

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD EN EL
DESEMPEÑO DE UN ALGORITMO DE DETECCIÓN DE FUGAS EN TUBERÍAS
DE ACERO CARBONO.**

**HERNAN STEVEN BUENAHORA PÁEZ
GUSTAVO ADOLFO MORENO BELTRÁN**

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

2015

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD EN EL
DESEMPEÑO DE UN ALGORITMO DE DETECCIÓN DE FUGAS EN
TUBERÍAS DE ACERO CARBONO.**

**HERNAN STEVEN BUENAHORA PÁEZ
GUSTAVO ADOLFO MORENO BELTRÁN**

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Electrónico

Director

**RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA
Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico, Ph.D**

Co-directores

**JHONATAN CAMACHO NAVARRO
Ingeniero Electrónico, Ms.c
ÓSCAR EDUARDO PEREZ GAMBOA
Ingeniero Electrónico**

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

2015

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS.....	17
1.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. MARCO CONCEPTUAL	18
2.1 MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL	18
3. DETECCIÓN DE DEFECTOS EN ESTRUCTURAS USANDO PIEZO- DIAGNOSIS.....	19
3.1 IDENTIFICACIÓN DE DEFECTOS ESTRUCTURALES MEDIANTE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA).....	21
3.2 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD EN LA <i>PIEZODIAGNOSIS</i>	23
3.2.1 Efectos de la Humedad.....	23
3.2.2 Efectos de la Temperatura.....	24
3.3 CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS USANDO MAPAS AUTOORGANIZADOS, ANTE CONDICIONES VARIABLES DE TEMPERATURA	25
4. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO.....	27
4.1 CONFIGURACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN Y ESTUDIO DE LOS ALGORITMOS DE DETECCIÓN DE DEFECTOS.....	28
4.1.1 Sistema piezo activo.	28
4.1.2 Algoritmo de detección de defectos usando estadísticos PCA.	31
4.2 CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO PARA LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD	34
4.2.1 Estructura para el control de variaciones de temperatura.....	35

4.2.2 Estructura para el control de variaciones de humedad	36
4.2.3 Interfaz gráfica para el registro de variaciones de temperatura y humedad .	37
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	38
5. CASOS DE ESTUDIO	39
5.1 ESCENARIO 1: VARIACIÓN DE TEMPERATURA CON FUGAS	40
5.2 ESCENARIO 2: VARIACIÓN DE HUMEDAD CON FUGAS	42
5.3 ESCENARIO 3: VARIACIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD CON FUGAS	43
5.4 ESCENARIO 4: VARIACIÓN DE TEMPERATURA CON AGREGACIÓN DE MASA.....	45
5.5 ESCENARIO 5: VARIACIÓN DE HUMEDAD CON AGREGACIÓN DE MASA	47
5.6 ESCENARIO 6: VARIACIÓN DE HUMEDAD Y TEMPERATURA CON AGREGACIÓN DE MASA.....	48
6. RESULTADOS.....	51
6.1 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA EN LA DETECCIÓN DE FUGAS	51
6.2 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE HUMEDAD EN LA DETECCIÓN DE FUGAS	56
6.3 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN LA DETECCIÓN DE FUGAS.....	61
6.4 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA CON AGREGACIÓN DE MASA.....	64
6.5 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE HUMEDAD CON AGREGACIÓN DE MASA	68
6.6 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD, CON AGREGACIÓN DE MASA.....	71
6.7 CLASIFICACIÓN DE AGREGACIÓN DE MASA Y FUGAS EN UN RANGO DE TEMPERATURAS, USANDO REDES SOM.....	74
7. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	79

7.1 CONCLUSIONES	79
7.2 RECOMENDACIONES	81
7.3 TRABAJOS FUTUROS.....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
BIBLIOGRAFÍA.....	87
ANEXOS.....	91

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ilustración del comportamiento de la onda guiada sobre una estructura.	20
Figura 2. Creación de matriz de estados de la estructura.....	21
Figura 3. Esquema conceptual de PCA en el contexto de SHM.....	22
Figura 4. Ilustración de una red neuronal (SOM).....	25
Figura 5. Diagrama de la metodología implementada para el desarrollo del proyecto.	27
Figura 6. Elementos utilizados durante el proyecto de investigación.....	29
Figura 7. Esquema modular del algoritmo implementado.....	31
Figura 8. Estructura construida para variar temperatura.....	35
Figura 9. Estructura para variar humedad	36
Figura 10. Interfaz para el registro de Temperatura y Humedad.	37
Figura 11. Diagrama de experimento.....	39
Figura 12. a) Grafica de temperatura (señal azul (referencia), señal roja (variación temperatura) b) humedad relativa.....	41
Figura 13. Gráfica de datos obtenidos durante el experimento de humedad, grafica superior (temperatura), grafica inferior (humedad relativa).....	43
Figura 14. Gráfica de datos obtenidos durante el experimento de humedad y temperatura, gráfica superior (temperatura), gráfica inferior (humedad relativa)...	45
Figura 15. a) Señal azul (variación temperatura), señal roja (referencia). b) Humedad relativa.....	46
Figura 16. Grafica de datos obtenidos durante el experimento de humedad, con agregación de masa, grafica superior (temperatura), grafica inferior (humedad relativa).	48

Figura 17. Gráfica de datos obtenidos durante el experimento de humedad y temperatura, con agregación de masa, gráfica superior (temperatura), gráfica inferior (humedad relativa).	50
Figura 18. Gráfica de Q-estadístico (izquierda) y Gráfica de T2 (derecha).....	52
Figura 19. Gráfica de índices Q vs T2 datos sin daños a diferentes temperaturas.	53
Figura 20. Gráfica De índices Q vs T2 datos sin daños a diferentes temperaturas y unas fugas proyectadas sobre los datos sin daños.	54
Figura 21. Gráfica de Q-estadístico datos sin daños a diferentes temperaturas con unas fugas proyectadas sobre los datos sin daños.	54
Figura 22. Señal de sensor en el dominio del tiempo.	55
Figura 23. Gráfica de Q-estadístico y T2	57
Figura 24. Gráfica De índices Q vs T2 datos sin daños a diferentes Humedades Relativas.	57
Figura 25. Gráfica De índices Q vs T2 datos sin daños a diferentes Humedades y unas fugas proyectadas sobre los datos sin daños.	58
Figura 26. Gráfica de Q-estadístico datos sin daños a diferentes Humedades y unas fugas proyectadas sobre los datos sin daños.	59
Figura 27. Señal del sensor en el dominio del tiempo	60
Figura 28. Gráfica de Q-estadístico Y T2.....	61
Figura 29. Gráfica de índices Q vs T2 datos sin daños a diferentes temperaturas y humedades relativas.....	62
Figura 30. Gráfica de Q-estadístico datos sin daños a diferentes temperaturas y humedades con unas fugas proyectadas sobre los datos sin daños.	63
Figura 31. Gráfica De índices Q vs T2 datos sin daños a diferentes temperaturas y humedades Relativas y unas fugas proyectadas sobre los datos sin daños.	63
Figura 32. Gráfica de índices Q vs T2 datos sin daños a diferentes Temperaturas.	64
Figura 33. Gráfica de Q-estadístico y T ²	65

Figura 34. Gráfica de Q-estadístico datos sin daños a diferentes temperaturas, con la agregación de masa proyectada sobre los datos sin daños.	66
Figura 35. Gráfica de índices Q vs T ² datos sin daños a diferentes temperaturas, con la agregación de la masa como daño proyectado sobre los datos sin daños. 67	67
Figura 36. Gráfica de Q-estadístico y T ²	69
Figura 37. Gráfica de índices Q vs T ² datos sin daños a diferentes humedades. 69	69
Figura 38. Gráfica de Q-estadístico datos sin daños a diferentes temperaturas, con la agregación de masa proyectada sobre los datos sin daños.	70
Figura 39. Gráfica De índices Q vs T ² datos sin daños a diferentes humedades, con la agregación de la masa como daño proyectado sobre los datos sin daños. 71	71
Figura 40. Gráfica de Q-estadístico Y T ²	72
Figura 41. Gráfica de índices Q vs T ² datos sin daños a diferentes humedades y temperaturas.....	72
Figura 42. Gráfica de Q-estadístico datos sin daños a diferentes temperaturas, con la agregación de masa proyectada sobre los datos sin daños.	73
Figura 43. Gráfica de índices Q vs T ² datos sin daños a diferentes Humedades y Temperaturas, con la agregación de la masa como daño proyectado sobre los datos sin daños.....	74
Figura 44. A) Modelo sin considerar rango de temperatura B) Modelo considerando el rango de temperatura	75
Figura 45. A) Red SOM del modelo sin considerar el rango de temperatura B) Red SOM del modelo considerando el rango de temperatura.....	76
Figura 46. A) Modelo sin considerar el rango de temperatura B) Modelo considerando el rango de temperatura	77
Figura 47. A) Red SOM del modelo sin considerar el rango de temperatura B) Red SOM del modelo considerando el rango de temperatura.....	78

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tabla de procedimientos del experimento de humedad para fugas.....	42
Tabla 2. Tabla de procedimientos para el experimento Temperatura, Humedad y Fugas.....	44
Tabla 3. Tabla de procedimientos para el experimento variación de Humedad con masa.....	47
Tabla 4. Tabla de procedimientos para el experimento Temperatura, Humedad, con agregación de masas.....	49

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Caracterización de sensores (humedad y temperatura) y calibración de sistema de adquisición de datos.....	91
ANEXO B. Diseño y operación del sistema de emulación y registro de condiciones ambientales (Humedad y Temperatura).....	100

RESUMEN

TITULO: “ESTUDIO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD EN EL DESEMPEÑO DE UN ALGORITMO DE DETECCIÓN DE FUGAS EN TUBERÍAS DE ACERO CARBONO”.

AUTORES: HERNAN STEVEN BUENAHORA PÁEZ**
GUSTAVO ADOLFO MORENO BELTRÁN

PALABRAS CLAVES: *piezodiagnosis*, onda guiada, tubería acero carbono, fugas y agregación de masa, temperatura, humedad, PCA, modelo base, redes SOM.

CONTENIDO:

En el presente trabajo de investigación, se describe la metodología utilizada para el estudio del algoritmo de detección de defectos en una sección tubería de acero carbono basado en análisis de componentes principales PCA y considerando variaciones de temperatura y humedad. La detección de defectos tipo agregación de masa y fugas, se realiza usando el principio de *piezodiagnosis*, que consiste en el análisis de ondas guiadas generadas mediante dispositivos piezoeléctricos. Así, si un defecto produce variaciones en las características de la onda guiada transmitida a través de la superficie de la tubería, este puede ser identificado usando índices estadísticos. El principal aporte del trabajo a presentar consta de evaluar la efectividad del algoritmo de detección de fallas ante condiciones variantes de temperatura y humedad, garantizando su control y el registro en tiempo real de las señales con montajes de laboratorio, emulando fugas y agregación de masa. Se identificó que se generan falsas alarmas en el algoritmo de detección de daños cuando se incluyen condiciones variantes de temperatura y humedad, debido a los cambios en la amplitud de la onda guiada transmitida. Además se evaluó un método propuesto por el grupo de investigación que permitió la detección de los daños (agregación de masa y fuga) por medio de la inclusión de los datos de temperatura máxima y mínima que se presentaban en la estructura. Esta investigación 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.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Rodolfo Villamizar Mejía, Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico, PH.D. Co-directores: Jhonatan Camacho Navarro, Ingeniero Electrónico, MS.C. Óscar Eduardo Pérez Gamboa, Ingeniero Electrónico

ABSTRACT

TITLE: "STUDY ON THE EFFECT OF TEMPERATURE AND HUMIDITY ON THE PERFORMANCE OF A LEAK DETECTION ALGORITHM IN CARBON STEEL PIPELINES".

AUTHORS: HERNAN STEVEN BUENAHORA PÁEZ**
GUSTAVO ADOLFO MORENO BELTRÁN

KEYWORDS: *piezodiagnosis*, guided wave, carbon steel pipeline, leaks and adding mass, temperature, moisture, PCA, base model, self-organizing maps (SOM).

CONTENT:

In this work, the methodology for the study of an algorithm for damage detection in carbon steel pipelines based on Principal Component Analysis PCA under variations of humidity and temperature is presented. The damage detection related to leakage and mass aggregation is performed using the principle of piezodiagnosis, which analyses guided waves generated by piezoelectric devices. If a damage causes variations in the characteristics of the guided waves transmitted through pipe surface, it can be detected by statistical indexes. The main contribution of this research is the evaluation of the effectiveness of a fault detection algorithm in the presence of humidity and temperature variations, ensuring their control and real-time recording of signals with laboratory setups when several damages are simulated by means of leaks and mass aggregation. As a result, it was found that the detection algorithm generates false alarms when variable temperature and humidity conditions are included, due to changes in the guided waves amplitude. In addition, a proposed by the research group allowed detection of damage (mass aggregation and leakage) through the inclusion of data of maximum and minimum temperature as presented in the structure. This research is part of "Monitoring and detection of damages in structures using embedded algorithms", funded by COLCIENCIAS. The proposed algorithm has been studied and improved in collaboration with Universidad Politecnica de Catalunya.

* Work degree

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Director: Rodolfo Villamizar Mejia, Electrical Engineering and Electronics Engineer, Ph.D. Co-directors: Jhonatan Camacho Navarro, Electronic Engineer, MS.C. Oscar Eduardo Perez Gamboa, Electronic Engineer

INTRODUCCIÓN

La detección temprana de fallas en tuberías permite evitar catástrofes similares a la sucedida en Risaralda, Colombia, donde el estallido de un oleoducto dejó como saldo seis muertos y 30 heridos [1], prevenir derrames de fluidos nocivos para el ambiente, así como reducir pérdidas económicas. Dichas fallas pueden ocurrir por diferentes causas tales como agrietamientos, envejecimiento y corrosión, entre otros. Aunque actualmente los métodos de evaluación pueden ser usados para tareas de inspección, dichos sistemas no consideran un monitoreo continuo y la obtención de un diagnóstico requiere detener la operación normal de la tubería.

En este sentido, la monitorización de salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés) tiene como objetivo el desarrollo de sistemas para la detección y localización de fallas en estructuras, de manera no invasiva y monitorización continua mediante la instalación permanente de sensores. Una de las técnicas de SHM ampliamente utilizada corresponde al análisis de la respuesta ante ondas guiadas registradas con dispositivos piezoeléctricos y procesada con la ayuda del análisis de componentes principales (PCA) [2], [3]. Dicha técnica, ha sido empleada para detección de daños en diferentes estructuras como láminas de acero, tuberías de acero carbono y componentes de alas de avión [4] [5] [6] [7] [8].

En este trabajo, se presentan los resultados de evaluar un algoritmo basado en análisis de componentes principales PCA y *piezodiagnosis* para la detección de fugas y agregaciones de masa en una sección de tubería de acero carbono considerando variaciones de humedad y temperatura a nivel de laboratorio. Los principales aportes corresponden al acondicionamiento experimental de una sección de tubería acero-carbono para la emulación de operación en condiciones de temperatura y humedad variables a nivel de laboratorio. De esta manera, se creó una base de casos mediante un sistema de adquisición que permite controlar

las variaciones de temperatura y humedad. En particular, se emuló una curva típica de las variaciones de temperatura de la ciudad de Barrancabermeja. Asimismo, se identificó que se generan falsas alarmas en el algoritmo de detección de daños cuando se incluyen condiciones variantes de temperatura y humedad, debido a los cambios en la amplitud de la onda guiada transmitida. Finalmente, se entrenó una red neuronal de tipo mapa auto-organizado SOM como herramienta de clasificación considerando un rango de temperaturas de operación en la sección de tubería, lo cual permite identificar daños tipo fuga y agregación de masa en condiciones de temperatura variable.

Los resultados del presente trabajo de grado son parte del proyecto “Monitorización y detección de defectos en estructuras usando algoritmos expertos embebidos” financiado por COLCIENCIAS. Así, el algoritmo de detección de fallas en estructuras aplicando PCA y piezo-diagnosís ha sido previamente validado por los grupos de investigación CEMOS de la UIS (Bucaramanga, Colombia) y CoDALab de la UPC (Barcelona, España).

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la temperatura y la humedad sobre el desempeño de un algoritmo de detección de fugas en tuberías de acero carbono basado en análisis de componentes principales y piezo-diagnosis, bajo condiciones controladas de laboratorio.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Crear condiciones variables y controladas de temperatura y humedad en una sección de tubería de acero carbono en un montaje de laboratorio.
- Crear escenarios de casos fugas en una sección de tubería de acero-carbono, contemplando variaciones de temperatura y humedad, con el fin de evaluar la robustez del algoritmo de detección de fugas.
- Evaluar el desempeño del algoritmo de detección de fugas en una sección de tubería de acero carbono ante cambios de humedad y temperatura controladas.

2. MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo se presentan los conceptos básicos utilizados en la metodología, donde se describen los fundamentos y conceptos relacionados con la monitorización de salud estructural, PCA, ondas guiadas, *piezodiagnosis*, los efectos de las condiciones ambientales a evaluar en el proyecto de investigación y un algoritmo de clasificación basado en redes SOM que se usó como herramienta de identificación de daños a diferentes condiciones de temperatura.

2.1 MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL

La monitorización de Salud Estructural (SHM por sus siglas en inglés) comprende el uso de diversas técnicas de detección utilizadas para lograr determinar el estado funcional de una estructura. El énfasis se encuentra en dos características de acuerdo a Balageas et al [9]:

- El uso de sensores para el registro de señales de una manera que se puedan realizar ensayos no destructivos (NDT) y se puedan convertir en una parte integral y así puede estar durante la operación y ciclo de vida de la estructura.
- Los métodos de reducción de datos y técnicas reversibles que permiten la identificación de parámetros físicos afectados por la presencia de los daños por lo cual se establece un diagnóstico.

SHM no está orientada por el tipo de aplicaciones o clases de problemas, pero presenta amplias técnicas como análisis de vibración, análisis modal y ondas guiadas con el uso de sensores de fibra óptica, acústico-ultrasonidos utilizando transductores piezoeléctricos entre otros [9] [10].

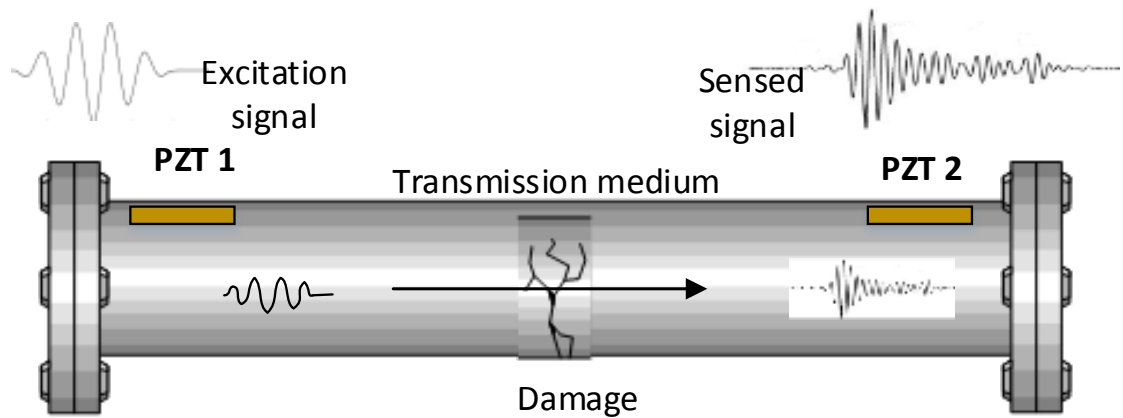
3. DETECCIÓN DE DEFECTOS EN ESTRUCTURAS USANDO PIEZO-DIAGNOSIS

La *piezodiagnos* se define como una técnica de SHM que se basa en el uso de ondas guiadas obtenidas al instrumentar una estructura con dispositivos piezoeléctricos PZT, aprovechando su dualidad actuador-sensor. Así, el diagnóstico del estado actual de una estructura se realiza mediante el análisis estadístico de las características de propagación de la onda guiada a través de la estructura [11] [12] [13]. La *piezodiagnos* se basa en dos conceptos principales: la piezoelectricidad y las ondas guiadas.

Mediante la caracterización de la propagación de ondas guiadas en la superficie de una estructura, es posible detectar alteraciones producidas por daños. Las ondas guiadas tienen la ventaja de viajar largas distancias dentro de los límites de la estructura en estudio, con una leve atenuación y con alta sensibilidad a pequeños defectos [14]. No obstante, las ondas guiadas son muy sensibles a variaciones ambientales y operacionales, ya que las ecuaciones de velocidad dependen de las características del medio de transmisión, y estas a su vez pueden cambiar en función de condiciones como la temperatura [15].

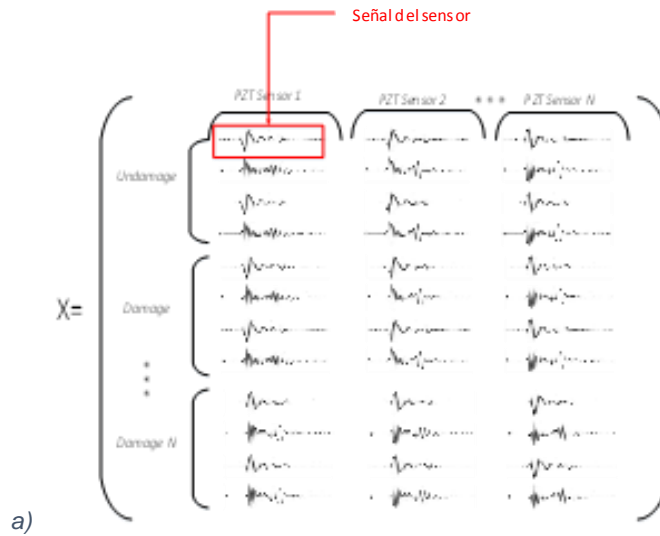
Las ondas guiadas pueden ser transmitidas y generadas por elementos piezoeléctricos (PZT) en configuración actuador-sensor, como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1. Ilustración del comportamiento de la onda guiada sobre una estructura.



De acuerdo con la Figura 1, el PZT/modo actuador es excitado a una frecuencia específica y el PZT/modo sensor permite registrar la señal emitida en otro punto de la estructura. El viaje de la onda es caracterizado por cambios en la amplitud en función del tiempo, las cuales representan las reflexiones y dispersiones generadas por alguna discontinuidad presente en la estructura [11] [16]. De este modo, los PZT sienten el viaje de la onda guiada afectada durante el recorrido entre el actuador y el sensor adheridos en la estructura. Como resultado, la información correspondiente a estados sin daño y con daño, es organizada en una matriz de como muestra la Figura 2.

