

DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE VISIÓNICA PARA
NANOMETROLOGIA DE MATERIALES

JULIAN ESTEBAN GONZALEZ DIAZ
JAIME DE JESUS GONZALEZ RODRIGUEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INFORMATICA
ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA, ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2009

DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE VISIÓNICA PARA
NANOMETROLOGIA DE MATERIALES

JULIAN ESTEBAN GONZALEZ DIAZ
JAIME DE JESUS GONZALEZ RODRIGUEZ

Trabajo de Investigación

Director
Dr. ARTURO PLATA GOMEZ
Doctor en Ciencias para el Ingeniero

Codirector
Msc. JAIME BARRERO P.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INFORMATICA
ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA, ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2009

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a:

*Mis padres, por sus esfuerzos y sacrificios con el fin de que culminara
con éxito mi carrera.*

*Los profesores, Arturo Plata Gomez, Jaime Barrero P. por sus valiosos
conocimientos, ya que sin su guía, este proyecto no hubiese sido
posible.*

A mis hermanos por su apoyo incondicional y su compañía.

*Todos mis compañeros y en general a todas aquellas personas, que me
han apoyado para ser lo que soy hoy.*

Jaime de Jesús González Rodríguez

Deseo agradecer a:

Mi madre Aurora Diaz y mi padre Esteban Gonzalez
por todo su sacrificio a través de todos estos años.

A mi Tía Nubia Prada y mi tío Fortian Gonzalez
Por su gran apoyo ya que sin éste
Aun seguiría siendo un sueño el hecho de ser profesional.

Al Doctor Arturo Plata, por ser un ejemplo a seguir y
Haber depositado su confianza en nosotros.

A mi Hermana Claudia Gonzalez, por sacarme de apuros.

Julian Esteban Gonzalez Diaz

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	12
DESCRIPCION DEL PROYECTO	13
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.2.1 Ingeniería Electrónica.....	13
1.2.2 Ingeniería de Sistemas.....	13
1.2.3 Ingeniería Sistemas y Electrónica	13
1.3 JUSTIFICACION.....	13
1.4 ANTECEDENTES.....	14
1.5 ALCANCES DEL PROYECTO	18
2. NANOMETROLOGIA DE MATERIALES	19
2.1 INTRODUCCION.....	19
2.2 CONCEPTOS BASICOS SOBRE INTERFERENCIA DE LA LUZ	19
2.2.1 La luz.	19
2.2.2 Intensidad en un patrón de interferencia.....	20
2.2.3 Visibilidad de franjas de interferencia.....	21
2.3 MICROSCOPIA INTERFERENCIAL.....	22
2.3.1 El microscopio de correlación tipo Mirau.....	23
2.3.2 Interferogramas con luz policromática.	24
3. ACTUADOR PIEZO-ELÉCTRICO.....	26
3.1 INTRODUCCIÓN.....	26
3.2 APLICACIONES DE LOS PIEZO ACTUADORES.....	26
3.3 ACTUADOR PIEZO ELÉCTRICO JENA REF. 0693	26
4. VISION POR COMPUTADOR.....	28
4.1 SUBSISTEMA DE ILUMINACION.....	19
4.2 SUBSISTEMA DE CAPTURA	30
4.2.1 Factores de calidad en la imagen.	31
4.2.2 Tipos de sensores	33
4.2.3 La cámara eo 5012.....	35
4.3 SUBSISTEMA DE ADQUISICION.....	36
4.4 SUBSISTEMA DE PROCESAMIENTO.....	37
4.4.1. Despliegue de los datos	43
4.4.2. Procesamiento de imagen.....	38
5. IMPLEMENTACIÓN DE LA COMUNICACIÓN Y CONTROL PIEZO- ELÉCTRICO	39
5.1. COMUNICACIÓN	39
5.1.1 Requerimientos para la comunicación.	39
5.1.2. Función	39
5.1.4 Implementación de la comunicación USB.....	42

5.2. CONTROL DEL ACTUDOR PIEZO-ELÉCTRICO	44
5.2.1. Requerimientos.....	45
5.2.2. Función.	45
5.2.3 Generalidades.	45
5.2.4 Circuito fuente de alimentación lineal.....	47
5.2.5 Etapa de conversión.....	50
5.2.6 Etapa de amplificación.	51
6. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL HARDWARE	53
6.1 DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL.....	53
6.2 DIAGRAMA CIRCUITAL GENERAL	53
6.3.1 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL PCB.....	54
7. METODOLOGIA Y DESARROLLO DEL SOFTWARE SISNA.....	55
7.1 INTRODUCCION.....	55
7.2 ALCANCES DEL SOFTWARE.....	55
7.3 METODOLOGIA DE DESARROLLO	55
7.4 FASE DE INICIO	58
7.4.1 Requerimientos.....	58
7.4.2 Usuarios del sistema.....	58
7.4.3 Casos de uso.....	59
7.4.4 Descripción de casos de uso.....	60
7.4.5 Diagramas de casos de uso del usuario	60
7.4.6 Interfaces principales.....	60
7.5 FASE DE ELABORACION	64
7.6 FASE DE CONSTRUCCION	69
7.6.1 El proceso de desarrollo evolutivo.....	69
7.6.2 Software y lenguajes de programación utilizados.....	70
7.6.3 Plan de pruebas.....	70
7.6.4 Diseño de pruebas basadas en escenarios	71
7.7 FASE DE TRANSICION	72
8. RESULTADOS	74
8.1 PRUEBAS TECNICAS DE PRESICION	74
8.1.1 Prueba de topografía.....	74
8.2 PRUEBAS FUNCIONALES	74
8.2.1 Estudio de la muestra 1.....	74
8.2.2 Estudio de la muestra 2.....	78
8.2.3 Estudio de la muestra 3.....	79
8.2.4 Estudio de la muestra 4.....	80
8.2.5 Planilla de evaluación de Satisfacción.....	81
9. CONCLUSIONES.....	82
10. RECOMENDACIONES.....	84
BIBLIOGRAFIA.....	85

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de la cámara EO-5012	426
Tabla 2. USB pines.....	471
Tabla 3. Características generales del DAC1220E.....	56
Tabla 4. Principales parámetros del OP AMP.....	57
Tabla 5. Especificaciones Muestra de calibración.	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Tarjeta digitalizadora de Imágenes Matrox.....	226
Figura 2. Camara CCD	226
Figura 3. Tarjeta para comunicación con el hardware de control del actuador piezo-eléctrico.....	226
Figura 4. Hardware para control del actuador piezo-eléctrico.	237
Imagen 5. Bus de datos ISA discontinuado.	237
Figura 6. Equipo de Computo Utilizado para nanometrologia con el sistema MATVIS.....	237
Figura 7. Espectro de luz visible y sus longitudes de onda	260
Figura 8 Franjas de interferencia.....	271
Figura 9 Esquema simplificado de un microscopio interferometrico.....	282
Figura 10. Salida detectada como función de la posición z para un microscopio de interferencia.....	23
Figura 11. Esquema simplificado de un microscopio de correlación tipo Mirau.	294
Figura 12. Interferograma con luz policromatica.....	315
Figura 13. Actuador piezo-eléctrico Jena ref. 0693	337
Figura 14. Diagrama etapas en un sistema de visión por computador.....	348
Figura 15. Configuraciones comunes en microscopia.	3529
Figura 16. Representación de resolución espacial.	371
Figura 17. Ejemplo de rango dinámico.....	382
Figura 18. El uso de microlentes mejora el Factor de llenado.....	382
Figura 19. Area Of Interest AOI.....	393
Figura 20. (a) Estructura típica de un sensor CCD color, (b) Analogía de la arquitectura CCD con cubetas y cinta transportadora.	404
Figura 21. (a) Cámara CMOS EO-5012, (b) Diagrama de bloques de la cámara CMOS EO5012.....	426
Figura 22. Diagrama de bloques del control hardware	4539
Figura 23. USB conectores y distribución de pines..	471
Figura 24. Estructura del cable USB.....	42
Figura 25. Transceptor de USB 2.0 del PIC 18f2550.....	49
Figura 26. Esquema básico de conexión para el PIC18F2550.....	504
Figura 27. Diagrama de bloques del la etapa Control Piezo-Eléctrico.	51
Figura 28. Esquema de un convertor AC-DC.....	515
Figura 29. Puente rectificador de onda completa.....	52
Figura 30. Formas de onda de entrada salida del puente rectificador de onda completa.....	46
Figura 31. Salida de un rectificador de onda completa con filtro capacitivo.....	53
Figura 32. AMP OP ideal.....	537
Figura 33. Diagrama de bloques: Fuente de alimentación lineal.....	54

Figura 34. Señal obtenida a la salida del bloque de regulación.....	49
Figura 35. Circuito regulador de tensión	55
Figura 36. Esquema básico de conexión para el DAC1220E.....	57
Figura 37. Estructura interna del convertor digital-analógico DAC1220.....	51
Figura 39. Configuración no inversora para el LM324.....	52
Figura 40. Diagrama de bloques general del sistema control hardware para el actuador piezo-eléctrico.....	593
Figura 41. Diseño del circuito impreso (PCB)	604
Figura 42. Diagrama de casos de uso del Usuario	66
Figura 43. Interfaz de presentación.....	67
Figura 44. Interfaz GUI	671
Figura 45. Interface para el <i>Test</i>	62
Figura 46. Interface de Topografía.....	63
Figura 47. Interfaz de ayuda de Usuario y Desarrollador.....	63
Figura 48. Arquitectura de SISNA	704
Figura 49. Transferencia de datos orientada a conexión entre la aplicación en el computador y el programa en el microcontrolador.....	73
Figura 50. Esquema de comunicación con la cámara EO-5012.....	758
Figura 51. Diagrama de estados del sistema.....	759
Figura 52. Diagrama del proceso de desarrollo evolutivo.....	76
Figura 53. Muestra para calibración.....	74
Figura 54. Imagen topográfica vista superior.....	75
Figura 55. Fenómeno asociado a la falta de precisión en los bordes pronunciados.....	75
Figura 56. Vistas Tridimensionales de la topografía de la muestra.....	76
Figura 57. Corte transversal de la imagen de la superficie de la muestra de calibración.....	76

LISTA DE ANEXOS

ANEXOS	93
A. CASOS DE USO	93
B. MEX-FILES (MATLAB Executable Files).....	95
C. FIRMWARE DEL MICROCONTROLADOR 18F2250 PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LA COMUNICACIÓN USB CON EL PC.	96
D. DIAGRAMA CIRCUITAL GENERAL PARA EL CONTROL DEL ACTUADOR PIEZO-ELÉCTRICO.	102
E. PLANILLA DE SATISFACCIÓN DE FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA....	103

TABAL DE ABREVIATURAS

CDC	Communication Device Class.
CCD	Charge-Coupled Device.
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor.
DAC	Digital to Analogue Converter.
DLL	Dynamic Linking Library.
ERP	Enterprise Resource Planning.
GNU	GNU's Not Unix.
GPL	General Public License.
HID	Human Interface Device.
IDE	Integrated development environment.
JVC	Victor Company of Japan.
LIFO	Last In First Out.
MATLAB	MATrix LABoratory.
NRZI	No Return to Zero Inverted.
OP AMP	Operational Amplifier.
PID	Product Identification Devices.
PC	Personal Computer.
PCB	Printed Circuit Board.
RUP	Rational Unified Process.
SPI	Serial Peripheral Interface.
SISNA	Sistema de Nanometrología.
SDCC	Small Device C Compiler.
UML	Unified Modeling Language.
USB	Universal Serial Bus.
VID	Vendor Identification Devices.

RESUMEN

Título: DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE VISIÓICA PARA NANOMETROLOGIA DE MATERIALES.*

Autores: Julian Esteban Gonzalez Diaz, Jaime De Jesús González Rodríguez.**

Palabras Claves: Nano metrología, Interferómetro, Mirau, Visiónica, Piezo-eléctrico, Detección de Máximos, adquisición de imágenes, USB.

Descripción: En este proyecto se muestra el proceso de desarrollo de un sistema conformado tanto por hardware como software para realizar estudios de muestras en materiales y medir distancias y alturas en la superficie del material a escala de nanómetros.

La finalidad del proyecto es dar una herramienta a los investigadores para realizar medidas de gran precisión utilizando un microscopio interferométrico tipo Mirau, e implementando algoritmos de detección de máximos y de interferometría dinámica mediante una cámara CMOS ubicada en el microscopio a la vez que las muestras son desplazadas por un actuador piezo-eléctrico controlado mediante el software y la etapa de control electrónico desarrollada para este propósito, dicho software reconstruirá las imágenes adquiridas y creará una imagen topográfica en 3D de la superficie de la muestra sobre la cual se podrán realizar medidas.

Se describe la metodología usada desde la recolección de los requisitos de diseño del hardware, y los de software hasta su desarrollo, comunicación de las partes, implementación, y puesta en marcha del sistema completo.

Finalmente el sistema se deja abierto a nuevos desarrollos como la conexión de un nuevo actuador piezo-eléctrico a la etapa de control electrónico para realizar perfilometría basada en algoritmos de *phase-shifting* ya que el sistema fue diseñado para su posterior evolución, y migración hacia varios equipos de cómputo de aquí, que la comunicación entre sus componentes son por bus de datos USB.

* Trabajo de Investigación

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática, Escuela de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

Director: Dr. Arturo Plata Gómez. Codirector: Jaime Barrero P.

ABSTRACT

Title: DEVELOPING AND IMPLEMENTATION OF A VISIONIC SYSTEM APPLIED TO NANOMETROLOGY ON MATERIALS.

Authors: Julian Esteban Gonzalez Diaz, Jaime De Jesús González Rodríguez.**

Key Words: Nanometrology, Interferometry, Mirau, Visionic, Piezo-electric, max detection, image sampling, USB.

Description: Current project shows the constituted by hardware-software system's developing process and methodologies used in such process, such system is used to carry out nanometrology studies on samples of materials and do measurements of height on their surfaces with a nanometric scale.

The goal of this project is to afford a tool to researchers which helps to achieve well accurated measurements using a Mirau interferometric microscope and implementing max detection algorithms and Dynamic Interferometry, with a CMOS camera placed in the microscope as well as material samples are displaced by a piezo-electric cristal ,such displacement is controlled by software and the hardware developed. This software will rebuid the 3D surface using sampled images and the user will be able to get measurements about it.

The methodology used is described since design's requirements collection for software and hardware until its development, communications of its parts, implementation and set up of the whole system.

Finally, the system is open to new developments as the connection of a new piezo-electric cristal to the electronic control stage, it will allow execute profilometry measurements based on phase-shifting algorithms, since the system was designed to be evolved and easy migrated to a wide range of computers, it is the reason why USB data bus was chosen for the communication between devices and the computer.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecanicas. Escuela de ingeniería de Sistemas e Informatica, Escuela de Electrica, Electronica y Telecomunicaciones.
Director: Dr. Arturo Plata Gomez. Codirector: Jaime Barrero P.

INTRODUCCIÓN

Los continuos desarrollos tecnológicos a nivel mundial en diferentes ramas de las ciencias se han movido a la escala de los nanómetros, un ejemplo de esto es el estudio de materiales donde se hace necesario la identificación de características topográficas a niveles de centésimas de nanómetros, el desarrollo de estas nuevas tecnologías requiere de herramientas basadas en métodos ópticos para realizar medidas de gran precisión basados en fenómenos como la interferometría. La interferometría es actualmente un procedimiento estándar que permite por medio de diversos sistemas ópticos el análisis de superficies, basado en la localización de las franjas. Las técnicas interferométricas ofrecen resoluciones axiales adecuadas para el análisis de objetos de algunas micras de altura con resoluciones de nanómetros, de esta forma podemos obtener información de la topografía de un objeto, la cual es optimizada realizando algoritmos de tratamiento digital de imágenes.

El interés por este tipo de herramientas para la exploración y análisis en ambientes industriales y biomédicos es creciente. Surge entonces la necesidad de la Universidad Industrial de Santander de obtener y modernizar las herramientas que le permitan la medición a escala manométrica con alto grado de precisión y de esta forma poder estar a la vanguardia en el desarrollo de conocimiento e investigación.

El desarrollo de este proyecto busca la construcción de un sistema que realice un movimiento de tipo nanométrico junto a un modelo interferométrico, para evaluar una muestra, con ayuda de un sistema que adquiere imágenes de intensidad (cámara CMOS) y haciendo uso del método de detección de máximos, aprovecha la propiedad del interferograma para la extracción de una imagen de topografía y máxima intensidad.

La herramienta permite obtener imágenes tridimensionales, superiores y cortes transversales de la superficie de muestras de materiales con gran precisión. Para lograr esto se requiere de un amplio conocimiento en diferentes disciplinas como son las ciencias de la computación, la ingeniería electrónica y por supuesto la física.

Se empieza por brindar una base de conocimiento de las tecnologías y conceptos físicos asociados al desarrollo del sistema para luego describir la metodología de desarrollo utilizada en cada una de las partes que lo componen.

DESCRIPCION DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema computacional con componentes Hardware y Software que permita realizar mediciones sobre muestras de materiales en la escala de nanómetros [nm] implementando algoritmos computacionales basados en modelos matemáticos obtenidos en el estudio de la interferometría óptica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.2.1 Ingeniería Electrónica

- Desarrollar un control hardware-software para el nanodesplazamiento de las muestras del microscopio, accionado por un actuador piezo-eléctrico.

1.2.2 Ingeniería de Sistemas

- Diseño y Desarrollo de una nueva Interfaz grafica más amigable para el usuario.
- Generar informes a partir de resultados obtenidos en las pruebas.

1.2.3 Ingeniería Sistemas y Electrónica

- Desarrollar un control software para el nano desplazamiento de las muestras del microscopio, accionado por un actuador piezo-eléctrico.
- Desarrollar software de adquisición y procesamiento de imágenes, el cual implementa algoritmos de corrimiento de fase y detección de máximos.

1.3 JUSTIFICACION

La universidad Industrial de Santander como universidad líder de desarrollo en el oriente del país, requiere de equipos de laboratorio modernos de alta precisión que permitan a los estudiantes realizar investigación de calidad, el Laboratorio de Óptica y Tratamiento de Señales cuenta con un sistema para nanometrología de materiales el cual es usado por los estudiantes de postgrado y pregrado de diferentes carreras, y el cual necesita ser actualizado ya que presenta inconvenientes funcionales debido a la desactualización de

sus componentes, lo cual evidencia la necesidad de desarrollar un nuevo sistema basado en tecnología moderna y recursos actuales, que sea mucho más amigable para el usuario tanto en su interfaz como en la exportación de los resultados obtenidos en las pruebas además de mejorar la compatibilidad de componentes y la fácil migración del software hacia equipos que puedan salir en los próximos años.

1.4 ANTECEDENTES

El Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales fue creado en *enero de 1984*. Cuenta con sólida experiencia en la formación de profesionales de diferentes perfiles, a nivel de posgrado y pregrado. Se trata de un grupo de investigación con categoría A en el escalafón de COLCIENCIAS*. Sus integrantes han participado directa e indirectamente en la consolidación de escenarios, en el ámbito regional y nacional, útiles para el desarrollo de la óptica y el tratamiento de señales. Ha logrado el roce internacional, que se manifiesta en la participación en proyectos conjuntos con instituciones de reconocido prestigio en óptica a nivel mundial. Igualmente sus integrantes han aportado a este campo.

Por otro lado se destaca la renovación de los integrantes del grupo con profesionales formados al interior del mismo grupo, esto permite la continuidad de líneas de investigación con posibilidades de ampliación y superación evidentes. Finalmente se destaca la labor pedagógica en la formación de profesionales ubicados actualmente en universidades nacionales y, en menor proporción, en grupos de investigación internacionales. Actualmente el grupo toma parte del Centro de Excelencia de Nuevos Materiales (CENM).

El grupo maneja cuatro líneas de investigación dentro de las cuales se encuentra la metrología óptica (Macro y Nanometrología), el principal objetivo de esta línea es impulsar el desarrollo de investigación aplicada, con el fin de resolver necesidades en nuestro medio. De esta manera se pretende:

- a.) Implementar y adaptar técnicas de medida ópticas en ambientes industriales, para el desarrollo de instrumentos de medida especializados.
- b.) Adelantar metodologías investigativas que conduzcan a innovación tecnológica en el área de la bioingeniería.
- C.) Formar profesionales en el campo de la óptica.

* Vigencia de esta última licencia de Colciencias hasta **2009-05-01**.

El grupo cuenta con un laboratorio localizado en el parque tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander, donde se encuentra entre otros un microscopio interferométrico al cual se adaptó un sistema computarizado para nanometrología de materiales (MATVIS), dicha aplicación fue desarrollada por el Dr. Arturo Plata Gómez durante sus años de doctorado y el cual implementa algoritmos producto de su tesis doctoral en *L'Université De Franche-Comté*, Francia, el cual utiliza hardware desarrollado en ese mismo país para el control de un actuador piezo-eléctrico sobre el cual se sitúan las muestras que se desean observar en el microscopio y el cual fue desarrollado para ser usado bajo el estándar de las redes eléctricas de ese país (220 V).

La aplicación desarrollada MATVIS aunque funcional, ha presentado inconvenientes en estos últimos tiempos cuando las tecnologías de la comunicación han evolucionado, de tal forma que se ha vuelto difícil la exportación a medios de almacenamiento modernos y el transporte de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, además de otros inconvenientes como la necesidad de adaptar el hardware de control a los estándares eléctricos utilizados en Colombia, lo cual obliga a usar un elevador de tensión de 110 a 220 Volts.

El proyecto MATVIS fue desarrollado totalmente en C++, lo cual le da una gran ventaja en cuanto a rendimiento, y corre sobre el sistema operativo Windows 95, pero requiere de una tarjeta digitalizadora de imágenes (Figura 1) ya que el sistema implementaba una cámara tipo CCD analógica, monocromática (Figura 2) y otra tarjeta (Figura 3) para la comunicación con el hardware de control del actuador piezo-eléctrico (Figura 4), dicha tarjeta requiere de un bus ISA (figura 5) ya discontinuado, este equipo de computo (Figura 6) no posee bus USB, y solo disponía para su salida de información una unidad de discos de $3\frac{1}{2}$ la cual se encuentra averiada y dicho tipo de unidad se ha dejado de vender comercialmente, (también discontinuada) lo que convierte a este sistema (aunque muy bueno para su época) en un sistema que no se adecua a las necesidades de la época actual.

