

# REPORTE DE PROYECTO INDUSTRIAL

**“Desarrollo y caracterización de un sistema  
pirométrico para el monitoreo del  
mecanismo de unión en el proceso de  
manufactura de álabes de fibra de carbono.”**

QUE PARA OBTENER  
LA ESPECIALIDAD TECNÓLOGO EN MECATRÓNICA

PRESENTA

JENNIFER ARELY VIVEROS MUÑOZ

Tutor Académico

DR. ELOY EDMUNDO RODRÍGUEZ VÁZQUEZ.



QUERETARO, QRO. AGOSTO 2017.

Agradecimientos.

A mis padres y hermanos por ser mi apoyo incondicional y motivo para seguir creciendo profesionalmente.

**AUTORIZACIÓN**  
**PUBLICACIÓN EN FORMATO ELECTRÓNICO DE TESIS**

Fecha:  
18/08/2017

El que suscribe Alumno (a) Jennifer Arely Viveros Muñoz

CURP VIMJ930402MVZVXN03 CVU 51533

ORCID

Correo electrónico (opcional)

Jennifer.viverosm@hotmail.com

Egresado (a) de Tecnólogo en Mecatrónica.

Autor de la Tesis titulada

Desarrollo y caracterización de un sistema pirométrico para el monitoreo del mecanismo de unión en el proceso de manufactura de álabes de fibra de carbono.

Por medio del presente documento autorizo<sup>1</sup> en forma gratuita y permanente a que la Tesis arriba citada sea divulgada y reproducida para publicarla mediante almacenamiento electrónico que permita el acceso al público a leerla y conocerla visualmente, así como a comunicarla públicamente en Página Web.

La única contraprestación que condiciona la presente autorización es la del reconocimiento del nombre del autor en la publicación que se haga de la misma.

Atentamente

-----  
Jennifer Arely Viveros Muñoz

<sup>1</sup> Ley Federal de Derechos de Autor

Para obtener tu ORCID regístrate en: <https://orcid.org/register>

|  |    |
|--|----|
| Contenido  |    |
| RESUMEN .....  | 6  |
| Capítulo I. Introducción .....   | 7  |
| Planteamiento del problema.....  | 8  |
| Justificación.....   | 8  |
| Objetivo.....  | 9  |
| Objetivos específicos.....   | 9  |
| Definición del proyecto.....   | 10 |
| Antecedentes o revisión de la literatura. ....   | 11 |
| Capítulo II. Metodología.....  | 14 |
| Marco teórico. ....  | 14 |
| Manufactura Aditiva.....   | 14 |
| Resina Epoxi.....  | 15 |
| Proceso de Curado.....   | 15 |
| Fibra de carbono .....   | 15 |
| MLX90614 .....   | 16 |
| Arduino Nano. ....   | 18 |
| Procedimiento experimental. ....   | 19 |
| Sistema óptico del pirométo.....   | 19 |
| Sistema electrónico del pirómetro.....   | 21 |
| Desarrollo e integración de los sistemas electrónico y óptico para la<br>conformación del sistema pirométrico..... | 22 |
| Resultados.....  | 23 |
| Conclusiones.....  | 26 |
| Referencias.....   | 27 |
| Anexos .....   | 28 |

## Contenido de tablas y figuras

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Antecedentes o revisión de la literatura.....  | 9  |
| Figura 1. Arreglo experimental del sistema de curado térmico de fibras. ....  | 7  |
| Figura 2. “P02” real. ....  | 8  |
| Figura 3. Cabezal del P02 .....   | 10 |
| Figura 4. Sensor LMX90614 internamente. [3].....  | 17 |
| Figura 5. Gráfica espectral del sensor respecto a la temperatura.....   | 17 |
| Figura 6. Sistema óptico del pirómetro.....   | 19 |
| Figura 7. Características de la primera cavidad. ....   | 20 |
| Figura 8. Sujetador para el MLX90614. ....  | 20 |
| Figura 9. Características de la segunda cavidad. ....   | 21 |
| Figura 10. Diagrama del circuito electrónico. ....  | 21 |
| Figura 11. Sistema pirométrico.....   | 22 |
| Figura 12. Proceso de unión del mecanismo. ....   | 23 |
| Figura 13. Temperaturas dadas en la experimentación.....  | 24 |
| Figura 14. Medición IR utilizando la cámara térmica FLUKE mientras el sistema de radiación IR estaba funcionando [13]. .... | 24 |
| Figura 15. Comparación entre las mediciones del sistema IR pirométrico y la cámara térmica FLUKE [13]. ....                 | 25 |

