

**CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE DESPLAZAMIENTOS
NANOMÉTRICOS CON MICROSCOPIA INTERFEROMÉTRICA**

MARTHA YOLANDA DÍAZ SÁNCHEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA INGENIERIA DE SISTEMAS
MAESTRÍA EN EL ÁREA DE INFORMÁTICA Y CIENCIAS DE LA
COMPUTACIÓN
BUCARAMANGA
2008**

**CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE DESPLAZAMIENTOS
NANOMÉTRICOS CON MICROSCOPIA INTERFEROMÉTRICA**

MARTHA YOLANDA DÍAZ SÁNCHEZ

**Trabajo de Investigación para optar el título de Magíster en el Área de
Informática y Ciencias de la Computación**

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

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA INGENIERIA DE SISTEMAS
MAESTRÍA EN EL ÁREA DE INFORMÁTICA Y CIENCIAS DE LA
COMPUTACIÓN
BUCARAMANGA
2008**

*A mis hijos, a quienes amo inmensamente y por quienes nunca dejaré de luchar.
A mi madre, quien siempre ha sido mi compañía, y es la fuerza y el eje de mi vida.*

AGRADECIMIENTOS

Los grandes sistemas son el resultado de la unión e interacción de sus partes para formar un todo. Gracias a quienes aportaron su grano de arena en la construcción de este proyecto.

Al doctor Arturo Plata Gómez por su dirección, apoyo, paciencia y por la oportunidad que me dio de trabajar a su lado.

Al profesor Henry Arguello, por su asesoría desinteresada y contribución en el desarrollo de este proyecto.

Al doctor Jaime Silvestre Salcedo, por su dedicación, acompañamiento permanente y gran profesionalismo.

A todas las personas y amigos quienes creyeron en mí.

Al laboratorio de Óptica de la Escuela de Física de la Universidad Industrial de Santander, por las herramientas facilitadas para la implementación de este proyecto.

RESUMEN

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE DESPLAZAMIENTO NANOMÉTRICOS CON MICROSCOPIA INTERFEROMÉTRICA*

AUTOR: MARTHA YOLANDA DÍAZ SÁNCHEZ**

PALABRAS CLAVES: piezo, desplazamientos nanométricos, microscopia interferométrica, transductor

Actualmente, los métodos ópticos para la caracterización de sistemas de desplazamientos nanométricos han adquirido gran interés en la concepción de herramientas y dispositivos de exploración y análisis en ambientes industriales y biomédicos.

Este trabajo fue orientado a la caracterización de sistemas de desplazamientos nanométricos utilizando microscopia interferométrica, que permite obtener el desplazamiento de un cristal piezo eléctrico en función del voltaje aplicado con resoluciones del orden de los nanómetros, encontrando la curva de histéresis del transductor eléctrico para conocer su comportamiento.

En los capítulos **III**, se describe el sistema informático MATVIS utilizado para la adquisición de los patrones de interferencia obtenidos en las pruebas experimentales. En los capítulos **IV**, se realiza el planteamiento teórico necesario para calibración del paso de desplazamiento, condición necesaria para el buen funcionamiento del microscopio interferométrico. Realizando este planteamiento se procede a la adquisición de imágenes, utilizando un sistema de control digital de desplazamientos y un software para la adquisición de imágenes, logrando la obtención de las franjas de interferencia. Luego se hace un análisis de la información de las franjas interferométricas, explicando las condiciones y los comportamientos de cada una de las medidas experimentales que hacen parte de esta implementación. Posteriormente, se hace el análisis de los valores que arroja el sistema para realizar la codificación de la información por medio de detección de máximos, para encontrar la cantidad de desplazamientos que ejecuta el cristal piezo eléctrico

Por último, se exponen los resultados de las pruebas efectuadas para mostrar el comportamiento del cristal piezo eléctrico al ser sometido a variaciones de voltaje en forma creciente y decreciente hasta determinar la caracterización del cristal Piezo Eléctrico Jena Ref. 0693.

*Proyecto de grado.

**Dr. ARTURO PLATA, Doctor en Ciencias para el Ingeniero. FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECAICAS, ESCUELA INGENIERIA DE SISTEMAS MAESTRIA EN EL AREA DE INFORMATICA Y CIENCIAS DE LA COMPUTACION.

SUMMARY

TITLE: SYSTEM CHARACTERIZATION OF DISPLACEMENT NANOMÉTRICOS WITH MICROSCOPY INTERFEROMÉTRICA *

AUTHOR: MARTHA YOLANDA DÍAZ SÁNCHEZ**

KEY WORDS : Piezo, displacements nonometricos, microscopy interferometrica, transductor

At the moment, the optical methods for the characterization of systems of nanométricos displacements have acquired great interest in the conception of tools and devices of exploration and industrial and biomedical atmosphere analysis.

This work was oriented to the characterization of systems of nanométricos Displacements using interferometric microscopy, that allows to obtain the displacement of an electrical crystal piezo based on the voltage applied with resolutions of the order of the nanometers, finding the curve of hysteresis of the electrical transductor to know its behavior.

In chapters III, computer science system MATVIS used for the acquisition of the obtained patterns of interference in the experimental tests is described. In chapters IV, the theoretical exposition used for calibration of the displacement passage is exposed, necessary condition for the good operation of the interferometric microscope. Making this exposition one comes to the acquisition of images, using a system of digital control of displacements and software for the acquisition of images, getting the interference strips results. Then an analysis of the information of the inteferométricas strips is made, explaining the conditions and the behaviors of each one of the experimental measures that are part of this implementation. Later, the analysis of the values that the system give to make the codification of the information by means of detection of maximums is made, to find the amount of displacements that executes the electrical crystal piezo. Finally, the conducted test results are exposed to show the behavior of the electrical crystal piezo by being submissive to variations of voltage in increasing and decreasing form on order to determine the characterization of the crystal Electrical Piezo Jena ref 0693.

*Proyecto de grado.

**Dr. ARTURO PLATA, Doctor en Ciencias para el Ingeniero. FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECAICAS, ESCUELA INGENIERIA DE SISTEMAS, MAESTRIA EN EL AREA DE INFORMATICA Y CIENCIAS DE LA COMPUTACION.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. SISTEMAS DE METROLOGÍA ÓPTICA	17
1.1 INTERFEROMETRÍA	19
1.1.1 Introducción	19
1.1.2 Aplicaciones	21
1.2 MICROSCOPIA DE INTERFERENCIA	23
1.2.1 Sistema de Microscopía Interferencia tipo Mirau	24
1.3 INTERFERENCIA DE DOS ONDAS	25
1.4 INTERFERENCIA CON UNA FUENTE MONOCROMÁTICA	26
1.5 SISTEMA ÓPTICO	27
2. CRISTAL PIEZO ELÉCTRICO	30
2.1 DEFINICIÓN	30
2.2 <i>HISTORIA DEL CRISTAL PIEZO ELÉCTRICO</i>	31
2.3 APLICACIONES DEL CRISTAL PIEZO ELÉCTRICO	32
2.4 CRISTAL PIEZO ELÉCTRICO JENA REF. 0693	34
3. AREA DE INGENIERÍA DEL SOFTWARE	35
3.1 LENGUAJE DE DESARROLLO (VISUAL C++)	35
3.2 PROGRAMACIÓN ORIENTADA A OBJETOS (POO)	37
3.3 ENTORNO DE DESARROLLO VISUAL C++	38
3.4 SOFTWARE MATVIS	39
3.4.1 Generalidades	39
3.4.2 Descripción del Software MATVIS	39
3.4.3 Lenguaje de Desarrollo MATVIS	45
3.4.4 Paradigma De Desarrollo MATVIS	46
3.4.5 Entorno de Desarrollo MATVIS	47

	Pág.
3.4.5.1 Ventana del proyecto	47
3.4.6 Arquitectura de la Aplicación MATVIS	54
3.4.7 Librerías Especiales Matvis	56
3.4.7.1 MIL (Matrox Imaging Library)	56
3.4.7.2 MPP	57
4. MEDIDAS EXPERIMENTALES	59
4.1 SISTEMA DE ADQUISICIÓN	59
4.2 CONTROL DIGITAL DE DESPLAZAMIENTOS	59
4.3 CALIBRACIÓN DEL PASO DE DESPLAZAMIENTO	60
4.4 OBTENCIÓN DE FRANJAS DE INTERFERENCIA	62
4.5 CODIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN	64
4.5.1 Implementación en MATLAB	64
4.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
5. CONCLUSIONES	77
6. RECOMENDACIONES	78
BIBLIOGRAFÍA	79
ANEXOS	81

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. (a) Interferómetro de Young, que funciona por división de frente de onda y (b) interferómetro de Michelson, que funciona por división de amplitud.	20
Figura 2. Objetivo de microscopio interferencial tipo Mirau.	25
Figura 3. Microscopio interferencial tipo Mirau.	27
Figura 4. Objetivo de microscopio interferencial tipo Mirau y un piezo eléctrico	34
Figura 5. Presentación inicial de la aplicación Matvis Windows Application.	40
Figura 6. Diálogos para la adquisición y procesamiento de imágenes.	40
Figura 7. Presentación del diálogo Setting Microscope.	42
Figura 8. Presentación del diálogo Setting Piezo.	42
Figura 9. Diálogo Profile White L.	44
Figura 10. Entorno de desarrollo de la aplicación MATVIS	47
Figura 11. Vista Funciones Miembros del ClassView.	48
Figura 12. Vista Variables Miembros del ClassView	49
Figura 13. Vista Resource View del Entorno de desarrollo del Software MATVIS.	50
Figura 14. Carpeta Sources Files de la vista FileView.	52
Figura 15. Carpeta Resource Files de la vista FileView	54
Figura 16. Objetos en una aplicación MDI	55
Figura 17. Sistema de Calibración del paso de desplazamiento	61
Figura 18. Paso de Desplazamiento interfranjas	61
Figura 19. Presentación de Franjas de Interferencia para un voltaje de: (a) 0 a 60 voltios (b) 0 a 110 voltios y (c) 0 a 150 voltios	63
Figura 20. Presentación de Franjas de Interferencia para un voltaje de: (a) 60 a 0 voltios (b) 110 a 0 voltios y (c) 150 a 0 voltios	63

	Pág.
Figura 21. Diagrama de flujo de la Función Piezo.	66
Figura 22. Patrones de interferencia con un Voltaje de: (a) 0 a 60 voltios (b) 0 a 100 voltios (c) 0 a 150 voltios.	67
Figura 23. Patrones de interferencia con un Voltaje de: (a) 60 a 0 voltios (b) 100 a 0 voltios (c) 150 a 0 voltios.	68
Figura 24. Desplazamientos Vr. Máximos – Piezo Jena Ref. 0693. Voltaje:60 v	69
Figura 25. Caracterización del Piezo Eléctrico Jena No. 0693 – Voltaje: 60 voltios	70
Figura 26. Desplazamientos Vr. Máximos – Piezo Jena Ref. 0693. Voltaje:110 v	71
Figura 27. Caracterización del Piezo Eléctrico Jena No. 0693 – Voltaje: 110 voltios	72
Figura 28. Desplazamientos Vr. Máximos – Piezo Jena Ref. 0693. Voltaje:150 v	73
Figura 29. Caracterización del Piezo Eléctrico Jena No. 0693 – Voltaje: 150 voltios	74
Figura 30. Caracterización del Piezo Eléctrico Jena No. 0693	75

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados de las pruebas experimentales.	68
Tabla 2. Relación Voltaje aplicado contra Desplazamientos del cristal piezo eléctrico Jena No. 0693	76

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Datos de los máximos encontrados en la prueba de 0 a 60 voltios con un Fac. de Amplificación de 2.5	81
ANEXO B. Datos de los máximos encontrados en la prueba de 60 a 0 voltios con un Fac. de Amplificación de 2.5	82
ANEXO C. Datos de los máximos encontrados en la prueba de 0 a 110 voltios con un Fac. de Amplificación de 5.0	83
ANEXO D. Datos de los máximos encontrados en la prueba de 110 a 0 voltios con un Fac. de Amplificación de 5.0	84
ANEXO E. Datos de los máximos encontrados en la prueba de 0 a 150 voltios con un Fac. de Amplificación	85
ANEXO F. Datos de los máximos encontrados en la prueba de 150 a 0 voltios con un Fac. de Amplificación de 7.5	87
ANEXO G. Funcion $[x,y]=\text{Piezo}(\text{archivo},N1,N2,\text{máximo_vol})$	89

INTRODUCCIÓN

Los constantes avances de la tecnología han permitido conocer mejor los fenómenos como la interferencia, la focalización, y la coherencia¹, permitiendo desarrollar líneas de investigación dirigidas a la caracterización de velocidad de movimiento, caracterización de transductores piezo-eléctricos, perfilometría óptica, y en general aplicaciones para la adquisición, almacenamiento y visualización de imágenes.

Actualmente, los métodos ópticos para la caracterización de sistemas de desplazamientos nanométricos han adquirido gran interés en la concepción de herramientas y dispositivos de exploración y análisis en ambientes industriales y biomédicos. La utilización de sistemas de control son una herramienta importante en metrología para realizar medidas de gran precisión de longitudes de onda, de distancias pequeñas y de determinados fenómenos ópticos.

En un microscopio convencional de propósito general, sólo se puede observar detalles a partir de 0,2 μm . Una alternativa que permite resolver este inconveniente consiste en utilizar microscopios interferométricos y cristales especiales como son los piezoeléctricos. Haciendo uso de este material y mediante la luz visible se puede detectar desplazamientos de las franjas interferométricas y se logra medir distancias pequeñas del orden de los nanómetros.

Actualmente en el laboratorio de óptica y tratamiento de señales (LOTS) de la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander (UIS), se encuentra un cristal piezo eléctrico, una tarjeta Matrox, una cámara (CCD) y un microscopio

¹ W.H. Steel "Interferometry" Cambridge at the university press, 1967.

interferométrico NIKON compuesto de un objetivo tipo Mirau^{2,3}. El cristal piezo eléctrico presenta un comportamiento no lineal de desplazamiento en función de una diferencia de potencial aplicada. Existe la necesidad de controlar éste fenómeno conocido como histéresis. Fenómenos como la histéresis requiere de una calibración para determinar el verdadero desplazamiento. Dada la complejidad de observación de movimientos nanométricos, se requiere de un sistema óptico interferométrico para calibrar los desplazamientos de las deformaciones del cristal piezo eléctrico. Los patrones de franjas muestran la deformación que sufre el cristal piezo eléctrico al aplicarle diferentes valores de voltajes.

El trabajo está orientado a caracterizar los desplazamientos del cristal piezo eléctrico por medio de métodos ópticos monocromáticos⁴, y debido a la necesidad de obtener resoluciones de nanómetros conviene aplicar la técnica de interferometría. Posteriormente es necesario utilizar un sistema de control (software MATVIS) para calibrar el sistema de desplazamientos nanométricos del material piezo eléctrico y obtener la caracterización del comportamiento del transductor eléctrico.

¿Por qué la medición de desplazamientos? Cuando se logra medir los desplazamientos que realiza el cristal piezo eléctrico, se puede conocer su comportamiento y la curva de histéresis.

La necesidad tecnológica de medir desplazamientos nanométricos implica el caracterizar sistemas de alta precisión.

Este trabajo está distribuido como se describe a continuación:

²SUAREZ M. "Implementación y aplicación de un perfilómetro basado en microscopía interferencial" Tesis, universidad industrial de Santander, (2000).

³PLATA A., SUAREZ M., GARZÓN J. "Implementación de un perfilómetro, basado en microscopía interferencial, para caracterización de superficies". Congreso Nacional de Óptica. Armenia, Colombia, 2000.

⁴PLATA, Arturo. "Algorithmes De Détection De Phase Dédiés a L'Interférométrie en Lumière Polychromatique: Application Et Apport Des Systèmes Adaptatifs a la Profilométrie" Thèse, L'Université de Franche-Comté, 1997.

En el capítulo 2 se enuncia una corta definición sobre Interferometría, microscopía interferométrica e interferencia de dos ondas y se encuentra una descripción del montaje del sistema óptico utilizado.

En el capítulo 3 se realiza una pequeña reseña histórica en cuanto a la historia, las propiedades y utilidades del cristal piezo eléctrico. Adicionalmente, se encuentra la descripción del piezo eléctrico Jena Ref. 0693 utilizado en la parte experimental.

En el capítulo 4 se describe la técnica y el procedimiento para la toma de las medidas experimentales, tales como: el sistema de adquisición; control digital de desplazamientos; calibración del paso de desplazamiento; obtención de las franjas de interferencia; codificación de la información, incluyendo la implementación hecha en MATLAB y el análisis de los resultados obtenidos. Al finalizar este capítulo se muestra la curva de histéresis y la caracterización de desplazamientos del transductor eléctrico.

En el capítulo 5 se exponen algunas definiciones relacionada con el área de ingeniería del software. Temas relacionados con el lenguaje de desarrollo Visual C++, programación Orientada a Objetos (POO) y el entorno de desarrollo Visual C++. Adicionalmente, se encuentra una descripción del software MATVIS de una forma más detallada acerca de su estructura de desarrollo y las librerías especiales utilizadas en la implementación de dicho software.

Finalmente en el capítulo 6 y 7, se encuentran las conclusiones y las recomendaciones.

Este trabajo se realiza como parte de uno de los proyectos del grupo de excelencia “nanometrología de materiales”.

1. SISTEMAS DE METROLOGÍA ÓPTICA

Diversos sistemas se han diseñado para obtener información de las imágenes de las muestras, entre ellos podemos señalar el microscopio confocal, el microscopio de fuerza atómica, el microscopio de fuerza molecular, otras variedades de microscopía de campo cercano y los microscopios interferométricos⁵. Estos últimos son los que se utilizaron en la parte experimental.

En el campo de la nanometrología, cuando se trabaja con sistemas interferométricos, es posible obtener y medir información del orden de los nanómetros. En un interferograma la información se puede codificar de acuerdo a la fase de las franjas como se hace en éste proyecto.

En este capítulo se enuncian los principios básicos de interferometría. Se describe el sistema óptico utilizado para la obtención de los interferogramas requeridos para la caracterización del sistema de desplazamientos nanométricos del cristal piezo eléctrico Ref. 0693.

Antes de entrar a definir que es interferometría, es necesario conocer las bases de la metrología, término que nace con el concepto de medición de longitud en el transcurso de la historia.

Antiguamente utilizaron como referencias de medida⁶, algunas partes del cuerpo humano, como el pie y el brazo. Posteriormente se construyeron objetos materializados, por ejemplo con barras de madera, en el Antiguo Egipto; y posteriormente de hierro, en la Edad Media. La definición actual, se enmarca

⁵SUAREZ M. "Clasificación de superficies basadas en propiedades de la compresión de imágenes". Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander, 2001.

