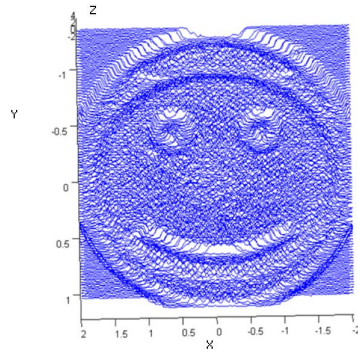


Figura 55: 4000 M/s en 40s escalonada 201.

Para ver la evolución de adquisición de las imágenes, a continuación se presenta una serie de figuras con forme al avance del proyecto y sus mejoras.

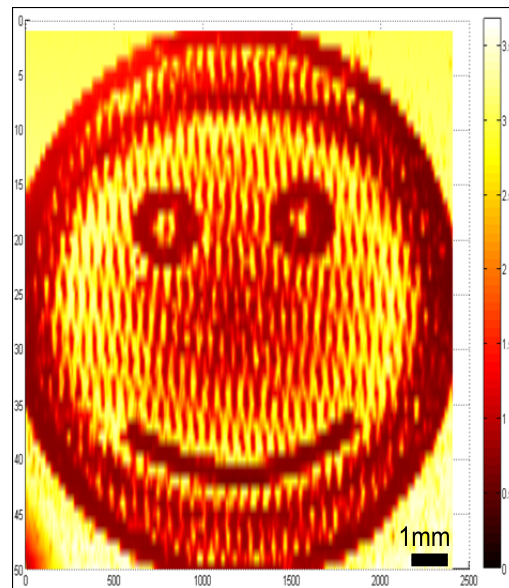


Figura 56: 1000 M/s en 122s escalonada 51.

Como podemos observar en la figura 56 ya se tiene una imagen escaneada y no una grafica (figura 55) con algunos rasgos parecidos a los de la muestra real de la figura 52, sin embargo esta imagen no nos muestra a detalle las características y rasgos particulares de la muestra real, esto se debe a que se tienen muy pocos saltos horizontales por lo que se pierde mucha información a la hora de adquirir los datos, lo que nos arroja una imagen sub-muestreada

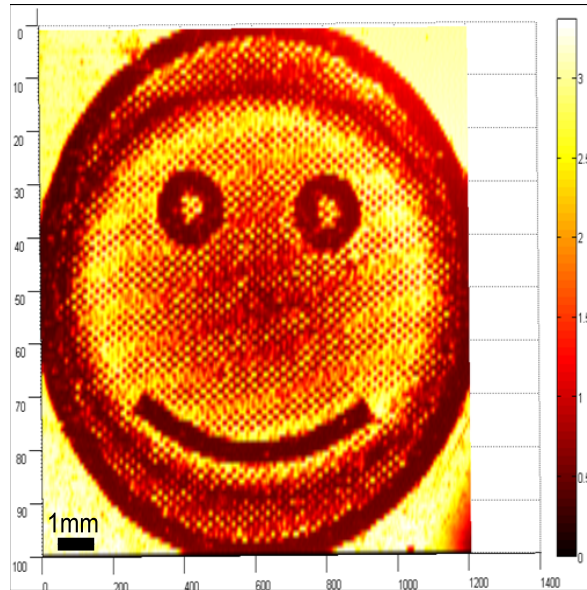


Figura 57: 1000 M/s en 120s escalonada 101.

Al aumentar a 101 los saltos horizontales, como se aprecia en la figura 57, se puede mejorar la imagen escaneada pero todavía se obtiene una imagen pobre.

Si aumentamos los saltos a 201 y disminuimos un poco el tiempo de 120s a 60s como se ve en la figura 58, podemos obtener una imagen más detallada.

Para lograr una imagen aun con más detalle, se aumento el tiempo de nueva cuenta a 120s y los saltos se aumentaron a 201 como lo podemos observar en la figura 59.

En la figura 60 se aumento a 501 saltos con un  $T_t = 120s$  lo con 1000 M/s, lo que ocasiona que se realice el barrido horizontal de manera más rápida. Como consecuencia de lo anterior se tiene un intervalo de adquisición en horizontal cada 62 micras y de 30 micras en vertical (lo cual empobrece la adquisición de datos en horizontal).

Se realizó una prueba aumentando las muestras por segundo para obtener así un intervalo de adquisición en horizontal parecido al vertical (horizontal 25 micras, vertical 30 micras ver figura 61).

Los resultados arrojan una imagen sobre-muestreada con deficiencia de nitidez, lo que

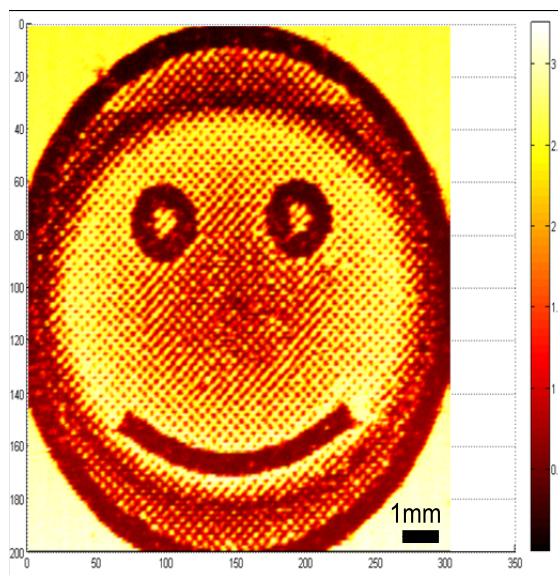


Figura 58: 1000 M/s en 60s escalonada 201.

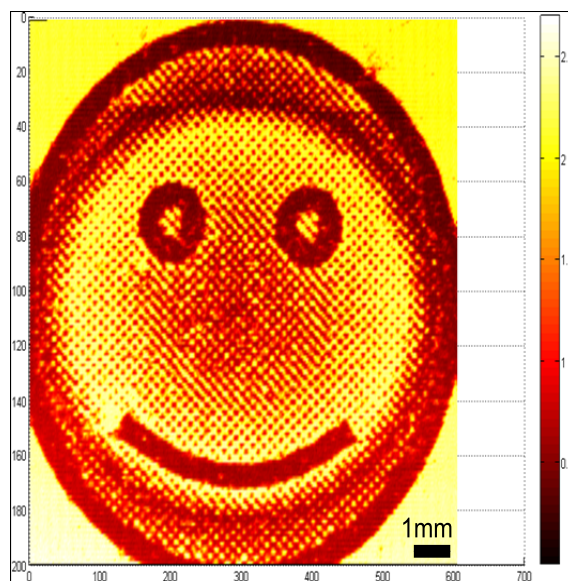


Figura 59: 1000 M/s en 120s escalonada 201.

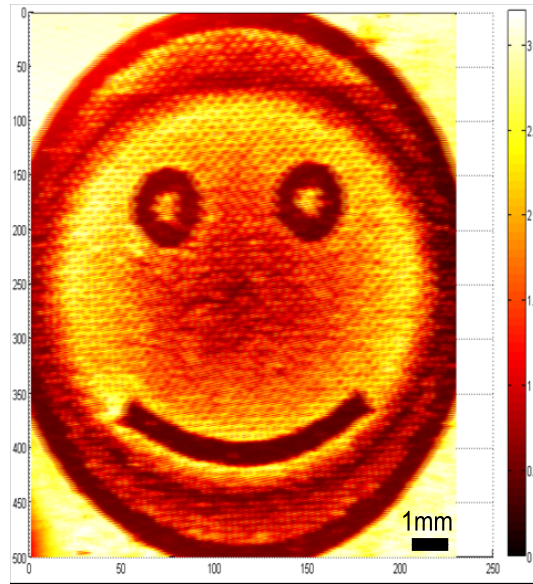


Figura 60: 1000 M/s en 120s escalonada 501.

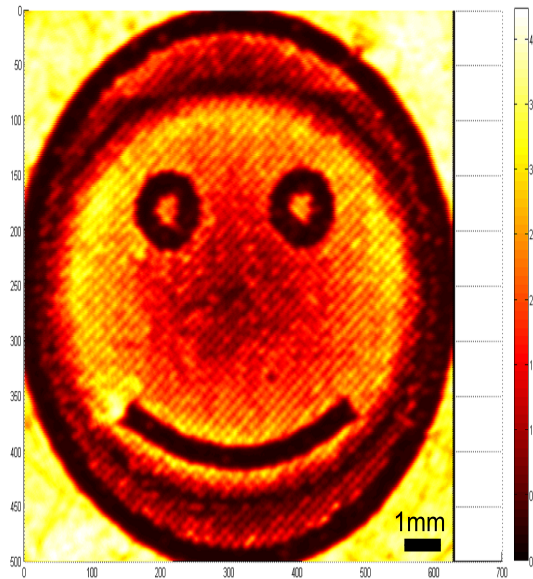


Figura 61: 2500 M/s en 125.25s, escalonada 501.

denota un haz en forma de elipse.