## RESUMEN

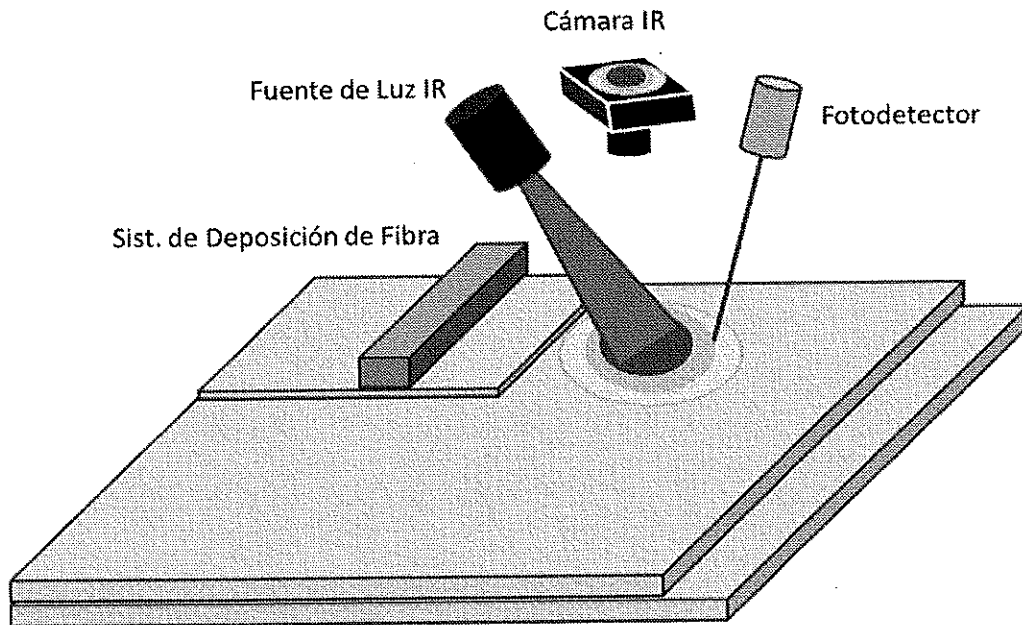
En la presente tesis se propone una metodología para desarrollar un sistema pirométrico que monitorea la temperatura, a través de la energía radiante en el espectro infrarrojo de la vecindad en la zona donde se realiza el proceso de activación térmica del mecanismo de unión entre las diferentes capas de fibras de carbono; durante el proceso de manufactura de álabes de turbinas eólicas. El sistema pirométrico desarrollado, será integrado a un sistema robótico para la manufactura aditiva por deposición que representa el objetivo principal del proyecto institucional P02 del CIDESI para el Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE Eólico).

Se incluye en este documento además de la primera versión del proceso de desarrollo de la metodología científica, los resultados obtenidos de la revisión del estado de la técnica, el esquema de conceptos del marco teórico y la descripción el proceso de diseño y resultados obtenidos de las primeras versiones tanto del sistema electrónico de acondicionamiento de señales como del sistema óptico de doble diafragma que integran al sistema pirométrico basado en un sensor infrarrojo para medir la temperatura a distancia.

## Capítulo I. Introducción

El CIDESI es miembro del Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico), y como tal, descansa en él la responsabilidad tecnológica de desarrollar las capacidades nacionales en manufactura de álabes de turbinas; requerimiento para el cual creó el proyecto institucional P02.

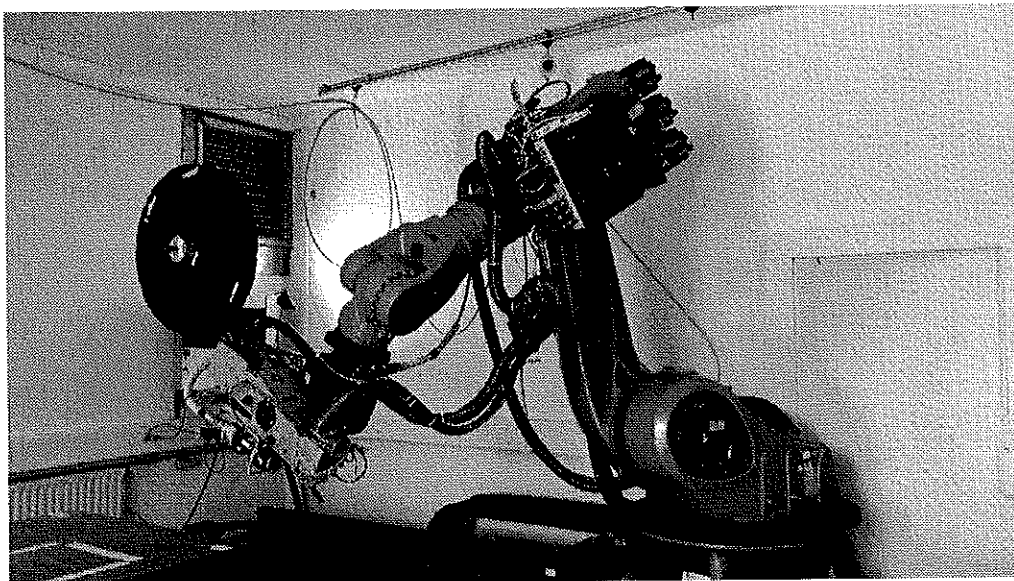
Como un sub proyecto del proyecto P02 se creó el “sistema de activación térmica para el mecanismo de unión de las fibras de carbono en los procesos de manufactura de álabes de turbogeneradores eólicos”; dentro de cuyos objetivos específicos se tiene el desarrollo e integración tanto del sistema de radiación para la activación térmica del mecanismo de unión, como del sistema pirométrico para el monitoreo de la temperatura en las zonas estratégicas del citado proceso.



