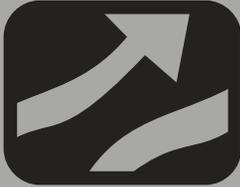


# CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE DESPLAZAMIENTO NANOMÉTRICOS CON MICROSCOPIA INTERFEROMÉTRICA



## AUTOR

Arturo Plata  
 Doctor en Ciencias del Ingeniero  
 Escuela de Física  
 Universidad Industrial De Santander  
 Carrera 27 Calle 9 Ciudadela Universitaria  
 Aplata@uis.edu.co  
 COLOMBIA

## AUTOR

Martha Yolanda Díaz Sánchez  
 Ingeniera de Sistemas  
 Esp. En Ingeniería del Software  
 Esp. En Docencia Universitaria  
 Universidad Industrial De Santander  
 Carrera 27 Calle 9 Ciudadela Universitaria  
 myoli9311@hotmail.com  
 COLOMBIA

**Fecha de Recepción del Artículo: Enero 28 de 2008**    **Fecha de Aceptación del Artículo: Febrero 19 de 2008**

## Artículo Tipo 1

## RESUMEN

*En este trabajo se determina el desplazamiento de un cristal piezo-eléctrico con resoluciones del orden de los nanómetros en función del voltaje aplicado, hasta encontrar la curva de histéresis del transductor eléctrico para conocer su comportamiento y determinar la caracterización del cristal Piezo-Eléctrico Jena Ref. 0693.*

*Se describe el montaje óptico utilizado en la parte experimental y el procedimiento para la calibración del paso de desplazamiento del cristal piezo-eléctrico. El procedimiento de calibración, es una condición necesaria para conocer desplazamientos de gran exactitud. Luego se hace la adquisición de imágenes utilizando un sistema de control digital de desplazamientos y un software para la captura, procesamiento y visualización de las imágenes, logrando obtener las franjas de interferencia. Posteriormente, se hace el análisis de los valores que arroja el sistema, explicando las condiciones y los comportamientos de cada una de las medidas experimentales. Se hace la codificación de la información utilizando Matlab y por medio de la detección de máximos, se logra encontrar la cantidad de desplazamientos que ejecuta el cristal piezo-eléctrico cuando sufre deformaciones al ser aplicado diferentes variaciones de voltaje.*

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

## PALABRAS CLAVE

Interferometría, Interferómetro Mirau, Interferograma, Cristal Piezo-eléctrico

## ABSTRACT

This document determines the displacement of a piezo-electric crystal with nanometric resolutions in function of applied voltage, until find the hysteresis curve of the

electric transducer to know its behavior and the characterization of the Piezo-electric crystal is determined Jena Ref. 0693.

It describes the optic device used for the trial process and the procedure for the flow calibration of the piezo-electric crystal. The calibration procedure is a necessary in order to know displacement with accurate success.

Then make the images acquisition using a displacement digital control system and a software for the capture, processing and visualization of the images, obtaining the interference stripes. Lately, the analysis of the values from the system is made to explain the conditions and behaviours of each one of the trials measures. The codification of the information is made using Matlab and the quantity of displacements is found through maximums that the crystal executes when suffers deformations when voltage variations are applied to it.

Finally, the results of the trials were developed to show the behavior of the crystal when it is submitted to voltage variations in increasing and decreasing forms until the characterization of the Piezo-electric crystal is determined Jena Ref. 0693.

## KEYWORDS

Interferometry, Mirau Interferometer, Interferogram, Piezo-electric glass

## INTRODUCCIÓN

Los constantes avances de la tecnología han permitido conocer mejor los fenómenos como la interferencia[1], permitiendo desarrollar líneas de investigación dirigidas a la caracterización de transductores piezo-electricos 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 herramientas importantes 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  $\mu\text{m}$ . Una alternativa que permite resolver este inconveniente consiste en utilizar microscopios in-

terferométricos[2] y cristales especiales como son los piezo-eléctricos. 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.