Se desarrollaron algunas pruebas cambiando el punto focal en el objeto para ver la difracción que sufren y que tanto se distorsionan las imágenes. Este experimento se puede ver en las figuras 63 y 64



Figura 62: Muestra real.

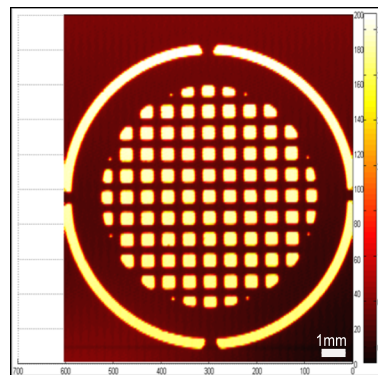


Figura 63: Imagen con el punto focal en el objeto(1000 M/s en 120s escalonada 201.

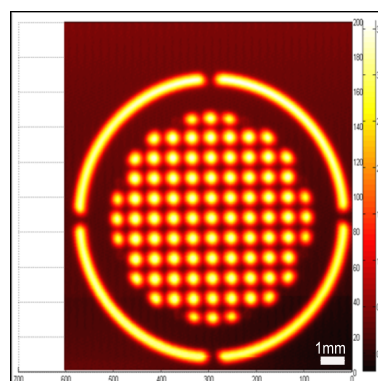


Figura 64: Imagen con punto focal fuera del objeto (1000 M/s en 120s escalonada 201.

Como recopilación de resultados experimentales finales para un escaneo "off-line" se presenta una serie de imágenes las cuales son de particular importancia debido a que cuentan

con características muy particulares y especiales, las cuales hacen que el estudio de estas sea algo interesante. Se puede ver con gran detalle estas características en las siguientes figuras.

En la figura 65 se puede apreciar la muestra real que posteriormente es escaneada (figura 66). En esta imagen (figura 66) se identifican claramente los cambios de profundidad de la muestra real.



Figura 65: Muestra real.

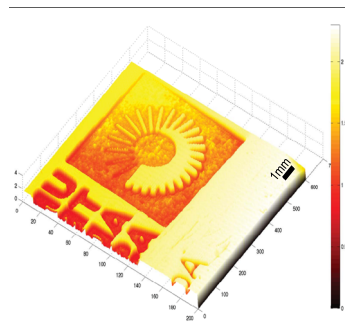


Figura 66: 1000 M/s en 120s escalonada 201.

En la figura 69 se puede ver una imagen escaneada de una hoja dentro de una bolsa de plástico (figura 67 y 68), lo que hace del estudio de esta imagen algo muy interesante debido a que el punto focal está directamente en la hoja y no en la bolsa de plástico, además, se obtiene una réplica que representa con gran precisión cada una de las venas de la hoja, que muy bien se asemejan a venas o arterias humanas.

En la figura 72 se muestra la imagen de una huella digital resultado de un escaneo de la muestra real de la figura 71.

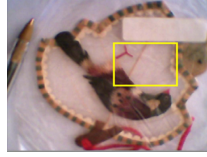


Figura 67: Muestra real.



Figura 68: Hacercamiento de la muestra real.

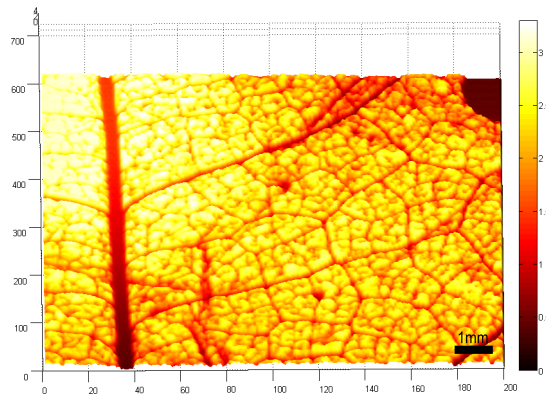


Figura 69: 1000 M/s en 120s escalonada 201.

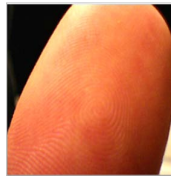


Figura 70: Muestra real.

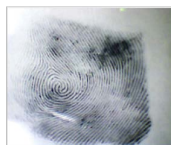


Figura 71: Muestra real.

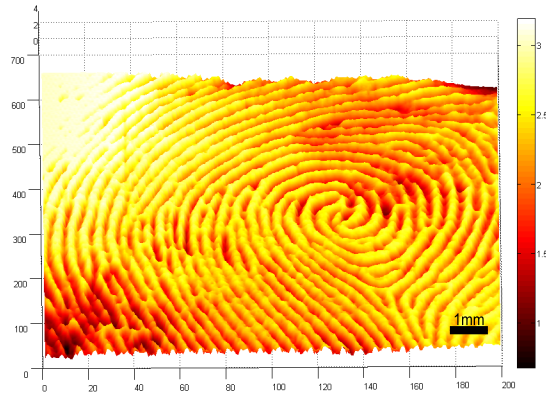


Figura 72: 1000 M/s en 120s escalonada 201.

## IV.2.2 Discusión de resultados "off-line"

Se presentan en la sección de resultados experimentales para un escaneo "off-line" diferentes figuras las cuales son una representación de los experimentos realizados en esta etapa del proyecto. Se puede corroborar, por el trabajo realizado, que este sistema obtiene imágenes de objetos de dimensiones pequeñas (1.2 cm x 1.2 cm) las cuales ayudan en el estudio detallado de los objetos escaneados dentro de las limitaciones del sistema.

## IV.3 Resultados experimentales para un escaneo "on-line"

Como ya vimos en el apartado III.2.3.3, se utilizó el software de Labview para programar el sistema de escaneo "on-line". En la programación empleada para este sistema (figuras 42 y 43) se muestran diferentes controladores los cuales sirven para determinar la tasa de muestreo, número de muestras totales a desplegar en la pantalla, algunos botones para las propiedades de edición de la gráfica bidimensional de las tres señales escaneadas y la gráfica del objeto escaneado.

Con este sistema se realizaron experimentos de escaneo en reflexión como se muestra

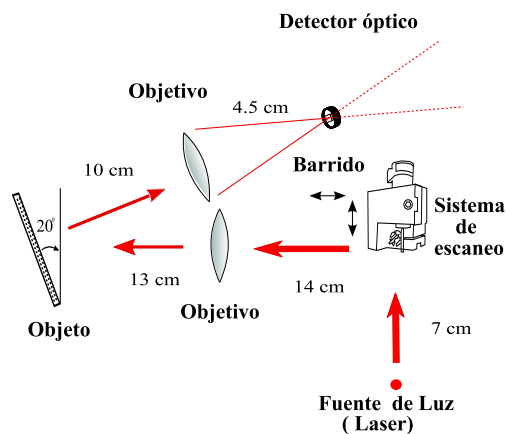


Figura 73: reflexión 20 grados.

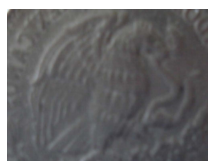


Figura 74: Muestra real de la moneda.

en la figura 73 y 78 (debido a que en este sistema no se implementó el almacenamiento de imágenes, las imágenes mostradas en esta sección son obtenidas mediante el sistema de escaneo "off-line").

En la figura 74 se puede observar la imagen escaneada de una moneda por medio de reflexión. En las figura 77 y 79 se pueden ver imágenes escaneadas con diferentes ángulos de reflexión, esto genera una sombra debido a que al reflejarse internamente el haz hay puntos donde el substrato de aluminio obstruye el paso de la reflexión interna del mismo haz. Esta sombra se acentúa más al mover el ángulo de reflexión.

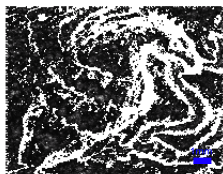


Figura 75: Moneda imagen on-line reflexión 20 grados.

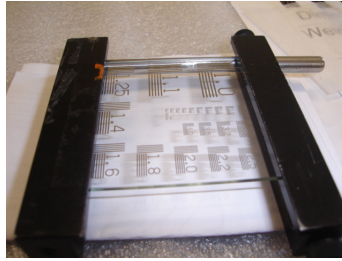


Figura 76: Muestra real tarjeta de resolución.

