

Cuantificación de Imperfecciones Controladas Mediante la Aplicación de Termografía de Fase Pulsada a Plexiglás

Miguel Ángel Cifuentes Marín¹, Milton Humberto Medina Barreto²

Resumen— La termografía es una técnica de Ensayo no Destructivo (NDT) que tiene grandes ventajas en comparación con otras, ya que puede ser usada a una distancia considerable del objeto de estudio y funciona con un tipo de radiación que no es perjudicial para la salud. Este documento presenta la aplicación de la técnica de Termografía de Fase Pulsada (PPT) a una probeta de Polimetilmetacrilato (plexiglás) con imperfecciones controladas de forma circular, en la cual se realiza el procesamiento de los termogramas registrados y la cuantificación de las características geométricas correspondientes a cada defecto. El espécimen fue excitado con pulsos de calor cuya duración fue variada entre 10 ms y 500 ms, a través de una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) y se tomaron 50 imágenes con una frecuencia de muestreo (Fs) de 0,33 Hz. Las imágenes fueron obtenidas tanto en modo de reflexión como de transmisión, lográndose por un lado, calcular la difusividad del plexiglás, y por el otro mediante el procesamiento de las imágenes en Matlab empleando el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) relacionar la frecuencia ciega con la profundidad de cada imperfección. Los resultados arrojaron un valor de difusividad del espécimen de $\alpha = 0,107 \pm 0,006 \text{ mm/s}^2$, valor que se encuentra dentro de los valores esperados de acuerdo con la literatura. La FFT provee imágenes de amplitud y fase, estas últimas denominadas fasegramas las cuales pueden ser utilizadas para el cálculo del contraste de fase absoluto y a partir de allí inferir la profundidad de cada imperfección. El diámetro resulta más sencillo de encontrar calculando el contraste térmico. Finalmente, se espera implementar una interfaz de usuario que utiliza un termograma, permite elegir una imperfección específica y visualizar sus características geométricas con sus respectivas incertidumbres.

Palabras Clave: *Frecuencia ciega, Radiación Infrarroja, Termografía de Fase Pulsada, Transformada de Fourier.*

1. INTRODUCCIÓN

La Termografía Infrarroja (TIR) es una técnica de Ensayo No Destructivo (NDT) que obtiene la temperatura de un cuerpo mediante la captación de la radiación infrarroja (IR) que éste emite, y luego la representa a través de imágenes también conocidas como termogramas. El uso sin contacto, el tipo de radiación que utiliza y el tiempo de adquisición de las imágenes son grandes ventajas en contraste con otras técnicas como el ultrasonido y los rayos X. Es importante saber que la velocidad de propagación de una onda térmica es diferente para cada material, y produce un calentamiento no uniforme de estos. En los metales sobre todo, dicha no uniformidad es más drástica que en los polímeros, gracias a que la PPT es menos afectada por el calentamiento no uniforme que otros tipos de termografía, es posible ubicar y determinar características como profundidad o diámetro de los defectos. Para que esta técnica sea efectiva es necesario que los termogramas posean diferencias de temperatura entre las distintas zonas del material, por lo tanto es importante

¹ miguel7@utp.edu.co, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Pereira

² mmedina@utp.edu.co, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Física

elegir un método de excitación térmica y adquisición de imágenes de las muestras, que facilite realizar el análisis de la información obtenida. El grupo de Investigación en Propiedades Magnéticas y Magnetoópticas de Nuevos Materiales (GIMM) viene realizando desde hace varios años, proyectos relacionados con la caracterización térmica de materiales empleando termografía infrarroja. Por lo tanto, se cuenta con los equipos necesarios para controlar la duración de los pulsos de calor que excitan las muestras, así como cámaras termográficas que permiten la adquisición de los distintos termogramas.

2. PLANTEAMIENTO DE LA PREGUNTA O PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Las NDT están siendo fuertemente implementadas en la actualidad, en áreas de la industria que requieren especial control de calidad en sus productos o piezas, tales como la aeronáutica y la aeroespacial; también en el mantenimiento predictivo de máquinas de procesos industriales e inclusive en aparellaje eléctrico de alta y baja tensión. La termografía está muy relacionada con las herramientas del procesamiento de imágenes, puesto que gran parte del éxito en los resultados de esta técnica depende de la forma en que sean procesados los termogramas [1, 2]. Es necesario mencionar que la composición de una vasta variedad de piezas y máquinas está constituida a base de polímeros como el plexiglás. Con base en lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál sería el protocolo de adquisición de imágenes termográficas que permita el mejor análisis de las características de muestras de plexiglás y cómo debería aplicarse la transformada de Fourier a los termogramas para cuantificar los parámetros geométricos de las imperfecciones presentes?

3. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años la termografía está siendo ampliamente utilizada en gran variedad de aplicaciones, lo cual se refleja en que en el año 2016 más de dos mil documentos fueron publicados en torno a este tema y en lo que va corrido del presente año ya van más de trescientos tal como lo muestra la figura 1.



Figura 1. Número de artículos en aplicaciones con termografía publicados cada año [9].

En industrias como la aeronáutica y la aeroespacial es necesario realizar estudios de las partes que forman las aeronaves, puesto que un defecto hasta en la pieza más pequeña podría ser devastador. En Risaralda es un ensayo NDT relativamente reciente, la cual no ha sido todavía implementada en diversas áreas de la industria donde sería de gran utilidad para predecir o prevenir resultados inesperados. Es pertinente empezar con PPT por ser una técnica que al utilizar las imágenes de fase obtenidas de la transformada de Fourier, no es tan afectada por el calentamiento no uniforme de las muestras y es relativamente fácil de aplicar. Además, el Grupo de Investigación en Propiedades Magnéticas y Magnetoópticas (GIMM), de la Universidad Tecnológica de Pereira está incursionando fuertemente en el campo de la termografía, analizando las técnicas ya existentes y buscando innovar en el área.

4. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer, implementar y validar un protocolo de calibración que permita detectar y cuantificar imperfecciones superficiales y subsuperficiales controladas en probetas de plexiglás, mediante la adquisición, preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento de imágenes obtenidas a través de PPT.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Revisar la bibliografía y el estado del arte.
2. Adquirir habilidad en el manejo de la cámara Fluke T300 y revisar los parámetros físicos relacionados a ella.
3. Definir los criterios de diseño de las probetas y del sistema experimental que permitan la aplicación de la técnica PPT al estudio termográfico sobre plexiglás.
4. Diseñar una GUI que permita controlar la duración del pulso de excitación generado por las lámparas halógenas.
5. Caracterizar la distribución térmica de dos lámparas halógenas para determinar su influencia como componente de ruido óptico en las imágenes termográficas.
6. Calcular la difusividad de la probeta de plexiglás, teniendo en cuenta la norma ASTM E1461-13.
7. Realizar el preprocesamiento (rotación y normalización) de las imágenes registradas.
8. Implementar la técnica PPT para el procesamiento de imágenes termográficas de las probetas metálicas tanto en modo transmisión como en modo reflexión de la cámara, para evaluar la presencia o ausencia de defectos y su posición, y comparar resultados en ambos modos.
9. Realizar el procesamiento de las imágenes de fase mediante la segmentación y el análisis del contraste presente.

10. Diseñar una GUI que permita visualizar los valores de diámetro y profundidad de cada imperfección.
11. Analizar los resultados y validar el protocolo establecido.

5. REFERENTE TEÓRICO

Para entender correctamente el uso y funcionamiento de los equipos infrarrojos es de vital importancia entender principios de la termodinámica (como la transferencia de calor) y de la física de la radiación infrarroja. Inicialmente de la termodinámica, se sabe que existen tres métodos básicos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. El primero es la transferencia de energía de un objeto a otro mediante contacto directo, el segundo se produce cuando corrientes de gases o líquidos se desplazan entre zonas calientes y frías. Finalmente el último método es el intercambio de energía electromagnética entre dos cuerpos o entre un cuerpo y el medio en el que se encuentra, y ya que las ondas electromagnéticas necesitan un medio para propagarse puede ser en el vacío.

La teoría electromagnética dice que las ondas de radio y la radiación térmica son manifestaciones de energía del mismo tipo y que se propagan en el vacío a una velocidad de 300.000 km/s. Se comprueba también en esta teoría que la electricidad y el magnetismo están relacionados, de allí que se le denomine teoría electromagnética. La propagación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes combinados, se conoce como radiación electromagnética. La Figura 2 muestra un esquema de onda electromagnética (OEM).