Figura 1 Tarjeta digitalizadora de Imágenes Matrox.



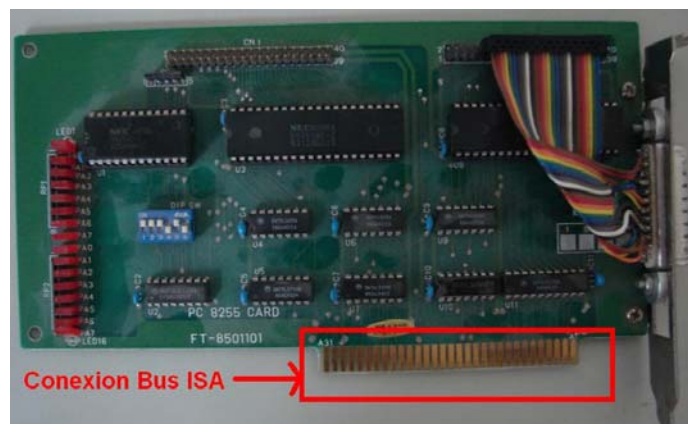
Fuente: Laboratorio de Óptica y Tratamiento de señales LOTS.

Figura 2. Cámara CCD



Fuente: Autores.

Figura 3. Tarjeta para comunicación con el hardware de control del actuador piezo-eléctrico.

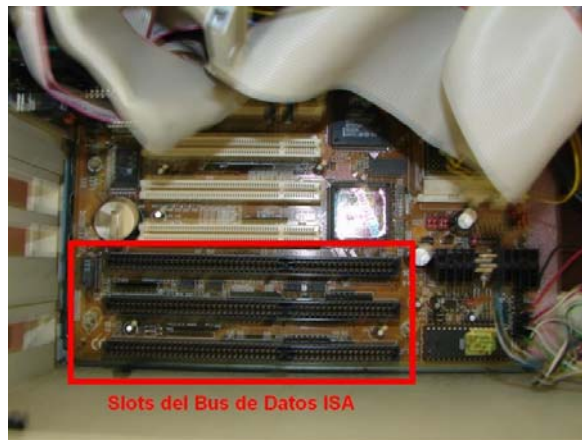


Fuente: Laboratorio de Óptica y Tratamiento de señales LOTS.
Figura 4. Hardware para control del actuador piezo-eléctrico.



Fuente: Laboratorio de Óptica y Tratamiento de señales LOTS.

Imagen 5. Bus de datos ISA discontinuado.



Fuente: Laboratorio de Óptica y Tratamiento de señales LOTS.

Figura 6. Equipo de Computo Utilizado para nanometrologia con el sistema MATVIS.



Fuente: Laboratorio de Óptica y Tratamiento de Señales LOTS.

1.5 ALCANCES DEL PROYECTO

Entregar un sistema que permita realizar estudios de nanometrología sobre muestras de materiales, cuya superficie tenga variaciones en el relieve desde los 10 [nm] hasta 6.5 μm , lo cual implica diseñar e implementar un control de nanodesplazamiento para un actuador piezo-eléctrico determinado[†] y realizar adquisición desde una cámara[‡] acoplada a un microscopio con objetivo interferométrico tipo Mirau, del cual dispone el Laboratorio de Óptica y Tratamiento de Señales localizado en la sede UIS- Guatiguara, los componentes del sistema tanto Hardware como Software y la comunicación entre dichos componentes deben ser desarrollados con herramientas de última generación que permitan portabilidad del sistema hacia equipos de computo modernos, así como la fácil obtención y compatibilidad de los reportes generados en las pruebas realizadas a las muestras, también es deseable que la documentación del software facilite su posterior evolución hacia nuevas funcionalidades.

[†] Cristal piezo eléctrico Jena ref. 0693 producido por *piezosystem jena, Inc.*

[‡] Camara EO-5012 producida por *Edmund Optics Inc.*

2. NANOMETROLOGIA DE MATERIALES

2.1 INTRODUCCION

Hace unas décadas la industria manufacturera se vio afectada por la revolución del semiconductor (1950-2010), cuya producción está enmarcada en la escala del micrómetro ($1\mu\text{m} = 1000\text{ nm}$), llevada a cabo mediante procesos planares litográficos multi-nivel, la verificación de los procesos se llevan a cabo mediante sistemas métricos ópticos que brindan la precisión requerida en micras; la nueva tendencia en la industria moderna de producción, se enmarca en la revolución de la Nanotecnología (2000-2050)¹ con el desarrollo de nano sistemas electrónicos, fotónicos, magnéticos, mecánicos, químicos, biológicos y muchos más. La exactitud requerida para la manufacturación de estos nano sistemas está en la escala manométrica ($1\text{ [nm]} = 1 \times 10^{-9}\text{ [m]}$), lo cual requiere que la inspección se haga a esta misma escala, el control preciso de la dimensión de los objetos es la clave de la nanotecnología y la ciencia de los nano-objetos. Las dimensiones de estos objetos están en el orden de los 100 nm, y las técnicas que se deben utilizar para realizar estas mediciones deben ser de tipo no intrusivas, la microscopia interferencial brinda una solución a este problema ya que a diferencia de de la microscopia estándar es capaz de obtener exactitud en la medición de alturas y de obtención de imágenes de cortes transversales.

2.2 CONCEPTOS BASICOS SOBRE INTERFERENCIA DE LA LUZ

2.2.1 La luz. La luz es modelada como una onda electromagnética transversal que se propaga a través del espacio. Debido a que tanto el campo eléctrico como el magnético están unidos el uno al otro y se propagan juntos usualmente consideramos suficiente tener en cuenta únicamente el campo eléctrico en cualquier punto; este campo puede ser tratado como un vector que varía en el tiempo perpendicular a la dirección de propagación de la onda, si este vector siempre permanece en el mismo plano se dice que la luz de la onda esta linealmente polarizada en ese plano.

Podemos describir entonces el campo eléctrico en cualquier punto correspondiente a una onda de luz que se desplaza a lo largo del eje z mediante la ecuación:

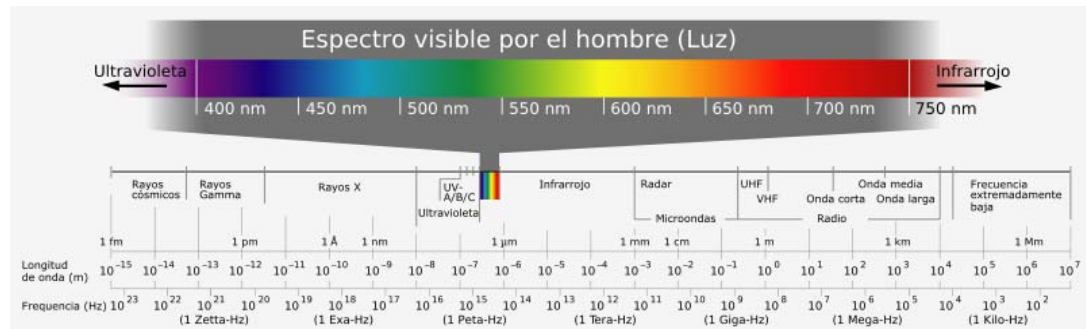
$$E(x, y, z, t) = a \cos \left[2\pi \left(vt - \frac{z}{\lambda} \right) \right] \quad (2.1)$$

Donde a es la amplitud de la onda v es la frecuencia y λ es la longitud de onda.

La luz visible comprende longitudes de onda desde los 0.4 μm (violeta) hasta los 0.75 μm (rojo) con frecuencias correspondientes a los 7.5×10^{14} Hz y 4.0×10^{14} Hz respectivamente como se muestra en la Figura 7.

El término entre corchetes es llamado fase de la onda y varía con el tiempo como con la distancia a través del eje z desde el origen.

Figura 7. Espectro de luz visible y sus longitudes de onda



Fuente <http://agaudi.files.wordpress.com>

2.2.2 Intensidad en un patrón de interferencia. Cuando dos ondas de luz se superponen la intensidad resultante en cualquier punto puede reforzarse o cancelarse, este es el fenómeno conocido como interferencia.

Asumiremos que dos ondas se están propagando en la misma dirección y son polarizadas en el mismo plano, también asumiremos que tienen la misma frecuencia, la amplitud compleja $A = a \exp(-i\phi)$ donde $\phi = 2\pi z/\lambda$ en cualquier punto en el patrón de interferencia es la suma de las amplitudes complejas de las dos ondas, entonces podemos escribir:

$$A = A_1 + A_2 \quad (2.2)$$

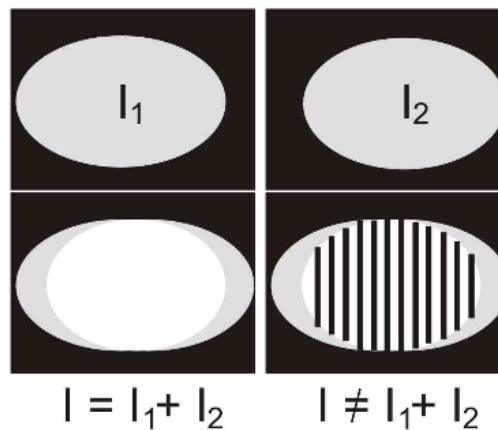
Por tanto la intensidad resultante es:

$$\begin{aligned} I &= |A|^2 \\ &= (A_1 + A_2)(A_1^* + A_2^*) \\ &= |A_1|^2 + |A_2|^2 + A_1 A_2^* + A_2 A_1^* \\ &= I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\Delta\phi) \quad (2.3) \end{aligned}$$

Donde I_1 y I_2 son las intensidades de las dos ondas actuando por separado y $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ es la diferencia de fase entre ellas.

Vemos que existen franjas solo si la intensidad resultante de la superposición de las dos ondas difiere de la suma de las intensidades de estas dos ondas individuales como muestra la figura 8, esta figura ilustra la situación de no interferencia (cuadrante inferior izquierdo) y la de interferencia (inferior derecho). El fenómeno de interferencia se suele manifestar mediante la aparición de franjas, las cuales varían su intensidad en forma sinusoidal y tienen un máximo cuando $\cos(\Delta\phi) = 1$, esta forma sinusoidal es llamada interferograma.

Figura 8 Franjas de interferencia



Fuente (Aina, 2009)

2.2.3 Visibilidad de franjas de interferencia. La intensidad en un patrón de interferencia tiene su valor máximo:

$$I_{\text{max}} = I_1 + I_2 + 2\mu(I_1 I_2)^{1/2} \quad (2.4)$$

Cuando $\Delta\phi = 2m\pi$ donde m es un entero, μ es el factor de coherencia y tiene su mínimo valor en:

$$I_{\text{min}} = I_1 + I_2 - 2\mu(I_1 I_2)^{1/2} \quad (2.5)$$

Cuando $\Delta\phi = (2m + 1)\pi$. La visibilidad \mathcal{V} de la interferencia de franjas es entonces definida por la relación:

$$v = \frac{I_{Max} - I_{Min}}{I_{Max} + I_{Min}} \quad (2.6)$$

Donde $0 \leq v \leq 1$. En este caso de las ecuaciones (4) y (5)

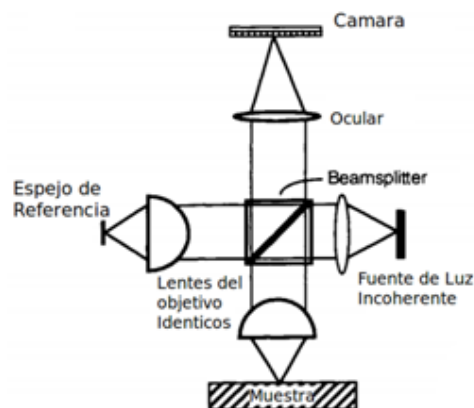
$$v = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \quad (2.7)$$

2.3 MICROSCOPIA INTERFERENCIAL

Los microscopios de interferencia forman un patrón con luz reflejada por la muestra y una superficie de referencia. Si la superficie de referencia se mantiene en una posición fija (Figura 9), las franjas de interferencia de cada *pixel* en la imagen son formadas al igual que la muestra reflejada es movida a través del foco. El contraste de las franjas de interferencia cae rápidamente a medida que el objeto sale de foco.

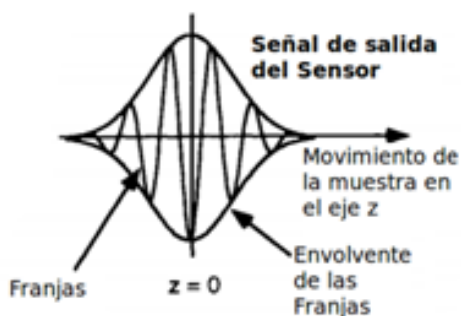
Mediante procesamiento digital del patrón de interferencia obtenido, la envolvente del patrón de interferencia para cada *pixel* puede ser determinado (Figura 10). El procesamiento digital de este patrón permite no solo la medición de la amplitud sino también la fase de la luz reflejada, entonces es posible medir la altura de la superficie y la rugosidad con una precisión de una pequeña fracción de una longitud de onda.

Figura 9 .Esquema simplificado de un microscopio interferometrico basado en el interferómetro de Michelson.



Fuente: (Kino, 1996)

Figura 10. Salida detectada como función de la posición z para un microscopio de interferencia. La envolvente de esta señal es también vista.



Fuente: (Kino, 1996)

2.3.1 El microscopio de correlación tipo Mirau. Un interferómetro tipo Mirau consiste de un divisor de onda y un espejo de referencia posicionado entre el objetivo y la muestra que generara las señales de interferencia.

Debido a la relativamente cortas trayectorias de los haces el interferómetro Mirau es menos sensitivo a vibraciones que otros como el interferómetro tipo Linnik. Además solo requiere un lente, sin embargo este lente debe tener una distancia de trabajo relativamente larga para acomodarse al *Beamsplitter* y al espejo de referencia.

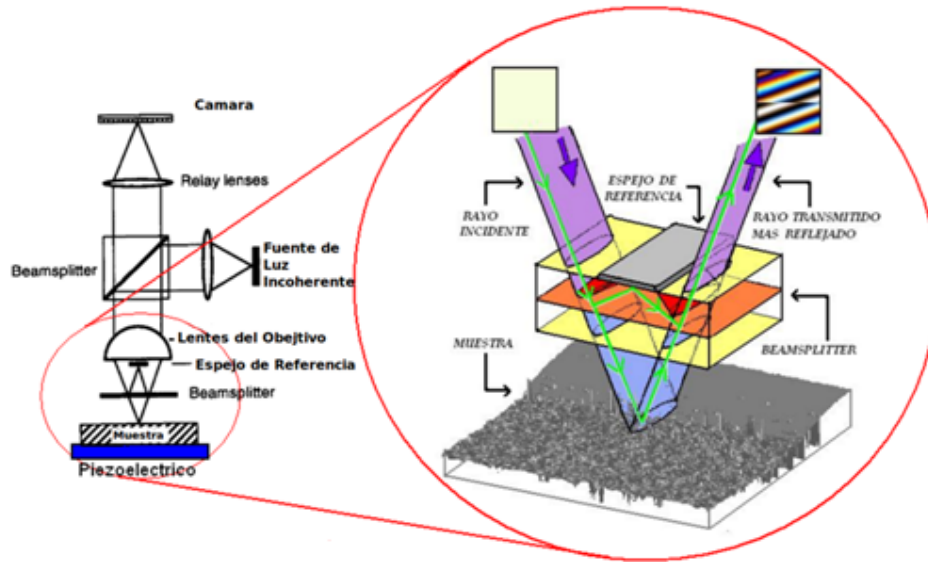
En los microscopios Mirau los haces de luz incoherente son divididos por el *beamsplitter*, aproximadamente la mitad de la potencia de el haz convergente es dirigido al espejo de referencia y la otra mitad es dirigida hacia la muestra. El espejo de referencia es posicionado en el plano focal del objetivo, mientras la muestra es escaneada a través de la coordenada en z por un actuador piezo-eléctrico controlado por computadora (Figura 10).

Los microscopios interferometricos tipo Mirau implementaban hasta hace poco cámaras CCD para obtener las señales de interferencia las cuales eran procesadas para formar la imagen, el estudio de este tipo de sensores será expuesto en la sección 4.2.2.

En la Figura 11 se puede observar el esquema simplificado de un microscopio de correlación tipo Mirau y la representación del modelo interferometrico

contenido en el objetivo del microscopio. El rayo incidente se divide en dos (rojo y azul) luego recorren uno la superficie del material y otro un espejo de referencian se vuelven a unir formando el patrón de franjas.

Figura 11. Esquema simplificado de un microscopio de correlación tipo Mirau.



Fuente: (Kino, 1996), (Lozano, 2007)

2.3.2 Interferogramas con luz policromática. Situando el origen de coordenadas en un punto en el eje z , en el cual los dos caminos ópticos son iguales, desplazando por medio del actuador piezo-eléctrico la muestra estudiada, a lo largo del eje z (eje perpendicular al plano de la muestra), en series de pasos de tamaño Δz , y volviendo a expresar la ecuación (2.3) en función de diferencias de longitudes, la intensidad en cualquier punto en el plano imagen, correspondiente a un punto del objeto con altura h , puede ser escrita como:

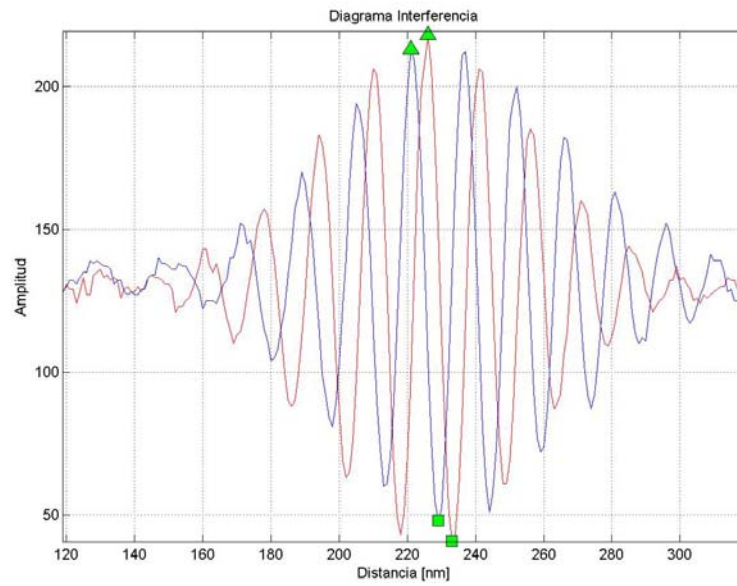
$$I(x) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} g(\rho) \cos \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \rho + \varphi_0 \right] \quad (2.8)$$

Donde I_1 y I_2 son las intensidades de los dos rayos que actúan independientemente, $g(\rho)$ es la franja visible, o función de coherencia (la cual corresponde a la envolvente de las franjas de interferencia), el $\cos \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \rho + \varphi_0 \right]$ es una modulación cosenoidal, y λ corresponde a la longitud

de onda de la fuente; $\delta = 2(z - h)$ es la diferencia en las longitudes de los caminos ópticos atravesados por los rayos, y ϕ_0 es la diferencia de fase que cambia debido a la reflexión en el divisor de rayos y los espejos.

La figura 12 muestra las variaciones de intensidad en un punto dado de la imagen cuando el objeto es examinado a lo largo de la altura del eje z.

Figura 12. Interferograma con luz policromática.



Fuente: Autores

3. ACTUADOR PIEZO-ELÉCTRICO

3.1 INTRODUCCIÓN

La palabra “piezo” se deriva de la palabra Griega: $\pi\epsilon\zeta\omega$ que significa estrechar, apretar u oprimir. En 1880, Jacques y Pierre Curie descubrieron ciertas sustancias especialmente algunos cristales como el cuarzo desarrollan una tensión eléctrica en su superficie cuando se les acciona mecánicamente, ellos llamaron a este fenómeno “el efecto piezo-eléctrico”. Este fenómeno también se presenta a la inversa o puede ser reversible, en este caso, se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico, este efecto era referido como “efecto piezo inverso”.

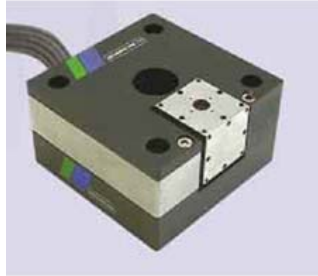
3.2 APLICACIONES DE LOS PIEZO ACTUADORES

La primera aplicación comercial fue en detectores ultrasónicos para submarinos desarrollados durante la 1ª Guerra Mundial y en la década de los cuarenta los científicos descubrieron que el titanato de bario (cerámico) puede comportarse como material piezo-eléctrico en presencia de un campo eléctrico. Actualmente el efecto piezo-eléctrico es a menudo encontrado en la vida diaria. Por ejemplo, en encendedores de gas para cigarrillos o encendedores para parrillas en estufas de gas; una palanca aplica presión a un cristal piezo-eléctrico creando un campo eléctrico lo bastante fuerte para producir una chispa que encienda el gas. Además, relojes con alarma utilizan a menudo elementos piezo-eléctricos. En el campo de la ingeniería el uso más común de este fenómeno, es en los actuadores piezo-eléctricos, este es un dispositivo que produce movimiento (desplazamiento) a niveles de nanómetros. En general las áreas en donde normalmente encontramos aplicaciones de los piezo actuadores son en óptica, tecnología de medición, microelectrónica, en mecánica de precisión e ingeniería mecánica y en la medicina.

3.3 ACTUADOR PIEZO ELÉCTRICO JENA REF. 0693

Las especificaciones más sobresalientes a resaltar de el actuador piezo-eléctrico Jena 0693 (Figura 13) son: voltaje de operación que va de 0 hasta 150 Voltios, desplazamiento máximo en Z de 30 micrómetros y como su estructura física no permite acoplar el transductor al objetivo Mirau del microscopio entonces se deben colocar las piezas a ser analizadas sobre el actuador piezo, teniendo claro esto, es necesario entonces especificar máxima carga soportada por el piezo la cual no debe exceder los 10 Newtons.