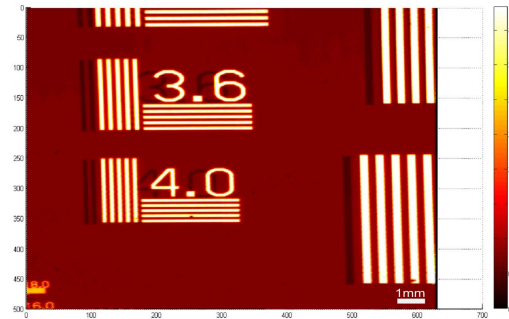


Figura 77: reflexión 20 grados.

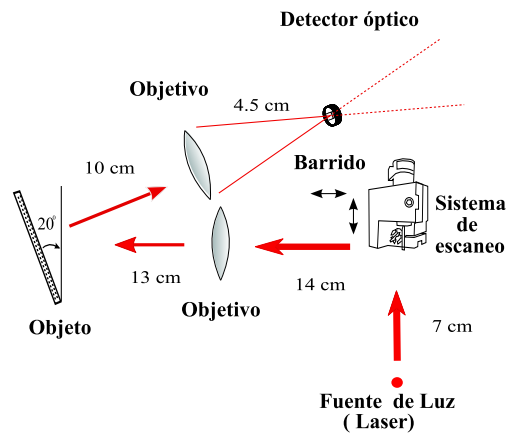


Figura 78: reflexión 40 grados.

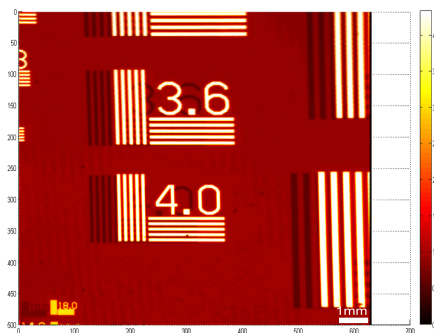


Figura 79: reflexión 40 grados.

### **IV.3.1 Discusión de resultados ”on-line**

Dentro de las ventajas a destacar de este sistema se encuentra una de las principales, que es, tener un escaneo en ”tiempo real”. Esta ventaja nos permite cambiar la muestra por otra y visualizar su imagen escaneada en la pantalla en unos pocos segundos sin tener que hacer un posterior procesado de los datos escaneados. Se realizaron escaneos en reflexión, lo cual nos indica que este sistema puede modificarse conforme a las necesidades requeridas.

# Capítulo V

## Conclusiones

### V.1 Introducción

En este trabajo de tesis se diseñó, acondicionó e implementó un sistema de escaneo óptico puntual para la obtención de imágenes tridimensionales, lo cual tiene una gama enorme de aplicaciones en un sinnúmero de áreas de investigación y de aplicaciones industriales. Se abordó, en primera instancia, el estudio de los dispositivos y elementos para la implementación de este sistema, posteriormente se realizó la integración de estos dispositivos y elementos.

Se obtuvieron muy buenos resultados al obtener imágenes de gran calidad y con una resolución relativamente alta lo cual nos da la posibilidad de seguir innovando en este tipo de dispositivos.

Se utilizó el programa Matlab para el procesamiento y adquisición de los datos. Se realizaron programas los cuales permiten hacer el procesamiento y despliegue de la información en unos cuantos segundos.

Como una de las conclusiones más importantes que se tiene es que este tipo de dispositivos, que ahora están en el mercado, son demasiado caros y no se construyen en nuestro país, por lo que su implementación es una innovación muy importante en cuanto a la obtención de imágenes con luz coherente.

## V.2 Aportaciones

- Se diseño e implemento un sistema de escaneo óptico puntual para la obtención de imágenes tridimensionales off-line(“pos-procesado”)
- El aporte mas significativo de este trabajo se ve reflejado en la adquisición de los datos junto con su visualización, todo esto on-line (“tiempo real”)

## V.3 Trabajos a futuro

- Realizar otros experimentos con diferentes dispositivos ópticos para mejorar la resolución.
- Utilizar nuevos elementos que permitan sustituir a algunos dispositivos como son el AFG3252 y la NI-DAQ PCI-6024E entre otros.
- Realizar un estudio de modelos más recientes de los galvanómetros y la tarjeta controladora e implementar su uso en este sistema.
- Realizar un estudio de software recientes y de mayor capacidad de procesamiento e implementar su uso en este sistema.

# Bibliografía

[1] A F Fercher, Optical coherence tomography—principles and Applications (Institute of Medical Physics, University of Vienna, Wien, Austria, 2003).

[2] Sean C. Crosby, Optical Coherence Tomography (University of Melbourne, Australia, 2003).

[3] Brezinski Mark, [2006], "Optical Coherente Tomography Principles and Aplications", 1era. ed., Academia Press, U.S.A., 656. ISBN; 0-12-133570-4.

[4] Bouma Brett E., Guillermo J. Tearney, [2002], " Hand Book of Optical Coherente Tomography", 1era. ed., Impreso en los Estados Unidos de America, 784. ISBN; 0-8247-0558-0.

[5] Manual SigLab version 2.13,[1996], "Manual SigLab version 2.13", version 2.13, Technology inc. Signal análisis group, Impreso en los Estados Unidos de America,250.

[6] Hetch Eugene, [2000], "Optica", 3era. Ed., Pearson Educación S.A., Madrid España, 28042. ISBN; 84-7829-025-7.

[7] Hetch Zajac, [1986], "Optica", Addison-Wesley Iberoamericana, S.A. U.S.A., ISBN; 0-201-02839-5.

[8] Edmund Optics, [2007], "Optics and Optical Instruments Catalog", 101 East Gloucester Pike, Barrington, NJ U.S.A., NO78A.

- [9] ThorLabs, [2007], "Tools of the Trade" , 435 Route 206, N.J. U.S.A., Volumen 19.
- [10] A F Fercher, W Drexler, C K Hitzenberger and T Lasser, "Optical coherence tomography—principles and applications", Published 20 January 2003, Artículo de la INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING.
- [11] Sean C. Crosby, Associate Professor Ann Roberts, "Optical coherence tomography" , 2003, Tesis.
- [12] Dorian Kermisch, "Principle of equivalence between scanning and conventional optical imaging systems", 19 Julio de 1977, Articulo de la Optical Society of America.
- [13] "Multiphoton system scans deep and fast" , Artículo de la Biophotonics Internacional, Diciembre 2007.
- [14] "Getting up to speed with mirrors" , Artículo de la Biophotonics Internacional, Mayo 2007.
- [15] "Getting a better look at the most common cancer" , Artículo de la Biophotonics Internacional, Agosto 2004.
- [16] "Getting the Whole-body picture" , Artículo de la Biophotonics Internacional, Junio 2005.

# Apéndice A

## A.1 Código de programas en Matlab

### A.1.1 Código para adquisición de datos

```
ai = analoginput('nidaq',1);
chan = addchannel(ai,1);
chan = addchannel(ai,0);
chan = addchannel(ai,3);
duration =121;
set(ai,'SampleRate',1000)
ActualRate = get(ai,'SampleRate');
set(ai,'SamplesPerTrigger',ActualRate*duration)
set(ai,'TriggerChannel',chan)
set(ai,'TriggerType','Software')
set(ai,'TriggerCondition','Rising')
set(ai,'TriggerConditionValue',-1.2)
chan = addchannel(ai,0);
chan = addchannel(ai,3);
start(ai)
[data,time] = getdata(ai,120000);
remsamp = num2str(ai.SamplesAvailable);
disp(['Number of samples remaining in engine: ', remsamp])
figure
plot(time,data)
drawnow
```

```

xlabel('Time (sec.)')
ylabel('Signal Level (Volts)')
waittilstop(ai,15)
delete(ai)
clear ai

```

### A.1.2 Código para el procesado y despliegue de datos

```

load '120yo3.mat';
data1=data(1:1:120000);
time=[1:1:120000];
data2=data(1:120000,2)';
data3=data(1:120000,4)';
figure
plot(data1,data2)
figure
plot(time,data1)
figure
plot(time,data2)
figure
plot(time,data3)
figure
plot3(data1,data2,data3)
dataz=zeros(600,199);
x=-1;
d=0;
o=(length(data2)/200)+100
for i=2:o
if((data2(i-1)/data2(i))>1.008)
d=i;

```

```
end

end

d2=(length(data2)/200)-d+1
if d2==0
data4=data3;
elseif d2>0
for i=1:(length(data2)+d2)
if d2>=i
data4(i)=0;
else
data4(i)=data3(i-d2);
end
end
else d2<0
for i=1:(length(data2))
if length(data2)+d2>=i
data4(i)=data3(i-d2);
end
if i>length(data2)+d2
data4(i)=0;
end
end
end
for j=1:(199)
x=x+1;
if (mod(j,2))==0
s=0;
for i=604:-1:1
s=s+1 ;
```

```
dataz(i,j)=data4(s+x*600);  
end  
end  
if (mod(j,2)==1)  
for i=1:(604)  
dataz(i,j)=data4(i+x*600);  
end  
end  
end  
datax=1:1:199;  
datay=1:1:604;  
figure  
surf(datax,datay,dataz)  
shading interp  
colormap(hot)  
colorbar
```

## A.2 Otras figuras en forma de gráfica

Es interesante ver los datos en forma de graficas porque de esta manera se definen las líneas de va y ven del barrido.