*Figura 1. Arreglo experimental del sistema de curado térmico de fibras.*

Sea un sensor acoplado a un sistema óptico de doble orificio, pueda utilizarse para monitorear la temperatura sin contacto y de forma puntualmente localizada, durante el proceso de manufactura de álabes de fibra de carbono.

La Fig. 1, muestra el arreglo experimental del sistema para el curado térmico de fibras de carbono, y se observa en él la integración del sistema pirométrico (fotodetector); cuyo funcionamiento se sustenta en la capacidad que tiene el sensor infrarrojo MLX90614 para medir la radiación IR de los cuerpos a temperaturas entre los -70 a 382 °C para la temperatura de objetos. Un arreglo óptico de doble



apertura complementa el sistema pirométrico para mejorar la puntualización de la medición.

*Figura 2. "P02" real.*

Para comprender más a fondo, imagine que ya se tiene la primera capa de fibra de carbono impregnada de resina, el proceso se lleva a cabo con la máquina del P02 el cual se puede observar en la Figura\_, en el cabezal se tiene un rodillo, inmediatamente la lámpara que aporta el calor para el curado de esta y justo a un lado se implementara el pirómetro para ir censando la temperatura. Ahora se tiene una idea más clara del proceso para elaborar la turbina eólica mediante esta técnica.

Planteamiento del problema

Necesidad de monitorear la temperatura durante el proceso de curado térmico.

Justificación

Tomando como fundamento el hecho de que las propiedades estructurales y dinámicas de las resinas utilizadas para la unión y manufactura de componentes fibrosos que son activadas térmicamente mediante la incidencia de radiación luminosa, dependen de las estructuras moleculares que se conforman localmente en dichas resinas durante este proceso; se justifica la necesidad de monitorear la temperatura en el proceso de curado térmico para que exista una adecuada adhesión



de las capas de fibra de carbono y por consiguiente exista una buena manufactura de álabes de turbinas de dicho material.

#### Objetivo

Por lo tanto, el objetivo de este proyecto es:

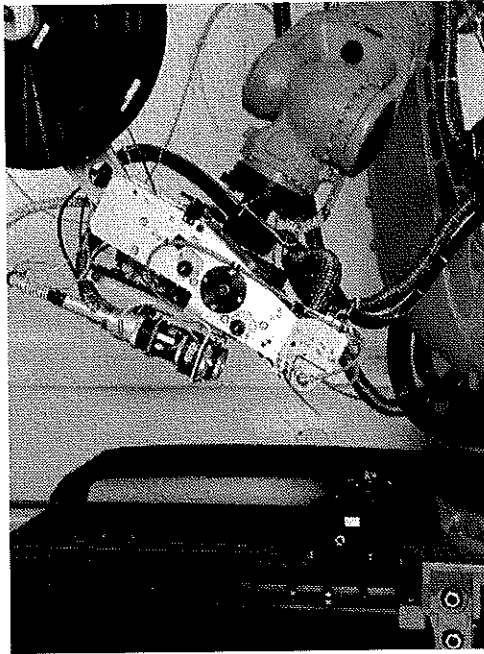
Desarrollar un sistema instrumental, basado en un detector pirométrico infrarrojo que monitorea la temperatura en las zonas estratégicas donde se realiza el proceso de curado de la resina que unen a las capas de fibra de carbono en procesos de manufactura aditiva de álabes de turbinas eólicas.

#### Objetivos específicos

- Cálculos básicos y selección de componentes para el diseño conceptual.
- Diseño de detalle del sistema electrónico para el acondicionamiento de señales y del sistema óptico de doble diafragma para el detector infrarrojo.
- Desarrollo e integración de los sistemas electrónico y óptico para la conformación del sistema pirométrico.

Definición del proyecto.

El proyecto desarrollado y caracterizado en esta tesis es un sistema pirométrico para el monitoreo del mecanismo de unión en el proceso de manufactura de álabes de fibra de carbono, el cual se colocara en el cabezal del P02 para cumplir con la función correspondiente mencionada.



*Figura 3. Cabezal del P02*

Antecedentes o revisión de la literatura.