⁶http://www.senacyt.gob.pa/g_metrologia/cenamep/historiametro.pdf "SENACYT"-Secretaría NACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN".

dentro del Sistema Internacional de Unidades (SI), y se basa en la constancia de la velocidad de la luz, lo que posibilita tener una escala universal independiente de un patrón material, como lo era la barra de aleación Pt-Ir del Prototipo Internacional del metro, vigente hasta el año 1960. La primera definición internacional del metro se hizo inicialmente en París en 1791 como un diez millonésimo de la longitud de un cuadrante polar de la tierra que pasa por París, a partir de una medición geodésica efectuada entre Dunkerque y Barcelona, que tomó seis años de trabajo. La definición del metro ha pasado de la materializada por la barra de Pt-Ir a la definición atómica de 1960, en base a los estudios y realización práctica efectuada por el profesor alemán Ernst Engelhard, en el Instituto Nacional de Metrología de la República Federal de Alemania. Esta definición se basaba en la constancia de la emisión cuántica del isótopo 86 del gas noble criptón, asociada con la transición $2p_{10} - 5d_5$. Esta da origen a una radiación visible sumamente adecuada para las mediciones interferométricas y con una coherencia espacial-temporal suficiente para visualizar las franjas de interferencia hasta un metro, siendo éste entonces igual a 1.650.763,73 longitudes de onda en el vacío de la radiación del Kr 86. Esto posibilitó pasar de un patrón internacional material a una definición cuántica y reproducible en cualquier lugar y situación, con una incertidumbre (reproducibilidad) de dos partes en 10^{-9} . Desde 1983 esta definición no ha vuelto a cambiar y es la que permanece hasta el presente, basada en la constancia de la velocidad de la luz. La velocidad de la luz ha sido medida en base a la unidad de longitud, definida por el Kr 86 y a la unidad de tiempo, el segundo, definido por la transición cuántica del isótopo 133 del cesio, mediante la comparación de una cadena de láseres y multiplicadoras de frecuencia, lo que ha permitido adoptar un valor convencional exacto para la velocidad de la luz en el vacío. Entonces, la definición actual del metro es el camino recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo igual a $1 / 299\,792\,458$ de segundo, con reproducibilidades de una parte en 10^{-12} . Con técnicas modernas se puede reproducir esta unidad y medir directamente longitudes o desplazamientos, utilizando interferómetros y rayos láser. Esta definición puede ponerse en práctica

mediante dos métodos: uno es a tiempo de tránsito y otra es la interferometría, que es una técnica que permite obtener franjas de interferencias a partir de una fuente luminosa coherente, tal como los láseres monómodos. Con una fuente estable y coherente pueden medirse directamente distancias de hasta 100 m con una incertidumbre del orden de 10^{-9} .

En los estudios hechos sobre la interferometría, se encontró que la visibilidad de las franjas depende del ancho de banda y de las dimensiones de la fuente^{2,4}. En este capítulo se hará un repaso general de los principios de interferometría y microscopia interferencial, conceptos necesarios para desarrollar este trabajo.

1.1 INTERFEROMETRÍA

1.1.1 Introducción. La interferometría de las ondas electromagnéticas, es un fenómeno que se puede observar en la vida diaria. Por ejemplo, las franjas de colores que se ven a través de las burbujas de jabón o en una mancha de aceite en un camino húmedo. En la actualidad este fenómeno es un procedimiento estándar en el desarrollo científico. Un estudio detallado de estos fenómenos se encuentra descritos en Born and Wolf⁷, Steel⁸, Hariharan⁹.

La interferometría se basa en la superposición en amplitud y fase producida cuando dos ondas luminosas de exactamente la misma frecuencia se suman. Además de tener la misma frecuencia, estas ondas deben ser sincrónicas, es decir que sus diferencias de fase, y por lo tanto las distancias entre las crestas de ambas ondas, deben permanecer constantes con el tiempo. Esto es prácticamente posible sólo si la luz de ambas ondas que interfieren proviene de la misma fuente luminosa. Pero si es solamente una fuente luminosa la que produce la luz, los dos

⁷Born and Wolf "Principles of Optics" Sixth ed. Pergamon Press, 1980.

⁸W. H. Steel "Interferometry" Cambridge at the University Press, 1967

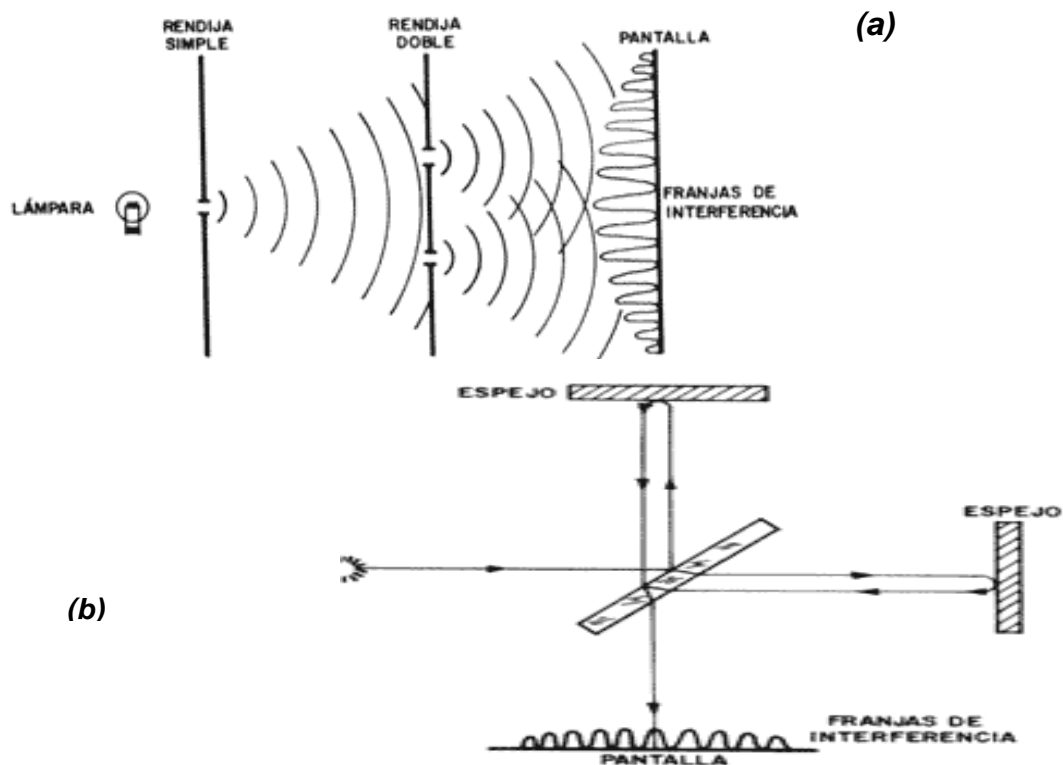
⁹P. Hariharan "Optical Interferometry" Academic Press, 1985.

haces luminosos que interfieren deben generarse de alguna manera del mismo haz.

Existen dos procedimientos para obtener dos haces de luz a partir de una fuente luminosa. La primera se denomina división de amplitud y la segunda división de frente de onda.

Usando estos dos métodos básicos se han diseñado una gran cantidad de interferómetros, con los que se pueden efectuar medidas sumamente precisas. La figura 1 muestra dos interferómetros muy comunes, el primero (a) es el sistema de dos rendijas de Young, que produce interferencia por frente de onda y el segundo (b) es el de Michelson, que produce interferencia por división de amplitud.

Figura 1. (a) Interferómetro de Young, que funciona por división de frente de onda y (b) interferómetro de Michelson, que funciona por división de amplitud.



El procedimiento utilizado en las pruebas experimentales se hizo con un sistema de microscopía interferencial tipo mirau, la cual tiene como procedimiento la división de amplitud de las ondas. Más adelante en otra sección de este capítulo se explica con más detalle.

1.1.2 Aplicaciones. La interferometría es ahora una herramienta indispensable en muchas actividades en las que sea necesario realizar mediciones. A partir de 1947 se han extendido estas técnicas a las ondas de radio, iniciándose así la radiointerferometría astronómica. Hoy en día, por medio de técnicas interferométricas se pueden realizar una gran variedad de medidas sumamente precisas, entre las que podemos mencionar las siguientes:

Medida y definición del metro patrón: El primero que tomó la longitud de onda de la luz como referencia para especificar longitudes de objetos fue Michelson. Esto se hace por medio del interferómetro que se muestra en la figura 1(b), el cual tiene su mismo nombre.

Medida de las deformaciones de una superficie: Frecuentemente, debido a causas muy variadas, una superficie puede tener deformaciones pequeñísimas que no son detectables a simple vista. A pesar de su reducida magnitud, estas deformaciones pueden ser el síntoma de problemas graves presentes o futuros. Como ejemplo, podemos mencionar una fractura de un elemento mecánico de un avión o de una máquina; una deformación en una pieza mecánica sujeta a fricción y finalmente, otro ejemplo es una deformación producida por esfuerzos mecánicos que ponen en peligro la estabilidad del cuerpo que los sufre. Es aquí donde la interferometría tiene un papel muy importante, detectando y midiendo estas pequeñísimas deformaciones de la superficie.

Determinación de la forma exacta de una superficie: Las superficies ópticas de los instrumentos modernos de alta precisión tienen que tallarse de tal manera que

no tengan desviaciones de la forma ideal, mayores de una fracción de la longitud de onda de la luz. Frecuentemente, las superficies no son esférica sino de cualquier otra forma, a la que de modo general se le denomina asférica. Medir las deformaciones de estas superficies se hace mediante la interferometría, con técnicas muy diversas y complicadas.

Alineación de objetos sobre una línea recta perfecta: Es frecuente que aparezca la necesidad de tener una línea recta de referencia muy precisa en una gran cantidad de actividades ingenieriles de tipo muy diverso. Por ejemplo, la bancada o base de un torno de alta precisión debe ser tanto más recta cuanto más fino sea el torno. En este problema y muchos otros en los que se requiera alinear algo con muy alta precisión, la interferometría es un auxiliar muy útil.

Determinación muy precisa de cambios del índice de refracción en materiales transparentes: Los vidrios ópticos, plásticos o cristales que se usan en las lentes, prismas y demás elementos ópticos tienen que ser de una alta homogeneidad tanto en su transparencia como en su índice de refracción. Esto es especialmente necesario si el instrumento óptico que los usa es de alta precisión. Esta homogeneidad de los materiales transparentes se mide con la tolerancia que sea necesaria por medio de interferometría.

Determinación muy precisa de velocidades o de variaciones en su magnitud: Cuando una fuente luminosa se mueve respecto al observador, es bien sabido que la longitud de onda de la luz tiene un cambio aparente, alargándose o acortándose, según que el objeto luminoso se aleje del observador o se acerque a él, respectivamente. Este es el llamado efecto Doppler, que se descubrió primero para las ondas sonoras y posteriormente para la luz. Por medio de interferometría se pueden detectar y medir variaciones sumamente pequeñas en la longitud de onda, lo que permite detectar movimientos o cambios también muy pequeños en la velocidad de un objeto. Esta propiedad se ha usado en muy diversas

aplicaciones, entre otras, la medida de la velocidad del flujo de líquidos o de gases.

Medición de ángulos: Los ángulos, al igual que las distancias, también se pueden medir con alta precisión por medio de técnicas interferométricas. Por ejemplo, el paralelismo entre las dos caras de una placa de vidrio de caras planas y paralelas, o el ángulo recto entre las dos caras de un prisma se pueden medir con una incertidumbre mucho menor de un segundo de arco, lo que es totalmente imposible de lograr por otros métodos.

La lista podría continuarse, pero con estos ejemplos es suficiente para darnos cuenta de la enorme utilidad de la interferometría, en el uso de las ondas de luz como unidad de medida.

En el desarrollo del proyecto, se utiliza la interferometría para uno de los casos de aplicación ya mencionado, el relacionado con la determinación muy precisa de magnitudes. En este caso haciendo uso de un sistema interferométrico se pueden detectar y medir variaciones de rangos sumamente pequeños en la longitud de onda, permitiendo detectar movimientos o cambios mínimos del piezo eléctrico al ser sometido a diferentes valores de voltaje. Estos cambios que sufre el transductor eléctrico, se deben a la propia característica que presenta este tipo de cristales.

1.2 MICROSCOPIA DE INTERFERENCIA

Hace solamente tres o cuatro décadas, los microscopios de interferencia¹⁰ fueron mirados como el pináculo del logro óptico y mecánico en el campo de la microscopia ligera. Algunos eran tan costosos como los microscopios electrónicos

¹⁰DUNN, Graham Microscopia de interferencia para transmitir luz: una técnica llevada antes de su tiempo. Londres: Instituto de Randall, Universidad Londres de King's.

del tiempo y solo eran utilizados por personal especializado en su uso, quienes fueron tratados con respeto por el desarrollo de sus trabajos experimentales.

La automatización de los microscopios de interferencia para la transmisión de luz ya está siendo explotada en las últimas décadas, y está claro que con el uso de los interferómetros se logra medir distancias del orden de los nanómetros, como es el caso de este proyecto de investigación.

En la literatura hay varias descripciones de microscopios interferométricos, pero aquí sólo se hará énfasis en el sistema interferométrico que se utilizó en la parte experimental, es decir un microscopio de reflexión con un objetivo interferométrico tipo Mirau¹¹, el cual será descrito en la siguiente sección.

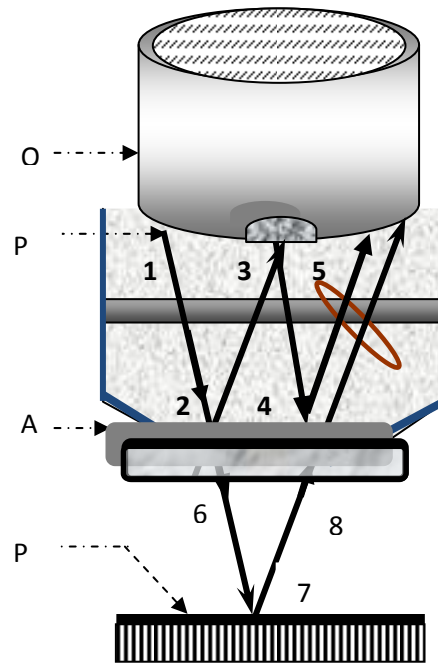
1.2.1 Sistema de Microscopía Interferencia tipo Mirau. En la actualidad se han creado algunos diseños de microscopios interferométricos útiles para la caracterización de transductores piezoeléctricos. Entre los tipos de microscopios interferométricos más comunes están: tipo Mirau, Link, Michelson y Confocal, entre otros, cada uno posee sus ventajas y sus desventajas.

Para este trabajo se utilizó un sistema de microscopio constituido por un microscopio de reflexión el cual tiene un objetivo tipo Mirau (Ver figura 2), el cual internamente posee una placa semireflectiva A entre el objetivo O y la muestra P2, y un espejo de referencia P1 sobre el centro de su componente frontal. Cuando un haz de luz pasa a través del objetivo, parte del haz se transmite hacia la muestra P2 y parte se refleja por la presencia de la lámina separadora A. El haz reflejado va al espejo de referencia P1, regresa a A y se superpone con el haz reflejado por el objeto P2. De esta forma, la señal de correlación de los dos haces es vista por

¹¹KINO G. S. Y CHIM S. S. C. Mirau correlation microscope, Applied Optics. Vol. 29, No.26, 1990. pp. 3775-3783.

el objetivo O. El contacto óptico se lleva a cabo cuando el camino óptico comprendido por 1-2-3-4 y 5 es igual al camino óptico entre 1-2-6-7 y 8¹².

Figura 2. Objetivo de microscopio interferencial tipo Mirau.



O: Objetivo, P1: Espejo de referencia, A: Lámina Separadora, P2: Muestra.

1.3 INTERFERENCIA DE DOS ONDAS

En un interferómetro a dos ondas, por lo general, un campo eléctrico incidente $\vec{E}(t)$ se divide en dos haces que luego se hacen interferir en la salida del interferómetro. La expresión general para la intensidad en la salida de un interferómetro a dos ondas tiene la siguiente forma¹³:

¹² Ibid 11.

¹³SUAREZ M. "Op. Cit.

$$I(\tau) = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} C(\tau), \quad (1)$$

Donde I_1 e I_2 son las intensidades de los dos haces que interfieren, τ el retardo temporal entre los haces y $C(\tau)$ la función de autocorrelación del campo $\vec{E}(t)$.

1.4 INTERFERENCIA CON UNA FUENTE MONOCROMÁTICA

Cuando dos ondas monocromáticas con amplitudes complejas se superponen, el resultado es una onda monocromática con igual frecuencia y amplitud compleja:

$$U(\mathbf{r}) = U_1(\mathbf{r}) + U_2(\mathbf{r}) \quad (2)$$

La intensidad de la onda en un punto del espacio, alejado de las fuentes, esta dada por la relación.

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos \varphi \quad (3)$$

Donde $I_1 = |U_1|^2$, $I_2 = |U_2|^2$ y $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ es la diferencia de fase entre las dos ondas que interfieren. La relación (3) se conoce como ecuación de interferencia. La intensidad de la superposición de las dos ondas no es la suma de sus intensidades; un término adicional, atribuido a la interferencia entre las ondas se presenta. Este término puede ser positivo o negativo, correspondiendo a interferencia constructiva o negativa, respectivamente.

Considere la superposición de dos ondas planas, cada una con intensidad I_0 , propagándose en la dirección z , si se asume que una de ellas está retrasada una distancia d con respecto a la otra, entonces la ecuación de interferencia queda en la forma:

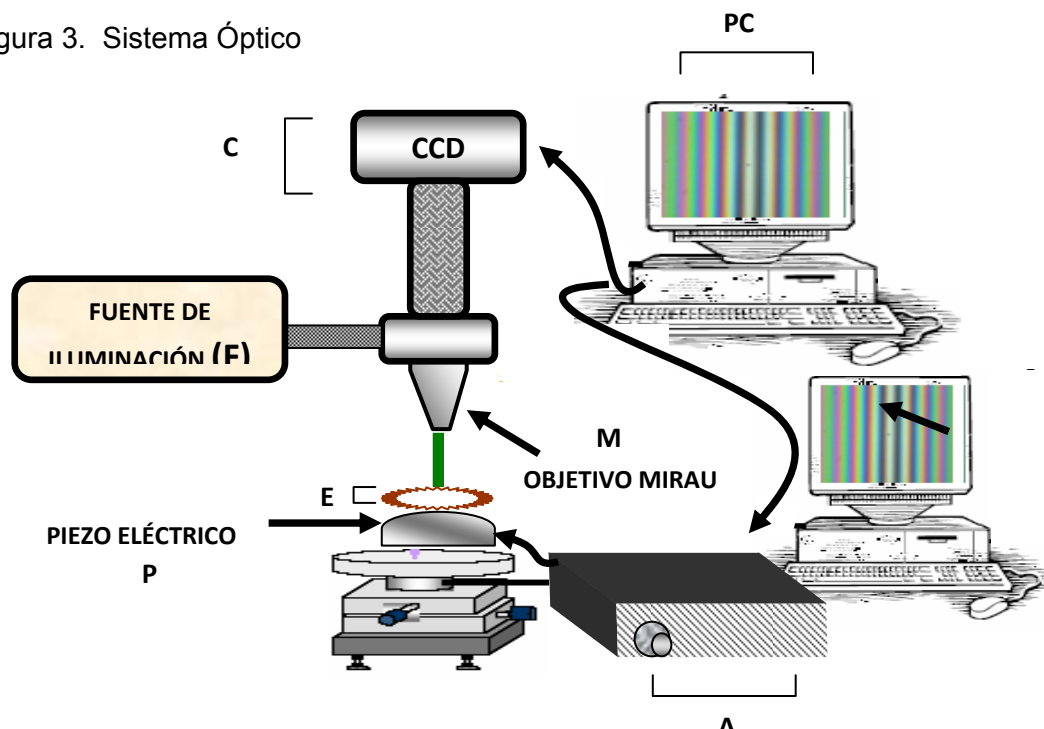
$$I = 2 * I_0 \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{d}{\lambda} \right) \right] \quad (4)$$

Donde λ es la longitud de onda. Si el retardo es un múltiplo entero de la longitud de onda, ocurre entonces interferencia constructiva completa y la intensidad total es $I = 4I_0$, por otro lado si el retardo es un múltiplo impar de media longitud de onda entonces ocurre interferencia destructiva completa y la intensidad total es $I = 0$.

