



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DE UN
TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO DE CUERDO A
LA TEMPERATURA DE TRABAJO”**

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

JESÚS HUMBERTO MERAZ CARO

DIRIGIDA POR

DR. JOSÉ DE JESÚS CORONEL HERNÁNDEZ

SINODALES

Dr. JOSÉ DE JESÚS CORONEL HDZ. _____
DIRECTOR

M. en C. RAFAEL RIVERA MORALES _____
SINODAL

M. en C. GUSTAVO PEDRAZA ABOYTES _____
SINODAL

Q.B. MAGALI E. AGUILAR ORTÍZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE QUÍMICA

**PROPIEDAD DE LA FACULTAD
DE QUÍMICA DE LA U.A.Q.**

FACULTAD DE
QUÍMICA



BIBLOTECA

No. Adq. J50926

No. Titulo _____

Glas. 621.3

M552R

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
TESINA TEÓRICA	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
II.1.1 Piezoelectricidad	2
II.1.2 Definición e Historia	2
II.1.3 Materiales piezoeléctricos	3
II.1.3.1 Nomenclatura	3
III. OBJETIVO	4
IV. DESARROLLO	4
IV.1.1 Ecuaciones que rigen la piezoelectricidad	4
IV.1.2 Resonancias piezoeléctricas	5
IV.1.3 Cerámicas piezoeléctricas	5
IV.2.1 Materiales y propiedades	6
IV.2.2 Transductores piezoeléctricos	9
IV.2.3 Transductores	9
IV.2.4 Usos	10
V. BIBLIOGRAFÍA	12
TESINA PRÁCTICA	
I. INTRODUCCION	14
II. ANTECEDENTES	14
II.1.1 El sistema quasar	14
II.1.2 Pruebas no destructivas (NDT)	14
III. OBJETIVO	15

Contenido	Página
IV. METODOLOGIA	15
IV.1 Materiales	15
IV.2 Método	16
V. RESULTADOS	17
VI. Análisis de resultados	18
VI. DISCUSIÓN	20
VII. CONCLUSIONES	21
VIII. BIBLIOGRAFÍA	23

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Características de los materiales usados como transductores	7
2. Materiales piezoeléctricos y propiedades	8
3. Resultados de temperatura y frecuencia	17
4. Resultados obtenidos en software estadístico	18

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Al aplicar una tensión mecánica cambia el centro de gravedad	2
2. Estructura composite de dos fases	4
3. Estructura tetragonal del PZT	7
4. Estructura de dominios antes del proceso de polarización	8
5. Transductor del equipo Quasar	9
6. Esquema constructivo de un transductor de ultrasonido	10
7. Fotografías que muestran el cilindro suspendido	16
8. Gráfica de dependencia lineal entre temperatura y frecuencia	19
9. Análisis de residuales	19
10. Cilindro maestro en el congelador	20
11. Tendencia de las gráficas	21
12. Equipo Quasar	22



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**"EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DE UN TRANSDUCTOR
PIEZOELÉCTRICO DE ACUERDO A LA TEMPERATURA DE
TRABAJO"**

TESINA TEÓRICA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

JESÚS HUMBERTO MERAZ CARO

DIRIGIDA POR

DR. JOSÉ DE JESÚS CORONEL HERNÁNDEZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2008.

I INTRODUCCIÓN

En estos tiempos existe una amplia gama de materiales transductores, los cuales están basados en tecnologías de actuadores emergentes. Estos actuadores están caracterizados por explotar nuevos fenómenos de transducción. Este es el caso de la piezoelectricidad. La mayoría de estos fenómenos de transducción son reversibles, y permiten la conversión de energía eléctrica en energía mecánica y viceversa (Pons, 2000).

Este es el caso del equipo de nombre Quasar, sobre el cual está hecho este trabajo, este equipo aprovecha el uso de este tipo de materiales piezoeléctricos para que, por medio de vibraciones electroacústicas, se pueda garantizar una buena estructura interna de las piezas metálicas.

La práctica de pruebas electroacústicas que se realicen bajo condiciones de operación inadecuadas pueden variar la precisión y veracidad de las mediciones. Es necesario que se realicen actividades con las cuales puedan ser corregidas o modificadas las deficiencias durante el desarrollo de la práctica, por ejemplo, contar con un área apropiada para realizar la prueba, como se sabe, los diferentes materiales pueden cambiar sus propiedades físicas, químicas o mecánicas de acuerdo al ambiente en el que estos se encuentren.

Se ha observado que cuando el material a ser inspeccionado en este equipo, tiene una alta temperatura, esto es, arriba de 50 °C, se induce una gran variación en el resultado de la inspección, llevando consigo, un alto porcentaje de falso rechazo.

II ANTECEDENTES

II.1.1 Piezoelectricidad

II.1.2 Definición e historia

En el año 1880 los hermanos Curie descubrieron un efecto sumamente interesante: un cristal, al ser sometido a una presión mecánica a lo largo de un eje determinado desarrollaba una diferencia de potencial entre sus caras.