Tabla 1. Antecedentes o revisión de la literatura.

| Título  | Autores   | Años         | Fuente   | Aportación   |
|---|---|--------------|--|--|
| Two-Color Pyrometer for Process Temperature Measurement During Machining                          | Alberto Tapetado, José Díaz Álvarez, María Henar Miguélez, Carmen Vázquez | Febrero 2016 | IEEE; JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 34 | Propone un pirómetro de fibra óptica para obtener mediciones de temperatura de superficies mecanizadas con un error de baja temperatura mediante un diseño optimizado. Los rayos dentro de la aceptación de la fibra óptica se recogen y transmiten. |
| Composición de elementos estructurales de construcción y método de elaboración.                   | Anna PEPELYAEVA   | 1 Jun 2017   | Google Patents                                 | Características de la fibra de carbono y resina de unión.  |
| Reporte P02   | M.C. Roberto Sosa, Dr. Gámez y Dr. Rodríguez.                             |              | Cidesi   | Explicación del proyecto general.  |
| Revestimiento interno para palas de aerogeneradores y procedimiento de montaje del mismo.         | De La Peña Razquin Emmanuel Garcia  | 22 Jun 2017  | Google Patents                                 | Técnica de curado de fibra de carbono con aire caliente.   |
| Braided wind turbine blades and method of making same   | Ronald R. Cairo   | 6 Oct 2010   | Google Patents                                 | Técnica de revestimiento y proceso de montaje para álabes de aerogeneradores.  |
| Luminescent organic/inorganic matrix, method for the production thereof and luminescent molecular | Fernando Palacio, Escolano Ángel Millán, Silva Nuno Joan                  | 29 Dic 2010  | Google Patents                                 | Funcionamiento de un termómetro de luminosidad.  |

|   |  |                  |   |   |
|---|--|------------------|---|---|
| thermometer based on said matrix  | Oliveira, Carlos<br>Luis Antonio<br>Días, Víctor<br>Amaral, Patricia<br>Lima, Carlos<br>Brites, Menos                          |                  |   |   |
| Fabricación Aditiva:<br>Tecnologías   | Dr. Guillermo<br>Reyes Pozo<br>Director del<br>Departamento<br>de Ingeniería<br>Industrial.<br>IQS. Universitat<br>Ramon Llull |                  | BIP<br>Barcelona<br>Institute of<br>Packaging   | Tipos de<br>Manufactura aditiva.                              |
| La fabricación aditiva,<br>tecnología avanzada para<br>el<br>diseño y desarrollo de<br>productos  | Manuel Zahera  | Julio de<br>2012 | XVI<br>Congreso<br>Internacio-<br>nal de<br>Ingeniería<br>de<br>Proyectos<br>Valencia | Información de la<br>manufactura aditiva.                     |
| Development of ReFaST<br>Pyrometer for Measuring<br>Surface Temperature<br>With Unknown<br>Emissivity:<br>Methodology,<br>Implementation, and<br>Validation | Xunjian Che;<br>Zhi Xie  | 2017             | IEEE<br>Transaction<br>s on<br>Instrumentat<br>ion and<br>Measureme<br>nt             | Importancia de la<br>emisividad para la<br>temperatura.       |
| Methods of precision<br>increase of a radiation<br>source coordinates<br>determination by a dual-<br>wavelength pyrometer<br>with optical shutters          | Anton I.<br>Sidorenko;<br>Andrey N.<br>Pavlov; Eugene<br>V. Sypin  | 2014             | IEEE<br>Transaction<br>s on<br>Instrumentat<br>ion and<br>Measureme<br>nt             | Información de la<br>capacidad de los<br>obturadores ópticos. |
| Optical-fiber pyrometer<br>positioning accuracy<br>analysis.  | A. Tapetado; E.<br>García; J. Díaz-<br>Álvarez; M. H.<br>Miguélez; C.<br>Vazquez   | 2016             | Proc. SPIE.<br>9916, Sixth<br>European<br>Workshop<br>on Optical<br>Fibre<br>Sensors  | Posicionamiento del<br>pirómetro.                             |

|   |   |           |   |  |
|---|---|-----------|---|--|
| Effect of pressure and temperature on properties of carbon-carbon composites prepared from renewable material | D Murali Manohar ;<br>Vasanthakumari Raju | Mayo 2017 | IEEE Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM) | Información con respecto a la temperatura y presión en el proceso del curado térmico de las capas de fibra de carbono. |
| Manual de materiales.   | George S. Brady                           | 1965      | Editorial Continental S.A.                                    | Tipos de carbono y características.  |
| Calor y Termodinámica   | Mark W. Zemansky                          | 1968      | Editorial Aguilar.  | Características de la propagación de calor.  |
| Temperature measurement   | L. Michalski<br>K.Eckersdorf<br>J. McGhee | 1986      | Editorial WILEY   | Equipo de medición de temperaturas y sus características.  |
| FISICA CUANTICA   | Dr. Mario Piris Silvera                   | 1999.     | Editorial ISCTN, 1999. La Habana, Cuba                        | Ley de Stefan-Boltzmann  |

## Capítulo II. Metodología.

### Marco teórico.

El sistema pirométrico desarrollado, como ya se ha mencionado anteriormente forma parte del proyecto P02 el cual consiste en manufactura aditiva, es por esto que en este documento se redacta brevemente información de este tema.