1.5 SISTEMA ÓPTICO

El montaje del sistema óptico que se utilizó para desarrollar el trabajo se ilustra en la figura 3.

Figura 3. Sistema Óptico



C: Cámara CCD, **M:** Objetivo tipo Mirau, **E:** Espejo, **P:** Piezo Eléctrico, **F:** Fuente de Luz, **A:** Amplificador de Voltaje, **PC:** Computador Personal.

Consta de un microscopio interferencial (NIKON – ECLIPSE ME600) con un **(M)** Objetivo tipo mirau (NIKON-10X) acoplado al microscopio. El sistema es alimentado por una **(F)** Fuente de iluminación con luz blanca. La adquisición se realiza por medio de una Video Cámara Module (CCD Model XC-75 marca SONY) Monocromática **(C)** el cual está acoplada a la computadora por una tarjeta digitalizadora de video (MATROX PULSAR) que trae incorporada una tarjeta VGA.

Al **(PC)** o computador personal se conecta un dispositivo electrónico que magnifica señales llamado Amplificador de voltaje **(A)** o Convertidor de 12 bits (HOLA – LASER) el cual es controlado por un puerto del computador y este dispositivo a la vez se conecta al **(P)** Piezo eléctrico (PIEZO SYSTEM JENA Ref. 0693) por medio de un cable. El cristal piezo eléctrico se coloca sobre la base de observación de muestras del microscopio y sobre el cristal piezo eléctrico se coloca un **(E)** espejo de superficie plana, el cual se utiliza como objetivo para que las ondas de luz se reflejen.

El piezo está regulado por un sistema de control digital que consta de una interface la cual cuenta con un convertidor analógico digital **(A)** que convierte señales binarias en analógicas. El amplificador es graduable y permite variar el rango de desplazamiento del Piezo como producto de los valores de voltaje que se le aplique. Para graduar el valor del voltaje, se manipula un botón localizado en la parte exterior que permite operar valores que se encuentran en el rango desde **0** hasta **10**. Este factor de amplificación determina la escala del voltaje que se aplica al cristal piezo eléctrico y de este valor depende el desplazamiento del piezo. El Amplificador de Voltaje requiere para su uso la instalación interna de la tarjeta de control en uno de los slot tipo ISA de la tarjeta madre del PC y la instalación previa de sus controladores. Este amplificador de voltaje puede manipular valores desde los 0 hasta (2^{12}), es decir, permite que el sistema siempre funcione hasta con 4096 pasos.

Debido a la restricción que presenta la tarjeta de control para ser instalada en un slot tipo ISA, se utilizó para el montaje óptico un equipo con arquitectura antigua que posea este tipo de slot. En la actualidad ya existe en el mercado computadores de alta tecnología para instalar también las tarjetas tipo ISA. El ordenador utilizado para el montaje consta de un microprocesador Pentium(r) con capacidad de memoria de 32.0 Mb de RAM y un disco duro de 4 GB. Este equipo tiene instalado el Sistema Operativo Microsoft Window 95 y el software de adquisición de imágenes MATVIS. Esta aplicación se describe más en detalle en el capítulo III.

El sistema óptico está controlado mediante el software MATVIS. Utilizado uno de los módulos de la aplicación se logra observar las imágenes de las franjas interferométricas y guardar los patrones de interferencia para posteriormente ser analizadas. Luego de la obtención de estas imágenes, se hace unos cálculos matemáticos y un análisis para definir su curva de histéresis y caracterizar el cristal piezo eléctrico en estudio. Para calibrar la intensidad de la luz de la imagen se utiliza un filtro color verde, el cual se explicará más a profundidad en el capítulo donde se hace referencia a los conceptos de calibración.

2. CRISTAL PIEZO ELÉCTRICO

2.1 DEFINICIÓN

Algunas sustancias especialmente algunos cristales como el cuarzo desarrollan una tensión eléctrica en su superficie cuando se les acciona mecánicamente y se llaman piezo eléctricos. La palabra piezo viene del latín, y quiere decir apretar. Esta característica se usa en el diseño de muchos transductores diferentes, especialmente acelerómetros, transductores de fuerza, transductores de presión, y cartuchos de fonógrafos.

En un cristal piezo eléctrico las cargas eléctricas positivas y negativas están separadas, pero simétricamente distribuidas, el cristal es eléctricamente neutro. Cuando una tensión es aplicada, esta simetría se destruye, y la asimetría de carga genera un voltaje.

Los materiales de Piezoeléctricos también muestran el efecto opuesto, llamada piezoelectricidad inversa, donde la aplicación de un campo eléctrico crea la tensión mecánica (la distorsión) en el cristal, porque las cargas dentro del cristal están separados y el voltaje aplicado afecta los puntos diferentes diferentemente dentro del cristal, produciendo la distorsión. Las fuerzas del torcimiento generadas por la piezoelectricidad inversa son sumamente altas. La única razón que la fuerza normalmente no se nota es porque causa un desplazamiento del orden de los nanómetros.

En conclusión, un cristal piezo eléctrico tiene algunas propiedades interesantes. Cuando estos cristales se presionan generan una carga eléctrica, y cuando se aplica una carga eléctrica en el cristal éste se deforma.

2.2 HISTORIA DEL CRISTAL PIEZO ELÉCTRICO

Una propiedad relacionada conocida como la pyroelectricidad¹⁴, la habilidad de ciertos cristales minerales de generar cargas eléctricas cuando se calienta era conocida ya en el siglo 18, y fueron definidas por Brewster en 1824. En 1880, los hermanos Pierre Curie y Jacques Curie predijeron y demostraron la piezoelectricidad que usa algunos elementos como el alambre e imanes, Ellos mostraron que cristales como el cuarzo y el topacio generan la polarización eléctrica por tensión mecánica.

La piezoelectricidad se dedujo matemáticamente de los principios termodinámicos fundamentales por Lippmann en 1881. Los Curies inmediatamente confirmaron la existencia del efecto inverso.

La primera aplicación práctica para los dispositivos piezoeléctricos fue el sonido, las primeras aplicaciones se desarrollaron durante la Primera Guerra Mundial. En Francia en 1917, Paul Langevin y sus compañeros de trabajo desarrollaron un descubridor submarino ultrasónico. El descubridor consistió en un transductor, hecho de cristales de cuarzo delgados cuidadosamente encolados entre dos platos de acero, y un teléfono especial para operar en el agua para descubrir el eco.

En las próximas décadas, nuevos materiales del piezoelectricidad y nuevas aplicaciones para esos materiales se exploraron y se desarrollaron. Los dispositivos Piezoeléctricos encontraron aplicabilidad en muchos campos. Por ejemplo, en los cartuchos del fonógrafo en los tocadiscos de esa época. Podían hacerse los micrófonos eléctricos de cerámica pequeños y sensibles. También en el desarrollo de transductores ultrasónicos permitieron realizar fáciles medidas de

¹⁴ <http://www.piezo.com/history.html> "Historia del Piezo Eléctrico"

viscosidad y elasticidad en los fluidos y sólidos, produciendo grandes adelantos en la investigación de los materiales.

Los esfuerzos japoneses en la investigación de los materiales crearon los materiales de piezocerámica competitivo a los materiales americanos. Para los Japoneses, los desarrollos de piezoeléctricos incluyen los nuevos planes de filtros de piezocerámica usados en las radios y televisiones, zumbadores del piezo y transductores de audio que podrían conectarse directamente en los circuitos electrónicos y los transductores ultrasónicos. Estos transductores fueron instalados en varios modelos de automóviles como dispositivos de localización, ayudando al chofer a determinar la distancia de la parte de atrás del automóvil a cualquier objeto que puede estar en su camino.

2.3 APLICACIONES DEL CRISTAL PIEZO ELÉCTRICO¹⁵

Se usan cristales Piezoeléctricos de numerosas maneras. A continuación se mencionan algunas de estas:

Como fuente de alto-voltaje: La piezoelectricidad directa de algunas substancias como cuarzo, puede generar miles de voltios.

La aplicación probablemente mejor conocida es el encendedor del cigarro eléctrico: Apretando el botón aprieta un cristal del piezoelectrico, y el voltaje alto producido enciende el gas. Igualmente es usado para las parrillas o estufas de gas portátiles.

Como sensores: Para reproducir el sonido, por ejemplo para los micrófonos y las guitarras con amplificador eléctrico.

¹⁵ Ibid.

También se usan los elementos de piezoeléctricos en la generación del sonido como sensores biológicos.

Adicionalmente, el piezo ha tenido gran auge y aplicaciones en el campo de la medicina, por ejemplo como transductor del sonido a pacientes con deficiencia auditiva en implantes del oído medio también llamados “puentes del sonido”. Estos transductores eléctricos han sido diseñados para aquellos con pérdidas auditivas conductivas o mixtas imposibles de resolver. Los implantes de oído medio son útiles aún para pacientes con pérdidas puramente sensoriales¹⁶.

Como actuador: Como los voltajes muy altos corresponden a sólo cambios diminutos en la anchura del cristal, ésta anchura puede cambiarse con la precisión y la exactitud extrema en un altavoz, para la alineación electrónica de espejos láser y en los microscopios de fuerza atómica.

Como normas de frecuencia: La piezoelectricidad inversa permite generar una serie regularmente cronometrada de pulsos eléctricos que se usan para guardar huella del pasaje de tiempo. El cristal de cuarzo tiene una frecuencia natural para oscilar. Esta puede ser usada para estabilizar la frecuencia de un voltaje periódico aplicada al cristal.

En los transmisores de la radio y receptores, y en computadoras dónde crea un pulso del reloj, normalmente usan un multiplicador de frecuencia para alcanzar los Megahertzios y rangos del Gigahertzios.

¹⁶MANIGLIA, A., PROOPS, D. (ed.). "Implantable Electronic Otologic Devices: State of the Art", The Otolaryngologic Clinics of North America, Vol. 34, No. 2., Philadelphia: W.B. Saunders, 2001.

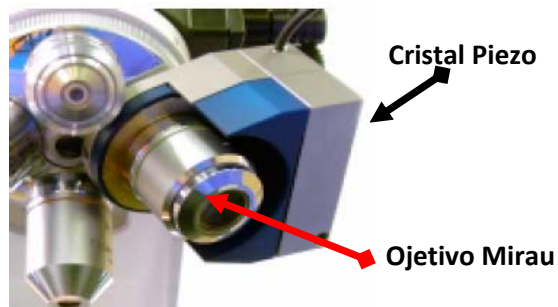
2.4 CRISTAL PIEZO ELÉCTRICO JENA REF. 0693

Este piezo eléctrico funciona con rangos de voltaje que van desde cero (0) hasta los ciento cincuenta (150) voltios, y permite un desplazamiento máximo de 30 micrómetros.

Una de las dificultades que tiene este cristal piezo eléctrico, es que su estructura física no permite acoplar el transductor al objetivo Mirau del microscopio como lo permiten otras referencias de cristales piezo eléctricos. Por lo tanto, se deben colocar las piezas a ser analizadas sobre el cristal piezo eléctrico y las piezas no quedan independientes o libres. Algunas veces se tendrán que analizar piezas muy pesadas como será el caso de otras investigaciones y al colocarlas encima del cristal piezo eléctrico provocaría problemas por el contrapeso de la pieza y afectarían físicamente el piezoeléctrico hasta dañarlo.

En la actualidad ya existen algunos cristales piezo eléctricos que permiten colocarlo al objetivo Mirau como se indica en el montaje de la Figura 4. Este no es el caso del cristal piezo eléctrico Ref. 0693.

Figura 4. Objetivo de microscopio interferencial tipo Mirau y un piezo eléctrico



3. AREA DE INGENIERÍA DEL SOFTWARE

En un proceso de desarrollo software se hacen partícipes algunos componentes, algunos de ellos son: el paradigma de programación de la aplicación, el lenguaje de programación utilizado para el desarrollo del software y la arquitectura de la aplicación, los cuales en conjunto integran una metodología de desarrollo.

3.1 LENGUAJE DE DESARROLLO (VISUAL C++)

Visual C++ es un lenguaje de programación que permite crear aplicación de diversos tipos. Por ejemplo, bases de datos, control de procesos, representaciones gráficas, aplicaciones multimedia, aplicaciones para internet, etc.

Este lenguaje, además de varias herramientas que lo convierten en un generador de C++, contiene un conjunto completo de clases MFC, que permite crear de una forma intuitiva las aplicaciones para Windows y manejar los componentes de Windows según su naturaleza de objetos.

Visual C++, incluye una gran cantidad de clases útiles para manejar gráficos, cálculos matemáticos y conectividad con datos.

Microsoft Visual C++¹⁷ es un entorno de programación en el que se combina la programación orientada a objetos (C++) y el sistema de desarrollo diseñado especialmente para crear aplicaciones gráficas para Windows SDK (Software development Kit).

¹⁷CEBALLOS, Francisco Javier. Aplicaciones para Win32, Microsoft Visual C++ 6. México: Alfaomega, 2000.

Programando en Visual C++, se puede manipular el ratón, el teclado, el monitor, la impresora, los puertos de comunicaciones y el reloj del sistema sin tener en cuenta el dispositivo periférico.

Visual C++ es un paquete para desarrollar aplicaciones que incluye, como características sobresalientes:

- ❖ Una biblioteca de clases, MFC, que da soporte a los objetos Windows tales como ventanas, cajas de diálogo, controles (por ejemplo, etiquetas, cajas de texto, botones de pulsación, etc.), así como los objetos GDI (Graphic Device Interface) tales como lápices (pens), pinceles (brushes), fuentes (fonts) y mapas de bits (bitmaps). A su vez, los objetos se comunican entre sí mediante mensajes, también soportados por las MFC.
- ❖ Un entorno de desarrollo integrado (editor de texto, compilador, depurador, explorador de código fuente, administrador de proyectos, etc.).
- ❖ Asistentes para el desarrollo de aplicaciones como AppWizard, editores de recursos, ClassWizard, ControlWizard, WizardBar y ATL COM Wizard (Activate Template Library Component Object Model Wizard).
- ❖ Galería de objetos incrustados y vinculados (OLE-Object Linking and Embedding).
- ❖ Una interfaz para diferentes tipos de aplicaciones que se pueden crear como son: simple documento (SDI - Single Document Interface), múltiples documentos (MDI-Multiple Document Interface) y basados en diálogo (DBI - Dialog Based Interface).
- ❖ Creación y utilización de bibliotecas dinámicas (DLL-Dynamic Link Libraries), incorporando nuevas clases, funciones y métodos para programación.
- ❖ Soporte para el estándar COM (Component Object Model- modelo de objeto componente; en otras palabras, componente software) al que pertenecen los componentes activos (ActiveX o formalmente controles OLE).

❖ Objetos de acceso a datos (DAO) que permiten acceder a bases de datos a través del motor de Access o de controladores ODBC.

Cuando se combinan estas características, se dispone de un potente sistema de desarrollo que permite diseñar eficientemente aplicaciones sofisticadas.

Visual C++, cuando se utiliza para desarrollar aplicaciones para Windows, se centra en dos tipos de objetos: ventanas y controles. Una ventana puede también incluir menús desplegables para proporcionar al usuario un amplio rango de órdenes seleccionables. A su vez, las órdenes más utilizadas pueden duplicarse en una barra de herramientas con el fin de proporcionar al usuario un acceso más cómodo.

3.2 PROGRAMACIÓN ORIENTADA A OBJETOS (POO)

Este paradigma de programación es un tipo de lenguaje de programación basado en la idea de encapsular estados y operaciones en objetos. En general, la programación se resuelve comunicando dichos objetos a través de mensajes (programación orientada a mensajes). Este paradigma aborda conceptos como son: objetos, clases, métodos, polimorfismo, herencia, etc. Una clase tiene definida las variables u objetos miembros y las funciones miembros con las que trabaja.

Implementar bajo el paradigma orientado a objetos POO (Object-oriented programming), requiere que el programador se enfoque en datos y en métodos que manipulen esos datos, más que en procedimientos.

Las clases se organizan en forma jerárquica de modo que existen las llamadas superclases y las subclases que “heredan” su comportamiento, el uso de dichas clases facilita el desarrollo y mantenimiento. También soporta el llamado “polimorfismo”, el cual permite que una clase tenga métodos llamados de la misma

manera y que sea el lenguaje el que seleccione cual debe usar, de acuerdo con los tipos o cantidad de parámetros con el que es llamado.

La principal ventaja de este tipo de programación, es la reutilización de códigos y su facilidad para pensar soluciones a determinados problemas.

3.3 ENTORNO DE DESARROLLO VISUAL C++

Visual C++ ofrece un entorno de desarrollo de C/C++ integrado en Windows que permite construir aplicaciones Windows (.EXE), aplicaciones de consola(.EXE), bibliotecas de enlace dinámico (.DLL), bibliotecas estáticas (.LIB), modelos AppWizard personalizados (.AWX), controles activos (ActiveX) y otros.

Desde el entorno de desarrollo Visual C++, se puede acceder fácilmente a muchas herramientas que facilitan al programador en la tarea de implementación de un software. Las siguientes herramientas son las más utilizadas:

AppWizard. Esta herramienta es accesible a través de la vista Projects que se visualiza cuando se ejecuta la orden New del menú File del entorno de desarrollo y permite crear el esqueleto básico de una aplicación a partir de la biblioteca de clase MFC incluida en Visual C++. Este esqueleto está compuesto por una serie de ficheros fuentes y ficheros de recursos. Los ficheros fuente contienen el código C++ que dan lugar a la aplicación y los ficheros de recursos contienen la descripción de los recursos que utiliza la aplicación.

