

**DETECCIÓN DE FALLOS EN DISPOSITIVOS PIEZOELÉCTRICOS  
CERÁMICOS EN UN ALGORITMO DE DETECCIÓN DE DEFECTOS EN  
ESTRUCTURAS BASADO EN PCA.**

**NELSON JAVIER MENDES GALLARDO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

**DETECCIÓN DE FALLOS EN DISPOSITIVOS PIEZOELÉCTRICOS CERÁMICOS  
EN UN ALGORITMO DE DETECCIÓN DE DEFECTOS EN ESTRUCTURAS  
BASADO EN PCA.**

**NELSON JAVIER MENDES GALLARDO**

**Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Electrónico**

**Director**

**RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA  
PhD en Tecnologías de Información**

**Co-director**

**Jhonatan Camacho Navarro  
Ms.c en Ingeniería Electrónica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

## **AGRADECIMIENTO**

El presente trabajo de grado primeramente me gustaría agradecerle a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER por la oportunidad de realizar mis estudios y ser un profesional.

A mi director de tesis, Dr. Rodolfo Villamizar, por su guía y sus conocimientos que lograron en mí poder terminar mis estudios con éxito.

Me gustaría agradecerle a mi profesor Jhonatan Camacho por brindarme la oportunidad de trabajar con él, por su dedicación y paciencia durante el proceso de la realización de mi tesis.

A mi madre Sol María, por ser el motivo el cual yo me siento con ganas de salir adelante y dar todo por ella, por sus cuidados, sus cariños y por ser un ejemplo para mi vida de lucha y dedicación, por sentirme orgulloso de ser su hijo y por su amor.

A mi nona Dominga, por ser ese apoyo incondicional, ser una guía para mi vida, por sus consejos, por enseñarme a ser una persona de bien, por los valores inculcados y por esa felicidad que siento cada vez que estoy con ella y por su amor.

A mi hermana Tatiana, quien se esfuerza por brindarme lo mejor que puede dar una hermana mayor, por su apoyo, sus cuidados y su dedicación, sus hijos que

me brindar un deseo de superarme y poder darles lo mejor de mí y a su esposo Donaldo por acogerme en su familia.

A mi hermano Carlos, quien se esfuerza por brindarme lo mejor que puede dar un hermano mayor, por su confianza, por su apoyo, por sus consejos y por ese empujón que necesitaba para comenzar mis estudios.

A mi hermana Daniela, quien se esfuerza por brindarme lo mejor que puede dar una hermana menor, por su compañía y por su apoyo.

A mis familiares, a mis tías, Ana, Beatriz, Mabel, Marisol, Omaira, Sofía, y Zoraida, a mi tío Hernando, a mis primas y primos, quienes participaron directa o indirectamente brindándome su apoyo incondicional en el proceso de mis estudios.

A mis amigos y conocidos.

***Nelson.***

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	19
1.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. MARCO CONCEPTUAL	20
2.1 MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL	20
2.2 DETECCIÓN DE DAÑOS MEDIANTE PIEZODIAGNOSIS	21
2.3 DIAGNÓSTICO DE DEFECTOS EN ESTRUCTURAS MEDIANTE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)	22
2.4 FALLAS EN DISPOSITIVOS Y MÉTODOS DE DETECCIÓN	27
2.4.1 Fallas comunes	27
2.4.2 Métodos de detección	28
3. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO	33
3.1 INSTRUMENTACIÓN	34
3.2 CASOS DE ESTUDIO	36
3.2.1 Fallas en PZT	37
3.2.2 Daños en la estructura	39
4. RESULTADOS	41
4.1 ESCENARIO 1: COMPORTAMIENTO ANTE TEMPERATURA VARIABLE DE LOS PZT SIN NINGÚN DAÑO.	41

4.2 ESCENARIO 2: EFECTOS DE DESACOPLE, DESCONEXIÓN, GRIETAS Y PERDIDA DE CERÁMICA A TEMPERATURA AMBIENTE DE 27°C.	46
4.3 ESCENARIO 3: EFECTOS DE DESACOPLE, DESCONEXIÓN, GRIETAS Y PERDIDA DE CERAMICA A UNA VARIACION DE TEMPERATURA AMBIENTE DE 27°C A 50°C.	52
4.4 ESCENARIO 4: AGREGACIÓN DE DEFECTOS ESTRUCTURALES MASA Y FUGA A LOS DAÑOS DEL PZT.	56
4.5 ESCENARIO 5: MÉTODO DE LA IMPEDANCIA PARA DETECTAR DAÑOS EN EL PZT	58
4.6 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS TIPOS DE DAÑOS	60
5. CONCLUSIONES	62
6. RECOMENDACIONES	64
REFERENCIAS	66
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXOS	75

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Onda guiada generada por el PZT sobre la tubería.	22
Figura 2. Algoritmo PCA llevado a cabo	23
Figura 3. Circuito eléctrico equivalente de una cerámica piezoeléctrica	30
Figura 4. Montaje para la aplicación del método de la impedancia	31
Figura 5. Diagrama del desarrollo del proyecto.	33
Figura 6. Estructura para el análisis Piezo-Activo	34
Figura 7. Áreas de desacople	37
Figura 8. Desconexión del cable de tierra y total del PZT con el sistema de registro de datos.	37
Figura 9. Una y dos grietas sobre la cerámica PZT	38
Figura 10. Graficas de los niveles de pérdida en la cerámica	39
Figura 11. Defectos en la estructura, masa y fuga.	40
Figura 12. Variación de temperatura ambiente dentro del rango de 27°C a 50°C.	42
Figura 13. Grafica de índices Q vs T <sup>2</sup> datos sin daños con variación de temperatura en el rango de 27°C a 50°C.	43
Figura 14. Grafica del promedio de Q-estadístico en función de la variación de temperatura sobre el PZT	45
Figura 15. Grafica del promedio de T2 en función de la variación de temperatura sobre el PZT	45
Figura 16. Promedios de los índices Q vs T <sup>2</sup> de los efectos ocasionados por los daños en el PZT	46
Figura 17. Promedios de los índices Q vs T <sup>2</sup> de los efectos ocasionados por los daños en el PZT (acercamiento de los demás datos)	47

Figura 18. Promedios de los índices Q vs $T^2$ de los efectos ocasionados por los daños en el PZT (datos por debajo del área de acción normal)	48
Figura 19. Desviación estándar de los índices Q vs $T^2$ de los efectos ocasionados por los daños en el PZT	49
Figura 20. Desviación estándar de los índices Q vs $T^2$ de los efectos ocasionados por los daños en el PZT (acercamiento de los demás datos)	50
Figura 21. Desviación estándar de los índices Q vs $T^2$ de los efectos ocasionados por los daños en el PZT (datos por debajo del área de acción normal)	51
Figura 22. Promedios de los índices Q vs $T^2$ de los efectos ocasionados por los daños en el PZT a temperatura ambiente variante	52
Figura 23. Promedios de los índices Q vs $T^2$ de los efectos ocasionados por los daños en el PZT a temperatura ambiente variable (acercamiento de los demás datos)	53
Figura 24. Promedios de los índices Q vs $T^2$ de los efectos ocasionados por los daños en el PZT a temperatura ambiente variable (datos por debajo del área de acción normal)	54
Figura 25. Desviación estándar de los índices Q vs $T^2$ de los efectos ocasionados por los daños en el PZT a temperatura ambiente variante	55
Figura 26. Desviación estándar de los índices Q vs $T^2$ de los efectos ocasionados por los daños en el PZT a temperatura ambiente variable (acercamiento de los demás datos)	56
Figura 27. Promedios de los índices Q vs $T^2$ de los efectos ocasionados por los daños en el PZT y los defectos estructurales masa y fuga	57
Figura 28. Desviación estándar de los índices Q vs $T^2$ de los efectos ocasionados por los daños en el PZT y los defectos estructurales masa y fuga	58
Figura 29. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos del primer nivel de desacople	76
Figura 30. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos del segundo nivel de desacople	76
Figura 31. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos del tercer nivel de desacople	77
Figura 32. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos del cuarto nivel de desacople	78

Figura 33. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos de diferenciación de los cuatro niveles de desacople	79
Figura 34. Grafica de Índices Q vs $T^2$ datos con problemas de conexión al sistema.	80
Figura 35. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos con una y dos grietas en la cerámica PZT de forma paralela al largo de la tubería	81
Figura 36. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos con una y dos grietas en la cerámica PZT de forma perpendicular al largo de la tubería	82
Figura 37. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos de perdida de cerámica de la primera grieta	83
Figura 38. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos de perdida de cerámica de la primera y segunda grieta	85
Figura 39. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos de perdida de cerámica con más del 50%	86
Figura 40. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos de perdida de cerámica con más del 90%	87
Figura 41. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos del primer nivel de desacople a diferentes temperaturas (Orig normal)	88
Figura 42. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos del segundo nivel de desacople a diferentes temperaturas (Orig normal)	89
Figura 43. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos del tercer nivel de desacople a diferentes temperaturas (Orig normal)	90
Figura 44. Grafica de índices Q vs $T^2$ datos del cuarto nivel de desacople a diferentes temperaturas (Orig normal)	91
Figura 45. Grafica de índices Q vs $T^2$ con una grieta a diferentes temperaturas (Orig con una grieta)	92
Figura 46. Grafica de índices Q vs $T^2$ con una grieta a diferentes temperaturas (Orig normal)	93
Figura 47. Grafica de índices Q vs $T^2$ con dos grieta a diferentes temperaturas (Orig con dos grietas)	94

Figura 48. Grafica de índices Q vs T2 con dos grieta a diferentes temperaturas (Orig normal)	95
Figura 49. Grafica de índices Q vs T2 datos con una y dos grietas en la cerámica PZT a diferentes temperaturas (Orig normal)	96
Figura 50. Grafica de índices Q vs T2 datos perdida de cerámica de la primera grieta a diferentes temperaturas (Orig normal)	97
Figura 51. Grafica de índices Q vs T2 datos perdida de cerámica de la segunda grieta a diferentes temperaturas (Orig normal)	98
Figura 52. Grafica de índices Q vs T2 datos perdida de cerámica del más del 50% a diferentes temperaturas (Orig normal)	98
Figura 53. Grafica de índices Q vs T2 datos perdida de cerámica del más del 90% a diferentes temperaturas (Orig normal)	99
Figura 54. Dimensiones de los PZT cerámicos (tomado de [32])	100

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Datos obtenidos de los daños en el PZT mediante el método de impedancia	59
Tabla 2. Influencia de daños	60
Tabla 3. Dimensiones de los PZT en mm (adaptado de [32])	100
Tabla 4. Constantes de piezoeléctricos más comerciales (Tomado de [33])	100
Tabla 5. Aplicaciones más habituales de los piezoeléctricos más comerciales (Tomado de [33])	101

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A: Efectos individuales de desacople, desconexión, grietas y perdida de cerámica a temperatura ambiente DE 27°C.	75
Anexo B: Efectos individuales de desacople, desconexión, grietas y perdida de cerámica a una variación de temperatura ambiente de 27°C A 50°C.	88
Anexo C: Datasheet de los piezoelectricos ceramicos	100

## RESUMEN

**TITULO:** “DETECCIÓN DE FALLOS EN DISPOSITIVOS PIEZOELÉCTRICOS CERÁMICOS EN UN ALGORITMO DE DETECCIÓN DE DEFECTOS EN ESTRUCTURAS BASADO EN PCA”

**AUTOR:** NELSON JAVIER MENDES GALLARDO\*\*

**PALABRAS CLAVES:** *piezodiagnosis*, frecuencia de resonancia, resistencia de resonancia, desacople, desconexión, grietas, temperatura, PCA, pérdida cerámica, PZT, promedio, desviación estándar.

### CONTENIDO:

En el presente trabajo de grado, se describe la metodología empleada para el estudio de las fallas en dispositivos PZT (*zirconato titanato de plomo*) mediante un algoritmo de detección de defectos en una sección de tubería de acero carbono basado en análisis de componentes principales (PCA) y con condiciones de temperatura ambiente variante. La detección de defectos se realiza empleando el principio de *piezodiagnosis*, que consiste en el análisis de ondas guiadas generadas mediante dispositivos piezoeléctricos. Si se produce una falla en el dispositivo PZT o un defecto en la estructura se identifican los cambios mediante índices estadísticos por la alteración de la respuesta. El principal aporte del trabajo presentado consiste en detectar mediante el cálculo de índices estadísticos daños ocasionados en dispositivos PZT con una variación de temperatura ambiente y la caracterización de la respuesta de impedancia ante daños de diferentes referencias de PZT cerámicos circulares. Se establece una zona de trabajo normal del PZT bajo la influencia de la variación de temperatura ambiente y una zona gris por fuera de la zona de trabajo normal para la detección de los daños. Se demuestra que se puede detectar la mayoría de los daños ocasionados, y se pueden identificar algunos de ellos como un grupo de fallas y no como un daño individual. Este trabajo hace parte del proyecto “Monitorización y detección de defectos en estructuras usando algoritmos expertos embebidos” financiado por COLCIENCIAS, donde el algoritmo usado ha sido estudiado y mejorado, en un trabajo colaborativo con la Universidad Politécnica de Catalunya.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad De Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica Y Telecomunicaciones Director PhD Rodolfo Villamizar Mejía Co-director Ms.c Jhonatan Camacho Navarro

## ABSTRACT

**TITLE:** “PIEZOELECTRIC SENSOR FAULT IDENTIFICATION IN A DAMAGE CERAMIC DEVICES IN A DAMAGE DETECTION ALGORITHM ON STRUCTURES BASED ON PCA”<sup>\*</sup>

**AUTHOR:** NELSON JAVIER MENDES GALLARDO<sup>\*\*</sup>

**KEYWORDS:** *piezodiagnosis*, resonance frequency, resonance resistance, decoupling, disconnection, cracks, temperature, PCA, ceramics loss, PZT, average, standard deviation.

### CONTENT:

In this present work degree, the methodology for the study of failures devices PZT (zirconate titanate of lead) using an algorithm for damage detection in carbon steel pipelines based on Principal Component Analysis (PCA) under variable environmental temperature conditions is presented. The damage detection is performed using the principle of piezodiagnosis, which analyses guided waves generated by piezoelectric devices, so if a device PZT failure occurs or a defect in the structure changes are identified by statistical indices by the altered response. The main contribution of this work presented, it is to detect damage caused in devices PZT under ambient temperature variation and response characterization of impedance before damage of different references PZT circular ceramic. It establishes a normal working area of the PZT under the influence of ambient temperature variation and a gray area outside the normal working area for the detection of damage. It shows that it can detect most caused damage, and can be identified some of them as a group fault and not as an individual damage.

This research is part of the research project “Monitoring and detection of damages in structures using embedded algorithms”, which is funded by COLCIENCIAS. The proposed algorithm has been studied and improved in collaboration with University Politecnica de Catalunya.

---

<sup>\*</sup> Project of grade

<sup>\*\*</sup> Faculty of Engineering Physics and Mechanical Engineering School of Electrical, Electronics and Telecommunications Director PhD Rodolfo Villamizar Mejía Co-director Ms.c Jhonatan Camacho Navarro

## INTRODUCCIÓN

La detección de daños en tuberías es de gran interés para la industria ya que permite disminuir costos de mantenimiento, minimizar los riesgos relacionados con fallas de operación [1], anticipar escape de fluidos que afecten el medio ambiente y prevenir catástrofes como la explosión ocurrida en Risaralda, Colombia [2], donde se presentaron víctimas humanas.

En este aspecto, la comunidad científica ha desarrollado métodos para la detección temprana de daños estructurales, bajo la disciplina denominada *Structural Health Monitoring* (SHM), que utiliza o implementa ensayos no destructivos (Non Destructive Testing, NDT) mediante técnicas basadas en ultrasonidos, emisiones acústicas y análisis de vibraciones, entre otros [3][4][5]. El uso de dichas técnicas permite en algunos casos la monitorización en tiempo real de estructuras de alta importancia como es el caso de las tuberías de acero-carbono, que son usadas por industrias como Ecopetrol, GAS NATURAL S.A, CICOLGAS LTDA y muchas más en [6][7], para el transporte de fluidos.

Así, se ha reportado el uso de técnicas de SHM basadas en análisis de ondas guiadas para la detección de defectos en tuberías acero carbono. En este sentido la presente propuesta de investigación hace parte de un trabajo colaborativo entre el grupo de investigación CoDALab de la Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España) y el grupo de investigación CEMOS de la Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia), en el cual se han validado resultados prometedores para la detección de fallas en estructuras del tipo tuberías de acero-carbono, , por medio de la monitorización de salud estructural basada en el análisis de la respuesta ante ondas guiadas registradas con dispositivos piezoeléctricos y procesadas usando análisis de componentes

principales (PCA) [8], [9]. Sin embargo, si no son considerados daños en los PZT, existe la probabilidad de obtener diagnósticos con falsas alarmas.

Por consiguiente, este proyecto de grado tiene como objetivo el estudio de posibles fallas que se puedan presentar en dispositivos PZT, en el marco de un algoritmo de detección de defectos estructurales basado en piezo-diagnos y PCA. El principal aporte consiste en detectar fallas en los dispositivos PZT (pérdida de alimentación, daño en la cerámica) en una tubería de acero-carbono a nivel de laboratorio ante una variación de temperatura ambiente entre el rango de 27°C a 50°C mediante índices PCA. Durante el proceso se logró detectar en la mayoría de los casos el daño ocasionado al PZT y determinados daños se lograron clasificar; además mediante sus parámetros eléctricos se comprobó que también es posible detectar los daños en los PZT utilizando una aproximación del método de la impedancia.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Validar experimentalmente una metodología de identificación de fallas en sensores piezoeléctricos usados para la detección de defectos en estructuras tipo tubería mediante un algoritmo basado en PCA.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para el cumplimiento del objetivo general del proyecto se plantean tres objetivos específicos:

- Caracterizar la respuesta de los dispositivos piezoeléctricos usando parámetros eléctricos relacionados con el método de impedancia ante diferentes tipos de fallo en sensores.
- Validar experimentalmente en un *loop* de tubería acero-carbono a nivel de laboratorio las variaciones producidas por diferentes tipos de fallo en dispositivos PZT en un algoritmo de detección de defectos en estructuras basado en PCA.
- Adaptar un método estadístico para diferenciar una falla en el dispositivo PZT con un defecto de tubería tipo agregación de masa o fugaz

## 2. MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo se describen los conceptos básicos empleados en el desarrollo del proyecto, en el que se describen los principios y conceptos relacionados con la monitorización de salud estructural, piezodiagnos, PCA, los efectos de daños en los PZT y de la variación de temperatura propuesta.

### 2.1 MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL

El monitoreo de salud estructural (SHM por sus siglas en inglés) se refiere al proceso de implementar una estrategia global y *online* para la identificación de daños en estructuras civiles, mecánicas o aeroespaciales, es decir, es un diagnóstico del estado de la estructura como un todo, en función del estado de sus diferentes partes y de sus materiales constitutivos. Su objetivo primordial es el de mejorar la seguridad y la confiabilidad de una estructura y para lograrlo, se ha apuntado al desarrollo de técnicas que puedan reemplazar la inspección visual por métodos automatizados de valoración de daños[10][11][12]. Otra línea de investigación afines la componen por ejemplo la evaluación no destructiva (NDE) que se refiere básicamente a la inspección off–line de estructuras, teniendo un conocimiento *a priori* de la presencia o localización del daño[13]. La predicción del estado y del tiempo de servicio de un sistema estructural en términos probabilistas es abordada por lo que se conoce como predicción del daño (*damage prognosis*)[14].

Los métodos de monitoreo de salud estructural pueden clasificarse en dos grandes grupos: **(1)** métodos globales, los cuales definen la presencia y la localización de un daño a partir de la dinámica de la estructura y **(2)** métodos

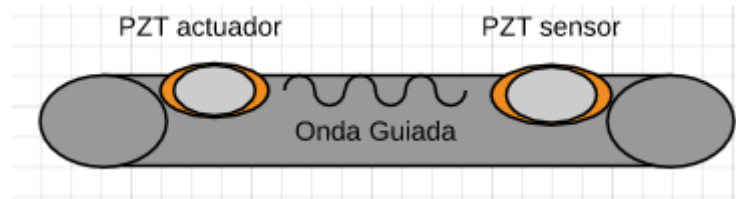
locales, los cuales se basan en pruebas experimentales e inspecciones visuales, tales como métodos de ultrasonido, métodos de campos magnéticos, entre otros. Estos métodos locales necesitan un conocimiento a priori de la localización del daño, además que la sección estructural que se va a revisar sea accesible para el operador encargado de la revisión visual[3].

## **2.2 DETECCIÓN DE DAÑOS MEDIANTE PIEZODIAGNOSIS**

La *piezodiagnos* es una técnica de *SHM* basada en el efecto *piezoeléctrico* como herramienta para el diagnóstico de defectos en estructuras, mediante el uso de transductores piezoeléctricos adheridos cerca de la superficie del material de prueba para transmitir y recibir energía [5][15]. La *piezodiagnos* se basa en dos conceptos principales: la piezoelectricidad y las ondas guiadas.

La piezoelectricidad se define como la aparición de un potencial eléctrico a través de algunas caras de un cristal cuando está bajo presión y de distorsión cuando un campo se aplica. El efecto piezoeléctrico se produce naturalmente en los cristales de cuarzo, pero puede ser inducida en otros materiales, como la cerámica de plomo, circonio, y titanio (PZT: zirconato titanato de plomo) [16]. Asimismo, los PZT pueden ser usados para generar ondas guiadas mediante configuración actuador-sensor como se muestra en la Figura 1. Las ondas guiadas tienen la propiedad de viajar largas distancias dentro de los límites de una estructura y permiten recolectar información de las reflexiones y dispersiones generadas por una discontinuidad (o defecto) presente en la estructura.

**Figura 1. Onda guiada generada por el PZT sobre la tubería.**



La información del viaje de la onda es recolectada adhiriendo varios PZT en diferentes puntos de la superficie de la estructura y el diagnóstico de un defecto se logra mediante la aplicación de técnicas estadísticas como análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés)[8][17][18].

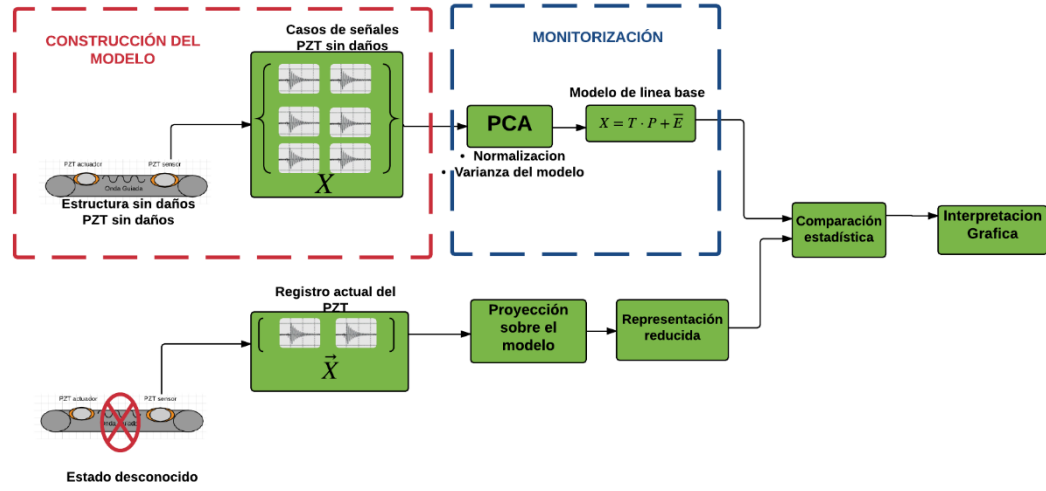
### **2.3 DIAGNÓSTICO DE DEFECTOS EN ESTRUCTURAS MEDIANTE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)**

Al realizar el monitoreo de salud estructural por medio de piezodiagnos, se presentan una gran cantidad de datos por lo que es necesario el uso de técnicas que permitan el procesamiento y análisis de grandes volúmenes de información proveniente de los sensores instalados en la estructura.

En este sentido, diversos trabajos han mostrado PCA como técnica apropiada para tareas de reconocimiento de patrones y detección de daños siendo el objetivo de PCA la reducción de las dimensiones de la matriz con las variables observadas para conservar la mayor cantidad de varianza de los datos. Así, la reducción es determinada por un nuevo espacio de coordenadas en función de la varianza-covarianza de los datos originales [17][19][20][21].