Figura 13. Actuador piezo-eléctrico Jena ref. 0693



(a)



(b)

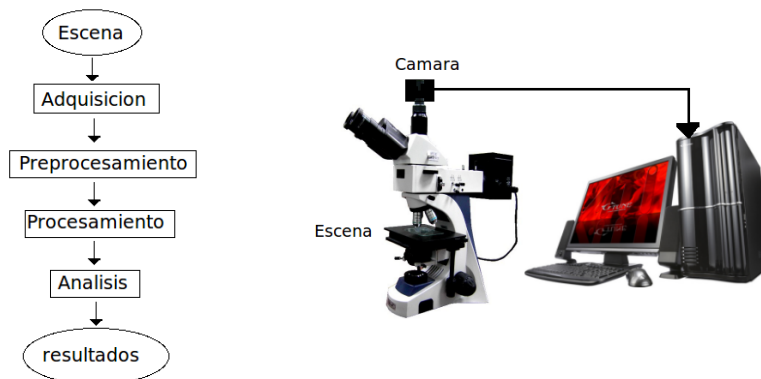
Fuente: (a) www.piezosjena.com, (b) Autores.

4. VISION POR COMPUTADOR

La digitalización de imágenes obtenidas desde un microscopio óptico y su posterior procesamiento, permite obtener un aumento en la capacidad de conocer características del objeto de estudio y extraer mayor información de este.

Los sistemas de visión por computadora constan de dos etapas básicas, la adquisición de las imágenes y su posterior procesamiento digital. El primer apartado está constituido por el subsistema de iluminación, captación de la imagen y la obtención de la señal en el computador, luego de ser obtenida se debe procesar esta señal para obtener información de esta. El diagrama del proceso se muestra en la figura 14.

Figura 14. Diagrama etapas en un sistema de visión por computador.



Fuente: Autores.

Debido a que los sistemas de visión por computador se encuentran con escenas visuales de información de tipo continuo y sin embargo los equipos de computo basan su diseño en la tecnología digital, es necesario conocer que el paso de información se verá alterada al aplicar esta transformación, por tanto resulta de gran importancia entender las limitaciones de resolución que debe tener el sistema de adquisición de imágenes para que dicha alteración no afecte los resultados finales del estudio y no nos alejemos de la realidad.

La responsabilidad de obtener una buena adquisición de imágenes recae directamente en el dispositivo que se va a utilizar para dicho fin, además de las condiciones en las cuales se haga la adquisición.

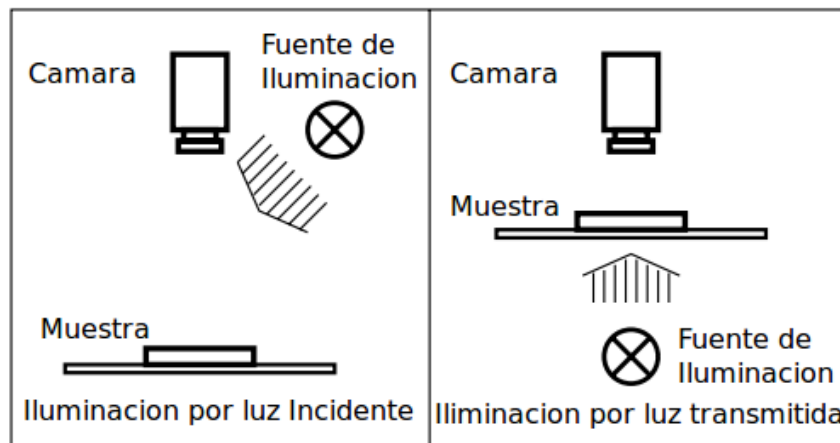
En general, podemos decir que un sistema de visión por computadora consta de los subsistemas de iluminación, captura, adquisición y de procesamiento.

4.1. SUBSISTEMA DE ILUMINACION

Es una parte muy importante del sistema que no se puede tomar a la ligera, la configuración de la fuente de iluminación de la muestra determinara en gran medida la confiabilidad de la información que se obtendrá en el dispositivo de captación de las imágenes.

Una buena elección de la fuente de iluminación permitirá al sistema de procesamiento de imágenes recibir la imagen bajo las mejores circunstancias y el número de procedimientos necesarios para la restauración de la misma serán minimizados. La meta es optimizar la dinámica y el contraste de una imagen, esto significa que un objeto debe ser fotografiado con un número máximo de intensidad pero al mismo tiempo debe mantener un buen contraste. En cualquier caso se debe establecer una fuente homogénea y temporalmente constante sobre toda el área de interés*. Aunque existen muchas configuraciones para la fuente de iluminación las más comunes utilizadas en microscopia se pueden ver en la Figura 15.

Figura 15. Configuraciones comunes en microscopia, podemos observar como la luz recibida por el sensor de captura puede ser reflejada o puede ser transmitida, lo cual es determinado por la ubicación de la fuente de iluminación.



Fuente: (Ferron).

* De ahora en adelante se denotara como AOI por sus siglas en ingles: Area Of Interest

4.1.1 Coherencia de la luz. La luz se genera en los átomos que suelen tener posiciones y velocidades aleatorias, de forma que trasladan esta aleatoriedad a la luz que emiten, entonces el campo eléctrico E de un haz de luz es una variable aleatoria.

Cualquier observación de la luz involucra cierto proceso de promediado estadístico[†] de tal forma que $\langle f(E, x, t) \rangle$ representara el valor medio de $f(E, x, t)$. Este promedio estadístico es realizado por todos los dispositivos de captura debido a su expansión espacial o su inercia temporal como es el caso de los sensores de las cámaras, cada *pixel* del sensor posee un tamaño y tiene un tiempo de exposición antes de transferir la carga fotoinducida. Salvo situaciones muy excepcionales la luz producida por las fuentes de luz convencionales tiene un valor medio de cero $\langle E \rangle = 0 \forall x, y$.

La coherencia es el grado de dependencia entre dos o más campos eléctricos, es decir dos o más ondas de luz, lo cual es muy importante para realizar las pruebas de interferometría con objetivos tipo Mirau, los cuales trabajan correctamente con luz incoherente.

De la ecuación (7) podemos ver que el grado de coherencia mide la calidad de de la interferencia, de modo que μ próximo a uno significa buena visibilidad (siempre que $I_1 \approx I_2$ y un $\mu \approx 0$ significa poca visibilidad de franjas

4.2 SUBSISTEMA DE CAPTURA

Para crear la imagen digital necesitamos capturar las imágenes analógicas del mundo real y cuantizarlas, esto se hace mediante sensores que reciben la radiación del espectro electromagnético y transforman las intensidades de las señales censadas en voltajes. El proceso se podría describir de la siguiente forma: “La energía entrante se transforma en un señal de tensión eléctrica por la combinación de electricidad de entrada y el material del sensor, sensible al tipo de energía que se quiere detectar. La señal de tensión eléctrica de salida es la respuesta del sensor, y una cantidad digital se obtiene de cada sensor digitalizando su respuesta.” (Vilet, 2005).

Aunque existe una amplia gama de dispositivos de captura de imagen, los más difundidos son los sensores CCD los cuales se han venido implementado desde hace ya varios años y los relativamente nuevos sensores CMOS.

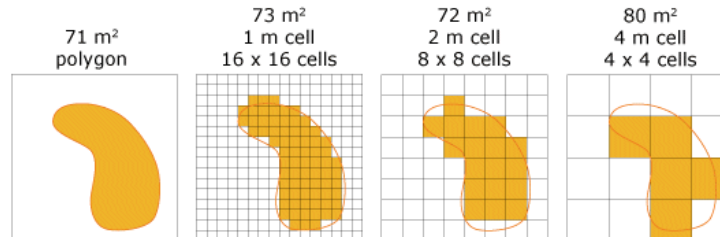
[†] Se representara mediante parentesis agudos $\langle \rangle$

Existen varios factores clave que se deben tener en cuenta para la adquisición de la imagen, algunos de las cuales son requerimientos que el sensor de captura debe cumplir.

4.2.1 Factores de calidad en la imagen. Cuanto mejor nos acerquemos a la imagen real de la escena, la información obtenida será más confiable, hay algunas definiciones que se deben conocer.

- **Resolución espacial:** Se puede describir como la capacidad que tiene el sensor para describir los detalles finos de la imagen real, esta característica es fundamental en la fase de muestreo. Un sensor con pocas células fotosensibles muestreará a baja resolución, con lo que los píxeles se apreciarán a simple vista, fenómeno conocido con el nombre de *pixelación*. Por el contrario, otro sensor con muchas células fotosensibles muestreará con una elevada resolución espacial, obteniéndose una imagen digital de gran calidad en la que no se verá los píxeles individuales. El concepto se puede ilustrar en la figura 16.

Figura 16. Representación de resolución espacial. Se puede observar que a mayor resolución podemos representar mejor el objeto de estudio.



Fuente: <http://webhelp.esri.com/>

- **Resolución Espectral:** Ancho de banda de las frecuencias de luz capturadas por el sensor.
- **Resolución Temporal:** Intervalo entre imágenes capturadas.
- **Rango dinámico:** Es el rango de diferencia tonal entre la parte más clara y la más oscura de una imagen. Cuanto más alto sea el rango dinámico, se pueden potencialmente representar más matices, a pesar de que el rango dinámico no se correlaciona en forma automática con la cantidad de tonos reproducidos ej.: Figura 17.

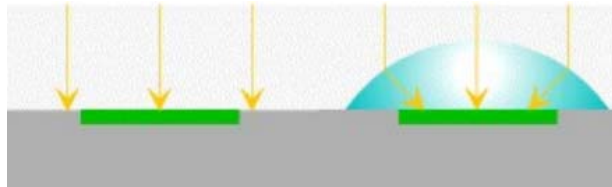
Figura 17. Ejemplo de rango dinámico.



Fuente: <http://www.library.cornell.edu>

- **Ruido:** son pequeñas variaciones aleatorias en la luminosidad del color captadas por los fotosensores, que degradan la calidad de la imagen capturada. La cantidad de ruido captada va a depender de la relación entre señal y ruido de los fotosensores (cuanto más baja sea, más ruido captarán y peor será la calidad de la imagen resultante).
- **Factor de Llenado:** Es el porcentaje del área del *pixel* que es expuesto a la luz durante la exposición. Idealmente este debería ser del 100%, ya que otros elementos son situados en la superficie junto con los fotosensores este valor se puede reducir a un 30-50%[‡] dependiendo de la tecnología del sensor. El uso de micro lentes compensan esta perdida y ayudan a incrementar el factor de llenado hasta un 90% o más. El esquema se muestra en la Figura 18.

Figura 18. El uso de microlentes mejora el Factor de Llenado.



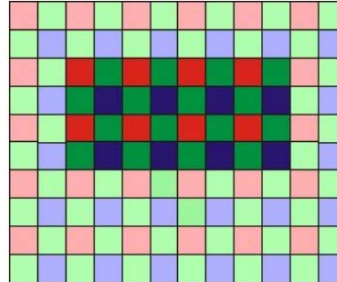
Fuente: User Manual uEye Cameras V3.32

- **Área de Interés:** Los sensores de la cámara tienen una resolución definida las cuales son dadas en número de *pixeles* (Ancho x Alto), sin embargo algunas aplicaciones pueden necesitar leer solo una parte seleccionada del sensor o reducir la resolución. Para ese propósito las cámaras proveen métodos como el *Binning* (combinación), *subsampling* (saltarse *pixeles*) y el AOI mostrada en la figura 19. Utilizando estos métodos también se

[‡] Cifra tomada del manual de la cámara utilizada en el proyecto, este valor puede cambiar para otras cámaras.

incrementara la tasa de muestreo del sensor debido a que la cantidad de información que se envía es menor.

Figura 19. Area Of Interest AOI.



Fuente: User Manual uEye Cameras V3.32

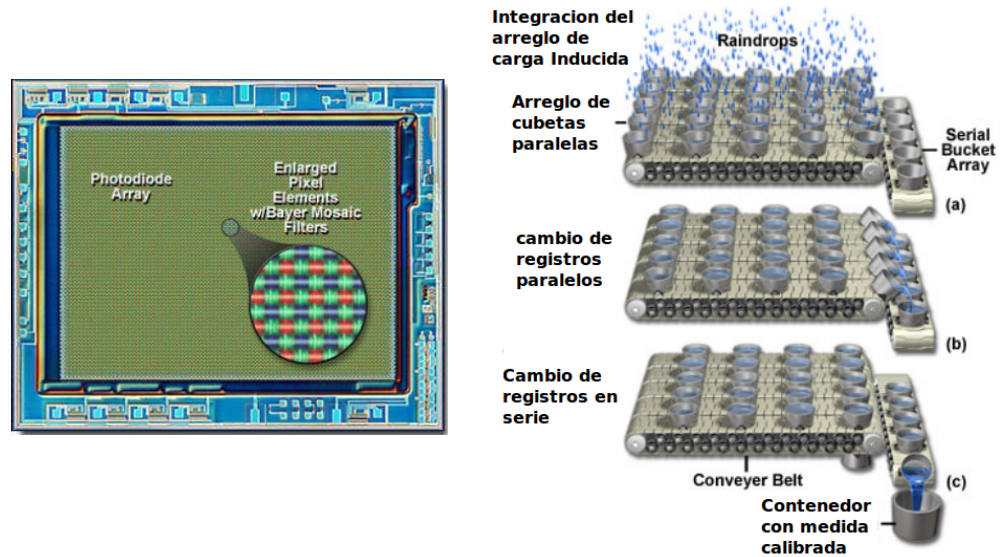
- **Otros:** Existen muchos otros factores que intervienen en la etapa de adquisición de imágenes con los cuales se puede obtener un mejor rendimiento del equipo y del software desarrollado para el procesamiento de las imágenes como lo son el filtro de color, los métodos de disparo el *pixel clock*, la velocidad de los *frames*[§], el tiempo de exposición, y la ganancia los cuales por ser temas extensos no se abarcaran en este libro pero pueden ser consultados en la Bibliografía.

4.2.2 Tipos de sensores

- **Sensores CCD:** En los sensores tipo CCD la luz entrante cae cada *pixel* es expuesto a la luz durante un tiempo denominado tiempo de integración, tras el cual los fotones que han sido almacenados son transferidos de forma ordenada a una etapa de salida, que es un amplificador que convierte la carga acumulada en cada *pixel* en una tensión eléctrica, podemos ilustrar esto haciendo una analogía con un array (arreglo) de cubetas dispuestas a la lluvia las cuales se encuentran en una cinta transportadora, en este caso la lluvia son los fotones y cada cubeta seria un *pixel* Figura 20. Los sensores CCD mueven la carga fotogenerada de *pixel* a *pixel* y lo convierten a voltaje en un nodo de salida, esta señal debe ser digitalizada y procesada por la circuitería de la cámara. La señal más representativa es la verde debido a que la cantidad de filtros de verde doblan la cantidad de filtros rojo y azul en cada *pixel* puesto que la visión humana es más sensible a dicha longitud de onda.

[§] Terminado adoptado para una imagen completa tomada por la cámara.

Figura 20. (a) Estructura típica de un sensor CCD color, (b) Analogía de la arquitectura CCD con cubetas y cinta transportadora.



Fuentes: (a) VHTM divulgación, (b) Observational Astrophysics.

- **Sensores CMOS:** Al contrario que en los sensores tipo CCD, los *pixeles* en el sensor CMOS son totalmente independientes de sus vecinas. La principal diferencia radica en que en estos sensores la digitalización se realiza píxel a píxel dentro del mismo sensor, por lo que la circuitería accesoria al sensor es mucho más sencilla. En cada celda de una matriz CMOS encontraremos varios foto transistores, conformando cada uno de los *pixeles* del sensor, que amplifican y procesan la información recogida. Esta manera de efectuar la lectura de la imagen es más flexible, ya que cada *pixel* se lee de manera individual.
- **CCD Vs CMOS:** Algunas de las ventajas que presenta CMOS sobre CCD son las siguientes:
 - Bajo consumo de potencia (1% de CCD)
 - Acceso aleatorio hacia AOI
 - *Blooming*^{**} y *Streaking*^{††} reducido comparado con CCD.
 - Electrónica adicional puede ser integrada *on chip* en cada *pixel* (Sensor inteligente)
 - Lectura no destructiva

** Se puede traducir como Difuminado.

†† Se puede traducir como Veteado.

Algunas desventajas que pueden presentar los CMOS respecto a CCD:

- Factor de llenado pequeño (Se ayuda a mejorar mediante microlentes)
- Típicamente son susceptibles a ruido.

4.2.3 La cámara eo 5012. De acuerdo a las ventajas anteriormente expuestas y tomando en cuenta los factores determinantes para una buena adquisición de imágenes se opta por adquirir la cámara EO5012 con la cual se lleva a cabo el montaje en el laboratorio.

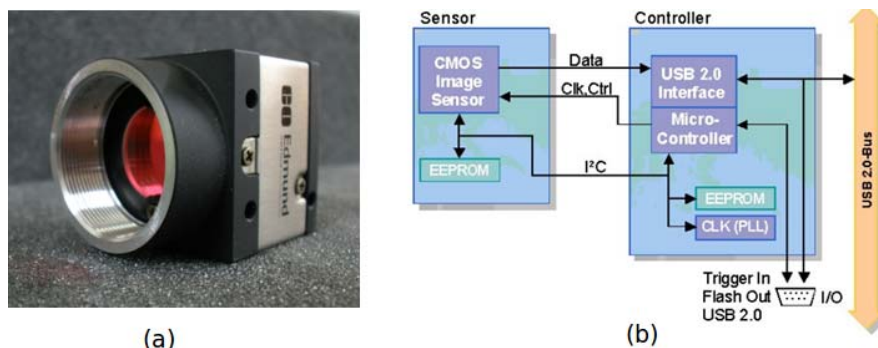
➤ **Componentes de la cámara EO-5012**

La cámara USB EO-5012 (Figura 21 (a)) tiene una estructura modular, consistente de los siguientes componentes:

- Tarjeta USB que incluye:
 - ✓ Una interfaz USB 2.0 con control de tráfico de datos entre la cámara y el PC.
 - ✓ Un micro-controlador el cual controla las entradas y salidas digitales, el *pixel clock* el tamaño de la Imagen.
 - ✓ Una memoria EEPROM donde el ensamblador de la cámara guarda el número serial de esta y un área de memoria de 64 bytes que puede ser usada libremente por el usuario.
- Tarjeta del Sensor. Esta tarjeta incluye:
 - ✓ El sensor.
 - ✓ Una EEPROM donde el tipo de cámara es guardado.

La arquitectura y flujo de datos y señales se puede apreciar en la Figura 21 (b)

Figura 21. (a) Cámara CMOS EO-5012, (b) Diagrama de bloques de la cámara CMOS EO5012



Fuente (a) Autores, (b) (GmbH, 2009)

Las especificaciones técnicas de la cámara se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 1 Especificaciones de la cámara EO-5012

Model	EO-5012
Sensor Type	1/2" Progressive Scan CMOS
Sensor (Micron)	MT9P031
Pixels (H x V)	2560 x 1920
Pixel Size (H x V)	2.2um x 2.2um
Sensing Area (H x V)	5.6mm x 4.2mm
Shutter Type	Global Start Rolling
Frame Rate	6 fps
Pixel Depth	8-bit
Video Output	USB2.0
Sync System	Internal or Via Software
Camera/Exposure Control	Via Software

Fuente: Edmund Optics

4.3 SUBSISTEMA DE ADQUISICION

Luego que se tiene el ambiente propicio para realizar la adquisición, esta lleva a cabo mediante el sensor, el cual adquiere los datos *pixel a pixel*, donde la

radiancia^{‡‡} es digitalizada. Teniendo la representación digital de la imagen, esta es guardada como una grilla de *pixeles*, para permitir su manipulación por parte del computador. Las radiancias podrán tomar cualquier valor entre 0 y R_{max} , el que es el número de intervalos digitales que están disponibles y dependen del número de bits del convertidor análogo-digital $R_{max}=2^n-1$, donde n es el número de bits. Esta imagen digitalizada, por lo general es procesada por un computador o clúster de computadores según las necesidades de los algoritmos de visión artificial, estos algoritmos parten de la representación digital de las imágenes y procesan esta información hasta alcanzar otro tipo de información de más alto nivel.

Antes de que la imagen pueda ser procesada esta debe ser enviada al ordenador mediante algún protocolo de comunicación, que asegure una tasa de transferencia lo suficientemente alta para que no hayan cuellos de botella entre la digitalización y el procesamiento de la señal. Una vez esta señal es adquirida por el ordenador se procede a situarse en memoria RAM de donde los algoritmos de visión artificial extraerán la imagen o trabajaran sobre esta, para su posterior análisis y entrega de resultados.

4.4 SUBSISTEMA DE PROCESAMIENTO

Una vez la imagen digital se encuentra situada en memoria y tenemos acceso a esta se debe realizar el procesamiento de la imagen que generara la topografía de la muestra en estudio. Por medio de procesamiento digital de las imágenes interferométricas obtenidas podemos reconstruir la topografía de la muestra aplicando algoritmos de detección de máximos y mínimos.

4.4.1. Despliegue de los datos. Teniendo los datos digitalizados y guardados en la forma de una grilla de *pixeles*, para que los datos sean mostrados en pantalla, el computador asigna a cada valor entero (o rango de ellos) un color en particular, de forma tal que pueda ser distinguido visualmente. Existen diferentes métodos de codificar los datos en color.

- Codificación (paleta) arcoíris (rainbow encoding): Cada valor digital es asignado a un color diferente, arbitrariamente elegido. Ej. 0=rojo, 1=azul, ... 255=amarillo.
- Codificación (paleta) en escala de grises: A cada valor se le asigna un nivel de gris, generalmente en un orden ascendente. Ej. 0=negro, 1=gris oscuro, . . .,254=gris claro, 255=blanco.

^{‡‡} Se define como el flujo radiante por unidad de ángulo sólido, que sale de una superficie emisora en una dirección dada.