Figura 80: Muestra real.

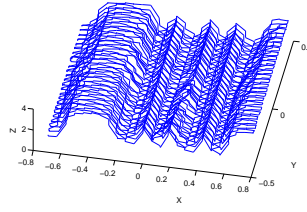


Figura 81: 1000 M/s en 2.5s escalonada 51.

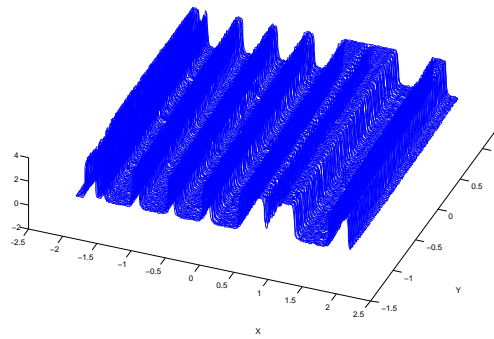


Figura 82: 1000 M/s en 120s escalonada 201.



Figura 83: Muestra real.

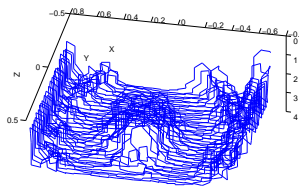


Figura 84: 1000 M/s en 2.5s escalonada 51.

### A.3 Otras figuras en forma de imagen

En esta sección se muestran algunas pruebas de escaneo plasmadas en forma de imágenes que se realizaron a objetos con diferentes características.



Figura 85: Muestra real.



Figura 86: Muestra real.

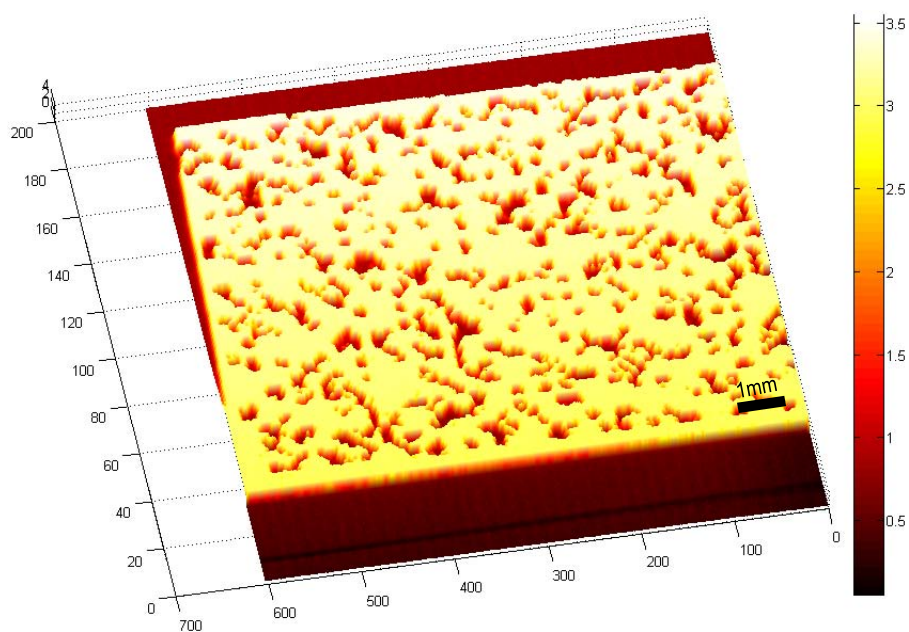


Figura 87: 1000 M/s en 120s escalonada 201.



Figura 88: Muestra real.

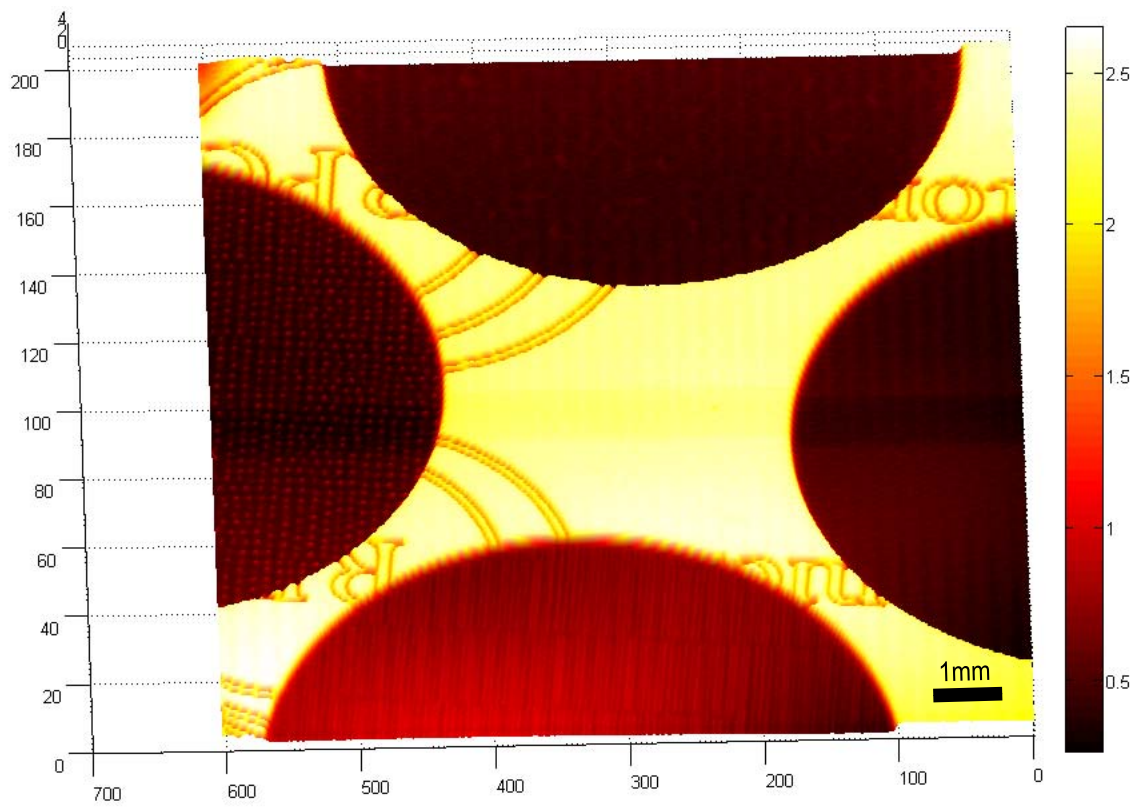


Figura 89: 1000 M/s en 120s escalonada 201.



Figura 90: Muestra real.