ClassWizard. Esta herramienta, accesible desde el menú View del entorno de desarrollo, opcionalmente desde la barra de herramientas, permite generar automáticamente las clases y funciones que gestionan los mensajes de los objetos Windows. Se utiliza para conectar los controles de la aplicación con el código que se ha de ejecutar al actuar sobre dichos controles.

3.4 SOFTWARE MATVIS

3.4.1 Generalidades. El software MATVIS, es una aplicación desarrollada en Visual Studio 6.0 - C++ e implementado por el Dr. Arturo Plata en sus trabajos de investigación en el Laboratorio de Óptica y Tratamiento de Señales. Implementada para la adquisición y procesamiento de imágenes que se adquieren desde una cámara de adquisición de imágenes CCD y un microscopio interferométrico. Este sistema es utilizado por el equipo de investigadores que pertenecen a este centro de investigación y se considera una de las aplicaciones más importantes y de gran utilidad, debido a que permite la adquisición de imágenes a partir del microscopio interferencial NIKON, el cual se puede utilizar con diferentes tipos de objetivos mirau que existen disponibles en el laboratorio para las prácticas investigativas. El software MATVIS tiene la ventaja que se puede acceder al código fuente y realizar algunas modificaciones de acuerdo al trabajo que se vaya a desarrollar y amerite los cambios.

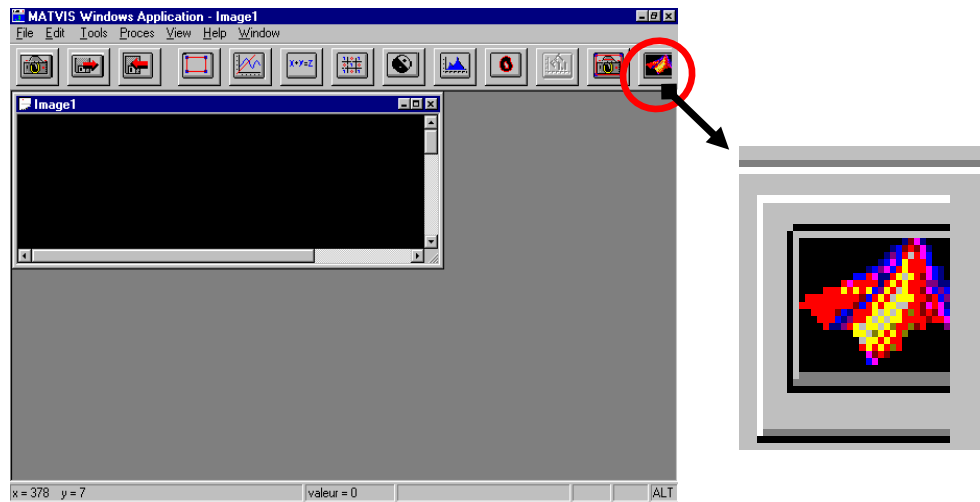
El software está implementado bajo ambiente Windows, utilizando librerías de Microsoft Foundation Class (MFC) de Visual Studio 6.0 C++ y algunas librerías especiales como son: MIL y MPP, las cuales se utilizan para el procesamiento de imágenes y la solución de cálculos vectoriales.

La aplicación, en su presentación inicial esta comprendida de un menú principal donde provee al usuario de un conjunto de órdenes agrupadas bajo una barra de menú que aparecerá debajo del título del formulario. Adicionalmente, debajo de la barra de menú, se encuentra una barra de herramientas que permite el acceso algunas de estas órdenes por medio de una representación gráfica o iconos.

3.4.2 Descripción del Software MATVIS. Esta aplicación tiene muchas utilidades en el área de tratamiento digital de imágenes. Para efectos de desarrollo de este proyecto, se utilizará y se explicará solo el icono que se encuentra señalado en la

siguiente figura, el cual se encarga de la tarea de adquisición y procesamiento de imágenes.

Figura 5. Presentación inicial de la aplicación Matvis Windows Application.



Cuando se activa este botón, se despliegan dos cuadros de diálogos como se muestra a continuación.

Figura 6. Diálogos para la adquisición y procesamiento de imágenes.



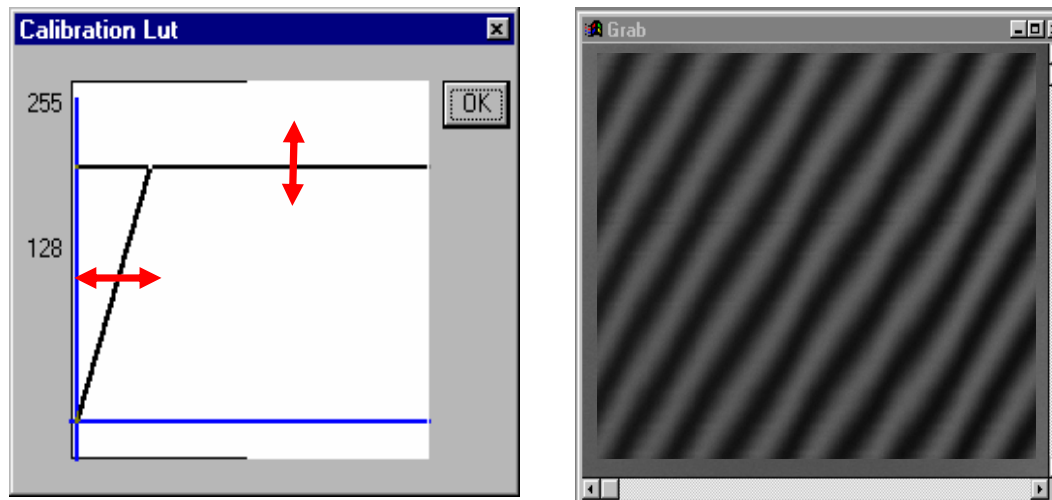
- 1) En el diálogo de la derecha, se observa como presentación preliminar la imagen de los patrones de interferencia.
- 2) El diálogo de la izquierda presenta cinco botones que permiten seleccionar diferentes opciones como son: Setting Piezo, Setting Microscope, Profil Monocr., Profil While L. y Cancel.

La interfaz del segundo diálogo permite hacer el puente entre el usuario y los datos. Su función principal es darle la oportunidad al usuario de seleccionar y digitar los datos requeridos por el sistema. Posteriormente el sistema envía al usuario el resultado de sus peticiones ya procesadas aplicando los procedimientos necesarios a los datos y ejecutando las operaciones para las cuales fue diseñado MATVIS. Esta interfaz es también la responsable de almacenar y mantener la integridad de la información que maneja la aplicación.

Cada botón tiene una tarea o función específica.

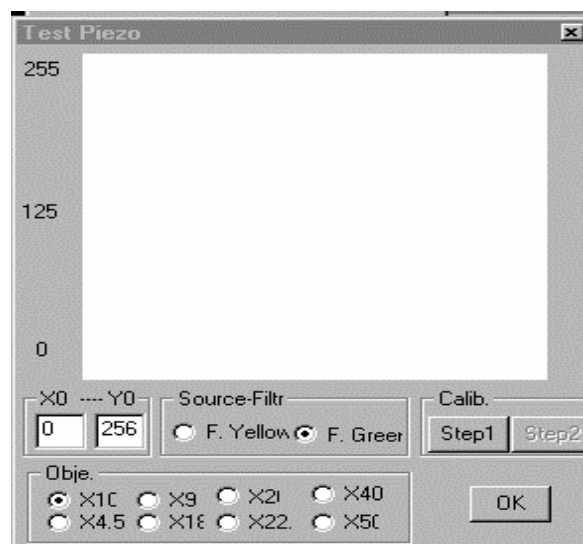
1. Setting Microscope. Se encarga de la calibración de la intensidad de luz de la imagen capturada. Aquí se puede manejar una paleta de colores para calibrar la intensidad de la luz. Esta interfaz da la oportunidad de mover unos ejes verticales y horizontales para graduar el color en la pantalla y visualizar que tan contrastada se encuentra la imagen en estudio y verificar que no quede saturada de color. Una imagen se considera saturada, cuando se observa en la mayoría de sus partes un color verde o rojo intenso. En la figura 7, se puede observar el diálogo de la paleta de colores y el diálogo con la imagen capturada.

Figura 7. Presentación del diálogo Setting Microscope.



2. Setting Piezo. Este módulo permite definir algunos parámetros específicos importantes para la obtención de los patrones de interferencia. A través de este diálogo, es posible seleccionar el tipo de filtro y la referencia del objetivo tipo Mirau que se utilizará para realizar las pruebas experimentales.

Figura 8. Presentación del diálogo Setting Piezo.



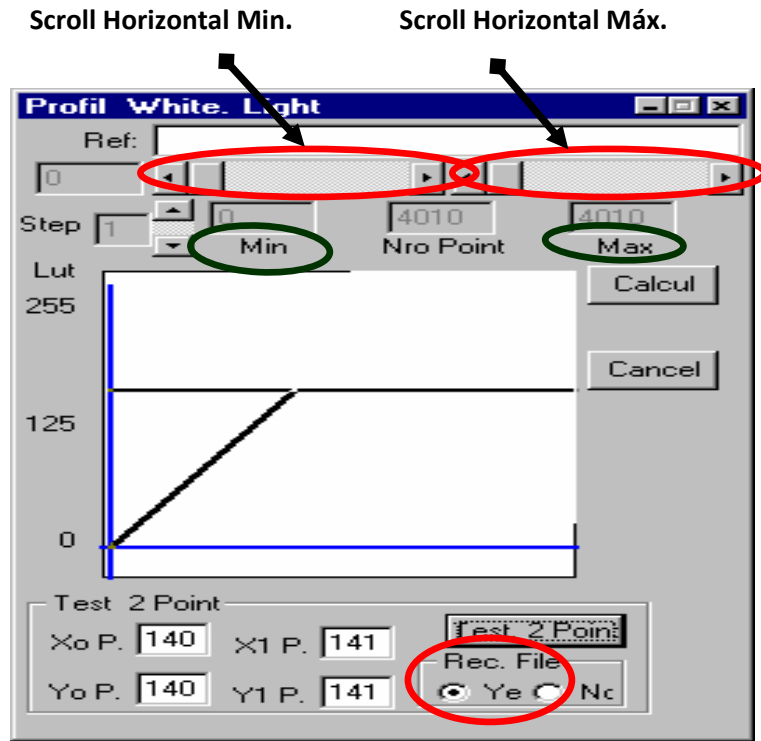
Cuando se asigna el color del filtro se caracteriza la longitud de onda y cuando se selecciona el objetivo tipo Mirau se determina el valor de cada píxel del eje X y Y en el plano de la imagen.

Para efectos de este trabajo, se usa un filtro de color verde y se obtienen imágenes con características de su color. Al definir la medida de la longitud de onda resultante, también se define el paso del desplazamiento que tendrán las franjas interferométricas para la medición de los desplazamientos del cristal piezo eléctrico Jena Ref. 0693, que corresponde a la mitad de la longitud de la onda definida.

3. Botón Test Piezo De Setting Piezo. Este objeto permite continuar con la calibración del filtro definido en el módulo *Setting Piezo*. El software Matvis en la actualidad está implementado para recorrer el cristal piezo eléctrico en el rango de 1 a 4010 pasos para su totalidad, pero para efectos de la calibración se escogen dos puntos cualquiera que se encuentren dentro del rango entre valores permitidos. Aquí se encuentra que el paso entre dos franjas interferométricas es equivalente a la mitad del valor de la onda del filtro de color verde ($\lambda/2=0.270 \mu\text{m}$).

4. Profile White L. Este módulo permite la definición del rango de valores de voltaje que serán enviados al cristal piezo eléctrico. De igual forma, permite grabar las intensidades de luz para cada punto cuando el cristal piezo se mueve, es decir, almacenar en memoria los interferogramas obtenidos y presentárselos al usuario para ser analizados.

Figura 9. Diálogo Profile White L.



Aquí se establece la cantidad de datos que se enviarán al piezo eléctrico (Figura 9).

Este diálogo cuenta con dos scroll horizontales: un scroll horizontal para seleccionar el punto Mínimo (Min) y un scroll horizontal para seleccionar el punto Máximo (Max). Estas dos posiciones están asociadas con el hardware, si muevo cualquiera de estos scroll se observa mover las franjas de interferencia. Del valor mínimo y máximo que se defina, es el barrido que realiza el piezo. En este módulo permite escoger un valor mínimo y un valor máximo que defina el barrido del voltaje aplicado al cristal piezo eléctrico. Como se desea conocer el comportamiento del cristal piezo eléctrico en toda su dimensión, se escoge todo el rango, es decir, de 1 a 4010 pasos y se evalúa su comportamiento.

Adicionalmente, haciendo uso de este módulo es posible la captura sucesiva de imágenes. El sistema permite grabar las imágenes haciendo click en la opción de YES y pulsando el botón “Rec. File” como se señala en la figura. Para este caso se graban las intensidades de luz para cada punto cuando el piezo se mueve. El sistema Matvis graba las imágenes en la raíz del directorio donde se encuentre la aplicación en un formato de fichero para imágenes .TIFF (Tagged Image File Format) en un archivo denominado: proflin.tif.

5. Profile Monocromatic. Este módulo no aplica para el desarrollo de este proyecto, por lo tanto, no es utilizado.

3.4.3 Lenguaje de Desarrollo MATVIS. El software MATVIS, se encuentra desarrollado con el lenguaje de programación Visual C++, debido a que este lenguaje permite crear aplicaciones para Windows y manejar puertos de comunicaciones para conectarse con el cristal piezo eléctrico. Y a partir de este sistema de comunicaciones observar las franjas de interferencia del desplazamiento del cristal piezo eléctrico y caracterizar su comportamiento.

Adicionalmente Visual C++, se utilizan para implementar aplicaciones para el control de procesos. En este proyecto se desea controlar el sistema óptico para la caracterización del piezo eléctrico Jena Ref. 0693.

Visual C++ permite incorporar algunas librerías adicionales para su funcionamiento, como lo hace con las librerías MIL (Matrox Imaging Library) y MPP. Estas librerías, reúne un grupo de funciones especiales para el procesamiento de imágenes y la solución de cálculos vectoriales, tareas importantes y necesarias para el buen funcionamiento de un software destinado para el procesamiento de imágenes interferométricas. Gracias a este conjunto de bibliotecas y el código fuente que lo interrelaciona con el sistema óptico, es posible la adquisición de franjas interferométricas y el estudio del comportamiento del

cristal piezo eléctrico para su caracterización. En la sección Librerías de este capítulo, se encuentra una definición más detallada acerca de las bibliotecas MIL y MPP.

La aplicación MATVIS, fue creada como MDI. Esta característica le permite crear una aplicación con una ventana principal y múltiples ventanas de documento. En este capítulo, en la sección de la Arquitectura de la aplicación, se encuentra una información más amplia acerca de la implementación MDI.

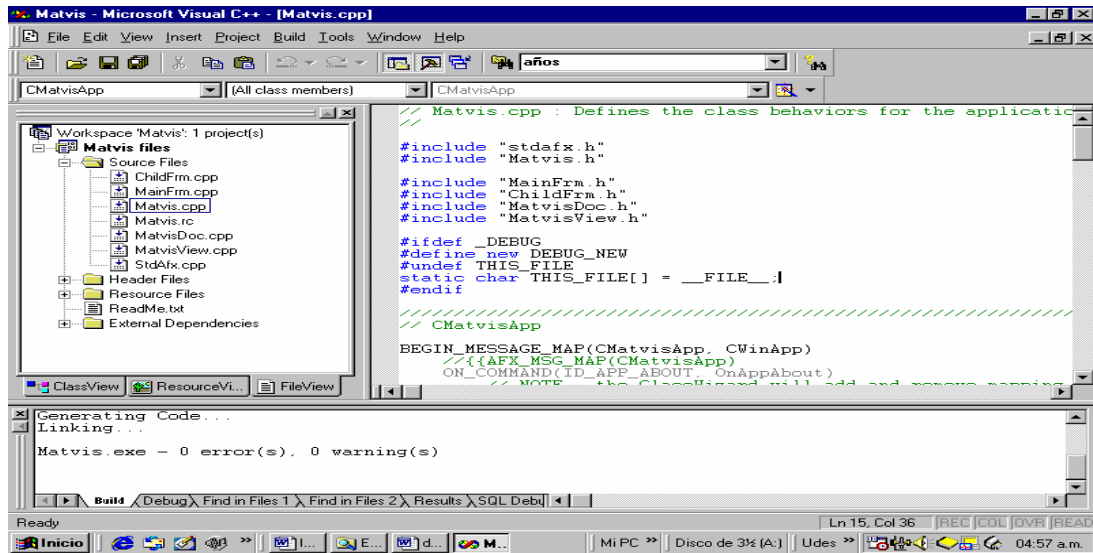
La aplicación MATVIS tiene en su presentación preliminar un menú desplegable que permite acceder a varias tareas que hacen parte de la funcionalidad del sistema. En este capítulo también se encuentra algunos gráficos con la interfaz del software MATVIS y algunos cuadros de diálogo con los que el usuario interactúa en el proceso de captura y procesamiento de imágenes que se obtiene bajo el sistema óptico montado para el desarrollo del este proyecto. Algunas de estas tareas están conectadas a varios diálogos que permiten interactuar con el usuario registrando algunas entradas y procesándolas hasta lograr que el sistema le entregue al usuario información en forma gráfica o textual.

3.4.4 Paradigma De Desarrollo MATVIS. El software MATVIS está implementado en Visual C++ basado en el paradigma orientado a objetos POO. La arquitectura de este software se enfoca en un esquema basado en objetos, clases, funciones, eventos, librerías y controles ActiveX entre otros.

El software MATVIS posee todas las bondades de una aplicación implementada bajo Windows y para Windows. Se implementó como una aplicación Windows (.EXE) y se corre invocando sus archivos ejecutables.

3.4.5 Entorno de Desarrollo MATVIS. La siguiente figura muestra el entorno de desarrollo de la aplicación MATVIS.

Figura 10. Entorno de desarrollo de la aplicación MATVIS



El escenario la aplicación MATVIS como toda aplicación Visual C++, consta de varias ventanas, como son: la **Ventana del proyecto** llamada también Workspace, que es la ventana de la izquierda de la figura anterior; la **Ventana de Edición** que se encuentra a la derecha del Workspace, y la **Ventana de Salida** o ventana de salida de resultados, denominada Output que se encuentra en la parte de debajo de las ventanas Workspace y de Edición. A continuación se describe cada una de las ventanas que tiene incorporadas el software MATVIS.

3.4.5.1 Ventana del proyecto. Esta ventana permite una cuidadosa gestión de los componentes de la aplicación. Cuando se crea o se abre una aplicación o proyecto, el entorno de desarrollo visualiza los componentes de este proyecto en la ventana Workspace. En la parte inferior de dicha ventana se visualizan tres pestañas que dan acceso a tres vistas: ClassView, ResourceView y FileView.

❖ **ClassView:** Visualiza las clases que componen la aplicación y sus miembros (funciones y variables miembros) de la clase.