Figura 2. Creación de matriz de estados de la estructura

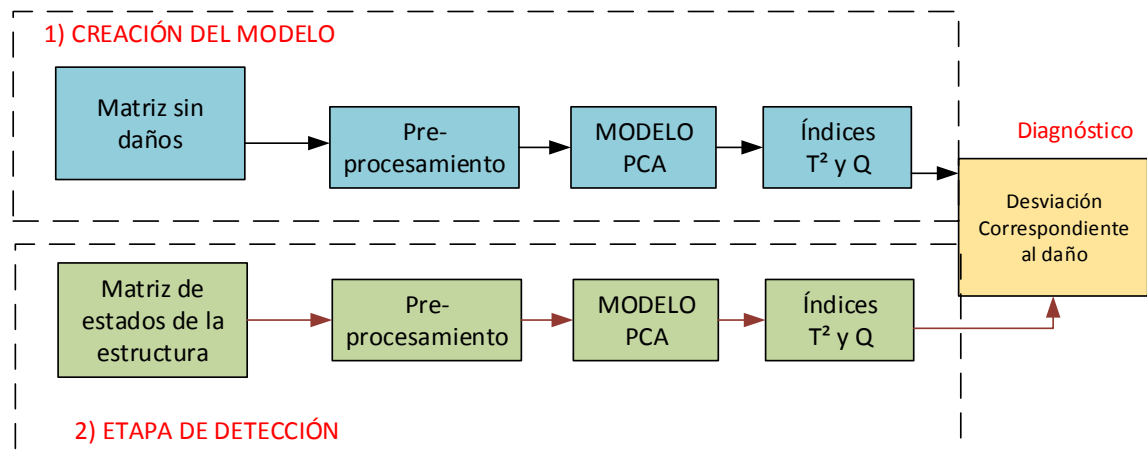


3.1 IDENTIFICACIÓN DE DEFECTOS ESTRUCTURALES MEDIANTE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)

Cuando se realiza la monitorización de una estructura en tiempo real o de forma periódica, se llega a disponer de un gran conjunto de datos, los cuales en ocasiones resultan complejos de analizar. Por tal motivo, se usan técnicas de procesamiento estadístico como Análisis de Componentes Principales (PCA), que ayuden a reducir el tamaño de los datos y a extraer la información más relevante. En los últimos años, diferentes publicaciones han demostrado que con el uso de PCA se puede llegar a detectar las fallas en la estructura [17] [18] [19] [4], con muy buenos resultados y bajo costo computacional. Así, mediante PCA se normaliza la información y se extraen patrones de información recogida por los sensores (en este caso piezoeléctricos) en diferentes condiciones de operación (con defectos y sin defectos) [3] [2]. La implementación de PCA bajo el enfoque de SHM es presentado en [2], que consiste en la creación de un modelo de línea base usando registros piezoeléctricos obtenidos de la condición sin daño y

posteriormente se evalúa la condición actual mediante el cálculo de índices estadísticos. En la Figura 3, se ilustra el esquema conceptual para la aplicación de PCA en el contexto de SHM.

Figura 3. Esquema conceptual de PCA en el contexto de SHM



De acuerdo con la Figura 3, mediante PCA es posible detectar comportamientos anormales en el viaje de la onda guiada a través de la superficie de la estructura. Para ello, se calculan dos índices estadísticos comúnmente utilizados en procesos de control: Q-estadístico y T²-estadístico. El estadístico T² es una medida de la variación de cada muestra dentro de la representación obtenida mediante PCA [2], mientras que el índice Q es la medida de la diferencia o residuo que hay entre una muestra y su proyección en el espacio de características reducidas [2].

Resultados previos han mostrado que el índice Q es mucho más sensible respecto al índice T². Esto es debido a que los valores de Q tienden a ser más pequeños por ser una medida del error cuadrático (Squared Prediction Error), mientras que los valores del índice T² son altamente dependientes de la varianza y por lo tanto requieren de un gran cambio para que sea detectable.

3.2 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD EN LA PIEZODIAGNOSIS

Como se presentó en la sección 0, la detección de daños en tuberías mediante el principio de *piezodiagnos*, se basa en los conceptos de piezoelectricidad y ondas guiadas. En este capítulo se describen los principales efectos que causan los cambios de humedad y temperatura en los tres componentes del sistema de piezo diagnosis: tubería, onda guiada y piezoeléctrico.

3.2.1 Efectos de la Humedad

Efecto en las tuberías: Uno de los factores que limitan la vida de las piezas metálicas en servicio es el ataque químico o físico-químico que sufren en el medio que les rodea, por lo tanto, la corrosión atmosférica es la producida por la acción combinada del oxígeno del aire y la humedad. Como en la atmósfera siempre existe humedad a la temperatura ambiente, los metales se destruyen más por corrosión que por la oxidación. Siendo sus efectos mucho mayores en los metales que se encuentren en contacto directo con agua [20].

Efecto en los piezoeléctricos: Cuando los piezoeléctricos entran en operación a altas humedades relativas y a temperaturas altas, se puede presentar un caso electro-químico, el cual ocurre cuando las moléculas de agua entran en contacto con los electrodos interiores de los piezoeléctricos produciendo grandes campos eléctricos, obteniendo como resultado un corto circuito entre los electrodos, causando un daño irreparable en el piezoeléctrico. [21] [22]

Efecto en la onda guiada: Debido a que la generación de ondas guiadas se efectúa mediante el uso de dispositivos piezoeléctricos, el proceso de adquisición de datos es sensible a las variaciones ambientales, en este caso de humedad, ya

que se afecta el estado nominal de la estructura (tubería) y la señal registrada. Estos cambios han sido reportados como una diferencia en amplitud y fase en la señal de respuesta obtenida [14].

3.2.2 Efectos de la Temperatura

Efecto en las tuberías: Cuando la sección de tubería es sometida a altas temperaturas, es posible que se genere termo-fluencia, que se presenta cuando la temperatura empieza a aumentar, de manera que alcanza a generar una deformación hasta el punto de sufrir un defecto o llevar a la ruptura del material [23].

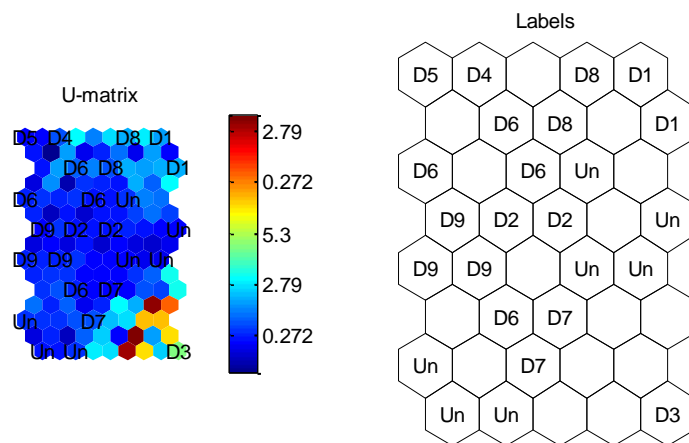
Efecto en los piezoeléctricos: Los piezoeléctricos al ser sometidos a altas temperaturas en tiempos prolongados, llegan a presentar cambios en sus propiedades, como sus constantes piezoeléctricas, las propiedades elásticas del material del piezoeléctrico causando cambios en la velocidad de la onda guiada y una expansión térmica siendo un cambio relativamente bajo en el espesor en el piezoeléctrico. [24]

Efecto en la onda guiada: El principal efecto debido a cambios de la temperatura en las ondas guiadas que ha sido reportado en el estado del arte, corresponde a cambios de amplitud en las señales de respuesta [25].

3.3 CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS USANDO MAPAS AUTOORGANIZADOS, ANTE CONDICIONES VARIABLES DE TEMPERATURA

Un mapa auto-organizado (SOM, por sus siglas en inglés) es una clase de red neuronal artificial, que convierte una cantidad elevada de datos en una relación geométrica más simple, permitiendo su clasificación en un espacio más reducido. Así, en la capa de salida de las redes SOM se sintetiza la distribución estadística de los datos de entrada, permitiendo crear clústers de información con características similares. Para realizar el agrupamiento, la red neuronal SOM organiza los clústers asignando pesos entre los datos de entrada y su respectivo clúster en el mapa. Dichos pesos son inicializados aleatoriamente, y luego redistribuidos mediante la minimización de la distancia Euclidiana entre los datos de entrada y los respectivos clústers [4]. La Figura 4 ilustra la representación de una red SOM.

Figura 4. Ilustración de una red neuronal (SOM).

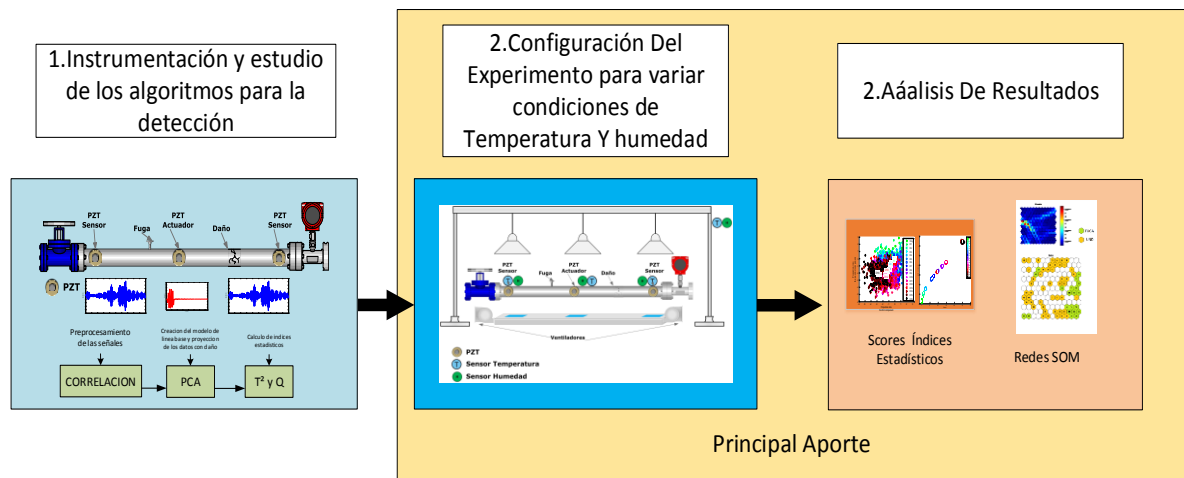


De acuerdo con la Figura 4, los datos correspondientes a los diferentes estados de la estructura (Sin daño, con daño) son agrupados en clústers de acuerdo con la distribución estadística original. Asimismo, mediante el uso de redes SOM, es posible organizar la información de defectos estructurales considerando variaciones de temperatura para obtener un algoritmo de clasificación basado en distancias Euclidianas. Dado de que la herramienta permite organizar información, y separar en clústers los datos con características similares se implementó con el fin de diferenciar una estructura con daños de una sin daño.

4. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

El desarrollo del presente trabajo de grado considera tres etapas como se ilustra en la Figura 5.

Figura 5. Diagrama de la metodología implementada para el desarrollo del proyecto.



De acuerdo con la Figura 5, la primera etapa corresponde a la configuración de la instrumentación disponible en el laboratorio para el registro de señales piezoeléctricas y al estudio de los algoritmos de detección de defectos desarrollados por investigadores de los grupos de investigación CEMOS (UIS, Colombia) y CoDALab (UPC, España). La segunda etapa consiste en la adecuación del experimento para la evaluación de los índices de detección de defectos bajo condiciones variantes de temperatura y humedad. Finalmente, en la

tercera etapa se realiza el análisis de resultados mediante la identificación de variaciones en los índices de daño y el entrenamiento de un algoritmo de clasificación usando redes SOM. La siguiente sección muestra en detalle cada una de las etapas de la metodología implementada.

4.1 CONFIGURACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN Y ESTUDIO DE LOS ALGORITMOS DE DETECCIÓN DE DEFECTOS.

En esta sección se describe la instrumentación con la que cuenta el grupo de investigación y que ha sido utilizada para el registro de señales piezoeléctricas, así como el algoritmo utilizado para detección de agregación de masas y fugas en una sección de tubería de acero carbono en condiciones de temperatura y humedad ambiental (sin variaciones significativas).

4.1.1 Sistema piezo activo. Los elementos principales utilizados para la realización de pruebas experimentales del presente proyecto, disponible en el laboratorio de investigaciones de la sede UIS-Guatiguará, se muestran en la Figura 6.

Figura 6. Elementos utilizados durante el proyecto de investigación



De acuerdo con la Figura 6, la estructura de pruebas corresponde a una sección de tubería de acero carbono de 1" de diámetro por 1 m de longitud, con bridas en sus extremos. Una válvula de bola ubicada en un extremo permite controlar la presión de aire suministrado por un compresor, y registrada por un manómetro analógico ubicado en el otro extremo. En la sección de tubería 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, que emulan dispositivos de robo. El equipo de adquisición y registro está constituido por los siguientes elementos:

Sistema Piezoeléctrico: Consiste en tres (3) dispositivos piezoeléctricos (PZT) adheridos a la superficie de la sección de tubería. El PZT de actuación se encuentra ubicado en el centro de la sección, mientras que dos PZT ubicados en los extremos son utilizados como dispositivos de sensado.

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.

Sistema de actuación: Para el desarrollo del montaje experimental se genera una onda tipo *burst* de frecuencia variable, usando el Picoscope®.

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.

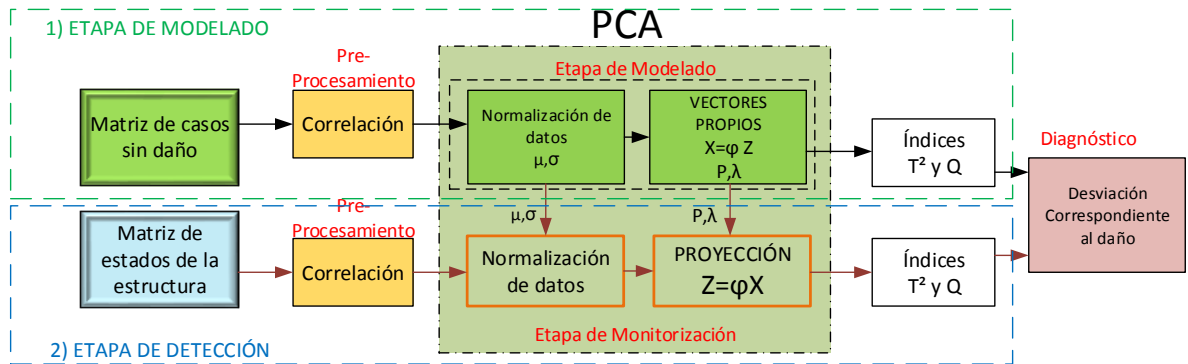
Sistema de adquisición: Tarjeta DAQ National Instruments® que se encarga de generar los pulsos digitales que controlan la tarjeta multiplexora.

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 filtrado (eliminación de tendencias, ruido de 60 Hz y ruidos de baja/alta frecuencia).

4.1.2 Algoritmo de detección de defectos usando estadísticos PCA. Se cuenta con un programa en MATLAB® que implementa el algoritmo de detección de defectos en estructuras basado en PCA presentado en la Figura 7. Dicho algoritmo fue desarrollado por investigadores del grupo CEMOS y adaptado de acuerdo con los equipos y estructura disponible en el laboratorio de la sede UIS-Guatiguará.

Figura 7. Esquema modular del algoritmo implementado.



De acuerdo con la Figura 7, una vez construida la matriz de casos sin daños, se obtiene el modelo PCA utilizado por el algoritmo. Los pasos a seguir son los siguientes:

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

$$\bar{X}_{i,j} = \frac{X_{i,j} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (1)$$

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 σ_s de las N mediciones registradas para todas las i repeticiones realizadas por cada sensor s , así como el valor medio μ_j de cada columna. La matriz normalizada \bar{X} está compuesta por cada valor $\bar{X}_{i,j}$ estandarizado por su respectivo valor medio μ_j y desviación estándar σ_s como establece la ecuación (1).

- Calcular la matriz de covarianza de la matriz normalizada, definida en la ecuación (2):

$$C = \bar{X}^T \bar{X} \quad (2)$$

- 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 φ y valores propios λ 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 (3) y (4).

$$[\varphi, \lambda] = svd(C) \quad (3)$$

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

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

- La matriz de normalización, representada por los valores medios μ_j y de desviación estándar σ_s obtenidos de la matriz de casos sin daños X .
- La matriz de transformación φ que corresponden a los vectores propios.
- Las varianzas de las componentes principales representadas por los r valores propios λ .

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^2 .

- **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 (5).

$$Z = \varphi^T \hat{X}_{new} \quad (5)$$

En la ecuación (5), \hat{X}_{new} es el vector normalizado aplicando el método de *group scaling* (ecuación (1)) y utilizando los valores medios μ_j y las desviaciones estándar σ_s del modelo de línea base.

- **Índice Hotelling T^2 :** El índice T^2 es la distancia en el espacio r -dimensional definido por los componentes principales respecto al origen, calculado usando la ecuación (6).

$$T^2 = \sum_{k=1}^r \frac{t_k^2}{\lambda_k} = Z^T \lambda^{-1} Z \quad (6)$$

En la ecuación (6), el índice T^2 se calcula mediante la sumatoria de los cuadrados de cada elemento t_k del vector de SCORES o proyecciones normalizado por su respectiva varianza λ_k o valor propio.

- **Índice Q-estadístico:** El índice Q corresponde al error cuadrático expresado en la ecuación (7).

$$Q = \sum_k (e_k)^2 \quad (7)$$

Donde e_k son los elementos del vector de error residual obtenido luego de reconstruir la medición como se expresa en la ecuación (8).

$$e = \varphi Z - \bar{X}_{new} \quad (8)$$

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.

4.2 CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO PARA LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD

En esta sección se describe la adecuación e instrumentación desarrollada para la realización de experimentos considerando cambios de temperatura y humedad en una sección de tubería, que constituye uno de los resultados del presente proyecto de grado.

4.2.1 Estructura para el control de variaciones de temperatura. Con el objetivo de facilitar el control de perturbaciones relacionadas con variaciones de temperatura, se construyó un marco en ángulo de aluminio de 100 x 50 cm (ancho x alto) ANEXO B. Diseño y operación del sistema de emulación y registro de condiciones ambientales (Humedad y Temperatura).

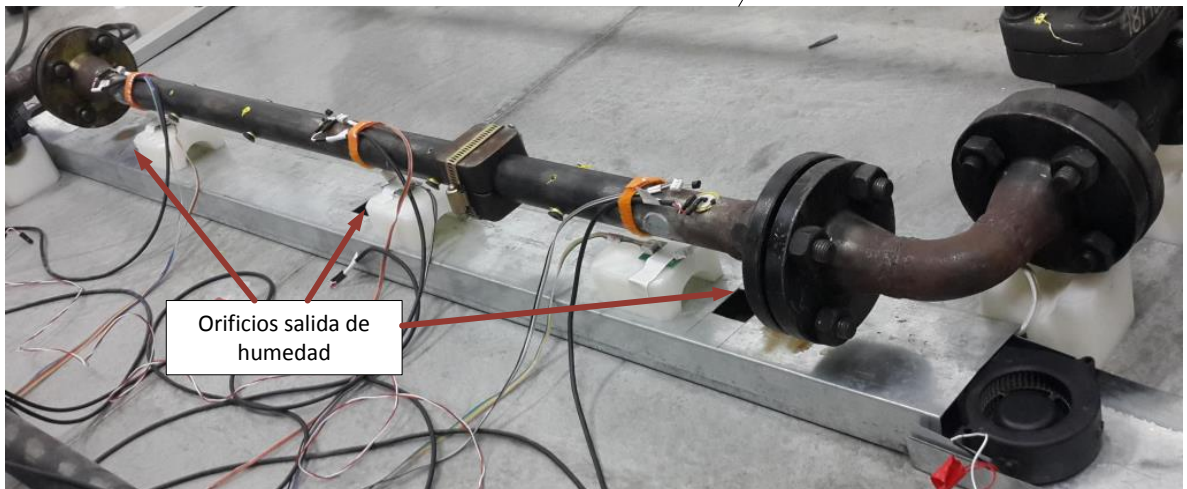
Figura 8. Estructura construida para variar temperatura



Como se ilustra en la Figura 8, sobre la estructura se acondicionaron tres 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 tres 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, se implementó un lazo de control PI por medio de un control de fase, que permite regular la intensidad de la luz irradiada por las lámparas y realizar seguimiento a valores de temperatura establecidos mediante curvas de referencia. El controlador fue programado en la plataforma Arduino DUE usando la librería PIDLibrary [26].

4.2.2 Estructura para el control de variaciones de humedad. Para realizar variaciones en la humedad cerca de la sección de tubería, se construyó un canal galvanizado de 100x20x3 [cm] para acumular agua que luego es utilizada para generar perturbaciones de la humedad en el ambiente (Figura 9).

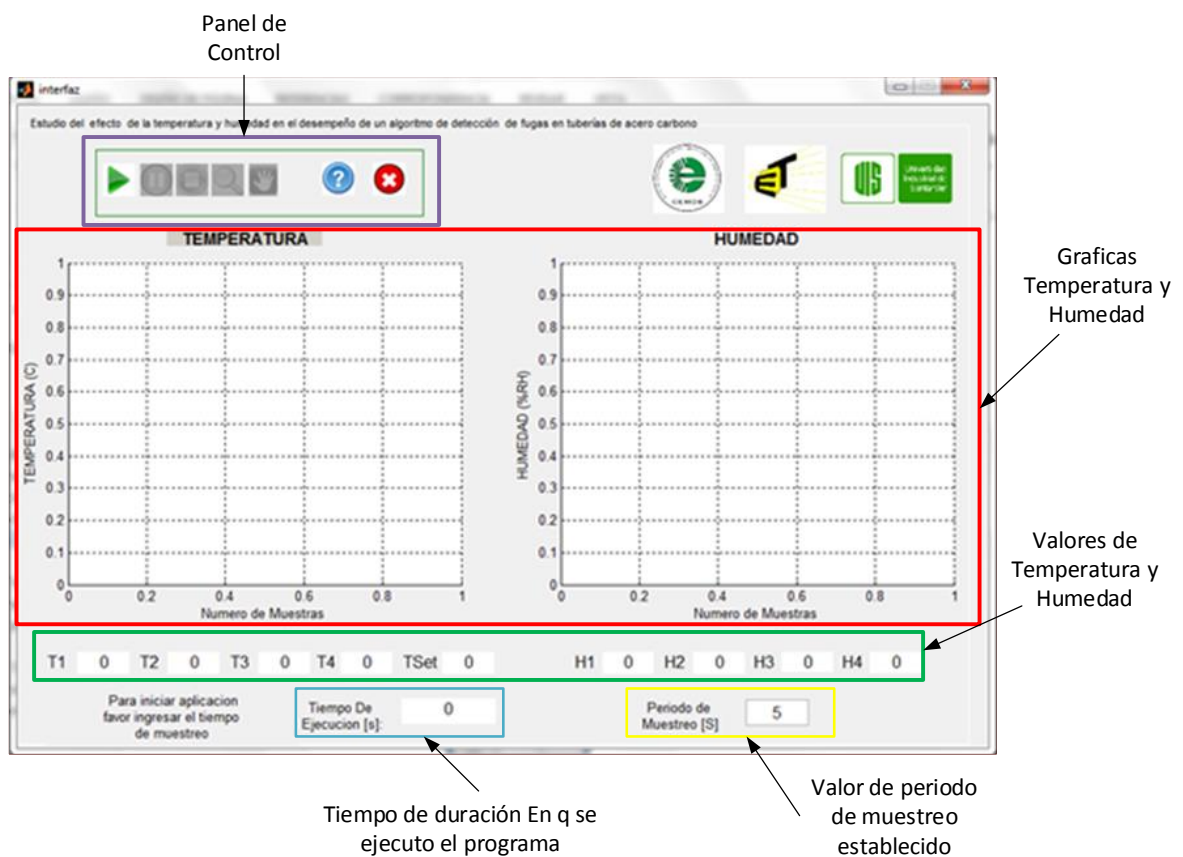
Figura 9. Estructura para variar humedad



Como se ilustra en la Figura 9, el canal fue instrumentado con dos resistencias térmicas que permiten calentar el agua hasta el punto de ebullición, logrando de esta forma generar vapor de agua. El vapor de agua sale a través de 3 orificios que afectan principalmente la zona donde se encuentran los PZT's adheridos a la superficie de la tubería. Además de las resistencias térmicas, se instalaron dos ventiladores (uno a cada lado de la estructura) que permiten generar aire frío. De esta manera, es posible modificar la humedad en el ambiente usando vapor, aire frío u homogenizar la perturbación de humedad en los alrededores de la estructura mediante combinación de los dos sistemas.