Algunos materiales cristalinos y cerámicos como el transductor eléctrico tienen como propiedad presentar el efecto piezo-eléctrico, cuyo principio de funcionamiento consiste en la aparición de una polarización eléctrica bajo la acción de un esfuerzo. Igualmente poseen un efecto reversible, ya que al aplicar una diferencia de potencial eléctrico entre dos caras de un material piezoeléctrico, aparece una deformación.

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 interferométrico NIKON compuesto de un objetivo tipo Mirau[3][4].

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.

El trabajo está orientado a caracterizar los desplazamientos del cristal piezo eléctrico por medio de métodos ópticos monocromáticos[5] y debido a la necesidad de obtener resoluciones de nanómetros conviene aplicar la técnica de interferometría.

Adicionalmente, se hace necesario utilizar un sistema de control para calibrar el sistema de desplazamientos nanométricos del material piezo-eléctrico para obtener mayor precisión en los datos que se obtienen.

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.

## 1. INTERFEROMETRÍA

La interferometría[6][7][8] se basa en el fenómeno que se produce cuando dos ondas luminosas de la

misma frecuencia se superponen sobre una pantalla.

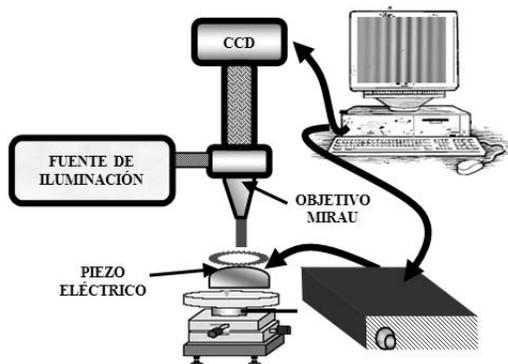
Además de tener la misma frecuencia, estas ondas deben ser sincrónicas, es decir que sus diferencias de fase, y por lo tanto las distancias entre las crestas de ambas ondas, deben permanecer constantes con el tiempo. Esto es prácticamente posible sólo si la luz de ambas ondas que se interfieren proviene de la misma fuente luminosa. Si es solamente una fuente luminosa la que produce la luz, los dos haces luminosos que se interfieren deben generarse de alguna manera del mismo haz. Existen muchos tipos de interferómetros, pero en todos ellos hay dos haces de luz que recorren dos trayectorias ópticas distintas determinadas por un sistema de espejos y placas que finalmente se unen para formar franjas de interferencia.

En este trabajo se utilizó la interferometría en luz blanca para determinar los desplazamientos del cristal piezoeléctrico a escala de nanómetros. Para encontrar el desplazamiento se hace necesario calcular el máximo valor de intensidad del interferograma para cada punto de la imagen del cristal. Esto se logra aplicando voltajes en forma creciente y decreciente al dispositivo piezoeléctrico.

## 2. SISTEMA OPTICO

El montaje del sistema óptico que se utilizó en la parte experimental se ilustra en la figura 1.

Figura 1. Sistema Óptico

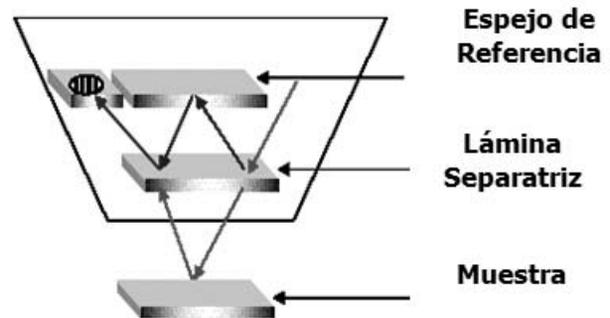


El sistema óptico consta de las siguientes partes:

- **Iluminación:** Se ilumina con una fuente de luz blanca.
- **Sistema interferométrico:** El dispositivo óptico utilizado es un microscopio óptico por reflexión (NIKON – ECLIPSE ME600), donde el objetivo convencional es reemplazado por un obje-

tivo acoplado con un sistema interferométrico[9] tipo mirau[10] (NIKON-10X). en la figura 2, se muestra este sistema interferométrico.