Al año siguiente comprobaron experimentalmente su efecto recíproco: frente a campos eléctricos externos, estos cristales evidenciaban una deformación mecánica. Esta propiedad fue llamada piezoelectricidad, y a dichos materiales piezoeléctricos.

Esto quiere decir que, al aplicar una tensión mecánica Z cambia la polarización eléctrica del material generándose un campo eléctrico (aparición de cargas en las superficies del material). Tal y como se muestra en la Figura 1, la tensión mecánica cambia el centro de gravedad de cargas negativas y positivas produciendo un cambio en el momento dipolar (Jubert y Donati, 2000).

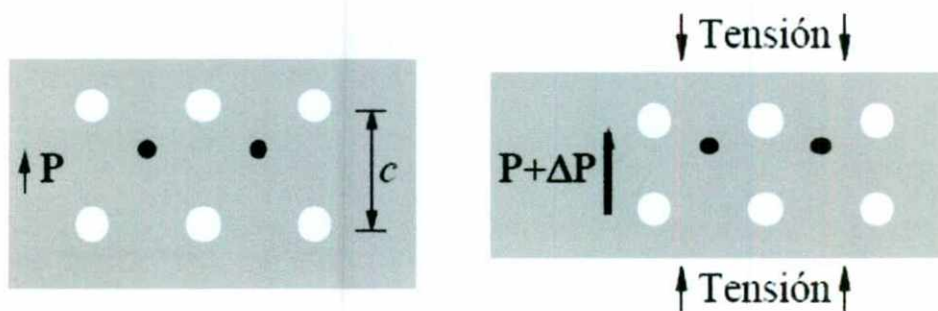


Figura 1. Al aplicar una tensión mecánica cambia el centro de gravedad, produciendo un momento bipolar (Jubert y Donati, 2000).

El efecto inverso también se da, al aplicar un campo eléctrico al cristal aparece una deformación mecánica en este.

II.1.3 Materiales piezoeléctricos

II.1.3.1 Nomenclatura

En 1970 comenzó el desarrollo de polímeros piezoeléctricos, tales como el PVDF (Polifluoruro de Vinilideno). En estos polímeros el fenómeno de la piezoelectricidad está asociado a fases cristalinas, donde las cadenas poliméricas están ordenadas presentando un alto momento dipolar, rodeadas de regiones amorfas. La importancia práctica de estos materiales reside en el hecho de su bajo costo de producción en láminas grandes (Jubert y Donati, 2000).

La idea directriz del estudio era fabricar materiales piezoeléctricos con propiedades promedio entre la cerámica tipo PZT y diversos tipos de polímeros. Lo primero fue introducir una nomenclatura capaz de describir en modo sencillo todas las posibles formas de unir dichas fases. Newnham, pionero en el desarrollo de los compuestos, fue quien introdujo el concepto de conectividad. Cada estructura es definida con tantos dígitos como fases. Cada fase, además, tendrá como dígito el 1 si el material se conecta consigo mismo a lo largo de columnas - una sola dirección- , 2 si el material se conecta entre sí a lo largo de planos - dos direcciones- y 3 si la conexión se verifica por las tres direcciones. En la Figura 2 se observan las distintas configuraciones con la descripción de conectividad correspondiente (Montero, 2001).

Las propiedades de los compuestos pueden ser estudiadas según diversos modelos que dependen del tipo de conectividad. Los más sencillos son los que se basan en el concepto clásico de conexión serie y paralelo. El compuesto tipo 2-2 de la Figura 2, es un clásico ejemplo de conexión serie en la dirección derecha-izquierda y paralelo en la dirección arriba-abajo. Por tanto habrá parámetros elásticos que se calcularán como promedio serie y otros como promedio paralelo. Esto no es más que una primera aproximación ya que hay muchos parámetros elásticos acoplados, por lo que el problema es realmente complicado (Montero, 2001).