4.2.3 Interfaz gráfica para el registro de variaciones de temperatura y humedad. El registro de las variaciones de temperatura y humedad se realizó por medio de una interfaz gráfica de usuario programada en Matlab® (Figura 10), la cual integra los sistemas de control de temperatura/humedad con el sistema de registro de señales piezoeléctricas.

Figura 10. Interfaz para el registro de Temperatura y Humedad.



En la Figura 10 se observa los controles de la interfaz. Luego de iniciar el registro, se van generando de manera continua las gráficas de temperatura y humedad, y se actualizan sus valores de acuerdo al periodo de muestreo establecido.

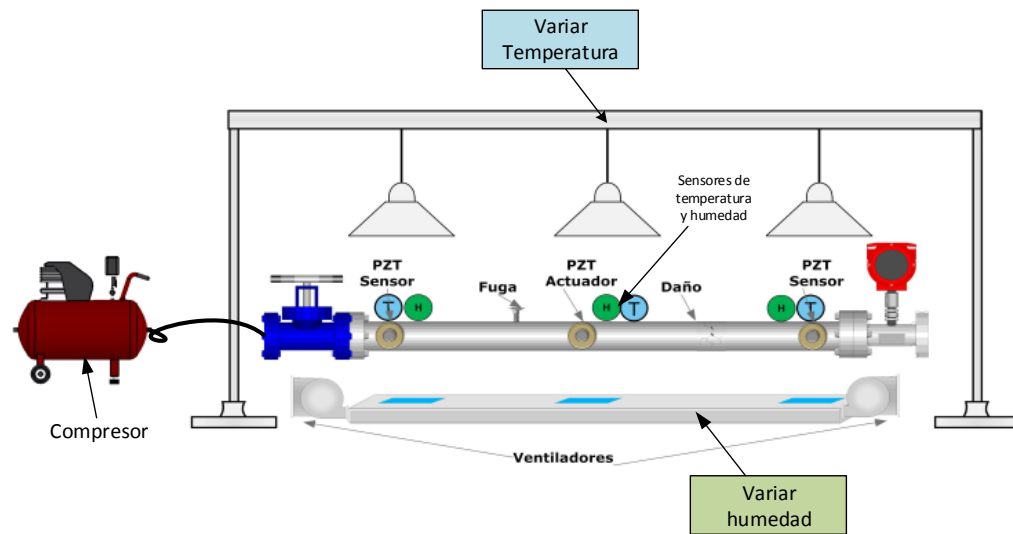
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con la revisión conceptual realizada en la sección 0, los efectos que causan los cambios en las condiciones de temperatura y humedad afectan el estado nominal de la sección de tubería, las propiedades de los piezoeléctricos y las características de las ondas guiadas transmitidas a través de la superficie de la tubería. No obstante, en este trabajo de grado el estudio de los efectos que causan las variaciones de temperatura y humedad sobre el sistema de detección de fugas y agregaciones de masas, no se efectúa considerando los efectos individuales, sino del sistema integral. Así, el análisis se realizó observando la tendencia o comportamiento de los índices estadísticos usados para la identificación del estado de la estructura. Adicionalmente, se entrenó una red SOM como método de clasificación de defectos considerando un rango de operación de temperatura. De esta manera, el estudio de las variaciones de temperatura y humedad se realiza desde el punto de vista de reconocimiento de patrones considerando el sistema de detección de defectos como una caja negra que permite o no reconocer el estado actual de la estructura. Así, la influencia corresponde a la capacidad de identificación o no del defecto en la sección de tubería en estudio, cuando las condiciones de temperatura y humedad son variantes.

5. CASOS DE ESTUDIO

Para evaluar el efecto de la temperatura y de la humedad en el algoritmo de detección de defectos, se plantearon diferentes escenarios o casos de estudio, los cuáles fueron realizados sobre la sección de tubería de acero carbono. Los defectos considerados corresponden a agregación de masas y fugas en la sección de tubería. En la Figura 11 se presenta un diagrama general de la instrumentación utilizada para la creación de los escenarios.

Figura 11. Diagrama de experimento



La Figura 11 muestra un sistema integrado entre el sistema de registro de señales piezoeléctricas y el sistema de control de condiciones de temperatura y humedad. Para el registro de temperatura y humedad se utilizaron los integrados LM35 y HSM-20G respectivamente, los cuales fueron calibrados respecto a mediciones obtenidas con un termo higrómetro referencia FLUKE 971. Ver ANEXO A.

Caracterización de sensores (humedad y temperatura) y calibración de sistema de adquisición de datos.

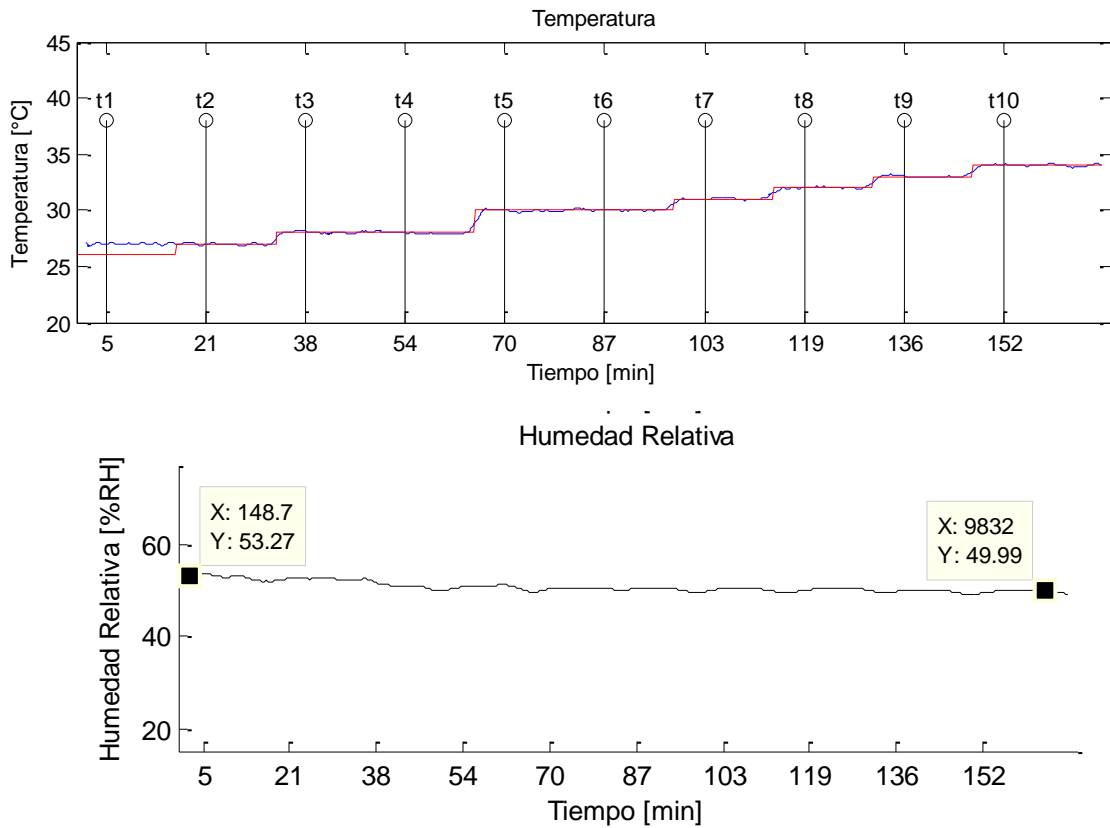
- **LM35:** Sensor de temperatura de rango de operación de -55 a 150 [°C], de bajo costo, con una precisión de 1 [°C], posee una escala de factor lineal y es calibrado directamente en Celsius
- **HSM-20G:** Sensor de temperatura y humedad, con precisión de medición de $\pm 5\%$ de humedad relativa, rango de humedad relativa de 20% a 95%, posee una respuesta lineal con rango de salida de 1 a 3 voltios en DC.

En la siguiente sección se describen de manera detallada cada uno de los casos de estudio que se tuvieron en cuenta para la evaluación del desempeño del algoritmo.

5.1 ESCENARIO 1: VARIACIÓN DE TEMPERATURA CON FUGAS

Para la realización del experimento se tomó como punto de referencia la curva de temperatura de la ciudad de Barrancabermeja, usando un reporte encontrado con 10 registros en un día medidos cada hora, mostrados a continuación: [26,27,28,28,30,30,31,32,33,34]. Para reducir el tiempo de la prueba los cambios se realizaron por periodos de 980 segundos y no cada hora como reporta la curva de temperatura. En la Figura 12 se muestra la curva de referencia con los respectivos cambios de temperatura y los respectivos tiempos de registro. Donde se consideraron que los cambios en la humedad eran constantes dado que las mediciones presentamos variaciones no mayores al 4% de humedad relativa.

Figura 12. a) Grafica de temperatura (señal azul (referencia), señal roja (variación temperatura) b) humedad relativa



De acuerdo con la Figura 12 a), el registro de las mediciones de temperatura se realizó cuando el valor medido se encontraba estable. Así mismo, el registro de las señales piezoeléctricas se realizó de forma simultánea usando el sistema de multiplexado, el Picoscope y el sistema DAQ.

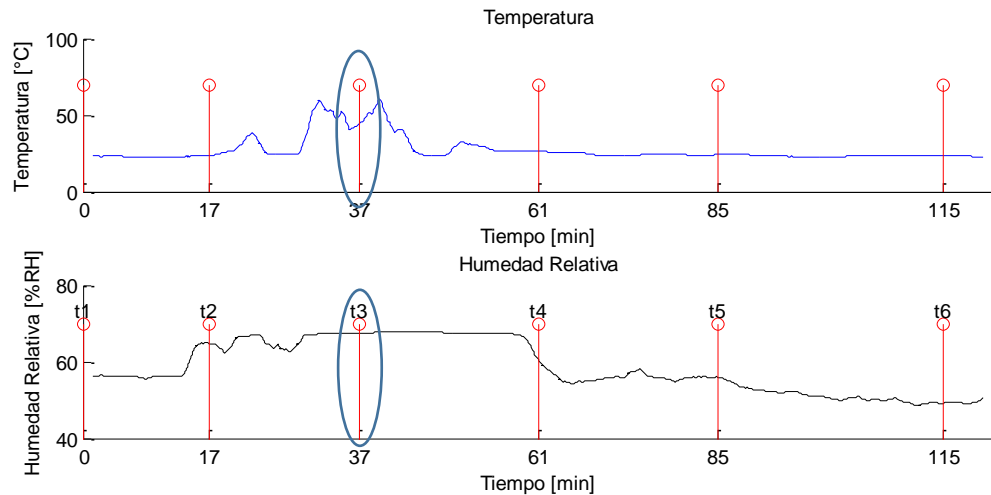
5.2 ESCENARIO 2: VARIACIÓN DE HUMEDAD CON FUGAS

Para el experimento se utilizó un montaje que permitió variar la humedad con resistencias eléctricas y agua (sección 0), el cual se inició con la humedad relativa a la que se encontraba el laboratorio tomando como registro los datos de la estructura sin daños y otro registro con la emulación de una fuga. Posteriormente se energizaron las resistencias eléctricas implementadas en el montaje, para lograr aumentar la humedad relativa y adquirir dos nuevos registros: sin daño y con fuga. Para garantizar la mayor variación de humedad posible en el experimento se planteó un procedimiento de apagado y encendido de las resistencias como se detalla en la Tabla 1, donde para cada uno de estos tiempos o variaciones en la humedad se realizó un registro sin daño y uno con la fuga.

Tabla 1. Tabla de procedimientos del experimento de humedad para fugas.

Tiempo [min]	Prueba	Descripción
0	T0	Toma de datos bajo condiciones iniciales en reposo
13	T1	Se energizaron las resistencias
17	T2	Toma de datos
37	T3	Toma de datos con la humedad estable
61	T4	Toma de datos con una humedad decreciente
85	T5	Toma de datos con una humedad decreciente
115	T6	Toma de datos con humedad baja y en estado estable

Figura 13. Gráfica de datos obtenidos durante el experimento de humedad, grafica superior (temperatura), grafica inferior (humedad relativa).



Como se puede observar en la Figura 13. En cada uno de los t_x se realizó un registro de los datos piezoeléctricos de la estructura, donde se ve que existe un cambio considerable en la humedad, además de ello se pudo ver que por el método de humidificación utilizado, se generaban cambios en la temperatura. Debido que la humedad y la temperatura son dependientes entre ellas, por ello se tomó la temperatura como dominante y la humedad como perturbación, siendo la temperatura la condición a controlar.

5.3 ESCENARIO 3: VARIACIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD CON FUGAS

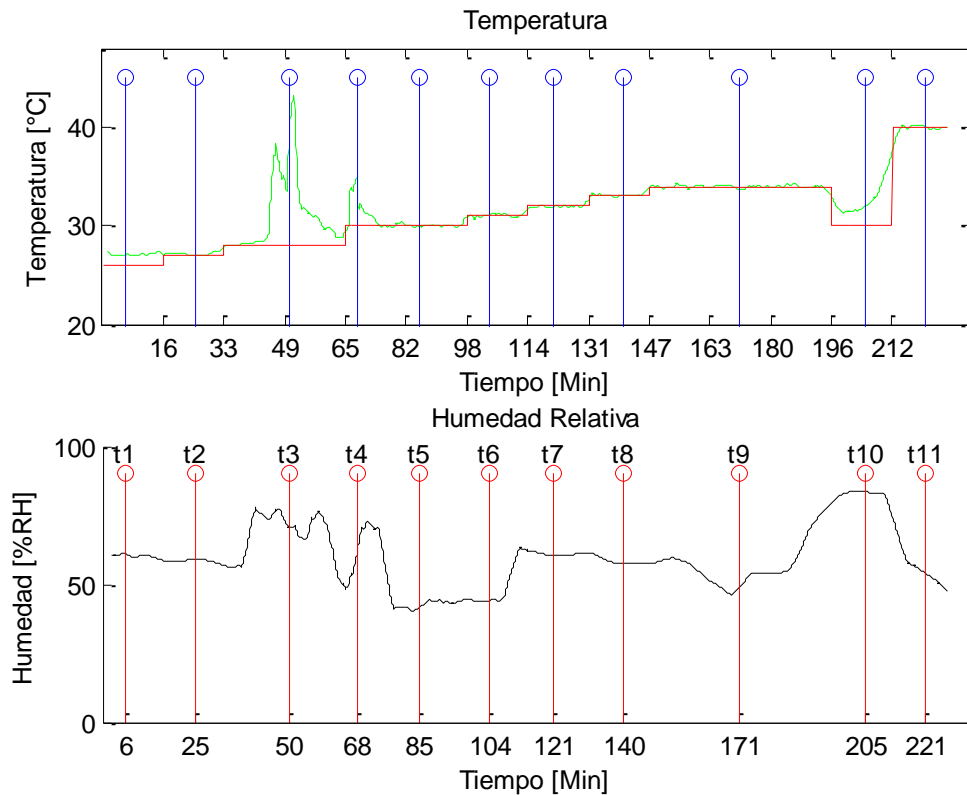
Con el experimento de temperatura, humedad y fugas se requirió el uso del sistema de control de temperatura y el dispositivo que permitía variar la humedad, con el fin de realizar las variaciones de estas dos condiciones ambientales en la

tubería. La condición inicial corresponde a la tubería sin perturbaciones de ambiente, mientras que condiciones diferentes corresponden a variaciones de humedad ejecutadas por ciertos tiempos como se registra el procedimiento en la Tabla 2. Igualmente se graficó el comportamiento del control como se observa en la Figura 14. A medida que se variaban estas condiciones, se realizaron los registros de los sensores de humedad y de temperatura. Además, en cada uno de los cambios realizados se obtuvo un registro de los datos sin daño y con fuga de la estructura para su posterior análisis. En este procedimiento se realizaron los cambios de temperatura cada 980 segundos donde el controlador encargado de variar la temperatura fue establecido mediante los siguientes valores [26,27,28,28,30,30,31,32,33,34,30,40], las cuales corresponden a los datos de la temperatura registrada de la ciudad de Barrancabermeja y a los que se incluyeron los dos datos adicionales al finalizar la curva.

Tabla 2. Tabla de procedimientos para el experimento Temperatura, Humedad y Fugas.

Prueba	Descripción
T0	Experimento inicial a condiciones ambientes sin perturbaciones
T1	Perturbación con la temperatura
T2	Perturbación con la temperatura
T3	Perturbaciones con la temperatura y humedad (encendido resistencia)
T4	Perturbaciones con la temperatura y humedad (encendido resistencia)
T5	Perturbación sólo con la temperatura
T6	Perturbación con temperatura y humedad (Ventilador)
T7	Perturbación sólo con la temperatura, humidificador apagado
T8	Perturbación con temperatura y humedad (encendido resistencia)
T9	Perturbación con temperatura y humedad (Ventilador)
T10	Perturbación con temperatura y humedad (Ventilador, resistencia encendida)
T11	Perturbación con temperatura, humidificador apagado

Figura 14. Gráfica de datos obtenidos durante el experimento de humedad y temperatura, gráfica superior (temperatura), gráfica inferior (humedad relativa).

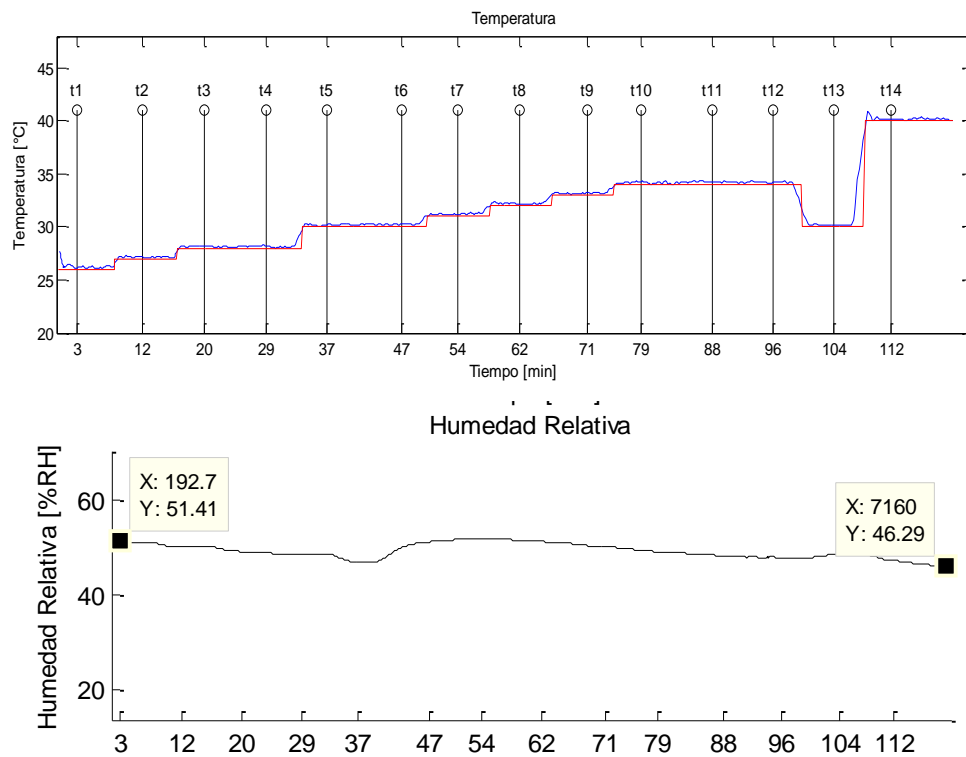


5.4 ESCENARIO 4: VARIACIÓN DE TEMPERATURA CON AGREGACIÓN DE MASA

Con los registros de temperatura utilizados en las anteriores secciones y con el control de temperatura (sección 0), se creó un escenario experimental donde se emularon las variaciones de temperatura y humedad, acercándose a un comportamiento cercano al de un entorno real. Los cambios de temperatura fueron aplicados cada ocho minutos siguiendo la curva de temperatura expuesta en los

escenarios anteriores, donde en ese lapso de tiempo se hace toma de datos sin daño o en estado nominal y con agregación de masa, aclarando que la toma de los registros se hizo cuando la temperatura se encontraba estabilizada en la sección de tubería. En la Figura 15 se muestra los tiempos de registro, los cambios de temperatura y la curva de referencia que se siguió durante el desarrollo del experimento.

Figura 15. a) Señal azul (variación temperatura), señal roja (referencia). b) Humedad relativa



5.5 ESCENARIO 5: VARIACIÓN DE HUMEDAD CON AGREGACIÓN DE MASA

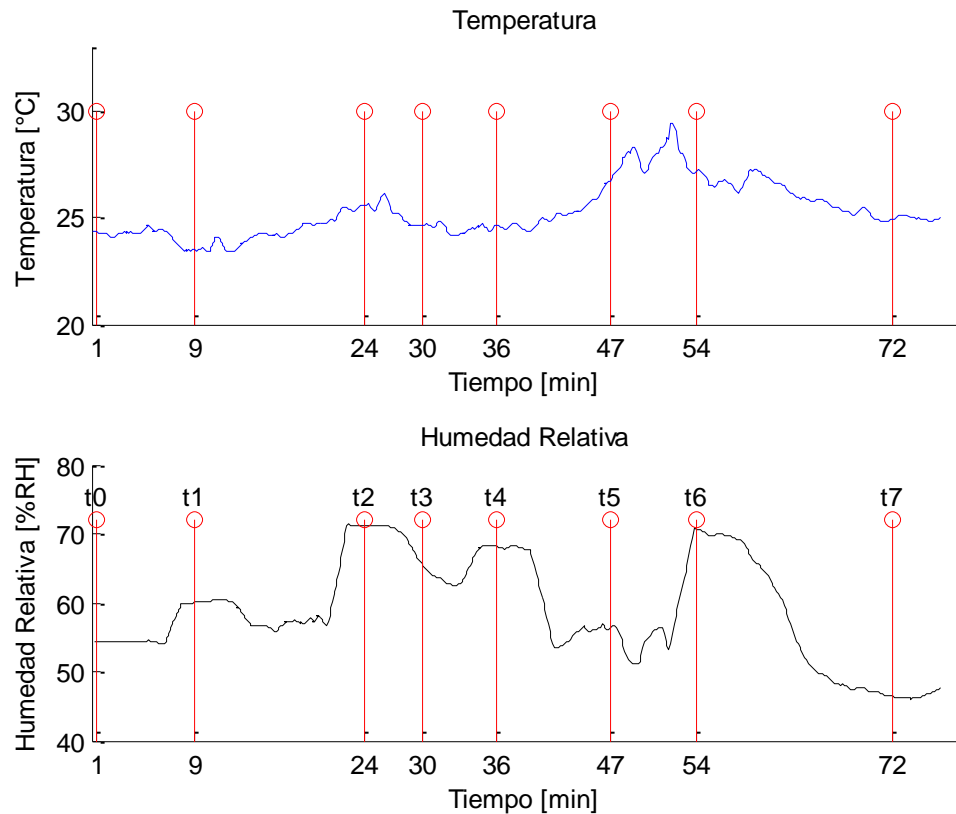
Este experimento se inició con la humedad relativa a la que se encontraba el laboratorio, tomando como registro los datos sin daños o estructura en estado nominal. Las variaciones se hicieron con el montaje que permitió variar la humedad nombrado en la sección 0. Para garantizar la mayor variación de humedad posible en el experimento, se planteó un procedimiento en el que se agregaron dos ventiladores y donde se hizo una combinación de encendido y apagado junto con las resistencias, tal como se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Tabla de procedimientos para el experimento variación de Humedad con masa.