Figura 2. Sistema Interferométrico Mirau



- **Cristal Piezo Eléctrico:** Se utiliza el cristal piezo-eléctrico Jena Ref. 0693, el cual funciona con rangos de voltaje que van desde cero (0) hasta los ciento cincuenta (150) voltios, y permite un desplazamiento máximo de 30 micrómetros.

- **Software para la adquisición, procesamiento y visualización de imágenes:** El software MATVIS, es una aplicación desarrollada en Visual Studio 6.0 - C++ e implementado bajo ambiente Windows, utilizando librerías de Microsoft Foundation Class (MFC) y algunas librerías especiales como son: MIL y MPP, las cuales se utilizan para el procesamiento de imágenes y la solución de cálculos vectoriales.

Esta aplicación fue desarrollada por el Dr. Arturo Plata e implementada para la adquisición y procesamiento de imágenes. 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 para el personal que trabaja 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 de investigación que se desarrolle y amerite los cambios.

- **Controlador desplazamiento piezoeléctrico:** Para el funcionamiento del cristal piezo eléctrico, se utiliza un Amplificador de voltaje (HOLO – LASER), que se comunica con el computador realizando comandos desde el

sistema de control MATVIS, el cual permite introducir al transductor eléctrico valores desde 0 hasta  $2^{12}$  datos. La cantidad de total de datos, se debe a las especificaciones del tipo de convertidor (de 12 bits) que posee la tarjeta digital análoga del amplificador.

El amplificador de voltaje tiene un botón que permite graduar el rango de voltaje (desde 0 a 10) suministrado al cristal piezo eléctrico.

• **Sistema de adquisición y procesamiento de imágenes:** El sistema de adquisición de imágenes se hace a través de una video cámara CCD Model XC-75 marca SONY Monocromática. Se utiliza una tarjeta MATROX PULSAR para digitalizar las imágenes enviadas por la CCD.

### 3. MEDIDAS EXPERIMENTALES

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

En las primeras dos pruebas, se utiliza una diferencia de voltaje de 0 a 60 voltios y de 60 a 0 voltios. Esto se logra amplificando el voltaje a una escala de 2.5. En las segundas pruebas, se aplican voltajes de 0 a 110 voltios y de 110 a 0 voltios cambiando la escala a 5.0 y las últimas pruebas 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.

#### 3.1 Calibración del paso de desplazamiento

Debido a que la iluminación utilizada en el sistema óptico se hace con una fuente de luz blanca, se requiere utilizar un filtro de un solo color y realizar un procedimiento para manipular una sola longitud de onda y que los patrones de interferencia que se formen dependan únicamente de este valor.

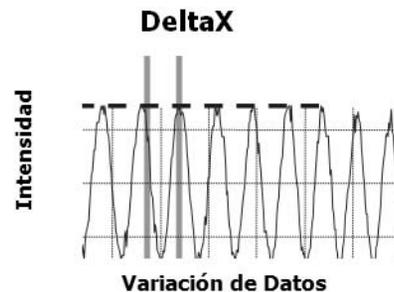
Para obtener este valor se hace una calibración, haciendo uso de uno de los módulos del sistema MATVIS, el cual captura el filtro de color verde para calibrar la longitud de onda; el tipo de objetivo interferométrico (10x), y el valor inicial y final para evaluar el recorrido óptico de dos puntos cercanos. En la figura 3 se observa el procedimiento visto como un sistema.

**Figura 3. Sistema de Calibración del paso de desplazamiento**



Cuando exista una variación de fase del interferómetro equivalente a  $2\pi$ , esta variación de fase corresponde a un corrimiento de  $\lambda/2$  correspondientes a cada uno de los máximos del interferograma (ver figura 4). La medición del paso interfranja observado en la calibración del sistema MATVIS es de  $\Delta X = 0.27 \mu\text{m}$ , entonces la calibración se realiza iluminando el microscopio interferométrico con una luz de longitud de onda de aproximadamente de 540 nm. Relacionando los valores de cada uno de los máximos y el paso interfranja, es posible calcular el desplazamiento del cristal piezo eléctrico.