CONECTIVIDADES

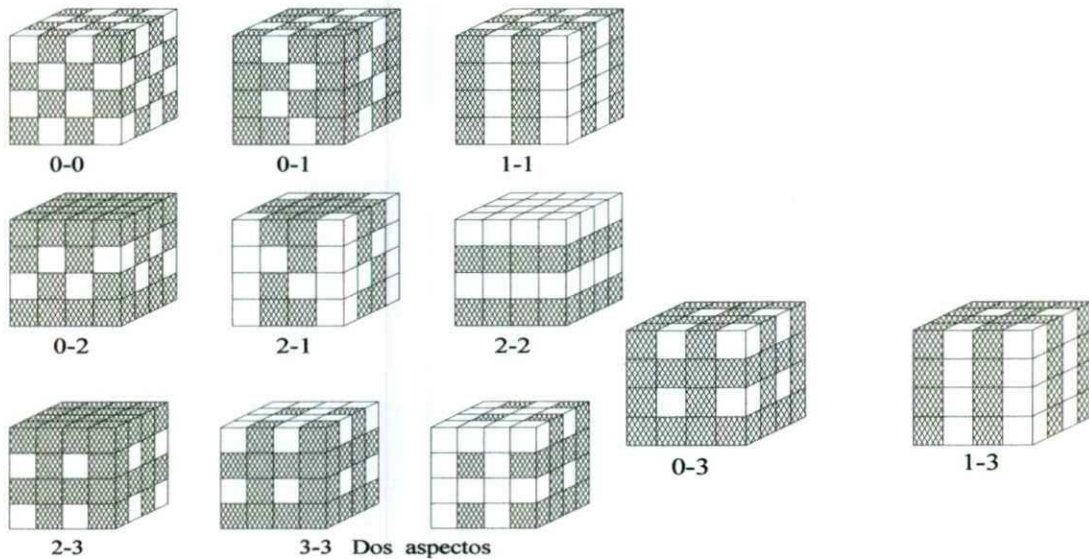


Figura 2.- Estructuras composite de dos fases (Montero, 2001).

III. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es sentar las bases teóricas con las cuales trabajan los materiales piezoeléctricos, para poder tener una mejor comprensión del fenómeno que ocurre al inducirle una presión o un voltaje determinado.

IV. DESARROLLO

IV.1.1 Ecuaciones que rigen la piezoelectricidad

Las ecuaciones que rigen la piezoelectricidad en una dimensión son:

$$P = Zd + \epsilon_0 \chi E; \quad e = Zs + Ed$$

$$d = \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)_E = \left(\frac{\partial e}{\partial E} \right)_z$$

$$g = \left(\frac{-\partial E}{\partial z} \right)_P = \left(\frac{\partial z}{\partial E} \right)_e$$

Donde:

P : polarización [C/m^2]

Z : tensión mecánica [N/m^2]

d : coeficiente de deformación piezoeléctrica [m/V]

g : coeficiente de tensión piezoeléctrica [m^2/C]

E : campo eléctrico [V/m]

c : susceptibilidad eléctrica

e : deformación elástica

s : coeficiente de elasticidad [m^2/N]

Estas ecuaciones describen la polarización eléctrica que aparece en el material al aplicar una tensión mecánica, y la aparición de una deformación elástica en el material al aplicar un campo eléctrico.

IV.1.2 Resonancias piezoeléctricas

Debido al acoplamiento entre las magnitudes mecánicas y eléctricas, un condensador piezoeléctrico en forma de barra (una de sus dimensiones muy superior a las otras dos) se comporta como un *oscilador electromecánico*, con unas frecuencias propias de resonancia que valen:

$$f_n = \frac{2n-1}{2l \sqrt{\rho s_{11}}} \quad \text{con } n = 1, 2, 3, \dots$$

donde el entero n es el orden de la resonancia, ρ la densidad másica del cristal, l la longitud de la barra, y s_{11} el coeficiente de elasticidad entre las deformaciones y las tensiones mecánicas aplicadas a lo largo de la muestra. La expresión permite determinar s_{11} a partir de la medida de las frecuencias piezoeléctricas (Von Hippel, 1995).

IV.1.3 Cerámicas piezoeléctricas

Aunque el fenómeno piezoeléctrico es cristalinamente anisótropo, una muestra policristalina (que en principio no tendría que presentar el fenómeno ya que sus momentos dipolares están orientados al azar) puede presentar piezoelectricidad si es sometida a un tratamiento adecuado. Este es el caso de los

condensadores de PZT (Titanato Zirconato de Plomo) policristalino que se utilizan, por ejemplo, para el aviso acústico en aparatos electrónicos (relojes, alarmas, ordenadores, teléfonos móviles...). Un posible proceso tecnológico para conseguir piezoelectricidad en cerámicas policristalinas puede consistir en aplicar un fuerte campo eléctrico, que oriente los dipolos de la muestra, a una temperatura ligeramente inferior a la temperatura de Curie. Las cerámicas piezoeléctricas pueden presentar efectos piezoeléctricos más intensos que los materiales monocristalinos (Von Hippel, 1995).

IV.2 Materiales y propiedades

Uno de los materiales piezoeléctricos con más éxito desarrollado recientemente es el PZT con una polarización espontánea de 47 mC/cm^2 , una temperatura de Curie de $97 \text{ }^\circ\text{C}$ y un coeficiente d en torno a 10^{-10} C/N , cincuenta veces mayor que el del cuarzo.

El Cuadro 1 analiza las propiedades de algunos de los materiales piezoeléctricos de uso más común. Históricamente el cuarzo fue el primer piezoeléctrico usado en dispositivos dada la existencia en la naturaleza de grandes monocristales lo cual hace este material relativamente barato. Presenta como gran ventaja la poca variación con la temperatura de sus coeficientes piezoeléctricos (Jubert y Donati, 2000).

Cuadro 1. Características de los materiales usados como transductores (Whitten y Gailey, 1992).