- Codificación (paleta) en escala de colores: A cada valor se le asigna un solo nivel de color, generalmente en un orden ascendente. Ej. 0=rojo oscuro, ..., 255=rojo claro.

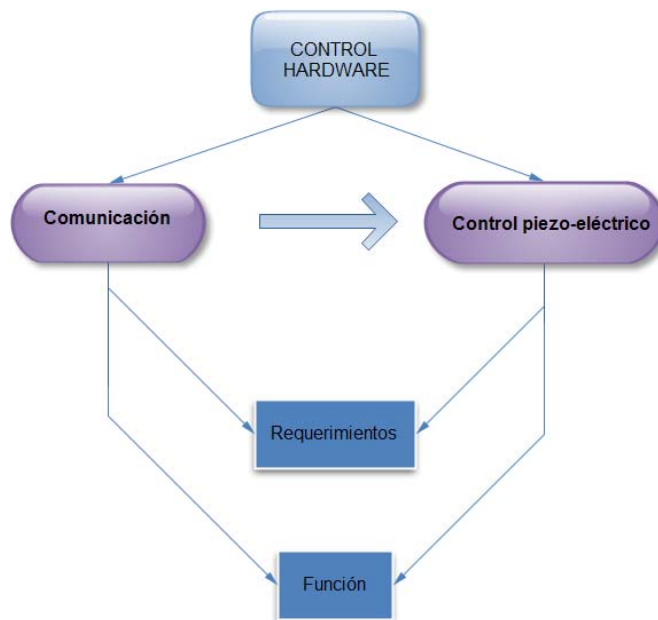
4.4.2. Procesamiento de imagen. La digitalización deja los datos con un formato adecuado para su manipulación por parte del computador. El procesamiento de la imagen es realizado sobre el software MATALB, ya que este posee varias herramientas para el procesamiento de imágenes.

- **Detección de máximos:** este algoritmo está basado en el interferograma creado por la fuente de luz policromática, el cual presenta un máximo de intensidad en los puntos donde la diferencia de camino óptico es cero (contacto óptico). La función principal del algoritmo es localizar la posición de máxima intensidad del interferograma para todos los puntos de la imagen de la muestra y almacenarlos. El método utilizado consiste en desplazar la muestra verticalmente con ayuda del actuador piezo-eléctrico, cuya función es desplazar la franja de intensidad máxima del interferograma para el área de estudio. Los pasos del actuador piezo-eléctrico son guardados para formar una imagen o matriz de rango, que llegue a contener los 256 niveles, asociando a cada nivel una altura respectiva.
- **Mejoramiento de la imagen:** Luego de realizar el procesamiento dinámico de la imagen en el cual se hace análisis temporal de la intensidad de cada *pixel* para cada desplazamiento del piezo y adquisición (Detección de máximos) se procede a mejorar el contraste de intensidades y posterior a esto se filtra para reducir el posible ruido típico de los sistemas de adquisición, así como los puntos no calculados debido a imperfecciones en la superficie física de la muestra.

5. IMPLEMENTACIÓN DE LA COMUNICACIÓN Y CONTROL PIEZO-ELÉCTRICO

Para la construcción y desarrollo del sistema de control hardware del actuador piezo-eléctrico fue necesario desarrollar un modelo conceptual de todo el sistema en donde se especifican bloques o etapas, dividiendo así funciones y requerimientos para cada bloque del sistema, este diagrama de bloques se ilustra en la figura 22.

Figura 22. Diagrama de bloques del control hardware



Fuente: Autores

5.1. COMUNICACIÓN

5.1.1 Requerimientos para la comunicación.

- Comunicación vía USB
- Fácil integración con MATLAB (acceder desde MATLAB al puerto USB).
- Alta velocidad de comunicación para soportar el flujo de datos requerido.

5.1.2. Función

- Comunicar el PC y con el bloque de control del actuador piezo-eléctrico vía bus USB.

5.1.3 Generalidades del bus de datos USB.

- **Descripción del bus de datos USB:** el USB es un bus punto a punto: ya que el lugar de partida es el PC o *hub*, y el otro extremo es un periférico u otro PC. Solo existe un solo *host* (PC) en una arquitectura USB. Algunos periféricos incluyen un *hub* integrado, como el teclado USB, al que se le puede conectar un Mouse USB. Los periféricos comparten la banda de paso del USB. El protocolo se basa en el llamado paso de testigo (token). El PC proporciona el testigo al periférico seleccionado y seguidamente, éste le devuelve el testigo en su respuesta. Este bus permite la conexión y la des-conexión en cualquier momento sin necesidad de apagar el equipo.
- **Características de transmisión:** la norma USB 1.1 define dos modos de transferencia full-speed (velocidad completa) a 12 Mbps y low-speed (baja velocidad) a 1,5 Mbps. USB 2.0 añade un nuevo modo a 480 Mbps, denominado high-speed (alta velocidad). Los dispositivos high-speed también soportan una mínima funcionalidad en modo full-speed, de forma que cuando se conectan a un puerto que está trabajando en modo full-speed, pueden (al menos) detectar y procesar el reset, y aceptar, procesar y responder adecuadamente a las funciones estándar de asignación de dirección y de configuración, así como a las de lectura de la información descriptiva del dispositivo y de sus posibles configuraciones (descriptores). Esta funcionalidad mínima permite que el sistema pueda detectar, identificar y configurar a los dispositivos high-speed aunque se conecten a puertos full-speed. Por su parte, los concentradores high-speed soportan en sus puertos downstream (puerto para la conexión de un periférico) los tres modos de funcionamiento (low, full y high-speed), de manera que admiten la conexión de cualquier dispositivo o concentrador USB 1.x y USB 2.0. Asimismo, soportan en sus puertos upstream (puerto para la conexión de un PC o *hub*) los modos full y high-speed de manera que se pueden conectar a cualquier concentrador o controlador USB 1.x o USB 2.0. Esto quiere decir que en un mismo sistema USB pueden coexistir dispositivos y concentradores USB 1.x y USB 2.0 (Low, Full y High Speed).

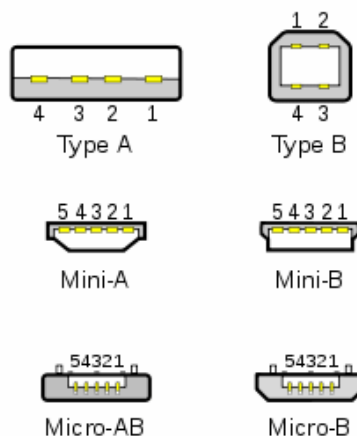
Los dispositivos USB se clasifican en cuatro tipos según su velocidad de transferencia de datos:

- **Baja velocidad (1.0):** Tasa de transferencia de hasta 1,5 Mbps (192 KB/s). Utilizado en su mayor parte por dispositivos de interfaz humana (HID) como los teclados, los ratones, hornos microondas y artículos del hogar.
 - **Velocidad completa (1.1):** Tasa de transferencia de hasta 12 Mbps (1'5 MB/s) según el estándar USB 1.1. Ésta fue la más rápida antes de la especificación USB 2.0, y muchos dispositivos fabricados en la actualidad trabajan a esta velocidad. Estos dispositivos dividen el ancho de banda de la conexión USB entre ellos, basados en un algoritmo de impedancias LIFO (último en entrar, primero en salir).
 - **Alta velocidad (2.0):** Tasa de transferencia de hasta 480 Mbps (60 MB/s) pero por lo general de hasta 125Mbps (16MB/s). Utilizado en dispositivos JVC.
- **Interfaz física:** a nivel eléctrico, el cable USB transfiere la señal y la alimentación sobre 4 hilos, esta distribución se observa en la figura 23 y la descripción de cada uno de ellos se muestra en la tabla 1.

Tabla 2. USB pines

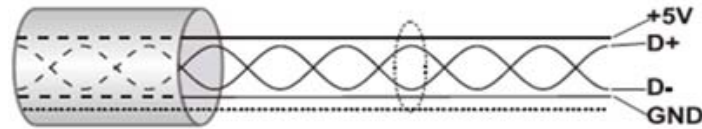
Pin	Nombre	Color cable	Descripción
1	Vcc	Rojo	+5V
2	D-	Blanco	Data -
3	D+	Verde	Data +
4	GND	Negro	Tierra

Figura 23. USB conectores y distribución de pines.



Fuente: leadsdirect.

Figura 24. Estructura del cable USB.

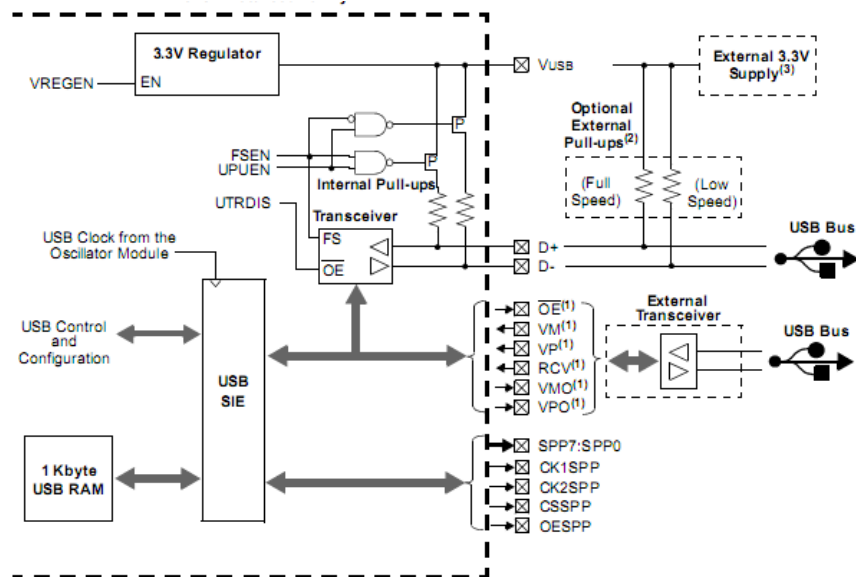


Fuente: leadsdirect

- **Características:** El puerto proporciona la tensión nominal de 5 V. Una resistencia de terminación instalada en la línea de datos permite detectar el puerto y conocer su configuración (1,5 o 12 Mbits/s). En términos de señal, se trata de un par trenzado con una impedancia característica de 90Ω . La velocidad puede ser tanto de 12 Mbits/s como de 1,5 Mbits/s. La sensibilidad del receptor debe ser de, al menos, 200mV y debe poder admitir un buen factor de rechazo de tensión en modo común. El reloj se transmite en el flujo de datos, la codificación es de tipo NRZI, existiendo un dispositivo que genera un bit de relleno (bit stuffing) que garantiza que la frecuencia de reloj permanezca constante. Cada paquete va precedido por un campo de sincronismo.
- **Consumo de potencia:** tanto el PC como el dispositivo que se le conecta a este, debe proporcionar una determinada potencia máxima siendo el PC el encargado de suministrar la energía. Además, el periférico puede estar autoalimentado (self powered). El ordenador gestiona el consumo, teniendo capacidad de poner en reposo (suspend) o en marcha a un periférico USB. En reposo, este reduce su consumo (si puede), quedándose la parte USB funcional. Este puerto sólo admite la conexión de dispositivos de bajo consumo, es decir, que tengan un consumo máximo de 100 mA por cada puerto; sin embargo, en caso de que estuviese conectado un dispositivo que permite 4 puertos por cada salida USB (extensiones de máximo 4 puertos), entonces la energía del USB se asignará en unidades de 100 mA hasta un máximo de 500 mA por puerto.

5.1.4 Implementación de la comunicación USB. El establecimiento de la comunicación USB entre el PC y el control del actuador piezo-eléctrico se hace gracias al microcontrolador PIC 18f2550, el cual fue seleccionado ya que cuenta con un transceptor de USB 2.0, ilustrado en la figura 25.

Figura 25. Transceptor de USB 2.0 del PIC 18f2550



Fuente: Datasheet PIC 18f2550

El puerto USB para la comunicación, tiene tres formas distintas de ser utilizado:

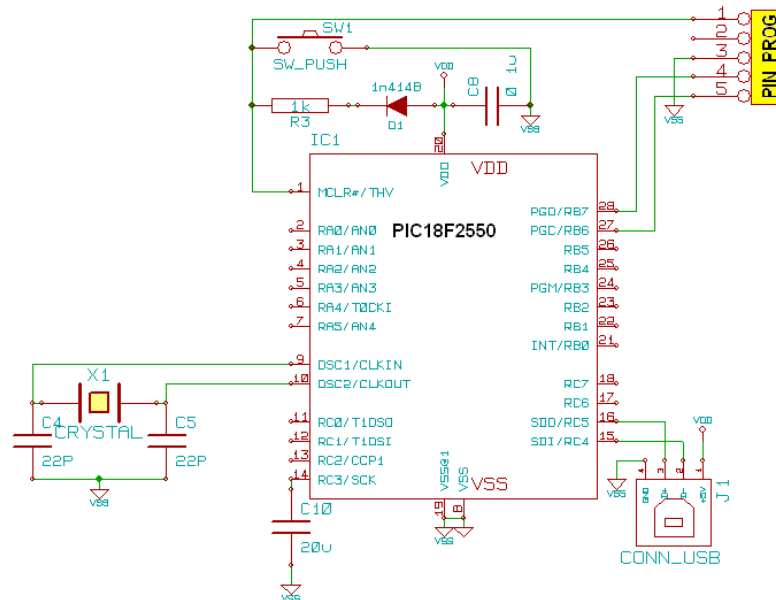
- **HID:** esta cuenta con baja velocidad de comunicación y no necesita instalar drivers.
- **CDC:** la velocidad de comunicación es media y es necesario instalar un driver (controlador de dispositivo) suministrado por el compilador.
- **DLL:** cuenta con alta velocidad de comunicación y al igual que la anterior es necesario instalar driver, además de requerir uso de una, DLL ambos suministrados por Microchip.

Se optó por la opción CDC ya que permite mediante la programación del microcontrolador PIC 18f2550 realizar uno o varios VPC (puerto serie virtual) lo cual permite la fácil integración con el Software MATLAB.

Para el control de la comunicación por medio del PC utilizando MATLAB, es necesario programar el microcontrolador para que emule un puerto serie virtual (VCP), ya habiendo emulado el puerto serie virtual, programar un puerto serie mediante MATAB resulta muy sencillo. La programación del firmware (*programación en firme*, ver anexo C) del microcontrolador se realizo en C

utilizando Piklab* con el compilador SDCC integrado, el cual proporciona dos librerías necesarias para la comunicación USB; “usb_cdc.h” la cual es la encargada configurar el VCP y la librería “usb_desc_cdc.h” la cual permite configurar el VID y PID del dispositivo conectado al PC para que este, enumere y enlace al firmware del microcontrolador y con el driver del mismo. El driver es proporcionado por *microchip*† de forma gratuita para ser posteriormente editado, para lograr la comunicación y, la correspondencia de VID y PID del firmware del microcontrolador, cuando este es conectado al PC. El circuito y los componentes necesarios para el funcionamiento del microcontrolador se observan en la figura 26.

Figura 26. Esquema básico de conexión para el PIC18F2550



Fuente: Datasheet PIC 18f2550.

5.2. CONTROL DEL ACTUADOR PIEZO-ELÉCTRICO

Con base a los resultados obtenidos en la caracterización‡ del actuador piezo-eléctrico se determinó el mejor intervalo de control en tensión, para desplazar el actuador piezo-eléctrico, el cual es: 0-30 voltios, en donde la histéresis del actuador piezo-eléctrico es la menor en todo el desplazamiento de este. La

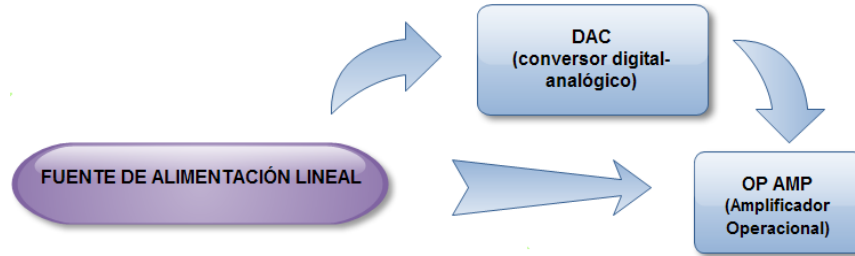
* IDE para la programación de microcontroladores PIC, distribuido por GNU, bajo la licencia GPL.

† Para mayor información: www.microchip.com

‡ Tesis: CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE DESPLAZAMIENTOS NANOMÉTRICOS CON MICROSCOPIA INTERFEROMÉTRICA

topología implementada para la construcción del control del actuador piezo-eléctrico, se puede observar en la figura 27. La estrategia es generar pasos de 40mV con el DAC en un rango de tensión de 0-5V_{DC}; y amplificar esta señal con un OP AMP seis veces, para obtener el rango del control del piezo-eléctrico de 0-30V_{DC} requerido.

Figura 27. Diagrama de bloques del la etapa Control Piezo-Eléctrico.



Fuente: Autores.

5.2.1. Requerimientos.

- Proporcionar una tensión de 0-30 voltios con una resolución de 40 mV al actuador piezo-eléctrico.
- Desplazar el actuador piezo eléctrico 6.5 micrómetros a una resolución de 5 nanómetros.

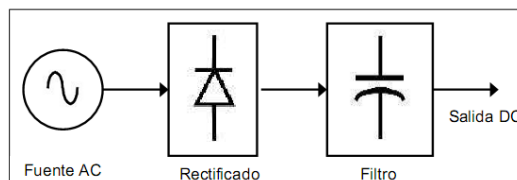
5.2.2. Función.

- Controlar el movimiento en el eje z (altura) del actuador piezo-eléctrico.

5.2.3 Generalidades.

- **Rectificador** el rectificador es un circuito cuyo objetivo es convertir una tensión AC de entrada en una tensión DC, el esquema general del convertidor AC-DC está representado en la figura 28.

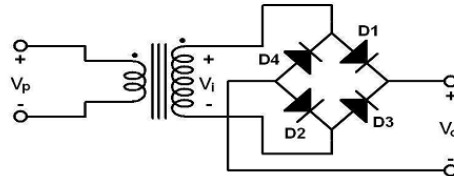
Figura 28. Esquema de un convertidor AC-DC



Fuente Autores.

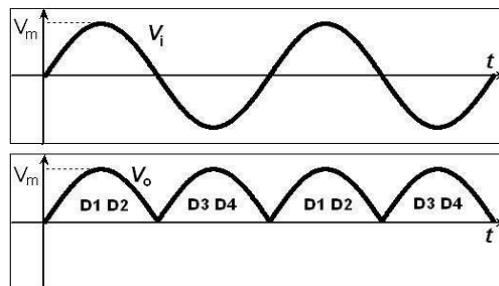
- **Puente rectificador de onda completa:** la figura 29 muestra un circuito conocido como rectificador en puente (debido a la similitud con la del puente de Wheatstone), no requiere de transformador con derivación central, lo que representa una ventaja distintiva sobre otros circuitos rectificadores, Sin embargo, el uso de dos diodos simultáneamente en conducción hace que el voltaje de salida disminuya, además de requerir cuatro diodos.

Figura 29. Puente rectificador de onda completa.



Fuente: Autores.

Figura 30. Formas de onda de entrada salida del puente rectificador de onda completa.



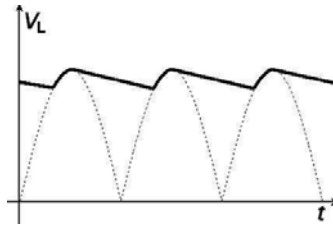
Fuente: Autores.

El voltaje inverso pico que deben soportar los diodos en esta configuración es V_i . El valor de DC de la señal salida es:

$$V_{c,d} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} V_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt = \frac{2V_m}{\pi} \quad (8)$$

- **Filtros:** como la señal de salida de un circuito rectificador es una señal pulsante, lo cual la hace inapropiada en ciertas aplicaciones. Por esta razón se hace necesario utilizar filtros para minimizar la naturaleza pulsante de la señal, de tal forma que la salida sea suavizada. Los filtros comúnmente utilizados son de tipo L, C y electrónicos, dependiendo de la aplicación y las especificaciones del circuito. La forma de onda de la salida de un filtro tipo C se observa en la figura 31.

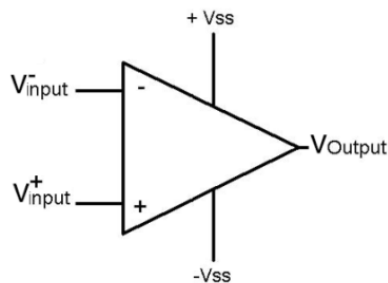
Figura 31. Salida de un rectificador de onda completa con filtro capacitivo.



Fuente: Autores.

- **Regulador de tensión:** el propósito del regulador de tensión es mantener la tensión de salida " V_o " en un valor predeterminado, sobre el rango esperado de corriente de carga, independientemente de las variaciones de la corriente de la carga, la tensión de entrada al regulador V_i y la temperatura T , además de atenuar el rizado.
- **DAC:** el conversor digital-analógico o DAC es un dispositivo encargado de convertir señales digitales en señales de corriente o de tensión analógica.
- **Amplificador operacional (OP AMP):** la función del amplificador operacional es captar la diferencia entre las señales de voltaje aplicadas en sus dos terminales de entrada es decir; $(V^{+input} - V^{-input})$ donde V^{+input} es la entrada no inversora y V^{-input} es la entrada inversora, multiplicar eso por un número A y provocar que la señal de salida sea $A(V^{+input} - V^{-input})$, aparezca en V_{output} . En la figura 32 podemos observar la representación gráfica del amplificador operacional ideal.