Este algoritmo es implementado por un programa en MATLAB® que fue desarrollado por el grupo CEMOS.

Figura 2. Algoritmo PCA llevado a cabo



Para el desarrollo del algoritmo se comienza creando una matriz de casos sin daños de la que se obtiene el modelo PCA utilizado para el algoritmo, donde se continúa con los siguientes pasos según la Figura 2:

- Normalizar la matriz de casos sin daños ( $X$ ) por el método *group scaling*:

$$\bar{X}_{i,j} = \frac{X_{i,j} - \mu_j}{\sigma_s} \quad (3)$$

En la ecuación (1),  $X$  corresponde a la matriz de casos sin daños que está compuesta por  $i$  repeticiones y  $j$  columnas. El número de columnas es el resultado de adquirir  $N$  muestras por sensor. Es decir, si se utilizan  $S$  sensores PZT, se obtienen  $j = N * S$  columnas en la matriz  $X$ .

De esta manera, para aplicar el método de normalización mediante el método de *group scaling*, es necesario calcular la desviación estándar  $\sigma_s$  de las  $N$  mediciones registradas para todas las  $i$  repeticiones realizadas por cada sensor  $s$ , así como el valor medio  $\mu_j$  de cada columna. La matriz normalizada

$\bar{X}$  está compuesta por cada valor  $\bar{X}_{i,j}$  estandarizado por su respectivo valor medio  $\mu_j$  y desviación estándar  $\sigma_s$  como establece la ecuación (3).

- Calcular la matriz de covarianza de la matriz normalizada, definida en la ecuación (4):

$$C = \bar{X}^T \bar{X} \quad (4)$$

- Utilizar la misma cantidad de componentes principales que el número de experimentos  $i$ . De esta manera, el espacio *r-dimensional* determinado por los componentes principales es de dimensión  $r = i$ .
- Estimar el vector de componentes principales reducido  $Z$ , mediante la obtención de los vectores propios  $\varphi$  y valores propios  $\lambda$  de la matriz de covarianza ( $C$ ), utilizando un método iterativo que resuelva el problema de descomposición en valores singulares (*svd*) como se expresa en las ecuaciones (5) y (6).

$$[\varphi, \lambda] = svd(C) \quad (5)$$

$$Z = \varphi^T \bar{X} \quad (6)$$

El modelo de línea base obtenido mediante PCA está constituido por los siguientes elementos:

- La matriz de transformación  $\varphi$  que corresponden a los vectores propios.
- La matriz de normalización, representada por los valores medios  $\mu_j$  y de desviación estándar  $\sigma_s$  obtenidos de la matriz de casos sin daños  $X$ .

- Las varianzas de las componentes principales representadas por los  $r$  valores propios  $\lambda$ .

Luego de obtener el modelo de línea base mediante PCA, la detección de los cambios de un nuevo experimento  $i$  respecto a casos sin daño, se realiza calculando los Scores y los índices Q-estadístico y Hotelling T<sup>2</sup>.

- **Scores:** Corresponde a la proyección  $Z$  de una nueva medición  $X_{new}$  al espacio de componentes principales definido por la matriz de casos sin daño  $X$ . La nueva medición es un vector que contiene las  $N$  muestras de cada uno de los  $s$  sensores piezoeléctricos. El vector *score* es calculado utilizando la ecuación (7).

$$Z = \varphi^T \hat{X}_{new} \quad (7)$$

En la ecuación (7),  $\hat{X}_{new}$  es el vector normalizado aplicando el método de *group scaling* (ecuación (2)) y utilizando los valores medios  $\mu_j$  y las desviaciones estándar  $\sigma_s$  del modelo de línea base.

- **Índice Q-estadístico:** El índice Q corresponde al error cuadrático expresado en la ecuación (8).

$$Q = \sum_k (e_k)^2 \quad (8)$$

Donde  $e_k$  son los elementos del vector de error residual obtenido luego de reconstruir la medición como se expresa en la ecuación (10).

$$e = \varphi Z - \bar{X}_{new} \quad (9)$$

- **Índice Hotelling T<sup>2</sup>:** El índice T<sup>2</sup> es la distancia en el espacio r-dimensional definido por los componentes principales respecto al origen, calculado usando la ecuación (8).

$$T^2 = \sum_{k=1}^r \frac{t_k^2}{\lambda_k} = Z^T \lambda^{-1} Z \quad (10)$$

En la ecuación (10), el índice T<sup>2</sup> se calcula mediante la sumatoria de los cuadrados de cada elemento t<sub>k</sub> del vector de SCORES o proyecciones normalizado por su respectiva varianza λ<sub>k</sub> o valor propio.

La razón principal del uso de los scores y de los índices PCA en el algoritmo, se debe a que facilitan la visualización en 2D de los diferentes tipos de daños, y que facilitan la tarea de clasificación de defectos.

Luego de obtener los cálculos de los índices Q-estadístico y Hotelling T<sup>2</sup>, se realiza el proceso de obtener la media aritmética y la desviación estándar de los índices para un análisis más sencillo de los mismos.

- **Media aritmética:** Las variables  $\bar{X}$  y  $\bar{Y}$  representan las medias de las muestras, dados los n índices {Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>,...,Q<sub>n</sub>} y {T<sup>2</sup><sub>1</sub>, T<sup>2</sup><sub>2</sub>,...,T<sup>2</sup><sub>n</sub>}, la media aritmética se define como:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T^2_i \quad \text{y} \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad (11)$$

La suma de n valores de la variable y luego dividido por n, donde n es el número de datos.

- **Desviación estándar:** denotada con el símbolo  $\sigma_s$  es una medida de dispersión definida como:

$$\sigma_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (12)$$

La raíz de la media de los cuadrados de las diferencias entre cada valor de la variable y la media aritmética de la distribución.

## 2.4 FALLAS EN DISPOSITIVOS Y MÉTODOS DE DETECCIÓN

Considerando que en un sistema SHM basado en *piezo-diagnosis* y PCA, la monitorización de defecto en la estructura es sensible a daños en los PZT y a variaciones operacionales; se realiza una revisión enfocada en daños en dispositivos PZT que han sido reportados en el estado del arte en metodologías que integran este tipo de tecnología. Aunque la respuesta de los PZT es altamente sensible a un número de factores que influyen ya sea la estructura y sus propiedades o su mecanismo de detección (en caso de un sistema activo de trabajo) y su conexión a la estructura [22], en esta revisión se describen problemas comunes estudiados en la literatura, así como las metodologías utilizadas para la detección de los problemas.

### 2.4.1 Fallas comunes

- **Problemas de conexión y desacople:** Comprenden los cambios en la condición de unión o degradación de las propiedades mecánicas/eléctricas de los transductores piezoeléctricos y que podrían causar identificación de daños en la estructura falsos. Este tipo de problemas compromete la capacidad de los

sistemas SHM para evaluar con precisión el estado de la estructura como es reportado en [23].

- **Grietas y pérdida de cerámica de los transductores:** Las cerámicas piezoeléctricas son frágiles y susceptibles a la formación de grietas en todas las escalas, lo que provoca discontinuidades geométricas, eléctricas, térmicas y mecánicas. La iniciación o crecimiento de grietas induce a alta tensión y/ o concentraciones de campo eléctrico, generando descargas parciales, así como avería dieléctrica, fractura y pérdida del efecto piezoeléctrico [24].
- **Efectos de la temperatura ambiente sobre el pzt:** En el estado del arte ha sido reportado una alta dependencia de las propiedades y el comportamiento de las cerámicas piezoeléctricas a la variación de temperatura[23]. Donde los efectos que se presentan por la temperatura son la alteración de las componentes dieléctricas y de impedancia de las cerámicas piezoeléctricas, causando un desplazamiento de su frecuencia de resonancia y cambios en la amplitud de voltaje[25][26][27].

#### 2.4.2 Métodos de detección

- **Detección por índices PCA**

En la literatura se ha usado con éxito los índices *T-squared* y *Q-Statistic* para la detección de defectos en estructuras[20], aunque para un monitoreo fiable de las estructuras el problema de la validación del sensor es una parte crítica de la vigilancia de la salud estructural, donde se han realizado estudios del estado del sensor mediante análisis de componentes principales el cual es capaz de realizar la detección de un sensor defectuoso como es reportado en [28][29][30]. En este proyecto se utilizó el procedimiento estadístico descrito en la sección 3.3 para determinar los daños en el PZT de acuerdo a las variaciones del promedio y la

desviación estándar de los índices utilizados para detectar defectos en estructuras.

De acuerdo con la Figura 2, la metodología para detección de daños en el PZT comprende dos etapas: Construcción del modelo (entrenamiento) y Monitorización (validación).

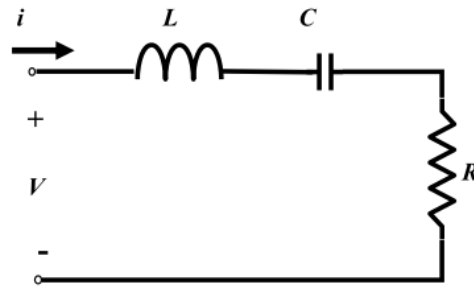
En el entrenamiento se utilizan los PZT para monitorear la estructura sin defectos para una muestra estadística significativa (mínimo 100 casos), con los que se construye la matriz de casos sin daños y se les realiza el procedimiento de normalización para obtener el modelo estadístico del PZT; luego para la validación se registra la respuesta de los sensores PZT en un estado desconocido (con o sin fallas), se les realiza el procedimiento estadístico descrito en la sección 3.3 para comparar la respuesta registrada respecto a los casos sin daños y si se presentan desviaciones respecto al caso sin daños se atribuyen a fallas en el PZT.

La metodología anteriormente supone que la estructura se encuentra sin defectos y que además los cambios en las condiciones operacionales y ambientales no producen desviaciones significativas en los índices de monitorización de daño.

- **Método de la impedancia**

En este método se utiliza un modelo eléctrico del dispositivo PZT como ilustra la Figura 3.

**Figura 3. Circuito eléctrico equivalente de una cerámica piezoeléctrica**



Fuente: [31]

Existen diferentes metodologías para desarrollar un sistema SHM, pero se presta especial atención a los basados en la impedancia electromecánica (E / M) obtenida a partir de transductores piezoeléctricos, la característica principal de estos transductores es el efecto piezoeléctrico. De esta propiedad, hay una relación directa entre la impedancia eléctrica y la impedancia mecánica. En consecuencia, un fallo estructural podría causar un cambio en la impedancia mecánica, que a su vez va a cambiar la impedancia eléctrica obtenida del PZT unido en la estructura[10]. Para la detección del fallo en transductores PZT mediante el método de impedancia se analizan los cambios en la impedancia ecuación (1), los cuales indican degradación de las propiedades eléctricas/mecánicas o de daños ocasionados a un transductor PZT.

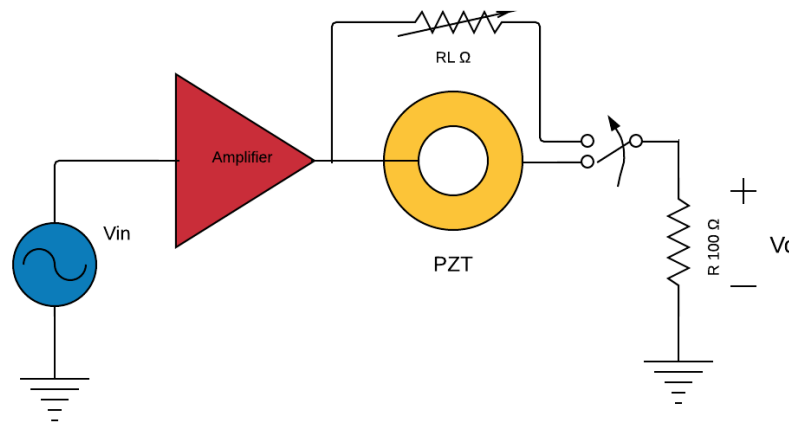
$$Z_L = R_L + iX_L \quad (1)$$

Asimismo, las mediciones de impedancia brindan información sobre el cambio de parámetros, tales como frecuencias de resonancia ecuación (2), lo que permite la detección del fallos en el dispositivo [23].

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L*C}} \quad (2)$$

En este proyecto se implementó un proceso para realizar de forma indirecta la medición del método de impedancia, donde los parámetros que se tuvieron en cuenta para el análisis de los cambios de la impedancia asociada al dispositivo PZT fueron la frecuencia y la resistencia de resonancia; mediante la inspección de su función de transferencia se pudo determinar estos parámetros y sus cambios.

**Figura 4. Montaje para la aplicación del método de la impedancia**



El montaje de la Figura 4 se realizó para determinar los parámetros asociados a la impedancia como los son la frecuencia de resonancia y la resistencia de resonancia. En el punto de resonancia se tiene que los valores de impedancia de L y C son iguales pero de signos contrarios y se cancelan entre ellos, lo que indica que en este punto solo se tiene el valor resistivo y de acuerdo a la ecuación (1), se obtendría el valor resistivo asociado a la impedancia del PZT., además como lo indican la ecuación (2) los parámetros L y C están asociados al valor de la frecuencia de resonancia, es decir si la frecuencia de resonancia cambia estos parámetros asociados también lo harán, y de esta forma indirectamente se utiliza el método de la impedancia sin la necesidad de realizar el cálculo de la impedancia para determinar los daños del PZT mediante los cambios de los parámetros asociados.

El proceso para determinar la frecuencia y resistencia de resonancia es el siguiente:

- Conectar primero el PZT en paralelo con una resistencia variable controlado mediante switch dip como lo indica la Figura 13, teniendo presente calcular el valor real de la resistencia de salida, este valor se tendrá muy presente para los cálculos posteriores.
- Realizar un barrido de frecuencia, con los datos obtenidos elaborar una gráfica de ganancia vs frecuencia.
- Identificar en altas frecuencias el punto más bajo de ganancia, en este valor estará la frecuencia de resonancia, guardar estos dos valores.
- Del montaje, desconectar el PZT y conectar la resistencia variable, buscar un valor de resistencia que permita obtener un valor de ganancia que sea igual o se aproxime al valor obtenido anteriormente, este será el valor de la resistencia de resonancia.
- Ocasionar daño en el PZT, y realizar de nuevo los procesos anteriores, obtenido la frecuencia y resistencia de resonancia.
- Organizar los valores en una tabla, si se presentan cambios concluir.

Si se presentan cambios en los parámetros, esto solo permite concluir que se puede detectar los daños en el PZT mas no asegura clasificarlos. El procedimiento fue automatizado mediante un macro en el PicoScope.

### 3. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

El proceso del proyecto de grado consta de tres etapas como lo indica la Figura 5.

**Figura 5. Diagrama del desarrollo del proyecto.**



La primera etapa consta de utilizar la instrumentación disponible en el laboratorio de la sede UIS en Guatiguará, para el registro de señales piezoeléctricas y las variaciones de temperatura y el montaje para la medición de los parámetros asociados a la impedancia del PZT, en la segunda etapa se presentan los escenarios para la evaluación del estado de los PZT ante daños en un rango de temperatura estimado, y por último en la tercera etapa se realiza el análisis de resultados mediante la identificación de variaciones en los índices de daño y la comparación con los índices de detección de defectos; además el análisis incluye los resultados obtenidos por el proceso de impedancia. A continuación se detalla cada etapa de la metodología empleada.

### 3.1 INSTRUMENTACIÓN

A continuación se detalla la instrumentación presente en el laboratorio desarrollada por investigadores de los grupos de investigación CEMOS (UIS, Colombia) y CoDALab (UPC, España), utilizado para la detección de defectos en una tubería de acero carbono, con variación de temperatura y el algoritmo utilizado para el análisis de los defectos.

- **Estructura de pruebas**

Las pruebas de detección de defectos se realizaron sobre una estructura que corresponde a un loop de tubería acero-carbono con secciones de 1" de diámetro por 1 m de longitud, con bridas en sus extremos Figura 6. El loop cuenta con una válvula de bola ubicada en un extremo que permite controlar la presión de aire suministrado por un compresor, y registrada por un manómetro analógico ubicado en el otro extremo.

**Figura 6. Estructura para el análisis Piezo-Activo**



Además en el laboratorio se tiene un marco en ángulo de aluminio de 100 x 50 cm (ancho x alto) con el objetivo de facilitar el control de perturbaciones relacionadas con variaciones de temperatura ver Figura 6; sobre la estructura se encuentran instaladas cuatro lámparas de 250 [W] para emular la radiación de temperatura del sol sobre una tubería en exteriores. Asimismo, en la estructura de aluminio se adaptaron cuatro tornillos sobre una guía deslizante en los cuales se sujetaron plafones para la conexión de las lámparas. Los tornillos adaptados permiten ajustar la posición tanto horizontal como vertical de cada una de las lámparas y así controlar manualmente el punto de mayor incidencia de radiación de temperatura. Adicionalmente, el sistema de adquisición cuenta con un lazo de control PI para la regulación de la temperatura.

- **Sistema Piezo-Activo**

**Sistema Piezoeléctrico:** en la sección de tubería se colocan tres dispositivos piezoeléctricos, donde en la mitad de la tubería se coloca el pzt actuador y a sus extremos los PZT sensor.

**Sistema de amplificación:** Consisten en amplificadores de acondicionamiento de señal con 2 MHz de ancho de banda y alto rechazo al ruido polarizado en configuración inversora con ganancia variable por medio de una resistencia variable con tensiones de alimentación de  $\pm 12V$ .

**Sistema de registro:** Osciloscopio de marca PicoScope® de dos canales, con función de generador de onda arbitraria (AGW) que permite definir una onda como un vector de datos. La onda utilizada es de tipo *Burst* de frecuencia variable.

**Sistema de multiplexado:** Tarjeta multiplexora para seleccionar entre 8 canales de registros. La tarjeta multiplexora es la que se encarga de alternar los canales

para que el proceso de registro de datos sea eficiente. En este caso sólo se utilizaron 2 de los ocho canales.

**Sistema de adquisición:** Tarjeta DAQ National Instruments® que se encarga de generar los pulsos digitales que controlan la tarjeta multiplexora.

**Interfaz de recolección:** Se cuenta con un programa en MATLAB® para la automatización de la adquisición de datos, el cual permite configurar los parámetros de cada uno de los sistemas involucrados en el proceso de registro (DAQ, tarjeta multiplexora, frecuencia de muestreo, configuración de los PZT, etc.). Los datos recolectados son organizados en archivos de texto (formato *txt*) en carpetas que corresponden a cada uno de los estados de la estructura en estudio (sin daño – daños), y permite organizar la matriz de casos de acuerdo al número de defectos considerados en la estructura. Asimismo, mediante la interfaz de registro es posible aplicar algoritmos de pre-procesamiento como estimación de correlación cruzada y filtrada (eliminación de tendencias, ruido de 60 Hz y ruidos de baja/alta frecuencia).

### 3.2 CASOS DE ESTUDIO

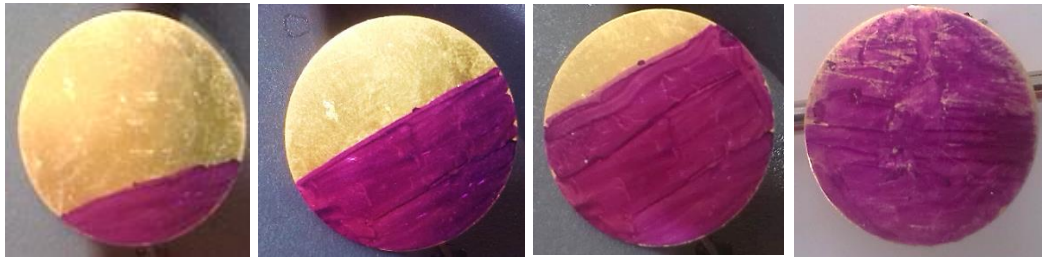
En esta sección se presentan los estados de daños que se analizaron a los PZT como lo son el desacople, la desconexión, grietas y pérdida cerámica y a los cuales se les aplicaron la variación de temperatura ambiente de 27°C a 50°C para cada escenario, teniendo en cuenta que la tubería en la que se encuentran los PZT no presenta ningún defecto.

### 3.2.1 Fallas en PZT

- **Problemas de conexión y desacople**

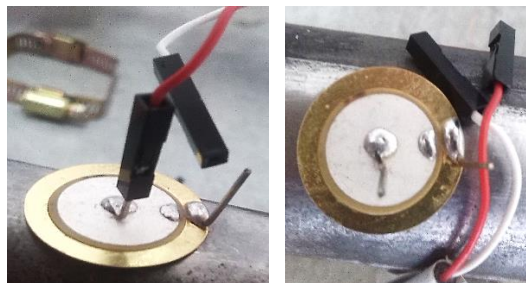
Comprenden los cambios en la condición de unión o degradación de las propiedades mecánicas/eléctricas de los transductores piezoeléctricos y que podrían causar identificación de daños en la estructura falsos.

**Figura 7. Áreas de desacople**



En la Figura 7 se observa las 4 áreas (color morado) de desacople que se aplicaran para el estudio del PZT. Se tiene un PZT con un diámetro de aproximadamente 2 cm. El desacople inicia con 0.5 cm del PZT, aumentando el diámetro cada 0.5 cm hasta no tener el PZT unido a la estructura; el desacople consiste en dejar sin pegante el área de color morado antes de adherir el PZT a la estructura. Se realizó de esta forma para obtener un mejor control del nivel de desacople.

**Figura 8. Desconexión del cable de tierra y total del PZT con el sistema de registro de datos.**

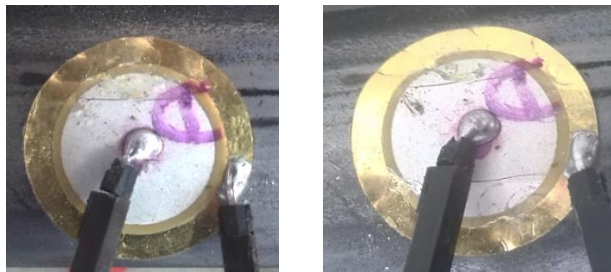


En la Figura 8 se muestran otro tipo de falla que se basa en la desconexión de los cables del PZT con el sistema de registro de datos, donde se tiene dos situaciones, la primera consiste desconectar el cable de tierra del PZT y la segunda cuando el PZT queda totalmente sin cables que lo conecten con el sistema de registro.

- **Grietas y pérdida de cerámica en el PZT**

Las cerámicas piezoeléctricas son frágiles y susceptibles a la formación de grietas en todas las escalas, lo que provoca discontinuidades geométricas, eléctricas, térmicas y mecánicas.

**Figura 9. Una y dos grietas sobre la cerámica PZT**



En la Figura 9 se presenta el PZT con alteraciones en la cerámica las cuales se deben a la generación de grietas (dos en este caso), de forma manual como una situación que se puede presentar cuando el diámetro del PZT supera el ancho de la tubería y recibe un golpe de terceros., Para el presente trabajo se consideraron dos tipos de agrietamiento: perpendicular y paralelo al largo de la tubería.

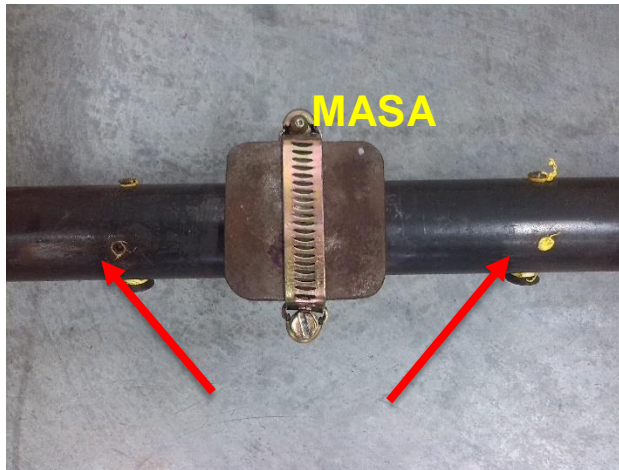
**Figura 10. Graficas de los niveles de pérdida en la cerámica**



En la Figura 10, se observan las áreas de pérdida de cerámica en el PZT que se causaron para el estudio, donde se comenzó con retirar de forma manual la cerámica de las grietas antes mencionadas. Se tuvieron cuatro niveles de pérdida, hasta quedar solo con contacto de soldadura. Esta falla es común en condiciones operacionales donde es posible que el PZT sea degradado completamente.