**Figura 4. Paso de desplazamiento Interfranja**



#### 3.2 Obtención franjas de interferencia

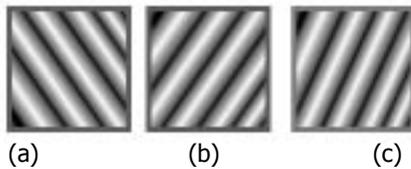
Luego de haber ya calibrado el Sistema óptico se realiza la toma de las muestras.

Para la obtención de las franjas de interferencia se utilizó el software MATVIS, que tiene funcionalidad cuando se aplican diferencias de voltaje en forma

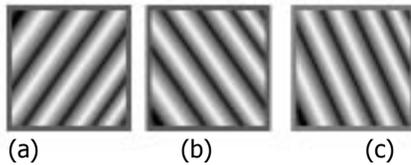
creciente al cristal piezo-eléctrico. Pero debido a la histéresis del cristal se desea conocer el comportamiento del cristal piezo eléctrico a medida que va perdiendo voltaje hasta volver a su estado inicial, es decir, aplicando diferencias de voltaje en forma decreciente, entonces se hizo necesario modificar el código de la aplicación "Matvis" para capturar imágenes haciendo el recorrido del piezo eléctrico en forma inversa.

Realizando las pruebas con el software MATVIS original y modificado, se obtienen seis interferogramas (.tif), representados en la figura 5 y la figura 6.

**Figura 5. Presentación de Franjas de Interferencia para un voltaje de: (a) 0 a 60 v. (b) 0 a 110 v. y (c) 0 a 150 v.**



**Figura 6. Presentación de Franjas de Interferencia para un voltaje de: (a) 60 a 0 v. (b) 110 a 0 v. y (c) 150 a 0 v.**



### 3.2.1 Análisis de las Franjas de Interferencia

En las figuras 5(a) 6(a), se logra apreciar que la distancia interfranjas es mayor que la distancia interfranjas en las figuras 5(b) y 5(b) e igualmente sucede con las franjas de las figuras 5(c) y 5(c). Esta separación interfranjas se presenta de acuerdo a la cantidad de voltaje aplicado. En los casos (a), se logra apreciar más espacio entre cada franja, porque el número de pasos para recorrer los 4096 datos es menor, la cantidad de voltios enviada al cristal piezo eléctrico es menor, y el desplazamiento del cristal es corto. A medida que la cantidad de voltios enviada al cristal piezo eléctrico es mayor, el desplazamiento del cristal es más grande y el número de pasos para recorrer los 4096 datos es mayor, por consiguiente, el espacio interfranja disminuye.

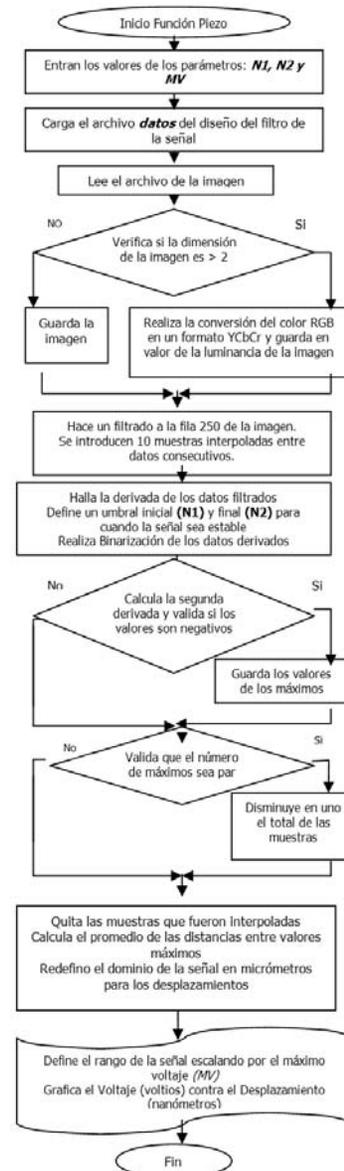
### 3.3. Codificación de la información

Luego de obtener los interferogramas de las pruebas experimentales, se codifica la información a partir de Matlab utilizando funciones propias de este lenguaje y algoritmos de tratamiento digital de imágenes.