Prueba	Descripción
T0	Experimento inicial a condiciones ambientes sin perturbaciones
T1	Se encendieron los ventiladores para variar la humedad
T2	Se encendieron las resistencias, con los ventiladores en funcionamiento
T3	Se apagaron las resistencias, manteniendo los ventiladores encendidos
T4	Se encendieron las resistencias, con los ventiladores en funcionamiento
T5	Se apagan los ventiladores y se mantienen las resistencias encendidas
T6	Se encendieron los ventiladores, con las resistencias encendidas
T7	Se apagaron las resistencias junto con los ventiladores

En la Figura 16 se pueden observar los valores, tanto de la temperatura, como de la humedad a la que fueron realizados los registros piezoeléctricos.

Figura 16. Grafica de datos obtenidos durante el experimento de humedad, con agregación de masa, grafica superior (temperatura), grafica inferior (humedad relativa).



5.6 ESCENARIO 6: VARIACIÓN DE HUMEDAD Y TEMPERATURA CON AGREGACIÓN DE MASA

El experimento de variación de humedad y temperatura fue uno de los más complejos ya que se debieron realizar diferentes procedimientos para garantizar la emulación de las variaciones de las condiciones ambientales de forma simultánea. Para ello se requirió del montaje de las lámparas y del montaje que permitió variar la humedad junto con los ventiladores y resistencias. El procedimiento que se llevó

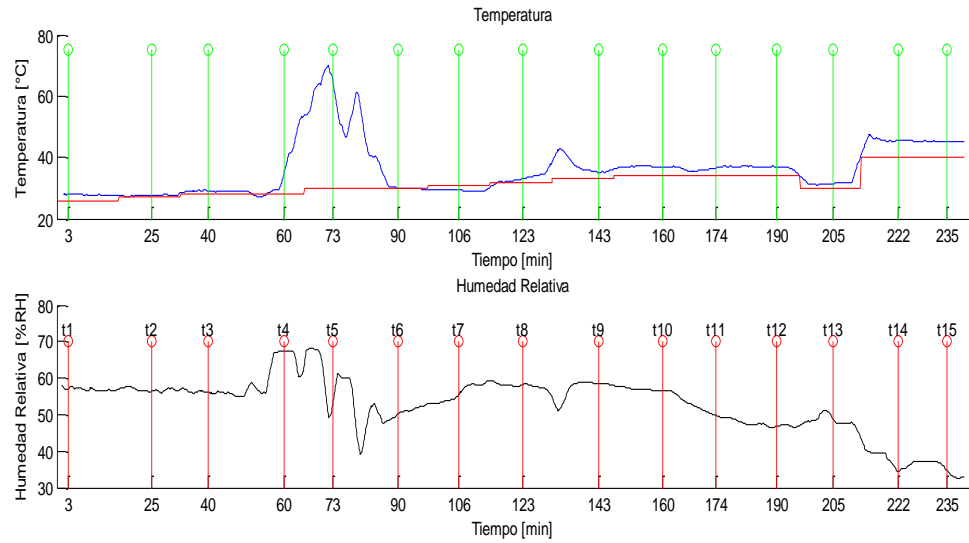
a cabo en este experimento se puede detallar en la Tabla 4, donde se puede identificar una pequeña descripción de cuál era la variación que se presentaba al realizar el registro piezoeléctrico.

Tabla 4. Tabla de procedimientos para el experimento Temperatura, Humedad, con agregación de masas.

Prueba	Descripción
T0	Condiciones en ambiente del laboratorio
T1	Sin perturbación de humedad, control de temperatura
T2	Sin perturbación de humedad, control de temperatura
T3	Sin perturbación de humedad, control de temperatura
T4	Perturbación humedad, solo resistencias, control de temperatura
T5	Perturbación humedad, solo resistencias, control de temperatura
T6	Perturbación humedad, resistencias con ventiladores, control de temperatura
T7	Perturbación humedad, resistencias con ventiladores, control de temperatura
T8	Perturbación humedad, resistencias con ventiladores, control de temperatura
T9	Perturbación humedad, solo ventiladores, control de temperatura
T10	Perturbación humedad, solo ventiladores, control de temperatura
T11	Ventiladores y resistencias apagados, control de temperatura
T12	Ventiladores y resistencias apagados, control de temperatura
T13	Ventiladores y resistencias apagados, control de temperatura
T14	Ventiladores y resistencias apagados, control de temperatura
T15	Ventiladores y resistencias apagados, control de temperatura

De la Figura 17, se pueden extraer los valores de las condiciones ambientales a las que se encontraba la estructura expuesta en el momento del registro piezoeléctrico.

Figura 17. Gráfica de datos obtenidos durante el experimento de humedad y temperatura, con agregación de masa, gráfica superior (temperatura), gráfica inferior (humedad relativa).



6. RESULTADOS

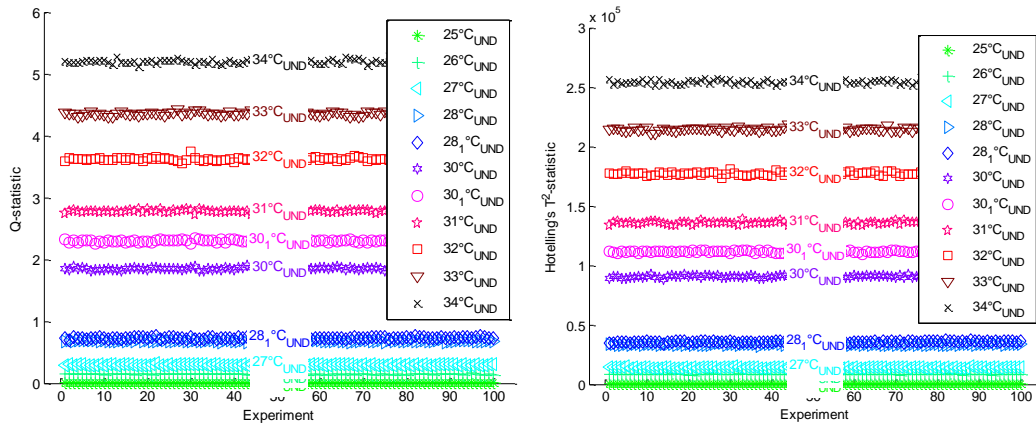
Los datos adquiridos en los seis escenarios descritos en la sección 0, fueron analizados, procesados y son presentados en este capítulo.

6.1 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA EN LA DETECCIÓN DE FUGAS

Los datos obtenidos en el experimento permiten mostrar cómo se comporta el algoritmo bajo cambios controlados de temperatura. Se tomaron los registros de 100 señales piezoeléctricas en 10 tiempos diferentes para el estado de la estructura sin daño y con daño (fuga en el mismo lugar e igual grado de apertura).

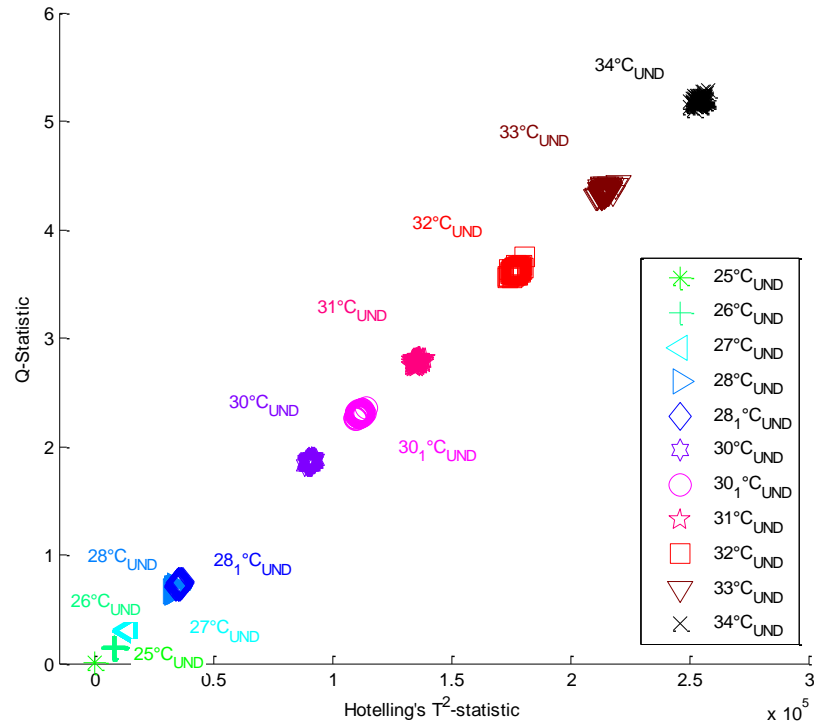
Con los datos registrados a temperatura ambiente se construyó el modelo base correlacionando la señal de actuación y la señal sensada. Posteriormente, mediante PCA se seleccionaron los más significativos para ser agregados en el modelo. Durante el desarrollo del experimento los datos sin daño registrados en los diferentes tiempos, fueron proyectados sobre el modelo creado, calculando los índices estadísticos T^2 y Q-estadístico, con el fin de realizar un estudio preliminar de la influencia de las variaciones de temperatura en la estructura y el comportamiento del algoritmo de detección. En las Figuras 18 y Figura 19 se muestran los resultados obtenidos en este experimento, donde cada uno de los paquetes de datos está etiquetado y con color diferente, dependiendo de la temperatura a la cual fueron registrados y el estado en el que se encontraba la estructura. (UND: estructura sin daño).

Figura 18. Gráfica de Q-estadístico (izquierda) y Gráfica de T^2 (derecha)



En la Figura 18 el eje *Experiment* corresponde a cada uno de los registros PZT realizados por cada adquisición de datos y en el eje y el valor de los índices Q y T^2 , se pueden observar los cambios en los índices Q y T^2 cuando se realizan cambios en la temperatura a la que está expuesta la tubería. Ambos índices presentan una variación similar, donde a medida que aumenta la temperatura aumentan los índices.

Figura 19. Gráfica de índices Q vs T² datos sin daños a diferentes temperaturas.



Para obtener información a partir de los índices, se proyectaron los datos sobre el modelo base. Como se observa en la Figura 19 los datos proyectados sobre el modelo base se distribuyen en clústers¹ según la temperatura a la que fueron registrados. Adicionalmente, los índices estadísticos presentan una tendencia lineal que aumenta de manera proporcional a la temperatura.

En las Figuras 20 y 21 se presentan los datos con algunos de los daños o fugas emuladas durante el procedimiento de la obtención de datos.

¹ Clúster: Agrupación de datos.

Figura 20. Gráfica De índices Q vs T^2 datos sin daños a diferentes temperaturas y unas fugas proyectadas sobre los datos sin daños.

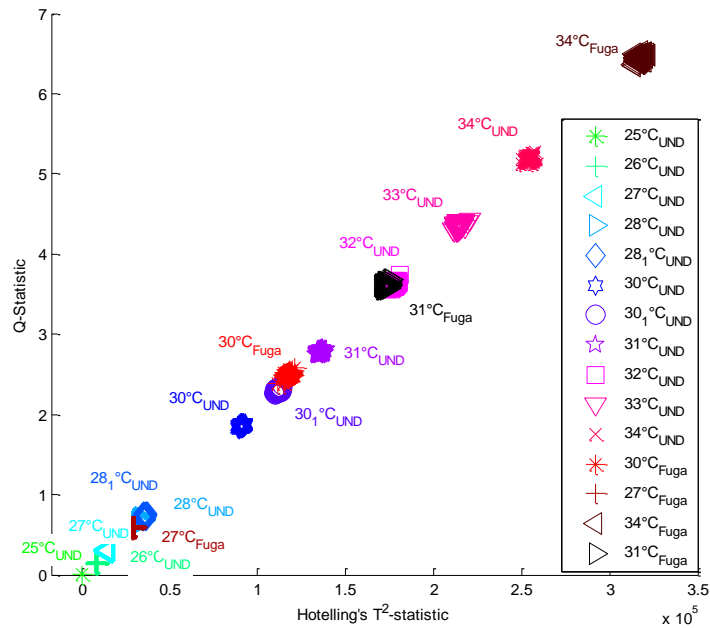
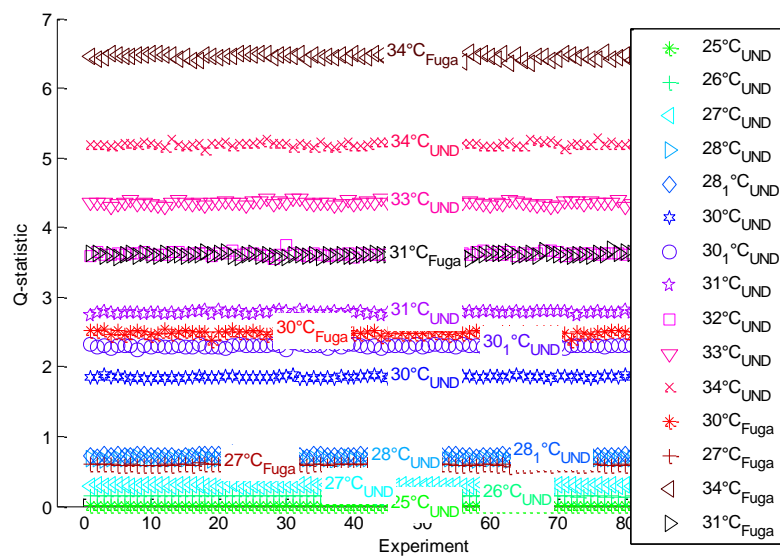


Figura 21. Gráfica de Q-estadístico datos sin daños a diferentes temperaturas con unas fugas proyectadas sobre los datos sin daños.

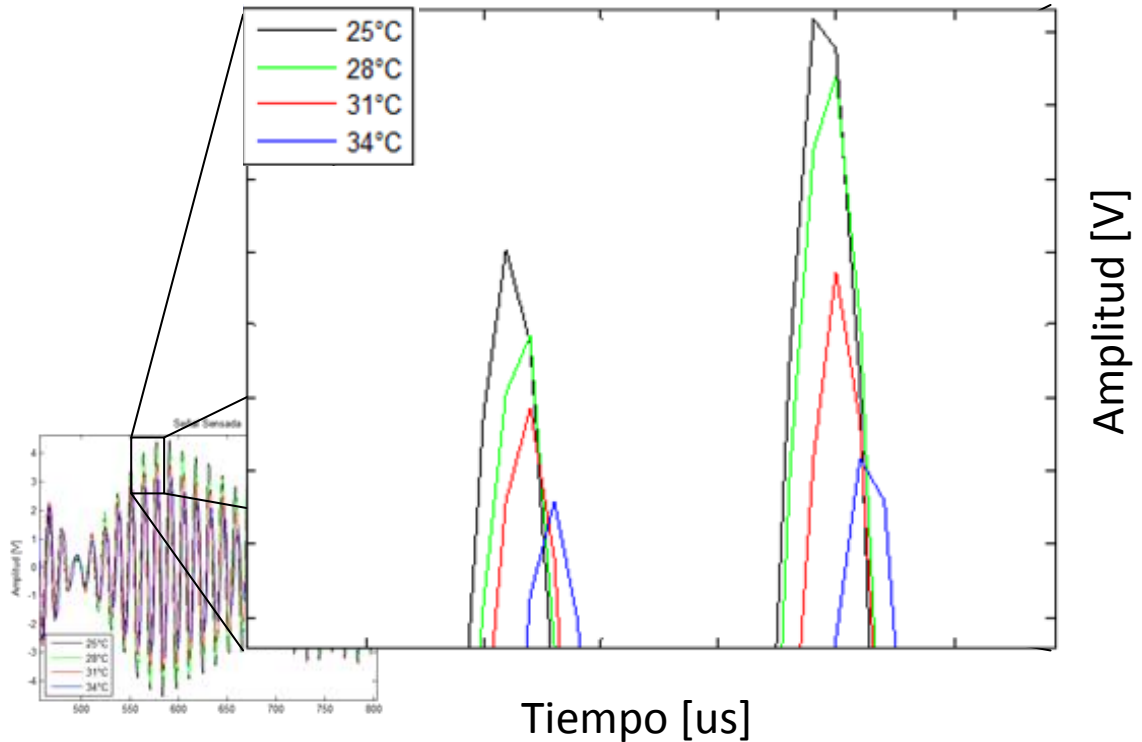


Después se realizó el análisis de los registros obtenidos incluyendo los datos de algunas de las fugas realizadas, como se observa en la Figura 20. Se puede decir que al presentarse una variación de temperatura podría generar una falsa alarma en la detección de una fuga, puesto que los clústers de los datos sin daño a diferentes temperaturas se mezclan con los clústers de los daños o fugas en este caso. Para abordar una posible solución a este problema se realizó el procedimiento presentado en la sección final de los resultados donde se realiza la evaluación de un método que permite la identificación de los daños.

- **Análisis de los efectos de la temperatura sobre las señales sensadas**

En la Figura 22 se muestran las señales adquiridas por uno de los sensores.

Figura 22. Señal de sensor en el dominio del tiempo.



Las señales mostradas en la Figura 22 permiten mostrar los cambios en la amplitud de la señal. Se puede observar que la amplitud es inversamente proporcional a la temperatura, ya que a medida que aumenta la temperatura la amplitud de la señal disminuye, también se puede observar que a medida que aumenta la temperatura se presenta un desfase mayor con respecto a la señal original.

6.2 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE HUMEDAD EN LA DETECCIÓN DE FUGAS

De igual manera que lo descrito en la sección 0 se tomaron los datos registrados de la humedad, con la que se encontraba el laboratorio y se construyó el modelo base mediante PCA. En el desarrollo del experimento los datos sin daño fueron registrados en diferentes tiempos como se muestra en la sección 0, donde fueron proyectados sobre el modelo creado, los índices estadísticos T^2 y Q-estadístico de igual manera se calcularon con el fin de realizar un estudio preliminar de la influencia de las variaciones de humedad en la estructura y el comportamiento del algoritmo de detección. A continuación se muestran los índices correspondientes a las variaciones de humedad sin daños en la estructura.

Figura 23. Gráfica de Q-estadístico y T²

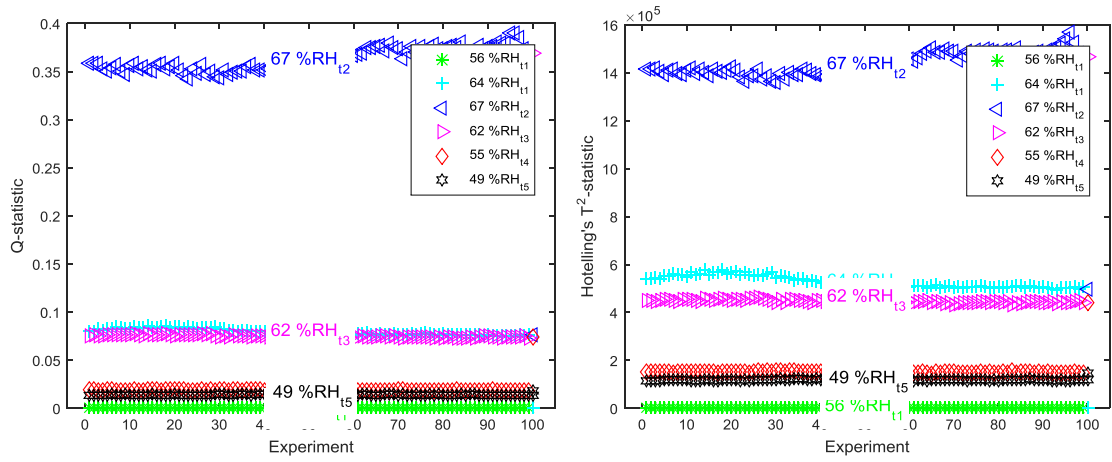
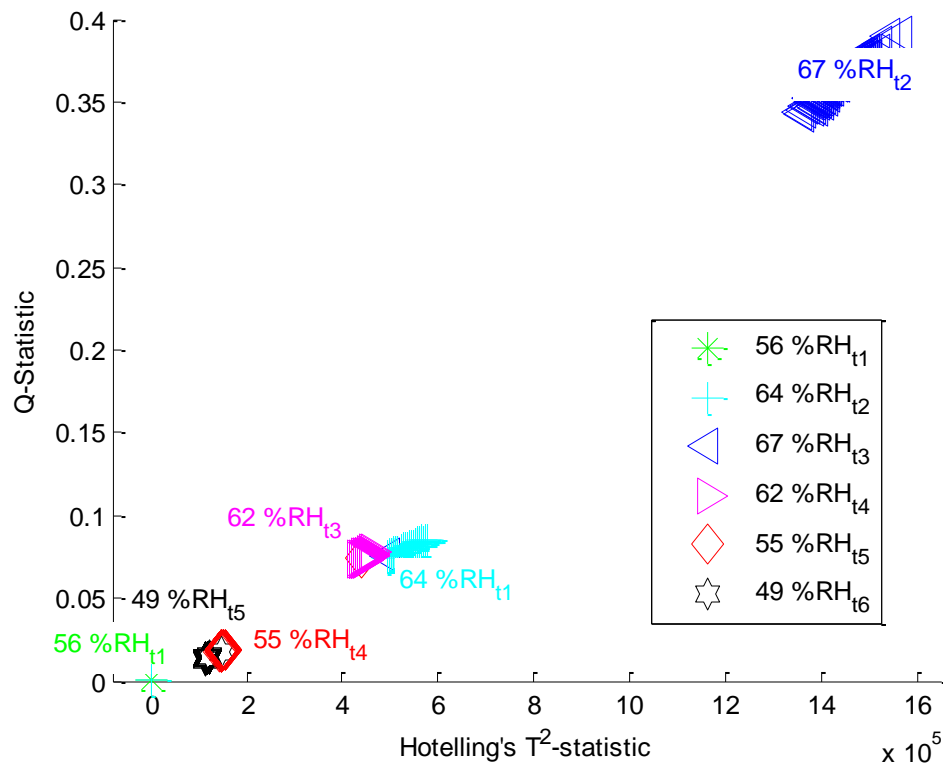


Figura 24. Gráfica De índices Q vs T² datos sin daños a diferentes Humedades Relativas.