### Manufactura Aditiva.

La Fabricación Aditiva o Additive Manufacturing (AM) consistente en manipular material a escala micrométrica y depositarlo de forma muy precisa para construir un sólido, son muy diversas las tecnologías que permiten fabricar piezas por este principio.

Una reciente estandarización de actividades de la ASTM y la ISO reúne estos procesos en siete categorías. Este cuadro ilustrativo con información de cada proceso fue creado por Hybrid Manufacturing Technologies.

**Fotopolimerización** (Nombres alternativos: SLA: Sistema de estereolitografía, DLP: Procesamiento digital por luz, 3SP: Escaneo, giro y fotocurado selectivo, CLIP: Interfaz de producción líquida continua).

**Fusión de lecho de polvo** (Nombres alternativos: SLS: Sinterización selectiva por láser, DMLS: Sinterización directa de metal por láser, EBM: Fusión por rayo de electrones, SHS: Sinterización selectiva por calor, MJF: Multi Jet Fusion).

**Inyección por aglutinante** (Nombres alternativos: 3DP – Impresión 3D ExOne Voxeljet.)

**Inyección de material** (Nombres alternativos: Polyjet SCP: Impresión de curvatura suave MJM: Multi-Jet Modelling Projet).

**Laminación de hojas** (Nombres alternativos: LOM: Laminated Object Manufacture SDL: Laminación por deposición selectiva UAM: Manufactura aditiva ultrasónica).

**Extrusión de material** (Nombres alternativos: FFF – Fabricación por filamento fundido FDM – Modelado por deposición fundida).

**Deposición directa de energía (DED)** (Nombres alternativos: LMD: Deposición de metal por láser LENS: Laser Engineered Net Shaping DMD: Deposición Directa de Metal).

**Hybrid** (Nombres alternativos: AMBIT –creado por Hybrid Manufacturing Technologies).

Estos son algunos tipos de manufactura aditiva, en caso del proyecto P02 se trabaja con AFP "posicionamiento de fibra", no se pretende adentrar al tema ya que no es

de gran importancia para esta parte del proyecto. Antes de seguir avanzando es importante hacer énfasis en la oración que se ha mencionado “curado de fibra de carbono”, en realidad lo que se cura es la resina Epoxi, en este caso, la cual cumple con la función de unión del mecanismo. Es por ello que es necesario hacer de nuestro conocimiento algunas características de la resina y de la fibra de carbono que será el material al cual se medirá la temperatura.

### Resina Epoxi

Las propiedades generales que presenta la resina epoxi se recogen a continuación:

- Excelentes propiedades mecánicas.
- Temperatura de uso entre 130° y 240°.
- Buen aislamiento eléctrico.
- Resistente ante fluidos corrosivos (agua, ácidos, soluciones salinas, alcoholes, grasas...)
- Excelente estabilidad dimensional (poca contracción al curar).
- Excelentes propiedades adhesivas.

### Proceso de Curado

El ciclo de curado permite que la resina evolucione de un material fusible y soluble a otro no fusible e insoluble, formado por retículos tridimensionales covalentes. Esta estructura espacial es la que imprime al material unas muy buenas propiedades en términos de resistencia en comparación con otros plásticos. La polimerización de la resina puede comenzar en el pre-preg a temperatura ambiente, pero este proceso sería muy lento (varios meses), porque se deben romper enlaces ya creados en la premezcla que anclan el proceso de crecimiento de cadenas.

La forma idónea de polimerizar es mediante la aplicación de calor y presión que eleve la temperatura de la premezcla sólida por encima de la temperatura de transición vítrea hasta convertirla en líquida en un proceso que facilita la formación de los enlaces covalentes.

### Fibra de carbono

Los materiales compuestos de fibra de carbono se encuentran entre los materiales compuestos más fuertes y más rígidos con excelentes propiedades específicas debido a su bajo peso. Mediante una correcta selección de fibra y matriz, así como una adecuada orientación del refuerzo y un correcto apilado se pueden conseguir elementos más rígidos y resistentes que las piezas de acero con menos de la mitad de su peso.

Las propiedades de la fibra de carbono se pueden resumir como sigue:

- Muy rígida y con densidades relativamente bajas.
- Muy buenas propiedades específicas.
- Coste intermedio (mayor que la fibra de vidrio)
- Mal aislante eléctrico.
- Diámetro de la fibra 5- 8  $\mu\text{m}$
- Frágil. Prácticamente no presenta plasticidad, el límite elástico es similar a la resistencia a tracción [4].