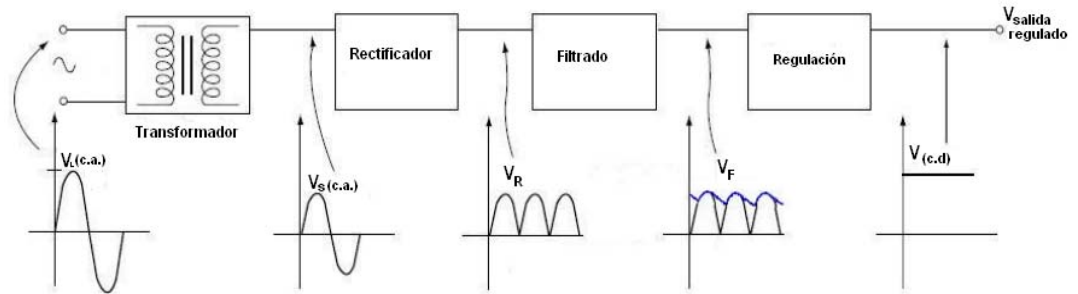
Figura 32. AMP OP ideal.



Fuente: Autores.

5.2.4 Circuito fuente de alimentación lineal. La topología implementada para generar la tensión requerida para hacer desplazar el actuador piezo-eléctrico es la de una fuente lineal de alimentación, ya que esta logra satisfacer los requerimientos del sistema, tales como intervalo de tensión y precisión. La fuente de alimentación lineal está compuesta por 4 bloques, ilustrados en la figura 33.

Figura 33. Diagrama de bloques: Fuente de alimentación lineal.



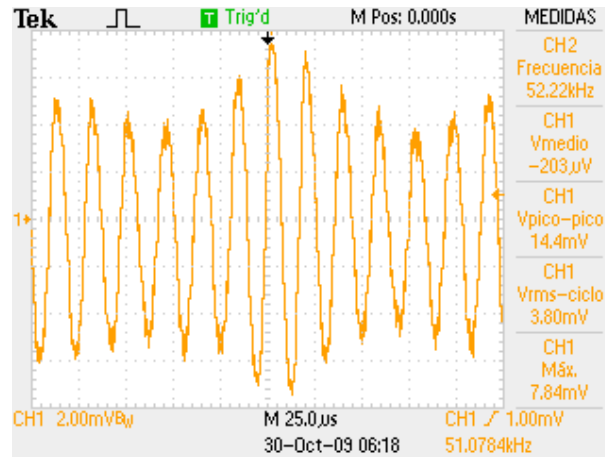
Fuente: Autores

- **Transformador reductor:** El primer bloque es un transformador- reductor de voltaje, como su nombre lo indica, disminuye por inducción el voltaje. De los $120 V_L$ (AC-RMS) que hay en el primario, en el secundario puede tener $30V_s$ (AC-RMS).
- **Rectificador:** El siguiente bloque es un puente rectificador de onda completa construido por 4 diodos de referencia 1N4007 (V_R).
- **Filtrado:** El filtrado, que es la tercera etapa de la fuente alimentación lineal, este se realiza mediante un capacitor de $1000\mu F$ seleccionado de acuerdo a la ecuación 5.9 para obtener un voltaje de rizado (V_F) menor a $20mV_{P-P}$.

$$V_F = \frac{1}{2\sqrt{3}f c R_L} \quad (5.9)$$

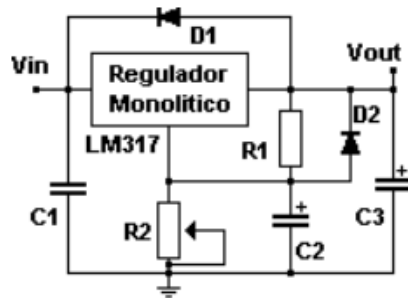
- **Regulación:** En el último bloque, el regulador de voltaje, se encarga de reducir el rizado y de proporcionar un voltaje de salida de la tensión exacta que se desea, en la figura 31 se puede observar el montaje realizado para este bloque, el circuito integrado utilizado fue el LM317 ya que cuenta con un factor de rechazo al rizado de 80dB, el cual cumple con los requerimientos del bloque de regulación, que era entregar un señal de salida con un rizado por debajo de $20mV_{P-P}$. La señal de salida de esta etapa se puede observar en la figura 34 en donde se observa V_F igual a $14.4mV_{P-P}$.

Figura 34. Señal obtenida a la salida del bloque de regulación.



Fuente: Autores

Figura 35. Circuito regulador de tensión



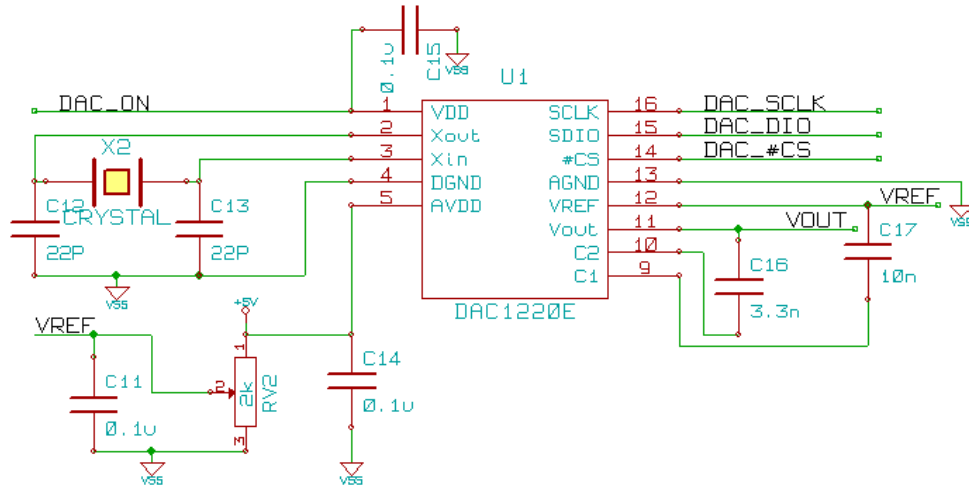
Fuente: Hoja de datos del LM317.

En la figura 35 podemos observar la topología implementada con el regulador LM317 para la bloque de regulación, donde el capacitor C1 con un valor de 1000µF se encarga de la rectificación de la señal de entrada, el capacitor C3 con un valor de 1µF de tantalio es el encargado de mejorar la respuesta a transitorios, el C2 con un valor de 10µF electrolítico en paralelo con R2 cumple el propósito de mejorar el rechazo del rizado. Los diodos D1 (1N4004) y D2 (1N4004) son los encargados de proteger el regulador contra posibles cortos circuitos en la entrada del regulador y para proteger al regulador contra

posibles cortos circuitos en la salida al dar camino a la descarga de capacitores.

5.2.5 Etapa de conversión. El DAC (convertor digital-analógico) seleccionado para hacer la conversión de la señal digital proporcionada por el microcontrolador a una señal analógica, es el DAC1220 de Texas Instruments, este cuenta con las características necesarias requeridas por el sistema, tales como: el tipo de comunicación (SPI), la resolución en bits (20bits) y su alta linealidad. En la tabla 3 podemos observar las características generales del DAC 1220E. El circuito y los componentes necesarios para el funcionamiento del DAC1220E se observan en la figura 36.

Figura 36. Esquema básico de conexión para el DAC1220E.



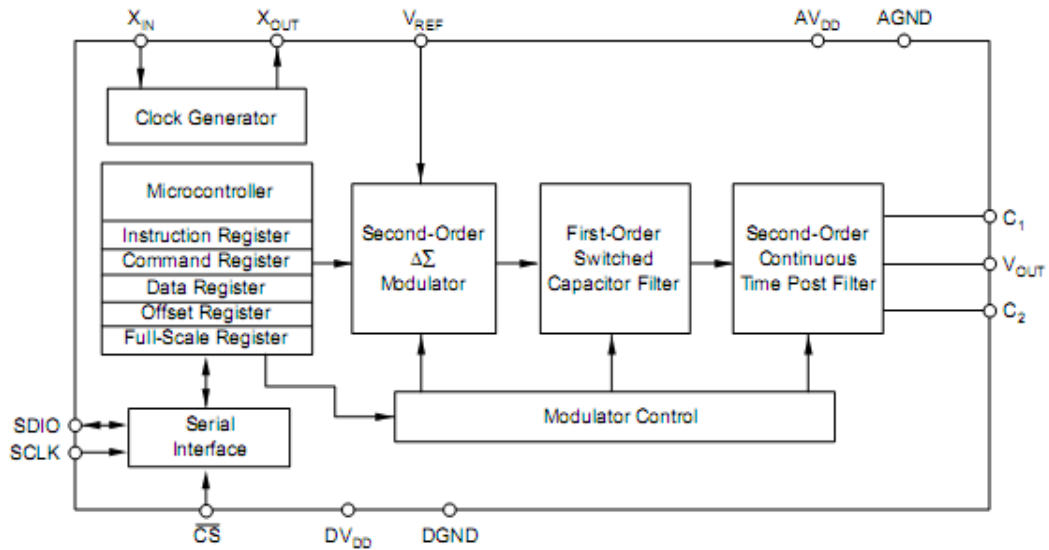
Fuente: Autores

Tabla 3. Características generales del DAC1220E

Parámetro	Características	Valor
Resolution	Resolución máxima	20 bits
Linearity Error	Error de linealidad	±0.0015%
Power Dissipation	Consumo de potencia	2.5mW
Interface	Modo de comunicación	SPI

Los módulos que constituyen la estructura interna del convertor digital-analógico se pueden observar en la figura 37.

Figura 37. Estructura interna del convertor digital-analógico DAC1220



Fuente: Data Sheet DAC1220E

5.2.6 Etapa de amplificación. Como su nombre lo indica esta etapa es la encargada de amplificar la señal obtenida del DAC. Para esta labor fue necesario seleccionar un amplificador operacional. El amplificador operacional, es un dispositivo electrónico, que cuenta con muchos parámetros que deben ser considerados acorde con la aplicación. En esta aplicación en particular las características más relevantes, que se deben tener en cuenta se describen en la tabla 4:

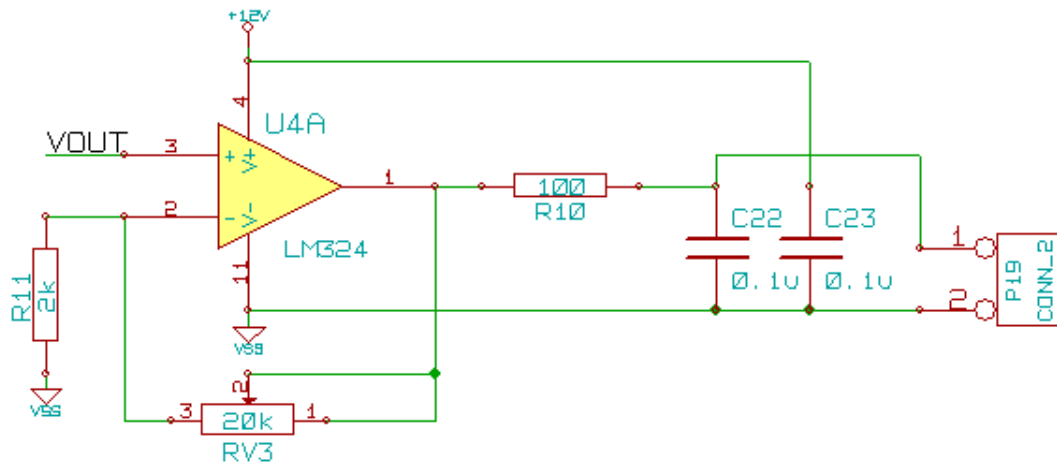
Tabla 4. Principales parámetros del OP AMP.

Parámetro	Características	Valor recomendado
Vout	Voltaje de salida	Mayor a 30V
PSRR	Rechazar las variaciones de la fuente	Alto (≈ 100 dB)
Voltage Offset	Voltaje no deseado en la entrada	Bajo ($\approx 100\mu V$)
Vcc	Voltaje de alimentación	Mayor a 30V

El amplificador operacional seleccionado, es el LM324 ya que cuenta con un V_{out} máximo de 32V, PSRR igual a 110dB y un Voltage Offset de 2mV acordes con los requerimientos de esta aplicación, además de ser uno de los más utilizados y de fácil adquisición en el mercado local. La configuración circuital

implementada para lograr un ganancia de 6v/v con el LM324 se observar en la figura 39.

Figura 39. Configuración no inversora para el LM324.



Fuente: Autores

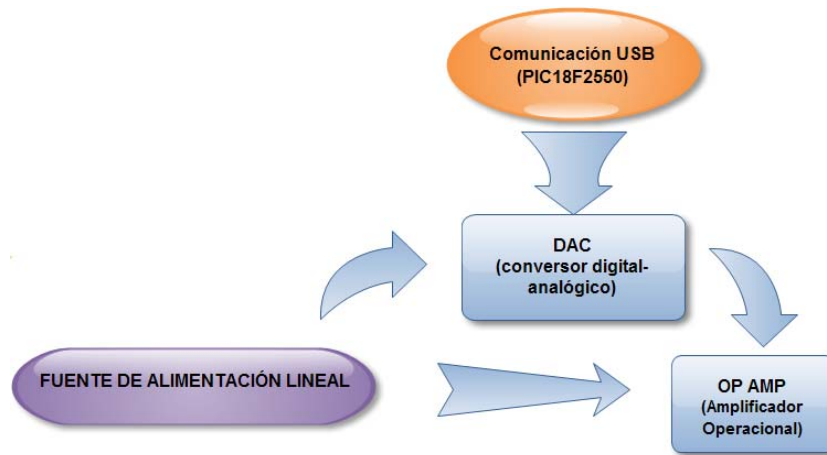
6. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL HARDWARE

En esta capítulo se describirá el sistema control final hardware implementado para controlar el actuador piezo-eléctrico.

6.1 DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL

En la figura 40 se ilustra el diagrama de bloques del sistema control hardware implementado para hacer el control del desplazamiento del actuador piezo-eléctrico.

Figura 40. Diagrama de bloques general del sistema control hardware para el actuador piezo-eléctrico.



Fuente: Autores

6.2 DIAGRAMA CIRCUITAL GENERAL

El diagrama circuital en donde se muestra todos los dispositivos involucrados en la etapa control hardware se pueden observar en el Anexo D.

La herramienta software utilizada para la captura de esquemáticos y diseño del circuito impreso o PCB es KICAD*, este software multiplataforma libre y de código abierto, bajo la licencia GPL2. El software comprende un gestor de proyectos y cuatro herramientas de diseño EESchema (Capturador de

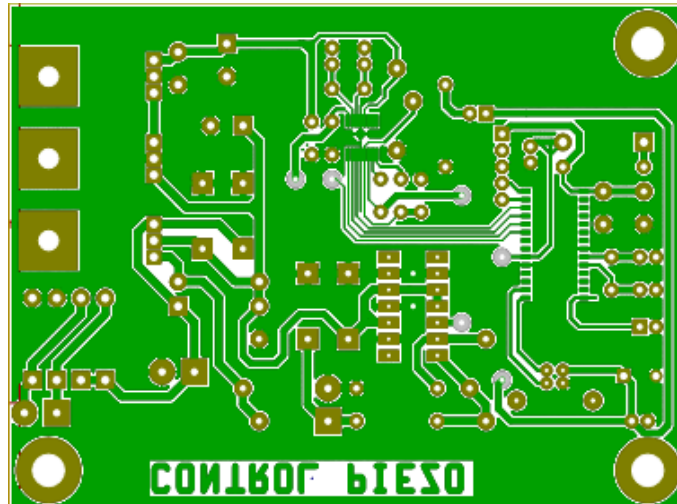
* Información sobre KICAD: http://kicad.sourceforge.net/wiki/index.php/Main_Page

Esquemáticos), CVpcb (asociar componentes con las huellas), PCBnew (Para diseño del PCB), y GerbView (Visor de archivos Gerber).

6.3.1 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL PCB

Para el diseño del circuito impreso se deben tener en cuenta varias consideraciones, pero generalmente las más importantes son: el acople capacitivo entre pistas y la variación de la fuente de alimentación. Por esta razón la mejor técnica para el diseño, es separar el área del PCB en diversas zonas, de acuerdo al tipo de señal que se maneja, en la figura 41 se muestra el PCB realizado.

Figura 41. diseño del circuito impreso (PCB)



Fuente: Autores

7. METODOLOGIA Y DESARROLLO DEL SOFTWARE SISNA

7.1 INTRODUCCION

El proceso de desarrollo de software es una actividad compleja, que demanda gran esfuerzo humano, tiempo y costos. El éxito de un proyecto de desarrollo de software se mide mediante estos dos últimos factores pero agregando la condición de la calidad del software. Para manejar estas tres variables se deben implementar metodologías y procesos afines a cada tipo de desarrollo.

7.2 ALCANCES DEL SOFTWARE

Los alcances del software son específicos y hacen parte de la totalidad del sistema, ya que este proyecto involucra un desarrollo de Hardware con sus propios alcances pero consecuentes con el desarrollo del software y viceversa.

Se definieron los siguientes alcances para la aplicación SISNA:

- Entregar un software totalmente funcional en cuanto a la comunicación con el microcontrolador 18f2550 de Microchip, a demás la aplicación debe ser capaz de realizar adquisición y captura de imágenes desde la cámara EO-5012 de Edmund Optics conectada a un microscopio interferométrico NIKON.
- Procesamiento de las imágenes para la realizar mediciones necesarias en la superficie de las muestras a escala manométrica.
- Generación de reportes de las mediciones realizadas, en cualquiera de los formatos (HTML, .doc o Látex)
 - ✓ Reporte de Imagen de Rango
 - ✓ Cortes transversales de la superficie de la muestra

Además de estos alcances se debe garantizar la calidad del software, de manera que se puedan hacer posteriores desarrollos e implementaciones (escalabilidad), por lo tanto se entregara una buena documentación del proyecto desde la etapa de comunicación hasta el aplicativo como tal.

7.3 METODOLOGIA DE DESARROLLO

Presupuestar el tiempo de un proyecto que involucra desarrollo de software no es una tarea fácil, y casi siempre se hace con base en datos históricos y también en la experiencia de personas que han realizado proyectos similares.

El desarrollo de software científico y de ingeniería difiere en este sentido de el desarrollo de los sistemas de gestión y ERP's para las empresas, ya que al ser proyectos de investigación no se tienen antecedentes de proyectos parecidos o son un recurso muy escaso y difícil de conseguir, al igual que personas especializadas en desarrollar el tipo de aplicación específica que se pretende desarrollar.

Para el desarrollo del SISNA se hizo uso de la metodología RUP de Rational Software Corporation ya que es configurable y permite ajustarse a las características específicas de un proyecto en los factores de tamaño y complejidad lo cual significa que se adapta tanto a pequeños desarrollos como a grandes organizaciones buscando la mejor calidad dentro de un tiempo y presupuesto previsible haciendo uso del estándar UML.

RUP está basado en lo que se consideran las mejores prácticas de desarrollo de software las cuales son:

- Desarrollo Iterativo del software: Dado la complejidad del software no es posible definir el problema completo de forma secuencial, hacer un diseño total, desarrollarlo y hacer pruebas. En su defecto el enfoque iterativo permite el avance en el entendimiento del problema a través de refinamientos sucesivos, lo cual permite introducir cambios en los requerimientos, características del sistema, o en los tiempos.
- Gestión de Requerimientos: Los requerimientos funcionales se hacen mediante Casos de Uso y escenarios Estos requerimientos se describen, organizan y documentan.
- Uso de arquitecturas basadas en componentes: La arquitectura debe estar basada en componentes software reutilizables de forma que sea flexible y fácil de modificar.
- Modelamiento visual del software: Se utiliza UML, las abstracciones visuales ayudan a comunicar diversos aspectos del software, ayudan a mantener la consistencia entre un diseño y su puesta en marcha, y favorecen la comunicación inequívoca.
- Verificación de calidad: Se diseñan y realizan pruebas que verifiquen la confiabilidad, integridad y rendimiento del software.
- Control de cambios: Se deben manejar los cambios de forma que cada cambio sea aceptable y se pueda continuar con los mismos. El proceso

describe cómo controlar, seguir y supervisar cambios para permitir el desarrollo iterativo acertado.

El ciclo de vida del software en la metodología RUP está particionado en cuatro ciclos, cada uno trabaja en una nueva generación del producto. El RUP divide un ciclo de desarrollo en cuatro fases consecutivas.

- Fase de inicio (*inception*): Durante esta fase se debe establecer el alcance del proyecto y el “caso de negocio”. Esto se logra identificando todas las entidades externas con las cuales el sistema interactúa y se define la naturaleza de esta interacción a un nivel alto, lo cual implica identificar los casos de uso y escribir solo los más significativos. El caso de negocio incluye criterios de éxito, la evaluación de riesgos, y la estimación de los recursos necesarios, y un plan de la fase que muestre las fechas previstas e hitos importantes.
- Fase de elaboración: En esta fase de elaboración se debe analizar el dominio del problema, establecer la arquitectura, desarrollar el plan del proyecto, y eliminar los elementos del riesgo más alto del proyecto. Para lograr estos objetivos, se debe tener una visión completa del sistema. Las decisiones arquitectónicas tienen que tomarse con una comprensión cabal del sistema: su alcance, funcionalidad importante y requerimientos no funcionales tales como requerimientos de Desempeño.
- Fase de construcción: Durante esta fase todos los componentes y características restantes se desarrollan y se integran al producto. La fase de la construcción es, es un proceso donde el énfasis se orienta a manejar los recursos y controlar las operaciones para optimizar costos, tiempos y calidad. El proceso de desarrollo escogido para la fase de construcción de este proyecto (SISNA) es el proceso de desarrollo evolutivo.
- Fase de transición: En esta fase se lleva a cabo la transición del producto de software al ambiente de producción. Una vez que el producto se ha entregado al usuario final, surgen nuevos aspectos que conllevan al desarrollo de nuevas versiones, a corregir errores, o a terminar algunas características que habían sido pospuestas.

Cada fase constituye un eslabón bien definido, un punto en el tiempo en el cual ciertas decisiones críticas deben tomarse, y por lo tanto al final las metas deben haber sido alcanzadas. Cada una de estos ciclos Cada fase de RUP

puede descomponerse en una o más iteraciones que pasan por cinco flujos de trabajo que son Requisitos, Análisis, Diseño, Implementación y Pruebas.