**3.2.2 Daños en la estructura** Para los defectos en la estructura se registró los datos de la agregación de una masa y fuga con presión de aire a los cuales se les realizó el proceso estadístico PCA, y de sus índices se obtuvo el promedio y la desviación estándar, para comparar estos datos con los obtenidos de los daños en el PZT de la sección 4.2.1 y determinar si se pueden diferenciar en el proceso de monitorización. Todo el proceso se realizó a una temperatura ambiente constante de 27°C.

**Figura 11. Defectos en la estructura, masa y fuga.**



En el laboratorio se tiene un loop de tubería al cual es posible causar fugas mediante la manipulación de pernos, ya que un defecto tipo fuga no es reversible. Así, los agujeros permanecen sellados herméticamente por medio de los pernos roscados y facilitan la generación de fugas graduales. Además de generar fugas, es posible causar defectos tipo agregación de masa en la tubería. Para este fin, se utilizan dos acoples que encajan en el diámetro de la sección ver Figura 11.

## 4. RESULTADOS

Teniendo en cuenta los conceptos presentados en la sección 3, los dispositivos PZT son sensibles a daños y a variaciones de operación, generando cambios en sus propiedades características como la piezoelectricidad, la amplitud de voltaje y la frecuencia de trabajo. En este trabajo de grado se realizó un estudio individual y grupal de los daños y perturbaciones en los PZT con una variación de temperatura ambiente asociada. El análisis individual de los daños se llevó a cabo con la observación de la variación de los índices estadísticos utilizados en la identificación de defectos en la estructura (ver anexos A y B) y el análisis grupal mediante el promedio y la desviación estándar de los índices estadísticos. El estudio de los daños en el PZT se efectúa mediante la variación de índices PCA, donde el sistema de detección de daños permite o no reconocer el estado del PZT dependiendo del valor de los índices obtenidos. Las pruebas se realizaron además en diferentes referencias de PZT para detectar daños mediante el análisis de los cambios de los parámetros asociados a la impedancia como lo son la frecuencia y resistencia de resonancia.

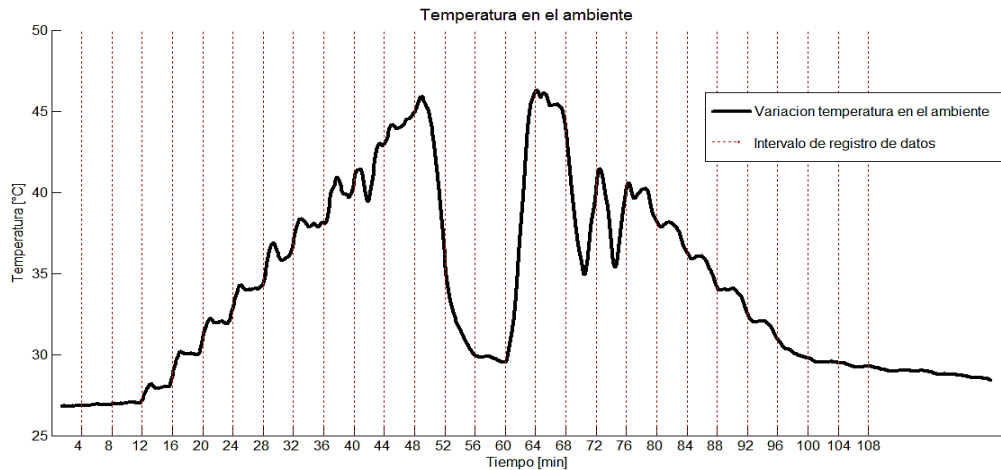
A continuación se describen los casos de estudio para determinar los efectos de daños en PZT.

### **4.1 ESCENARIO 1: COMPORTAMIENTO ANTE TEMPERATURA VARIABLE DE LOS PZT SIN NINGÚN DAÑO.**

La siguiente información muestra la distribución de los datos que se toman de los pzts sin ningún daño ante una variación de temperatura programada.

En la Figura 12 se muestra la variación de temperatura en el ambiente durante el experimento, donde cada 4 minutos cambiaba la temperatura del ambiente y durante este intervalo de tiempo se registraba un dato del pzt sensor, en total se registraron 27 datos.

**Figura 12. Variación de temperatura ambiente dentro del rango de 27°C a 50°C.**



El algoritmo con los datos del experimento muestran el comportamiento del PZT ante cambios controlados de temperatura. En cada uno de los 27 datos obtenidos se registraron 100 señales piezoeléctricas, con lo que se construyó el modelo base correlacionando la señal sensada y la señal de actuación. Mediante PCA se seleccionaron los datos más relevantes para ser agregados al modelo; durante el desarrollo del experimento los datos sin daños registrados fueron proyectados sobre el modelo creado, con lo que se pudo calcular los índices estadísticos  $T^2$  y Q-estadístico, con el objetivo de proceder a un estudio previo de la influencia de las variaciones de la temperatura en el PZT y comportamiento del algoritmo de detección. En las Figura 13, Figura 14 y la Figura 15 se exponen los resultados obtenidos en este experimento donde se tuvo en cuenta tres medidas de temperatura, las cuales fueron:

TLS: Temperatura medida con láser sobre el PZT.

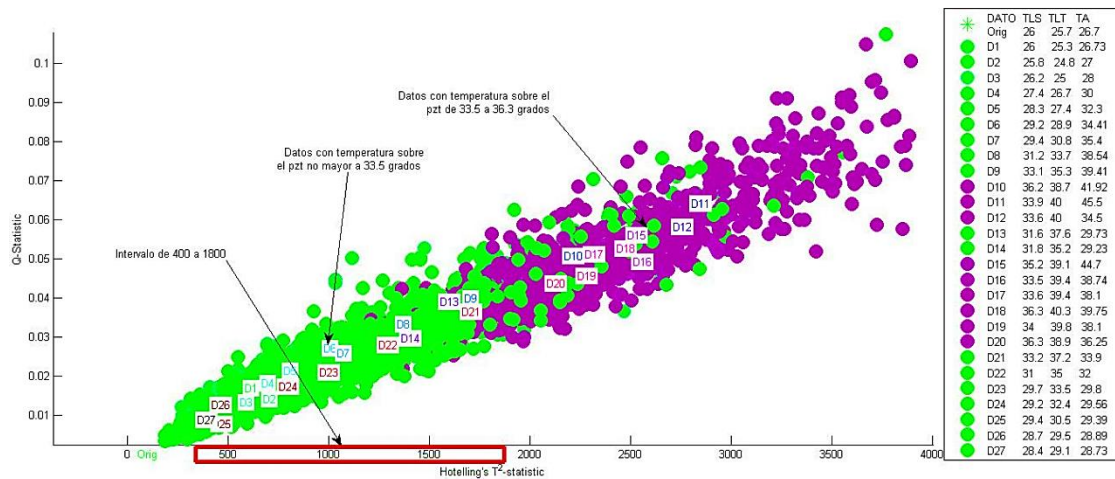
TLT: Temperatura medida con láser sobre la tubería.

TA: Temperatura ambiente.

En la Figura 13, se puede apreciar los cambios en los índices Q y  $T^2$  cuando se efectúan cambios en la temperatura a la que está expuesta el PZT, generalmente cada uno de los paquetes de datos están etiquetados y con color diferente, dependiendo del momento y el estado en que se encuentre el PZT o la estructura. (Orig: estructura y PZT sin daños).

En este caso, siguiendo los cambios de temperatura de la Figura 12, se pudo separar los datos en dos áreas, en las cuales la medida de temperatura que rige esta distribución fue la del láser sobre el PZT (TA), ya que con las otras medidas no se encuentra la suficiente concordancia para separar los datos.

**Figura 13. Grafica de índices Q vs  $T^2$  datos sin daños con variación de temperatura en el rango de 27°C a 50°C.**



Para obtener información a partir de los índices, se proyectaron los datos sobre el modelo base. Como se observa en la Figura 13 los datos proyectados sobre el

modelo base se distribuyen en clúster<sup>1</sup> según la temperatura a la que fueron registrados. Donde se manejan los datos de color verde con un valor de temperatura no mayor a 33.5 °C, y un rango de  $T^2$  de 400 a 1800 y los de morado con un rango de temperatura 33.5- 36.3 °C. Y un  $T^2$  de 2000 a 4000.

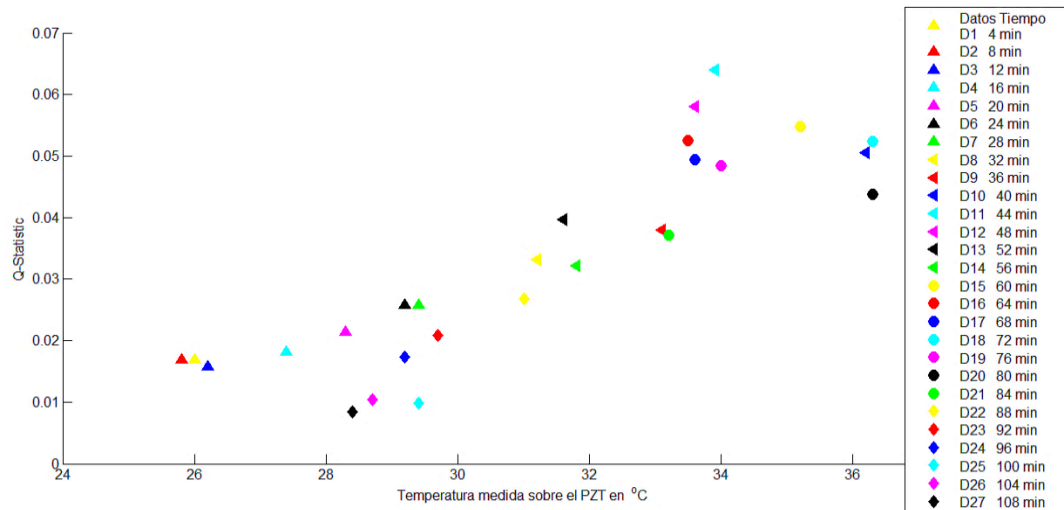
Como resultado de este experimento se tendrá en cuenta en las siguientes pruebas la medida de temperatura sobre el PZT como mejor respuesta ante temperatura variable y la medida de temperatura ambiente como parte del objetivo del proyecto.

En la Figura 14 y la Figura 15 se realiza el análisis individual de los promedios de las variables Q-estadística y  $T^2$  con respecto a la variación de la temperatura medida en el PZT teniendo en cuenta la evolución de los datos a través del tiempo, para observar el comportamiento o tendencia de estos índices bajo las condiciones dadas, este comportamiento sigue una pendiente positiva a medida que aumenta la temperatura y regresan por la misma pendiente a medida que disminuye la temperatura manteniendo los datos en una región determinada.

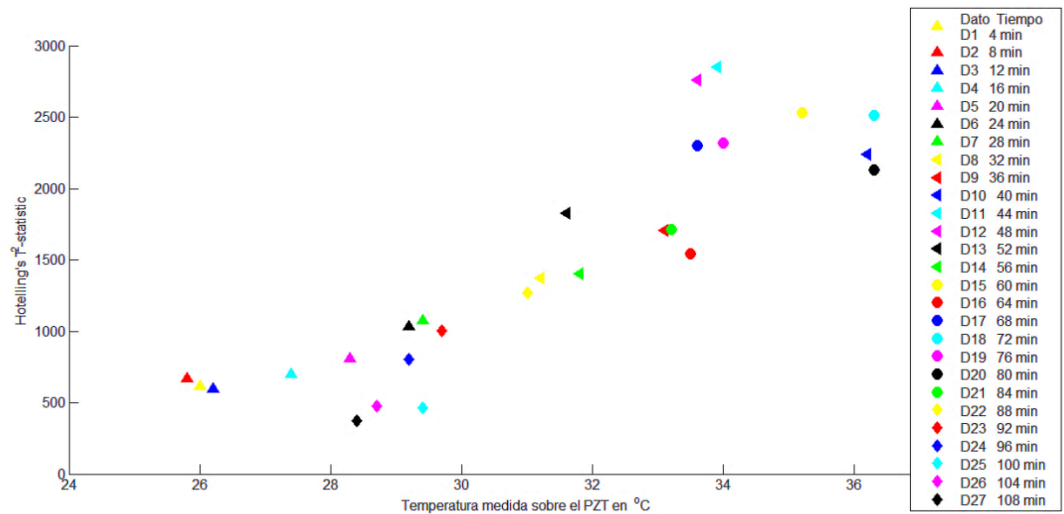
---

<sup>1</sup> Clúster: Agrupación de datos.

**Figura 14. Grafica del promedio de Q-estadístico en función de la variación de temperatura sobre el PZT**



**Figura 15. Grafica del promedio de T2 en función de la variación de temperatura sobre el PZT**

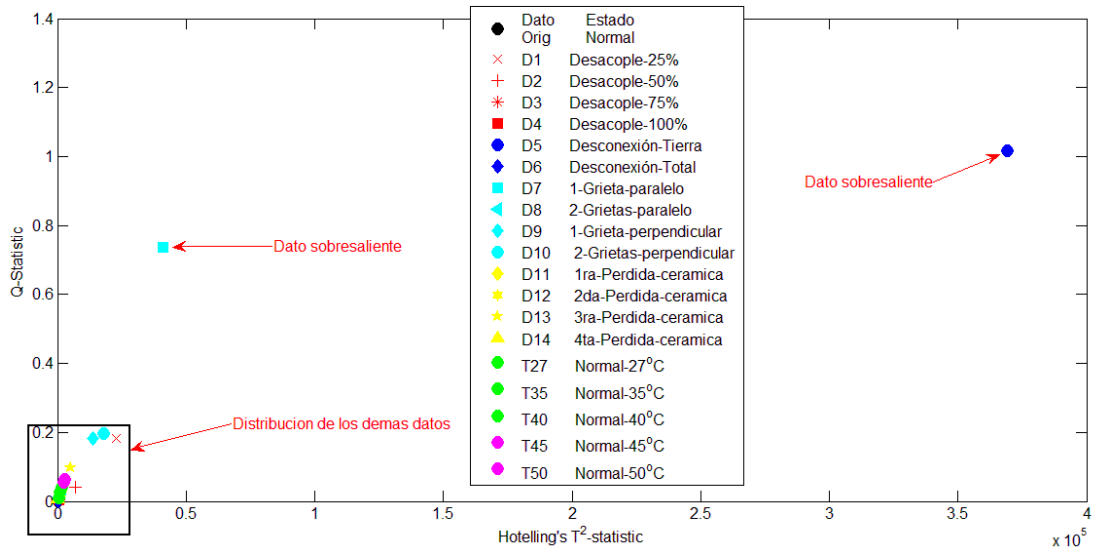


## 4.2 ESCENARIO 2: EFECTOS DE DESACOPLE, DESCONEXIÓN, GRIETAS Y PERDIDA DE CERÁMICA A TEMPERATURA AMBIENTE DE 27°C.

En esta sección se estudiarán el promedio y la desviación estándar de los resultados obtenidos por los efectos que causan los daños de desacople, desconexión, grietas y pérdida de cerámica a temperatura ambiente de 27°C, teniendo en cuenta que el lugar de estudio de los casos es un laboratorio con una temperatura ambiente continua al nivel de 27°C.

### PROMEDIOS

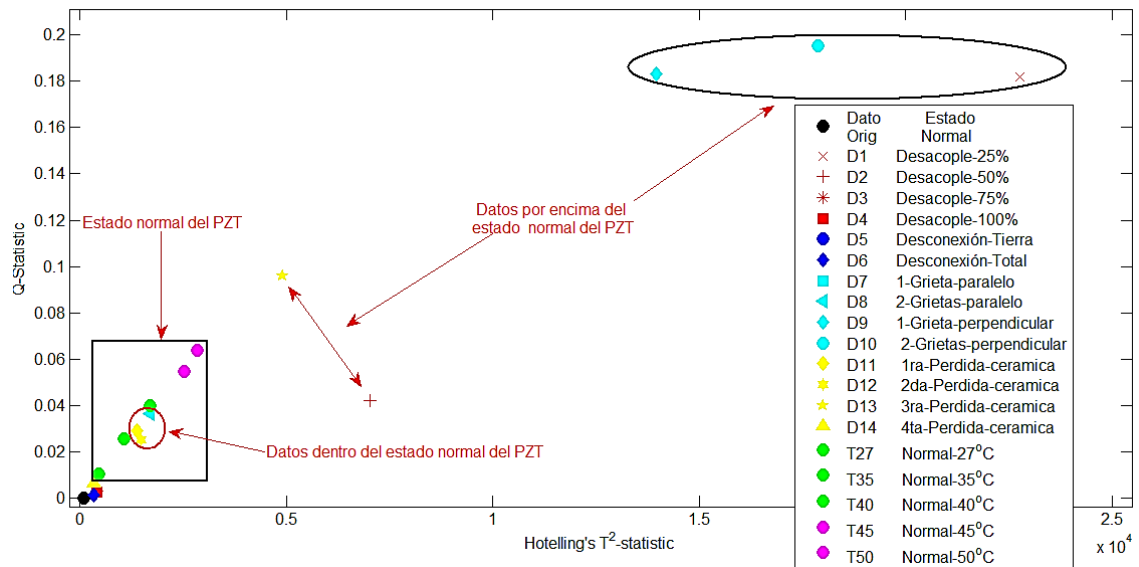
**Figura 16. Promedios de los índices Q vs  $T^2$  de los efectos ocasionados por los daños en el PZT**



En la Figura 16, se realiza la identificación de los daños ocasionados en el PZT más específicamente el promedio de los índices Q vs  $T^2$ , donde se puede revisar cada daño por separado con su distribución de clúster en el anexo A.

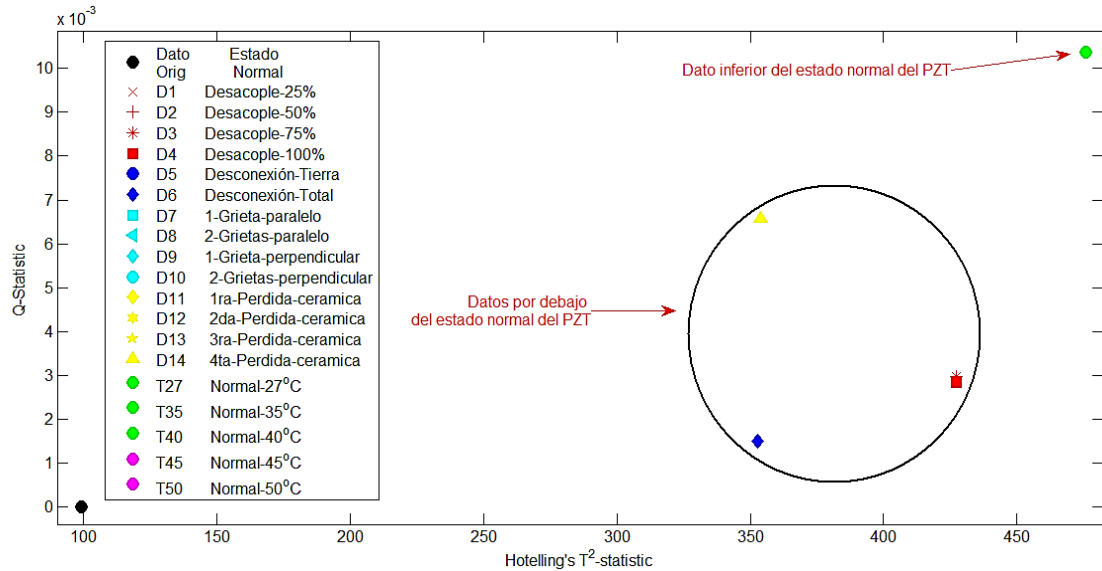
En esta figura se puede ver dos valores que sobresalen de los demás promedios, pertenecientes a los daños de una grieta en paralelo y la desconexión de la tierra en el PZT, este último dato por sus altos índices de Q y  $T^2$  se podría determinar como un daño definido, ya que ningún otro efecto estudiado se acerca a unos índices con estos valores.

**Figura 17. Promedios de los índices Q vs  $T^2$  de los efectos ocasionados por los daños en el PZT (acercamiento de los demás datos)**



En la Figura 17 se tiene la distribución de los demás promedios obtenidos, donde se define un área de los promedios en la cual el PZT está sin daños y con una variación de temperatura antes definida (ver Figura 15) esto para facilitar la identificación de los daños; por encima de esta área se tienen índices que me indican la detección de unos daños pero no la especificación de los mismos, también se puede observar que dentro del área asignada se tienen datos de daños que no se pueden identificar como daños, en el anexo A se realiza un análisis individual de estos datos.

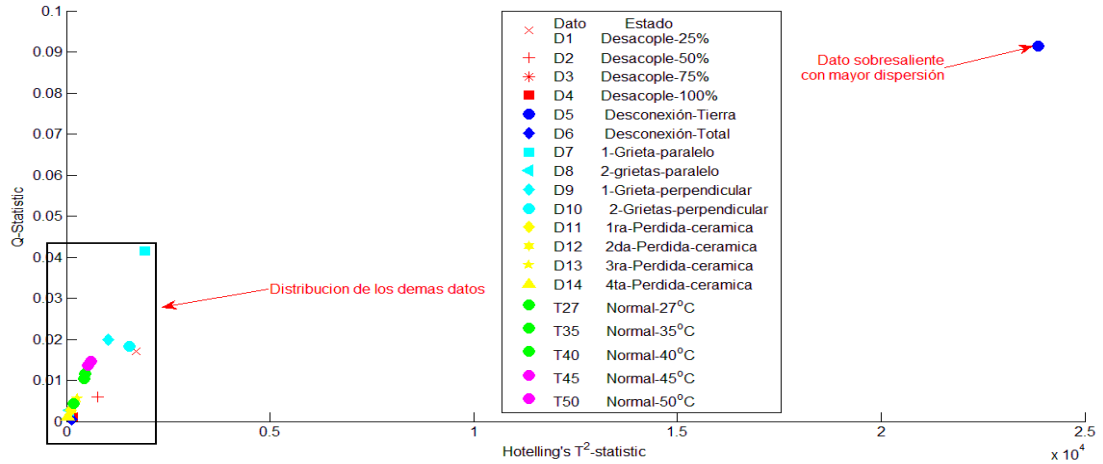
**Figura 18. Promedios de los índices Q vs T<sup>2</sup> de los efectos ocasionados por los daños en el PZT (datos por debajo del área de acción normal)**



En la Figura 18 se tienen los datos que se ubicaron por debajo del área asignada en la Figura 17, estos datos por sus bajos índices de Q y T<sup>2</sup> estadísticos pertenecientes a daños como desacople del 75 y 100 por ciento, desconexión y destrucción total del PZT, se podrían determinar cómo daños definidos ya que ningún de los otros efectos estudiados arrojan índices con estos valores.