Una vez mencionados los conocimientos necesarios, se procede adentrar a lo que realmente interesa en es el documento, por lo cual se prosigue hacer mención a uno de los elementos más importantes para desarrollo del sistema pirométrico en su apartado electrónico.

#### MLX90614

Es un sensor de temperatura infrarrojo sin de contacto, para medir la temperatura de un objeto a distancia.

Características del sensor:

Incluye un regulador de voltaje que permite alimentar directamente a 5V, una tensión de alimentación de alimentación de 3V, ángulo de 80°, un único sensor infrarrojo y filtro interno.

Viene calibrado de fábrica en un amplio rango de -70 a 382 °C para la temperatura de objetos.

Internamente el MLX90614 está constituido con un chip de silicio con una fina membrana micromecanizada sensible a la radiación infrarroja, junto con la electrónica necesaria para amplificar y digitalizar la señal y calcular la temperatura.

El conjunto incluye un amplificador de bajo ruido, un conversor ADC de 17 bits, un DSP (procesador digital de señal) y compensación de la temperatura ambiente como se puede observar en la Figura 2.

Funcionamiento del sensor MLX90614.

El funcionamiento del sensor MLX90614 se rige según la ley de Stefan-Boltzmann, por la cual se puede decir, que todo objeto por encima del cero absoluto (°K) emite radiación cuyo espectro es proporcional a su temperatura.

El MLX90614 recoge esta radiación y su salida es una señal eléctrica proporcional a la temperatura de todos los objetos en su campo de visión (véase Fig. 3) . En este caso por ejemplo, la fibra de carbono será sometida al calor de la lámpara, por lo cual esta tendrá una reacción y emitirá un espectro provocado por el calor aplicado y será lo que el sensor capte para determinar la temperatura.



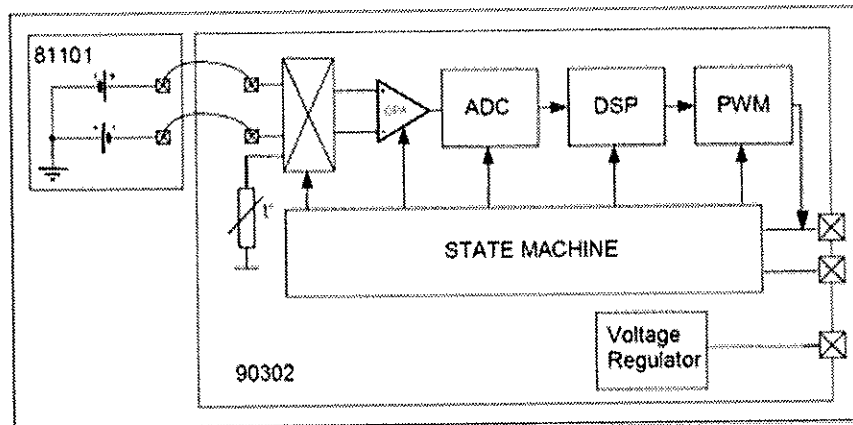


Figura 4. Sensor LMX90614 internamente. [3]

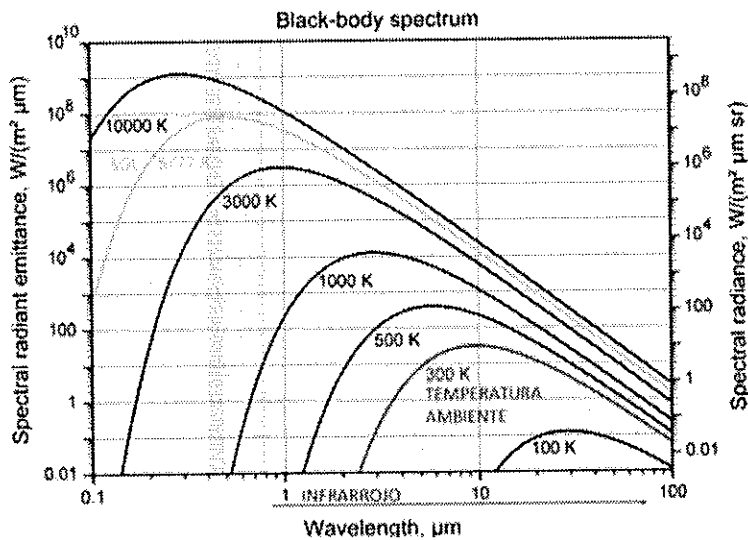


Figura 5. Gráfica espectral del sensor respecto a la temperatura.

Las características del sensor mencionadas con anterioridad hacen suficiente para cumplir con los requerimientos definidos para el trabajo llevado a cabo.