Para elaborar el código de programación, primero se utiliza la herramienta de diseño para realizar filtros de señales llamada fdtool. 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, todas las especificaciones se graban en un archivo con el nombre datos. Posteriormente este fichero se invoca desde la función Piezo implementada.

En la figura 7 se muestra el algoritmo de la función.

**Figura 7. Algoritmo Función Piezo.**



La función Piezo consta de tres parámetros de entrada, así:

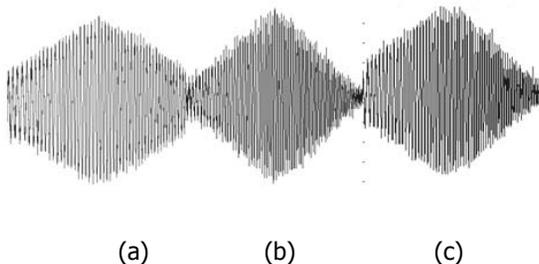
**FUNCION Piezo (archivo\_de\_imagen, N1, N2, MV).**

Los parámetros se describen a continuación:

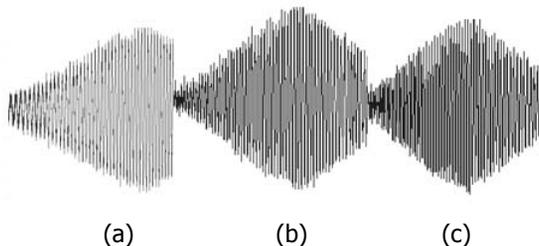
**N1** → Umbral inicial a partir de la cual la señal presenta un comportamiento estable; **N2** → Umbral final a partir de la cual la señal presenta un comportamiento estable; **MV** → Máximo voltaje aplicado en la prueba experimental.

La función realiza la adquisición de las imágenes que se muestran en la figura 5 y figura 6. Luego se hace un filtrado a la fila 250 de la imagen para obtener la variación en intensidad en una línea representativa y se obtienen los interferogramas que se observan en la figura 8 y figura 9. Posteriormente se hace la detección de máximos hasta obtener la curva de histéresis del cristal piezo eléctrico Jena Ref. 0693, representada en la gráfica donde se muestran los desplazamientos del cristal piezo eléctrico contra el voltaje aplicado.

**Figura 8. Patrones de interferencia con un Voltaje de: (a) 0 a 60 voltios (b) 0 a 100 voltios (c) 0 a 150 voltios.**



**Figura 9. Patrones de interferencia con un Voltaje de: (a) 60 a 0 voltios (b) 100 a 0 voltios (c) 150 a 0 voltios.**



### 3.4. Análisis de resultados

Analizando los datos de los máximos encontrados al ejecutar la función piezo, se logra determinar información importante que se encuentra tabulada en la siguiente tabla.

**Tabla 1. Resultados de las pruebas experimentales.**

VOLTAJE APLICADO (VOLTIOS)	FACT DE AMPLIF.	CANT. DE MÁXIMOS	DESPLAZ. PIEZO ELÉCTR. (nm)	DESPLAZ. (%)
0-60	2.5	56	15.000	40
60-0	2.5	54	13.000	40
0-110	5.0	102	28.000	74
110-0	5.0	100	27.000	74
0-150	7.5	132	36.000	100
150-0	7.5	138	37.000	100

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:** Cuando se aplican diferencias de voltaje en forma creciente, se encuentran 56 máximos para el recorrido de los 4096 datos, 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 del cristal piezo-eléctrico será de  $(56 \cdot 0.270 \mu\text{m})$ , es decir, 15.000 nm aproximadamente.

Cuando la variación de voltaje es de forma decreciente, se encuentran 54 máximos durante el recorrido total, por lo tanto, el máximo valor de desplazamiento del transductor eléctrico será de  $(54 \cdot 0.270 \mu\text{m})$ , que en la escala de los nanómetros equivale a 15.000 nm. aproximadamente.