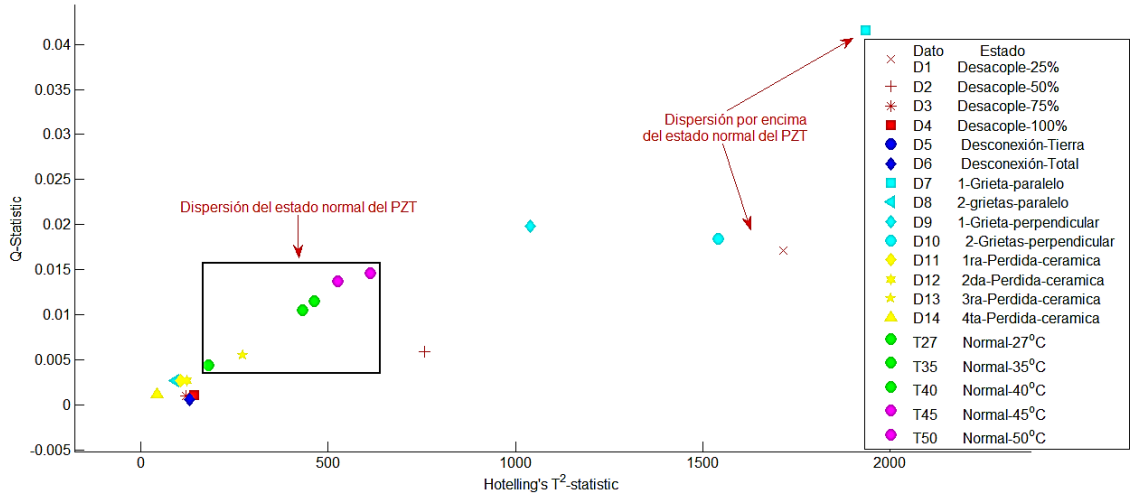
## DESVIACIÓN ESTÁNDAR

Figura 19. Desviación estándar de los índices Q vs  $T^2$  de los efectos ocasionados por los daños en el PZT



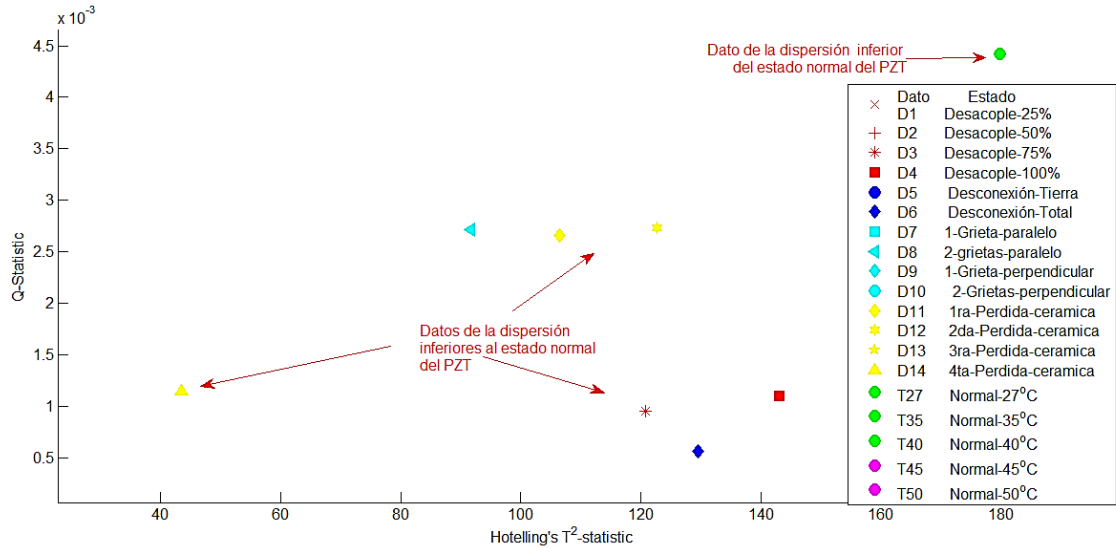
En la Figura 19 se tienen los datos de la variación esperada con respecto al promedio de los daños calculados, donde se tiene que el daños con mayor dispersión pertenece al daño de la desconexión de la tierra, se entiende que a mayor dispersión se tiene una alta probabilidad de tender a el error de confundirse con los demás datos, pero en este caso el promedio de este daño se encuentra en unos índices suficientemente lejos de los demás datos superando el valor de la dispersión que presenta evitando así confundirse con los demás datos identificándose como un daño distinguible.

**Figura 20. Desviación estándar de los índices Q vs T2 de los efectos ocasionados por los daños en el PZT (acercamiento de los demás datos)**



En la Figura 20 se muestran las demás medidas de dispersión, donde los datos que están por encima del estado normal del PZT como el daño grieta en paralelo maneja un grado de dispersión alto pero su promedio es lejano a los otros datos evitando que se confunda con estos permitiendo ser un daño distinguible de los demás; los daños 2-grieta perpendicular y desacople del 25%, tienen grados de dispersión cercano entre ellos, y como el promedio de estos datos no se ubican tan separados se presenta el caso de tender al error de confundirse los uno de los otros, haciendo que no se pueda distinguir que tipo de daño es en el PZT; también tiende a confundirse con estos datos el daño 1-grieta perpendicular que aunque este dentro del grado de dispersión del estado normal del PZT la media de este daño también se halla cerca a la media de los daños anteriores; siguiendo este orden de ideas los daños desacople 50% y 3era perdida de cerámica aunque tienen sus grados de dispersión dentro de los del estado normal del PZT sus medias se encuentran muy juntas tendiéndose a el error de confundirse estos dos daños, pero al mismo tiempo se encuentran separados de los demás daños teniendo la posibilidad de etiquetarlos como un grupo de daños.

**Figura 21. Desviación estándar de los índices Q vs T2 de los efectos ocasionados por los daños en el PZT (datos por debajo del área de acción normal)**

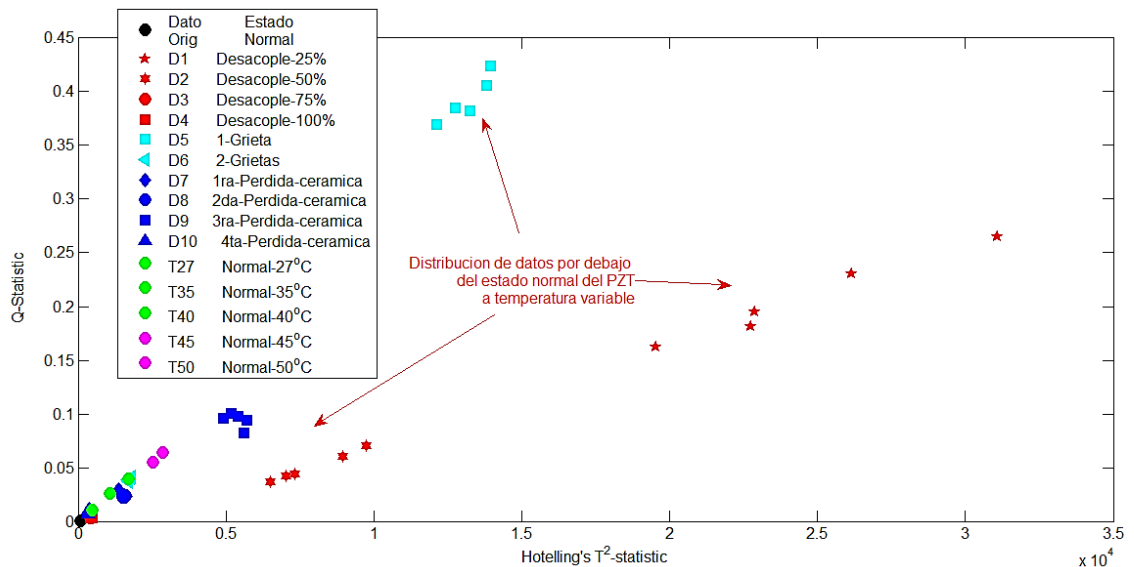


En la Figura 21 se tienen los datos con el grado de dispersión más bajos, indicando que estos datos tienen la menor posibilidad de llegar a confundirse entre los demás datos, aunque también se debe de tener en cuenta la ubicación del promedio de los datos para poder distinguir los daños, dicho esto los daños desconexión y pérdida de cerámica total, desacople del 75 y 100 por ciento se identifican como un grupo de daños y no como daños individuales en sí; los daños 1era y 2da pérdida de cerámica y 2-grieta en paralelo tienen grados de dispersión bajos, pero su promedio se ubica dentro del área de acción normal del PZT, haciendo que estos daños no se puedan detectar; el daño 3ra pérdida de cerámica tiene un grado de dispersión bajo y además su promedio se ubica distante de otros datos, catalogándolo como un daño que se puede distinguir de los demás daños.

### 4.3 ESCENARIO 3: EFECTOS DE DESACOPLE, DESCONEXIÓN, GRIETAS Y PERDIDA DE CERAMICA A UNA VARIACION DE TEMPERATURA AMBIENTE DE 27°C A 50°C.

En esta sección se estudiarán el promedio y la desviación estándar de los resultados obtenidos por los efectos que causan los daños de desacople, grietas y pérdida de cerámica a temperatura ambiente variable de 27°C a 50°C, con la idea de que la estructura está ubicada al aire libre en donde la temperatura es variable.

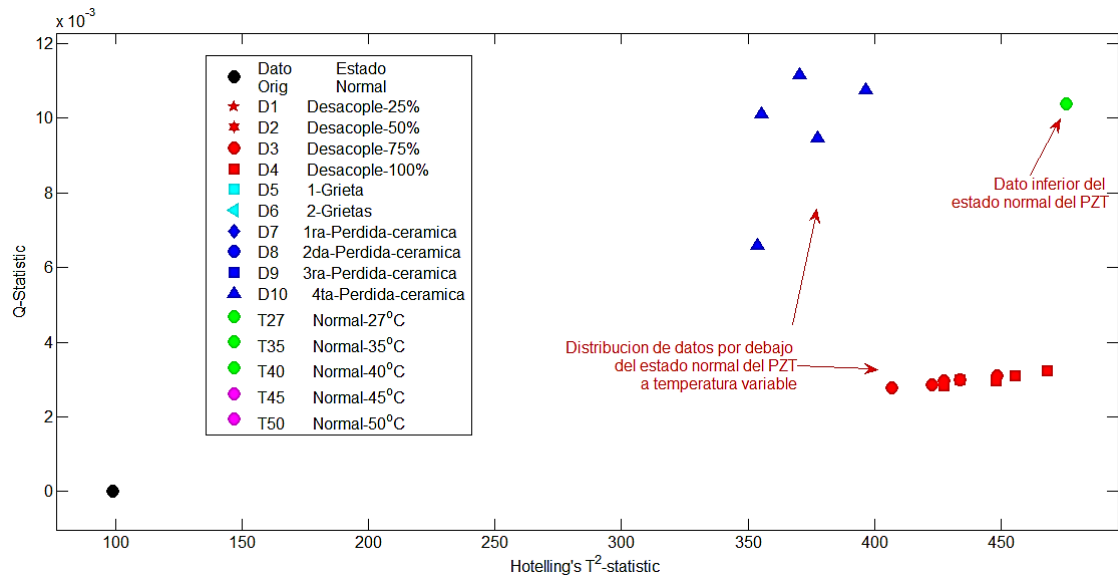
**Figura 22. Promedios de los índices Q vs  $T^2$  de los efectos ocasionados por los daños en el PZT a temperatura ambiente variante**



En la Figura 22 se grafican los promedios de la variación de temperatura ambiente de los daños, en esta figura como en la sección anterior se delimito una pequeña área en la que el PZT actúa sin daños a ciertas temperaturas para facilitar la detección de daños, en la figura se tiene datos por encima de esta área lo que indica la detección de daños, se puede apreciar que dependiendo del daño se obtienen determinados grupos de datos, en estos grupos se presente cierta distribución de los datos dependiendo de la temperatura en la que fueron tomados,

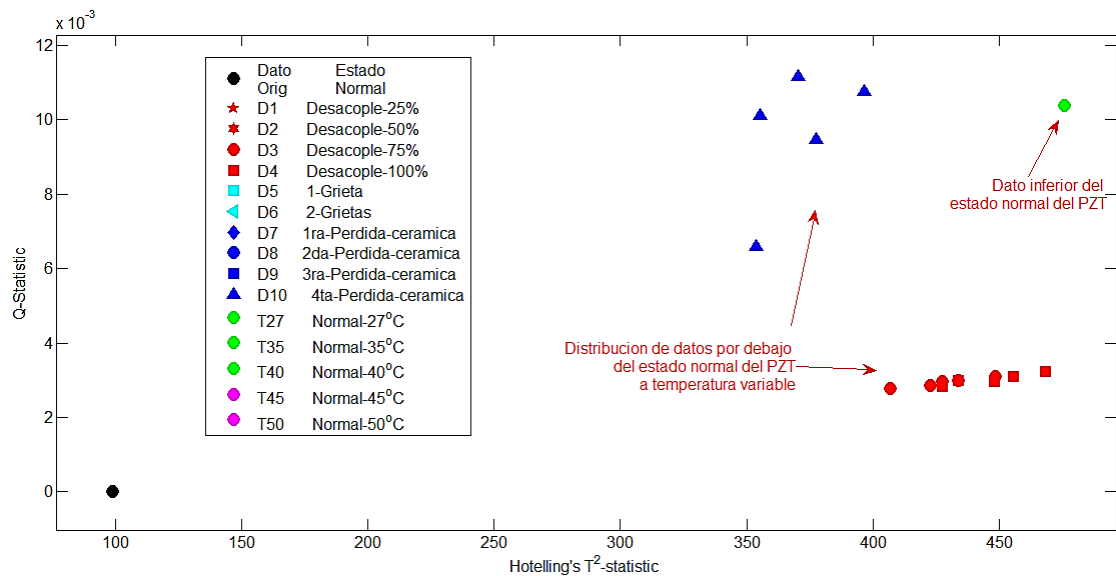
siendo los datos de desacople del 25 y 50 por ciento los más dispersos entre ellos con lo que se puede decir que son los más afectados por la variación de la temperatura ambiente, ya que en los demás datos (ver Figuras 23 y 24) se aprecia que se mantienen bien agrupados dando a entender que la variación de temperatura no afecta el resultado del efecto de los demás daños en el PZT, la distribución completa de los índices  $QvsT^2$  de cada daño se puede apreciar en el anexo B.

**Figura 23. Promedios de los índices Q vs  $T^2$  de los efectos ocasionados por los daños en el PZT a temperatura ambiente variable (acercamiento de los demás datos)**



En la Figura 23 se presentan los promedios de la variación de temperatura ambiente de los daños que no se pueden detectar gracias a que estos datos caen dentro del área de acción normal del PZT, pero de igual forma que en la gráfica anterior la variación de temperatura no presenta cambios a los efectos de los daños y estos se mantiene agrupados entre ellos.

**Figura 24. Promedios de los índices Q vs  $T^2$  de los efectos ocasionados por los daños en el PZT a temperatura ambiente variable (datos por debajo del área de acción normal)**

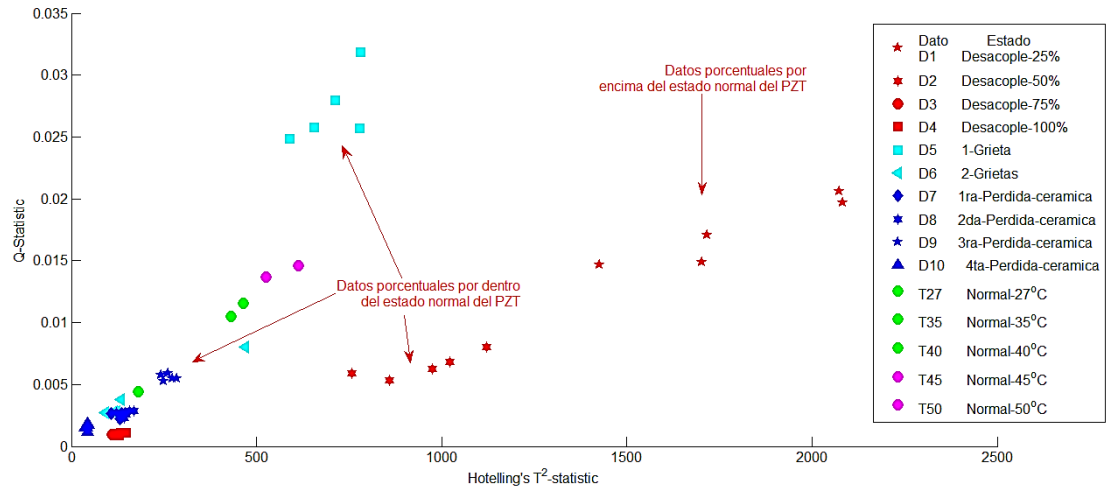


En la Figura 24 se presentan los promedios de la variación de temperatura ambiente de los daños que están por debajo de la acción normal del PZT, en la sección anterior estos datos ya se definieron y se puede observar que la variación de temperatura no representan ningún cambio.

En esta sección no se presentó el promedio de la variación de temperatura de los daños de desconexión, ya que se esperaba que la variación de temperatura presentara cambios sobre la cerámica o el acople del PZT y no de la conexión que tuviera.

## DESVIACIÓN ESTÁNDAR

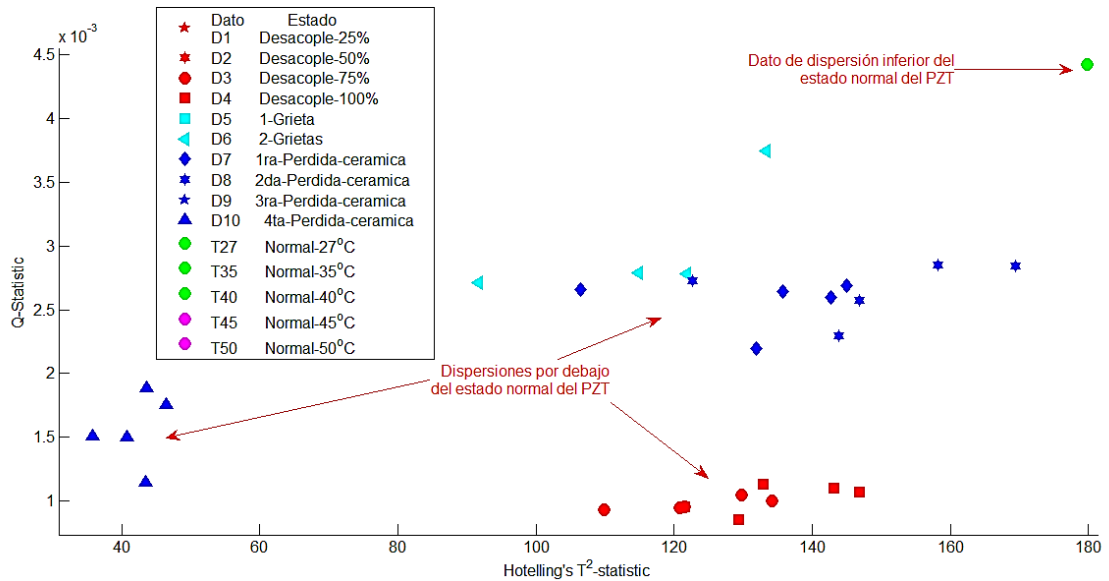
**Figura 25. Desviación estándar de los índices Q vs  $T^2$  de los efectos ocasionados por los daños en el PZT a temperatura ambiente variante**



En la Figura 25 y Figura 26 se muestran los datos de la variación esperada con respecto al promedio de los daños calculados a temperatura ambiente variante, los grados de dispersión de la variación de la temperatura de cada daño se encuentran ubicados en una zona específica dependiendo del daño al igual que su promedio, lo que indica que no se presenta ninguna variación en la respuesta dada por los daños y determina que la variación de la temperatura no afecta los impactos ocasionados por los daños del PZT.

Por último se llevan a cabo los mismos análisis de los resultados de desviación estándar realizados en la sección 5.2.

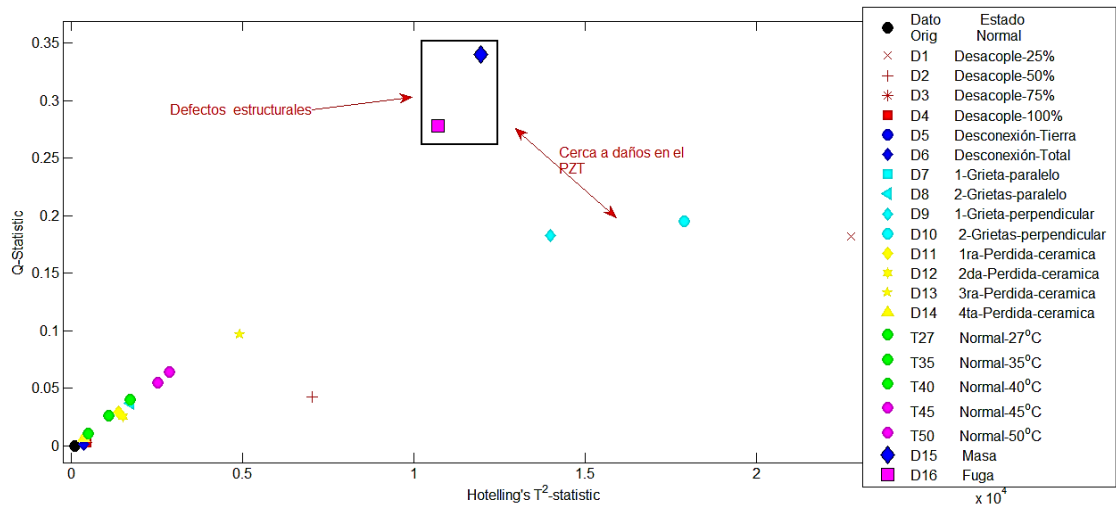
**Figura 26. Desviación estándar de los índices Q vs  $T^2$  de los efectos ocasionados por los daños en el PZT a temperatura ambiente variable (acercamiento de los demás datos)**



#### 4.4 ESCENARIO 4: AGREGACIÓN DE DEFECTOS ESTRUCTURALES MASA Y FUGA A LOS DAÑOS DEL PZT.

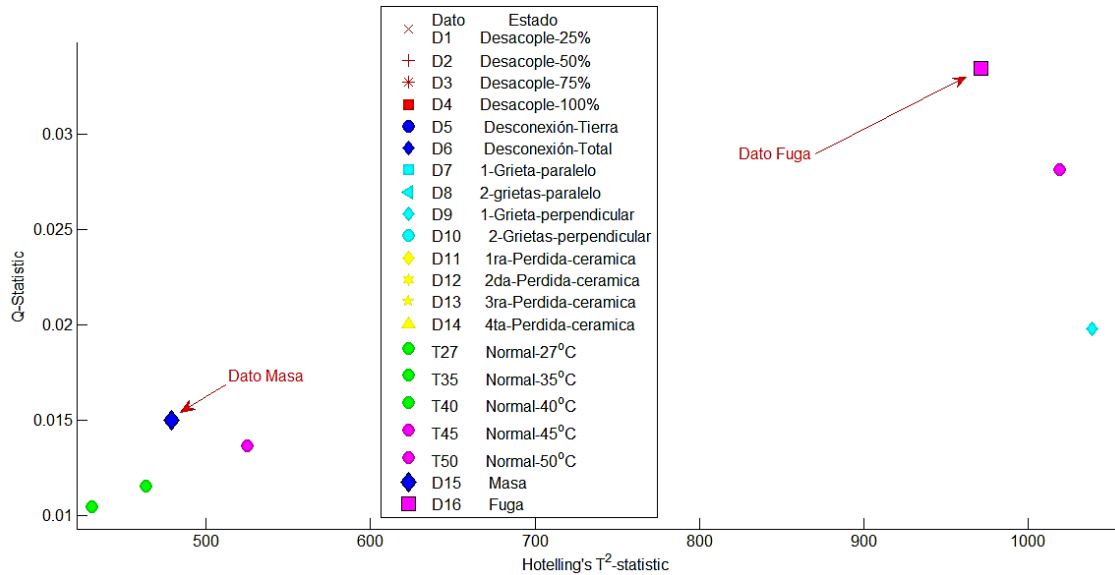
En esta sección se estudiarán el promedio y la desviación estándar de los resultados obtenidos por los efectos que causan los daños de desacople, desconexión, grietas y pérdida de cerámica a temperatura ambiente de 27°C, junto con los defectos estructurales masa y agregación de masa para realizar un análisis comparativo.

**Figura 27. Promedios de los índices Q vs  $T^2$  de los efectos ocasionados por los daños en el PZT y los defectos estructurales masa y fuga**



En la Figura 27 se observa que se detectan los defectos de masa y fuga, ya que sus promedios se encuentran por fuera del área de acción normal del PZT, pero al mismo tiempo se encuentran cerca uno del otro y dependiendo de su dispersión se podrían catalogar no como daños individuales sino como un grupo de daños, además solo tienden a estar cerca del área de unos pocos daños del PZT, es decir se pueden detectar los defectos estructurales y diferenciar de la mayoría de los daños del PZT.

**Figura 28. Desviación estándar de los índices Q vs  $T^2$  de los efectos ocasionados por los daños en el PZT y los defectos estructurales masa y fuga**



En la Figura 28 se observa que la dispersión de datos es mayor en el defecto de fuga haciendo que tienda al error de confundirse con otros datos especialmente con el defecto de masa y a la no diferenciación del mismo, por otro lado el defecto de masa tiene poca dispersión de datos lo cual evita que se confunda con los demás datos, además su promedio se encuentra alejado de la mayoría de promedios obtenidos, logrando la posibilidad de que se pueda realizar la detección de este defecto, pero no se descarta que se pueda confundir con algún tipo de daño en el PZT.

#### **4.5 ESCENARIO 5: MÉTODO DE LA IMPEDANCIA PARA DETECTAR DAÑOS EN EL PZT**

En esta sección se mostraran los resultados de haber ocasionado grietas y de destruir la cerámica de diferentes referencias de PZT, donde se analizaran los

cambios obtenidos en la frecuencia y resistencia de resonancia las cuales se relacionan con los parámetros eléctricos del PZT.