Cabe mencionar que una de las características más importantes para desarrollar tal proyecto pirométrico idealmente son las dimensiones, puesto que se pretende montar en un cabezal de prueba que nos deja muy restringidos los espacios y de igual manera se implementara al cabezal mostrado en las imágenes anteriores del P02 sin problemas con las dimensiones actuales, siendo factor la toma de decisión elegir como otro componente electrónico principal la tarjeta de control, siendo la Arduino nano la que contiene los requerimientos para el conjunto de elementos en general del P02.

Arduino Nano.

Esta placa de programación Arduino Nano está especialmente diseñada para proyectos en donde el tamaño es importante, es realmente compacta (4.5 x 1.7 x 1.9 cm)

Algunas características:

Contiene con 14 puertos digitales de entrada/salida, 8 puertos análogos, de los cuales para 2 serán ocupados por el sensor para el pirómetro, una memoria de 16 KB, 1 KB de SRAM y 512 bytes de EPROM.

Su ClockSpeed es 16 MHz. Funciona con un voltaje que puede estar en el rango de 7 a 12 voltios. Entrega una corriente de 40 mA.

## Procedimiento experimental.

### Sistema óptico del pirómetro.

El sistema óptico del pirómetro tiene un diseño que consta de tres elementos como se puede observar en la Figura 4, los cuales constituyen el sujetador del sensor, la pieza que contiene la primera cavidad, y la segunda cavidad, las cuales serán explicadas con detalle más adelante.

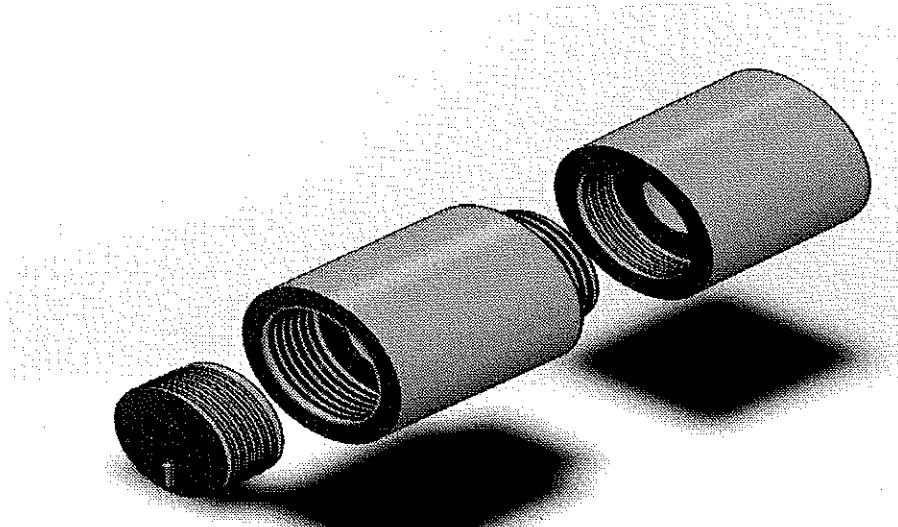
El funcionamiento del sistema consiste en la recepción de una haz de luz el cual entrara por el orificio principal, pasando por los filtro de luz (para eliminar la luz ambiente que pueda hacer que tengamos medidas erróneas), hasta llegar al lente del sensor de forma puntual, el cual se encarga de convertir la señal del espectro del haz de luz en temperatura.

### Primera cavidad.

Este elemento de la primera cavidad (véase Figura 5), contiene roscados en sus extremos los cuales sirven para embonar en la parte inferior el sujetador del sensor y en la parte superior la segunda cavidad la cual solo será embonada si es necesaria, es decir, si la temperatura es más precisa con esta.

### Segunda cavidad.

El elemento de la segunda cavidad (véase Figura 7) está hecho con la finalidad de dar mayor seguridad a una mejor recepción espectral y por lo consiguiente menos error en la conversión a temperatura.



*Figura 6. Sistema óptico del pirómetro.*

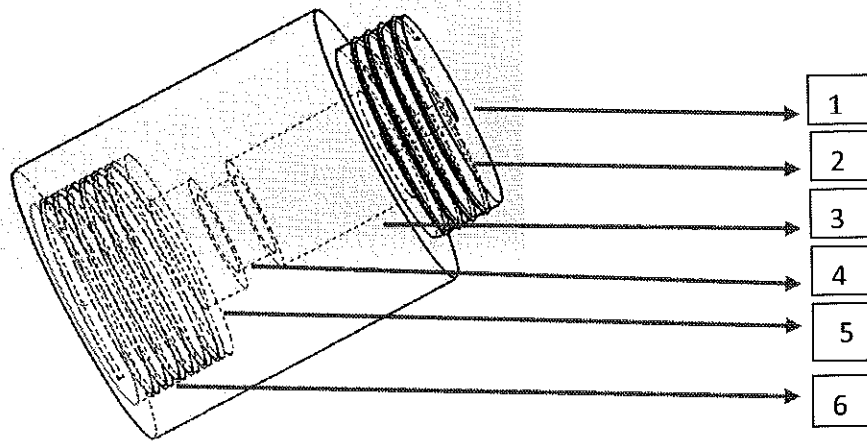


Figura 7. Características de la primera cavidad.