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.

**2. Voltaje de 0 A 110 voltios y de 110 a 0 voltios.** 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  $(100 \cdot 0.270 \mu\text{m})$ . El máximo

desplazamiento que recorre el cristal piezo es de 27.000 nm aproximadamente.

Comparando el desplazamiento que realiza el cristal piezo-eléctrico con respecto al anterior voltaje aplicado, 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 voltios. Es decir alcanza hasta un 74% del total de su valor máximo de desplazamiento.

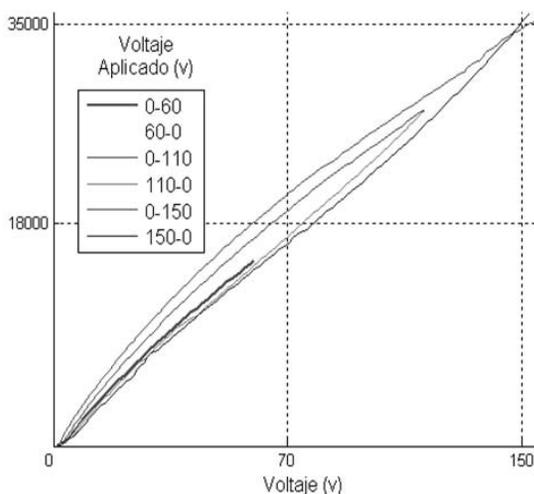
### 3. Voltaje de 0 A 150 voltios y de 150 a 0 voltios.

Se encontró que para este voltaje el piezo eléctrico cuando hace su recorrido llega hasta los 133 máximos en promedio, entonces, el mayor valor de desplazamiento encontrado en esta prueba fue de  $(133 \times 0.270 \mu\text{m})$ , para un total de 35.000 nm.

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

Tomando los resultados que arroja la función Matlab, se obtiene la figura 10, donde muestra el Voltaje aplicado al cristal piezo-eléctrico en voltios en el eje x, y el desplazamiento del cristal piezo eléctrico en el orden de los nanómetros en el eje y.

**Figura 10. Caracterización del Piezo Eléctrico Jena No. 0693**



En la Figura se observa la curva de histéresis, logrando observar a simple vista que el comportamiento de los desplazamientos en función del voltaje aplicado no es lineal.

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 a medida que el cristal va perdiendo voltaje. El transductor cuando se aplica voltaje en forma decreciente va recuperando su forma inicial pero su trayectoria no es la misma. Este fenómeno se logra apreciar por la histéresis que presentan estos cristales.

La curva de histéresis del cristal piezo-eléctrico muestra la relación voltaje aplicado contra el desplazamiento. Estos valores permiten finalmente caracterizar el cristal piezo eléctrico Ref. 0693.

### 4. 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 microscopio interferométrico 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.

### 5. REFERENCIAS

- [1]W.H. Steel "Interferometry" Cambridge at the university press, 1967.
- [2]SUAREZ M. "Clasificación de superficies basadas en propiedades de la compresión de imágenes". Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander, 2001. Pag. 30-34.
- [3]SUAREZ M. "Implementación y aplicación de un per-

filómetro basado en microscopia interferencial” Tesis, universidad industrial de Santander, 2000. Pag 18-23.

[4]PLATA A., SUAREZ M., GARZÓN J. “Implementación de un perfilómetro, basado en microscopia interferencial, para caracterización de superficies”. Congreso nacional de óptica, Armenia, Colombia, 2000.

[5]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. Pag. 40-45

[6]Bord and Wolf “Principles of Optics” Sixth ed. Pergamon Press, 1980. Pag. 17-22.

[7]W. H. Steel “Intererometry” Cambridge at the University Press, 1967. Pag. 40-42.

[8]P. Hariharan “Optical Interferometry” Academic Press, 1985. Pag. 29-31.

[9]DUNN, Graham Microscopia de interferencia para transmitir luz: una técnica llevada antes de su tiempo. Londres: Instituto de Randall, Universidad Londres de King’s. Pag. 48-52.

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