7.4 FASE DE INICIO

7.4.1 Requerimientos

- **Requerimientos de comunicación con Hardware de control del actuador piezo-eléctrico.**
 - La comunicación se debe realizar mediante bus de datos USB.
 - La aplicación debe enviar 2 bytes al microcontrolador y ser reconocidos por este.
 - El microcontrolador debe recibir el número enviado desde la aplicación y enviarlo al DAC (Software grabado en el microcontrolador).
 - La inicialización, comunicación, envío y recepción de datos se debe hacer tan rápido como sea posible.

- **Requerimientos de comunicación y adquisición de imágenes con cámara EO-5012**
 - La comunicación se debe realizar mediante bus de datos USB.
 - La aplicación debe poder controlar todos los factores de calidad en la adquisición de imágenes (AOI, resolución, ganancia, la velocidad de los *frames*, el tiempo de exposición, etc.).
 - La inicialización, comunicación, envío y recepción de datos se debe hacer tan rápido como sea posible.

- **Requerimientos de Funcionalidad**
 - Permitir la configuración del puerto de comunicación asociado a la etapa Hardware del proyecto la cual se debe pedir al iniciar el programa por primera vez o luego de ser reasignado el hardware a un puerto físico diferente.
 - Desplazar el actuador piezo-eléctrico en pasos de cinco a quince nanómetros, siempre partiendo desde la posición inicial (reposo) hasta una posición actual, la cual en ese momento pasara a ser la nueva posición inicial.
 - No debe generar cambios bruscos de posición en el actuador piezo-eléctrico, ya que esto reduce el tiempo de vida útil del actuador.
 - Siempre que se cierre la aplicación debe llevar el actuador piezo-eléctrico hasta su posición de reposo de manera controlada.

- La interfaz de usuario debe ser amigable e intuitiva.
- La interfaz principal debe tener un sistema de posicionamiento que permita situarse en cualquier parte del intervalo (0-6.5 μ m) indicando la posición deseada.
- Debe permitir la visualización del desplazamiento y adquisición de datos en tiempo real.
- Debe implementar un *test* (prueba) de calibración mediante interferogramas con luz policromática.
- Debe permitir generar un informe del *test* en formato .doc.
- Debe Implementar una interfaz para generación de topografía de superficies de materiales con alturas no mayores a los 100 nm mediante algoritmos de detección de máximos y mínimos desarrollados por el Dr. Arturo Plata.
- Debe permitir realizar mediciones en las superficies obtenidas.
- Debe permitir generar un informe de la prueba en formato .doc.
- La interfaz principal debe tener un acceso a una ayuda para Usuario y para desarrollador.
- Toda la aplicación debe estar correctamente documentada y el código fuente debe ser ordenado y descrito debidamente.

7.4.2 Usuarios del sistema. El tipo de Usuarios que utilizara la aplicación será:

- Usuario: Debe estar calificado para manipular el microscopio (focalizar imagen, verificar que el contacto óptico coincida con el foco), por lo general será un estudiante de maestría o doctorado de la escuela de Física. La aplicación no maneja diferentes roles de usuario.

7.4.3 Casos de uso

- **Usuario**
 - Configurar Cámara.
 - Configurar Puerto del Hardware.
 - Posicionamiento largo del actuador piezo-eléctrico (focalización).
 - Posicionamiento Fino del Actuador piezo-eléctrico.
 - Realizar *test* de calibración.
 - Exportar Resultados del *Test*.
 - Realizar estudio de nanometrología (Topografía)
 - Exportar resultados del estudio.
 - Consultar ayuda de Usuario.
 - Consultar manual de desarrollo.

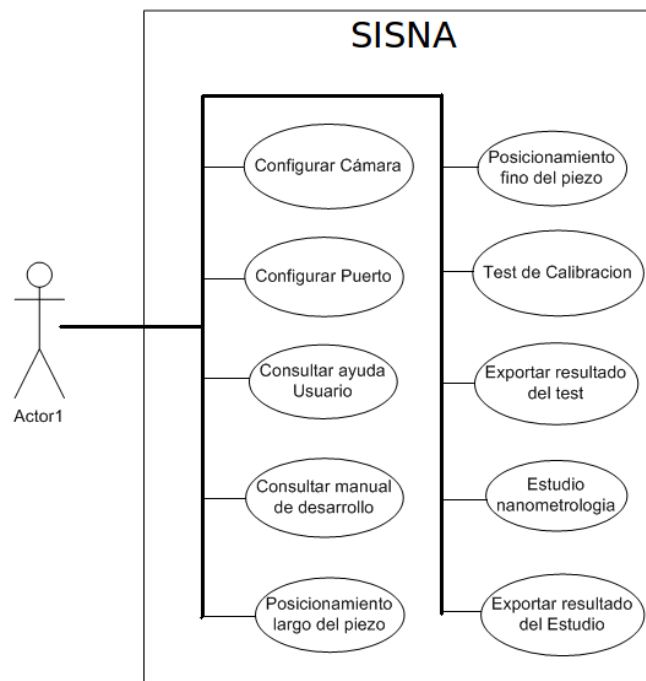
7.4.4 Descripción de casos de uso

Ver anexo A.

7.4.5 Diagramas de casos de uso del usuario

Los diagramas de casos de uso se pueden ver en la figura 42 y la descripción de cada uno de ellos se encuentra en el anexo A.

Figura 42. Diagrama de casos de uso del Usuario



Fuente: Autores.

7.4.6 Interfaces principales

- **Presentación.** En esta interfaz se muestra la versión del producto y los nombres de los desarrolladores mientras el sistema se inicializa la comunicación con el hardware de control del actuador, e inicializa la cámara y la configura en los parámetros por defecto para la adquisición de imágenes. Ver Figura 43.

Figura 43. Interfaz de presentación

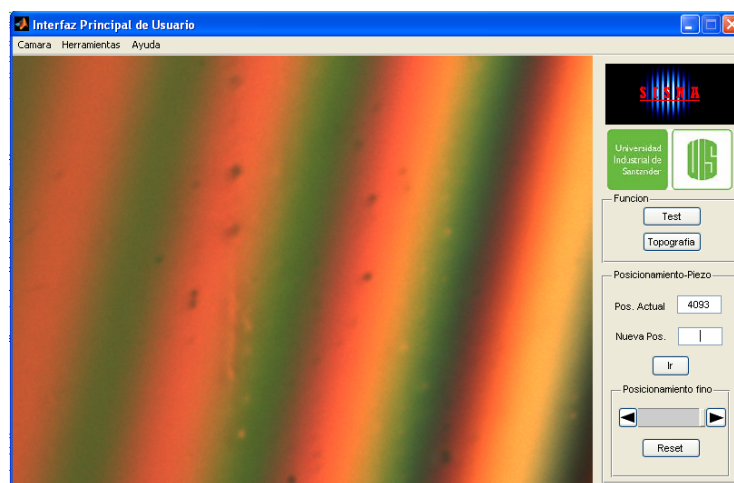


Fuente: Autores

- **Interfaz GUI:** Esta es la interfaz principal, contiene los controles para posicionar el actuador piezo-eléctrico, seleccionar el rango de muestreo, configuraciones de cámara, configuraciones de puertos, configuración de la resolución axial de desplazamiento del actuador piezo-electrico y ayuda, y el menú para realizar el *test* o realizar un estudio de nanometrología. Ver figura 44.

Esta interfaz provee mecanismos de validación que garantizan que durante la ejecución de un estudio este no sea interrumpido abruptamente.

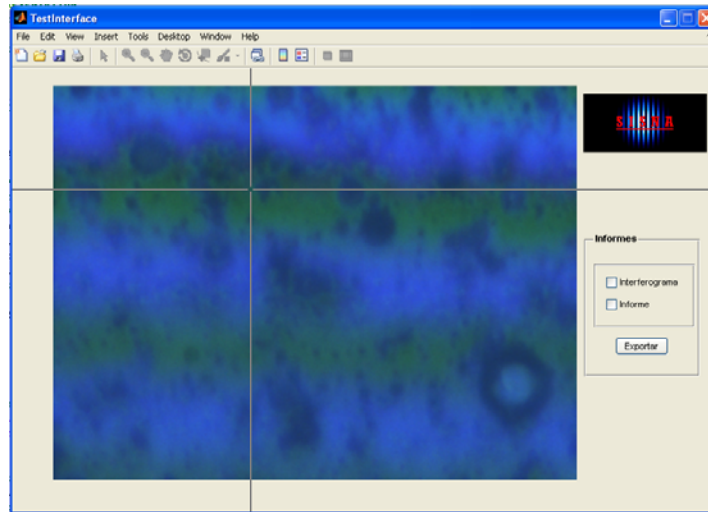
Figura 44. Interfaz GUI



Fuente: Autores.

- **Interfaz Test:** A esta interfaz solo se puede acceder si se han seleccionado los límites del intervalo de adquisición, luego de esto al haber dado *clik* en el botón “Test” del “GUI”, se despliega esta interfaz, la cual inicia a la espera de seleccionar dos pixeles en la imagen, luego de esto, ejecutara el algoritmo que permitirá encontrar el interferograma que es mostrado en la misma interfaz luego de terminado el proceso interno.
Luego de ser visualizado el interferograma se podrán exportar los datos del *test* haciendo *clik* en el botón “Exportar”. Ver Figura 45.

Figura 45. Interface para el Test

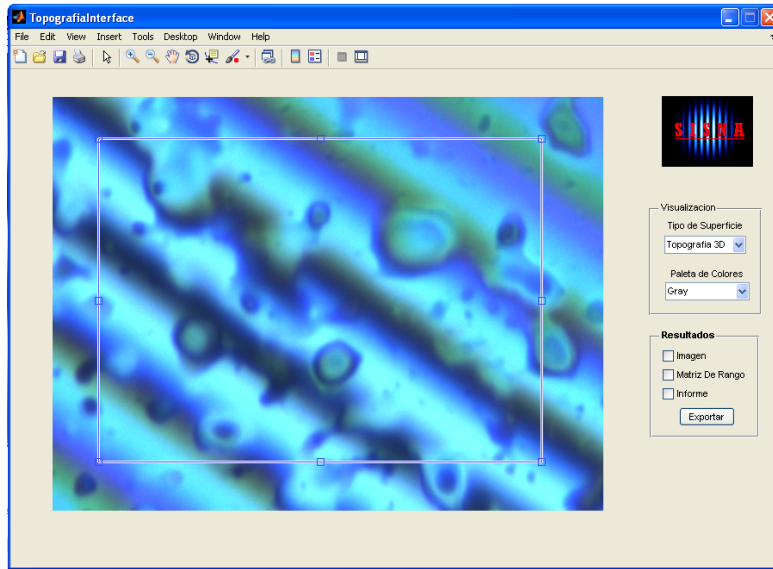


Fuente: Autores.

- **Interfaz Topografía:** A esta interfaz solo se puede acceder si se han seleccionado los límites del intervalo de adquisición, luego de esto al haber dado *clik* en el botón “Test” del “GUI” se despliega esta interfaz la cual inicia a la espera de seleccionar una región de estudio de la imagen (la cual puede ser toda la imagen), luego de esto, ejecutara el algoritmo que permitirá encontrar la topografía de la muestra en la región seleccionada la cual es mostrada en la misma interfaz luego de terminado el proceso interno.

Luego de ser visualizada la imagen topográfica se podrán realizar mediciones en esta superficie, ver cortes transversales y se podrán exportar los datos del *test* haciendo *clik* en el botón “Exportar”. Ver Figura 46.

Figura 46. Interface de Topografía.



Fuente: Autores.

- **Interfaz de ayuda:** Brinda soporte a los usuarios del sistema y a las personas que deseen mejorar la aplicación y agregarle nuevas funcionalidades (Figura 47). Contiene los manuales de usuario y una descripción detallada de los componentes del sistema como *datasheets*, información concerniente a las características de comunicación, y código fuente.

Figura 47. Interfaz de ayuda de Usuario y Desarrollador.



Fuente: Autores.

7.5 FASE DE ELABORACION

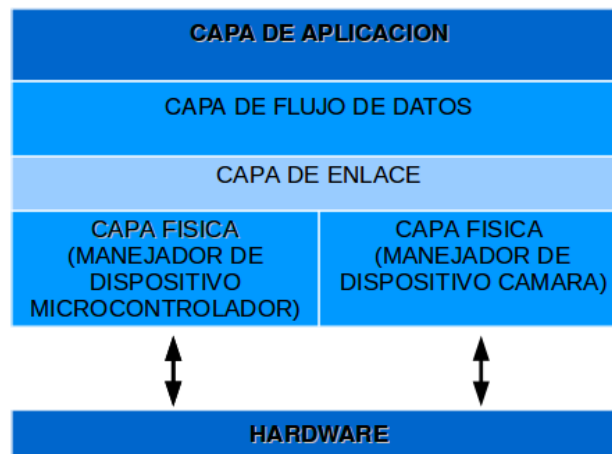
7.5.1 Dominio del problema. El desarrollo del software SISNA incluye interacción directa con dos tipos de hardware independientes (fase de control y cámara), los cuales trabajan a diferentes velocidades de transferencia de datos entre cada uno de ellos y la computadora, la aplicación debe ser lo más rápida posible lo cual significa que se debe sacar el mejor provecho a la comunicación con los dispositivos ya que cada para cada estudio de muestras o *test* se toman alrededor de mil a dos mil muestras, también significa que al tener diferentes tasas de transferencia de datos alguna de ellas representara un cuello de botella en la ejecución de la aplicación. La conexión con el microcontrolador de la fase de control del actuador es crítica y se debe tratar cuidadosamente para no dañar el cristal piezo-eléctrico ya que es un recurso de difícil adquisición.

Una vez realizada la conexión con el hardware se debe implementar una comunicación con estos que garantice la estabilidad de la aplicación y control sobre el envío y recepción de los datos en cada uno de los dispositivos.

Luego de que se ha establecido conexión con los dispositivos la aplicación debe cumplir con los requerimientos funcionales especificados y al salir de la aplicación se debe finalizar correctamente la conexión con los dispositivos.

7.5.2 Arquitectura del software. La arquitectura que se establece para el diseño del software está dividida en 4 capas Figura 48, cada una, con base en los requerimientos de comunicación y de funcionalidad.

Figura 48. Arquitectura de SISNA.



Fuente: Autores.

- **Capa de aplicación:** En esta capa se encuentran las interfaces graficas de entradas y salidas a nivel de usuario,
- **Capa de flujo de datos:** Es una capa muy importante y se asegura de enviar y recibir los datos desde y al microcontrolador y la cámara de forma correcta según los parámetros que reciba desde la capa de aplicación, está constituida por los archivos de desplazamiento del actuador piezo-eléctrico y de adquisición de imágenes los cuales deben recuperar los datos de imagen puestos en la memoria RAM por el control ActiveX* que maneja la cámara y una vez recuperados de la RAM reconstruir estos datos en una imagen como tal para hacer el procesamiento correspondiente (MEX-FILES).
- **Capa de enlace:** Esta capa es la encargada de hacer la negociación de conexión entre el *host* y los dispositivos hardware, se deben manejar los errores en caso de que esta capa falle, e intentar una nueva conexión. Las conexiones deben ser inicializadas al correr la aplicación y deben ser finalizadas al cerrar la misma. Esta capa está constituida por los archivos de inicialización del puerto COM asociado al control del actuador (microcontrolador), también la constituye el control ActiveX que maneja el hardware de la cámara.
- **Capa Física (Manejador de dispositivo de control):** Esta capa está compuesta por los *drivers* y la programación grabada en el dispositivo microcontrolador 18f2550 de Microchip. Esta capa convierte los programas en señales digitales que son enviadas al DAC de la etapa de potencia.
- **Capa Física (Manejador de cámara):** Se compone de los controladores de la cámara y la programación interna de esta, la cual interactúa con el control ActiveX para enviar las imágenes desde la cámara y para fijar los parámetros de captura del sensor.

7.5.3 Arquitectura de la comunicación con el hardware de control del actuador piezo-eléctrico. La transferencia de datos a la etapa de control y potencia es un subsistema crítico, debido a que cambios bruscos de tensión en el actuador piezo-eléctrico pueden afectar su funcionamiento óptimo y dejarlo oscilando, esto es, el actuador piezo-eléctrico solo se debe mover a pasos medidos, siempre garantizando que sea de forma incremental o

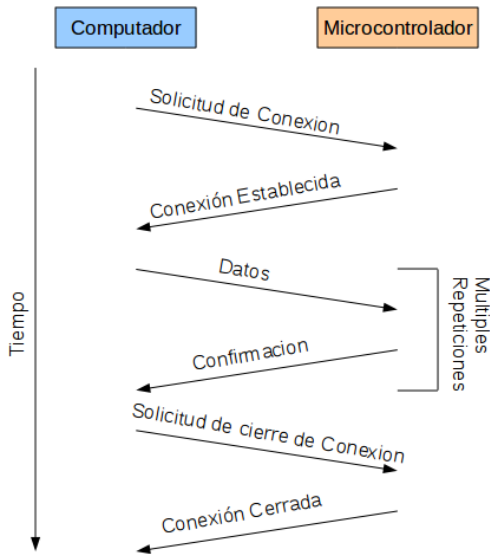
* Este control ActiveX es proporcionado por la empresa que vende la cámara.

decremental sucesiva dependiendo la dirección en la cual se desee mover, al terminar de realizar los estudios se debe hacer una finalización del sistema de forma que se lleve el actuador de forma correcta desde la posición en la cual se encuentre hasta su posición de reposo.

Para que este hardware sea reconocido se debe disponer de un driver que haga la emulación de un puerto RS-232 y lo asigne en el sistema operativo, el cual será usado desde la aplicación para realizar la conexión, esta debe tener una configuración de acuerdo a los parámetros especificados en la programación interna del microcontrolador, por lo tanto es muy importante la configuración correcta en la inicialización del puerto, ya que de esta depende que los datos se escriban y lean correctamente.

Se trabaja una transferencia de datos orientada a conexión (Figura 43) en la cual el *host* envía una señal de solicitud de conexión de acuerdo a si la asignación del puerto y si el dispositivo está listo para la transmisión de datos (controladores de dispositivos funcionando correctamente) la solicitud será aceptada o bien, se devolverá un error que debe ser manejado por la capa de enlace. Después de establecida la conexión se enviarán datos y se recibirá una confirmación de que el dato fue escrito correctamente de forma digital, tal confirmación se escribe en el *buffer* y es el cual es leído por MATLAB, de hacerse esta operación muy rápido, el buffer es llenado y la conexión falla, este es un error que debe ser manejado para mantener la integridad del actuador piezo-eléctrico. Luego de que se han terminado de enviar los datos (y se desea cerrar la aplicación) se envía el actuador a la posición inicial (estado de reposo) y se envía una señal de cierre del puerto que devuelve una confirmación, si el puerto no se puede cerrar devolverá un error y el dispositivo hardware deberá ser restablecido (manualmente) ya que si el puerto aun permanece abierto la próxima solicitud de conexión será rechazada.

Figura 49. Transferencia de datos orientada a conexión entre la aplicación en el computador y el programa en el microcontrolador.



Fuente: Autores.

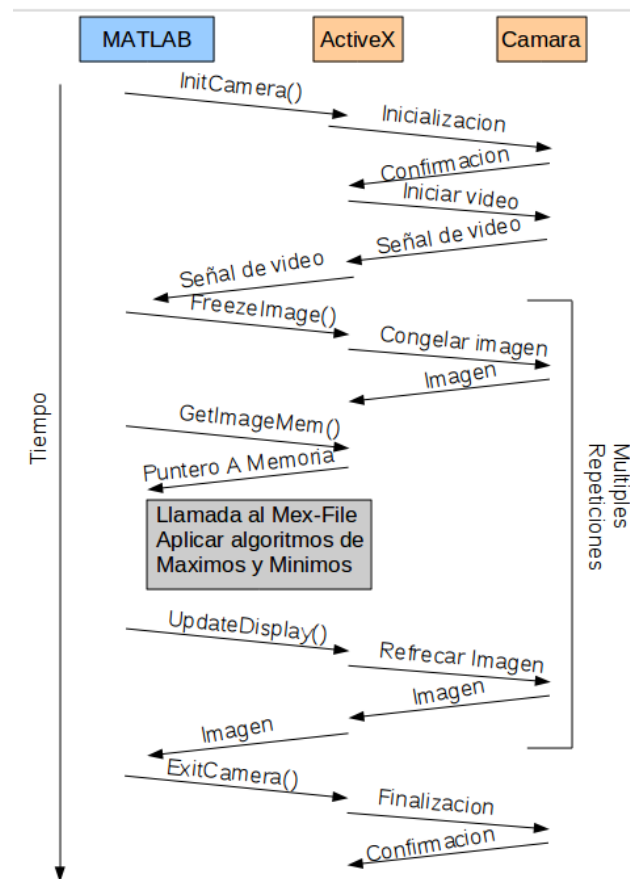
7.5.4 Arquitectura de la comunicación con la cámara para adquisición. La cámara EO-5012 de Edmund Optics viene lista para ser utilizada a nivel de usuario, incluyendo una interfaz en la que se puede visualizar en tiempo real las imágenes adquiridas por la cámara, también trae algunos ejemplos de adquisición y código fuente implementados en C++, la comunicación es realizada mediante un control ActiveX el cual es la interfaz del desarrollador que quiere crear aplicaciones utilizando esta cámara, el control ActiveX se encarga de operar sobre la cámara, comunicarse con el microcontrolador interno de esta, y asignar la imagen en memoria a la cual se accede mediante punteros a esta dirección de memoria; MATLAB basa su programación en Java lo cual significa que no maneja punteros directamente, pero es capaz de implementar funciones creadas en C (con manejo de punteros) mediante archivos compilados en MATLAB llamados MEX-Files[†], mediante esta función es posible recuperar los datos asignados en estas direcciones de memoria RAM que luego deben ser reconstruidos en la aplicación de MATLAB que llama al MEX-File.