Como lo muestran las figuras 11 y 12, la aplicación MATVIS consta de dos grandes Clases: la primera **CAboutDlg**, que se encarga del diálogo “Acerca De” y la segunda clase es **Dialfilt2**, la cual controla la interfaz principal del proyecto. Los rombos de color fucsia son las funciones miembros definidos en cada clase con sus respectivos atributos (públicos, privados o protegidos) y los rombos de color azul son las variables miembros definidas en las clases.

Figura 11. Vista Funciones Miembros del ClassView.

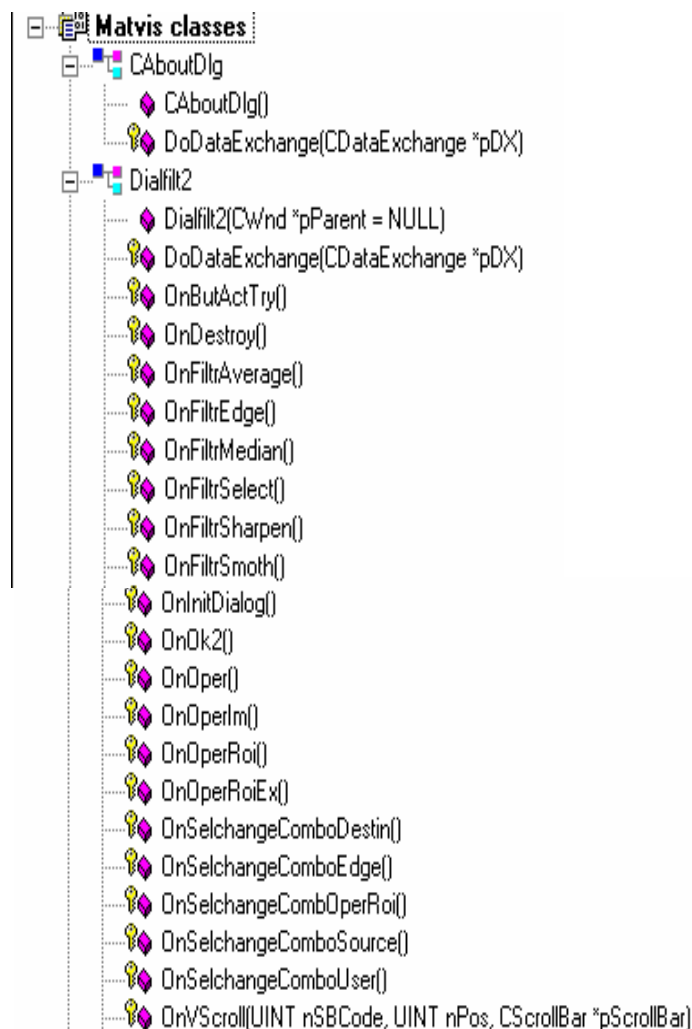
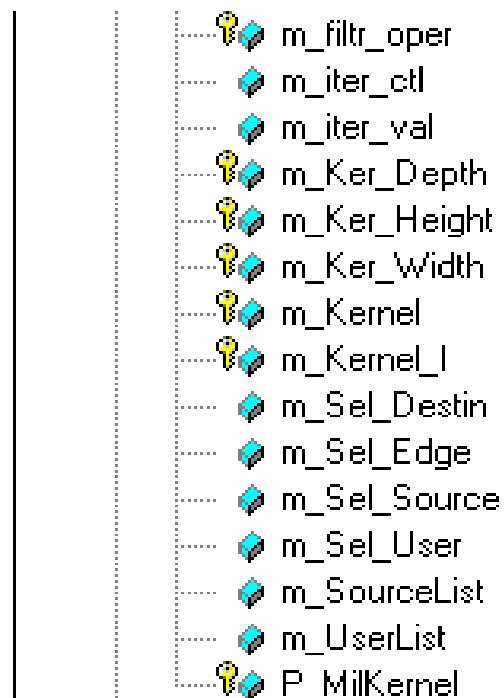


Figura 12. Vista Variables Miembros del ClassView



❖ **ResourceView:** Visualiza los recursos que forman parte de la aplicación. Los recursos pueden ser: diálogos, iconos, menús, aceleradores, tabla de cadenas de caracteres, barras de herramientas y otros.

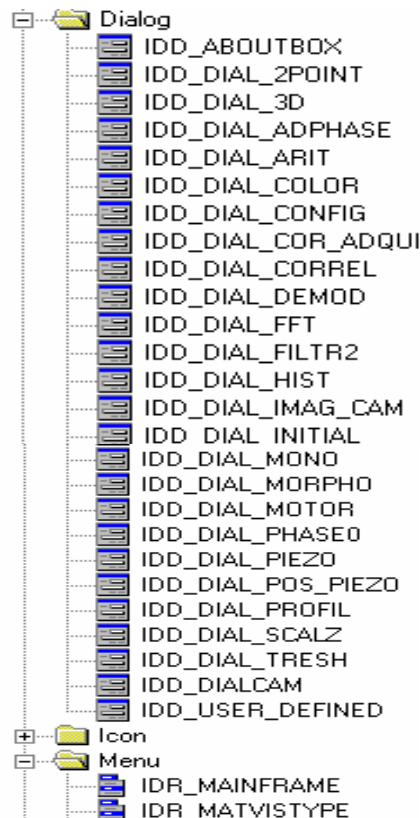
Los menús, son la forma de proveer al usuario de un conjunto de órdenes lógicamente relacionados, agrupadas bajo un mismo título. Un conjunto de todos los títulos correspondientes a los menús diseñados aparecerán en la barra de menús situada debajo del título del formulario.

Cuando el usuario haga clic en un título de un menú, se desplegará una lista visualizando los elementos que contiene el menú. Si no contiene elementos, se ejecutará directamente una acción. Los elementos de un menú pueden ser órdenes, submenús y separadores. Cuando se activa cada orden o se selecciona se despliega una caja de diálogo correspondiente a cada función.

La aplicación MATVIS, posee un menú principal como se observa en la Figura 10 que hace parte de la interfaz de presentación. Adicionalmente, cada menú contiene tareas o submenús muestra múltiples diálogos. Las cajas de diálogo contienen diferentes controles, como son: iconos, etiquetas, cajas de imágenes, botones de pulsación, botones de opción, barras de desplazamiento vertical y horizontal, marcos, casillas de verificación entre otros. A través de estos controles, el sistema permite registrar algunas condiciones y valores iniciales, adquirir imágenes y procesarlas.

Al colocar| en funcionamiento el sistema óptico a través de los diálogos, es posible ver las franjas interferométricas y utilizar las barras de desplazamiento horizontales para visualizar el desplazamientos del cristal piezo eléctrico a medida que se le aplican las diferencias de voltaje al cristal piezo eléctrico.

Figura 13. Vista Resource View del Entorno de desarrollo del Software MATVIS.



La mayoría de las ventanas activas o diálogos activos quedan definidos por un marco (frame), una barra de título, algunas barras de desplazamiento vertical y/o horizontal, un botón para maximizar la ventana, un botón para minimizarla y un botón para cerrarla. A diferencia con la interfaz principal que además de los botones (maximizar, minimizar y cerrar), incluye un menú de control situado a la izquierda del título, una barra de herramientas y una barra de estado.

Cada uno los cuadros de diálogo que conforman el software MATVIS desempeñan una funcionalidad diferente dependiendo del proceso que esté realizando, los cuales pueden ser: de adquisición de las imágenes, procesamiento de datos o entrega de los resultados al usuario. En la ilustración de la figura 13, se logra observar la variedad de diálogos que consta la aplicación MATVIS.

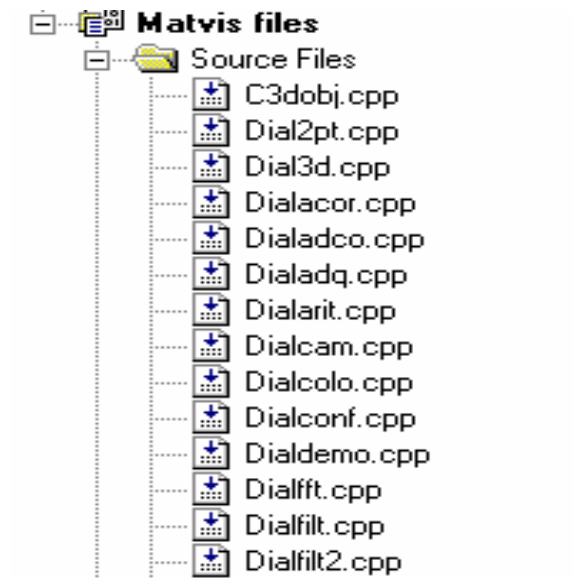
❖ **FileView:** Visualiza los ficheros fuente que componen la aplicación. Haciendo doble click en el nombre de cualquiera de ellos, se visualiza la ventana de código correspondiente al mismo.

Esta pestaña consta de varias carpetas. Algunas de ellas son: Source Files, Header Files y Resource Files.

Source Files: En este lugar se encuentra los ficheros (.cpp) que almacenan el código fuente de la aplicación MATVIS.

Donde Dialfit2.cpp es el fichero fuente principal de la aplicación.

Figura 14. Carpeta Sources Files de la vista FileView.



Entre otros ficheros se encuentra: Dialhist.cpp, Dialpiez.cpp, Dimagcam.cpp, M_imag.cpp, Matvis.cpp, Matvis.rc y Matvivw.cpp.

El archivo con extensión (.rc) es un fichero que contiene una lista de todos los recursos que la aplicación utiliza como iconos y mapas de bits.

El archivo Dialpiez.cpp y DialSetP.cpp son los más importantes. Estos ficheros se modifican en su código fuente para que el control de desplazamiento horizontal se desplace desde los 4010 hasta los 0 datos, es decir, haciendo esta modificación se le pueden aplicar diferencias de voltaje al cristal piezo eléctrico en forma decreciente para conocer su comportamiento a medida que el cristal llega a su punto máximo de desplazamiento y va perdiendo sus valores de voltaje hasta llegar al punto inicial.

Header Files: En este lugar se encuentran los ficheros de las cabeceras (.h) de la aplicación. Estos archivos contienen las declaraciones y definiciones que el preprocesador incluye en el fichero fuente justo antes de iniciarse la compilación. Algunos de los ficheros de las cabeceras del software MATVIS, son los siguientes; Dialfit2.h, C3dobj.h, Dial2pt.h, Dial3d.h, Dialacor.h, Dialadco.h, Dialadq.h, Dialarit.h, Dialcam.h, Dialcolo.h, Dialconf.h, Dialdemo.h, Dialfft.h, Dialfilf.h, Dialfilf2.h, Dialhist.h, Dialpiez.h, Dimagcam.h, M_imag.h y Matvis.h

Donde Dialfit2.h es el fichero de la cabecera principal de la aplicación. Contiene la definición de la clase Dialfit2.

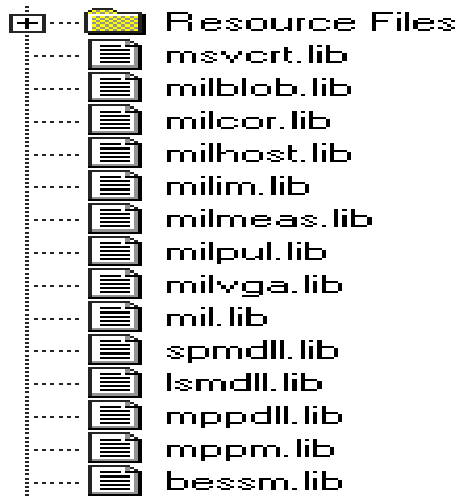
Resource Files: llamado también el fichero de recursos, contiene la definición de los recursos para la aplicación, tales como iconos, cursores, mapas de bits, cadenas de caracteres, menús, aceleradores, cuadros de diálogo, etc.

En este lugar se encuentran los archivos (.lib), que son los ficheros de descripción de las librerías. Existe uno por cada archivo DLL. Las librerías (.lib) las necesita el compilador para conocer las funciones disponibles en la DLL y son especialmente requeridas para el funcionamiento del software. Los DLL hacen referencia a las bibliotecas dinámicas Dll (Dynamic Link Libraries).

Los ficheros que empiezan con las letras mil, son el conjunto de bibliotecas MIL para el procesamiento de imágenes. Y los ficheros que empiezan con las letras mpp y lsm, son del conjunto de bibliotecas de MPP que se encargan de los cálculos vectoriales que se realizan para el funcionamiento de la aplicación MATVIS.

Aquí se encuentran los archivos que se incorporan por las bibliotecas MIL y MPP ya mencionadas anteriormente.

Figura 15. Carpeta Resource Files de la vista FileView



3.4.6 Arquitectura de la Aplicación MATVIS. La interfaz de usuario de una aplicación Windows (MDI) está formada inicialmente por una ventana, seguido de múltiples ventanas.

El proceso de desarrollo de la aplicación fue hecho en dos fases: primero generar a partir del AppWizard un conjunto de ficheros de partida, que forman la base para la creación del esqueleto de la aplicación con múltiples documentos (MDI-Multiple Document Interface). Y la segunda fase, el desarrollo de la aplicación editando los ficheros fuentes, la compilación, el enlace, las pruebas y depuración de la aplicación.

El software MATVIS, se construyó como una aplicación MDI que permite tener varias ventanas marco dentro de la ventana principal de la aplicación. Esto es, una ventana marco principal dentro de la cual pueden abrirse varias ventanas marco hijas, de las cuales sólo una estará activa, la que tiene la barra de título resaltada. Cada ventana hija contiene una vista de un documento, lo que permite disponer de diferentes tipos de ventanas; por ejemplo, ventanas de diálogos y

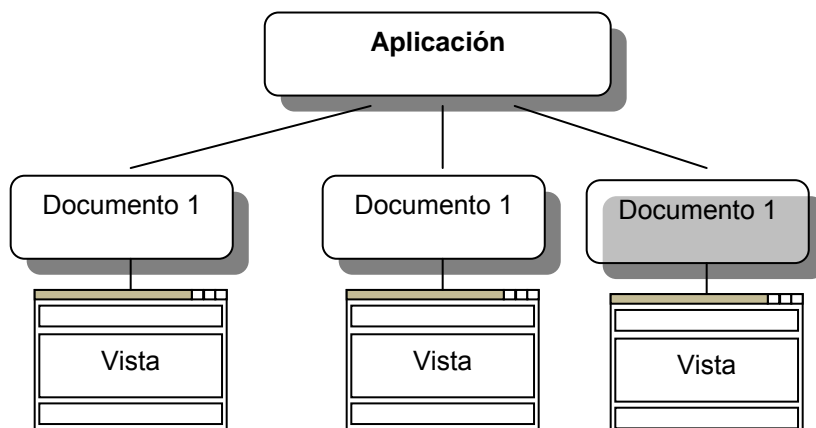
ventanas de imágenes. Ninguna de las ventanas hijas tiene barra de menús, ya que comparten la barra de menús de la ventana principal (ventana padre).

Los objetos fundamentales que intervienen en una aplicación en ejecución son: aplicación, documentos y vistas.

El software MATVIS, es el caso de una aplicación soporta múltiples documentos y múltiples vistas, esta clase de aplicación recibe el nombre de interfaz de múltiples documentos.

Los documentos se crean para que contengan diferentes tipos de información, por ejemplo, texto y/o gráficos. El siguiente gráfico muestra las relaciones entre los objetos ya mencionados en una aplicación MDI.

Figura 16. Objetos en una aplicación MDI



La ventana marco principal de una aplicación MDI es una ventana convencional de Windows; esto es, tiene una barra de título, un menú, una barra de herramientas, un borde que permite redimensionar la ventana, un menú de control y botones para maximizar, minimizar y cerrar la ventana. El área de cliente de la ventana marco principal (denominada ventana cliente MDI) no se utiliza directamente para

visualizar un documento sino para contener las ventanas hijas (denominada ventanas documentos), cada una de las cuales visualiza un documento. Cada una de las ventanas hijas tiene el mismo aspecto que la ventana padre excepto que no tiene barra de menús ni barra de herramientas ya que comparten el menú y la barra de herramienta de la ventana padre. Sólo una ventana hija puede estar activa en un instante determinado.

3.4.7 Librerías Especiales Matvis. Las funciones Windows son el corazón de las aplicaciones Windows. Hay cientos de funciones de Windows dispuestas para ser llamadas desde C. Todas las funciones están declaradas en un fichero de cabecera denominado Windows.h incluido en el SDK y por lo tanto en Visual C++.

Visual C++, permite acceder a la biblioteca de clases MFC que da soporte a los objetos Windows. También cuando se requiere de algunas funciones especiales como las necesita la aplicación MATVIS para su funcionamiento, deja incorporar algunas librerías especiales al compilar y ejecutar el software.

Para la implementación de la aplicación MATVIS, se utilizaron adicionalmente las bibliotecas MIL para el procesamiento de imágenes y las bibliotecas MPP, para realizar algunos cálculos vectoriales. Estas librerías se describen a continuación.

3.4.7.1 MIL (Matrox Imaging Library). La MIL son las Librerías para la tarjeta Matrox Imaging. Son librerías en lenguaje C de muy alto nivel con un extenso conjunto de funciones óptimas para el procesamiento de imágenes (punto a punto, estadísticas, filtros, transformaciones geométricas y morfológicas).

Se usan las librerías MIL para acelerar el desarrollo en microscopia, en imágenes médicas y aplicaciones de análisis de imágenes.

MIL es compatible con sistemas Operativos:

- a) Windows NT 4.0 y 95.

- 1) Microsoft C++ 5.0 Visual.
 - 2) Borland C++ Builder 3.0
- b) DOS (32 bit)

El procedimiento para hacer uso de estas librerías empieza por instalar el paquete MIL y cuando se instala automáticamente se ubican los dlls en: C:\WINDOWS\SYSTEM32 en C:\WIN95\SYSTEM. El paquete MIL incluye: Mil.Dll, Milhost.Dll, Miltiff.Dll, Milim.Dll, Milpat.Dll, Milblob. Dll, Milmeas.Dll, Milvga.Dll y Milocr.Dll entre otras. Posteriormente, se instalan los respectivos drivers de la tarjeta Matrox en el sistema y por último se hace el link a estas librerías desde la opción Tools de la barra del menú de Visual C++.

Haciendo uso de estas librerías, es posible la manipulación de imágenes, crear, guardar, abrir, seleccionar las opciones de la cámara y cerrar una imagen. También definir el área de interés de la imagen haciendo uso del ratón o a través de una caja de diálogo definir los parámetros de la cámara si el sistema tiene un digitalizador, escoger la fuente de la cámara y las referencias de la entrada o manipular los colores de las imágenes capturadas. Y por último, permitir la carga de la representación de caracteres de un archivo en una fuente específica. Este archivo puede ser guardado en un archivo ASCII (.TXT) o un archivo con imágenes en escala de grises es decir formato (.MIM o .TIFF).

3.4.7.2 MPP. Este bloque de librerías incorpora funciones que realizan cálculos vectoriales.

Está compuesto por varios Módulos:

FEM (Finite Element Method)

El módulo FEM, es una colección de clases y funciones para desarrollar métodos finitos usando el lenguaje de programación C++.