Material	Eficiencia como transmisor	Eficiencia como receptor	Sensibilidad	Poder de resolución	Características mecánicas
Cuarzo	Mala	Mediana	Escasa	Optima	Buena
Sulfato de litio	Mediana	Buena	Buena	Optima	Soluble en agua
Titanato de bario	Buena	Mediana	Optima	Mediana	Frágil
Metaniobato de bario	Buena	Mediana	Optima	Optima	Buena
Zirconato titanato de plomo	Buena	Mediana	Optima	Mediana	Buena

Por debajo de T_c muestra una simetría tetragonal, Figura 3, asimétrica que provoca la piezoelectricidad. Presenta como desventaja la alta dependencia con la temperatura de sus coeficientes piezoeléctricos. El proceso de fabricación de esta cerámica sigue una ruta de metalurgia de polvos seguido de una aplicación de campo eléctrico, $2 \times 10^4 \text{V/cm}$, a alta temperatura, para conseguir una polarización uniaxial tal y como se muestra en la Figura 4.

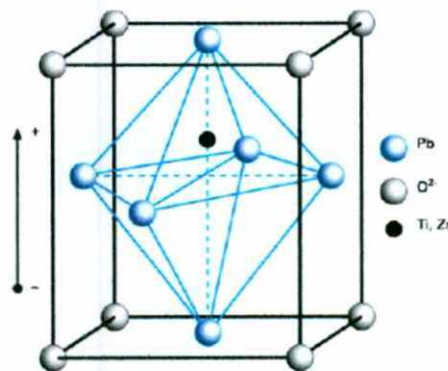


Figura 3. Estructura tetragonal del PZT por debajo de la temperatura de Curie (Jubert y Donati, 2000).

Cuadro 2. Materiales piezoeléctricos y propiedades (Whitten y Gailey, 1992).

[WHI92]

Material	Fórmula	d(C/N)
Cuarzo	SiO ₂	d ₁₁ = -2,25x10 ⁻¹¹ d ₁₄ = 0,85x10 ⁻¹²
ADP	NH ₄ H ₂ PO ₄	d ₃₅ = 5x10 ⁻¹¹
KDP	KH ₂ PO ₄	d ₃₅ = 5x10 ⁻¹¹
Niobato de litio	LiNbO ₃	d ₃₃ = 1,6x10 ⁻¹¹ d ₁₃ = 7,4x10 ⁻¹²
PZT	PbTi _{0,49} Zr _{0,52} O ₃	d ₃₃ = 2,23x10 ⁻¹⁰ d ₁₃ = -9,4x10 ⁻¹¹
PVDF	(CH ₂ -CF ₂) _n	d ₃₂ = 3x10 ⁻¹² d ₁₃ = 1,82x10 ⁻¹¹

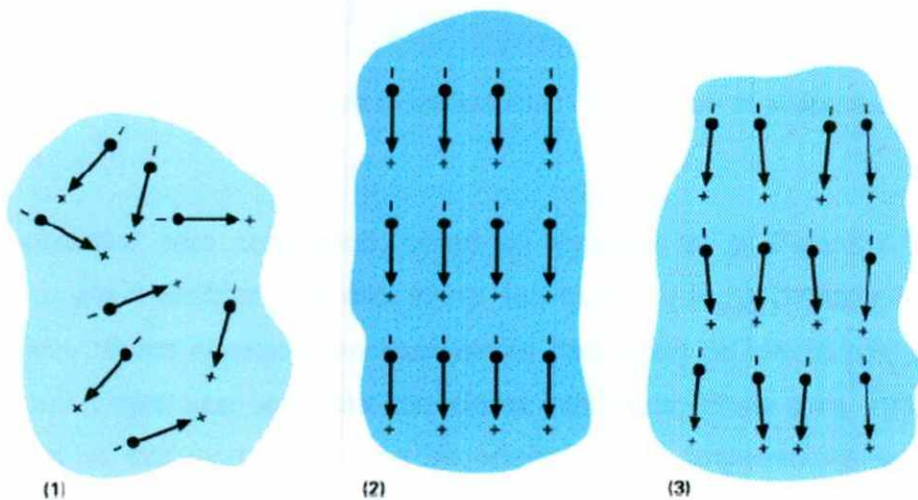


Figura 4. Estructura de dominios antes del proceso de polarización, 1, durante, 2, y después del mismo, 3, con una polarización uniaxial (Jubert y Donati, 2000).

El margen de frecuencia cubierto por los cristales de cuarzo depende de su tamaño y modo de vibración y comúnmente pueden ser construidos para operar entre unas decenas de KHz hasta decenas de MHz y la frecuencia de resonancia puede ser estable hasta unas pocas partes en 10^9 Hz (Jubert y Donati, 2000).

Los materiales piezoeléctricos son utilizados en multitud de aplicaciones para convertir señales eléctricas en ondas mecánicas y viceversa. De esta forma se pueden generar ondas ultrasónicas por medio de transductores o bien realizar sensores mecánicos. Algunas aplicaciones de los materiales piezoeléctricos aprovechan su alta constante dieléctrica o simplemente las grandes deformaciones que se obtienen en la resonancia. Otras, utilizan el efecto directo e inverso como en los transformadores piezoeléctricos (Kayombo, 1999).