En la Figura 24 y Figura 25 se puede observar que existen unos pequeños grupos de clústers los cuales se dividen debido a los cambios de temperatura que se presentaron en la estructura cuando se realizó la variación de humedad que se pueden observar en la Figura 13 donde se muestra cada uno de los tiempos en los que se realizaron los registros del estado de la estructura, por tanto se puede decir que la humedad en la estructura no causaría cambios en la respuesta de los sensores y de esta manera sería predecible detectar una falla cuando existan cambios en la humedad pero no en la temperatura.

En las Figuras 25 y 26 se presentan los datos de los registros sin daño y algunas de las fugas realizadas durante el procedimiento proyectado sobre el modelo.

Figura 25. Gráfica De índices Q vs T^2 datos sin daños a diferentes Humedades y unas fugas proyectadas sobre los datos sin daños.

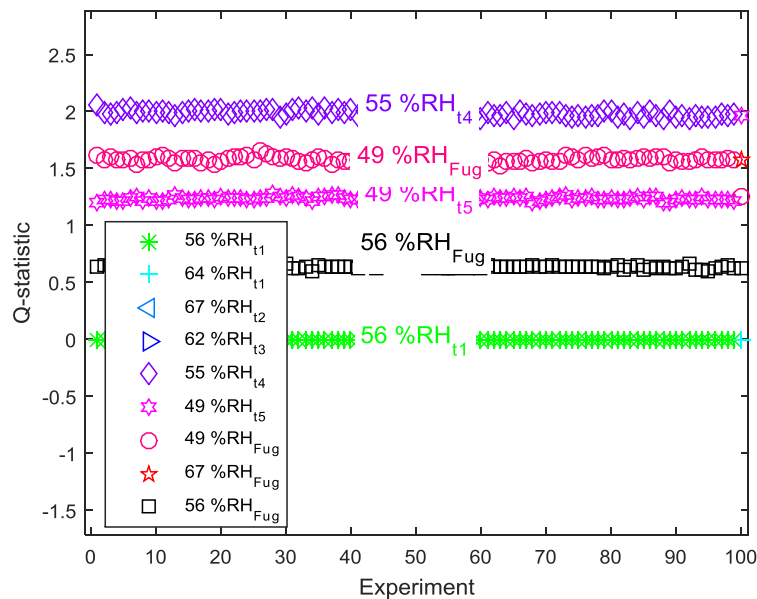
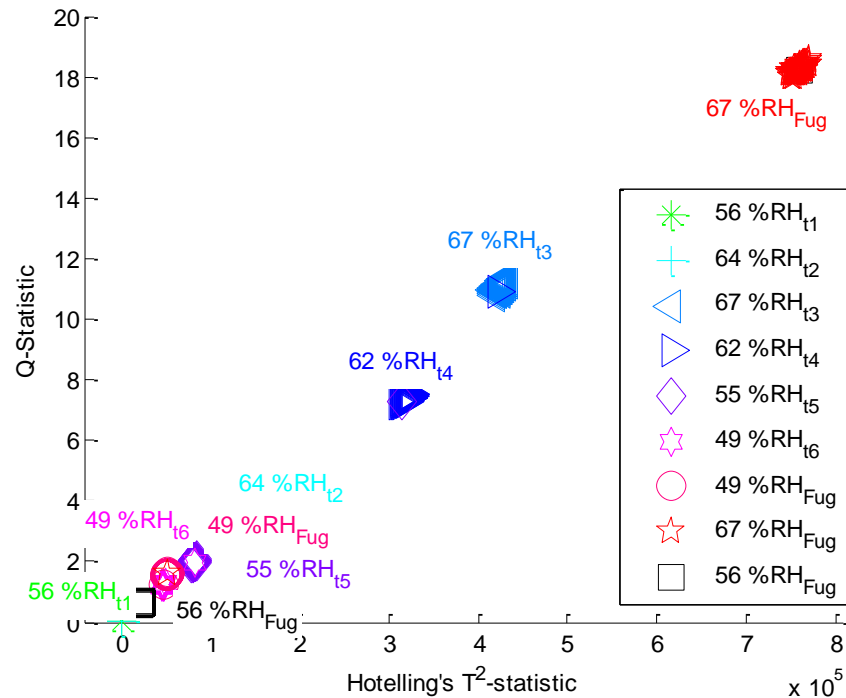


Figura 26. Gráfica de Q-estadístico datos sin daños a diferentes Humedades y unas fugas proyectadas sobre los datos sin daños.

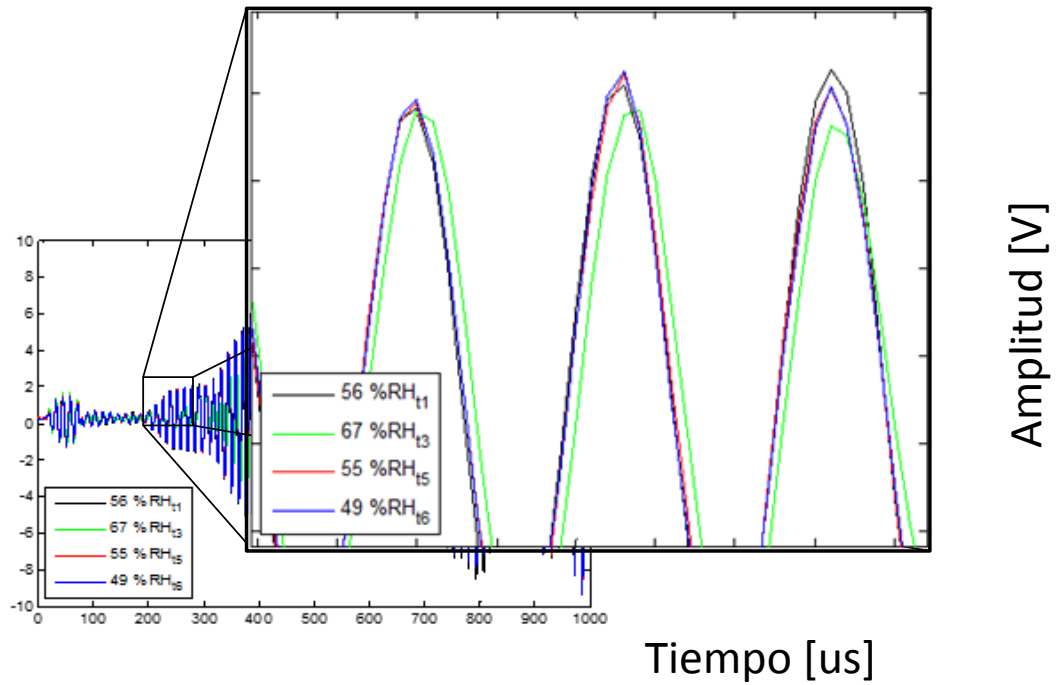


Al realizar el análisis de la proyección de registros obtenidos incluyendo los datos de algunas de las fugas realizadas, se observa en la Figura 25 que los clústers de las pruebas sin daño junto con los clústers de fugas no tienen relación alguna, es decir no se puede predecir un comportamiento entre ellos. La detección se puede dar si se evalúa la estructura con solo un valor constante de condiciones de humedad y temperatura, pero en condiciones de operación real no prestaría una función útil, ya que la humedad varía constantemente presentando falsas alarmas de detección.

- **Análisis de los efectos de la humedad sobre las señales sensadas**

En las Figuras 27 y 28 se presentan algunas de las señales para observar los efectos de la humedad sobre las señales sensadas.

Figura 27. Señal del sensor en el dominio del tiempo

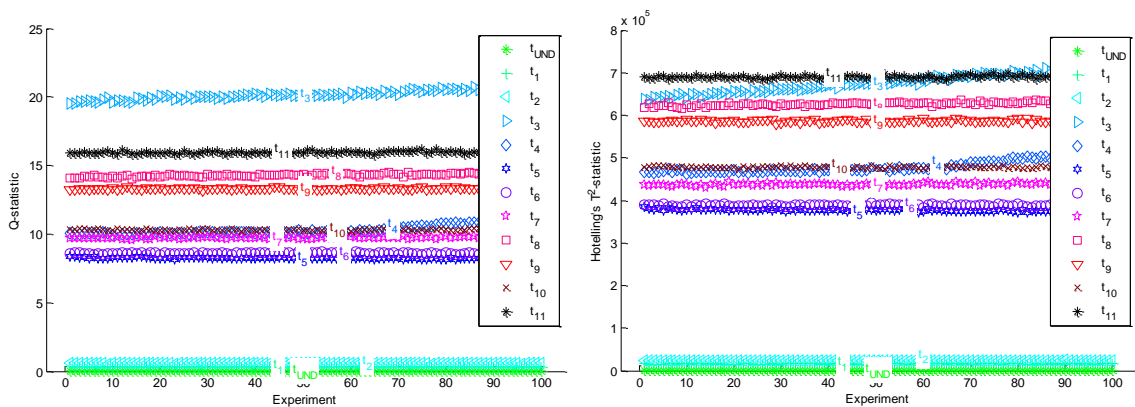


Con esta imagen se puede verificar que los cambios de temperatura generan una disminución en la amplitud de la señal de sensado y un desfase en la misma, puesto que la señal verde corresponde a la señal con un cambio brusco en la temperatura debido al vapor de agua caliente que generan las resistencias para variar la humedad en el ambiente. Además se puede decir que la humedad no genera cambios bruscos en la señal de sensado.

6.3 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN LA DETECCIÓN DE FUGAS

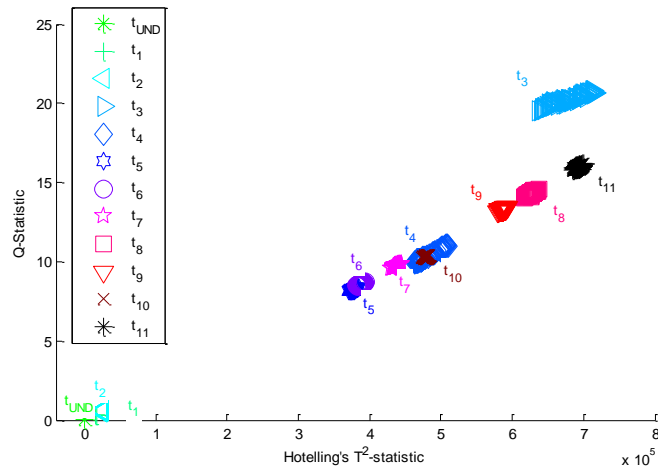
Con los datos registrados de la temperatura y de la humedad en estado sin perturbaciones se construyó el modelo base mediante PCA. Con el procedimiento planteado para el experimento se tomaron los datos sin daño, donde fueron proyectados sobre el modelo creado, los índices estadísticos T^2 Y Q-estadístico. Igualmente se calcularon con el fin de realizar un estudio preliminar de la influencia de las variaciones de humedad y de la temperatura en la estructura y el comportamiento del algoritmo de detección. En las Figuras 28 y 29 se muestran los resultados obtenidos al proyectar los diferentes registros de la estructura sin daños. Donde cada uno de los tx (tal como se nombraron los datos), corresponden a los tiempos donde fueron adquiridos los registros piezoeléctricos mostrados en la sección 0, donde se describió de manera detallada el experimento.

Figura 28. Grafica de Q-estadístico Y T^2



En las Figuras 28 y 29 se puede observar que el dato tomado en el tiempo t_3 se ubica lejos de los demás. Esto es debido a que cuando se energizaron las resistencias, la temperatura cambió bruscamente por lo que se presenta una variación en los índices y el clúster se encuentra aislado. Adicionalmente, se puede observar que el índice Q es más sensible a las variaciones.

Figura 29. Gráfica de índices Q vs T^2 datos sin daños a diferentes temperaturas y humedades relativas.



En la Figura 30 se muestran los resultados del índice Q al proyectar los registros sin daño y algunas fugas sobre el modelo base.

Figura 30. Gráfica de Q-estadístico datos sin daños a diferentes temperaturas y humedades con unas fugas proyectadas sobre los datos sin daños.

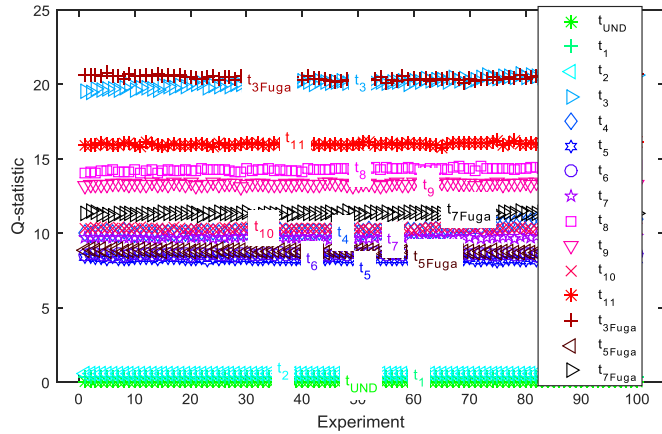
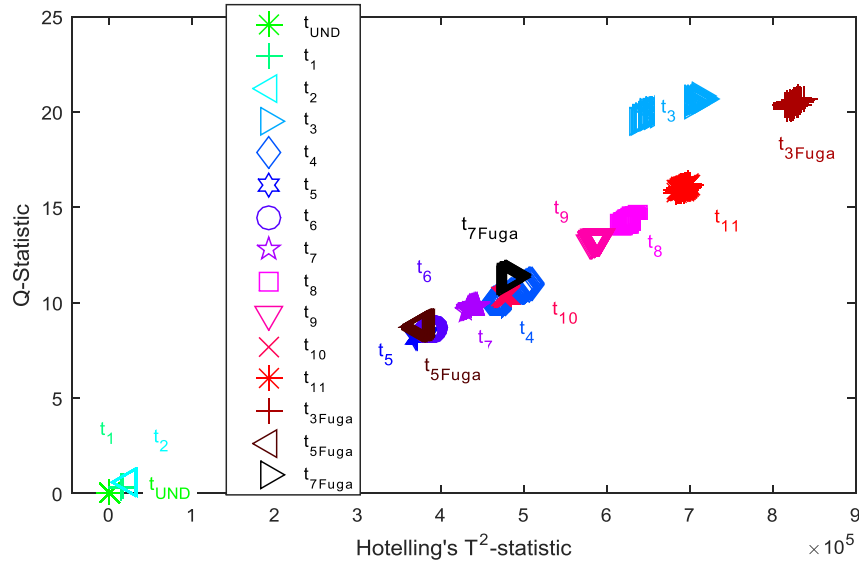


Figura 31. Gráfica De índices Q vs T^2 datos sin daños a diferentes temperaturas y humedades Relativas y unas fugas proyectadas sobre los datos sin daños.



Al momento de aplicar fugas en la tubería se puede inferir que no se logra diferenciar los datos sin daños a los presentados con algunas fugas proyectadas, como se observa en las Figuras 30 y 31. Por tanto, no se podría asegurar una

detección de un daño ya que podría llegar a ser una falsa alarma en el diagnóstico de la estructura.

6.4 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA CON AGREGACIÓN DE MASA

Después de realizado el análisis para la detección de fugas, se procedió a verificar si aparecía el mismo efecto cuando se realizaba una agregación de masa en la estructura. En la Figuras 32 y 33 se muestran los resultados obtenidos de la proyección de los datos sin daño de la estructura a las diferentes temperaturas.

Figura 32. Gráfica de índices Q vs T² datos sin daños a diferentes Temperaturas.

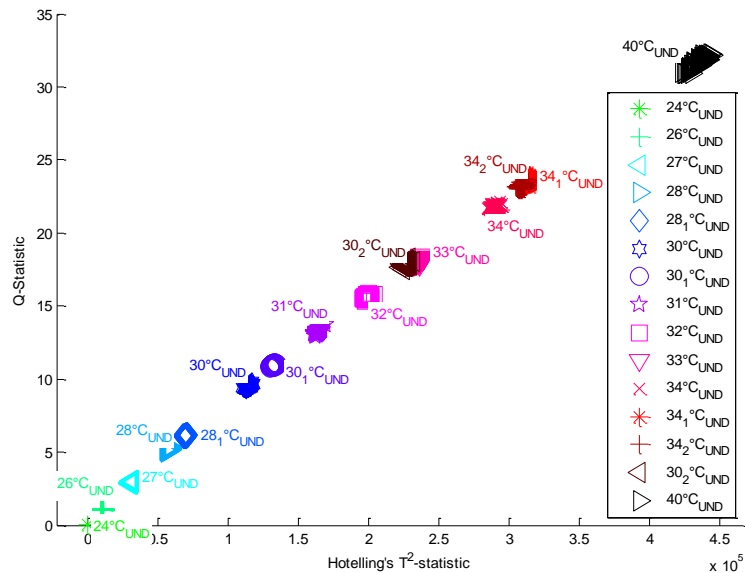
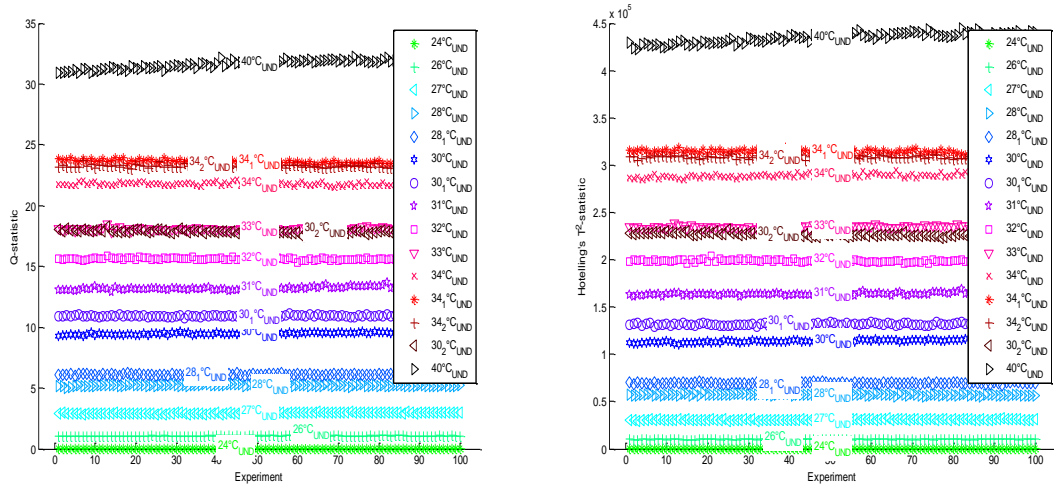
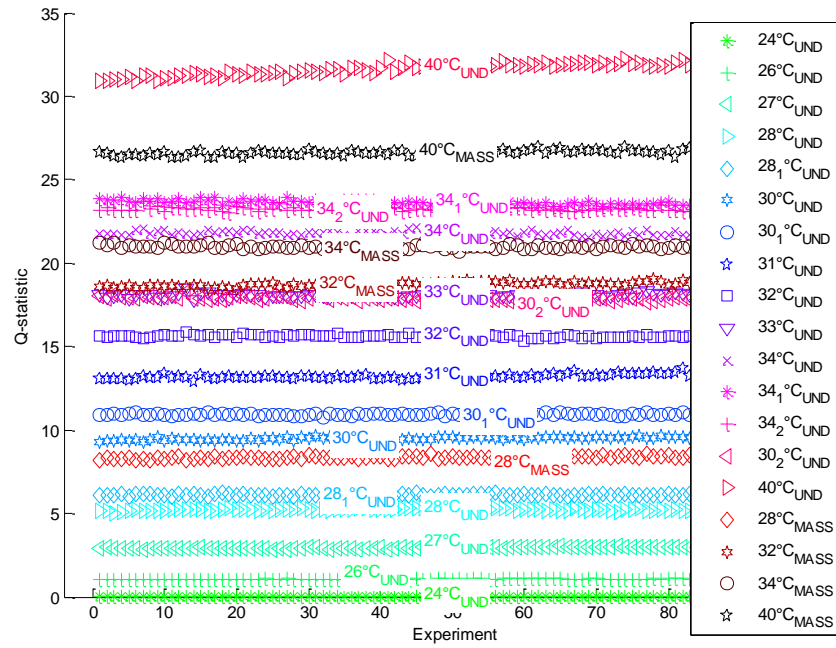


Figura 33. Gráfica de Q-estadístico y T²



Como se observa en las Figuras 32 y 33 se puede verificar que los valores de T² y Q son similares a los obtenidos en la sección 0, por lo que se verifica repetitividad de dichos valores ante las mismas condiciones de temperatura.

Figura 34. Gráfica de Q-estadístico datos sin daños a diferentes temperaturas, con la agregación de masa proyectada sobre los datos sin daños.



6.5 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE HUMEDAD CON AGREGACIÓN DE MASA

Después de adquiridos los datos organizados, se realizó el modelo basado PCA con el registro realizado en las condiciones a las cuales se encontraba la estructura, y se proyectaron todos los índices de los estados sin daño de cada uno de los tiempos en que se registraron los datos. La notación presentada en los datos corresponde a la descrita en la sección 0, donde se describe de manera detallada el tiempo de cada registro, la temperatura y la humedad a la cual estaba expuesta la estructura. Donde t_x corresponde al tiempo en que se tomó el registro piezoeléctrico.

En la Figura 37 y Figura 38 se puede observar que los cambios en las condiciones de humedad relativa no generan cambios bruscos en la respuesta del sistema. Los cambios bruscos obtenidos corresponden a los datos donde ocurrían cambios de temperatura en la estructura. Por lo tanto se confirma que el algoritmo de detección de fallas basado en PCA no permite diferenciar daños en la estructura con cambios de temperatura en la estructura.

Figura 36. Gráfica de Q-estadístico y T²

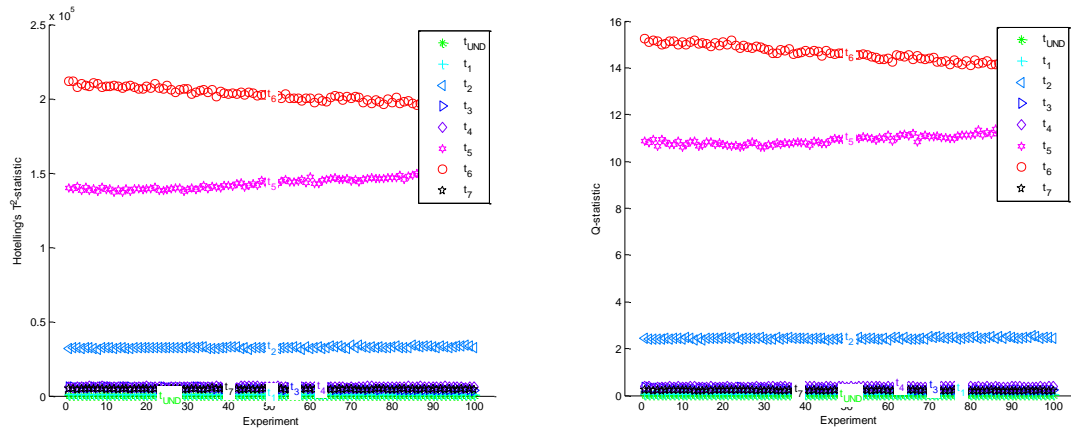


Figura 37. Gráfica de índices Q vs T² datos sin daños a diferentes humedades.