FEM, proporciona bibliotecas de clases de C++ como herramientas para la solución de problemas de límites y problemas de valor inicial para casos de 1 a 3 dimensiones. FEM puede usarse igualmente bien para resolver problemas estáticos o problemas dinámicos.

Least Squares Module (LSM)

El módulo LSM es un conjunto de clases y métodos relacionados para resolver problemas de mínimos cuadrados lineales y no lineales con una o más variables dependientes. Los datos pueden tener o no peso y los modelos pueden tener una o múltiples ecuaciones.

Numerical Integration Module (QUAD)

La técnica de integración numérica es usada para encontrar el resultado de integrales unidimensionales o bidimensionales. Los límites de las integrales pueden ser finitos o infinitos y la función para integrar puede ser continua, discontinua o infinita.

Optimization Module (OPTIM)

OPTIM proporciona la optimización general amplia de funciones arbitrarias. Muchos problemas que ocurren en las matemáticas aplicadas, ciencias, ingenierías, economía y estadística, involucran obtener el mejor resultado o el más óptimo. Estos problemas de optimización son caracterizados por una o más variables independientes

4. MEDIDAS EXPERIMENTALES

Para probar el funcionamiento del cristal piezo eléctrico se realizan tres pruebas distintas haciendo la variación del rango del voltaje desde el amplificador.

En la primera prueba, se utiliza una diferencia de voltaje de 0 a 60 voltios. Esto se logra amplificando el voltaje a una de escala de 2.5. En la segunda prueba, se aplican voltajes de 0 a 110 voltios cambiando la escala a 5.0 y la última prueba se hace con toda la totalidad del máximo rango aplicado al cristal piezo eléctrico con un factor de amplificación de 7.5, es decir, de 150 voltios.

4.1 SISTEMA DE ADQUISICIÓN

La adquisición de imágenes se realiza haciendo uso de una cámara CCD SONY, la cual está acoplada a la computadora por una tarjeta MATROX PULSAR. Posteriormente haciendo uso del software MATVIS y de las herramientas ofrecidas por la tarjeta para el manejo digital de imágenes, se obtiene la visualización de los patrones de interferencia en la pantalla. En la figura 3 se muestra la ubicación de la Video Cámara CCD en el montaje óptico.

4.2 CONTROL DIGITAL DE DESPLAZAMIENTOS

Los desplazamientos del cristal piezo eléctrico se encuentran controlados por un sistema digital que convierte señales digitales en analógicas representadas en voltajes. Este sistema es un amplificador graduable para el rango de voltaje suministrado al cristal piezo eléctrico. En la figura 3 se muestra la ubicación del Amplificador de Voltaje en el montaje óptico.

4.3 CALIBRACIÓN DEL PASO DE DESPLAZAMIENTO

La importancia de la calibración para el desarrollo de este proyecto es evidente, se requiere conocer desplazamientos de gran exactitud, por lo tanto el montaje óptico a utilizar en la parte experimental deber probarse que funcione con valores exactos.

El sistema óptico utilizado en la parte experimental posee una fuente de luz blanca. Al capturar los patrones de interferencia, esta se separa en varios rayos y estos interfieren dando lugar a patrones de interferencia de muchos colores y por consiguiente a muchas longitudes de onda.

En este proyecto se requiere manipular una sola longitud de onda y que los patrones de interferencia que se formen dependan únicamente de este valor. Por esto, se coloca un filtro de color en la ranura que se encuentra en la parte posterior del microscopio interferométrico, y se calibra la longitud de onda, de tal manera que el patrón de interferencia sólo dependerá de una única longitud de onda, y las posiciones de los máximos dependerán también de esta medida, es decir, la distancia interfranjas se logre obtener en función de este valor.

Para obtener el paso de desplazamiento del cristal piezo eléctrico se debe hacer una calibración. Este procedimiento requiere del uso del módulo “Setting Piezo” del software MATVIS, el cual captura como valores de entrada el color del filtro (verde), el tipo de objetivo interferométrico (10x), y el valor inicial y final para evaluar el recorrido óptico (dos puntos cercanos). En la figura 17 se observa este procedimiento visto como un sistema. La interface para la calibración del paso se explicó con más detalle en el capítulo anterior.

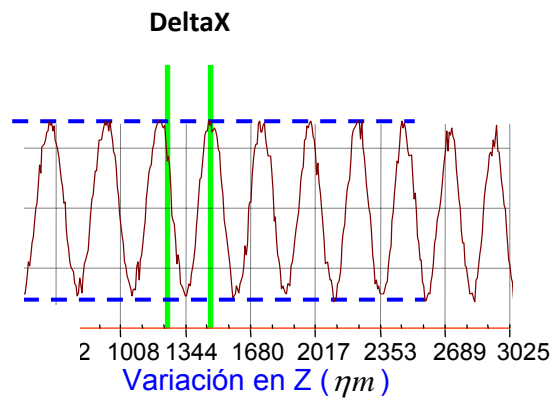
Figura 17. Sistema de Calibración del paso de desplazamiento



En la figura 6 se hace una representación de una porción del interferograma obtenido por el sistema MATVIS y la medición del paso DeltaX que se realiza con el software.

El valor del paso interfranja observado en la calibración del sistema MATVIS es de $\Delta X = 0.27 \mu m$, entonces ha recorrido $\lambda/2$ y la longitud de onda (λ) del filtro color verde es de 540 nm.

Figura 18. Paso de Desplazamiento interfranja



4.4 OBTENCIÓN DE FRANJAS DE INTERFERENCIA

Luego de haber ya calibrado el Sistema óptico se realiza la toma de muestras. Cuando se realiza la obtención de imágenes, en la pantalla de la cámara de adquisición se forman varios puntos. Debido al sistema interferométrico hay superposición de dos ondas. En algunos de esos puntos, las ondas llegan en fase, por lo que hay interferencia constructiva y en consecuencia debe verse luz intensa, es decir, las franjas se ven brillantes. En otros puntos las ondas llegarán con una diferencia de fase de π o múltiplos impares de π , por lo que hay interferencia destructiva, por lo tanto, no hay luz, es decir, las franjas se ven oscuras. Esto significa, que se forma una imagen donde se podrán ver bandas de luz intensa seguidas de bandas oscuras y efectivamente esto es lo que ocurre en la figura 19 y la figura 20.

Para la obtención de las franjas de interferencia se utilizó el software MATVIS. Este software se puede manipular cuando se aplican diferencias de voltaje en forma creciente al cristal piezo eléctrico, pero debido a la histéresis del cristal se desea conocer el comportamiento del cristal piezo eléctrico a medida que va perdiendo voltaje hasta volver a su estado inicial, es decir, aplicando diferencias de voltaje en forma decreciente, entonces se hizo necesario modificar el código de la aplicación “Matvis” para capturar imágenes haciendo el recorrido del piezo eléctrico en forma inversa.

Antes de describir el procedimiento que se realizó para la obtención de las imágenes, es necesario aclarar que se capturaron seis imágenes para valores de voltaje diferente aplicados al cristal piezo eléctrico. De 0 a 60 voltios, de 60 a 0 voltios, de 0 a 110 voltios, de 110 a 0 voltios, de 0 a 150 voltios y de 150 a 0 voltios. Donde los 150 voltios es el mayor voltaje que se le puede aplicar al cristal.

Para trabajar con estos seis valores de voltajes se estabilizaron factores de amplificación de 2.5, 5.0 y 7.5 en forma correspondiente.

Se ejecuta el software “Matvis” original y modificado y se define todo el rango, es decir, de 0 a 4010 pasos y de 4010 a 0 pasos para obtener el interferograma en todo su trayectoria.

Realizando las pruebas con el software MATVIS se obtienen seis interferogramas (.tif), que se encuentran a continuación.

Figura 19. Presentación de Franjas de Interferencia para un voltaje de: (a) 0 a 60 voltios (b) 0 a 110 voltios y (c) 0 a 150 voltios

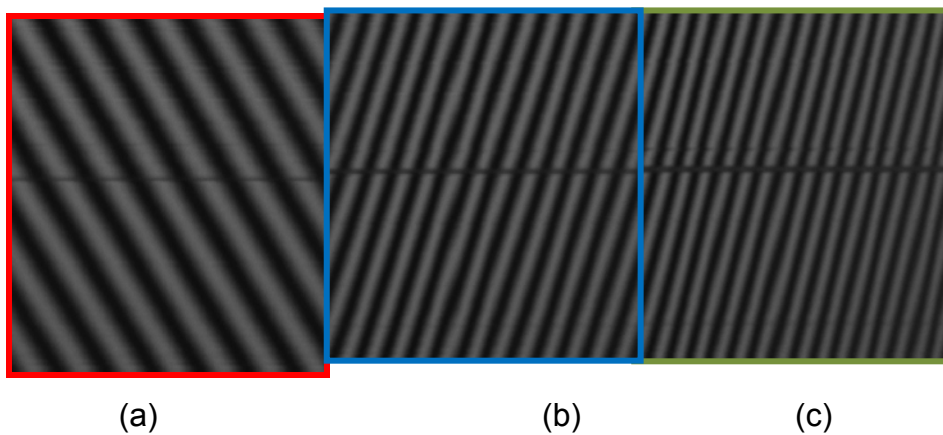
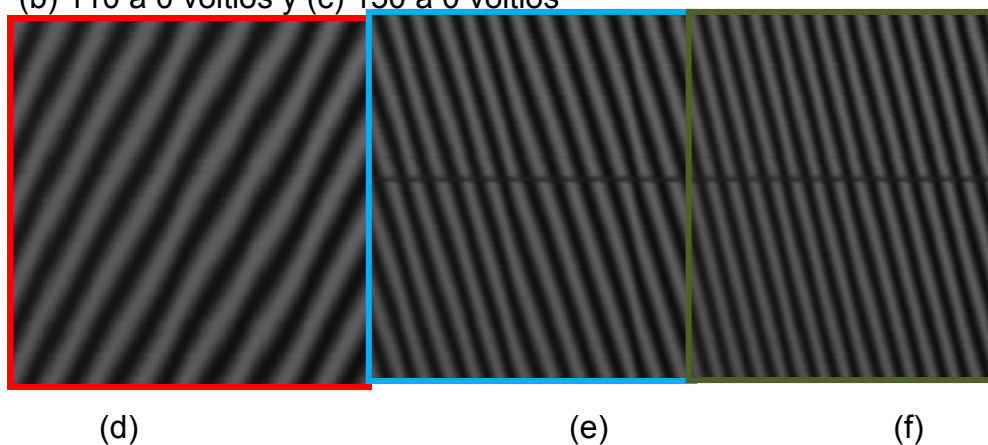


Figura 20. Presentación de Franjas de Interferencia para un voltaje de: (a) 60 a 0 voltios (b) 110 a 0 voltios y (c) 150 a 0 voltios



En las figuras 19(a) 20(a), se logra apreciar que la distancia interfranjas es mayor que la distancia interfranjas en las figuras 19(b) y 20(b) e igualmente sucede con las franjas de las figuras 19(c) y 20(c). Esta separación interfranjas se presenta de acuerdo a la cantidad de voltaje aplicado. A medida que la cantidad de voltios enviada al cristal piezo eléctrico es menor, el desplazamiento del cristal es más pequeño y el número de pasos es menor, entonces se logra apreciar más espacio entre cada franja para los 4010 datos. Porque independiente del factor de amplificación que se utilice en las muestras, siempre el software manipula la misma cantidad de datos.

4.5 CODIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN

A partir de Matlab y utilizando algunos algoritmos de tratamiento digital de imágenes se cargan las imágenes obtenidas y se realizan los cálculos correspondientes hasta obtener la gráfica de Desplazamientos del cristal piezo eléctrico contra el voltaje aplicado.

4.5.1 Implementación en MATLAB. Luego de obtener los interferogramas de las pruebas experimentales, se realiza una serie de cálculos matemáticos utilizando una aplicación hecha en MATLAB R2006 hasta obtener la curva de histéresis del cristal piezo eléctrico Jena Ref. 0693.

Para elaborar el código en Matlab, primero se utiliza una herramienta de diseño para realizar filtros de señales llamada ***fdatool***. Haciendo uso de ésta herramienta se elige la frecuencia de muestreo hasta obtener un patrón sinusoidal muy semejante al objetivo deseado. Adicionalmente se elige una frecuencia de corte del filtro en forma empírica de tal forma que la señal muestreada dibuje sus trazos con mayor afinación es decir suavice la señal. Ya definido el diseño del filtro, los coeficientes del filtrado se guardan por defecto en una variable llamada (Num) y todas las especificaciones se graban en un archivo con el nombre ***datos***.

Posteriormente este fichero se invoca desde la **función Piezo** implementada en MATLAB. La **función Piezo** consta de tres parámetros de entrada, así:

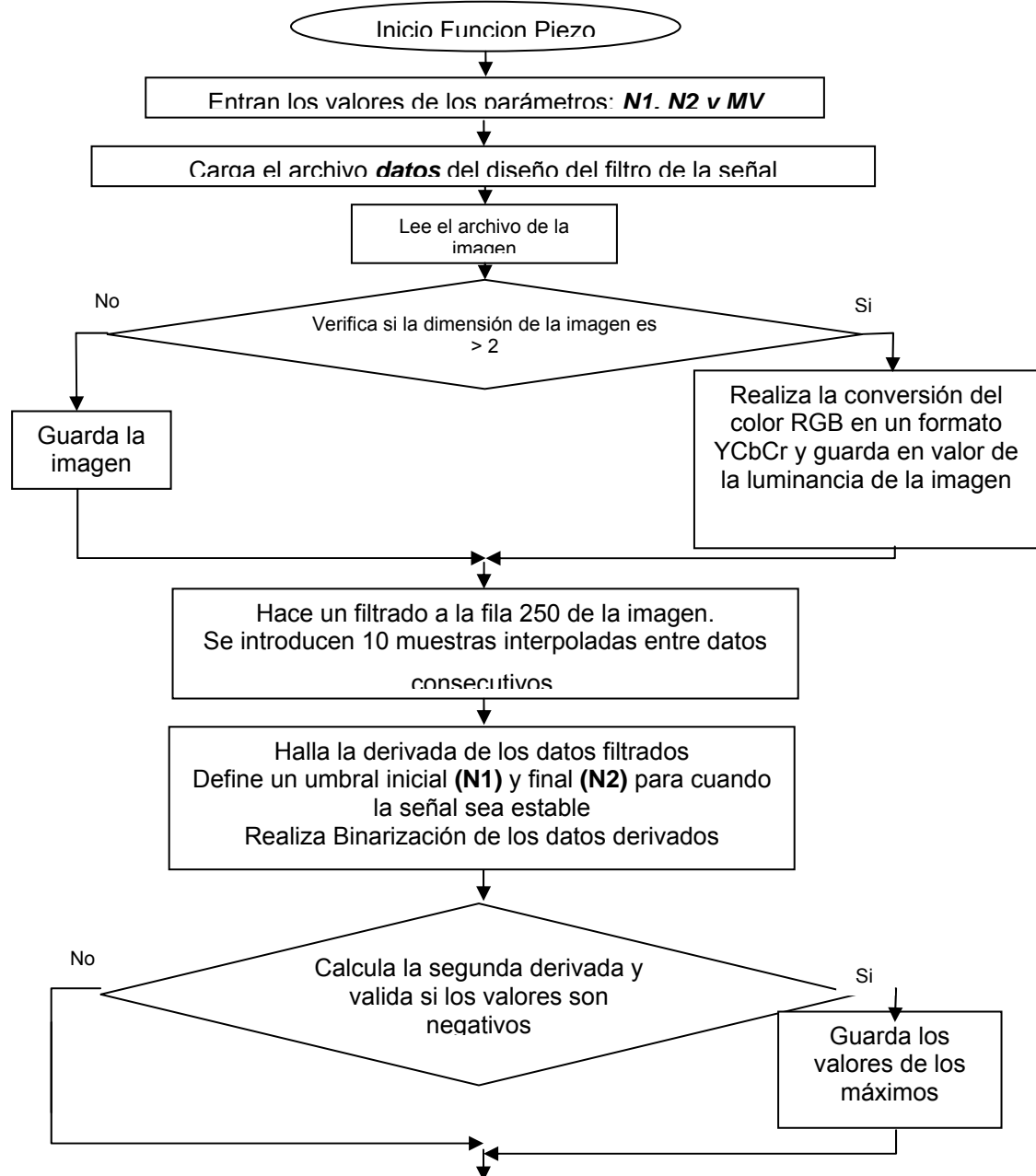
FUNCION Piezo (archivo_de_imagen, N1, N2, MV). Los parámetros se describen a continuación:

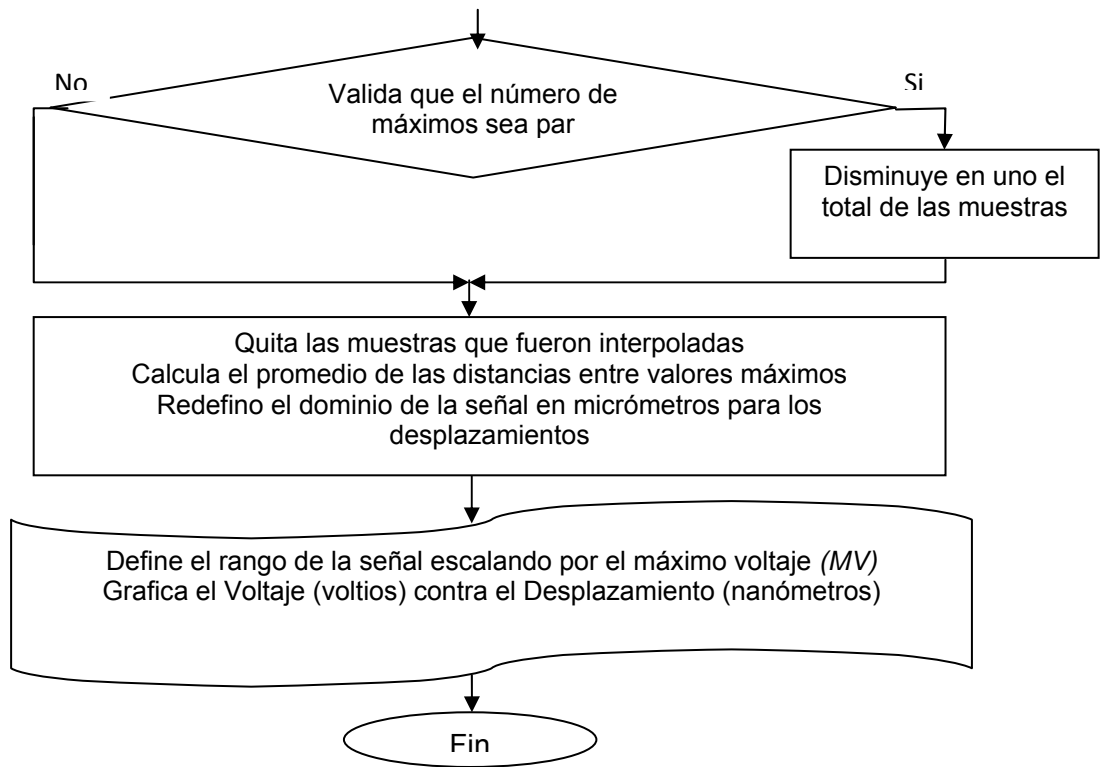
N1→ Umbral inicial a partir de la cual la señal presenta un comportamiento estable; **N2**→ Umbral final a partir de la cual la señal presenta un comportamiento estable; **MV**→ Máximo voltaje aplicado en la prueba experimental.