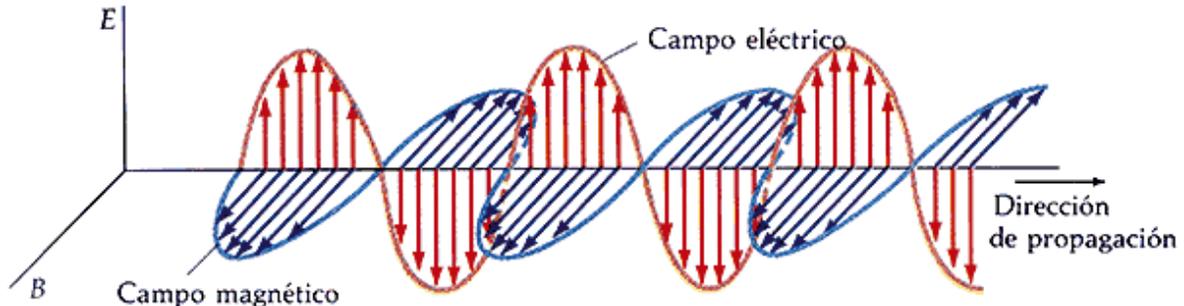


Figura 2. Onda Electromagnética [3].

Las OEM existen con distintos valores de longitudes de onda, los cuales diferencian la radiación electromagnética y hacen que se presente en varias formas, tales como luz visible, ondas de radio o radiación infrarroja; cada longitud de onda se sitúa en una zona diferente del espectro electromagnético, a radiación infrarroja (IR) tiene longitudes de ondas entre 1 mm y 750 nm. La cantidad de calor irradiado por una superficie es dependiente de la eficiencia con la que ésta emita energía y conforme la temperatura incrementa también lo hace la energía irradiada. Existen materiales que emiten poca energía de la que absorben, es decir, tienen baja emisividad, en general son los metales quienes cumplen con esta característica puesto que son brillantes, a diferencia de los materiales opacos que tienen una emisividad alta y facilitan la captación de la radiación infrarroja.

La cámara termográfica representa la radiación proveniente del espectro electromagnético en cuestión, mediante imágenes denominadas termogramas. La excitación producida por

una fuente de calor externo, produce diferencias de temperatura entre zonas defectuosas y no defectuosas de un material, es a esto lo que se le denomina contraste, y es útil para los análisis mediante procesamiento de imágenes. Una herramienta importante para el procesamiento es la transformada de Fourier (FT), la cual al ser aplicada a una función la lleva del dominio del tiempo al de la frecuencia. La FT es en general una integral continua, pero es posible usar una expresión equivalente en un dominio discreto, esta recibe el nombre de Transformada Discreta de Fourier (DFT) y se representa de la siguiente manera:

$$F_n = \sum_{k=0}^N T(k)e^{2\pi jkn/N} = Re_n + Im_n \quad (1)$$

Donde $T(k)$ es la función a transformar, k es la variable independiente y N el número de muestras. Además es evidente que como resultado se tiene una parte real y una imaginaria, y se puede afirmar que la fase está dada por:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Im_n}{Re_n} \right) \quad (2)$$

La DFT es aplicada a cada pixel de las imágenes, formando así los denominados fasegramas, mediante el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Posterior a esto, se debe tener en cuenta que el contraste de fase absoluto se define como:

$$\Delta\phi = \phi_d - \phi_s \quad (3)$$

Donde ϕ_d es la fase de un pixel y ϕ_s es el valor promedio de fase en un área definida. El contraste de fase depende de las propiedades térmicas del material, la estructura subsuperficial del espécimen y la frecuencia de modulación [5]. Además, de esto se tiene que la profundidad de un defecto está dada para el mínimo valor de la frecuencia ciega (Figura 3), según la siguiente ecuación:

$$z \propto f_b^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$z \approx \alpha t^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Donde z es la profundidad del defecto, f_b la frecuencia ciega y α es la difusividad del material [1].

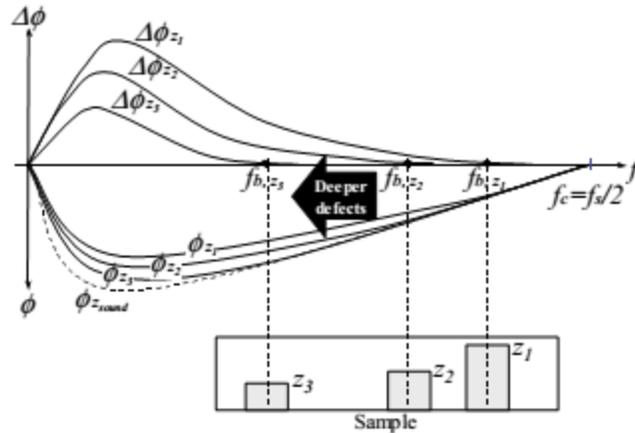


Figura 3. Relación entre la profundidad de las imperfecciones y la frecuencia ciega [5].