**Tabla 1. Datos obtenidos de los daños en el PZT mediante el método de impedancia**

Ref.	Diámetro [cm]	Estado	Frecuencia Resonancia [KHz]	Resistencia Medida [ $\Omega$ ]	Resistencia Teórica [ $\Omega$ ]	%Error Resistencia
27EE35	2	Normal	106	87	81,27	7,051
27EE35	2	Grieta	100	42	38,86	8,080
		Destrucción				
27EE35	2	Cerámica	***	28	38,23	26,759
24EE45	1,3	Normal	136	446	413,79	7,784
24EE45	1,3	Grieta	131	273	235,26	16,042
		Destrucción				
24EE45	1,3	Cerámica	***	198	162,30	21,996
20EE65	1,3	Normal	133	258	235,37	9,615
20EE65	1,3	Grieta	109	74	66,26	11,681
		Destrucción				
20EE65	1,3	Cerámica	***	113	81,27	39,043
Chinos	0,5	Normal	169	218	185,53	17,501
Chinos	0,5	Grieta	187	250	202,80	23,274
		Destrucción				
Chinos	0,5	Cerámica	***	1114	1351,60	17,579
Bucacento	2,8	Normal	102	164	141,58	15,836
Bucacento	2,8	Grieta	95	180	129,71	41,727
		Destrucción				
Bucacento	2,8	Cerámica	***	187	127,70	46,437

En la Tabla 1 se tiene diferentes referencias de PZT con sus respectivos diámetros de su parte posterior (ver anexo C para los demás parámetros de los PZT), a los cuales se les aplico el proceso descrito en la sección 4.2.3, se puede evidenciar los cambios que se presentan en los valores de frecuencia y resistencia asociados a los parámetros eléctricos del PZT cuando se expone a un daño.

En la tabla se nota una disminución del punto de la frecuencia de resonancia, indicando que al realizar el daño se está afectando o disminuyendo su parte capacitiva, según la literatura, adicionalmente también se muestra una disminución de la resistencia de resonancia consecuentemente esto indica una disminución de voltaje en el punto de resonancia.

Al destruir la cerámica del PZT este pierde su característica de piezoelectricidad y no resuena a altos valores de frecuencia y se comporta como una resistencia sin ningún valor capacitivo.

Adicionalmente se calculó una resistencia teórica ya que el circuito en resonancia se tienen dos resistencia en serie, basta realizar un divisor de voltaje y despejar la resistencia requerida, esto para fines de evitar hacer el cambio manual del PZT por una resistencia variable hasta encontrar el valor requerido, donde se calculó el porcentaje de error de las dos medidas de resistencia, siendo en algunos casos lo suficientemente bajo para aceptar el valor teórico de resistencia o por lo menos realizar una aproximación para identificarlo con mayor fluidez con la resistencia variable.

#### 4.6 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS TIPOS DE DAÑOS

**Tabla 2. Influencia de daños**

<b>Experimento</b>	<b># Experimentos</b>	<b>Zona Normal</b>	<b>Zona Gris</b>	<b>% Incidencia</b>
Masa	20	Fuera	Dentro	60
Fuga	20	Fuera	Dentro	70
1-Nivel-Desacople	20	Fuera	Dentro	75
2-Nivel-Desacople	20	Fuera	Dentro	70
3-Nivel-desacople	20	Fuera	Fuera	100

<b>Experimento</b>	<b># Experimentos</b>	<b>Zona Normal</b>	<b>Zona Gris</b>	<b>% Incidencia</b>
4-Nivel-desacople	20	Fuera	Fuera	100
Sin-Tierra	20	Fuera	Fuera	85
Sin-Fuente	20	Fuera	Fuera	100
1-Grieta	20	Fuera	Dentro	70
2-Grietas	20	Dentro	Fuera	70
1-Perdida	20	Dentro	Fuera	70
2-Perdida	20	Dentro	Fuera	70
3-Perdida	20	Fuera	Dentro	70
4-Perdida	20	Fuera	Fuera	100

En la Tabla 2 se detalla la influencia de los daños en el algoritmo para la detección de defectos en estructuras, para determinar la influencia de un daño o de un defecto, se seleccionó el dato a estudiar, se calculó la dispersión del dato con un porcentaje del 99.8%, suponiendo que el sistema sigue el comportamiento de la distribución estándar, se tomaron 20 datos del mismo experimento, a los cuales se calculó el promedio, y se analizó el total de incidencia de los promedios dentro del área de la dispersión del dato analizado, calculando así su porcentaje de incidencia. Se determina una zona gris en la cual los datos que inciden en esta área se pueden detectar pero no identificar. Los datos que están por fuera de la zona gris y la zona normal, es un daño que se puede identificar. Los datos por dentro de la zona normal no se pueden detectar, pero estos daños no suceden sin un previo daño detectable, con lo que el sistema responde a la necesidad de generar una alarma ante una anomalía del sistema.

## 5. CONCLUSIONES

- En el presente trabajo de grado, se efectuó el estudio de los cambios en la respuesta del PZT considerando distintos tipos de fallas a diferentes valores de temperatura, sobre un algoritmo de detección de defectos en estructuras con índices PCA y *piezodiagnosis*; siendo los cambios de los valores de los índices PCA la base para la detección de los daños realizados.
- Al someter el PZT sin ningún tipo de falla a la variación de temperatura ambiente de 27°C a 50°C propuesta. Se pudieron establecer unos índices PCA que me indican el normal funcionamiento del PZT y los índices PCA fuera de esta área representan una perturbación del sistema, facilitando la detección de los daños. Para esto se realizó tres tomas de temperatura, la del ambiente, la de la estructura y la del PZT, teniendo como referencia la medida sobre el PZT por ser la de mejor distribución de los datos y la del ambiente como parte del objetivo planteado
- Se muestran que los daños de desconexión, desacople, y destrucción total de cerámica arrojan los mínimos índices PCA. Con valores por debajo del área normal de acción del PZT y cercanos a los datos de origen sin ningún daño. Esto es debido a que la onda transmitida y sensada en gran parte son iguales con amplitud cero.
- Se pueden destacar los índices PCA que se obtuvieron del daño desconexión de tierra como los datos que más difieren, con respecto a los datos de origen sin ningún daño, con un porcentaje de diferencia del 79.5%, permitiendo que se pueda detectar y clasificar de los demás daños.

- La mayoría de los daños ocasionados al PZT y los defectos de estructura (masa y fuga) se pudieron detectar. Con un porcentaje del 95.4% con respecto a la distribución estándar del daño más cercano a la zona normal del sistema. Aun así el sistema responde a las necesidades de la monitorización. Ya que solo se necesita un daño y no muchos de ellos para poder generar una alarma de la situación presente.
- La variación de temperatura ambiente programada a la cual fueron sometidos los diferentes tipos de daños, no afecto la respuesta de los datos obtenidos cuando el modelo base se realiza con un PZT sin daños; esto se debe a que los valores de temperatura que se manejaron no alcanzan los niveles que afectan de manera significativa al PZT que se encuentran en la literatura; y solo se ven los efectos de la variación de la temperatura cuando el modelo base se construye a partir de un PZT con el daño que se está analizando.
- Mediante la aproximación del método de impedancia utilizado en el presente proyecto de grado es posible detectar, pero no clasificar, daños ocasionados a diferentes referencias de PZT, relacionando los cambios en la frecuencia y resistencia de resonancia como los cambios de los parámetros eléctricos del PZT. Esto es debido a que las diferentes referencias de PZT tienen su frecuencia de resonancia ubicada en distintos puntos. Con lo que al generar un daño se obtendrá para cada referencia de PZT variaciones de resistencia y de frecuencia distintas, sin poder estimar una tendencia de los comportamientos de los daños. Para lograr la identificación de los daños se sugiere que se realice un trabajo detallado e individual de los daños para estimar un rango o una tendencia de sus efectos sobre el PZT.

## **6. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda encerrar la sección de tubería para garantizar un mayor control de la variación de temperatura ambiente.
- Se recomienda adquirir instrumentos que permitan realizar grietas o cortes más detallados o controlados en la cerámica, para realizar un profundo análisis de este daño y poderlo identificar en trabajos futuros.
- Se recomienda que la onda transmitida se distribuya a lo largo de toda la ventana de muestreo o que contenga la menor cantidad de ceros en sus niveles de voltaje. Esto se puede realizar ampliando en el programa del PicoScope la señal sin ceros, para que cubra toda la ventana de adquisición de datos.
- Adquirir un medidor de impedancias para facilitar los análisis de los daños causados en el PZT.
- Tomar cada daño como un trabajo individual de estudio y elaborar un proceso detallado, para realiza una posible identificación de los daños.

## **TRABAJOS FUTUROS**

- Estudiar los efectos de los daños en el PZT con unos niveles de temperatura mayor a los 50°C, si es posible a un punto cercano al valor de Curie. Ya que muchas veces el contenido que se transporta por la tubería tiene niveles de temperatura mayor a 50°C, para lo cual necesario saber el comportamiento de los PZT ante estas circunstancias.

- Agregar nuevas situaciones de daños o escenarios donde se afecte el funcionamiento del PZT, como por ejemplo ubicar la tubería un metro bajo tierra.
- Implementar el método de impedancia para analizar los daños del PZT sobre la estructura mediante un medidor de impedancias, realizar pruebas con defectos en la estructura, y hacer un análisis comparativo para determinar si se logra diferenciar los casos.
- Aumentar los niveles de voltaje de la onda utilizada para aumentar el desgaste de los PZT y analizar su vida útil.
- Aplicar métodos estadísticos como los K-vecinos para analizar la distribución de los índices PCA obtenidos por los procesos realizados.

## REFERENCIAS

- [1] G. Latorre and R. Mora, “Análisis estructural de tuberías de oleoductos abolladas por carga explosiva,” vol. 1, pp. 101–110, 1998.
- [2] E. Pais, “elpais.com.co,” 21-02-2016. [Online]. Available: <http://www.elpais.com.co/elpais/colombia/noticias/seis-muertos-y-30-heridos-en-estallido-oleoducto-en-risaralda>.
- [3] E. Castro Rodriguez, “Simulación de ondas elásticas en vigas y detección de daño mediante la transformada Wavelet. Tesis Doctoral.,” 2005.
- [4] M. Specialties, “Piezo Film Sensors Technical Manual,” Measurement, no. March, p. 57, 2006.
- [5] M. Sandeep and K. Sharman, “Feasibility of Using Ultrasonic Guided Waves for Under Water Pipe Inspection,” no. July, 2013.
- [6] Ecopetrol, “ecopetrol.com.co,” 21-04-2016. [Online]. Available: [http://www.ecopetrol.com.co/documentos/71702\\_ANEXO\\_B\\_ET\\_Dise%C3%B1o\\_de\\_Tuberia\\_E.pdf](http://www.ecopetrol.com.co/documentos/71702_ANEXO_B_ET_Dise%C3%B1o_de_Tuberia_E.pdf).
- [7] N. Técnica, “NTC,” 1996.
- [8] R. Villamizar, O. E. Perez, and J. C. Navarro, “Pipe Leak Detection based on Statistics from Principal Component Analysis.”
- [9] M. Ruiz, L. E. Mujica, X. Berjaga, and J. Rodellar, “Partial least

square/projection to latent structures (PLS) regression to estimate impact localization in structures,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 2, p. 025028, 2013.

- [10] F. G. Baptista and J. V. Filho, “A new impedance measurement system for PZT-based structural health monitoring,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 10, pp. 3602–3608, 2009.
- [11] H. a. Winston, F. Sun, and B. S. Annigeri, “Structural Health Monitoring With Piezoelectric Active Sensors,” *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 123, no. 2, p. 353, 2001.
- [12] D. a. Tibaduiza, M. a. Torres-Arredondo, L. E. Mujica, J. Rodellar, and C. P. Fritzen, “A study of two unsupervised data driven statistical methodologies for detecting and classifying damages in structural health monitoring,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 41, no. 1–2, pp. 467–484, 2013.
- [13] Ling Yu, Jun-hua Zhu, and Liu-jie Chen, “Parametric study on PCA-based algorithm for structural health monitoring,” *Progn. Heal. Manag. Conf. 2010. PHM '10*, pp. 1–6, 2010.
- [14] Y. M. O. D, “Monitoreo de salud estructural empleando filtros Kalman Monitoreo de salud estructural empleando filtros Kalman,” 2009.
- [15] D. Elettrotecnica and P. Milano, “Piezoelectric Sensors,” pp. 1241–1244, 1880.
- [16] A. Ledoux, “Theory of Piezoelectric Materials and Their Applications in Civil Engineering,” 2011.

- [17] A. Grane, "Análisis en componentes principales," II Semin. Capacit. docentes. ..., 1995.
- [18] R. Dunia, F. Systems, S. J. Qin, T. F. Edgar, and T. J. Mcavoy, "Identification of Faulty Sensors Using Principal Component Analysis," *Process Syst. Eng.*, vol. 42, no. 10, pp. 2707–2812, 1996.
- [19] J. Kullaa, "Detection , identification , and quantification of sensor fault," *Isma2010*, pp. 893–908, 2010.
- [20] L. Mujica, J. Rodellar, A. Fernandez, and A. Guemes, "Q-statistic and T2-statistic PCA-based measures for damage assessment in structures," *Struct. Heal. Monit.*, vol. 10, no. 5, pp. 539–553, 2011.
- [21] J. M. C. Verde, "Detección de Fallas usando Análisis de Componentes Principales Carac-," pp. 431–436, 2004.
- [22] K. Schubert, M. Christ, a S. Herrmann, and a Stieglitz, "Analytical and Experimental Investigation of Environmental Influences on Lamb Wave Propagation and Damping Measured with a Piezo-Based System," *6th Eur. Work. Struct. Heal. Monit.*, vol. 49, no. 0, pp. 1–9, 2012.
- [23] T. G. Overly, G. Park, K. M. Farinholt, and C. R. Farrar, "Piezoelectric active-sensor diagnostics and validation using instantaneous baseline data," *IEEE Sens. J.*, vol. 9, no. 11, pp. 1414–1421, 2009.
- [24] T. Y. Zhang and C. F. Gao, "Fracture behaviors of piezoelectric materials," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 41, no. 1–3, pp. 339–379, 2004.
- [25] I. P. Lipscomb, P. M. Weaver, J. Swingler, and J. W. McBride, "The effect of

relative humidity, temperature and electrical field on leakage currents in piezo-ceramic actuators under dc bias,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 151, no. 2, pp. 179–186, 2009.

- [26] S. J. Lee, H. Sohn, and J.-W. Hong, “Time Reversal Based Piezoelectric Transducer Self-diagnosis Under Varying Temperature,” *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 29, no. 2, pp. 75–91, 2010.
- [27] S. Klusacek, J. Fialka, and A. M. Samples, “An Experimental Study of Temperature Effect on Material Parameters of PZT Ceramic Ring Used in Knock Sensors,” pp. 874–879, 2013.
- [28] K. Worden, G. Kerschen, P. De Boe, and J.-C. Golinva, “Sensor validation and correction using auto-associative neural networks and principal component analysis,” *Proc. IMAC XXI*, 2003.
- [29] Y. U. Zhang, C. Bingham, M. Gallimore, Z. Yang, and J. Stewart, “Applied Sensor Fault Detection , Identification and Data Reconstruction Based on PCA and SOMNN for Industrial Systems,” pp. 2–7.
- [30] P. De Boe and J.-C. Golinval, “Principal Component Analysis of a Piezosensor Array for Damage Localization,” 2014.
- [31] P. Kielczyński, W. Pajewski, and M. Szalewski, “Piezoelectric sensors for investigations of microstructures,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 65, no. 1, pp. 13–18, 1998.
- [32] “Discos ceramicos piezoelectricos,” p. 4211.

- [33] O. B. Ib, "Sistema piezoelèctric d' energy harvesting per l'enllumenat d'evacuació d'emergència d'un edifici Oriol Barrufet Ibós 1," pp. 1–64.

## BIBLIOGRAFÍA

BAPTISTA F. G. and FILHO J. V., "A new impedance measurement system for PZT-based structural health monitoring," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 58, no. 10, pp. 3602–3608, 2009.

CASTRO RODRIGUEZ E., "Simulación de ondas elásticas en vigas y detección de daño mediante la transformada Wavelet. Tesis Doctoral.," 2005.

DE BOE P. and GOLINVAL J.-C., "Principal Component Analysis of a Piezosensor Array for Damage Localization," 2014.

Discos ceramicos piezoelectricos," p. 4211.

DUNIA R., SYSTEMS F., QIN S. J., T. F. Edgar, and T. J. Mcavoy, "Identification of Faulty Sensors Using Principal Component Analysis," Process Syst. Eng., vol. 42, no. 10, pp. 2707–2812, 1996.

E. PAIS, "elpais.com.co," 21-02-2016. [Online]. Available: <http://www.elpais.com.co/elpais/colombia/noticias/seis-muertos-y-30-heridos-en-estallido-oleoducto-en-risaralda>.

ECOPETROL, "ecopetrol.com.co," 21-04-2016. [Online]. Available: [http://www.ecopetrol.com.co/documentos/71702\\_ANEXO\\_B\\_ET\\_Dise%C3%B1o\\_de\\_Tuberia\\_E.pdf](http://www.ecopetrol.com.co/documentos/71702_ANEXO_B_ET_Dise%C3%B1o_de_Tuberia_E.pdf).

ELETTROTECNICA D. and P. MILANO, "Piezoelectric Sensors," pp. 1241–1244, 1880.

GRANE A., “Análisis en componentes principales,” II Semin. Capacit. docentes. ..., 1995.

IB O. B., “Sistema piezoelèctric d’ energy harvesting per l’enllumenat d’evacuació d’emergència d’un edifici Oriol Barrufet Ibós 1,” pp. 1–64.

KIELCZYŃSKI P., PAJEWSKI W., and SZALEWSKI M., “Piezoelectric sensors for investigations of microstructures,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 65, no. 1, pp. 13–18, 1998.

KLUSACEK S., FIALKA J., and SAMPLES A. M., “An Experimental Study of Temperature Effect on Material Parameters of PZT Ceramic Ring Used in Knock Sensors,” pp. 874–879, 2013.

KULLAA J., “Detection , identification , and quantification of sensor fault,” *Isma2010*, pp. 893–908, 2010.

LATORRE G. and MORA R., “Análisis estructural de tuberías de oleoductos abolladas por carga explosiva,” vol. 1, pp. 101–110, 1998.

LEDOUX A., “Theory of Piezoelectric Materials and Their Applications in Civil Engineering,” 2011.

LEE S. J., SOHN H., and HONG J.-W., “Time Reversal Based Piezoelectric Transducer Self-diagnosis Under Varying Temperature,” *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 29, no. 2, pp. 75–91, 2010.

LING YU, JUN-HUA ZHU, and LIU-JIE CHEN, “Parametric study on PCA-based algorithm for structural health monitoring,” *Progn. Heal. Manag. Conf. 2010. PHM ’10*, pp. 1–6, 2010.

LIPSCOMB I. P., WEAVER P. M., SWINGLER J., and McBRIDE J. W., "The effect of relative humidity, temperature and electrical field on leakage currents in piezo-ceramic actuators under dc bias," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 151, no. 2, pp. 179–186, 2009.

MUJICA L., RODELLAR J., FERNANDEZ A., and GUEMES A., "Q-statistic and T2-statistic PCA-based measures for damage assessment in structures," *Struct. Heal. Monit.*, vol. 10, no. 5, pp. 539–553, 2011.

N. Técnica, "NTC," 1996.

OVERLY T. G., PARK G., FARINHOLT K. M., and FARRAR C. R., "Piezoelectric active-sensor diagnostics and validation using instantaneous baseline data," *IEEE Sens. J.*, vol. 9, no. 11, pp. 1414–1421, 2009.

RUIZ M., MUJICA L. E., BERJAGA X., and RODELLAR J., "Partial least square/projection to latent structures (PLS) regression to estimate impact localization in structures," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 2, p. 025028, 2013.

SANDEEP M. and SHARMAN K., "Feasibility of Using Ultrasonic Guided Waves for Under Water Pipe Inspection," no. July, 2013.

SCHUBERT K., CHRIST M., HERRMANN A S., and STIEGLITZ A, "Analytical and Experimental Investigation of Environmental Influences on Lamb Wave Propagation and Damping Measured with a Piezo-Based System," *6th Eur. Work. Struct. Heal. Monit.*, vol. 49, no. 0, pp. 1–9, 2012.

SPECIALTIES M., "Piezo Film Sensors Technical Manual," *Measurement*, no. March, p. 57, 2006.

TIBADUIZA D. A., TORRES-ARREDONDO M. A., MUJICA L. E., RODELLAR J., and FRITZEN C. P., "A study of two unsupervised data driven statistical methodologies for detecting and classifying damages in structural health monitoring," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 41, no. 1–2, pp. 467–484, 2013.

VERDE J. M. C., "Detección de Fallas usando Análisis de Componentes Principales Carac-," pp. 431–436, 2004.

VILLAMIZAR R., PEREZ O. E., and NAVARRO J. C., "Pipe Leak Detection based on Statistics from Principal Component Analysis."

WINSTON H. A., SUN F., and ANNIGERI B. S., "Structural Health Monitoring With Piezoelectric Active Sensors," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 123, no. 2, p. 353, 2001.

WORDEN K., KERSCHEN G., DE BOE P., and GOLINVA J.-C., "Sensor validation and correction using auto-associative neural networks and principal component analysis," *Proc. IMAC XXI*, 2003.

Y. M. O. D, "Monitoreo de salud estructural empleando filtros Kalman Monitoreo de salud estructural empleando filtros Kalman," 2009.

ZHANG T. Y. and GAO C. F., "Fracture behaviors of piezoelectric materials," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 41, no. 1–3, pp. 339–379, 2004.

ZHANG Y. U., BINGHAM C., GALLIMORE M., YANG Z., and STEWART J., "Applied Sensor Fault Detection , Identification and Data Reconstruction Based on PCA and SOMNN for Industrial Systems," pp. 2–7.

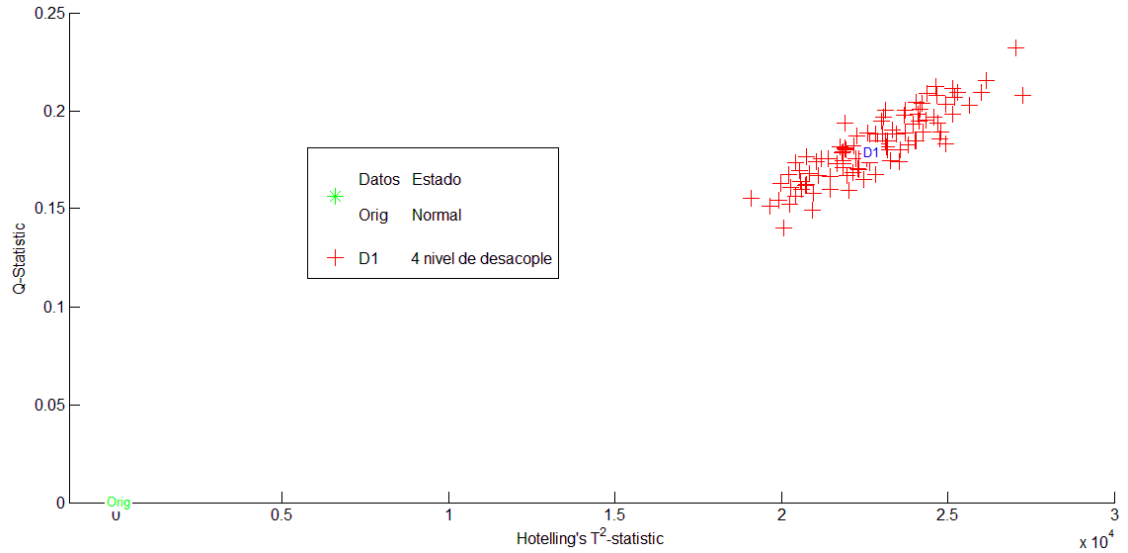
## ANEXOS

### **Anexo A: Efectos individuales de desacople, desconexión, grietas y pérdida de cerámica a temperatura ambiente DE 27°C.**

#### **Desacople**

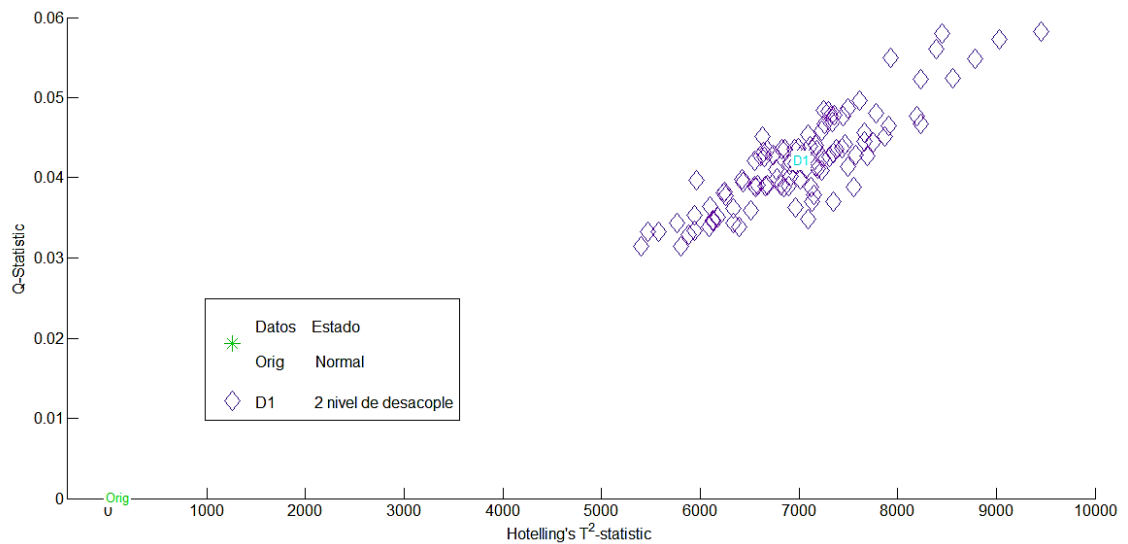
En esta sección se muestran los resultados después de generar cuatro diferentes estados o niveles de desacople entre la tubería y el PZT, estos niveles de desacople están dentro de 4 áreas correspondiente a una aproximación del 25, 50, 75 y 100 por ciento del área total de un PZT de diámetro de 2cm de su cara trasera. Se tomaron los datos de estas condiciones a temperatura ambiente de 27°C y se construyó el modelo base mediante PCA. Durante el desarrollo del experimento los datos registrados de los daños fueron proyectados sobre el modelo creado para cada caso, calculando los índices estadísticos de  $T^2$  Y Q-estadístico, con el fin de realizar una evaluación previa de la influencia que ocasiona los diferentes niveles de desacople del PZT con la estructura.