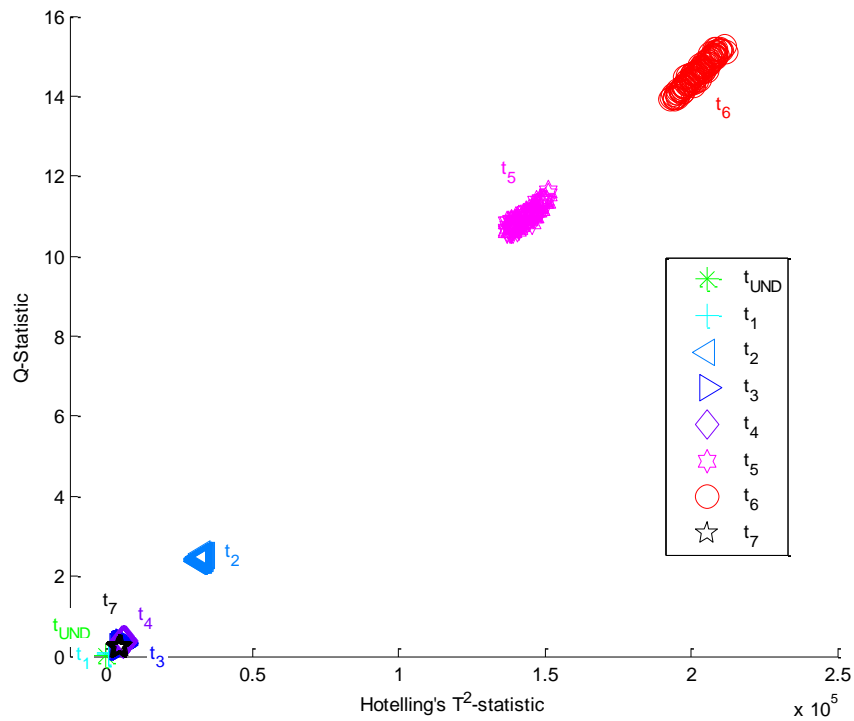
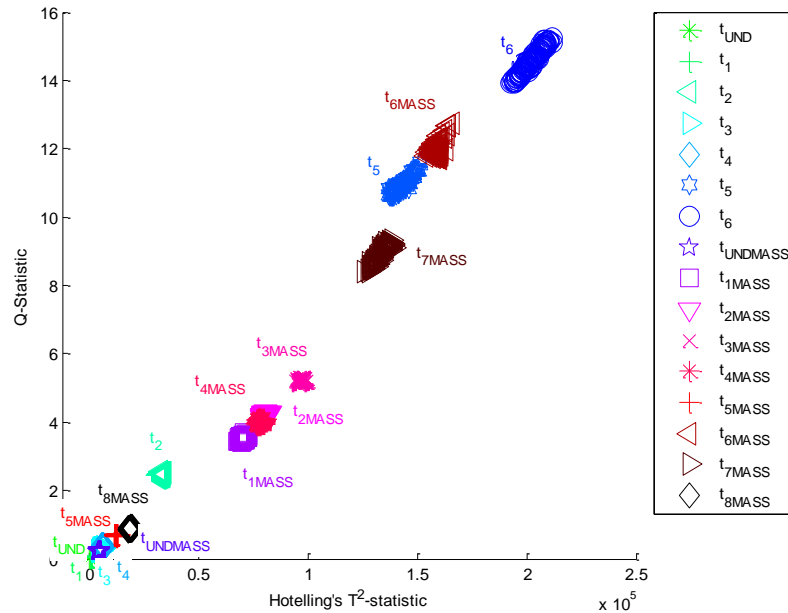


Figura 39. Gráfica De índices Q vs T² datos sin daños a diferentes humedades, con la agregación de la masa como daño proyectado sobre los datos sin daños.



6.6 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD, CON AGREGACIÓN DE MASA

A continuación se muestran los resultados correspondientes a la descripción de la sección 0, donde se describe de manera detallada el experimento y los tiempos de registro. En las Figuras 40 y 41 se muestran los resultados correspondientes a los registros obtenidos con la estructura sin daños a diferentes condiciones de temperatura y humedad.

Figura 40. Gráfica de Q-estadístico Y T²

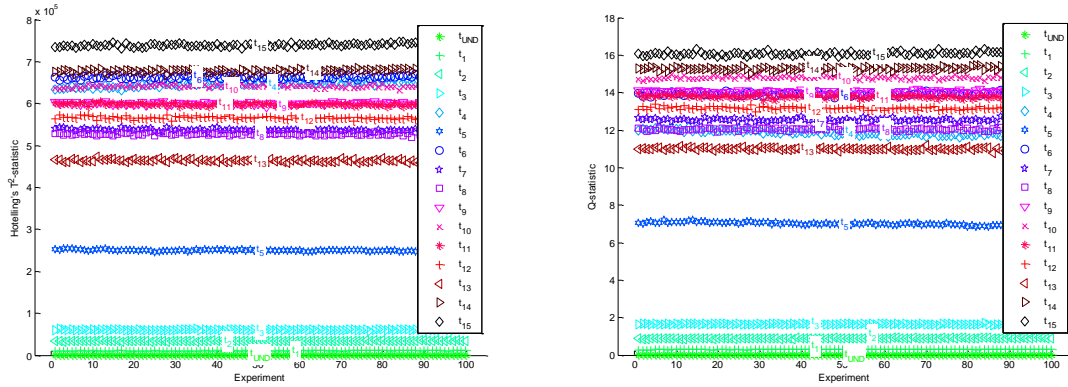
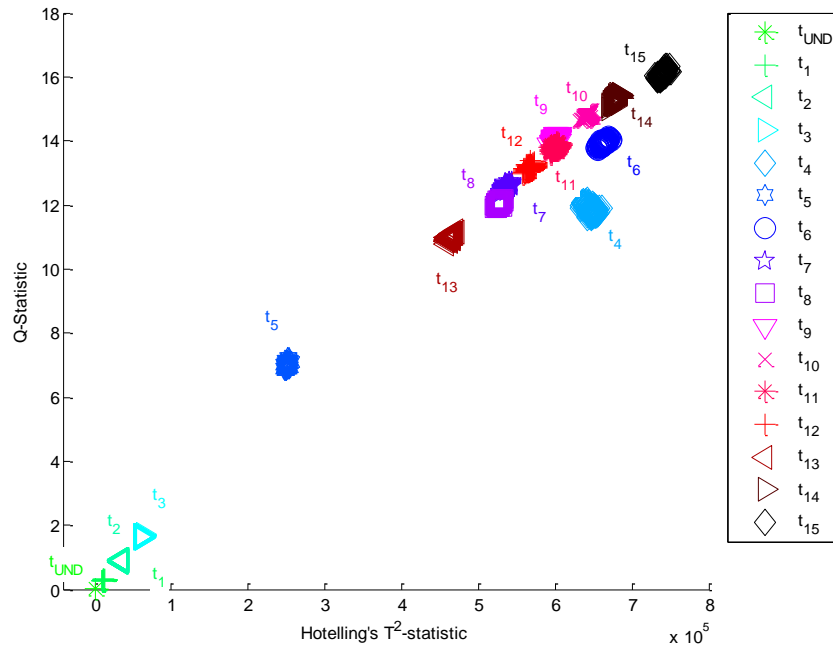


Figura 41. Gráfica de índices Q vs T² datos sin daños a diferentes humedades y temperaturas.



De las Figuras 40 y 41 se puede inferir que al proyectar los índices de la estructura sin daños, a diferentes cambios de temperatura y humedad, hay una tendencia lineal y los registros que se salen de esta tendencia, corresponden a los momentos en que se utilizaron las resistencias para variar la humedad.

En las Figuras 43 y 42 se pueden observar los datos de las proyecciones sobre el modelo base de los escenarios sin daño y con agregación de masa, ante las diferentes condiciones de temperatura y humedad, descritas en el caso de estudio.

Figura 42. Gráfica de Q-estadístico datos sin daños a diferentes temperaturas, con la agregación de masa proyectada sobre los datos sin daños.

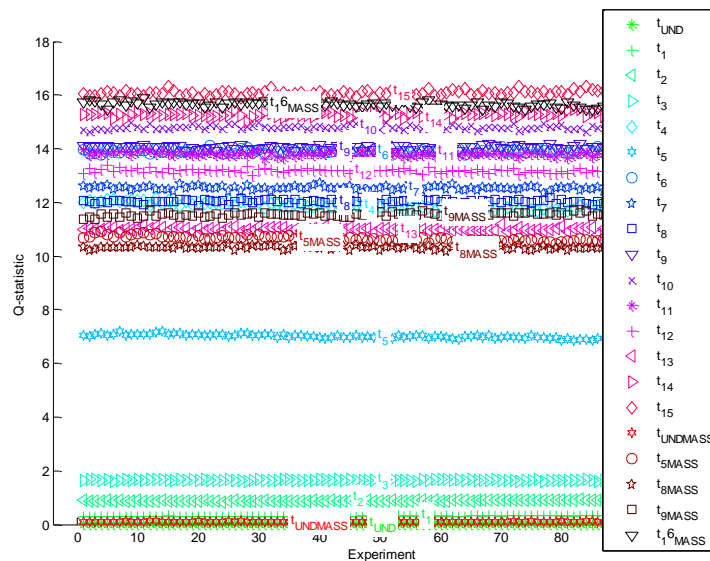
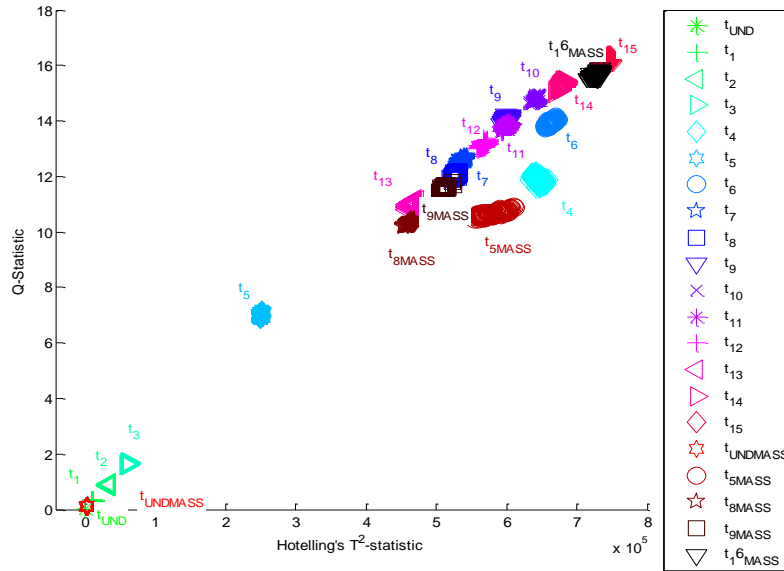


Figura 43. Gráfica de índices Q vs T² datos sin daños a diferentes Humedades y Temperaturas, con la agregación de la masa como daño proyectado sobre los datos sin daños.



Como se puede ver en la Figura 43 no es posible, a partir de los valores de T² y Q, identificar de manera visual si se efectuó una agregación de masa a la estructura o hubo un cambio en las condiciones de temperatura y humedad a las que se encuentra expuesta la estructura.

6.7 CLASIFICACIÓN DE AGREGACIÓN DE MASA Y FUGAS EN UN RANGO DE TEMPERATURAS, USANDO REDES SOM.

Después de analizar los resultados obtenidos y ver las influencias de la temperatura y la humedad en el algoritmo de detección de fallas, se propone una adaptación de la metodología que permita identificar daños tipo fuga y agregación

de masa en la sección de tubería de acero carbono [7] [6]. La metodología a seguir para la detección en un rango de temperaturas establecido es la siguiente:

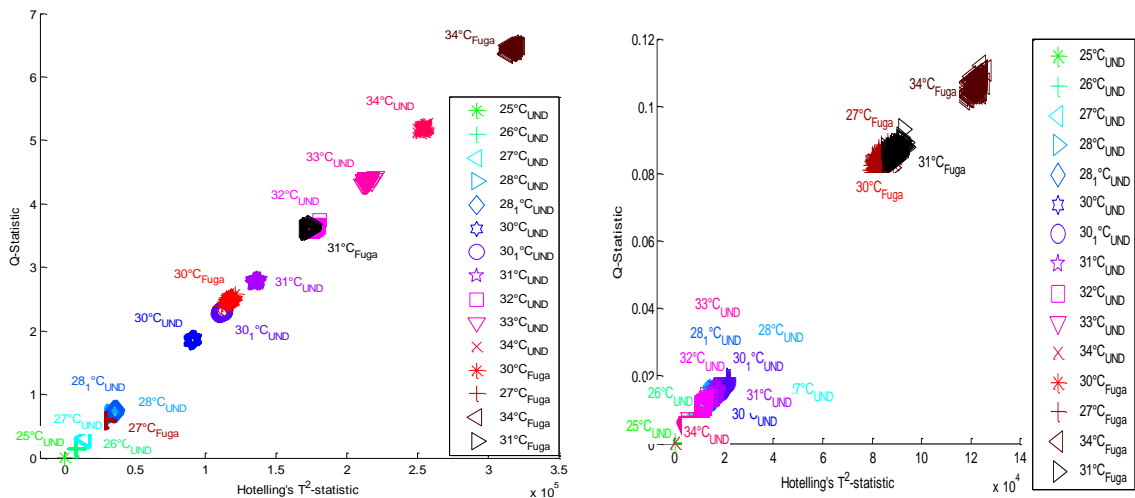
1. Se establecen las condiciones de temperatura mínimas y máximas a las cuales va a operar la tubería
2. Se realiza el registro de la estructura sin daños a estas 2 temperaturas y se crea el modelo basado en PCA teniendo en cuenta la información de los 2 estados.

De esta manera se obtiene un modelo de la estructura basado en PCA, que incluye las máximas variaciones que este puede presentar en cuanto a condiciones de temperatura variables. Finalmente, para tener una mejor representación en un espacio no lineal de los datos se utilizan redes SOM.

A continuación se muestran los resultados de la metodología propuesta:

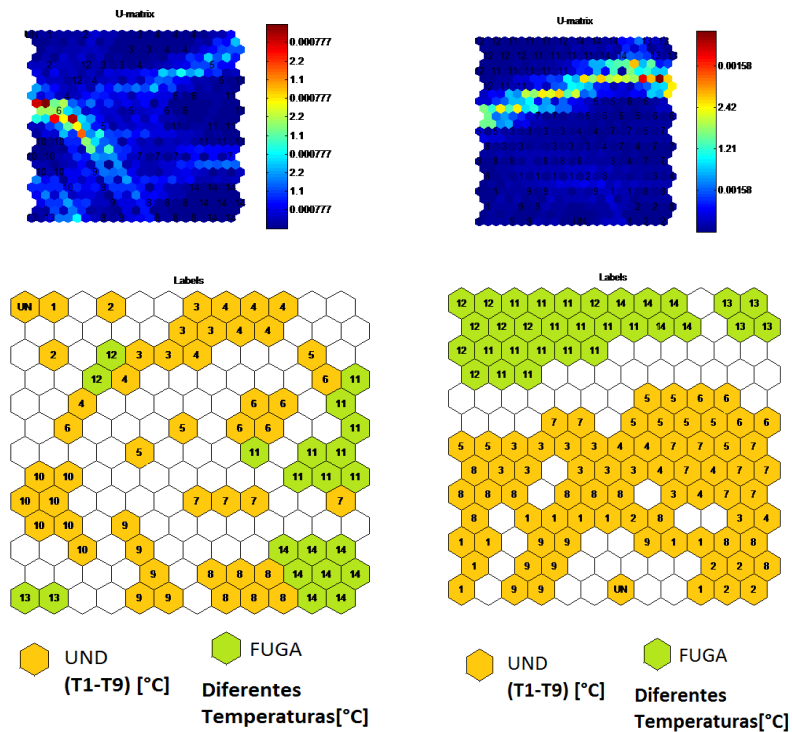
- **Detección de fugas:**

Figura 44. A) Modelo sin considerar rango de temperatura B) Modelo considerando el rango de temperatura



Por medio de este método es posible establecer unos límites entre la estructura con daños y la estructura sin daños. La Figura 45 muestra los mismos resultados mediante el uso de una red neuronal para verlo en una representación no lineal.

Figura 45. A) Red SOM del modelo sin considerar el rango de temperatura B) Red SOM del modelo considerando el rango de temperatura



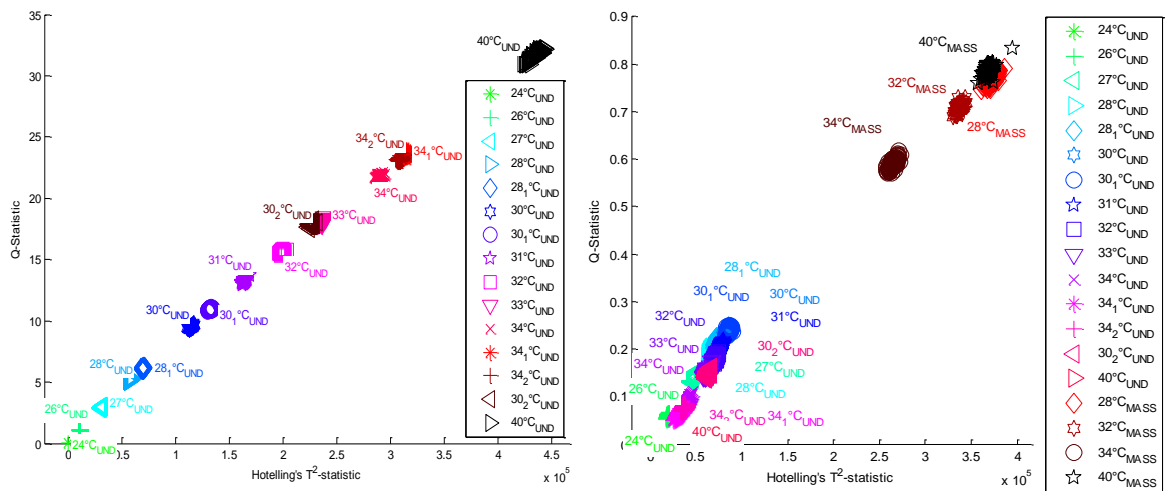
Se puede observar que la red SOM clasifica los datos en dos grandes grupos plenamente diferenciados. De esta manera, los datos con los daños en un sector y los datos sin daños o en estado nominal en el otro.

- **Detección de agregación de masa:**

Se creó un modelo incluyendo los modelos base o de la estructura sin daño de las temperaturas de los extremos, y se proyectaron los demás como objeto de

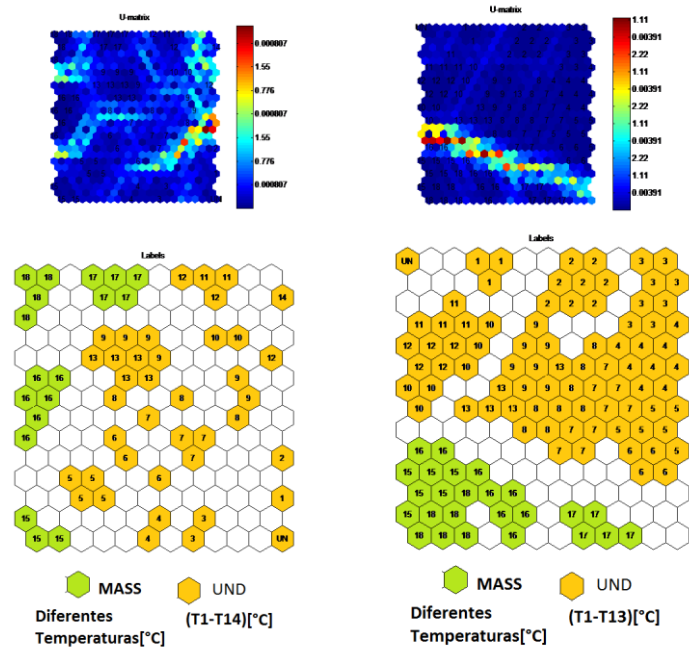
verificación y determinar si la metodología propuesta cumplía con el objetivo de identificar el daño en este caso agregación de masa.

Figura 46. A) Modelo sin considerar el rango de temperatura B) Modelo considerando el rango de temperatura



Como se puede observar en la Figura 46 B. se puede decir que el método permite diferenciar si ocurre un daño, sin tener en cuenta las condiciones de temperatura a la cual se encuentre la estructura. La Figura 47 presenta los anteriores resultados en una red neuronal con el fin de observarlos en un espacio no lineal y observar gráficamente los clústers de una mejor manera.

Figura 47. A) Red SOM del modelo sin considerar el rango de temperatura B) Red SOM del modelo considerando el rango de temperatura



Como se observa en la Figura 47, en el modelo creado con la metodología inicial, los datos se encuentran dispersos sin ningún punto común entre ellos, lo que no permite identificar a simple vista si se trata de un daño o un cambio en las condiciones ambientales. Mientras que con la metodología modificada se observa cómo se crean 2 grupos grandes uno donde se encuentran las proyecciones de los registros sin daño de la estructura y otro donde se encuentran las agregaciones de masa realizadas a diferentes temperaturas.

7. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 CONCLUSIONES

- En el presente trabajo de grado, se realizó el estudio el efecto de variar las condiciones de temperatura y humedad, sobre un algoritmo de detección de defectos en estructuras basado en *piezodiagnosis* e índices PCA. De esta manera, se analizó la influencia existente en la amplitud y fase de las ondas guiadas registradas, los cambios en los valores de los índices PCA y la clasificación de defectos tipo fuga y agregación de masa usando redes neuronales SOM.
- Se estableció una metodología para la creación de escenarios que consideren condiciones de temperatura y humedad variables en una sección de tubería de acero carbono. De esta manera, es posible afectar el ambiente en el que opera la tubería, mediante el uso de resistencias térmicas, ventiladores, lámparas de iluminación y una estructura tipo canal para almacenamiento de agua, que permiten la creación de escenarios considerando incluso curvas típicas de una región.
- La configuración utilizada para la variación de temperatura y humedad, permite registrar mediciones en las que el efecto de alguna de estas variables es dominante. Esto se logra mediante la generación de casos experimentales con vapor, aire frío, cambios de intensidad de calor o combinación de escenarios. Así, es posible estudiar los efectos de variación de humedad y temperatura a pesar de la dependencia existente, en rangos de 49% - 67% y 25°C - 40°C respectivamente.
- Se evidenció que las variaciones de temperatura causan cambios de amplitud y fase en la onda guiada transmitida, mayores que los relacionados con variaciones de humedad. De esta manera, los cambios en la señal piezo-

eléctrica registrada son de 0.7V y 0.2V aproximadamente para variaciones de temperatura y humedad respectivamente. Asimismo, a medida que aumenta la temperatura, se observa disminución en la amplitud y un aumento del desfase de la señal piezo-eléctrica.