Como toda función, empieza por entrar en su fase inicial todos los valores de los parámetros. Después se carga el archivo **datos** ya mencionado. Luego se captura cada imagen (.tif) registrada por el software MATVIS dando lugar a imágenes de dimensiones de 512x4010 (intensidad x pasos). En seguida se realiza un corte transversal de estas imágenes a la mitad, dicho de otra manera se hace un filtrado a la fila 250 de la imagen para obtener la variación en intensidad en una línea representativa. Luego se hace una interpolación de los datos filtrados introduciendo 10 muestras entre datos consecutivos para manipular más datos y obtener mayor precisión de los cálculos matemáticos que se realizan. Se halla la primera y segunda derivada de los datos filtrados hasta encontrar los puntos máximos de cada onda de la señal. Después se quitan las muestras que fueron interpoladas para manipular valores reales. Los valores máximos (Anexos A, B, C, D, E, F y G) encontrados es información importante, porque a partir de estos valores es posible calcular el desplazamiento del cristal piezo eléctrico y hallar el promedio de los desplazamientos del cristal piezo eléctrico para redefinir el dominio de la señal en el orden de los nanómetros. Por último se define el rango de la señal escalando por el máximo voltaje (MV) aplicado al cristal piezo eléctrico hasta obtener la grafica del Voltaje en voltios en el **eje x** y el desplazamiento del cristal piezo eléctrico en el orden de los nanómetros en el **eje y**. Los procesos del

algoritmo en forma general se describen en la figura 21 y el diagrama con el código hecho en matlab se encuentra en el Anexo G.

Figura 21. Diagrama de flujo de la Función Piezo.





Los interferogramas obtenidos cuando se hace un filtrado a la fila 250 de la imagen para obtener la variación en intensidad en una línea representativa se observan en las siguientes dos figuras. Cuando se aplican diferencias de voltaje en forma creciente se muestran los tres interferogramas en la figura 22. Y los interferogramas obtenidos cuando se aplican voltajes en forma decreciente se ilustran en la figura 23.

Figura 22. Patrones de interferencia con un Voltaje de: (a) 0 a 60 voltios (b) 0 a 100 voltios (c) 0 a 150 voltios.

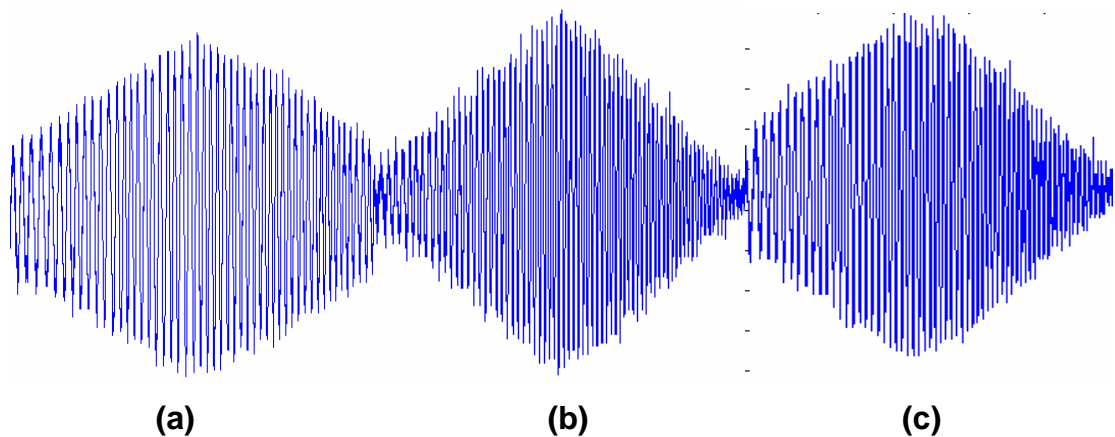
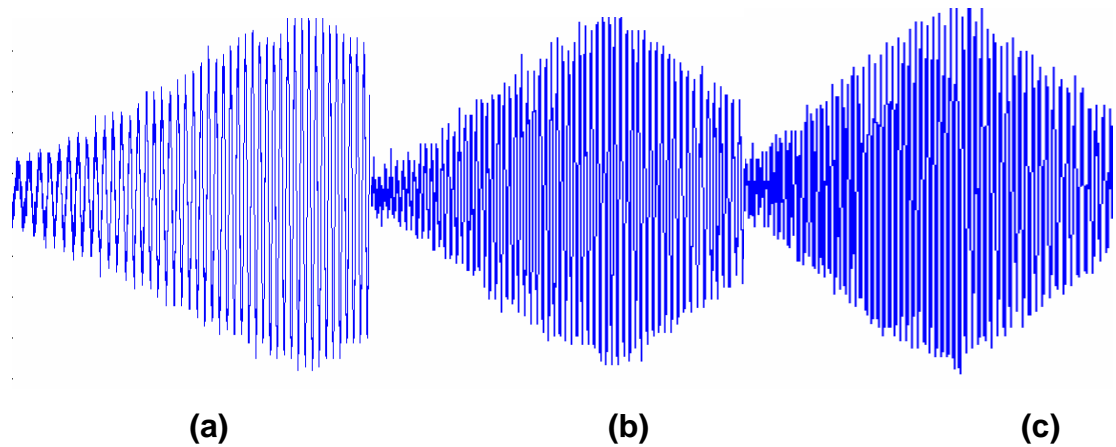


Figura 23. Patrones de interferencia con un Voltaje de: (a) 60 a 0 voltios (b) 100 a 0 voltios (c) 150 a 0 voltios.



4.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Analizando los datos de los máximos encontrados en el anexo A hasta el anexo F, se logra determinar información importante que se encuentra tabulada en la siguiente tabla.

Tabla 1. Resultados de las pruebas experimentales.

VOLTAJE APLICADO (VOLTIOS)	FACTOR DE AMPLIFICACION	NUMERO DE MAXIMOS	DISTANCIA PROMEDIO ENTRE MAXIMOS	DESPLAZAMIENTO DEL CRISTAL PIEZO ELÉCTRICO (NM)
0-60	2.5	56	71	15.000
60-0	2.5	50	78	13.000
0-110	5.0	102	40	28.000
110-0	5.0	100	39	27.000
0-150	7.5	132	30	36.000
150-0	7.5	138	29	37.000

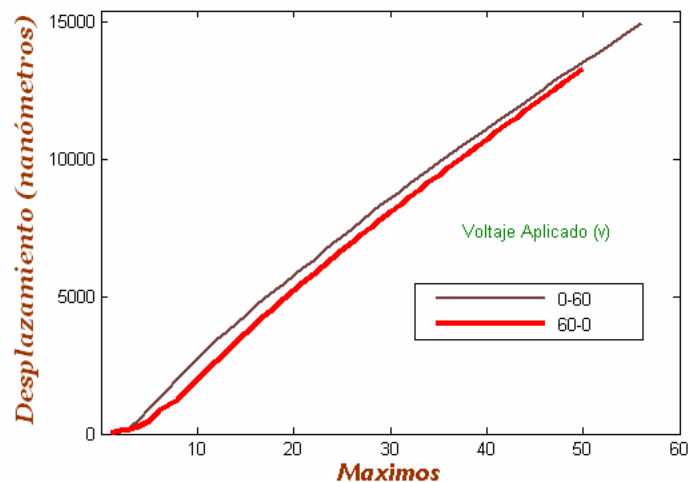
En los anteriores capítulos se define que el cristal piezo eléctrico Jena Ref. 0693 utilizado en la parte experimental funciona con rangos de voltaje que van desde 0 hasta 150 voltios permitiendo un desplazamiento máximo de 30 micrómetros, y que el valor de desplazamiento interfranjas de interferencia es de 0.270 μm .

Tomando estos valores y los de la tabla, a continuación se presenta un análisis de estos resultados para cada rango de voltaje aplicado al cristal piezo eléctrico.

1. Voltaje de 0 A 60 voltios y de 60 a 0 voltios. Para estos casos, se observa la relación de Desplazamientos Vr. Máximos en la figura 24. La línea de color marrón muestra los desplazamientos del piezo cuando se aplica el voltaje de 0 a 60 voltios. Aquí se encontraron 56 máximos durante el recorrido de los 4011 pasos, es decir, cada 56 pasos aproximadamente se desplaza el piezo eléctrico media longitud de onda (0,270 micrómetros), por lo tanto, el mayor valor de desplazamiento será de (56*0.270 μm). Como la escala de la gráfica se realizó en el rango de los nanómetros, se aprecia el máximo desplazamiento del cristal piezo eléctrico en 15.000 nm aproximadamente.

La línea de color rojo ilustra el comportamiento del piezo eléctrico aplicando variación de voltaje de 60 a 0 voltios. En este caso se encontraron 50 máximos durante el recorrido total, por lo tanto, el máximo valor de desplazamiento será de (50*0.270 μm), que en la escala de los nanómetros equivale a 13.000nm aproximadamente.

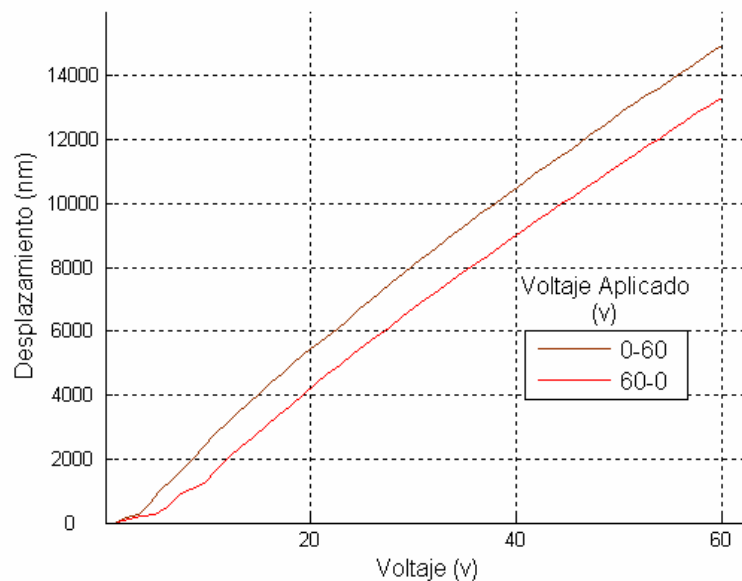
Figura 24. Desplazamientos Vr. Máximos – Piezo Jena Ref. 0693. Voltaje:60 v



Para cualquiera de los dos casos anteriores, se nota que el recorrido físico del piezo eléctrico aplicando voltaje en forma creciente no es el mismo que al aplicarle el voltaje en forma decreciente. Este fenómeno se logra apreciar por la histéresis que presentan estos cristales.

En el gráfico 25, se observa la caracterización del cristal Piezo Eléctrico Jena Ref. 0693, utilizando un voltaje de 60 voltios. Analizando estos resultados, se puede concluir que, el cristal piezo eléctrico realiza un desplazamiento hasta de 15.000 nm. cuando se le aplica un voltaje máximo hasta de 60 v. En términos de porcentaje, el cristal piezo eléctrico con este voltaje alcanza hasta un 40% del total de su valor máximo de desplazamiento.

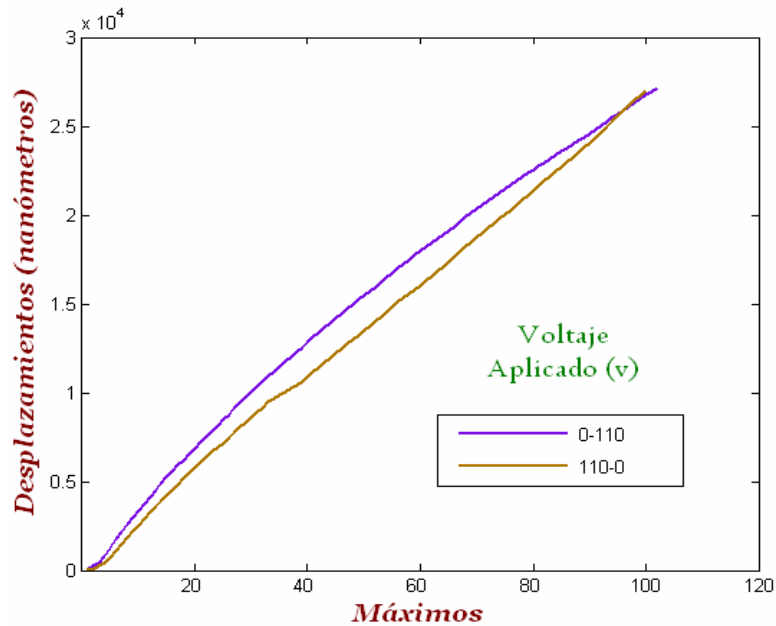
Figura 25. Caracterización del Piezo Eléctrico Jena No. 0693 – Voltaje: 60 voltios



2. Voltaje de 0 A 110 voltios y de 110 a 0 voltios. En la figura 26, se observa la relación de Desplazamientos Vr. Máximos. La línea de color morado muestra el comportamiento del cristal piezo eléctrico al ser sometido a variaciones de voltaje en forma creciente. Igualmente, la línea de color ocre permite observar el

comportamiento del cristal al aplicarle diferencias de voltaje desde 110 hasta 0 voltios.

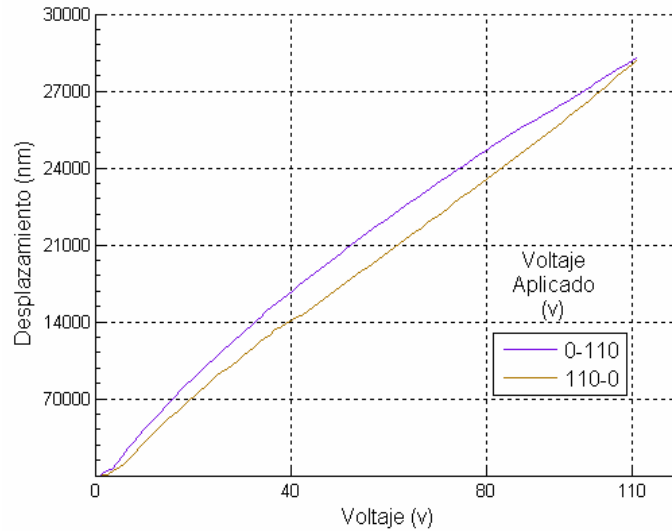
Figura 26. Desplazamientos Vr. Máximos – Piezo Jena Ref. 0693. Voltaje:110 v



Utilizando el voltaje de 110 voltios, el promedio de máximos hallado fue de 100. El mayor valor de desplazamiento que recorre el piezo eléctrico en esta prueba fue de $(100 \times 0.270 \mu\text{m})$. En la gráfica se aprecia que el máximo desplazamiento que recorre el cristal piezo es de 27.000 nm aproximadamente.

La Figura 27 ilustra un gráfico de la caracterización del cristal Piezo Eléctrico Jena Ref. 0693, utilizando un voltaje de 110 voltios.

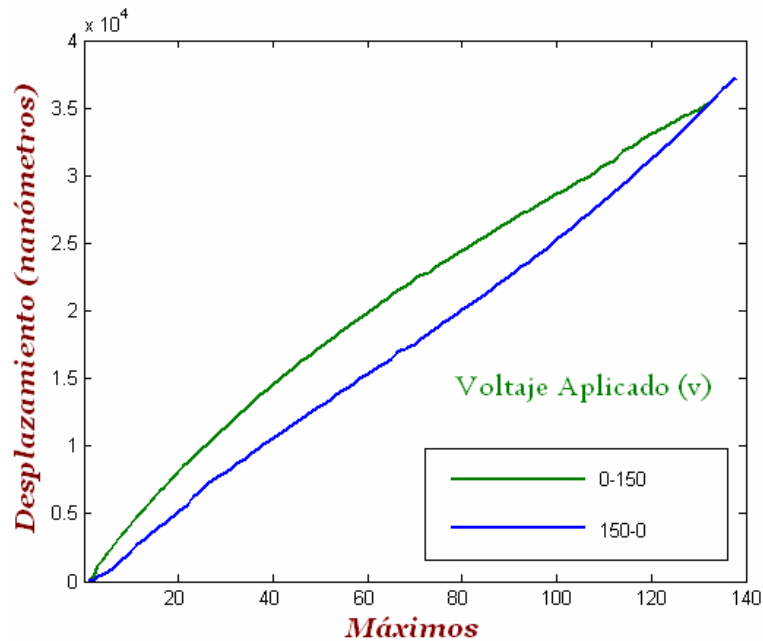
Figura 27. Caracterización del Piezo Eléctrico Jena No. 0693 – Voltaje: 110 voltios



Comparando el desplazamiento que realiza el cristal piezo eléctrico en la figura 25 y en la figura 27, se observa que a medida que aumenta la cantidad de voltaje aplicado al piezo eléctrico, aumenta la cantidad de pasos y aumenta la cantidad de deformaciones que sufre el cristal y por consiguiente es mayor su desplazamiento. En conclusión, el cristal Piezo Eléctrico Jena Ref. 0693 realiza desplazamientos hasta de 27.000 nm cuando se le aplica un voltaje máximo hasta de 110 v. Es decir alcanza hasta un 74% del total de su valor máximo de desplazamiento.

3. Voltaje de 0 A 150 voltios y de 150 a 0 voltios. En la figura 28, la relación de Desplazamientos Vr. Máximos se observan nuevamente en dos trayectorias representadas en líneas de color verde y azul.

Figura 28. Desplazamientos Vr. Máximos – Piezo Jena Ref. 0693. Voltaje:150 v

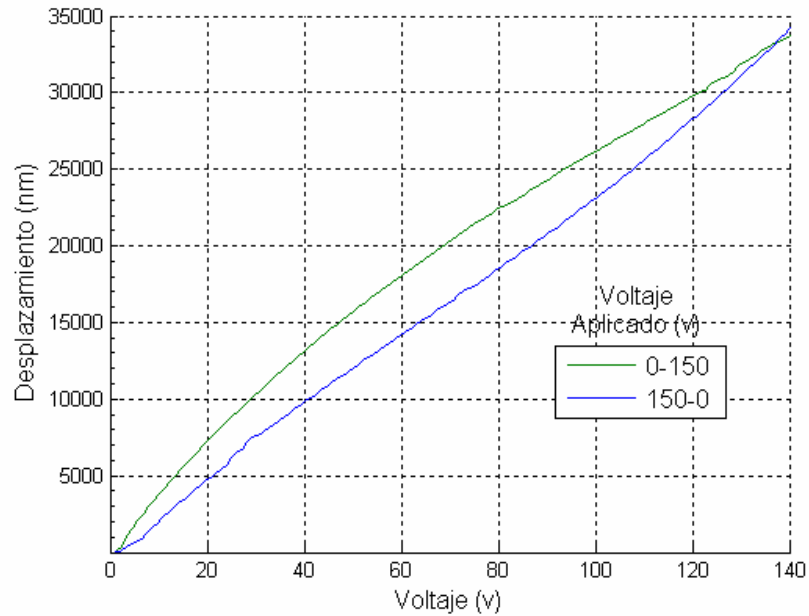


La línea de color verde muestra el comportamiento del piezo eléctrico al ser sometido a variaciones de voltaje en forma creciente e igualmente la línea de color azul permite observar el comportamiento del cristal al aplicarle diferencias de voltaje en forma decreciente.