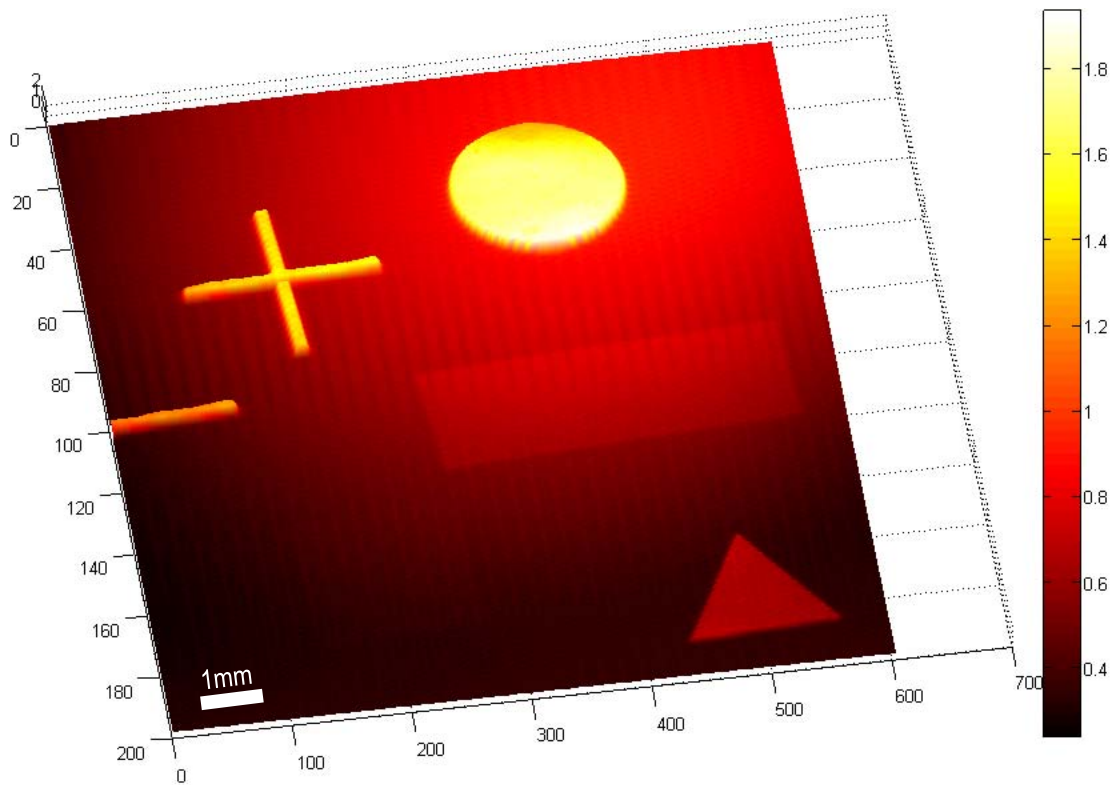


Figura 91: 1000 M/s en 120s escalonada 201.



Figura 92: Muestra real.

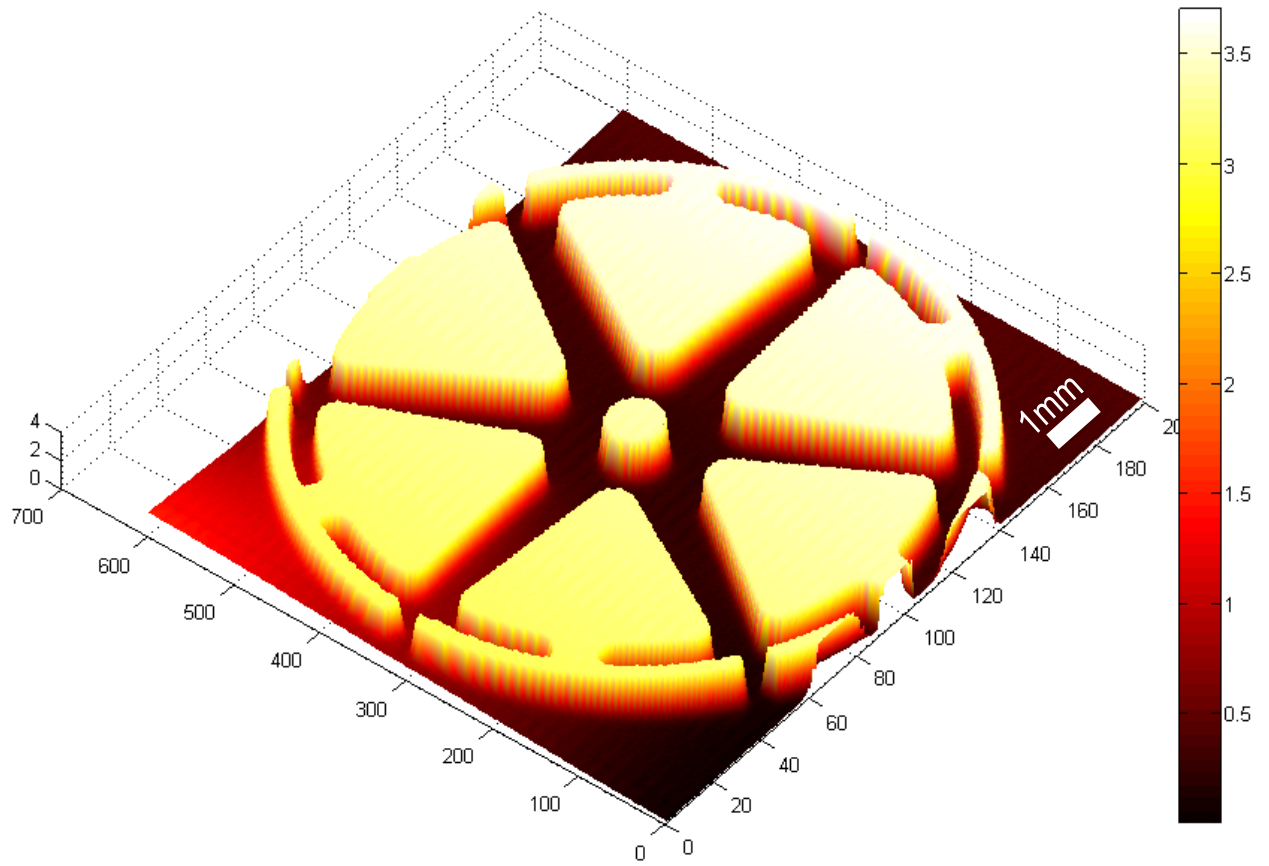


Figura 93: 1000 M/s en 120s escalonada 201.



Figura 94: Muestra real.

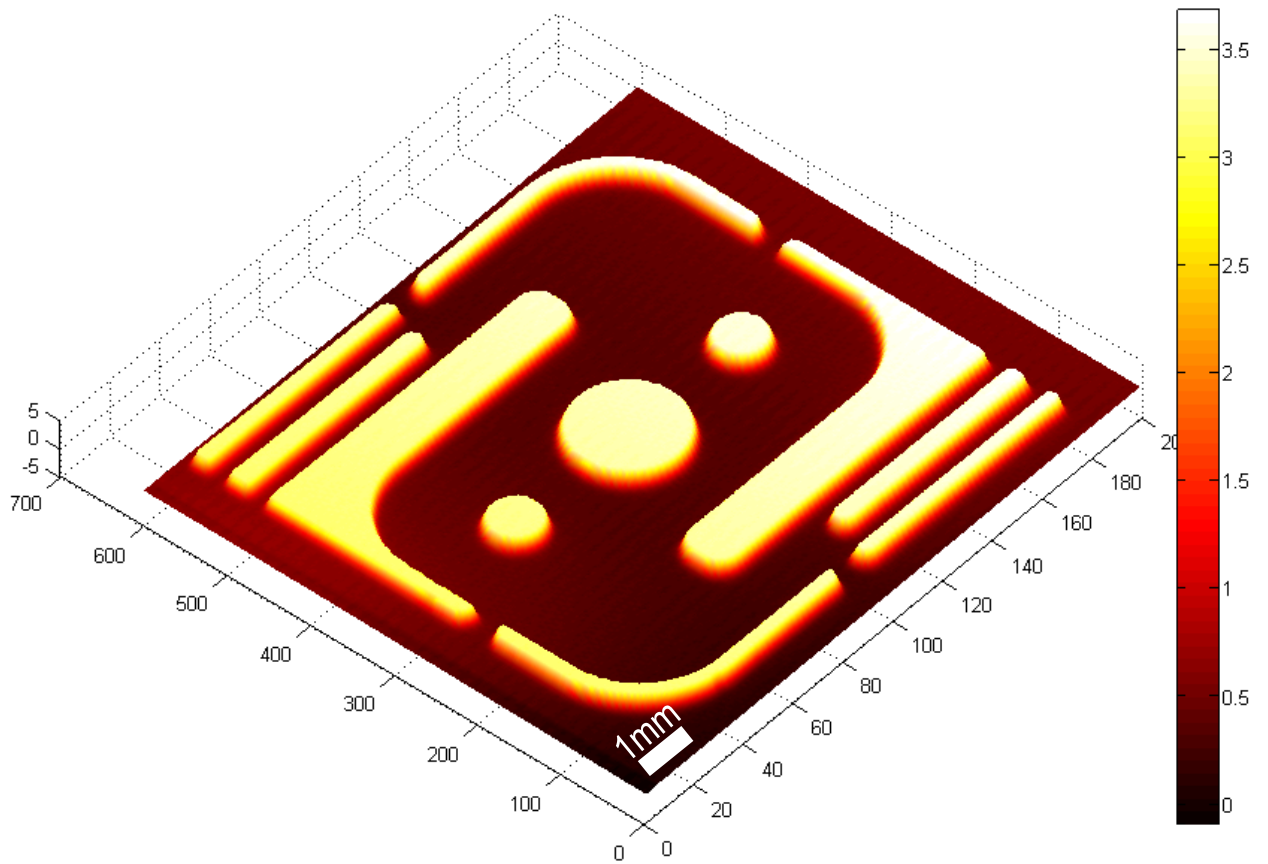


Figura 95: 1000 M/s en 120s escalonada 201.