6. METODOLOGÍA

La presente propuesta de investigación se clasifica dentro de la modalidad de Investigación Aplicada de Tipo Experimental en la cual se plantean dos estudios:

1. Determinación del diámetro de las imperfecciones presentes en las probetas de polimetilmetacrilato, también conocido como plexiglás, haciendo uso de la técnica PPT con la transformada de Fourier y de la cámara Fluke TI300 en dos modos de adquisición de termogramas, reflexión y transmisión.
2. Determinación de la profundidad de las imperfecciones existentes en las probetas teniendo en cuenta la relación que hay entre el tiempo o la frecuencia ciega (es decir, la frecuencia a la que un defecto es visible por primera vez) y la profundidad de los defectos [1].

En primera instancia se diseñó y creó una probeta circular de plexiglás, con un diámetro de 120 mm y un espesor de 5 mm, además, es importante tener en cuenta que tiene en una de sus superficies planas, algunas imperfecciones circulares especialmente controladas y distribuidas, es decir, cada una cuenta con un diámetro y una profundidad conocida.

El sistema de adquisición de imágenes de la probeta se de acuerdo al estado del arte [5], para Termografía Activa Pulsada (PT), teniendo en cuenta la variación en la posición de la cámara según el modo de adquisición de datos de la cámara termográfica, el sistema consta de dos lámparas halógenas de 500 W cada una, con el propósito de excitar térmicamente durante unos milisegundos la probeta de análisis. Una interfaz gráfica de usuario (GUI), implementada en Matlab, la cual proveyó la posibilidad de controlar el tiempo que las lámparas están encendidas, mediante el acople del computador a través de una tarjeta de adquisición de datos (DAQ NI-USB 6001) con una interfaz de potencia basada en relé de estado sólido que va directamente a las lámparas. Una cámara termográfica (Fluke TI300), con una tasa de muestreo de 0.33 Hz y un termohigrómetro con el objetivo de obtener la temperatura y la humedad del ambiente. Para reducir la influencia de ruido óptico es óptimo realizar la toma de termogramas en un ambiente oscuro. El esquema del sistema es el siguiente:

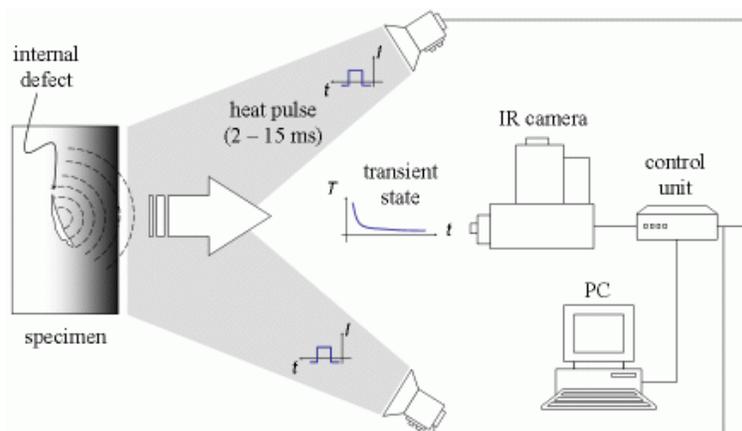


Figura 4. Sistema de termografía infrarroja activa pulsada (Reflexión) [8].

Se tomaron 50 imágenes por cada pulso con la cámara directamente sobre cada lámpara encendida a distintos tiempos y en dos posiciones principales; la primera en la posición del sistema normal y la segunda con ella en el lugar donde experimentalmente estaría la probeta, y así, mediante las imágenes obtenidas se caracterizó su distribución térmica y fue posible analizar su influencia como componente de ruido óptico. Teniendo esto presente, se inició la toma de imágenes con el sistema ya descrito con el propósito de adquirir habilidad en el manejo de la cámara termográfica Fluke TI300 y con el software SmartView, propio de este instrumento.