V BIBLIOGRAFIA

Faguaga, M., Machado, G. 2000. Diseño, Fabricación y Caracterización de Transductores Piezoeléctricos de Ultrasonido para su Aplicación en END. Universidad de la República.

Jubert, A., Donati, E. 2000. Química para Ingeniería. CEILP.

Justo, D., Balardo, C. 1998. Estudio de las propiedades de un cristal piezoeléctrico. Estudio de las propiedades de un cristal piezoeléctrico. Analogía con circuitos resonantes. Laboratorio 4 - Dpto. de Física - FCEyN-UBA.

Kayombo, J. 1999. Medida de la no linealidad en materiales piezocerámicos por el método de intermodulación. Universidad Politécnica de Cataluña.

Montero, F. 2000. Composites piezoeléctricos. Diseño, modelos, caracterización, fabricación y transductores. Instituto de Acústica CSIC.

Montero, F. 2001. Curso de Transductores parte III: Técnicas de Construcción de Transductores Piezoeléctricos de Visualización. Instituto de Acústica. CSIC.

Pons, J. 2000. A comparative analysis of Piezoelectric and Magnetostrictive actuators in Smart Structures. Institute of Industrial Automation CSIC.

Von Hippel, A. 1995. Dielectric Materials and Applications.

Whitten, K., Gailey, K. 1992. Química General. Mc Graw Hill. Tercera Edición



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DE UN TRANSDUCTOR
PIEZOELÉCTRICO DE ACUERDO A LA TEMPERATURA DE
TRABAJO”**

TESINA PRÁCTICA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

JESÚS HUMBERTO MERAZ CARO

DIRIGIDA POR

DR. JOSÉ DE JESÚS CORONEL HERNÁNDEZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2008.

I. INTRODUCCIÓN

Se tomó un cilindro maestro al salir éste de tratamiento térmico, y se evaluó en el equipo Quasar la respuesta de los transductores piezoeléctricos que utiliza el equipo para determinar la sanidad interna de cada una de las piezas mediante el uso de electro resonancia acústica. El uso de este tipo de prueba es un requerimiento especial del cliente, el 100% de la producción debe ser inspeccionado en este equipo.

II. ANTECEDENTES

II.1.1 El sistema Quasar

El principal interés de los fenómenos piezoeléctricos reside en una analogía electromecánica característica de ciertos cristales. Al someter un cristal piezoeléctrico a deformaciones mecánicas, aparece en él una polarización que da origen a un campo eléctrico.

Análogamente, la aplicación de un campo eléctrico se acompaña de vibraciones elásticas del material, consecuencia del denominado efecto piezoeléctrico inverso. De este modo, al excitar uno de estos cristales con un campo eléctrico alterno, el cristal oscilará con la misma frecuencia de excitación que el campo, y su amplitud tomará valores extremos para ciertas frecuencias, denominadas "de resonancia" (Prucha y Nath, 2003).

II.1.2 Pruebas no destructivas (non destructive test, NDT)

El propósito de las pruebas no destructivas (NDT por sus siglas en inglés) es identificar y rechazar piezas defectuosas, partes que podrían fallar prematuramente en servicio. La mayoría de los métodos modernos para NDT dependen de la inspección visual. Los rayos X, análisis magnéticos, ultrasonido y prueba de fuga son muestras de NDT más comúnmente utilizados en la industria automotriz (Hands y Nath, 2004).

Un nuevo método de NDT es referido a la inspección por resonancia, esto es, se hace vibrar una pieza y se mide la frecuencia de resonancia para detectar la presencia de defectos.

El sistema de inspección por resonancia Quasar involucra a tres computadoras. El transceiver genera y analiza las señales. Todos los cálculos son hechos por una PC estándar, la cual es montada en un gabinete industrial. Un sistema PLC Allen Bradley controla la carga y descarga de las partes.

Las piezas hechas mediante un proceso controlado, tienen un patrón de resonancia similar determinada por la dimensión de la parte y las propiedades del material (Prucha y Nath, 2003).

III. OBJETIVO

La finalidad del presente trabajo es proporcionar las bases prácticas con las cuales se debe realizar la inspección de piezas con el equipo de electro resonancia acústica Quasar.

IV. METODOLOGÍA

IV.1 Materiales

Cilindro Maestro

Software Galaxy

Transceiver

Dispositivo de sujeción de Cilindro Maestro

Horno de Tratamiento Térmico

Pirómetro láser

Guantes Terry

Congelador

Transductores

Software estadístico

IV.2 Método

La pieza muestra, el cilindro maestro, tuvo su ciclo de tratamiento térmico final (T6, precipitación) por un periodo de 5.25 horas, cuando se tomó la pieza, ésta tenía un temperatura de 78°C. Se montó el dispositivo de sujeción en la estación número 1, se inicializó el programa Galaxy, que es el que controla el transceiver y se abrió el programa correspondiente al número de parte de la pieza.