Para el caso de la figura 28, se encontró que para este voltaje el piezo eléctrico hace su recorrido total en 135 máximos en promedio, pero en forma creciente llega hasta los 133 máximos. Y si tomamos que se devuelve a partir de este valor, entonces, el mayor valor de desplazamiento encontrado en esta prueba fue de $(133 \times 0.270 \mu\text{m})$. En la gráfica se aprecia el desplazamiento en el orden de los nanómetros que realizó el cristal piezo eléctrico para un total de 35.000 nm.

La Figura 29, ilustra un gráfico de la caracterización del cristal Piezo Eléctrico Jena Ref. 0693 utilizando el voltaje de 150 voltios.

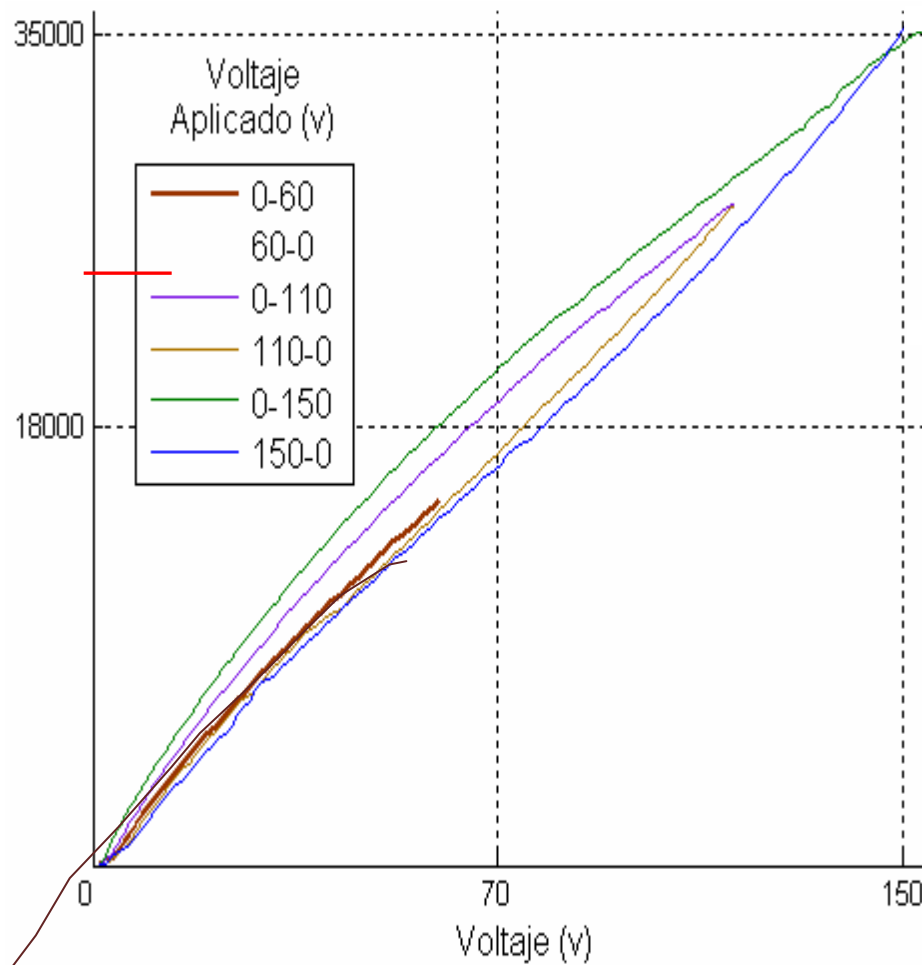
Figura 29. Caracterización del Piezo Eléctrico Jena No. 0693 – Voltaje: 150 voltios



Analizando el comportamiento del cristal Piezo Eléctrico Jena Ref. 0693, se puede concluir, que con este factor de amplificación el cristal realiza desplazamientos hasta de 35.000 nm cuando se le aplica un voltaje máximo hasta de 150 v. Es decir alcanza hasta el 100% del total de su desplazamiento.

En la Figura 30 se observa la caracterización del piezo eléctrico Jena Ref. 0693. Logrando observar a simple vista que el comportamiento de los desplazamientos en función del voltaje aplicado no es lineal.

Figura 30. Caracterización del Piezo Eléctrico Jena No. 0693



Se observa un comportamiento similar en las tres zonas analizadas. A medida que aumenta el voltaje aplicado aumenta su desplazamiento, pero difiere en el camino que recorre el cristal piezo eléctrico cuando se le aplica voltaje en forma creciente y cuando se le aplica voltaje en forma decreciente, es decir, el comportamiento del piezo eléctrico cuando se le aplican diferencias de voltaje sufre transformaciones muy pequeñas (del rango de los nanómetros) y a medida que el cristal va perdiendo voltaje va recuperando su forma inicial pero su trayectoria no es la misma.

Finalmente en la tabla 2 se logra apreciar la relación voltaje aplicado contra el desplazamiento del transductor eléctrico. Estos valores permiten ver el comportamiento del cristal piezo eléctrico Ref. 0693.

Tabla 2. Relación Voltaje aplicado contra Desplazamientos del cristal piezo eléctrico Jena No. 0693

VOLTAJE (VOLTIOS)	DESPLAZAMIENTO MAXIMO (NANOMETROS)	DESPLAZAMIENTO MAXIMO (MICROMETROS)	PORCENTAJE DE DESPLAZAMIENTO (%)
[1-60]	14.000	14	40
[61-110]	26.000	26	74
[111-150]	35.000	35	100

5. CONCLUSIONES

Utilizando métodos ópticos monocromáticos es factible caracterizar los desplazamientos de un cristal piezo eléctrico hasta obtener resoluciones del orden de los nanómetros.

Haciendo uso del interferómetro es posible encontrar la longitud de onda de fuentes de luz monocromáticas, ya que experimentalmente fue posible medir el paso y la longitud de desplazamiento del piezo eléctrico en unidades de nanómetros.

Utilizando sistemas de control abiertos como Matvis es posible obtener los interferogramas de un sistema de desplazamiento nanométrico como es el de un material piezo eléctrico, calibrar su paso de desplazamiento y obtener la caracterización del transductor eléctrico.

Se pudo comprobar experimentalmente el fenómeno de la interferencia a través del recorrido de las franjas de interferencia que muestran las deformaciones del cristal en función de una diferencia de potencial aplicada.

El cristal piezo eléctrico Jena Ref. 0693 presenta histéresis y su comportamiento es no lineal si se aumenta o se reduce el voltaje aplicado.

Cuando se utiliza el microscopio interferométrico y se aplica en forma dinámica el proceso de variación del camino óptico, se obtiene la variación de la intensidad en un punto, el cual se puede evidenciar en un interferograma, permitiendo obtener el perfil de una muestra (piezo eléctrico) del orden de los nanómetros por medio de la obtención de los patrones de interferencia.

6. RECOMENDACIONES

El desarrollo tecnológico actual implica mayor conocimiento de nanotecnología, deberían implementarse más áreas de investigación en ésta línea.

Al desarrollar proyectos conjuntos con las áreas de ciencias permite conocer las necesidades informáticas de investigación avanzada, es bueno seguir fomentando esta interacción.

BIBLIOGRAFÍA

BORD AND WOLF. "Principles of Optics" Sixth ed. Pergamon Press, 1980.

CEBALLOS, Francisco Javier. Aplicaciones para Win32, Microsoft Visual C++ 6.0 México: Alfaomega, 2000.

DUNN, Graham Microscopia de interferencia para transmitir luz: una técnica llevada antes de su tiempo. Londres: Instituto de Randall, Universidad Londres de King's.

KINO G. S. Y CHIM S. S. C. Mirau correlation microscope, Applied Optics. Vol. 29, No.26, pp. 3775-3783, 1990.

MANIGLIA, A., PROOPS, D. (ed.). "Implantable Electronic Otologic Devices: State of the Art", The Otolaryngologic Clinics of North America, Vol. 34, No. 2., Philadelphia: W.B. Saunders, 2001.

P. Hariharan "Optical Interferometry" Academic Press, 1985.

PLATA A., SUAREZ M., GARZÓN J. "Implementación de un perfilómetro, basado en microscopía interferencial, para caracterización de superficies". Congreso nacional de óptica, Armenia, Colombia, 2000.

PLATA, Arturo. "Algorithmes De Détection De Phase Dédiés a L'Interférométrie en Lumière Polychromatique: Application Et Apport Des Systèmes Adaptatifs a la Profilométrie" Thèse, L'Université de Franche-Comté, 1997.

SUAREZ M. "Clasificación de superficies basadas en propiedades de la compresión de imágenes". Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander, 2001.

_____. "Implementación y aplicación de un perfilómetro basado en microscopía interferencial" Tesis, universidad industrial de Santander, (2000).

W. H. Steel "Intererometry" Cambridge at the University Press, 1967

_____. "Interferometry". Cambridge at the university press, 1967.

www.piezo.com/history.html "Historia del Piezo Eléctrico"

www.senacyt.gob.pa/g_metrologia/cenamep/historiametro.pdf “SENACYT” -
Secretaría NACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN”.

**ANEXO A. Datos de los máximos encontrados en la prueba de 0 a 60 voltios
con un Fac. de Amplificación de 2.5**

# MÁX.	VALOR
1	101
2	389
3	632
4	1503
5	2595
6	3476
7	4395
8	5408
9	6404
10	7335
11	8176
12	9069
13	9868
14	10641
15	11484
16	12296
17	13163
18	13929
19	14569
20	15273

# MÁX.	VALOR
21	16040
22	16736
23	17547
24	18334
25	19013
26	19754
27	20550
28	21321
29	22016
30	22681
31	23385
32	24073
33	24759
34	25422
35	26110
36	26772
37	27428
38	28096
39	28778
40	29380

# MÁX.	VALOR
41	30011
42	30661
43	31307
44	31958
45	32601
46	33279
47	33950
48	34574
49	35174
50	35749
51	36288
52	36905
53	37535
54	38198
55	38840
56	39446

ANEXO B. Datos de los máximos encontrados en la prueba de 60 a 0 voltios con un Fac. de Amplificación de 2.5

# Máx.	Valor
1	105
2	409
3	598
4	820
5	1390
6	2529
7	3130
8	3656
9	4831
10	5883

# Máx.	Valor
21	16168
22	17018
23	17900
24	18748
25	19579
26	20438
27	21281
28	22076
29	22904
30	23703

# Máx.	Valor
41	32218
42	32973
43	33730
44	34488
45	35247
46	35982
47	36733
48	37484
49	38214
50	38964

ANEXO C. Datos de los máximos encontrados en la prueba de 0 a 110 voltios con un Fac. de Amplificación de 5.0

# Máx.	Valor	# Máx.	Valor	# Máx.	Valor	# Máx.	Valor	# Máx.	Valor
1	10.4	21	1058.3	41	1927	61	2674.4	81	3343.7
2	41.3	22	1107.2	42	1964.9	62	2709.4	82	3364.6
3	60.2	23	1152.7	43	2004	63	2743.3	83	3398.1
4	121.7	24	1199.9	44	2043.8	64	2777.2	84	3431.2
5	185.6	25	1246.5	45	2083.8	65	2810.2	85	3460.8
6	258.6	26	1289.5	46	2123.8	66	2844.9	86	3489.2
7	319.8	27	1336.2	47	2163.2	67	2880.7	87	3521.9
8	379.4	28	1381	48	2201.7	68	2915.9	88	3553.3
9	442.2	29	1425.2	49	2238.2	69	2949.8	89	3580.7
10	496.9	30	1475.1	50	2274.9	70	2985.9	90	3610.8
11	548.7	31	1517.9	51	2310.4	71	3021.3	91	3643.4
12	602.1	32	1561.1	52	2346.3	72	3055.8	92	3676.1
13	659.5	33	1605.2	53	2383.7	73	3090.5	93	3706.4
14	719.8	34	1645.6	54	2420.8	74	3124.9	94	3738.6
15	769.4	35	1685.5	55	2458.2	75	3157.3	95	3768.9
16	818.3	36	1724.5	56	2494.5	76	3189.2	96	3801.7
17	868.1	37	1764	57	2530.8	77	3223.4	97	3833
18	912.2	38	1806.1	58	2566.4	78	3253.7	98	3866.2
19	962.2	39	1845.6	59	2603.3	79	3282.6	99	3896.4
20	1010.5	40	1887.1	60	2639.6	80	3313.1	100	3928.3
								101	3959.1
								102	3989.2

ANEXO D. Datos de los máximos encontrados en la prueba de 110 a 0 voltios con un Fac. de Amplificación de 5.0

# MAX.	VALOR	# MAX.	VALOR	# MAX.	VALOR	# MAX.	VALOR	# MAX.	VALOR
1	0.1	21	889.5	41	1629.3	61	2381.6	81	3155.3
2	10.6	22	934.8	42	1666.2	62	2419.2	82	3194.4
3	41.5	23	972.6	43	1704.4	63	2455.9	83	3236
4	64.2	24	1008.8	44	1745.3	64	2495.3	84	3274.6
5	106.6	25	1044.6	45	1782.5	65	2533.8	85	3311.7
6	162.6	26	1087.4	46	1820.3	66	2576.6	86	3350.7
7	215.3	27	1127.6	47	1857.8	67	2618	87	3392.8
8	273.8	28	1172.3	48	1895.2	68	2658.4	88	3433.2
9	326.9	29	1213.5	49	1933.9	69	2695.7	89	3471.8
10	375	30	1259.5	50	1969.2	70	2733	90	3513.3
11	423.9	31	1296	51	2008.1	71	2772.8	91	3554.2
12	483.3	32	1329	52	2044.9	72	2808.9	92	3598.2
13	528.9	33	1382.5	53	2083.6	73	2848	93	3641.4
14	572.3	34	1404.7	54	2121.9	74	2885.1	94	3685.3
15	610.8	35	1442.5	55	2161	75	2921.7	95	3731.1
16	658	36	1467.6	56	2199.7	76	2957.9	96	3779.4
17	705.8	37	1501.3	57	2234.5	77	3000	97	3820.5
18	751.9	38	1521.7	58	2270.3	78	3040.1	98	3860.9
19	798.7	39	1551	59	2305.1	79	3080.6	99	3899.8
20	842.6	40	1591.1	60	2341.9	80	3119	100	3942.4

ANEXO E. Datos de los máximos encontrados en la prueba de 0 a 150 voltios con un Fac. de Amplificación de 7.5

# Máx.	Valor	# Máx.	Valor	# Máx.	Valor	# Máx.	Valor	# Máx.	Valor
1	110	28	12177	55	20941	82	28006	109	34366
2	438	29	12550	56	21228	83	28240	110	34605
3	1237	30	12919	57	21514	84	28491	111	34825
4	1816	31	13267	58	21792	85	28722	112	34961
5	2321	32	13602	59	22071	86	28962	113	35305
6	2829	33	13956	60	22347	87	29199	114	35745
7	3359	34	14305	61	22632	88	29444	115	35980
8	3832	35	14656	62	22926	89	29679	116	36211
9	4302	36	15035	63	23214	90	29896	117	36423
10	4779	37	15379	64	23501	91	30139	118	36803
11	5248	38	15714	65	23792	92	30394	119	37031
12	5703	39	16039	66	24067	93	30617	120	37234
13	6167	40	16373	67	24338	94	30841	121	37430
14	6595	41	16682	68	24588	95	31075	122	37642
15	7015	42	17010	69	24812	96	31315	123	37799
16	7452	43	17347	70	25150	97	31541	124	38060

17	7883
18	8308
19	8706
20	9117
21	9535
22	9911
23	10310
24	10698
25	11069
26	11436
27	11806

44	17648
45	17973
46	18293
47	18593
48	18883
49	19165
50	19459
51	19759
52	20060
53	20362
54	20655

71	25380
72	25551
73	25711
74	25993
75	26230
76	26496
77	26764
78	27018
79	27264
80	27511
81	27750

98	31781
99	31987
100	32209
101	32433
102	32656
103	32879
104	33091
105	33310
106	33526
107	33755
108	33960

125	38247
126	38440
127	38669
128	38864
129	39031
130	39246
131	39438
132	39778

**ANEXO F. Datos de los máximos encontrados en la prueba de 150 a 0 voltios
con un Fac. de Amplificación de 7.5**

# MAX.	VALOR	# MAX.	VALOR	# MAX.	VALOR	# MAX.	VALOR	# MAX.	VALOR
1	1	31	8961	61	16693	91	24529	121	33863
2	106	32	9217	62	16965	92	24802	122	34205
3	415	33	9507	63	17190	93	25071	123	34538
4	569	34	9770	64	17433	94	25346	124	34877
5	746	35	10020	65	17685	95	25622	125	35228
6	950	36	10313	66	18065	96	25895	126	35589
7	1330	37	10574	67	18282	97	26187	127	35964
8	1698	38	10837	68	18502	98	26498	128	36341
9	2080	39	11095	69	18675	99	26810	129	36723
10	2440	40	11332	70	18849	100	27121	130	37099
11	2804	41	11593	71	19127	101	27432	131	37468
12	3135	42	11871	72	19414	102	27739	132	37853
13	3417	43	12128	73	19679	103	28043	133	38249
14	3731	44	12367	74	19947	104	28346	134	38622
15	4049	45	12617	75	20231	105	28652	135	39001
16	4351	46	12906	76	20504	106	28959	136	39387
17	4653	47	13165	77	20765	107	29268	137	39769
18	4952	48	13418	78	21008	108	29592	138	40001

19	5200	49	13664	79	21273	109	29905
20	5559	50	13913	80	21535	110	30219
21	5818	51	14156	81	21802	111	30532
22	6077	52	14416	82	22069	112	30845
23	6657	53	14676	83	22322	113	31161
24	6963	54	14928	84	22568	114	31498
25	7218	55	15192	85	22848	115	31833
26	7711	56	15451	86	23138	116	32168
27	8026	57	15707	87	23415	117	32501
28	8231	58	15960	88	23685	118	32838
29	8446	59	16204	89	23957	119	33176
30	8690	60	16443	90	24234	120	33531

ANEXO G. Funcion [x,y]=Piezo(archivo,N1,N2,máximo_vol)