Figura 96: Muestra real.

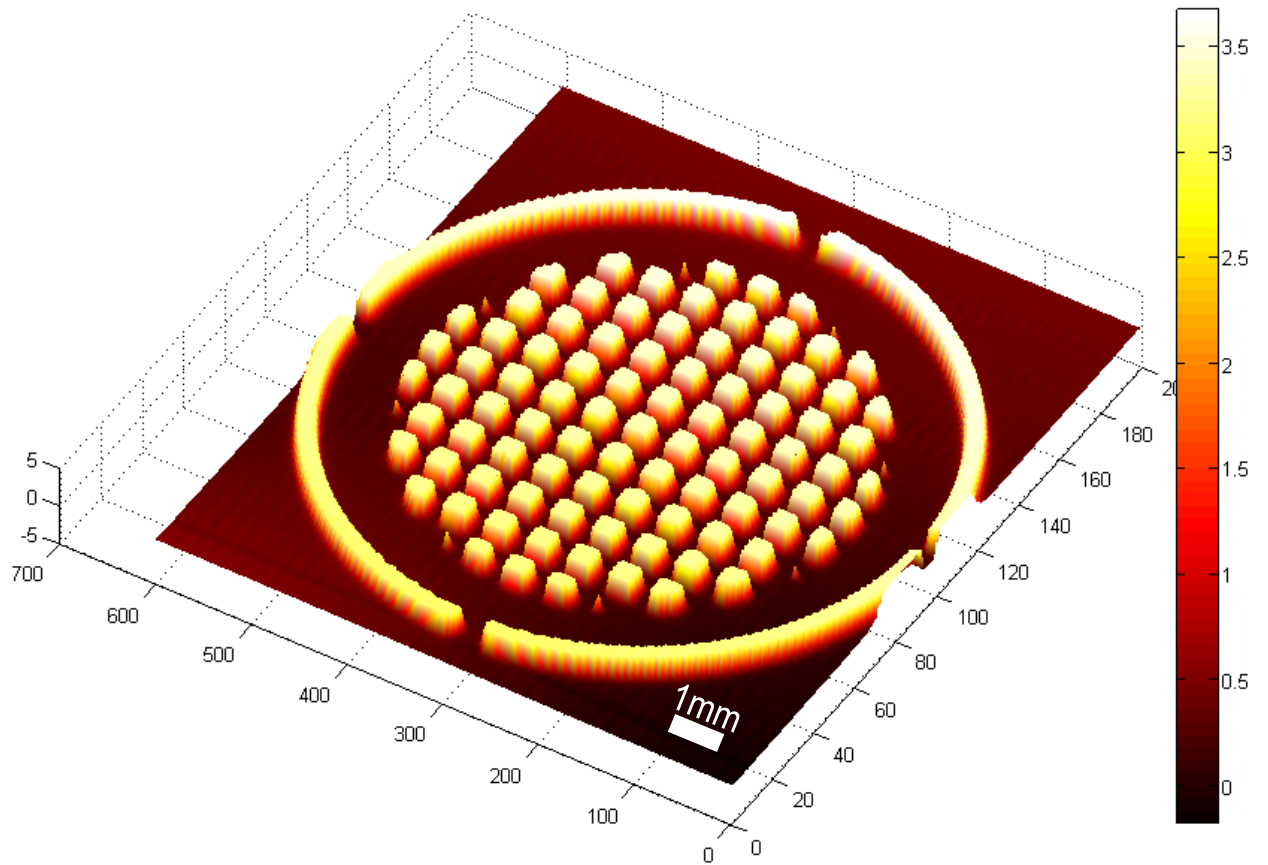


Figura 97: 1000 M/s en 120s escalonada 201.



Figura 98: Muestra real.

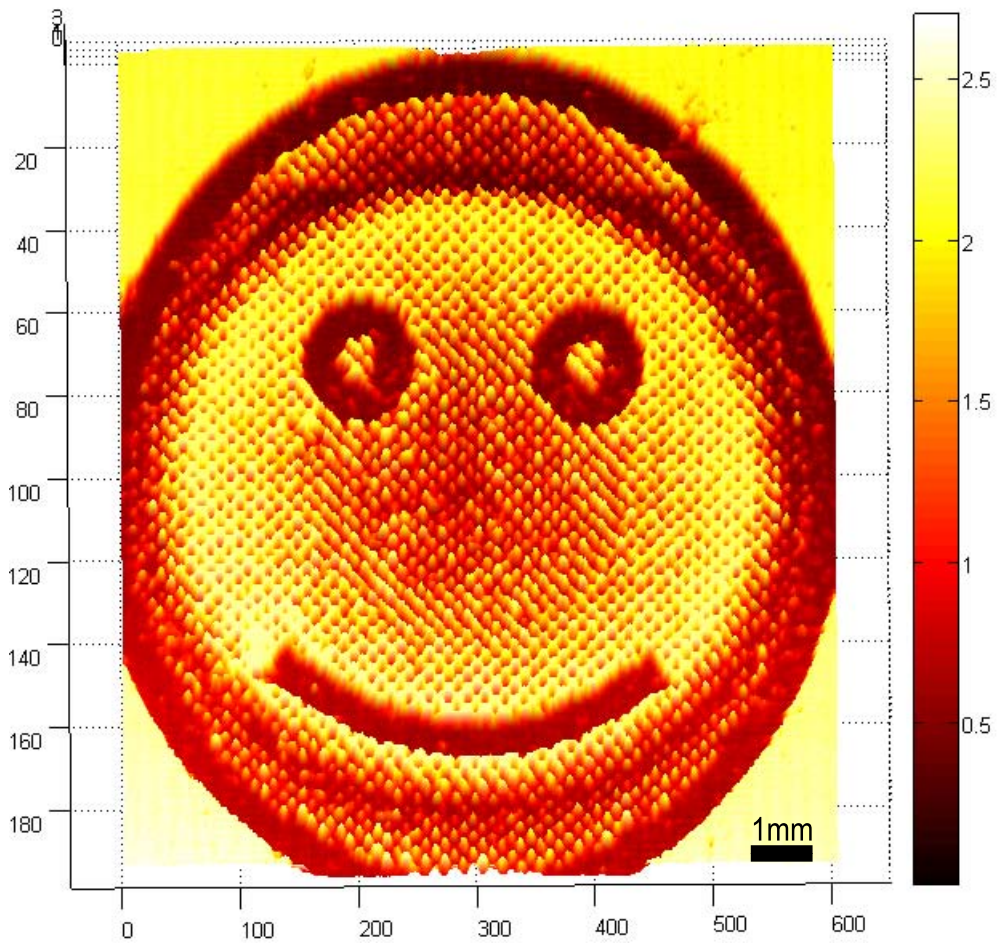


Figura 99: 1000 M/s en 120s escalonada 201.



Figura 100: Muestra real.