Toda solicitud que se hace a la cámara se hace implementando funciones del ActiveX, el flujo de datos se puede observar en la Figura 45

[†] Para mas informacion ver anexo B

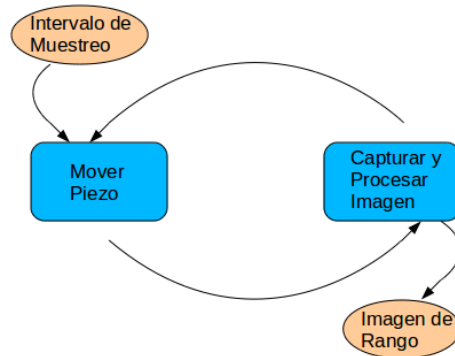
7.5.5 Diagrama de estados del sistema. Después de implementar la comunicación con los dispositivos de hardware se deben unificar para crear la aplicación que permitirá realizar el *test* de calibración o el estudio de la muestra, ya que el sistema recibe como parámetros el intervalo de muestreo el cual es definido en la interfaz principal GUI, luego de hacer el muestreo se tiene una Imagen de rango a la cual se procesa para obtener la topografía de la muestra y los resultados serán mostrados en las respectivas interfaces de usuario para su análisis. El diagrama de estados que muestra cómo funciona el sistema se muestra en la figura 50.

Figura 50. Esquema de comunicacion con la camara EO-5012



Fuente: Autores.

Figura 51. Diagrama de estados del sistema



Fuente: Autores.

7.6 FASE DE CONSTRUCCION

En entrar en esta etapa del ciclo de vida del software ya tenemos un prototipo ejecutable, que debe ser madurado, se deben mejorar los tiempos de las pruebas y algunas correcciones y mejoras de en los programas de la capa de enlace para el manejo de errores. Se ha escogido como proceso de desarrollo de la aplicación el proceso de desarrollo evolutivo ya que aun falta conocer como implementar algunos casos de uso y mejoras en el rendimiento.

7.6.1 El proceso de desarrollo evolutivo. Este modelo de proceso se utiliza cuando los requisitos no son muy claros o no se conocen del todo. La idea se basa en desarrollar una implementación inicial exponiéndola a las correcciones del usuario y refinándola a través de diferentes versiones hasta que se tiene el sistema a punto Figura 52.

El tipo de desarrollo evolutivo implementado en este proyecto es el Exploratorio, el objetivo es trabajar con el usuario para explorar los requerimientos y entregar un sistema final, se empieza el desarrollo con las partes del sistema que se comprenden mejor y este evoluciona agregando nuevos atributos propuestos por el cliente.

Figura 52. Diagrama del proceso de desarrollo evolutivo.



Fuente: (Sommerville, 2005)

Debido a la naturaleza de este proyecto y a que los procesos de desarrollo tanto de hardware como de software se llevan de forma paralela pero no de forma independiente, esta la posibilidad de la modificación de requisitos o la especificación de nuevos requisitos. Se opta entonces por adaptar este tipo de proceso evolutivo que es el mejor para sistemas de hasta quinientas mil líneas de código (Sommerville, 2005), empezando por definir los requisitos de comunicación con el Hardware y posteriormente los funcionales.

7.6.2 Software y lenguajes de programación utilizados

- **MATLAB** con los **Toolbox** de adquisición y procesamiento de imágenes, se uso para desarrollar casi la totalidad la aplicación con las licencias de las que dispone la Universidad Industrial de Santander.
- **Lenguaje C** se realizo una función para recuperar la imagen adquirida por la cámara desde la memoria RAM la cual luego es compilada para generar un MEX-File.
- **ActiveX Control** propio de la cámara EO-5012 utilizado para enviar y recibir datos a y desde la cámara.
- **OpenOffice Suite**. Se utilizo para realizar los diagramas. Se distribuye bajo licencia LGPL.
- **Aptana Studio** para crear la ayuda en ambiente web. Aptana es distribuido licencia GPL.
- **PIKLAB IDE** para realizar la programación del microcontrolador. Distribuido bajo licencia GPL
- **KICAD IDE** para el diseño del PCB. Distribuido bajo licencia GPL2.

7.6.3 Plan de pruebas. Se deben realizar las pruebas correspondientes para asegurarse que el sistema se comporte como se espera y descubrir errores, se debe ser muy riguroso en las pruebas de los subsistemas críticos, como la

comunicación con el control del actuador, ya que los errores en este subsistema como se menciono anteriormente pueden dañar el actuador piezo-eléctrico.

7.6.4 Diseño de pruebas basadas en escenarios

Caso de uso: Configuración del puerto de conexión de control del actuador piezo-eléctrico.

Antecedentes: Antes de inicializar la interfaz GUI se debe establecer conexión con el microcontrolador a través de un puerto COM en el sistema operativo.

- a) Se conecta el dispositivo en un puerto físico diferente al asignado (si no es la primera vez que se conecta).
- b) Se inicializa la aplicación
- c) La aplicación debe pedir el nuevo puerto.
- d) Se busca en el administrador de dispositivos el nuevo puerto
- e) Se ingresa en el sistema
- f) Se inicializa la aplicación
- g) La aplicación debe inicializar correctamente y mostrar el GUI
- h) Se cierra la aplicación
- i) Se inicializa la aplicación
- j) Esta vez no debe solicitar el puerto asignado y debe mostrar el GUI.

Caso de uso: Desplazamiento largo del actuador piezo-eléctrico.

Antecedentes: Se debe encontrar las franjas en la imagen focalizada para realizar ya sea el *test* o el estudio de la muestra y establecer el intervalo de muestreo, estas franjas se visualizan desplazando el actuador, la comunicación debe ser mucho mas rápida que cuando se está haciendo el *test* o el estudio.

- a) Se ingresa la posición a la cual se desea ir.
- b) Se oprime el botón "Ir".

Caso de uso: Desplazamiento fino del actuador piezo-eléctrico.

Antecedentes: si se desea mover el actuador piezo-eléctrico solo unas cuantas posiciones se recurre al posicionamiento fino.

- a) Se hace *clic* en los botones de desplazamiento ya sea hacia la izquierda o la derecha cuantas veces sea necesario.

- b) Se hace lo suficientemente rápido para verificar que el buffer del micro responde a tiempo.

Caso de uso: Realizar *Test*.

Antecedentes: Para realizar el *test* de calibración se deben seleccionar los puntos del intervalo de muestreo en la interfaz GUI.

- a) Situar muestra de calibración
- b) Seleccionar los puntos máximo y mínimo del intervalo de muestreo.
- c) Hacer *clic* en el botón *Test*.
- d) Escoger dos píxeles sobre la imagen.
- e) Exportar resultados
- f) Verificar máximos y mínimos en los interferogramas y distancias entre ellos, compararlos con las especificaciones de las muestras de calibración.
- g) Cerrar la interfaz

Caso de uso: Realizar Estudio de muestra.

Antecedentes: Para realizar el *test* de calibración se deben seleccionar los puntos del intervalo de muestreo en la interfaz GUI.

- a) Situar muestras de calibración
- b) Seleccionar los puntos máximo y mínimo del intervalo de muestreo.
- c) Hacer *clic* en el botón Topografía
- d) Escoger el área de la imagen que se desea.
- e) Exportar Resultados
- f) Comparar topografía y distancias obtenidas con muestras de calibración contra las especificaciones del fabricante.
- g) Cerrar la Interfaz

7.7 FASE DE TRANSICION

7.7.1 Resultado de las pruebas asociadas a la calibración del sistema. La exactitud que muestra el sistema se comparo respecto a las especificaciones de fabricante de muestras destinadas a este fin y se muestran en el capítulo 8 numeral 8.1.

7.7.2 Resultados de las pruebas basadas en escenarios. Se realizaron estudios a cuatro pruebas de material de vidrio con recubrimiento de una película delgada de titanio para el laboratorio de plasma de la escuela de Física

de la Universidad Industrial de Santander las cuales se describen mejor en numeral 8.2 del capítulo 8.

8. RESULTADOS

8.1 PRUEBAS TECNICAS DE PRECISION

Estas pruebas son las más importantes, ya que de su resultado depende la principal funcionalidad del sistema.

Para medir la precisión del sistema final se realizaron pruebas utilizando muestras de calibración (Figura 53) construidas para medir la precisión en los equipos de medición ópticos.

Estas piezas tienen dimensiones establecidas según las especificaciones del fabricante, las cuales se pueden observar en la tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones Muestra de calibración.

Tipo de muestra	Calibration Artifact
Fabricante	Veeco
Referencia	498-011-500
Profundidad	200 nm
Pitch	10 μm
Dimension Externa	18 mm

Figura 53. Muestra para calibración



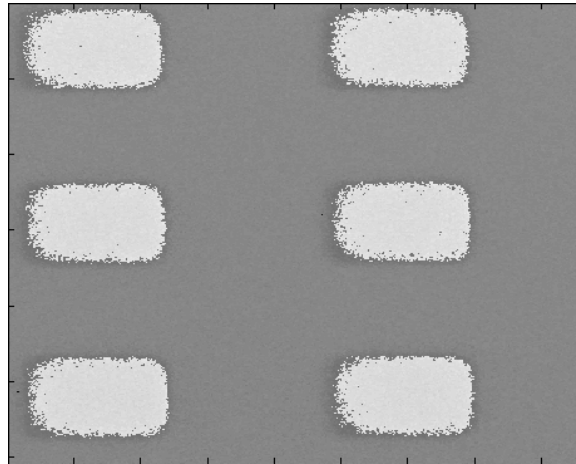
Fuente: Autores.

8.1.1 Prueba de topografía.

- **Vista superior de la muestra:** Esta imagen muestra los accidentes topográficos vistos desde arriba, estos son determinados por la intensidad de la imagen donde los puntos de mayor luminosidad son puntos de mayor altura. En la figura 48 se muestra la imagen obtenida para esta prueba, los bordes no se muestran con gran precisión, debido

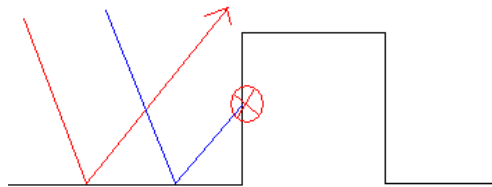
a que se presenta superposición de más de dos ondas por tanto el interferograma se torna complejo y de bajo contraste lo cual limita el sistema de adquisición para cambios bruscos de alturas (Figura 55).

Figura 54. Imagen topográfica vista superior.



Fuente: Autores.

Figura 55. Fenómeno asociado a la falta de precisión en los bordes pronunciados (superposición de tres ondas).

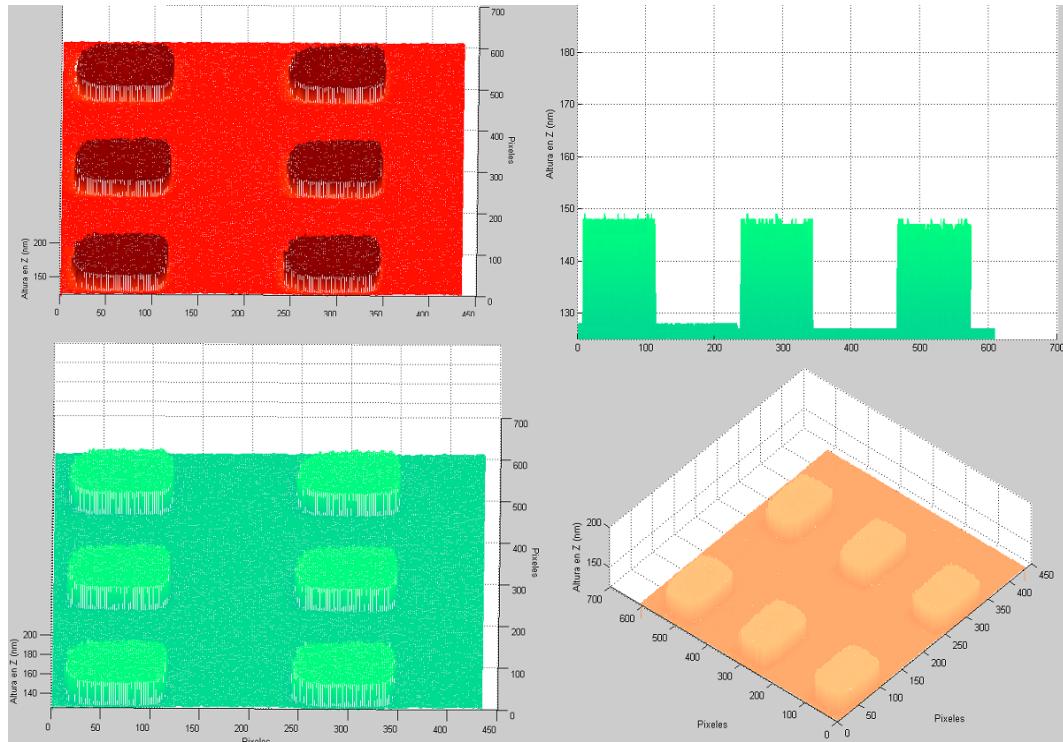


Fuente: Autores.

- **Vista 3D de la muestra:** Esta vista realiza una reconstrucción en tres dimensiones de la topografía de la muestra. En la figura 53 se puede apreciar esta vista generada para la muestra de calibración cuya altura de los *pitchs** los cuales tienen una altura de 200 nm.

* Se traduce como puntos, pero son protuberancias cuadradas en esta muestra como se ven en la figura 50.

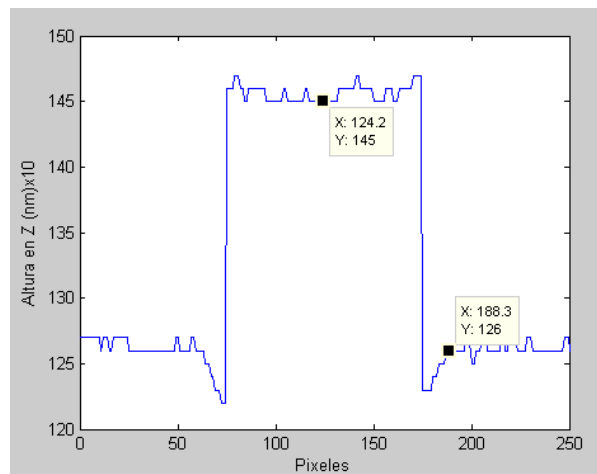
Figura 56. Vistas Tridimensionales de la topografía de la muestra



Fuente: Autores

Para lograr obtener una estimación más precisa de las alturas de la muestra que se compararán con las especificaciones del fabricante se muestra un corte transversal en uno de los *pitchs* (Figura 56).

Figura 57: Corte transversal de la imagen de la superficie de la muestra de calibración.



Fuente: Autores

Como se puede apreciar en la figura 57 la altura en nanómetros coincide con las especificaciones del fabricante de la muestra, lo cual quiere decir que el sistema esta calibrado.

8.2 PRUEBAS FUNCIONALES

Para evaluar la funcionalidad, el sistema fue sometido a uso por parte de un usuario en un escenario de estudio real, para tal evaluación se caracterizaron muestras con recubrimiento de titanio en piezas de corte, desarrollado por el laboratorio de plasma de la Universidad Industrial de Santander, las cuales fueron realizadas por el Ph.D. Piotr Tsygankov. El estudio se llevo a cabo con siete muestras cuyo resultado fue satisfactorio, luego de esto se pidió al usuario que evaluara el sistema mediante una planilla de evaluación de satisfacción[†] (Anexo E).

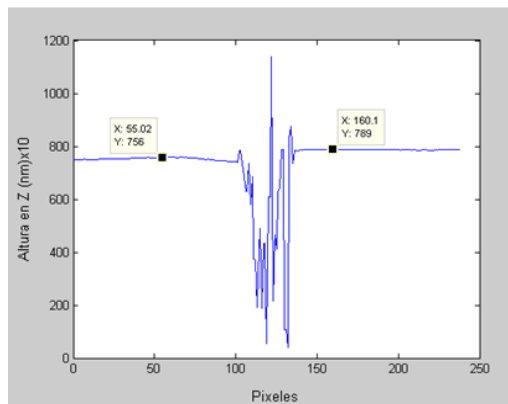
A continuación se muestran los resultados del estudio de cuatro de las siete muestras, cantidad que se considera suficiente para mostrar la funcionalidad del sistema.

En cada estudio se requiere conocer la diferencia de alturas entre la sección de la muestra recubierta por titano y aquella que no lo fue, además de la evaluación cualitativa de la topografía de la muestra.

Para todas las muestras se configuro el sistema para una resolución axial de cada paso en 5 nm.

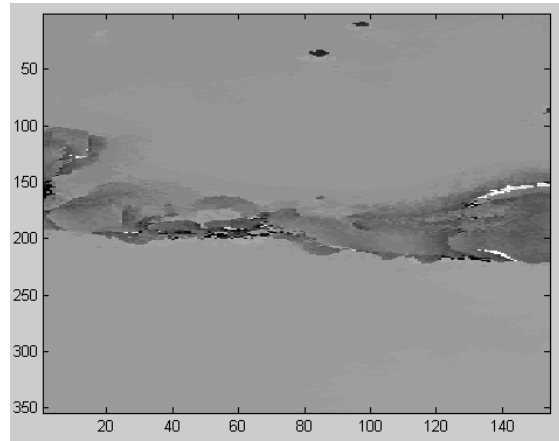
8.2.1 Estudio de la muestra 1. El grosor de la capa implantada en esta muestra es de 165 nm.

- Corte transversal de la muestra.

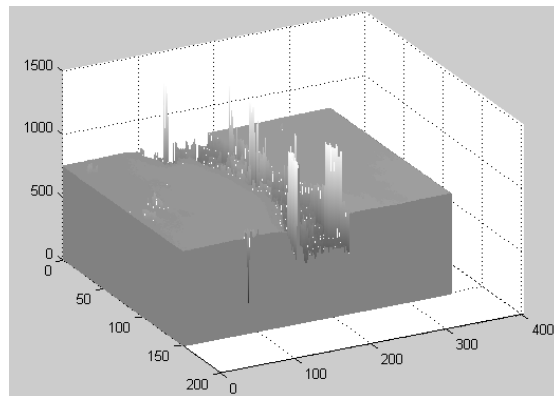


[†] Esta evaluación fue hecha en inglés debido a que el usuario no entiende muy bien el español.

- Imagen de niveles en 2D.

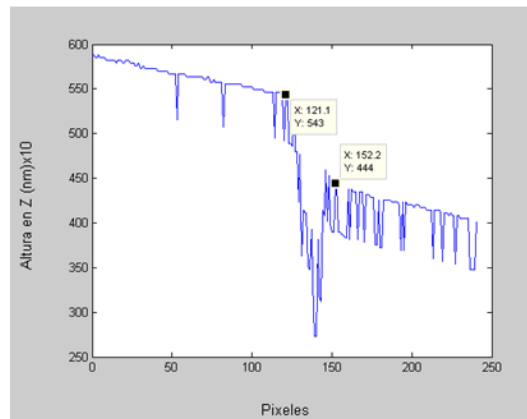


- Representación Topográfica en 3D.

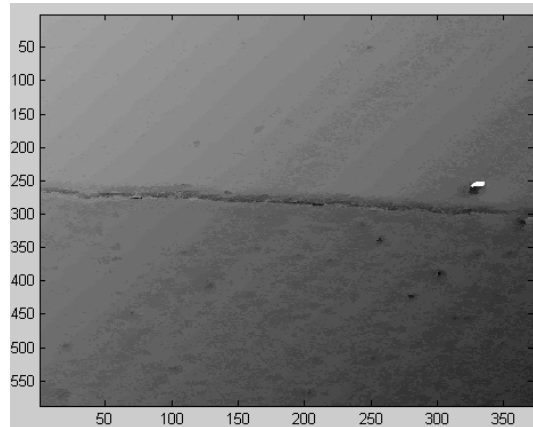


8.2.2 Estudio de la muestra 2. El grosor de la capa implantada en esta muestra es de 810 nm.

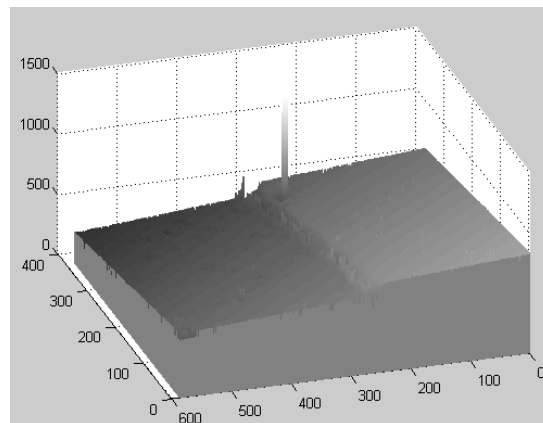
- Corte transversal de la muestra.



- Imagen de niveles en 2D.

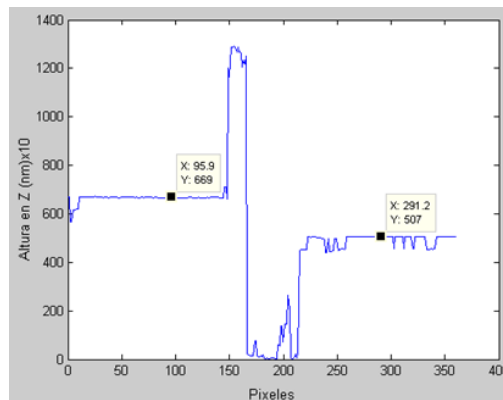


- Representación Topográfica en 3D.

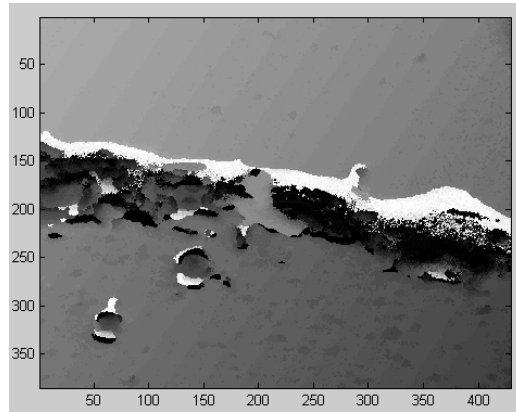


8.2.3 Estudio de la muestra 3. El grosor de la capa implantada en esta muestra es de 810 nm.

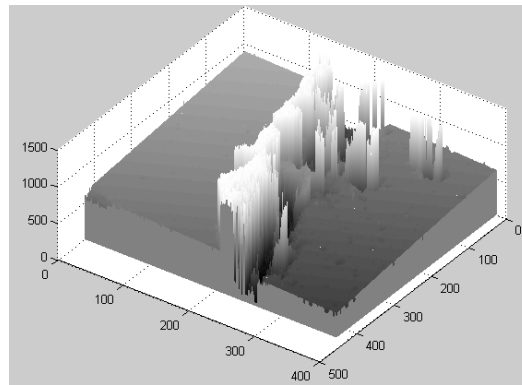
- Corte transversal de la muestra.