Se adquirieron los termogramas correspondientes a la probeta haciendo variaciones en la duración de los pulsos generados por las lámparas para observar los cambios en la distribución térmica de las imágenes y con éstas determinar la difusividad del material según la norma ASTM E1461-13, pues es un parámetro necesario en el cálculo de la profundidad [1], el número de imágenes por cada tiempo fue de 30 y las duraciones fueron de 10 ms, 30 ms, 50 ms, 100 ms, 200 ms y 500 ms. Además se ubicó la cámara termográfica en dos posiciones distintas, frente a la muestra y detrás de ella, según el modo de funcionamiento elegido para la toma de datos, los cuales podían ser reflexión o transmisión, el primero con la cámara frente a la muestra y los defectos, y el segundo con ella al lado contrario. Como primer paso fue necesario tener bien establecidos los parámetros físicos de la cámara, tales como la emisividad, la temperatura y la distancia a la muestra, para lo cual se utilizan el termómetro, el termohigrómetro, y con laca color negro mate se pintó la probeta y así aumentó su emisividad, pues en su estado natural era relativamente brillante. En segunda instancia se realizó una rotación y normalización de los termogramas, pues cuando se adquirieron no estaban perfectamente ubicados en relación con las lámparas y el soporte que sostuvo la pieza.

7. RESULTADOS PARCIALES Y ESPERADOS

La caracterización de las lámparas resultó satisfactoria, ya que se esperaba que no tuviera gran influencia en la temperatura del ambiente que pudiera afectar la adquisición de los datos. Según los resultados obtenidos fue posible observar que la temperatura antes y después del pulso de calor, no tenía una variación significativa. En el cálculo de la difusividad resultó que la de la probeta es de $\alpha = 0,107 \pm 0,006 \text{ mm/s}^2$.

Se espera además que luego de la aplicación de la transformada de Fourier a cada pixel de los termogramas obtenidos, la determinación del diámetro de las imperfecciones sea relativamente sencilla, ya que es una etapa que no requiere un gran desarrollo del procesamiento de imágenes [1].

El cálculo de la profundidad de la imperfección requiere una mayor exigencia en el procesamiento de los termogramas, pero mediante los fasegramas se espera encontrar los valores con un error muy pequeño. Entonces, habiendo sido calculados el diámetro y la profundidad de los defectos se procede a calcular las respectivas incertidumbres. Finalmente, se diseñará la GUI en Matlab, que permitirá elegir cada imperfección y ver sus características geométricas con sus respectivas incertidumbres y se realiza la validación del protocolo establecido.

8. CONCLUSIONES

La termografía pulsada es una técnica útil para el cálculo de la difusividad de polímeros como el plexiglás. Los materiales con baja conductividad, como el espécimen de este estudio, no requieren altas frecuencias de muestreo, a diferencia de los materiales que tienen alta conductividad como los metales.

La FT es una herramienta muy útil en vista de que tiene la capacidad de otorgar información que no se ve tan afectada por el calentamiento no uniforme del espécimen a estudiar. Sin embargo la aplicación de la Transformada de Fourier tiene la desventaja de anular la información temporal de los datos, la cual está directamente relacionada con la profundidad de las imperfecciones. Una transformada compleja, al igual que la de Fourier, con la diferencia de que tenga la facultad de conservar la información correspondiente al dominio del tiempo sería una excelente opción para procesar los termogramas, un ejemplo de ello es la Transformada Wavelet.

9. IMPACTOS

Social

El tipo de radiación que utiliza no es perjudicial para la salud de la persona que implementa la termografía. El control de calidad en las piezas fabricadas a base de polímeros como el plexiglás en aplicaciones, tales como aviones o barcos, donde están involucradas la salud física e incluso la vida de las personas. Es importante mencionar que en el mantenimiento de estructuras como edificios o casas es de gran utilidad y esto puede hablar del deterioro de alguna edificación, de tal forma que si se realizan procedimientos de NDT con termografía se cuida la integridad física de la gente que esté en contacto con edificaciones o máquinas.

Económico

Uno de los principales usos de la termografía dentro de la industria es el mantenimiento preventivo y predictivo, esto representa una disminución en el gasto de nueva maquinaria, ya que se está al pendiente del estado actual de las que son propiedad de la empresa y se reduce el riesgo de pérdida. La inspección con termografía es no destructiva, es decir, no debe afectarse la integridad de los materiales o máquinas a las que se les realicen los procedimientos de control, esto definitivamente representa un ahorro. Además si una empresa implementa ésta técnica para control de calidad o mantenimiento, generaría confiabilidad y a la larga sería un activo y no un gasto.