- Mientras que la temperatura pudo establecerse a partir de un valor de referencia dado usando una estrategia de control PI, para el caso de la humedad no fue posible. Por tanto, para este trabajo, la humedad sólo puede ser considerada como una perturbación, ya que un cambio de temperatura causa cambios significativos en los valores de humedad que deben ser considerados en el diseño de los escenarios. Esto muestra una alta dependencia existente entre las variables de humedad y temperatura para cambios abruptos.
- Los resultados obtenidos muestran que el algoritmo de detección de defectos basado en PCA no logra diferenciar entre un defecto en la tubería y variaciones de temperatura y/o humedad. De esta manera, si no se considera en el entrenamiento del algoritmo las condiciones ambientales de humedad y temperatura en las que opera la estructura, se podría generar falsas alarmas lo que repercutiría en un sistema de detección de defectos no robusto.
- Mediante el uso de redes neuronales SOM es posible identificar defectos a diferentes temperaturas de operación. Esto se logra entrenando el sistema de clasificación usando un modelo que incluya los datos de la estructura en estado sin daños a las temperaturas mínima y máxima. Se realizó la comparación con una red SOM entrenada usando sólo los registros a condición nominal de temperatura, logrando una mejor frontera de separación cuando se consideran el mínimo y máximo rango de temperatura.

7.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda encerrar la sección de tubería para garantizar una mayor variación de humedad en las condiciones ambientales.
- Se recomienda incluir en el análisis, mediciones de temperatura en la superficie de la tubería, usando por ejemplo sensores de tipo láser.
- Se recomienda usar humidificadores que permitan un mayor control sobre las variaciones de humedad en el ambiente.
- Se recomienda utilizar elementos que permitan distribuir los cambios de temperatura de manera más uniforme sobre la estructura, por ejemplo mediante la circulación de un fluido a temperatura variante.

7.3 TRABAJOS FUTUROS

- Estudiar el efecto de los cambios de temperatura y humedad en el ambiente sobre el dispositivo piezoeléctrico, así como en el medio acoplante.
- Analizar la influencia sobre la detección de defectos de diferente naturaleza como corrosión o agrietamiento, cuando existen condiciones variantes de temperatura y humedad. Asimismo, extender el estudio sobre otro tipo de estructuras incluyendo tuberías de mayor dimensión.
- Caracterizar los cambios causados en la estructura como termofluencia, deformaciones y/o fatiga térmica causados por variaciones de temperatura, con el objetivo de diferenciarlos respecto a otros tipos de defecto como fugas, agregación de masas, o corrosión.
- Utilizar las redes SOM como sistema de clasificación, considerando los datos correspondientes a mediciones sin daño en todos los escenarios de temperatura y humedad bajo las que operará la estructura.

- Comparar el desempeño del sistema de clasificación de defectos usando redes SOM respecto a metodologías basadas en métodos de compensación y selección óptima de modelos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. pais, "elpais.com.co" 08 07 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.elpais.com.co/elpais/colombia/noticias/seis-muertos-y-30-heridos-en-estallido-oleoducto-en-risaralda>.
- [2] L. Mujica, "Q-statistic and T2-statistic PCA-based measures for damage assessment in structures, Structural Health Monitoring" Sage, 2010.
- [3] T. Gurrea, "Análisis de componentes principales" 2010.
- [4] M. Anaya, D. Tibaduiza, M. Torres-Arredondo, F. Pozo, M. Ruiz, L. Mujica, J. Rodellar, and C.-P. Fritzen, "Data-driven methodology to detect and classify structural changes under temperature variations," Smart Mater. Struct., vol. 23, p. 045006, 2014.
- [5] I. Bueth, "Damage detection in piping systems using pattern recognition techniques" 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2013.
- [6] T. Diego, "A study of two unsupervised data driven statistical methodologies for detecting and classifying damages in structural health monitoring" Mechanical Systems and Signal Processing, pp. 467-484, 2013.
- [7] F. Gharibnezhad, "Damage Detection Using Robust Fuzzy Principal Component Analysis" 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2012.

- [8] M. Luis, "Detección de impactos mediante razonamiento basado en conocimiento: aplicación a una sección de ala de avión" Informatica y Automatica Ecola Politecnica Superior, 2005.
- [9] F. Lucia "Definition of Structural Health Monitoring" de Structural Health Monitoring, Ed. John Wiley & Sons Ltd, 2014.
- [10] C. Boller, Encyclopedia of Structural Health Monitoring, 2009.
- [11] G. Mavi, "Feasibility of using ultrasonic guided waves for under water pipe inspection" Thapar University, Patiala, 2013.
- [12] P. Thien, "Piezoelectric active sensing for damage detection in pipeline structure" In Proc. 23rd Int.Modal, 2005
- [13] H. An, "Piezoelectric transducers for assessing and monitoring civil infrastructures. Sensor technologies for civil infrastructure" Sensing Hardware and Data Collection Methods for Performance Assesment, Vol. 1, n° 86, 2014.
- [14] K. Schubert, "Analytical and Experimental Investigation of Environmental Influences on Lamb Wave Propagation and Damping Measured with a Piezo-Based System" DGZIP, 6th European Workshop on Strucutral Health Monitoring, vol. 49, no. 0, pp. 1–9, 2012.
- [15] L. Rose, "Ultrasonic Guided Waves in Solid Media" Pennsylvania State University, Ed Cambridge, 2014.
- [16] J. Shen, "Non- Destructive Evaluation Using Guided Waves on Pipe-Like" Michigan, State University , 2012.

- [17] M. Yang, "Structural damage diagnosis under varying environmental conditions—part II: local PCA for non-linear cases", Mechanical Systems and Signal Processing, 2005.
- [18] R. Villamizar, O. E. Perez, and J. C. Navarro, "Pipe Leak Detection based on Statistics from Principal Component Analysis.", 2014.
- [19] M. J. Camacho-Navarro, "Damage detection in structures using robust baseline models" 7th Eccomas Thematic Conference on Smart Structures and Materials, n° ID138, 2015.
- [20] C. Francisco, "Corrosión" de Análisis del fenómeno de la corrosión en materiales de uso técnico: Metales. Procedimiento de Protection, pp. 4-5-6, 2009.
- [21] PI, "Influences on the lifetime of a piezo-ceramic actuator" de Reliability And Lifetime of Multilayer Piezo Actuators, p. 2, 2015.
- [22] P. Pertsch, "Development of Highly Reliable Piezo Multilayer Actuators And Lifetime Tests under DC and AC Operating Conditions" Piezotechnology, 2010.
- [23] R. Coltters "Fatiga Térmica - efecto de la temperatura" Metfusion, 20 Agosto 2013.
- [24] A. Raghavan, "EFFECTS OF ELEVATED TEMPERATURE" de GUIDED-WAVE STRUCTURAL HEALTH MONITORING, 2007, pp. 134-135.
- [25] F. Gharibnezhad, Robust Damage Detection in Smart, 2014.
- [26] Arduino, "Arduino Genuino," Disponible en: <http://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary>.

- [27] "Circuito para detectar cruces por cero". Disponible en: wiki.dxarts.washington.edu .
- [28] Perú-V, "Materiales piezoeléctricos," Disponible en: http://www.ingenieria.peru-v.com/estructuras_inteligentes/materiales_piezoelectricos.htm.
- [29] J. Gueorguieva, "Sensor piezoelectrico" 2013. Disponible en: http://jgvisualsplash.com/concordia/?attachment_id=230.
- [30] CeramTec "Principios de funcionamiento piezoelectrico" Disponible en: <http://www.ceramtec.es/materiales-ceramicos/piezoceramica/basicos/>.
- [31] "Temperatura-Explicación y definición de la temperatura". Disponible en: www.quees.info/que-es-la-temperatura. [Último acceso: 23 01 2015].
- [32] "Mezclas de gas-vapor y acondicionamiento de aire" de Termodinámica 6ta Edición, pp. 733-734, 2008.

BIBLIOGRAFÍA

An, H. "Piezoelectric transducers for assessing and monitoring civil infrastructures. Sensor technologies for civil infrastructure" Sensing Hardware and Data Collection Methods for Performance Assessment, Vol. 1, n° 86, 2014.

Anaya, M. Tibaduiza, D. Torres-Arredondo, M. Pozo, F. Ruiz, M. Mujica, L. Rodellar, J. and Fritzen, C.-P. "Data-driven methodology to detect and classify structural changes under temperature variations," Smart Mater. Struct., vol. 23, p. 045006, 2014.

Arduino, "Arduino Genuino," Disponible en:
<http://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary>.

Boller, C. Encyclopedia of Structural Health Monitoring, 2009.

Buethel, I. "Damage detection in piping systems using pattern recognition techniques" 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2013.

C. Francisco, "Corrosión" de Análisis del fenómeno de la corrosión en materiales de uso técnico: Metales. Procedimiento de Protección, pp. 4-5-6, 2009.

Camacho-Navarro, M. J. "Damage detection in structures using robust baseline models" 7th Eccomas Thematic Conference on Smart Structures and Materials, n° ID138, 2015.

Circuito para detectar cruces por cero. Disponible en: wiki.dxarts.washington.edu

CeramTec "Principios de funcionamiento piezoelectrico" Disponible en: <http://www.ceramtec.es/materiales-ceramicos/piezoceramica/basicos/>.

Coltters, R. "Fatiga Térmica - efecto de la temperatura" Metfusion, 20 Agosto 2013.

E. país, "elpais.com.co" 08 07 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.elpais.com.co/elpais/colombia/noticias/seis-muertos-y-30-heridos-en-estallido-oleoducto-en-risaralda>.

F., Lucia. "Definition of Structural Health Monitoring" de Structural Health Monitoring, Ed. John Wiley & Sons Ltd, 2014.

Gharibnezhad, F. "Damage Detection Using Robust Fuzzy Principal Component Analysis" 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2012.

Gharibnezhad, F. Robust Damage Detection in Smart, 2014.

Gueorguieva, J. "Sensor piezoelectrico" 2013. Disponible en: http://jgvisualsplash.com/concordia/?attachment_id=230.

Gurrea, T. "Análisis de componentes principales" 2010.

M., Luis. "Detección de impactos mediante razonamiento basado en conocimiento: aplicación a una sección de ala de avión" Informática y Automática Ecola Politécnica Superior, 2005.

Mavi, G. "Feasibility of using ultrasonic guided waves for under water pipe inspection" Thapar University, Patiala, 2013.

Mezclas de gas-vapor y acondicionamiento de aire de Termodinámica 6ta Edición, pp. 733-734, 2008.

Mujica, L. "Q-statistic and T2-statistic PCA-based measures for damage assessment in structures, Structural Health Monitoring" Sage, 2010.

Pertsch, P. "Development of Highly Reliable Piezo Multilayer Actuators And Lifetime Tests under DC and AC Operating Conditions" Piezotechnology, 2010.

Perú-V, "Materiales piezoeléctricos," Disponible en: http://www.ingenieria.peru-v.com/estructuras_inteligentes/materiales_piezoelectricos.htm.

PI, "Influences on the lifetime of a piezo-ceramic actuator" de Reliability And Lifetime of Multilayer Piezo Actuators, p. 2, 2015.

Raghavan, A. "EFFECTS OF ELEVATED TEMPERATURE" de GUIDED-WAVE STRUCTURAL HEALTH MONITORING, 2007, pp. 134-135.

Rose, L. "Ultrasonic Guided Waves in Solid Media" Pennsylvania State University, Ed Cambridge, 2014.

Schubert, K. "Analytical and Experimental Investigation of Environmental Influences on Lamb Wave Propagation and Damping Measured with a Piezo-Based System" DGZIP, 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, vol. 49, no. 0, pp. 1–9, 2012.

Shen, J. "Non- Destructive Evaluation Using Guided Waves on Pipe-Like" Michigan, State University, 2012.

T., Diego, "A study of two unsupervised data driven statistical methodologies for detecting and classifying damages in structural health monitoring" *Mechanical Systems and Signal Processing*, pp. 467-484, 2013.

Temperatura-Explicación y definición de la temperatura. Disponible en: www.quees.info/que-es-la-temperatura. [Último acceso: 23 01 2015].

Thien, P. "Piezoelectric active sensing for damage detection in pipeline structure" In *Proc. 23rd Int. Modal*, 2005

Villamizar, R. Perez, O. E. and Navarro, J. C. "Pipe Leak Detection based on Statistics from Principal Component Analysis.", 2014.

Yang, M. "Structural damage diagnosis under varying environmental conditions—part II: local PCA for non-linear cases", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2005.

ANEXOS

ANEXO A. Caracterización de sensores (humedad y temperatura) y calibración de sistema de adquisición de datos.

EXPERIMENTO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

Para la instrumentación del proyecto de grado se realizó la respectiva caracterización y calibración de cada sensor de humedad y temperatura, HSM-20G y el LM35 respectivamente, para ello inicialmente se diseñó un sistema de adecuación de las señales que se iban a obtener, para ello se implementó el circuito del cual se muestra en la Figura 48 el PCB del mismo.



Figura 48. Montaje PCB para la adecuación de la señal

Posteriormente se acopló el montaje con un ARDUINO DUE, el cual permitió realizar la lectura y adquirir los datos de cada sensor.

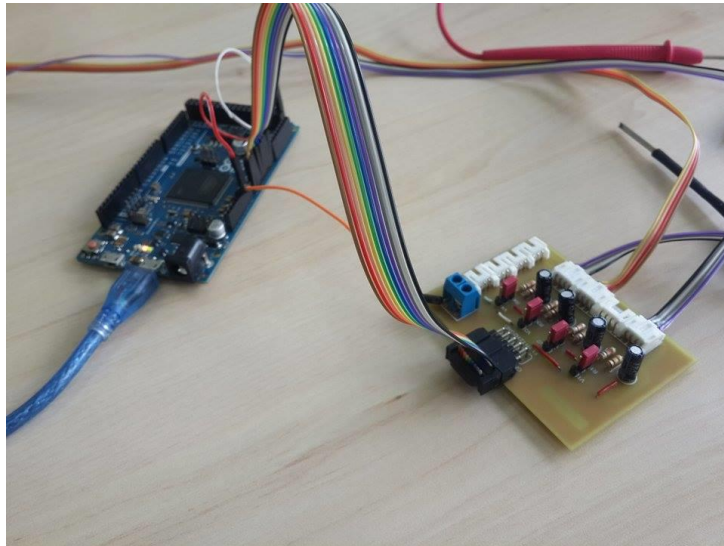


Figura 49. Acople del montaje con el ARDUINO DUE.

Además de leer los datos con el ARDUINO DUE, se trabajó también con el software MATLAB, donde se elaboró una interfaz que me permite introducir el periodo de muestreo que se desea obtener y guardar, el usuario los puede ver con la interfaz realizada junto con el tiempo de ejecución.

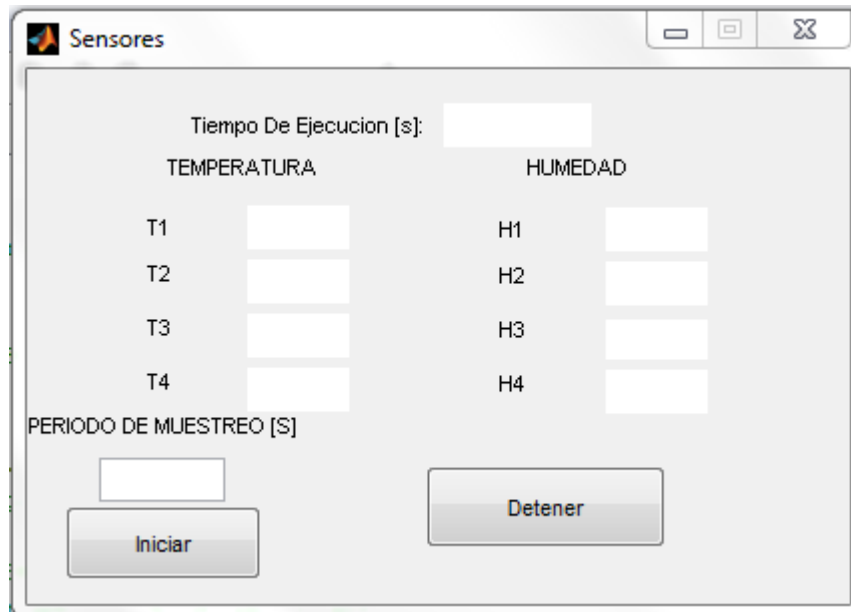


Figura 50. Interfaz realizada en MATLAB

Los datos también se pueden visualizar por medio de gráficas, que permiten observar el comportamiento del ambiente donde se realizaron las respectivas pruebas de calibración.

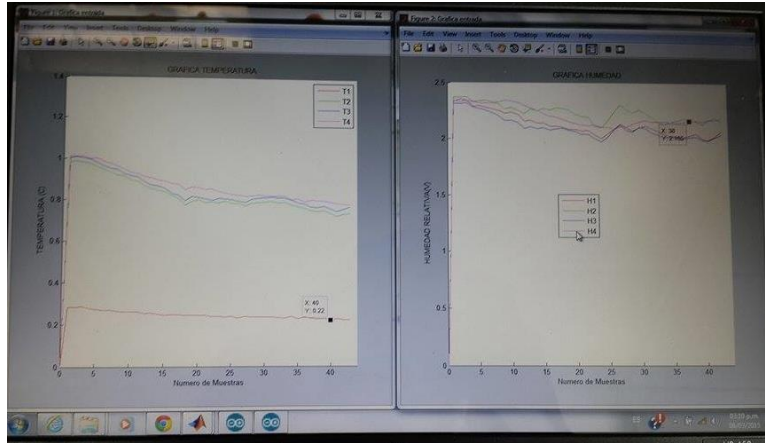


Figura 51. Ilustración de las gráficas de los sensores de temperatura y de humedad.

CARACTERIZACIÓN SENSORES DE HUMEDAD

Para la ejecución de la caracterización de los sensores de humedad se requirió trabajar en un entorno cerrado, donde con la ayuda de un aire acondicionado que está localizado en el salón 402 del edificio de la escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones permitiendo realizar las variaciones de humedad y de temperatura.

El procedimiento para la toma de datos fue el siguiente:

1. Se aisló el salón cerrando la puerta y todas las ventanas, con el aire acondicionado apagado, con el fin de alcanzar una temperatura alta y una humedad relativa alta.
2. Después de lograr una temperatura alta y una humedad alta, se procedió a encender el aire acondicionado inicializándolo con 18 [°C], siendo la mínima temperatura con la cual trabaja.

3. Cuando la temperatura inició el descenso se empezaron a tomar datos cada diez minutos con la interfaz de MATLAB y con un FLUKE 971 durante dos horas, hasta llegar a la temperatura mínima alcanzada en el transcurso del experimento.
4. Después de las dos horas de pruebas en el salón, se adquirieron algunas muestras con la puerta abierta y afuera en el ambiente, para garantizar mayor variación en la humedad.

El procedimiento se realizó dos veces, en días diferentes.

Datos Adquiridos con Fluke 971

Los datos del fluke se tomaron manualmente y fueron los siguientes:

AMBIENTE	
Muestras	Humedad [%]
0	69,4
1	69,7
2	68,7
3	68,3
4	68,3
5	68,9
6	68,4
7	67,3

Tabla 5. Datos mostrados por el FLUKE.

En este caso se muestran sólo siete muestras como ejemplo ilustrativo, pero realmente fueron noventa datos que se adquirieron durante las dos horas y los cuales se utilizaron para la caracterización de cada sensor.

Con los datos adquiridos y guardados, se procedió a trabajar con la herramienta de EXCEL, el cual donde se importaron para poder relacionar los valores obtenidos por el FLUKE junto con los datos del sensor. En la Figura 52 se graficó la humedad que mostraba el FLUKE versus la tensión que suministraba el sensor de humedad, y se estableció su respectiva relación lineal obteniendo el valor de la

pendiente y de su desviación máxima, donde la pendiente es la constante que caracteriza el sensor.

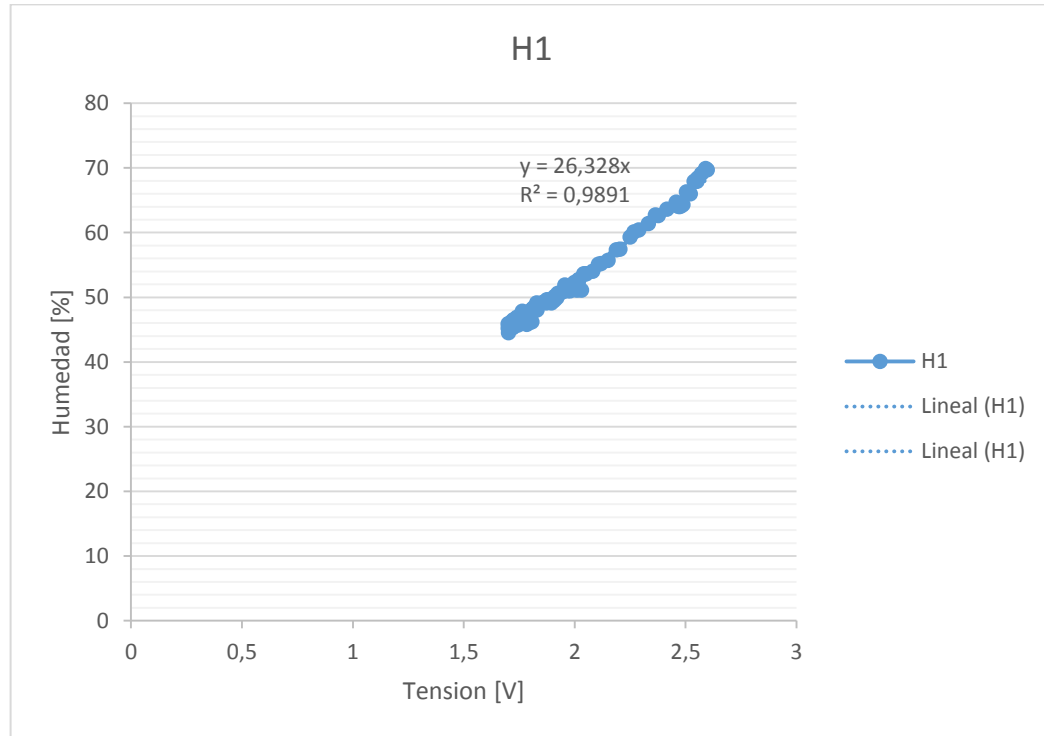


Figura 52. Gráfica del sensor H1 de humedad relativa vs tensión.

Al realizar la regresión lineal de los valores se obtuvieron los siguientes datos de pendiente y desviación máxima.

Valor de Pendiente	26,327547
Desviación Máxima	2,3649301

Tabla 6. Pendiente obtenida (constante), junto con la desviación máxima

Con la constante obtenida y la tensión suministrada por el sensor, se hizo una comparación con los valores del FLUKE y de los datos caracterizados, el cual se obtuvo una gráfica semejante a los valores de referencia del instrumento de medición.