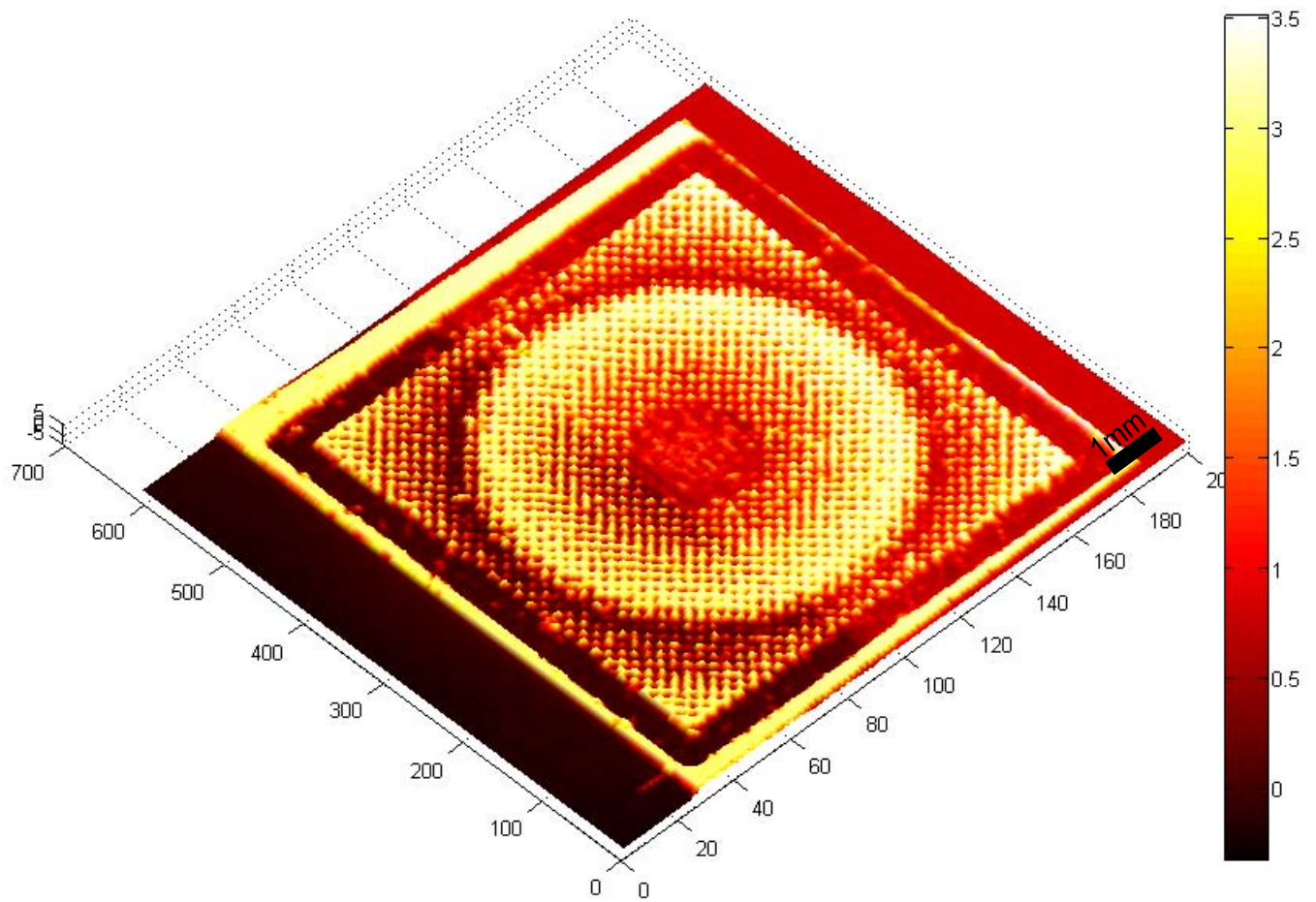


Figura 101: 1000 M/s en 120s escalonada 201.

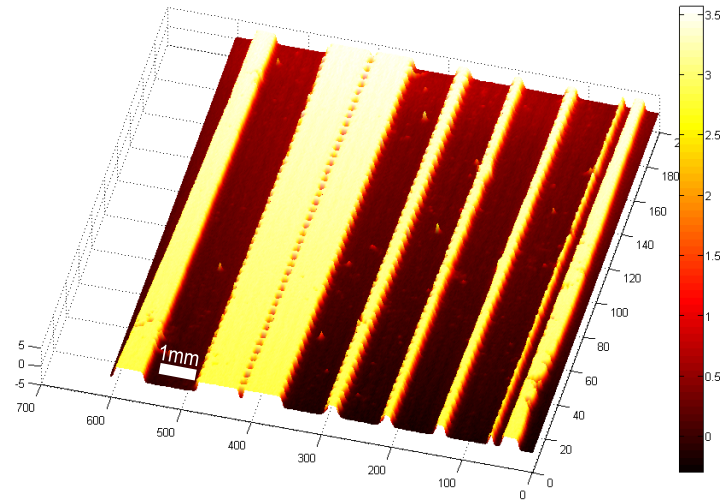


Figura 102: 1000 M/s en 120s escalonada 201.

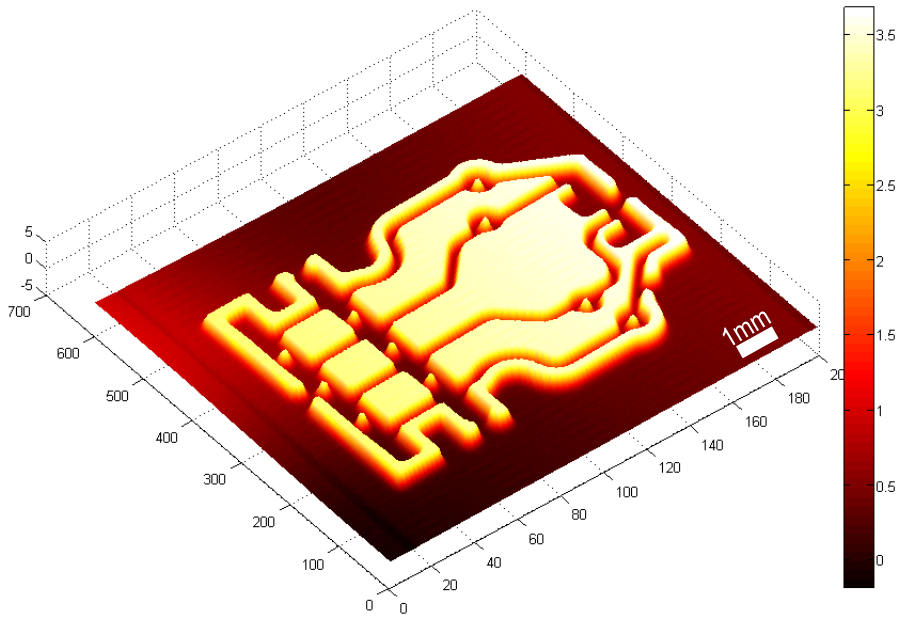


Figura 103: 1000 M/s en 120s escalonada 201.

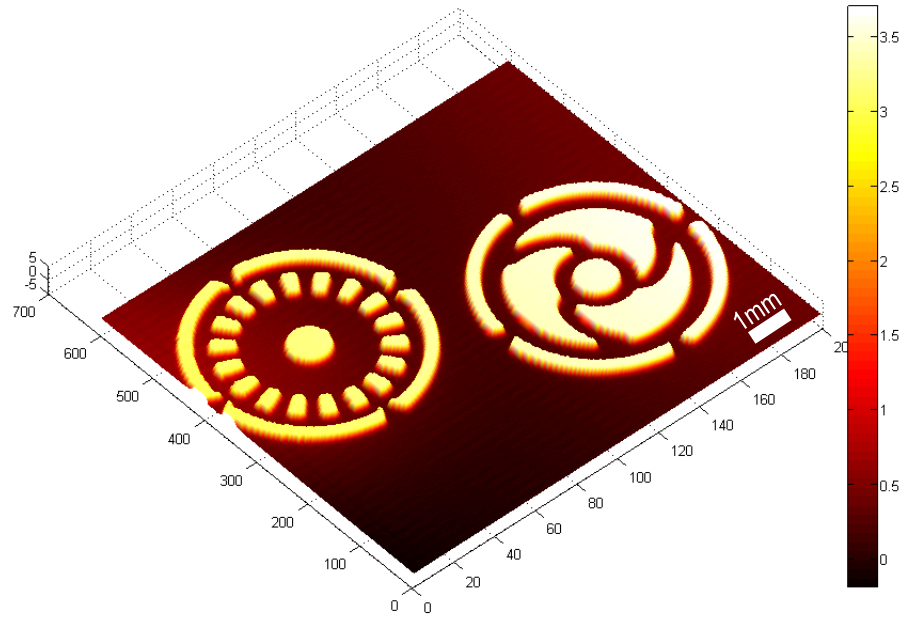
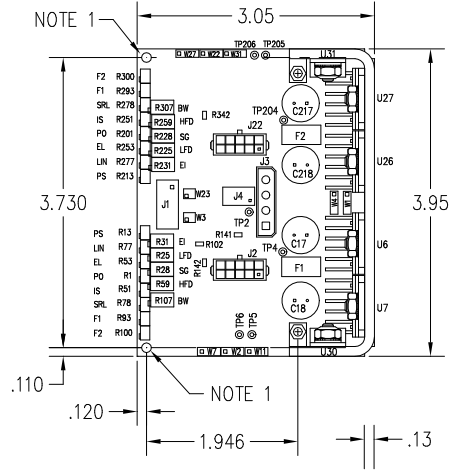


Figura 104: 1000 M/s en 120s escalonada 201.