**Figura 29. Grafica de índices Q vs T<sup>2</sup> datos del primer nivel de desacople**



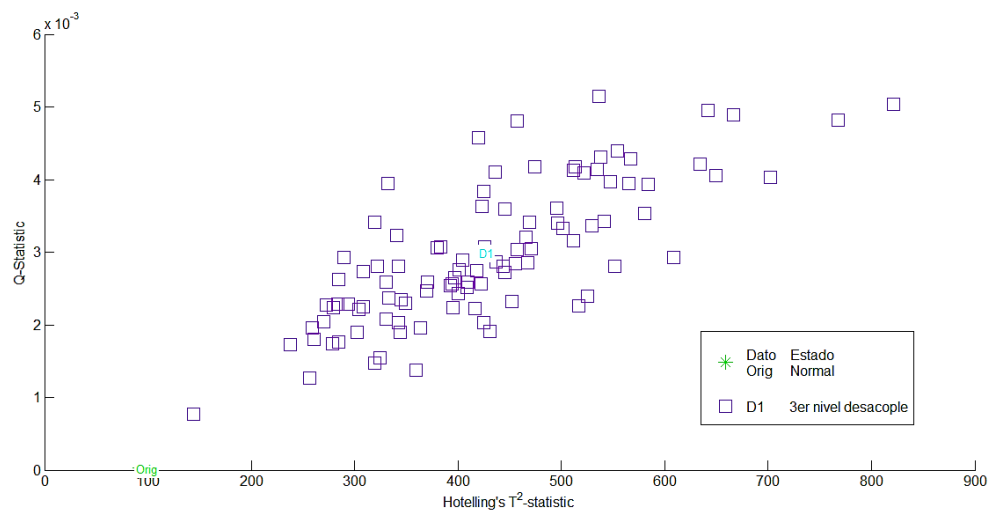
En la Figura 29 se observan los cambios en los índices Q y T<sup>2</sup> que genera el estado de desacople del primer nivel o del 25% del PZT con la estructura a una temperatura ambiente de 27°C, en este caso se puede observar que los clúster del efecto ocasionado por el desacople se sitúan bastante alejados de la zona de índices sin daños del sensor a temperatura ambiente de 27°C antes estudiados.

**Figura 30. Grafica de índices Q vs T<sup>2</sup> datos del segundo nivel de desacople**



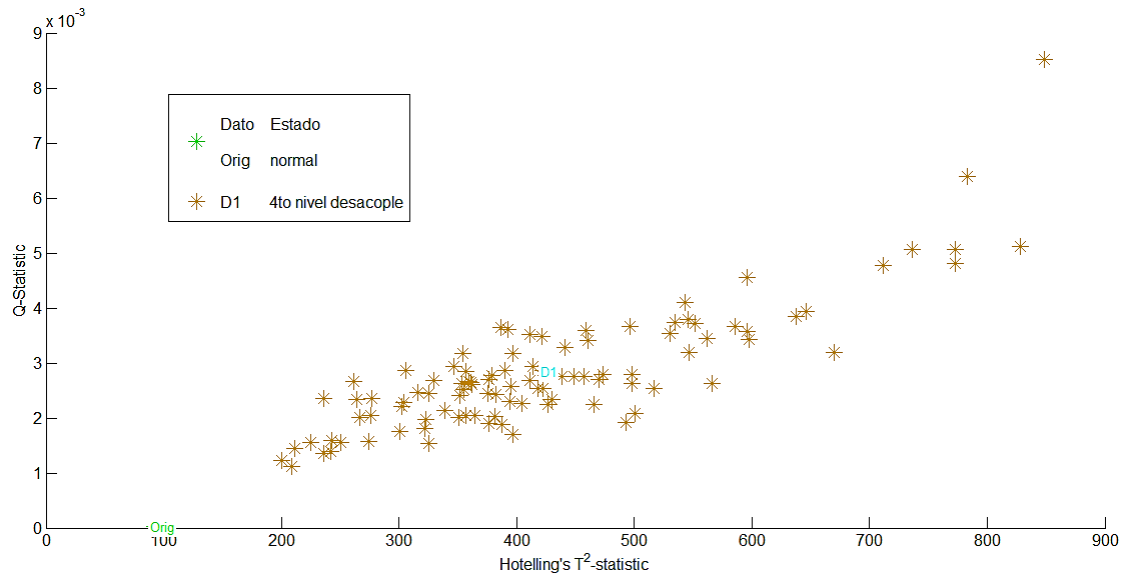
En la Figura 30 se observan los cambios en los índices Q y  $T^2$  que genera el estado de desacople del segundo nivel o del 50% del PZT con la estructura a una temperatura ambiente de 27°C, en este caso se puede observar que los clúster del efecto ocasionado por el desacople se sitúan cerca de la zona de índices sin daños del sensor a temperatura ambiente de 27°C antes estudiados, pero de todos modos se percibe la anomalía generada por este nivel de desacople.

**Figura 31. Grafica de índices Q vs  $T^2$  datos del tercer nivel de desacople**



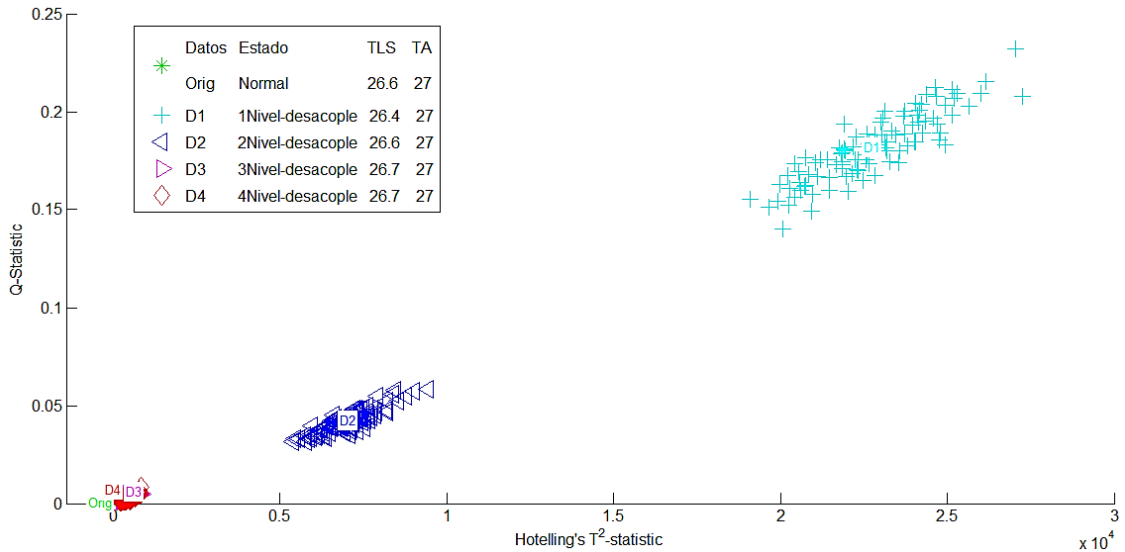
En la Figura 31 se observan los cambios en los índices Q y  $T^2$  que genera el estado de desacople del tercer nivel o del 75% del PZT con la estructura a una temperatura ambiente de 27°C, en este caso se puede observar que los clúster del efecto ocasionado por el desacople se sitúan por debajo de la zona de índices sin daños del sensor a temperatura ambiente de 27°C antes estudiados; a partir de este resultado un desacople de más del 50% con la estructura da unos índices que caen en una zona donde se puede declarar que el sensor esta desconectado o dejo de funcionar, esto se verá más adelante en las secciones 5.2.2 y 5.2.4.

**Figura 32. Grafica de índices Q vs  $T^2$  datos del cuarto nivel de desacople**



En la Figura 32 se observan los cambios en los índices Q y  $T^2$  que genera el estado de desacople del cuarto nivel o del 100% del PZT con la estructura a una temperatura ambiente de  $27^\circ\text{C}$ , en este caso se puede observar que los clúster del efecto ocasionado por el desacople se sitúan por debajo de la zona de índices sin daños del sensor a temperatura ambiente de  $27^\circ\text{C}$  antes estudiados, como en el caso anterior el PZT se puede declarar desconectado o inactivo.

**Figura 33. Grafica de índices Q vs T<sup>2</sup> datos de diferenciación de los cuatro niveles de desacople**



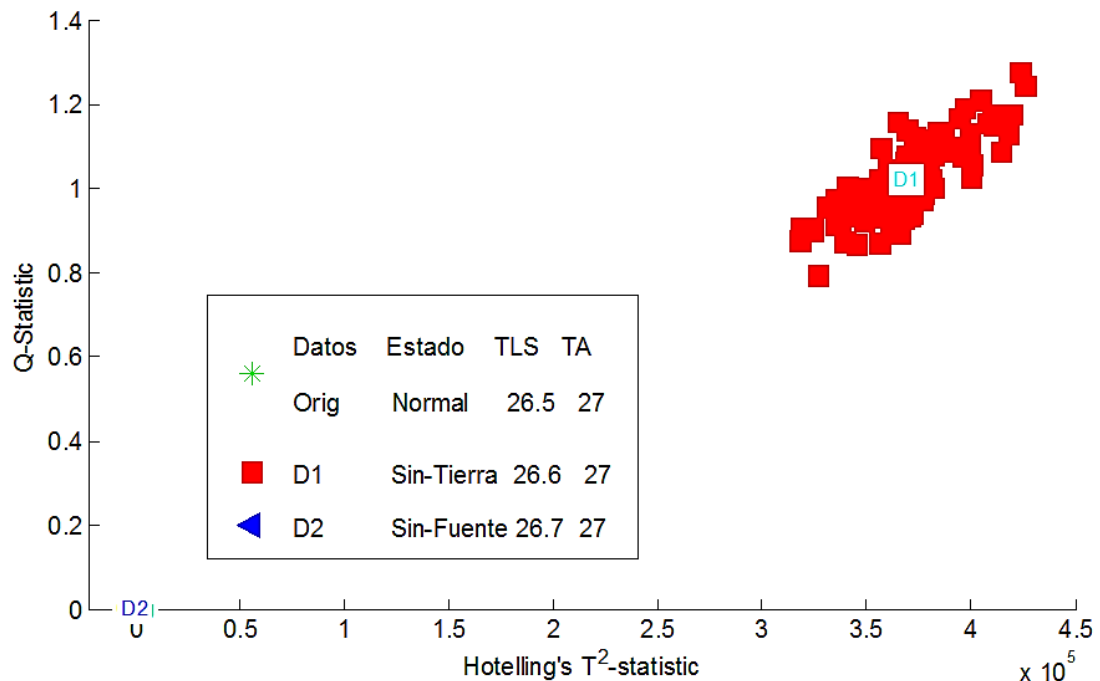
En la Figura 33 se observan los datos proyectados sobre el modelo base de los cuatro niveles de desacople estudiados, donde la distribución de los clúster muestra la diferencia de los efectos que produce cada nivel de desacople, ubicando los datos en rangos representativos, estando los datos de desacople de menos del 50% por encima de la zona normal de actuación del PZT a temperatura ambiente de 27°C, y los datos de desacople de más del 50% por debajo de esta zona.

### Desconexión

En esta parte se muestran los resultados después de alterar en dos condiciones la conexión del PZT con el sistema recolector de datos, estos dos estados son la pérdida de tierra y la desconexión completa con el sistema. Se tomaron los datos de estas dos condiciones a temperatura ambiente de 27°C y se construyó el modelo base mediante PCA. Durante el desarrollo del experimento los datos registrados de los daños fueron proyectados sobre el modelo creado, calculando

los índices estadísticos de  $T^2$  Y Q-estadístico, con el fin de realizar una evaluación previa de la influencia que ocasiona la mala conexión del PZT con el sistema.

**Figura 34. Grafica de Índices Q vs  $T^2$  datos con problemas de conexión al sistema.**



En la Figura 34 se pueden observar los cambios en los índices Q y  $T^2$  cuando se afecta el estado de conexión del PZT a una temperatura de ambiente de 27°C. En los índices se obtiene que los efectos de los dos estados que se le alteraron al PZT se ubican en rangos distantes uno de otro.

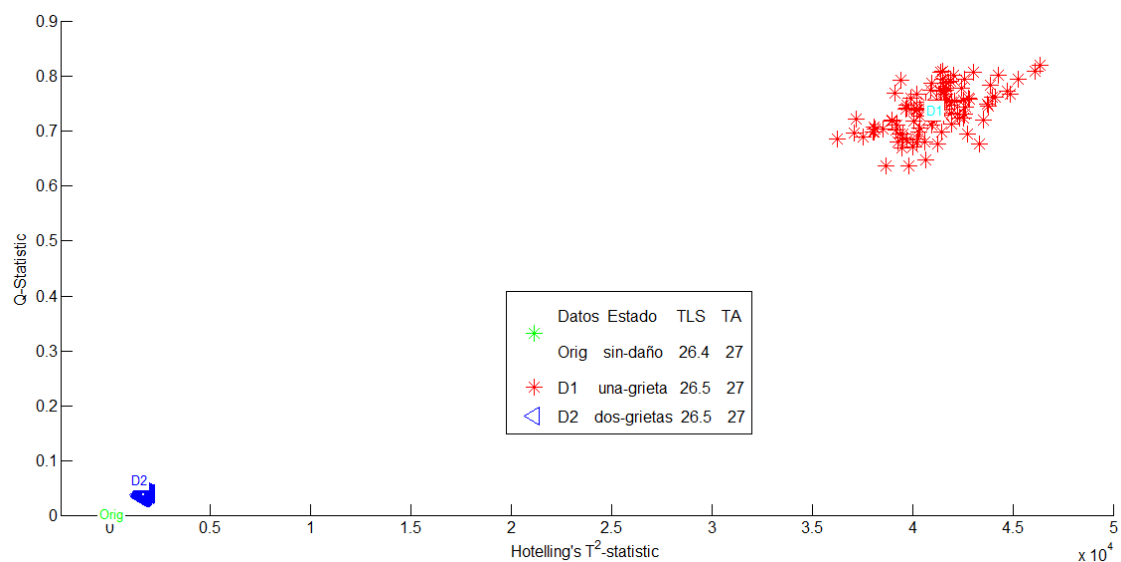
En la Figura 34 se observa los datos proyectados sobre el modelo base, donde la distribución de los clúster muestra una clara distancia que los separa, ubicando los datos en rangos representativos, estando los datos de la desconexión completa del PZT en índices por debajo de los datos sin daños del PZT con  $T^2$  menor a 500 y Q-estadístico menor a 0.004 y los datos de falta de tierra por

encima y bastante alejados de los datos sin daños, con  $T^2$  mayor a  $3 \times 10^5$  y Q-estadístico del orden de 1, siendo estas dos zonas las que me declaran una desconexión o pérdida de tierra en el sensor PZT.

## Grietas

En esta parte se muestran los resultados después de generar una y dos grietas a la cerámica del PZT en forma paralela y perpendicular al largo de la tubería, se tomaron los datos de estas condiciones a temperatura ambiente de  $27^\circ\text{C}$  y se construyó el modelo base mediante PCA. Durante el desarrollo del experimento los datos registrados de los daños fueron proyectados sobre el modelo creado, calculando los índices estadísticos de  $T^2$  Y Q-estadístico, con el fin de realizar una evaluación previa de la influencia que ocasionan estas grietas al PZT.

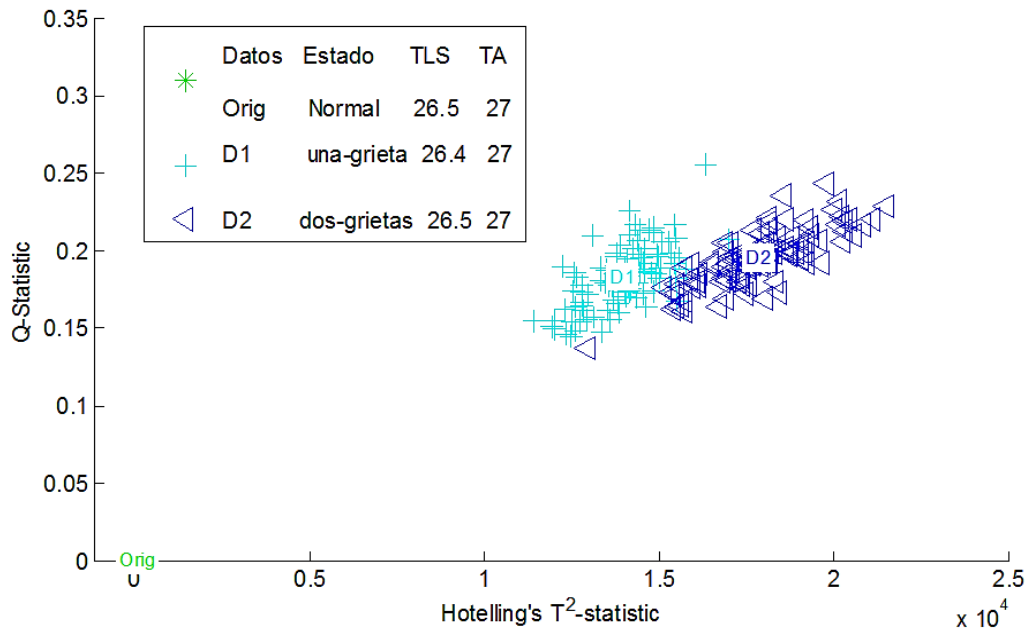
**Figura 35. Grafica de índices Q vs  $T^2$  datos con una y dos grietas en la cerámica PZT de forma paralela al largo de la tubería**



En la Figura 35 se observan los cambios que ocasionan las grietas en la cerámica cuando estas se generan de forma paralela al largo de la tubería, en este caso se

puede notar que los clúster del efecto ocasionado por la segunda grieta tienden a situarse en una zona donde regularmente se ubican índices sin daños del sensor a temperatura ambiente de 27°C antes estudiados, diferente al efecto de la primera grieta el cual los clúster se ubican fuera de esta zona, esto puede ocurrir que al generar la primera grieta en la cerámica se obtiene una área asimétrica de sensado de la onda transmitida (imagen de la izquierda de la Figura 9), pero cuando se genera la segunda grieta en la cerámica (imagen de la derecha de la Figura 9), se presenta un área más simétrica de sensado de la onda transmitida o en cualquier caso el área total de contacto con la estructura es el mismo que como si no tuviera grietas.

**Figura 36. Grafica de índices Q vs T2 datos con una y dos grietas en la cerámica PZT de forma perpendicular al largo de la tubería**



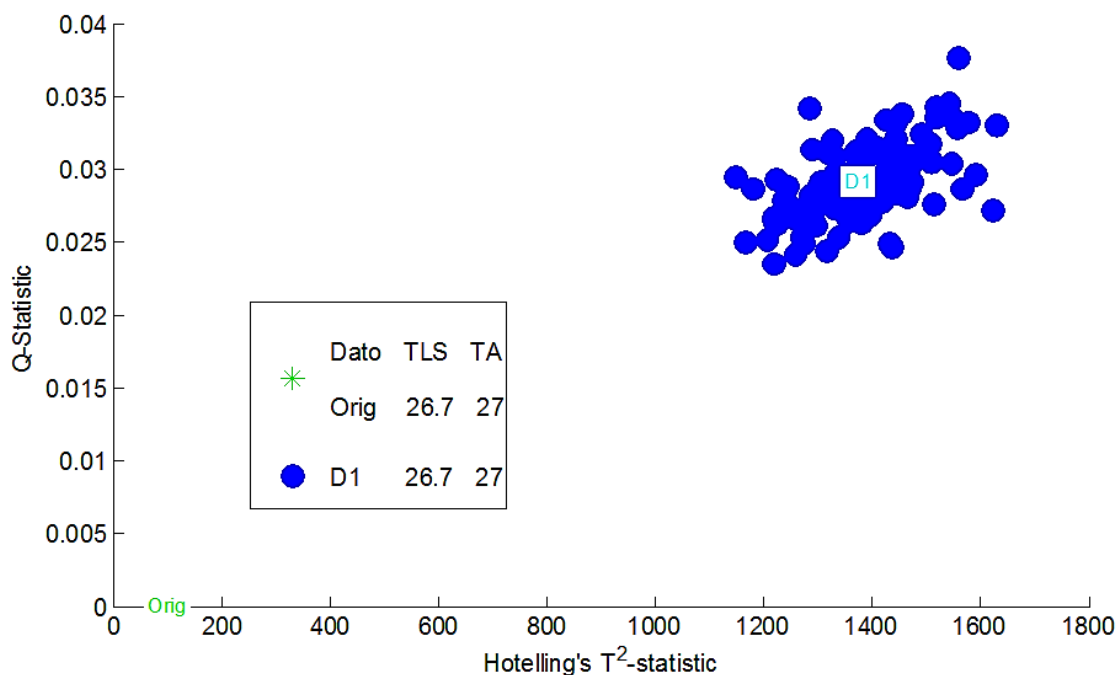
En la Figura 36 se observan los cambios que ocasionan las grietas en la cerámica cuando estas se generan de forma perpendicular al largo de la tubería, a diferencia del caso anterior al generarse las dos grietas perpendicularmente los índices del resultado de este proceso se ubicaron en una misma zona, y está a la

vez se ubica por fuera de la zona sin daños del sensor PZT, indicando que la onda transmitida es afectada por la forma en que es sensada por el PZT o por la nueva área de la cerámica, teniendo como resultado el mismo efecto si tuviera una o dos grietas de forma perpendicular.