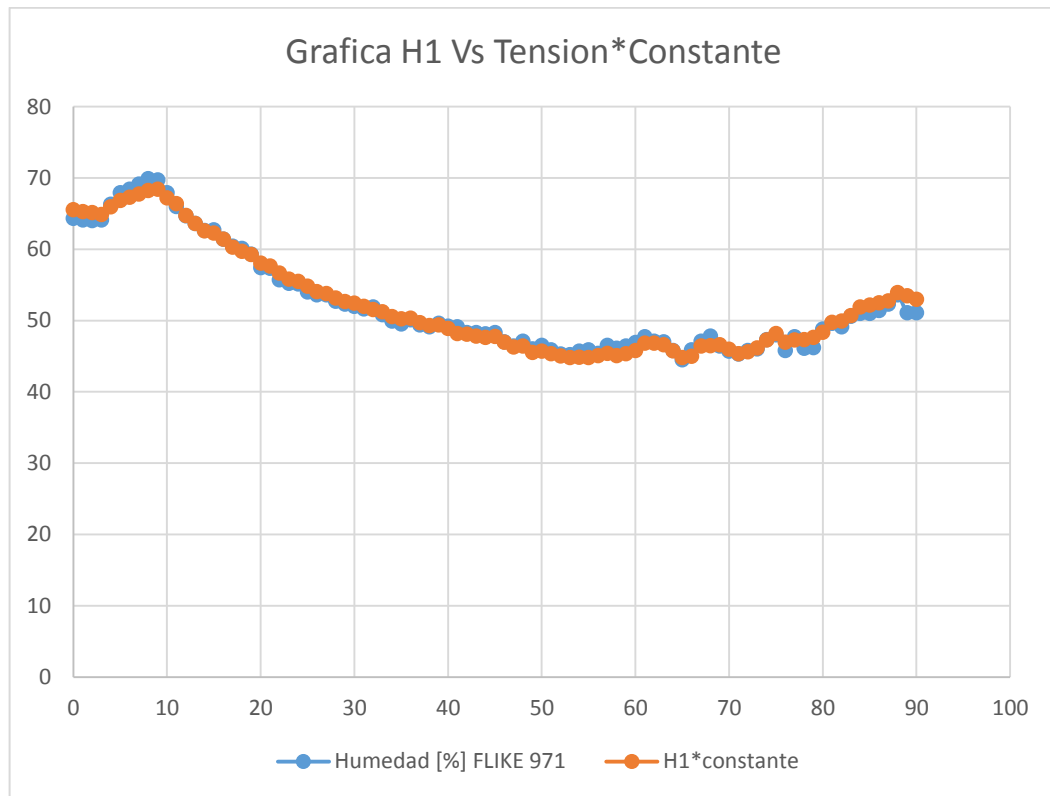


Figura 53. Datos del FLUKE, valores caracterizados del sensor Vs Muestras

Se hizo el mismo procedimiento de la caracterización para cada sensor, y se obtuvieron los valores de las constantes y desviación máxima mostrados en la Tabla 7.

	Constante	Desviación
H1	26,3275474	2,36493009
H2	26,9068	2,56576059
H3	26,596	2,43881982
H4	27,382	3,05016128

Tabla 7. Tabla de las constantes y desviación máxima para la caracterización de los cuatro sensores de humedad.

CARACTERIZACIÓN SENSORES DE TEMPERATURA

Con los sensores de temperatura se realizó el mismo procedimiento y en paralelo con los sensores de humedad.

Datos Adquiridos con Fluke 971

Los datos del FLUKE se tomaron manualmente y fueron los siguientes:

MUESTRA	TEMPERATURA [C]
0	29,8
1	29,8
2	29,8
3	29,4
4	29,1
5	29
6	28,8
7	28,6

Tabla 8. Datos mostrados por el FLUKE.

En este caso se muestran solo siete muestras como ejemplo ilustrativo, pero realmente fueron noventa datos que se adquirieron durante las dos horas y de los cuales se utilizaron para la caracterización de cada sensor.

Con los datos adquiridos y guardados, se procedió a trabajar con la herramienta de EXCEL, el cual se importaron para poder relacionar los valores obtenidos por el FLUKE junto con los datos del sensor. En la figura 7 se graficó temperatura que mostraba el FLUKE versus la tensión que suministraba el sensor de temperatura, y se realizó su respectiva linealización para obtener el valor de la pendiente y de

su desviación máxima, donde la pendiente es la constante que caracteriza el sensor.

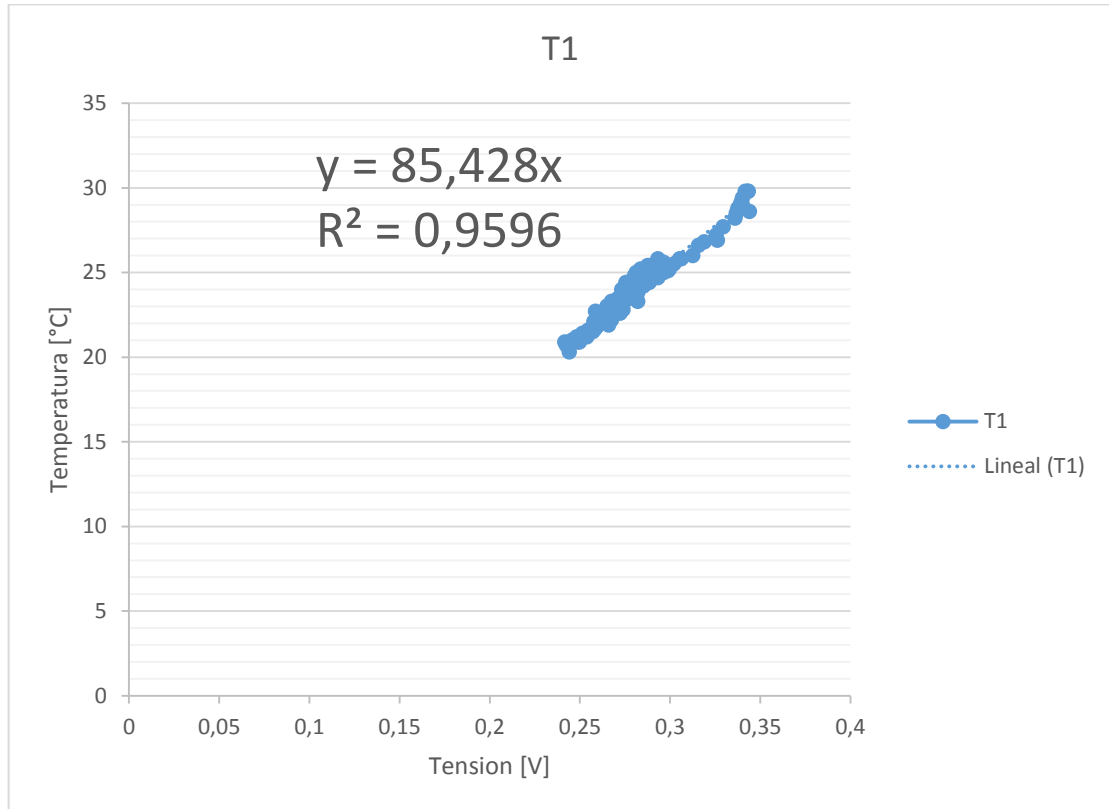


Figura 54. Gráfica del sensor T1 de temperatura vs tensión.

Al linealizar los valores se obtuvieron los siguientes datos de pendiente y desviación máxima.

Valor de Pendiente	85,428
Desviación Máxima	0,9814439

Tabla 9. Pendiente obtenida (constante), junto con la desviación máxima

Con la constante obtenida y la tensión suministrada por el sensor, se hizo una comparación con los valores del FLUKE y de los datos caracterizados, el cual se obtuvo una gráfica semejante a los valores de referencia del instrumento de medición.

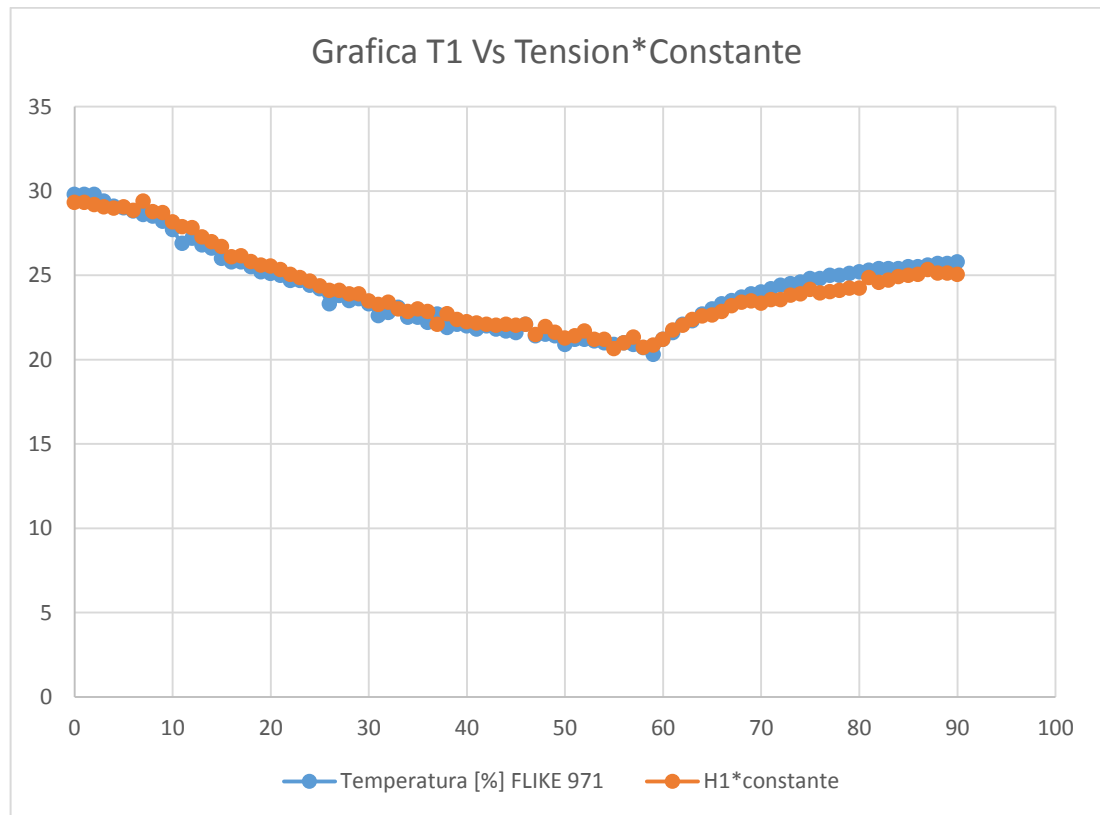


Figura 55. Datos del FLUKE vs valores caracterizados del sensor.

Se hizo el mismo procedimiento de la caracterización para cada sensor, y se obtuvieron los valores de las constantes y desviación máxima mostrados en la tabla 6.

	Constante	Desviacion
T1	85,428	0,9814439
T2	95,56	1,92304568
T3	90,284	2,88001972
T4	92,107	1,66858795

Tabla 10. Tabla de las constantes y desviación máxima para la caracterización de los cuatro sensores de temperatura.

ANEXO B. Diseño y operación del sistema de emulación y registro de condiciones ambientales (Humedad y Temperatura).

Para la emulación de las condiciones ambientales se realizó el montaje de tres lámparas 250w que emulan la radiación generada por el sol, aumentando la temperatura en la estructura. Como se muestra a continuación.

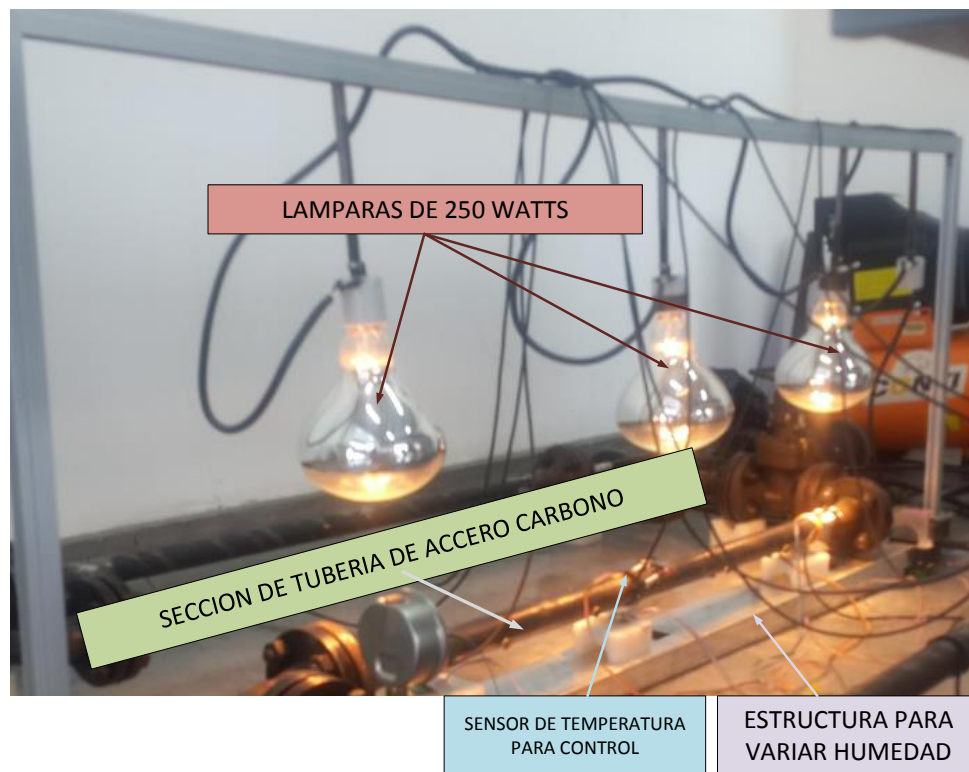


Figura 56. Descripción del montaje de pruebas.

Además de esto para realizar el estudio, se realizó un sistema de medición por medio de un Arduino para adquirir la información de los sensores ubicados en la estructura y presentarlos por medio de una GUI en Matlab®.

Se realizó el montaje que se muestra a continuación tomado de [27], que por medio del integrado H11AA11 detecta el cruce por cero de la señal proveniente de la red y envía un uno a la salida que es identificado mediante las interrupciones del ARDUINO y de esta manera realizar el disparo que permita circular corriente por el TRIAC, para así controlar la intensidad del bombillo.

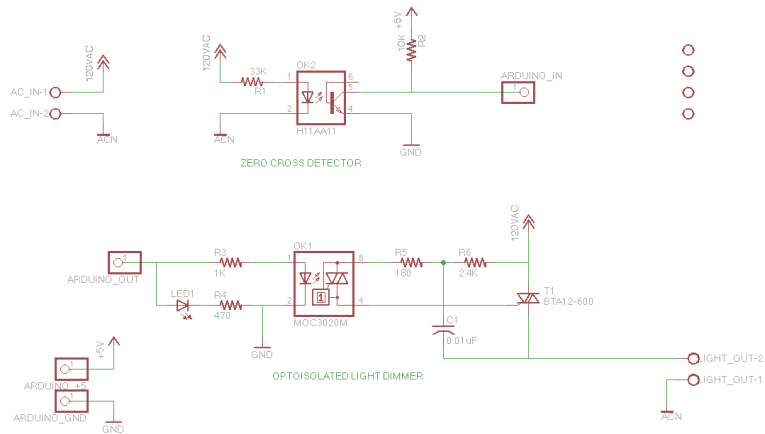


Figura 57. Montaje para controlar la intensidad del bombillo

Después de poder controlar la intensidad de las lámparas Se implementó un Controlador PI para controlar la intensidad de calor irradiada por las lámparas y de esta manera mantener una temperatura establecida.

Para ello se tomó la señal del PZT ubicado en el centro de la estructura y con esta señal se realizó el respectivo control de temperatura, para diseñar el controlador se realizó la respuesta al impulso de la planta y se registraron los valores leídos por el sensor después de esto se utilizó la herramienta ident de Matlab® que permitió encontrar una buena aproximación a la respuesta del sistema.

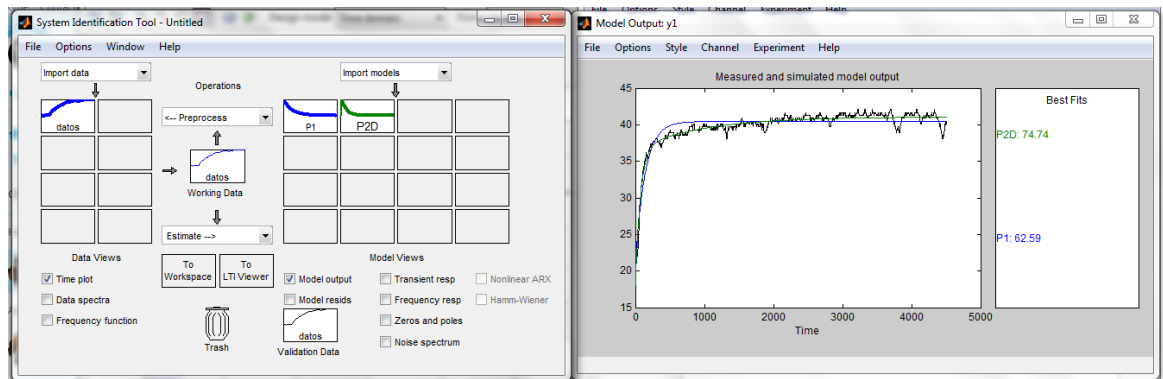


Figura 58. Ilustración de la herramienta ident de Matlab

Después de tener una buena aproximación de la función de transferencia se procedió a calcular las constantes mediante la herramienta PID Tuning de Matlab® donde se obtuvieron las siguientes constantes $K_p= 10.88$ $K_i=0.7871$, estas constantes se utilizaron para sintonizar el controlador mediante ARDUINO y la librería PIDLibrary [26]. Y realizaron pruebas de la respuesta del controlador a los cambios donde se ajustaron de manera empírica los valores de las constantes quedando como valores $K_p= 10.5$ $K_i=1.9$. Las cuales mejoraron la respuesta del controlador cuando se efectuaba un cambio en la señal de referencia.

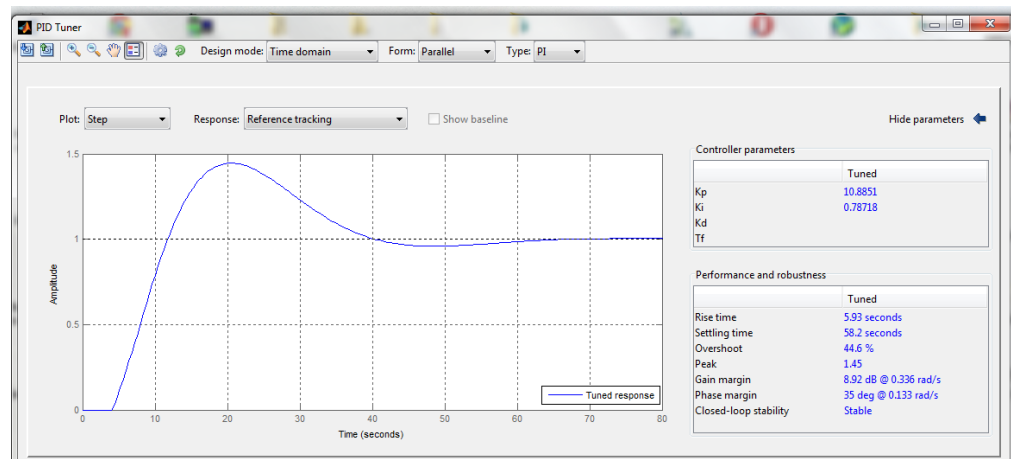


Figura 59. Señal de respuesta del controlador

El control implementado permite cargar un vector con los valores de referencia a seguir por el controlador y el tiempo de cambio entre ellos en el script del Arduino se modifican los parámetros que queremos establecer para la realización del experimento.

```
int SetpointAr[]={26,27,28,28,30,30,31,32,33,34,34,34,30,40}; //vector de referencias
int tchangeSet=980000; //tiempo en ms
```

Después de realizados estos cambios se accede a la GUI creada en Matlab® la cual se encarga del registro de la información de todos los sensores ubicados cerca de la estructura.

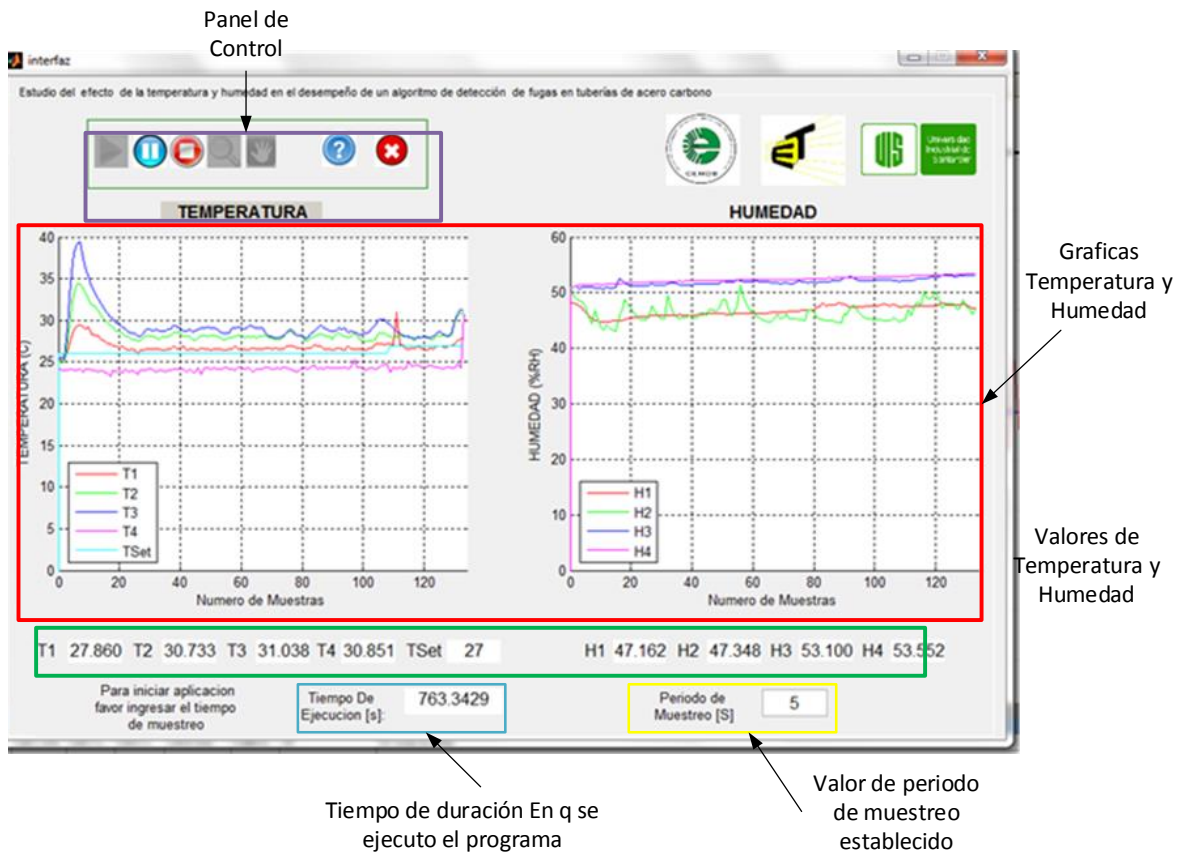


Figura 60. Guide realizada para observar los valores de temperatura y humedad

La interfaz de usuario *guide* permite mostrar los valores de temperatura y humedad a la que se encuentra expuesta la estructura en el transcurso del tiempo. Y de esta manera poder determinar el mejor momento para realizar los registros de datos. Los datos mostrados en la *guide* quedan almacenados en un documento .txt que puede ser cargado para el respectivo análisis de datos.