## A.4 Especificaciones de la tarjeta controladora y los galvanómetros

Las especificaciones que se tomaron en cuenta para realizar este proyecto se encuentran en esta sección. Estas especificaciones están en forma de tablas sacadas directamente del fabricante.

Pin #	Signal Name	Voltage Range
1	+Supply Voltage	+15VDC to +18VDC or +18VDC to +30VDC
2	+Supply Voltage Return	GND (Common)
3	-Supply Voltage Return	GND (Common)
4	-Supply Voltage	-15VDC to -18VDC or -18VDC to -30VDC



JUMPER CONFIGURATION

JUMPER	INPUT SELECTOR:	JUMPER SETTING	INPUTS, J1 +*/N (-*/N GND)
W1	+/-15V TO +/-18V	1-2	N/A
	+/-18V TO +/-30V	2-3	N/A
W3	X NON-INVERTING, DIFFERENTIAL SCANNER ROTATES CW FOR J1-6 HIGHER THAN J1-5	1-2, 3-4	J1-6, J1-5 *
	X INVERTING, DIFFERENTIAL SCANNER ROTATES CCW FOR J1-6 HIGHER THAN J1-5	1-3, 2-4	J1-6, J1-5 *
	NON-INVERTING, SINGLE-ENDED	1-2, 3-4	J1-6, J1-5 *
	INVERTING, SINGLE-ENDED	1-3, 2-4	J1-6, J1-5 *
W23	Y NON-INVERTING, DIFFERENTIAL SCANNER ROTATES CW FOR J1-2 HIGHER THAN J1-1	1-2, 3-4	J1-2, J1-1 *
	Y INVERTING, DIFFERENTIAL SCANNER ROTATES CCW FOR J1-2 HIGHER THAN J1-1	1-3, 2-4	J1-2, J1-1 *
	NON-INVERTING, SINGLE-ENDED	1-2, 3-4	J1-2, J1-1 *
	INVERTING, SINGLE-ENDED	1-3, 2-4	J1-2, J1-1 *
W11	X MIRROR ALIGNMENT MODE	1-2	N/A
	X NORMAL MODE	2-3	N/A
W31	Y MIRROR ALIGNMENT MODE	1-2	N/A
	Y NORMAL MODE	2-3	N/A
W4	+/-15V TO +/-18V	1-2	N/A
	+/-18V TO +/-30V	2-3	N/A
R102	X SRL ENABLED	OUT	N/A
	X SRL DISABLED	IN	N/A
R140	X SRL ENABLED	OUT	N/A
	X SRL DISABLED	IN	N/A
R141	X SRL ENABLED	IN	N/A
	X SRL DISABLED	OUT	N/A
R142	X CLASS 0	IN	N/A
	X CLASS 1	OUT	N/A
R143	X CLASS 0	OUT	N/A
	X CLASS 1	IN	N/A
R144	X CLASS 0	IN	N/A
	X CLASS 1	OUT	N/A
R302	Y SRL ENABLED	OUT	N/A
	Y SRL DISABLED	IN	N/A
R340	Y SRL ENABLED	OUT	N/A
	Y SRL DISABLED	IN	N/A
R341	Y SRL ENABLED	IN	N/A
	Y SRL DISABLED	OUT	N/A
R342	Y CLASS 0	IN	N/A
	Y CLASS 1	OUT	N/A
R343	Y CLASS 0	OUT	N/A
	Y CLASS 1	IN	N/A
R344	Y CLASS 0	IN	N/A
	Y CLASS 1	OUT	N/A

TUNING TRIM POTS FUNCTION

TRIM	FUNCTION
R1 (R201)	POS. OFFSET (PO) X(Y)
R13 (R213)	POS. SCALE FACTOR (PS) X(Y)
R25 (R225)	LOW FREQ. DAMPING (LFD) X(Y)
R28 (R228)	SERVO GAIN (SG) X(Y)
R31 (R231)	ERROR INTEGRATOR GAIN (EI) X(Y)
R51 (R251)	INPUT SCALE ADJUST (IS) X(Y)
R53 (R253)	ERROR LIMITTER (EL) X(Y)
R59 (R259)	HI FREQ DAMPING (HFD) X(Y)
R77 (R277)	POS. LINEARITY ADJUST (LIN) X(Y)
R78 (R278)	SLEW RATE LIMITER (SRL) X(Y)
R107 (R307)	BANDWIDTH ADJ (BW) X(Y)
R93 (R293)	NOTCH FREQUENCY 1 X(Y)
R100 (R300)	NOTCH FREQUENCY 2 X(Y)

TEST POINTS

TEST POINT	SIGNAL
TP2	GROUND
TP4 (TP204)	MOTOR + X(Y)
TP5 (TP205)	NOTCH FILTER INPUT X(Y)
TP6 (TP206)	NOTCH FILTER OUTPUT X(Y)

J1 (6 PIN) COMMAND INPUT

AMP 794682-6 MATE

PIN#	SIGNAL NAME
J1-1	- Y INPUT
J1-2	+ Y INPUT
J1-3	MUTE RETURN
J1-4	MUTE
J1-5	- X INPUT
J1-6	+ X INPUT

J2 (10 PIN) X MOTOR CONN

AMP 1-794682-0

PIN#	SIGNAL NAME
1	SHIELD
2	+ MOTOR
3	SHIELD
4	- MOTOR
5	AGC RETURN
6	AGC SHIELD
7	DIODE COMMON
8	AGC OUT
9	1a
10	1b

J22 (10 PIN) Y MOTOR CONN

PIN#	SIGNAL NAME
1	SHIELD
2	+ MOTOR
3	SHIELD
4	- MOTOR
5	AGC RETURN
6	AGC SHIELD
7	DIODE COMMON
8	AGC OUT
9	1a
10	1b

J3 (4 PIN) INPUT POWER CONN

MOLEX 15-24-4049

PIN#	SIGNAL NAME
J3-1	+ POWER
J3-2	+ PWR RETURN
J3-3	- PWR RETURN
J3-4	- POWER

J4 (12 PIN) I/O CONN  
HRS DF11-12DP-2DSA01

PIN#	SIGNAL NAME
1	X VELOCITY
2	Y VELOCITY
3	X POSITION
4	Y POSITION
5	SIGNAL RETURN
6	SIG RETURN
7	X CURRENT
8	Y CURRENT
9	X AGC
10	Y AGC
11	X FAULT
12	Y FAULT

Scanner MODEL NO. **6210H** Tolerance Units/Notes

**Mechanical Specifications**

Rated Excursion, Rotor <sup>1</sup>	±20	Min	degrees
Bumper Stop Angle, Initial Contact <sup>1</sup>	±26	±4	degrees
Optical Aperture, Two-Axis, Std.	3.6	-	millimeters
Rotor Inertia	0.018	±10%	gm-cm <sup>2</sup>
Recommended Load	0.000 - 0.18	-	gm-cm <sup>2</sup>
Torque Constant	2.79E+04	±10%	dyne-cm/amp
Coil Resistance	3.72	±10%	ohms
Coil Inductance	109	±10%	µhenries
Back EMF Voltage	48.7	±10%	µv/degrees/s
Thermal Resistance, Rotor-to-Case	2.0	Max	°C/watt
Maximum Rotor Temperature	110	Max	°C
Maximum RMS Current	2.4	Max	amps
Maximum Peak Current	8	Max	amps
Maximum RMS Power	30	Max	watts
Fuse Rating	3	-	amp., fast-blo
Settling time <sup>2</sup>	100	Typ	µsec
Scanner Weight	17	Typ	grams
Case Operating Temperature	0 - 50	-	°C

RESOLUTION VALUES FOR STANDARD USAF 1951 RESOLUTION TEST PATTERN (All values in Cycles per milimetro)										
ELEMENTS	GROUP									
	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7
1	.250	.500	1.00	2.00	4.00	8.00	16.00	32.00	64.00	128
2	.281	.561	1.12	2.24	4.49	8.89	17.9	35.9	71.8	143
3	.315	.629	1.26	2.52	5.04	10.1	20.1	40.3	80.6	161
4	.354	.707	1.41	2.83	5.66	11.3	22.6	45.3	90.5	181
5	.397	.794	1.59	3.17	6.35	12.7	25.4	50.8	101	203
6	.445	.891	1.78	3.56	7.13	14.3	28.5	57.0	114	228