### **Pérdida de cerámica**

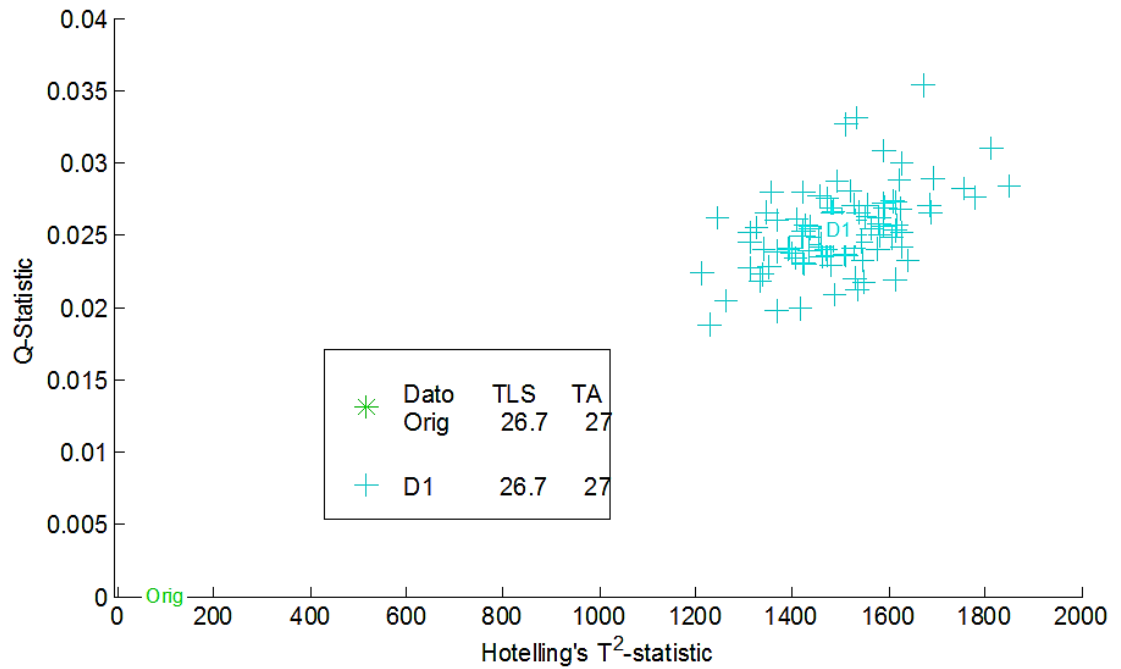
En esta sección se muestran los resultados después de generar cuatro diferentes estados o niveles de pérdida de cerámica en el PZT, se partirá en el estado anterior del PZT con dos grietas en paralelo con las que se comenzara a desprender la cerámica, luego una aproximación de pérdida de cerámica del 50 y 90 por ciento, se tomaron los datos de estas condiciones a temperatura ambiente de 27°C y se construyó el modelo base mediante PCA. Durante el desarrollo del experimento los datos registrados de los daños fueron proyectados sobre el modelo creado para cada caso, calculando los índices estadísticos de T2 Y Q-estadístico, con el fin de realizar una evaluación previa de la influencia que ocasiona los diferentes niveles de pérdida de cerámica del PZT.

**Figura 37. Grafica de índices Q vs T2 datos de pérdida de cerámica de la primera grieta**



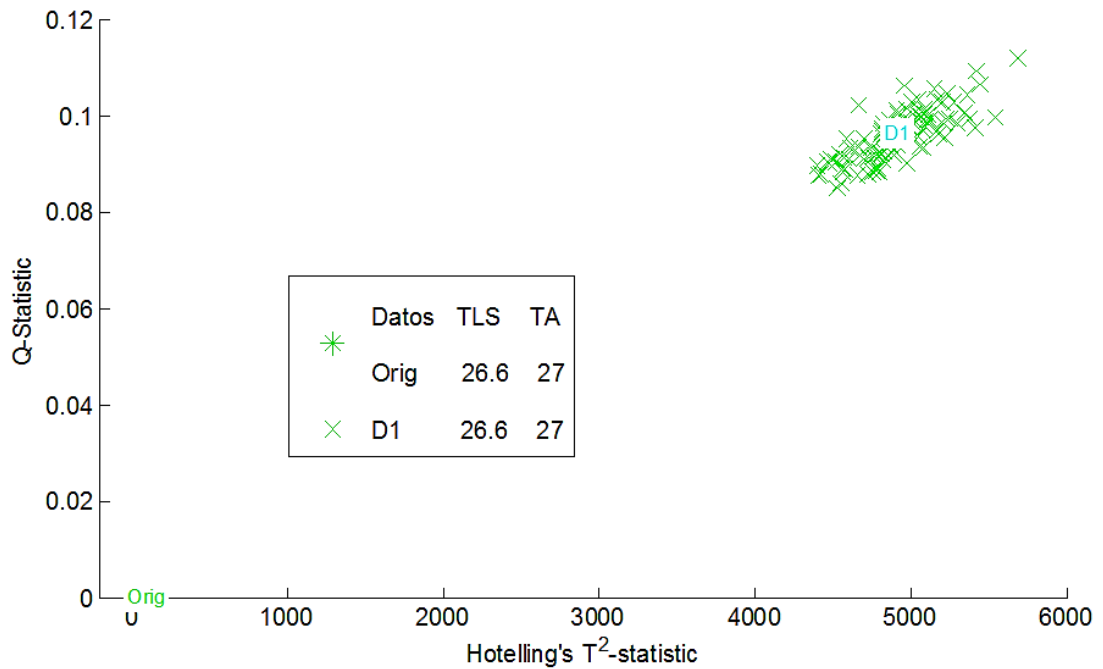
En la Figura 37 se observan los cambios en los índices Q y T2 que genera el estado de pérdida de cerámica de la primera grieta del PZT a una temperatura ambiente de 27°C, en este caso se puede observar que los clúster del efecto ocasionado por el pérdida de cerámica de la primera grieta se sitúan en la misma zona de los índices de la segunda grieta de la Figura 35 los cuales se ubican en la zona de índices sin daños del sensor a temperatura ambiente de 27°C antes estudiados. Esto indica que al generarse las grietas, la zona de cerámica que se separa no genera ningún efecto sobre la acción del PZT, aun cuando tenga o no cerámica en esta área.

**Figura 38. Grafica de índices Q vs T2 datos de perdida de cerámica de la primera y segunda grieta**



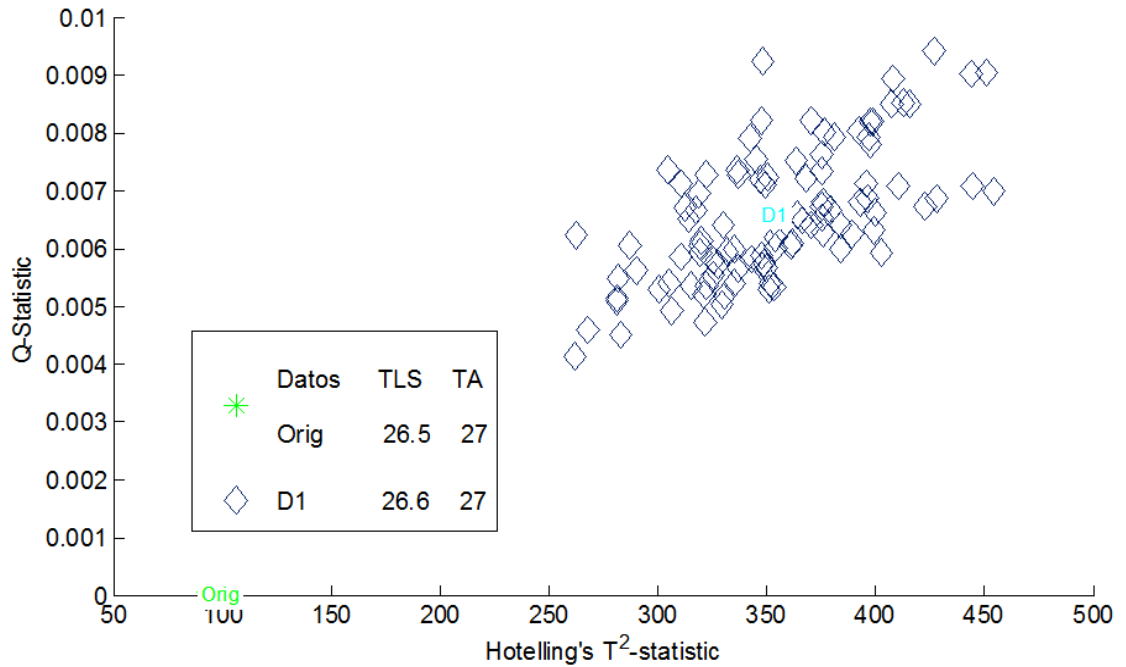
En la Figura 38 se observan los cambios en los índices Q y T2 que genera el estado de perdida de cerámica de la segunda grieta del PZT a una temperatura ambiente de 27°C, como era de esperarse se presenta la misma situación del caso anterior, donde se tienen los mismos clúster en la misma zona del efecto de la segunda grieta de la Figura 35.

**Figura 39. Grafica de índices Q vs T2 datos de perdida de cerámica con más del 50%**



En la Figura 39 se observan los cambios en los índices Q y T2 que genera el estado de perdida de cerámica con una aproximación de más del 50% del PZT a una temperatura ambiente de 27°C, se puede notar que los clúster del efecto ocasionado por la pérdida de la cerámica se ubican cerca de la zona de índices sin daños del sensor a temperatura ambiente de 27°C, pero igualmente están fuera de esta zona con lo que nos permite detectar el daño en el PZT.

**Figura 40. Grafica de índices Q vs T2 datos de perdida de cerámica con más del 90%**



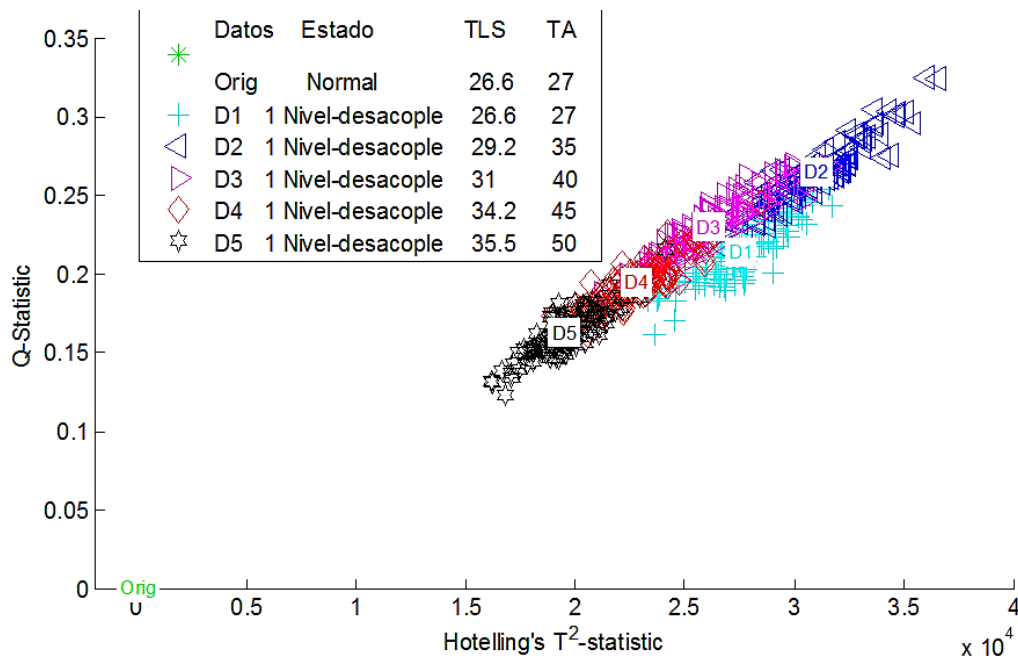
En la Figura 40 se observan los cambios en los índices Q y T2 que genera el estado de perdida de cerámica con una aproximación de más del 90% del PZT a una temperatura ambiente de 27°C, se puede notar que los clúster del efecto ocasionado por la pérdida de la cerámica se ubican por debajo de la zona de índices sin daños del sensor a temperatura ambiente de 27°C, a partir de este resultado una pérdida de cerámica significativa o de un porcentaje alto da unos índices que caen en una zona donde se puede declarar que el sensor deajo de funcionar.

**Anexo B: Efectos individuales de desacople, desconexión, grietas y perdida de cerámica a una variación de temperatura ambiente de 27°C A 50°C.**

**Desacople**

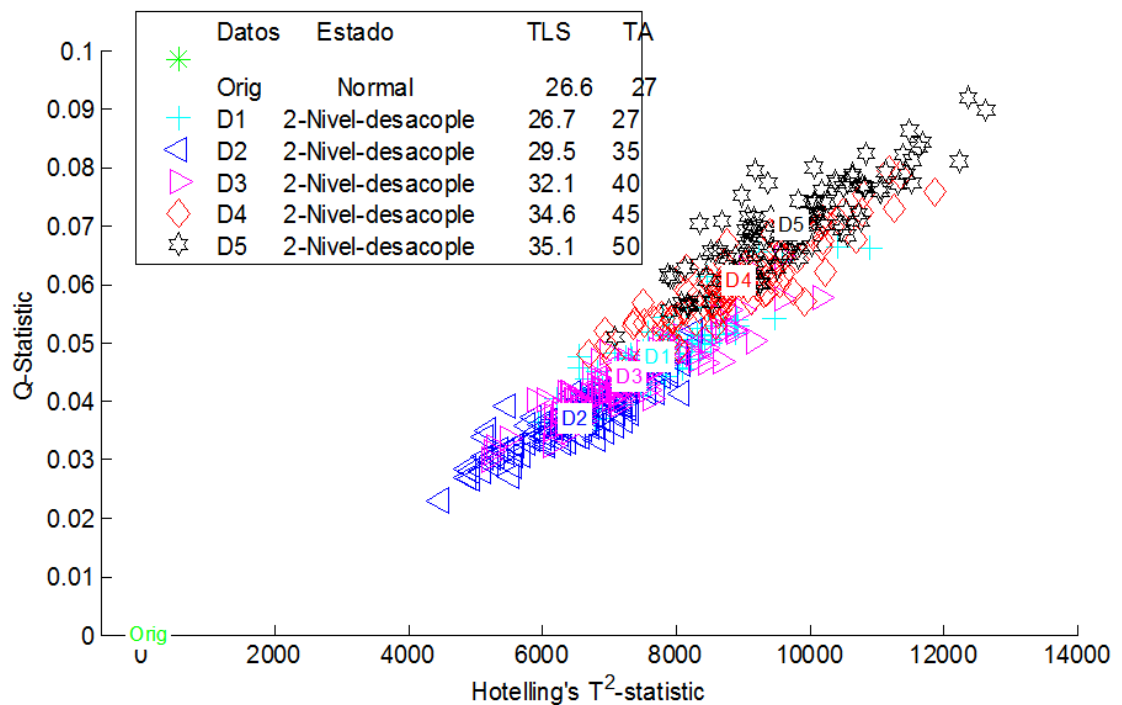
En esta parte se muestran los resultados después de generar diversos niveles de desacople del PZT con la estructura, Se tomaron los datos de estas condiciones a temperatura ambiente variable de 27°C a 50°C y se construyó el modelo base mediante PCA. Durante el desarrollo del experimento los datos registrados de los daños fueron proyectados sobre el modelo creado, calculando los índices estadísticos de  $T^2$  Y Q-estadístico, con el fin de realizar una evaluación previa de la influencia que ocasionan los diferentes niveles de desacople con la variación de temperatura.

**Figura 41. Grafica de índices Q vs T2 datos del primer nivel de desacople a diferentes temperaturas (Orig normal)**



En la Figura 41 se presenta la distribución de los clúster luego de tomar los datos de diferentes temperaturas en un rango de 27°C a 50°C, donde los datos fueron proyectados sobre un modelo base, el cual está en un estado normal a temperatura de 27°C. Se aprecia que toda la distribución de los clúster se mantiene en un mismo lugar con una pequeña pendiente, a pesar de la presente variación de temperatura, indicando que los índices del efecto de desacople del 25% serán los mismos para cada ocasión, mientras no se presenten otras anomalías.

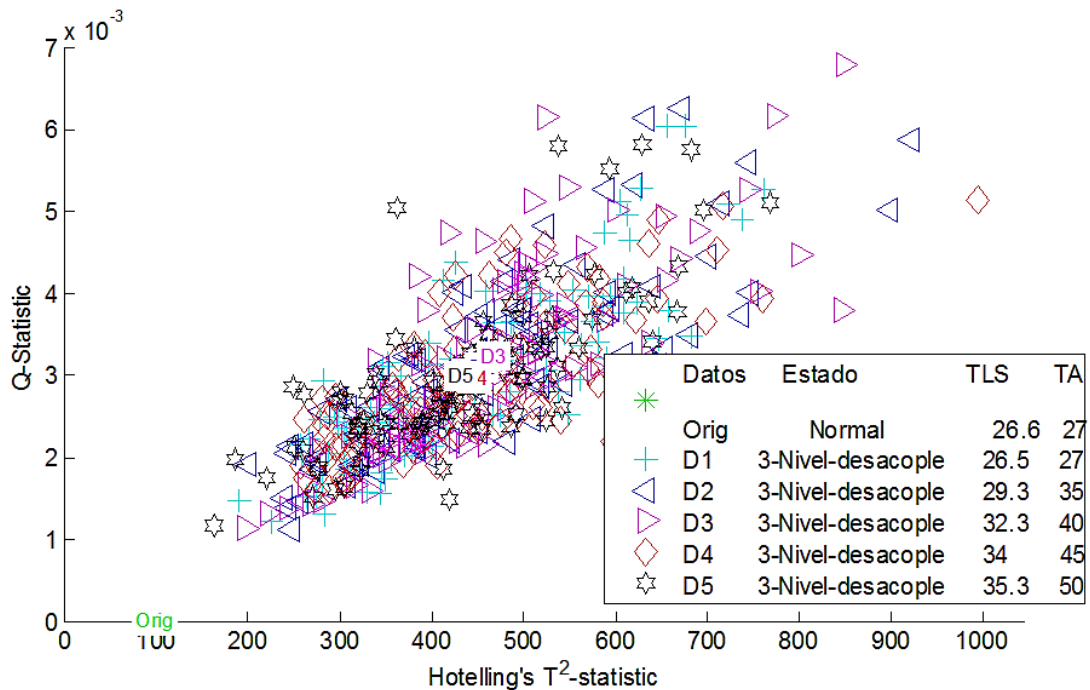
**Figura 42. Grafica de índices Q vs T2 datos del segundo nivel de desacople a diferentes temperaturas (Orig normal)**



En la Figura 42 se presenta la distribución de los clúster luego de tomar los datos de diferentes temperaturas en un rango de 27°C a 50°C, donde los datos fueron proyectados sobre un modelo base, el cual está en un estado normal a temperatura de 27°C. Se aprecia que toda la distribución de los clúster se mantiene en un mismo lugar con una pequeña pendiente como en el caso anterior,

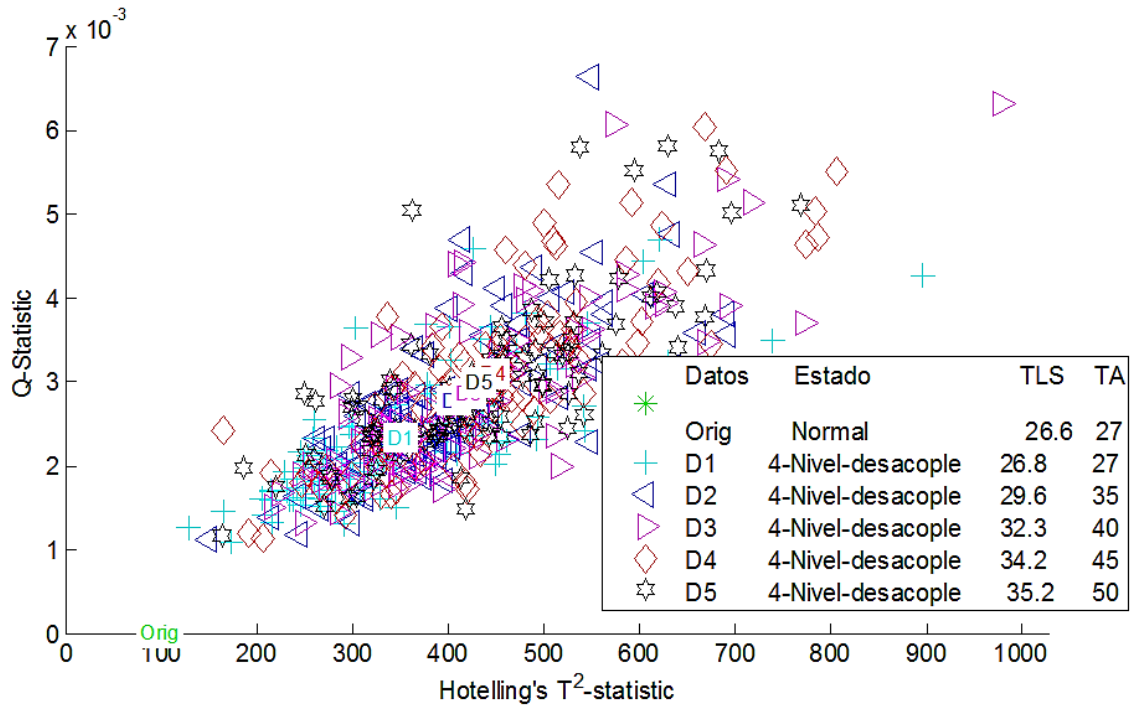
mostrando que los índices del efecto de desacople del 50% no cambian con la variación de temperatura.

**Figura 43. Grafica de índices Q vs T2 datos del tercer nivel de desacople a diferentes temperaturas (Orig normal)**



En la Figura 43 y figura 44 se presenta la distribución de los clúster luego de tomar los datos de diferentes temperaturas en un rango de 27°C a 50°C, donde los datos fueron proyectados sobre un modelo base, el cual está en un estado normal a temperatura de 27°C. Se aprecia que toda la distribución de los clúster se mantiene en una misma área, siendo la respuesta de los daños de desacople del 75 y 100 por ciento una señal de cero, la cual no es afectada por la variación de temperatura aplicada y los índices serán los mismo para cada ocasión.

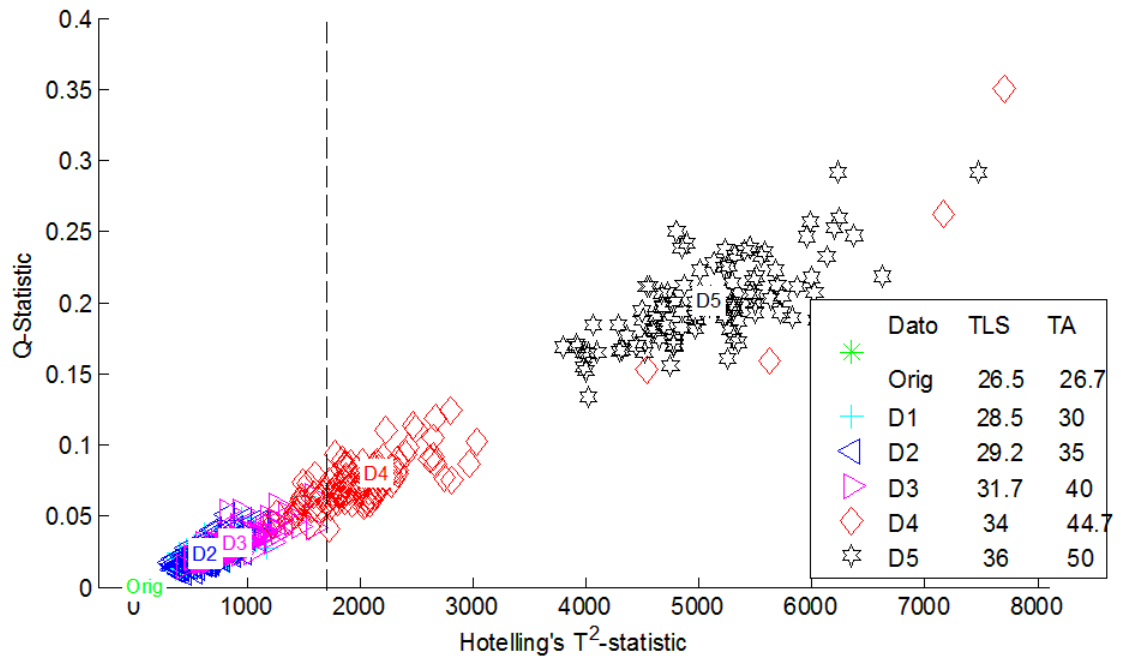
**Figura 44. Grafica de índices Q vs T2 datos del cuarto nivel de desacople a diferentes temperaturas (Orig normal)**



### Grietas

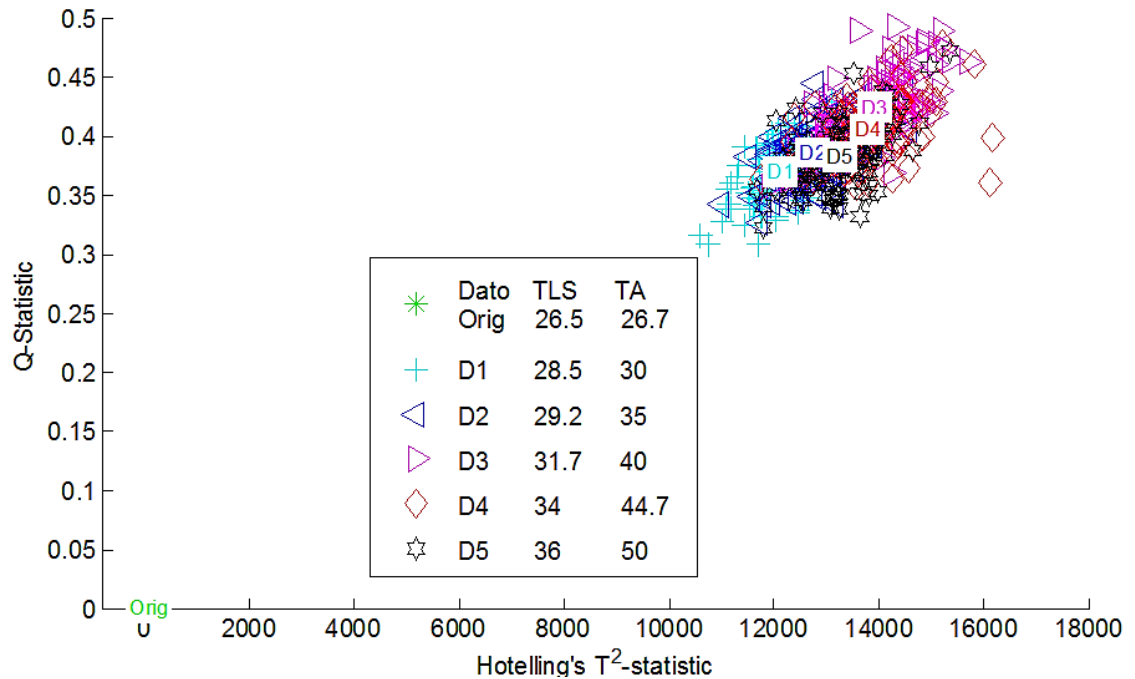
En esta parte se muestran los resultados después de generar una y dos grietas a la cerámica del PZT, Se tomaron los datos de estas dos condiciones a temperatura ambiente variable de 27°C a 50°C y se construyó el modelo base mediante PCA. Durante el desarrollo del experimento los datos registrados de los daños fueron proyectados sobre el modelo creado, calculando los índices estadísticos de T2 Y Q-estadístico, con el fin de realizar una evaluación previa de la influencia que ocasionan estas grietas al PZT ante la variación de temperatura, donde la proyección del modelo se realizó teniendo en cuenta el dato Orig con y sin una grieta.