- Imagen de niveles en 2D.

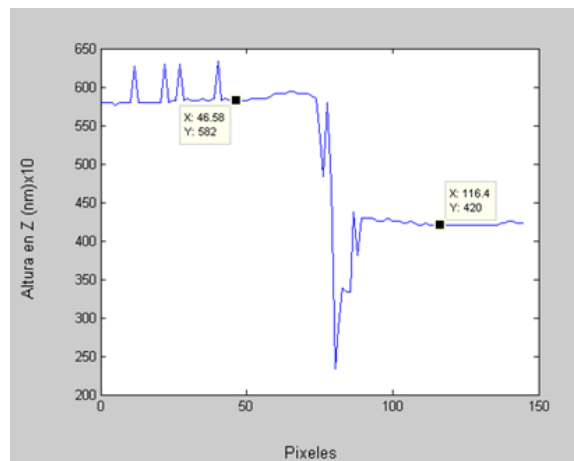


- Representación Topográfica en 3D.

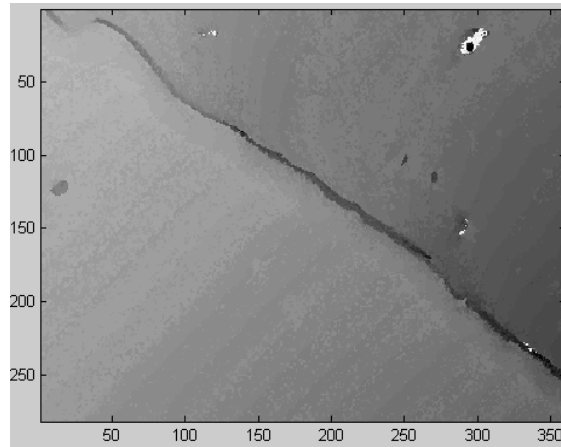


8.2.4 Estudio de la muestra 4. El grosor de la capa implantada en esta muestra es de 810 nm.

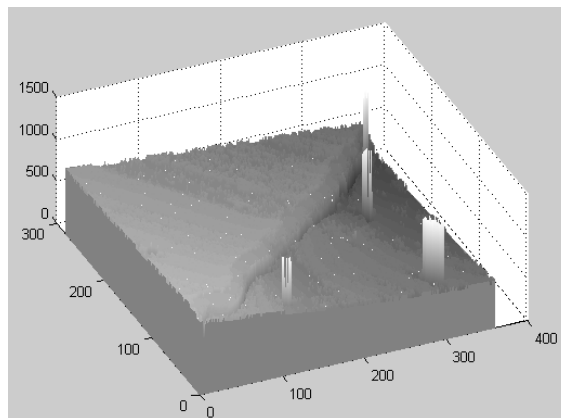
- Corte transversal de la muestra.



- Imagen de niveles en 2D.



- Representación Topográfica en 3D.



8.2.5 Planilla de evaluación de Satisfacción. En el anexo E se muestra el formato de evaluación presentado al usuario luego de realizar el estudio de las siete muestras.

9. CONCLUSIONES

Los nuevos avances tecnológicos se llevan a cabo mediante investigación en equipos interdisciplinarios, de esta sinergia surgen nuevas ideas y aplicaciones que de otro modo no se darían.

Los métodos de medición usados para realizar medidas a escalas por debajo de la micra deben ser de tipo no intrusivo, por esto se recurre a los dispositivos ópticos de medida.

El procesamiento de imágenes es un campo que cobra cada vez más fuerza en la metrología óptica, ya que permite obtener una gran precisión por medio de los sistemas de visión computarizada.

Los algoritmos de corrimiento de fase y detección de máximos (tesis doctoral, véase (Gomez, 1997)) permiten una gran precisión al ser implementados en los sistemas computacionales y dispositivos de hardware modernos así como la reconstrucción de estas superficies en una perspectiva tridimensional.

Los dispositivos de captura de imágenes CMOS están cogiendo gran auge en los sistemas ópticos de medida computarizados.

MATLAB se ratifica como una herramienta computarizada de gran uso en los sistemas que requieren procesamiento de imágenes.

La implementación de rutinas en C mejora considerablemente el rendimiento de los sistemas desarrollados en MATLAB siempre y cuando se tengan en cuenta sus limitaciones y ventajas.

En la comunicación con dispositivos hardware es de gran relevancia la estricta verificación de los procesos que este último lleva a cabo utilizando protocolos de transferencia de datos como los orientados a conexión, para tener certeza que el proceso se está llevando a cabo de la manera esperada en todo momento.

Cuando se desea asegurar la portabilidad de hardware se deben usar interfaces de conexión estándar y de gran expansión en el mercado tal como el bus de datos USB, además de esto se debe buscar la reducción de estos componentes.

En todo sistema óptico la máxima resolución transversal es de $\lambda/2$ donde λ es la longitud de onda sobre la que se desee trabajar.

10. RECOMENDACIONES

El sistema se deja abierto a nuevos desarrollos como la conexión de un nuevo piezo-eléctrico a la etapa de control electrónico para realizar perfilometría basada en algoritmos de *phase-shifting* abriendo así futuras líneas de investigación teniendo como base el sistema de control nanométrico del actuador piezo-eléctrico.

Los nuevos avances tecnológicos se llevan a cabo mediante investigación en equipos interdisciplinarios, muestra de esta integración fue la realización de este proyecto, ya que de esta sinergia surgen nuevas ideas y aplicaciones que contribuyan a la exploración de nuevas líneas de investigación.

BIBLIOGRAFIA

1. Aina, A. L. (Enero de 2009). APUNTES DE TÉCNICAS EXPERIMENTALES EN FÍSICA IV: ÓPTICA. Madrid, España.
2. Álvarez, Á. L., & Borromeo, S. (s.f.). *Otros tipos de sensores*. Obtenido de laimbio08.escet.urjc.es:laimbio08.escet.urjc.es/docencia/IE/TEMA3_otros.pdf
3. COMPANIES, S. G. (1999). LOWPOWERQUADOPERATIONALAMPLIFIERS LM124-LM224-LM324. Italy.
4. Corporation, N. S. (20 de Oct de 2008). LM117/LM317A/LM317 Terminal Adjustable Regulator. USA.
5. Corporation, R. S. (Noviembre de 1998). Rational Unified Process. Cupertino, California, USA.
6. Ferron, A. E. *Theory and Applications of Digital Image Processing*. Offenburg: University Of Applied Sciences.
7. GmbH, I. I. (2009). User Manual uEye Cameras. Germany.
8. Gomez, A. P. (1997). *Algorithmes De Détection De Phase Dédiés al L'Interférométrie en Lumière Polychromatique: Application Et Apport Des Systèmes Adaptatifs a la Profilométrie*. Comté: L'Université de Franche-Comté.
9. Keller, C. U. (2008). *Observational Astrophysics 2*. Recuperado el 2009, de http://www.astro.uu.nl/~keller/Teaching/ObsAstro2_2008/
10. Kino, T. C. (1996). *Confocal scanning Optical Microscopy and related Imaging systems*. San Diego, California: ACADEMIC PRESS.
11. Litwiller, D. (January de 2001). *Dalsa*. Recuperado el 2009, de http://www.dalsa.com/corp/markets/CCD_vs_CMOS.aspx

12. Lozano, C. J. (2007). *Caracterización de Materiales Por Reflectividad en Amplitud y Fase con Microscopia Interferencial*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
13. Moreno, L. (30 de 03 de 2005). *Digitalización de imágenes. Resolución de la cámara y calidad de la captura*. Recuperado el 10 de 2009, de Desarrolloweb: <http://www.desarrolloweb.com/articulos/1903.php>
14. Platero, C. (s.f.). *Carlos Platero*. Obtenido de http://www.elai.upm.es/spain/Profesorado/cplatero_es/cplatbas.htm
15. Sedra, A. S. (1991). *Microelectronics circuits*. Saunders College: Mc GrawHill.
16. Sommerville, I. (2005). *Ingeniería de Software*. Pearson Education.
17. T.I. (2000). 20 Bit Low Power DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER. USA.
18. Technology Microchip. (2004). PIC18f2455/2550/4455/4550 Data Sheet. USA.
19. Thorlabs. (2008). Operation Manual Thorlabs Instrumentation USB 2.0 Camera. Germany: thorlabs.
20. VHTM. (s.f.). *VHTM Divulgacion*. Obtenido de www.vhtm.com
21. Vilet, J. R. (2005). *Apuntes de Procesamiento Digital De Imágenes*. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

ANEXOS

A. CASOS DE USO

- **Configurar Cámara:** El usuario puede necesitar fijar algunos parámetros de adquisición de la cámara^{*}, para eso necesita una interfaz que lo deje modificar los siguientes parámetros:
 - *Pixel clock*
 - *Frame Rate*
 - *Exposure Time*
 - *Gain*
 - *Offset*
 - *Automatic Image Control*
 - *Area Of Interest*
 - *Binning*
 - *Subsampling*
- **Configurar Puerto:** Luego de que se conecta el dispositivo de control del actuador, el Sistema operativo asigna un puerto COM para la comunicación con este, este puerto debe ser inicializado en MATLAB (asignar un manejador) para su comunicación. Como el dispositivo se puede conectar físicamente en diferentes computadores para hacer pruebas, cada vez que se conecte, el sistema operativo dicho equipo asignara un numero de puerto casi siempre diferente al anterior, por lo que al inicializar la aplicación esta debe pedir que se ingrese el puerto que será usado en adelante (solo la primera vez que se inicializa luego de haber sido cambiado de puerto físicamente el control) y se guardara en la configuración.
- **Posicionamiento Largo del actuador piezo-eléctrico:** El usuario ingresa el numero de la posición a la cual desea enviar el actuador y luego oprime el botón “Ir”
- **Posicionamiento Fino del actuador piezo-eléctrico:** El usuario hace clic sobre cualquiera de los botones de posicionamiento fino para desplazar el actuador un paso cada vez.

^{*} Para una descripción de cada uno de ellos por favor remitase al manual de usuario de la cámara.

- **Test de Calibración:** Una vez que el usuario ha encontrado las franjas de interferencia de la imagen y ha marcado los puntos sobre los cuales desea realizar el test, debe ser habilitado para ubicar los *pixeles* de estudio sobre la imagen, el programa hace el estudio y muestra el interferograma de cada uno de los dos *pixeles* de forma diferenciable y los puntos máximos y mínimos de cada interferograma ubicados, además de la diferencia entre ellos.
- **Exportar resultados del test de calibración.** Luego de hacer el test se puede exportar los resultados en formato .doc a una ubicación específica.
- **Realizar estudio de nanometrología:** Una vez que el usuario ha encontrado las franjas de interferencia de la imagen y ha marcado los puntos sobre los cuales desea realizar el test, debe ser habilitado para seleccionar el área de estudio sobre la imagen (también puede ser toda la imagen), después de realizare el muestreo debe mostrar la topografía de la muestra y herramientas que permitan conocer distancias sobre esta superficie.
- **Exportar resultados del estudio de nanometrología.** Luego de hacer el test estudio se pueden exportar los resultados en formato .doc a una ubicación específica.
- **Consultar ayuda de usuario.** El usuario podrá revisar el manual de uso dando clic en el botón ayuda.

Consultar ayuda de Desarrollador. La persona que desea evolucionar la aplicación encontrara toda la documentación necesaria en el menú ayuda.

B. MEX-FILES (MATLAB Executable Files)

Los MEX-Files son subrutinas escritas en C o Fortran que luego de ser compiladas pueden ser corridas dentro de MATLAB de la misma forma que las funciones escritas en un M-File.

Cuando de debe usar un MEX-File?

- Cuando se tiene código existente en C que se quiere reutilizar sin ser reescrito en código de MATLAB.
- El algoritmo a ser implementado contiene algunos ciclos `for` y/o `while` que no pueden ser vectorizados. MATLAB no puede procesar los bucles tan rápido como C o Fortran. El código en los MEX-Files corren a la velocidad normal de C o Fortran respectivamente dando como resultado un incremento substancial en el rendimiento.
- Para acceder al Hardware
- Para manejar programación con punteros igual que en C.

Componentes de los MEX-Files

El código fuente de los MEX-Files consiste de dos componentes principales:

- La Rutina computacional: La cual contiene el código que se desea implementar.
- La rutina de puerta de enlace: Esta rutina llama a la rutina computacional y sirve para interfazar esta con MATLAB.
- Todo Código MEX debe contener la sentencia: `#include "mex.h"`.
- El punto de entrada a la rutina de puerta de enlace debe ser llamado `mexFunction` y actúa como el `main()`.

Una ventaja que presentan los MEX-Files en el campo del procesamiento de imágenes es la capacidad que se tiene para asignar y liberar memoria manualmente, lo cual hace que estos algoritmos sean óptimos y mejore el rendimiento de la aplicación ya que no se tendrán datos que ocupan gran volumen en memoria que además de ser innecesarios inducen al uso de memoria cache del disco lo cual es inaceptable para cualquier aplicación que necesite correr rápido.

C. FIRMWARE DEL MICROCONTROLADOR 18F2250 PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LA COMUNICACIÓN USB CON EL PC.

```
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
// Programa: PIEZO CONTROL.
// Ver:2.0
// Octubre de 2009
// Por: Jaime de Jesús González Rodríguez y Julian González
Diaz
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

#include <18F2550.h> // Definición de registros internos.
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
// Fuses utilizados:
/*////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
    HSPLL: utilizamos un cristal HS de alta velocidad, en
conjunto con el PLL para generar los 48Mhz.
    MCLR: Utilizamos reset por hardware.
    NOWDT: No utilizamos el perro guardan.
    NOPROTECT: Desactivamos la protección de código.
    NOLVP: Desactivamos la programación a bajo voltaje.
    NODEBUG: No entramos al modo debug.
    USBDIV: signfica que el clock del usb se tomara del
PLL/2 = 96Mhz/2 = 48Mhz.
    PLL5: significa que el PLL prescaler dividira en 5 la
frecuencia del cristal. para HS = 20Mhz/5 = 4Mhz.
    CPUDIV1: El PLL postscaler decide la división en 2 de
la frecuencia de salida del PLL de 96MHZ, si
        queremos 48MHZ, lo dejamos como esta.
    VREGEN: habilita el regulador de 3.3 volts que usa el
módulo USB.
```

```

        NOPBADE: No utiliza las entradas analógicas del puerto
B.
*////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

#fuses
HSPLL,MCLR,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP,NODEBUG,USBDIV,PLL5,CPUDIV
1,VREGEN,NOPBADEN

#use delay(clock=48000000) // Frecuencia máxima de trabajo.
#include "usb_cdc.h" // Descripción de funciones del USB.
#include "usb_desc_cdc.h" // Descriptores del dispositivo
USB.

#byte PORTB=0xF81
#pragma bit DAC_CS=PORTB.5
#pragma bit DAC_DAT=PORTB.4
#pragma bit DAC_CLK=PORTB.3
#pragma bit DAC_ON=PORTB.2

void DAC_CNF(void) {
int8 CNF;
int16 CMR;
int8 i;
#pragma bit CNF7=CNF.7
#pragma bit CMR15=CMR.15
    //Se configura el DAC por SPI
    DAC_DAT=0;
    DAC_ON=1; //Se enciende el DAC
    DAC_CS=1; //Se deshabilita el DAC
    DAC_CLK=0; //Se arranca con la señal de reloj a 0
    delay_ms(200); //Se espera a que arranque el DAC
    //Se comienza la configuración de los registros
internos del DAC
    DAC_CS=0; //Se habilita el DAC
    delay_us(42); //MIN:21
    //Configuración(16b,unsig), autocalibración y
reset(vout=0)
    CNF=0b00100100; //Comando de configuración
    for(i=0;i<=7;i++){

```

```

//CNF=b0//Palabra de configuración del
DAC: b-RW-MB1-MB0-0-A3-A3-A1-A0
    DAC_DAT=CNF7;
    DAC_CLK=1;
    delay_us(6); //MIN:3/6
    CNF=CNF*2; //Se rota el registro
    DAC_CLK=0;
    delay_us(6); //MIN:3/6
}
delay_us(14); //MIN:7
//CNF=b0//Palabra de configuración del DAC:
b-RW-MB1-MB0-0-A3-A3-A1-A0
    CMR=0b0010101001100001; //Configuración y
autocalibración y reset(vout=0)
    for(i=0;i<=15;i++){
        DAC_DAT=CMR15;
        DAC_CLK=1;
        delay_us(6); //MIN:3/6
        CMR=CMR*2; //Se rota el registro
        DAC_CLK=0;
        delay_us(6); //MIN:3/6
    }
    delay_us(42); //MIN:21
//Configuración, en estado de funcionamiento
normal
CNF=0b00100100; //Comando de configuración
    for(i=0;i<=7;i++){
        DAC_DAT=CNF7;
        DAC_CLK=1;
        delay_us(6); //MIN:3/6
        CNF=CNF*2; //Se rota el registro
        DAC_CLK=0;
        delay_us(6); //MIN:3/6
    }
    delay_us(14); //MIN:7
//Palabra de configuración del DAC: b-RW-
MB1-MB0-0-A3-A3-A1-A0
    CMR=0b0010101000100000; //Configuración y
autocalibración y reset(vout=0)
    for(i=0;i<=15;i++){
        DAC_DAT=CMR15;

```

```

        DAC_CLK=1;
        delay_us(6); //MIN:3/6
        CMR=CMR*2; //Se rota el registro
        DAC_CLK=0;
        delay_us(6); //MIN:3/6
    }
    delay_us(42); //MIN:21
    DAC_CS=1; //Se deshabilita el DAC
}

void DAC_DATOUT(int16 DATA) {
    int8 CNF;
    int8 i;
    #pragma bit CNF7=CNF.7
    #pragma bit DATA15=DATA.15
    //Se comienza la transmisión de datos al DAC
    delay_us(22); //MIN:11
    DAC_CS=0; //Se habilita el DAC
    delay_us(42); //MIN:21
    //Selecciona dirección del dato y tamaño de
registro
    CNF=0b00100000; //Comando de configuración
    for(i=0;i<=7;i++){
        DAC_DAT=CNF7;
        DAC_CLK=1;
        delay_us(6); //MIN:3/6
        CNF=CNF*2; //Se rota el registro
        DAC_CLK=0;
        delay_us(6); //MIN:3/6
    }
    delay_us(14); //MIN:7
    //Se transmite 16b al DAC
    for(i=0;i<=15;i++){
        DAC_DAT=DATA15;
        DAC_CLK=1;
        delay_us(6); //MIN:3/6
        DATA=DATA*2; //Se rota el registro
        DAC_CLK=0;
        delay_us(6); //MIN:3/6
    }
    delay_us(42); //MIN:21
}

```

```

        DAC_CS=1;
    }

// Programa principal.
void main() {
int16 val;
    DAC_ON=1; //Se enciende el DAC
    set_tris_b(0b11000011);
    DAC_ON=1; //Se enciende el DAC
    // Configuraciones varias.
    setup_spi(SPI_SS_DISABLED);
    setup_wdt(WDT_OFF);
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL);
    setup_timer_1(T1_DISABLED);
    setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
    setup_timer_3(T3_DISABLED|T3_DIV_BY_1);
    setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
    setup_vref(FALSE);

    DAC_CNF();                //Se configura el DAC
    DAC_DATOUT(0x0000);      //Vout=0

    usb_cdc_init();          // Funciones necesarias
para iniciar el módulo USB.
    usb_init();              // Funciones necesarias para
iniciar el módulo USB.
    while(!usb_cdc_connected()) {
        // Mientras el USB no está conectado.
        delay_ms(200);
    }
    /* Detecta si el host envía datos al PIC, mediante las
funciones:
        usb_enumerated()
        usb_cdc_kbhit()
        usb_cdc_getc()
        usb_cdc_connected()
    */
do{
    // bucle eterno
    usb_task();
    if (usb_enumerated()){

```

```

        // Si el puerto ya fue enumerado por el host :
        if(usb_cdc_kbhit()){
            // en espera de nuevo(s) caracter(es) en el
buffer.
            val=get_long_usb(); //Lee un dato de
16b desde el PC
            DAC_DATOUT(val);          //Envía el
dato al DAC
            printf(usb_cdc_putc,"%Ld\r",val);
//Envía un eco al PC: Ld Long signed int Lu Long unsigned
int
        }
    }
}while (TRUE);
}

```


E. PLANILLA DE SATISFACCIÓN DE FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA

EVALUATION OF SATISFACTION IN THE SYSTEM'S USE

USER:

Ph.D. Poitr A. Tsygankove
 Plasma Engineer, R&D
 Assosiate Profesor
 BAUMAN MOSCOW STATE TECHNICAL UNIVERSITY



Sign

QUESTION	CALIFICATION
Do the Interfaces have the correct title?	5/5
Are tags in the interfaces meaningful?	5/5
Is the size of the fields suitable?	5/5
Are the controls enable adequately?	5/5
Are the color used in the interfaces pleasing to the eye?	5/5
Do the interfaces have the correct dimensions?	5/5
Are the fields in the interfaces correctly placed?	5/5

QUESTION	CALIFICATION
Do you consider, the measurements obtained by the system are correct ?	5/5
Is the user notified of the process is executing the software?	5/5
Is the flow of data between interfaces synchronized?	5/5
Are the tools of the software easy to use?	5/5
If there is any activity which require you must wait, is it notified?	5/5
Do you consider the time spent taking samples is correct?	5/5

QUESTION	CALIFICATION
In your opinion, is the software friendly to use?	5/5
Are the interfaces Intuitive?	5/5
Would you recommend this system to someone else who need take accurate measurement s?	5/5
Would you use this software often?	5/5
Are you satisfied with the system?	5/5