Una vez que ya se inicializó el equipo, con la ayuda de los guantes Terry se puso la pieza en el dispositivo de sujeción (Figura 7a) y se activó el equipo para que la pieza quedara suspendida en los transductores (material piezoeléctrico). Ya que la pieza se encontraba suspendida, se tomó la lectura de temperatura utilizando el pirómetro láser, es importante mencionar que la temperatura siempre se tomó en la misma zona de la pieza, como lo muestra la Figura 7b, debido a que en la pieza, al tener distintos espesores, la temperatura varía de una zona a otra, la lectura de frecuencia se tomó directamente del software Galaxy.



Figura 7. Fotografías que muestran el cilindro maestro suspendido en los transductores (a y b) y el pirómetro láser usado para la toma de temperatura (c).

V. RESULTADOS

El Cuadro 3 muestra los resultados obtenidos de las lecturas de temperatura y frecuencia.

Cuadro 3. Resultados de Temperatura y Frecuencia

T °C	Hz	T °C	Hz
73.4	33.426	44.0	33.787
72.5	33.449	43.1	33.803
70.6	33.468	41.8	33.808
68.5	33.491	40.5	33.816
66.8	33.514	39.2	33.835
65.3	33.531	37.5	33.846
64.4	33.548	36.6	33.861
62.8	33.563	33.9	33.938
60.6	33.608	32.0	33.953
57.4	33.627	30.6	33.975
55.8	33.645	29.2	33.992
55.3	33.669	28.7	34.009
52.8	33.682	25.5	34.054
51.2	33.693	25.1	34.058
48.5	33.711	24.5	34.067
47.6	33.736	24.0	34.075
46.6	33.749	23.6	34.079
45.9	33.761	22.5	34.106
44.6	33.775		

V.1 Análisis de resultados

Cuadro 4. Resultados obtenidos en software estadístico

Regression Analysis: Hz versus T °C

The regression equation is

$$\text{Hz} = 34.4 - 0.0129 \text{ T } ^\circ\text{C}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	34.3647	0.0090	3825.79	0.000
T °C	-0.0128685	0.0001859	-69.21	0.000

S = 0.0175260 R-Sq = 99.3% R-Sq(adj) = 99.3%

PRESS = 0.0119283 R-Sq(pred) = 99.20%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	1.4711	1.4711	4789.46	0.000
Residual Error	35	0.0108	0.0003		
Total	36	1.4819			

Obs	T °C	Hz	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	73.4	33.4260	33.4201	0.0059	0.0059	0.36
2	72.5	33.4490	33.4317	0.0057	0.0173	1.04
3	70.6	33.4680	33.4562	0.0054	0.0118	0.71
4	68.5	33.4910	33.4832	0.0051	0.0078	0.47
5	66.8	33.5140	33.5051	0.0049	0.0089	0.53
6	65.3	33.5310	33.5244	0.0046	0.0066	0.39
7	64.4	33.5480	33.5359	0.0045	0.0121	0.71
8	62.8	33.5630	33.5565	0.0043	0.0065	0.38
9	60.6	33.6080	33.5848	0.0040	0.0232	1.36
10	57.4	33.6270	33.6260	0.0036	0.0010	0.06
11	55.8	33.6450	33.6466	0.0034	-0.0016	-0.09
12	55.3	33.6690	33.6531	0.0034	0.0159	0.93
13	52.8	33.6820	33.6852	0.0032	-0.0032	-0.19
14	51.2	33.6930	33.7058	0.0031	-0.0128	-0.74
15	48.5	33.7110	33.7406	0.0029	-0.0296	-1.71
16	47.6	33.7360	33.7521	0.0029	-0.0161	-0.93
17	46.6	33.7490	33.7650	0.0029	-0.0160	-0.93
18	45.9	33.7610	33.7740	0.0029	-0.0130	-0.75
19	44.6	33.7750	33.7907	0.0029	-0.0157	-0.91
20	44.0	33.7870	33.7985	0.0029	-0.0115	-0.66
21	43.1	33.8030	33.8100	0.0029	-0.0070	-0.41
22	41.8	33.8080	33.8268	0.0030	-0.0188	-1.09
23	40.5	33.8160	33.8435	0.0030	-0.0275	-1.59
24	39.2	33.8350	33.8602	0.0031	-0.0252	-1.46
25	37.5	33.8460	33.8821	0.0033	-0.0361	-2.10R
26	36.6	33.8610	33.8937	0.0033	-0.0327	-1.90
27	33.9	33.9380	33.9284	0.0036	0.0096	0.56
28	32.0	33.9530	33.9529	0.0039	0.0001	0.01
29	30.6	33.9750	33.9709	0.0040	0.0041	0.24
30	29.2	33.9920	33.9889	0.0042	0.0031	0.18
31	28.7	34.0090	33.9954	0.0043	0.0136	0.80
32	25.5	34.0540	34.0365	0.0047	0.0175	1.04
33	25.1	34.0580	34.0417	0.0048	0.0163	0.97
34	24.5	34.0670	34.0494	0.0049	0.0176	1.05
35	24.0	34.0750	34.0558	0.0050	0.0192	1.14
36	23.6	34.0790	34.0610	0.0050	0.0180	1.07
37	22.5	34.1060	34.0751	0.0052	0.0309	1.84

R denotes an observation with a large standardized residual.