**Figura 45. Grafica de índices Q vs T2 con una grieta a diferentes temperaturas (Orig con una grieta)**



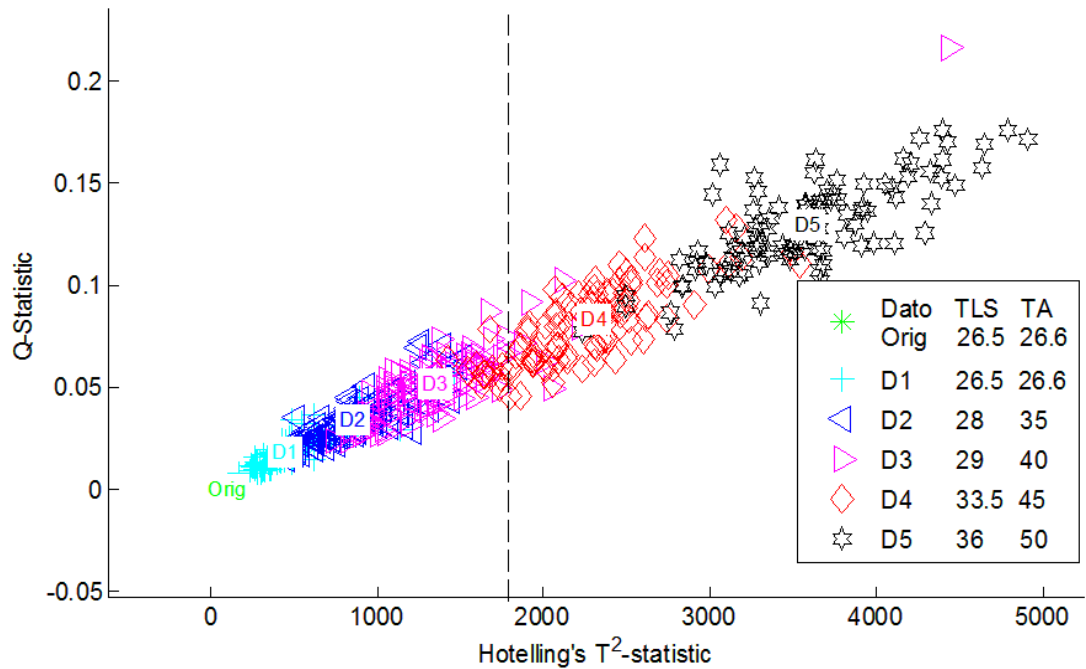
En la Figura 45 se presenta la distribución de los clúster luego de tomar los datos de diferentes temperaturas en un rango de 27°C a 50°C, donde los datos fueron proyectados sobre un modelo base, el cual está afectado por una grieta a una temperatura de 27°C. Los clúster a determinada temperatura mantienen los resultados estudiados en la Figura 15, indicando que el efecto de la variación de temperatura se mantiene cuando el estado del PZT es el mismo en todo el registro de datos.

**Figura 46. Grafica de índices Q vs T2 con una grieta a diferentes temperaturas (Orig normal)**



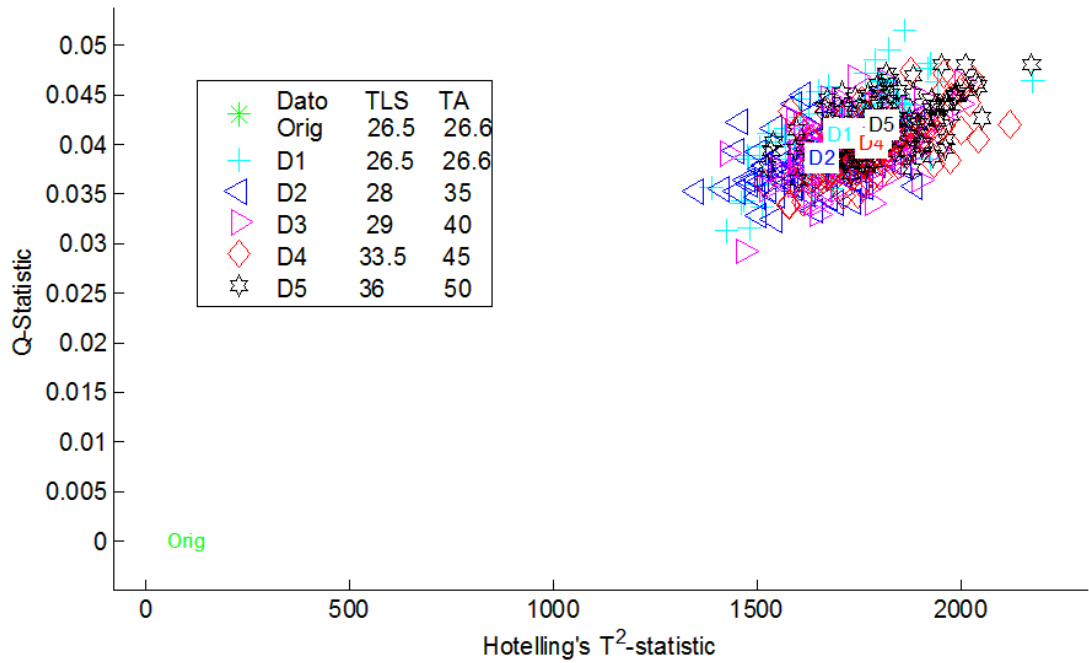
En la Figura 46 se presenta la distribución de los clúster luego de tomar los datos de diferentes temperaturas en un rango de 27°C a 50°C, donde los datos fueron proyectados sobre un modelo base, el cual está en un estado normal sin grietas a temperatura de 26.7°C. Se aprecia que toda la distribución de los clúster se mantiene en un mismo lugar a pesar de la presente variación de temperatura, esto indicando que los índices del efecto de una grieta serán los mismos para cada ocasión, mientras no se presenten otras anomalías.

**Figura 47. Grafica de índices Q vs T2 con dos grieta a diferentes temperaturas (Orig con dos grietas)**



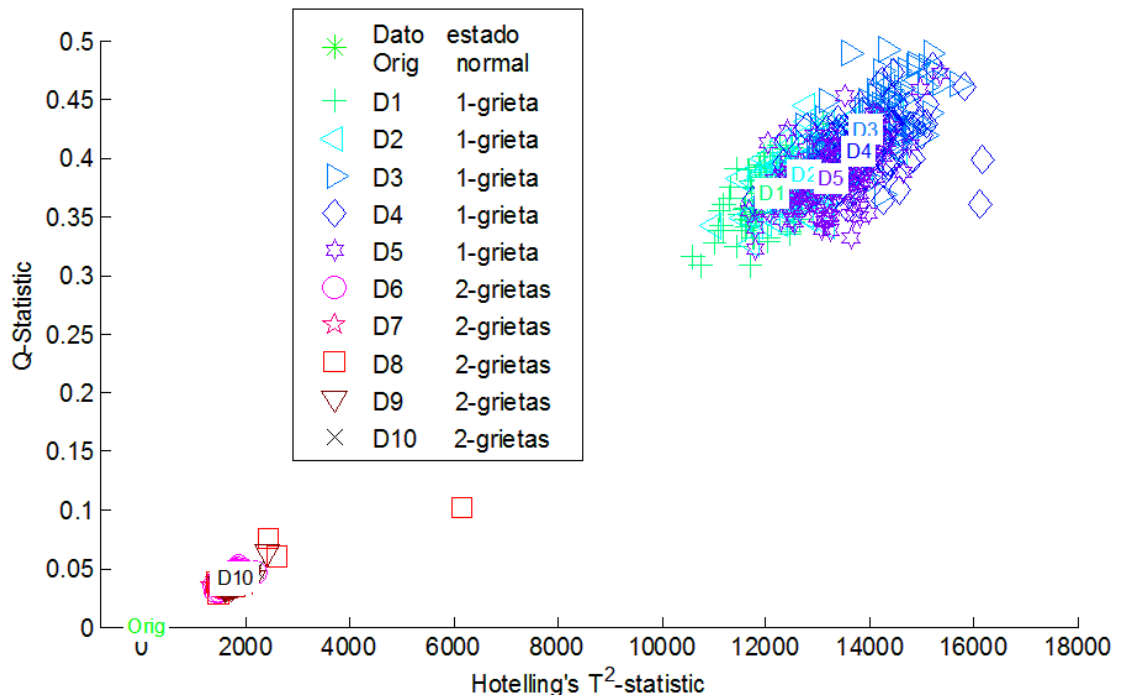
En la Figura 47 se presenta la distribución de los clúster luego de tomar los datos de diferentes temperaturas en un rango de 27°C a 50°C, donde los datos fueron proyectados sobre un modelo base, el cual está afectado por dos grietas a una temperatura de 26.7°C. Como en el caso de la Figura 45, los resultados de los efectos de la temperatura ante un estado igualitario del PZT se mantienen.

**Figura 48. Grafica de índices Q vs T2 con dos grieta a diferentes temperaturas (Orig normal)**



En la Figura 48 se presenta la distribución de los clúster luego de tomar los datos de diferentes temperaturas en un rango de 27°C a 50°C, donde los datos fueron proyectados sobre un modelo base, el cual está en un estado con dos grietas a temperatura de 26.7°C. Como se puede ver, la distribución de los clúster se mantiene en una sola nube, lo que indica que tenemos el mismo resultado que en el de la Figura 46, donde la variación de la temperatura no presenta ninguna afectación relevante a comparación del efecto ocasionado por las dos grietas.

**Figura 49. Grafica de índices Q vs T2 datos con una y dos grietas en la cerámica PZT a diferentes temperaturas (Orig normal)**



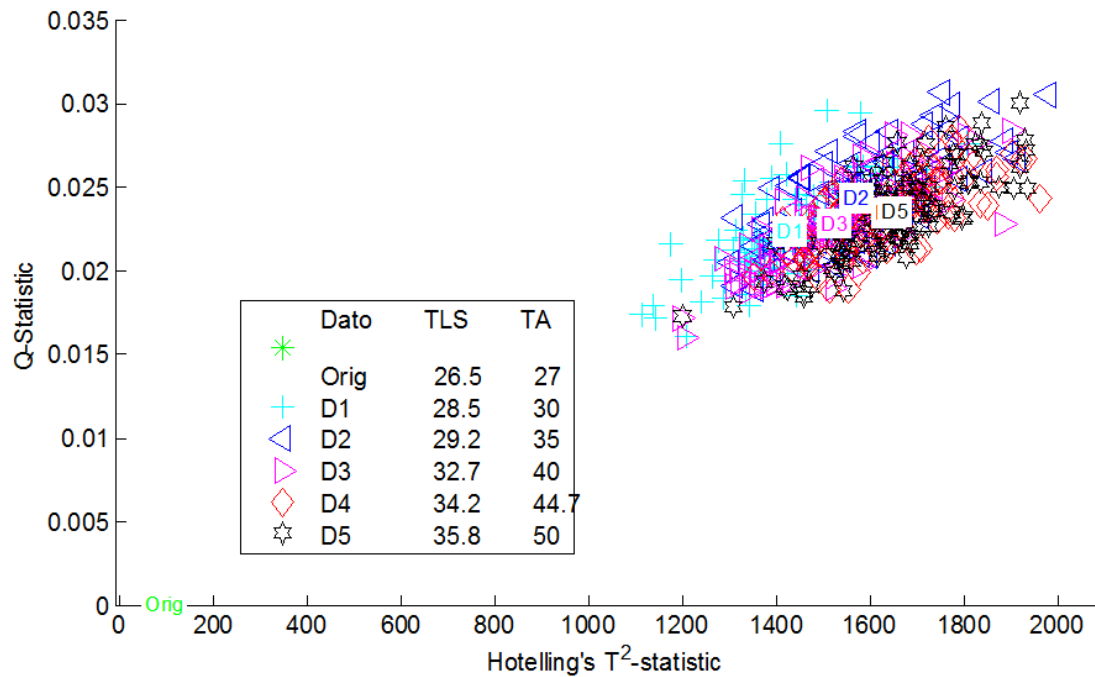
En la Figura 49, se realiza una comparación de los efectos de una y dos grietas en la cerámica del PZT con variación de temperatura ambiente, se puede observar que de todos los datos solo tenemos dos clúster importantes correspondientes al efecto ocasionado por una y dos grietas en la cerámica del PZT. También cabe destacar que en la Figura 49 se presenta el mismo resultado de la sección 5.2.3 dejando a un lado todo efecto de temperatura variable.

### **Perdida de cerámica**

En esta sección se muestran los resultados después de generar diferentes niveles de pérdida de cerámica en el PZT, Se tomaron los datos de estas condiciones a temperatura ambiente variable de 27°C a 50°C y se construyó el modelo base mediante PCA. Durante el desarrollo del experimento los datos registrados de los daños fueron proyectados sobre el modelo creado, calculando los índices

estadísticos de T2 Y Q-estadístico, con el fin de realizar una evaluación previa de la influencia que ocasionan estas pérdidas de cerámica al PZT ante la variación de temperatura.

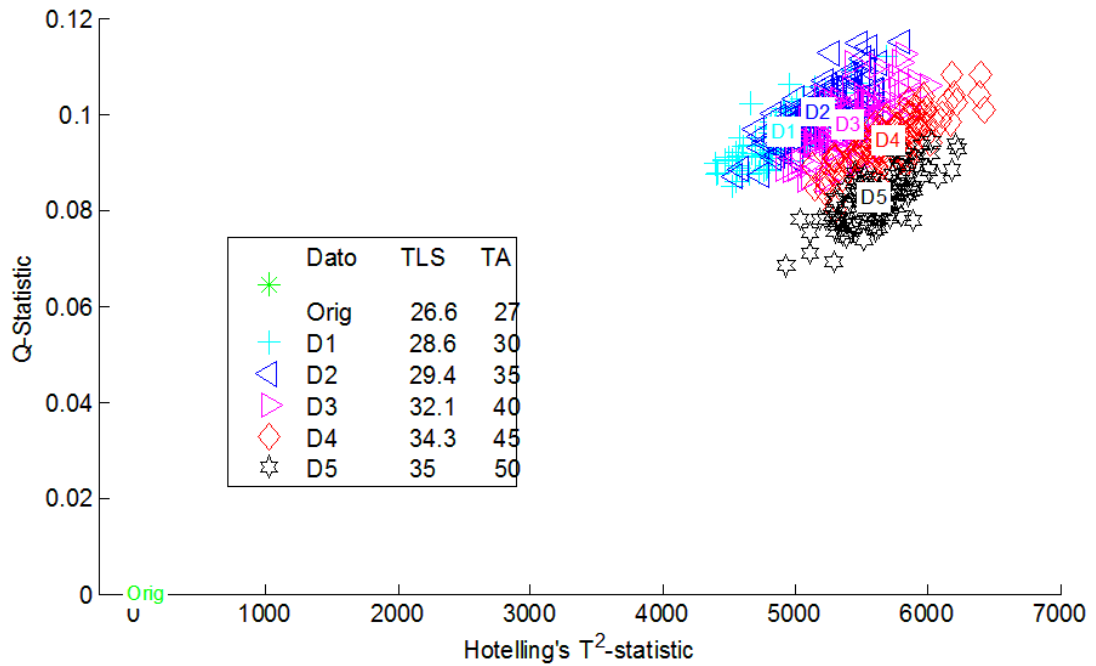
**Figura 50. Grafica de índices Q vs T2 datos perdida de cerámica de la primera grieta a diferentes temperaturas (Orig normal)**



En la Figura 50 y Figura 51 se presenta la distribución de los clúster luego de tomar los datos de diferentes temperaturas en un rango de 27°C a 50°C, donde los datos fueron proyectados sobre un modelo base, el cual está en un estado normal con temperatura de 27°C. Como se puede ver, la distribución de los clúster se mantiene en una sola nube, lo que indica que tenemos el mismo resultado que en el de la Figura 46, ya que se retiraron la cerámica de las dos grietas, lo que indica que esta cerámica retirada no afectaba al resto del PZT, igualmente la variación de temperatura tampoco influyo en este caso.

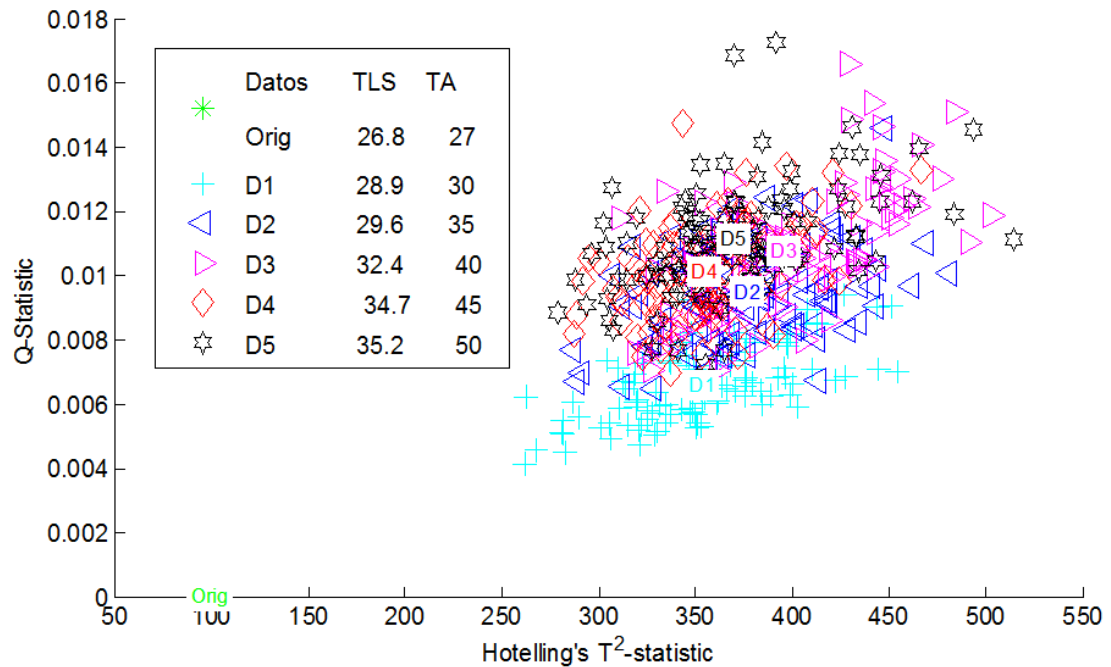
**Figura 51. Grafica de índices Q vs T2 datos perdida de cerámica de la segunda grieta a diferentes temperaturas (Orig normal)**

**Figura 52. Grafica de índices Q vs T2 datos perdida de cerámica del más del 50% a diferentes temperaturas (Orig normal)**



En la Figura 52 se observan los cambios en los índices Q y T2 que genera el estado de perdida de cerámica con una aproximación de más del 50% del PZT a una variación de temperatura ambiente de 27°C a 50°C, se puede notar que los clúster del efecto ocasionado por la pérdida de la cerámica se ubican en una misma zona lo que indica que la variación de temperatura no influyo en los resultados del daño ocasionado.

**Figura 53. Grafica de índices Q vs T2 datos perdida de cerámica del más del 90% a diferentes temperaturas (Orig normal)**



En la Figura 53 se presenta la distribución de los clúster luego de tomar los datos de diferentes temperaturas en un rango de 27°C a 50°C, donde los datos fueron proyectados sobre un modelo base, el cual está en un estado normal a temperatura de 27°C. Se aprecia que toda la distribución de los clúster se mantiene en una misma área, siendo la respuesta del daño de pérdida de cerámica con una aproximación de más del 90% una señal de cero, la cual no es afectada por la variación de temperatura aplicada y los índices serán los mismos para cada ocasión.

## Anexo C: Datasheet de los piezoelectricos ceramicos

Figura 54. Dimensiones de los PZT cerámicos (tomado de [32])

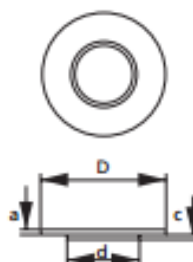


Tabla 3. Dimensiones de los PZT en mm (adaptado de [32])

Dimensiones en mm				
Código	D	d	a	c
27EE35	27	19	0,2	0,15
24EE45	20	14	0,2	0,2
20EE65	20	14	0,2	0,2

Tabla 4. Constantes de piezoelectricos más comerciales (Tomado de [33])

Material	PZT-4	PZT-8	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H
$K_p$	0,6	0,5	0,61	0,6	0,63
$K_{33}$	0,68	0,63	0,7	0,71	0,73
$d_{33} (\cdot 10^{-12} \text{ C/N})$	300	215	400	460	550
$d_{31} (\cdot 10^{-12} \text{ C/N})$	-11,5	-9,5	-170	-210	-265
$g_{33} (\cdot 10^{-3} \text{ V}\cdot\text{m/N})$	26	25	25	22	19
$g_{31} (\cdot 10^{-3} \text{ V}\cdot\text{m/N})$	-11	-11	-11	-9	-9
$K^T_3$ C. dieléctrica relativa	1250	1000	1750	2450	3100
Factor de disipación	0,004	0,004	0,02	0,02	0,02
Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	7600	7600	7650	7500	7500

Material	PZT-4	PZT-8	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H
Temperatura de Curie (°C)	325	330	360	260	190
Factor de calidad $Q_m$	500	1000	75	70	65
$s^E_{11}$ ( $\cdot 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N)	12	11	19	23	21
$s^E_{33}$ ( $\cdot 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N)	16	14	16	16	15
Np (Hz-m) (modo planar)	2200	2270	1950	2000	1950
Np (Hz-m) (modo espesor)	1905	2032	1800	1950	2000

**Tabla 5. Aplicaciones más habituales de los piezoeléctricos más comerciales (Tomado de [33])**

Piezoeléctrico	Aplicaciones
PZT-4	Sistemas de limpieza por ultrasonidos y fisioterapia
PZT-8	Sistemas de soldadura por ultrasonidos
PZT-5A	Sensores y transductores para ensayos no destructivos
PZT-5J	Generadores de chispa por impacto y posicionadores
PZT-5H	Generadores de chispa por impacto y posicionadores