Ambiental

Aunque se utilizan lámparas de potencia relativamente alta (500W), el tiempo de implementación es mínimo, del orden de los milisegundos, por lo cual el costo energético es bajo y la contaminación producida también. Además, por ser una técnica no invasiva, no requiere de la destrucción de los materiales, por ende evita la generación de desechos de distintos tipos.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Benitez, "Contribución a la Caracterización de Defectos en Termografía Infrarroja mediante Máquinas de Aprendizaje", Doctorado, Universidad del Valle, 2008.
- [2] X. Maldague, F. Galmiche and A. Ziadi, "Advances in pulsed phase thermography", *Infrared Physics & Technology*, vol. 43, no. 3-5, pp. 175-181, 2002.
- [3] 2017. [Online]. Available: <https://www-scopus-com.ezproxy.utp.edu.co/term/analyzer.uri?sid=F65B6296A966FCD97EECA42CCE8205C7.wsnAw8kcdt7IPYLO0V48gA%3a10&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28Thermography%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=27&count=30713&analyzeResults=Analyze+results&txGid=F65B6296A966FCD97EECA42CCE8205C7.wsnAw8kcdt7IPYLO0V48gA%3a13#zip>. [Accessed: 30- Mar- 2017].
- [4] P. IP, "Pregunta: Espectro Electromagnético - Respuesta: ...", *Pregunton.org*, 2017. [Online]. Available: <http://www.pregunton.org/pregunta.php?id=1019>. [Accessed: 21- Mar- 2017].
- [5] C. Ibarra-Castanedo and X. Maldague, "Defect depth retrieval from pulsed phase thermographic data on plexiglas and aluminum samples", *International Society for Optics and Photonics*, pp. 348-356, 2004.
- [6] D. Sharath, M. Menaka and B. Venkatraman, "Defect Characterization Using Pulsed Thermography", *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 32, no. 2, pp. 134-141, 2012.
- [7] W. Parker, R. Jenkins, C. Butler and G. Abbott, "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity", *Journal of Applied Physics*, vol. 32, no. 9, pp. 1679-1684, 1961.
- [8] "Visioimage Inc. - Infrared Vision Systems", *Visioimage.com*, 2017. [Online]. Available: http://www.visioimage.com/en/products_ir_ndt_thermography_tutorial.htm. [Accessed: 27- Mar- 2017].
- [9] "Descubrimiento de las ondas de Radio: la confirmación de la Teoría Electromagnética", *Investigación y Ciencia*, 2017. [Online]. Available: <http://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/10/posts/descubrimiento-de-las-ondas-de-radio-la-confirmacin-de-la-teora-electromagnetica-10186>. [Accessed: 21- Mar- 2017].
- [10] C. Ibarra Castanedo, "QUANTITATIVE SUBSURFACE DEFECT EVALUATION BY PULSED PHASE THERMOGRAPHY: DEPTH RETRIEVAL WITH THE PHASE", Doctorado, Université Laval, 2005.

11. FICHA TÉCNICA

Universidad	Universidad Tecnológica de Pereira	
Programa Académico	Ingeniería Física	
Nombre del Semillero	Semillero de la Interacción Magnética y de la radiación Infrarroja Aplicada a Materiales	
Nombre del Grupo de Investigación	Grupo de Investigación en Propiedades Magnéticas y Magnetoópticas de Nuevos Materiales	
Línea de Investigación	Radiación Electromagnética Aplicada	
Nombre del Tutor del Semillero	Dr. Milton Humberto Medina Barreto	
Email Tutor	mmedina@utp.edu.co	
Título del Proyecto	Cuantificación de Imperfecciones Controladas Mediante la Aplicación de Termografía de Fase Pulsada a Plexiglás	
Autor del Proyecto		
Ponente	Miguel Ángel Cifuentes Marín	
Documento de Identidad	1088019337	
Email	miguel7@utp.edu.co	
Teléfonos de Contacto	3216204300	
Nivel de formación de los estudiantes ponentes (Semestre)	10 semestre	
MODALIDAD (seleccionar una- Marque con una x)	PONENCIA	
	Investigación en Curso	X
	Investigación Terminada	
	PÓSTER	
ÁREA DE LA INVESTIGACIÓN (seleccionar una- Marque con una x)	Propuesta de Investigación	
	Ciencias Naturales	
	Ingenierías y Tecnologías	X
	Ciencias Médicas y de la Salud	
	Ciencias Agrícolas	
	Ciencias Sociales	
	Humanidades	
Artes, arquitectura y diseño		