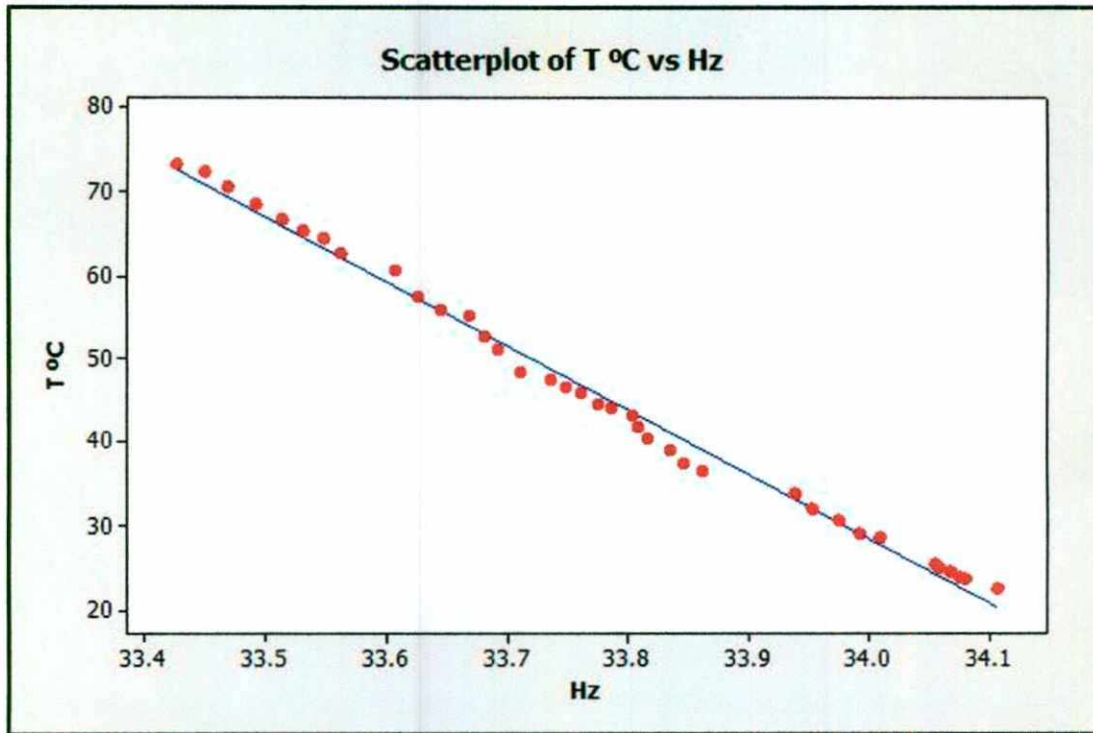


Figura 8. Muestra la dependencia lineal de la lectura de frecuencia con respecto a la temperatura, el 99.3% de la variación en la frecuencia obedece a un cambio en la temperatura.

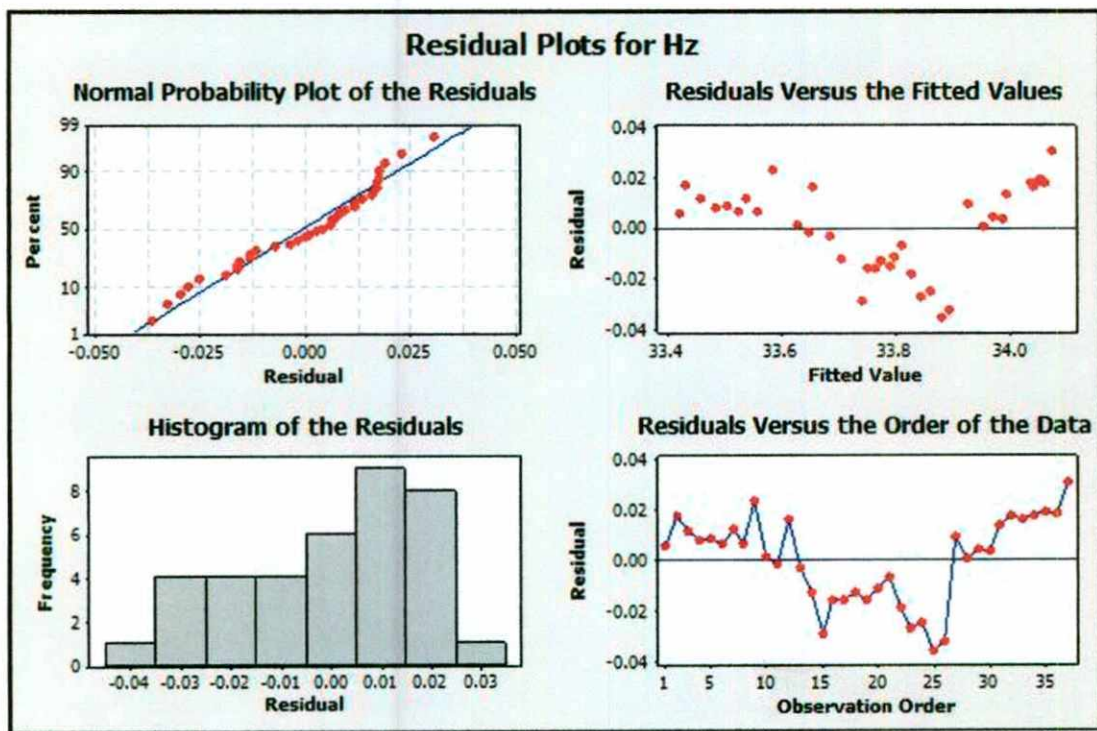


Figura 9. Análisis de residuales.

VI DISCUSION

Para poder tomar los datos en un amplio rango de temperaturas con el sistema Quasar (Sección VI), se tuvo que enfriar la pieza en un refrigerador, como lo muestra la Figura 10, con esto se puede verificar el comportamiento en condiciones fuera de lo normal y predecir su comportamiento en un rango mayor de temperatura.



Figura 10. Cilindro maestro en el congelador para disminuir su temperatura.

Se pudo apreciar claramente en la Figura 8 la dependencia lineal de la temperatura de la pieza con la lectura de frecuencia reportada por el transceiver.

Como se aprecia en la Figura 11, el rango de frecuencia se puede ver afectado en gran medida al incrementar o disminuir la temperatura de la pieza a ser inspeccionada, lo que incrementa la posibilidad de una pieza que se encuentra bien internamente pueda ser rechazada y por consecuencia aumentar el porcentaje del rechazo interno.

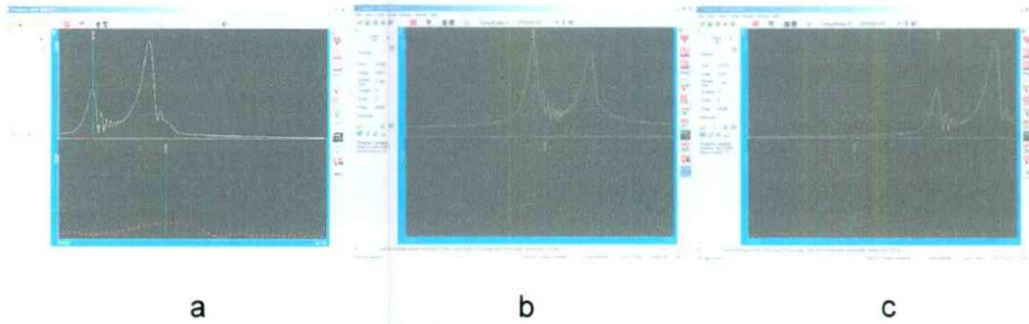


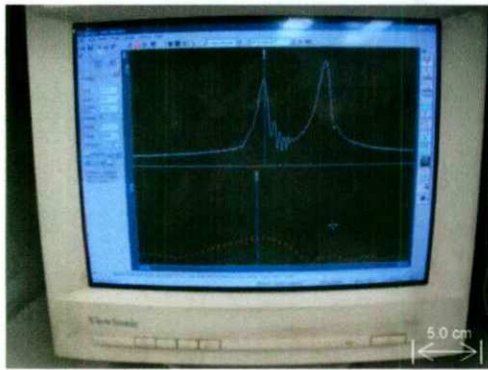
Figura 11. Se muestra la tendencia de la gráfica, a) cuando la temperatura es alta $\approx 70^{\circ}\text{C}$, b) cuando la temperatura cae $\approx 50^{\circ}\text{C}$ y c) cuando la temperatura es baja $\approx 20^{\circ}\text{C}$.

VII CONCLUSIONES

Con los datos de la sección IX.1 se puede apreciar que una temperatura por arriba o por debajo de la temperatura con la que se creó el programa que analiza las piezas, podría influenciar claramente en el resultado final.

Es recomendable tener un área controlada para llevar a cabo la inspección, ya que una variación en el equipo (Figura 12) puede inducir una situación de mayor rechazo de material.

Aunque la variación pueda ser pequeña, el programa que se encarga de hacer la selección (software Galaxy), Figura 10, puede interpretar esta ligera variación como que la frecuencia a la cual está apareciendo la resonancia está fuera de lugar y así rechazarla.



a



b

Figura 12. Equipo Quasar, a) software galaxy, b) transceiver.

VIII BIBLIOGRAFIA

Hands, G., Nath, R. 2004. Nondestructive Testing of Small Castings.

<http://www.asnt.org/publications/materialseval/basics/feb04basics/feb04>

Prucha, T., Nath, R. 2003. New Approach in Non-Destructive Evaluation Techniques for Automotive Castings. Quasar International.