- 1.- $\varnothing=3.5\text{mm}$ . Orificio principal para la recepción del haz de luz.
- 2.- $\varnothing=14\text{mm}$ . Roscado para embonar la segunda cavidad.
- 3.- $\varnothing=4\text{mm}$ . Filtro de luz.
- 4.- $\varnothing=5.6\text{mm}$ . Ventana del sensor.
- 5.-  $\varnothing=8.15\text{mm}$ . Cuerpo del sensor.
- 6.-  $\varnothing=15\text{mm}$ . Roscado interno para insertar el sujetador del sensor.

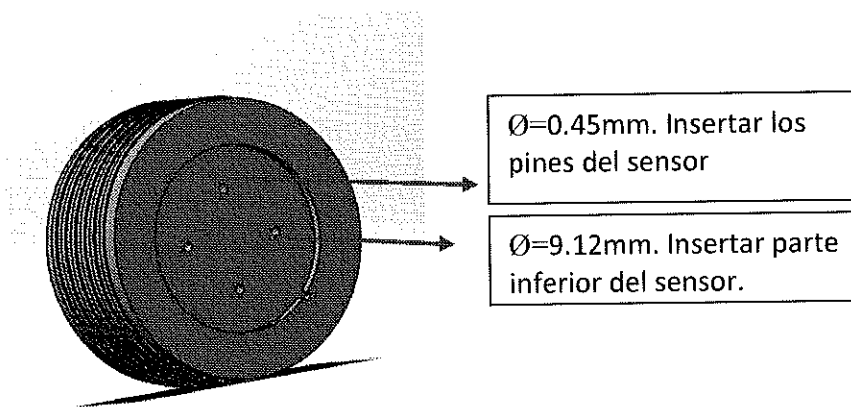


Figura 8. Sujetador para el MLX90614.

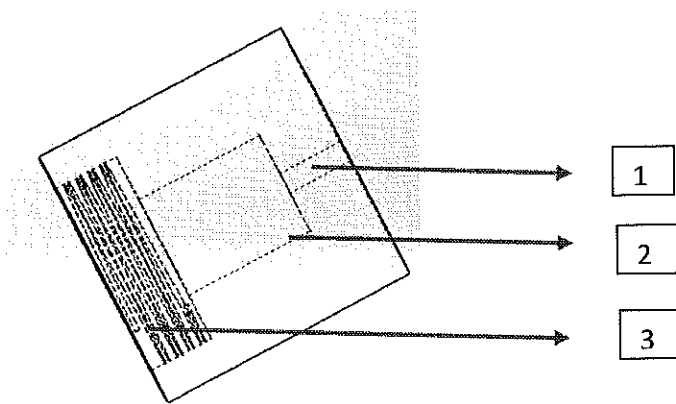


Figura 9. Características de la segunda cavidad.

- 1.- $\varnothing=3.5\text{mm}$ . Orificio principal para la recepción del haz de luz.
- 2.- $\varnothing=4\text{mm}$ . Filtro de luz.
- 3.- $\varnothing=15\text{mm}$ . Roscado para embonar a la primer cavidad.

Sistema electrónico del pirómetro.

Es mediante este sistema electrónico que se hace posible saber la temperatura de un objeto que se encuentra a distancia en este caso enfocado al proceso de curado térmico de fibra de carbono, para poder monitorear la cantidad de calor aplicado para que dicho proceso termine con un producto de calidad.

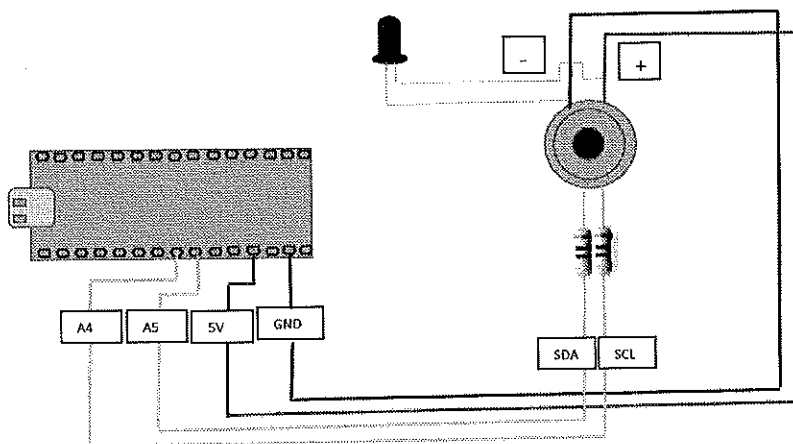


Figura 10. Diagrama del circuito electrónico.

Desarrollo e integración de los sistemas electrónico y óptico para la conformación del sistema pirométrico.

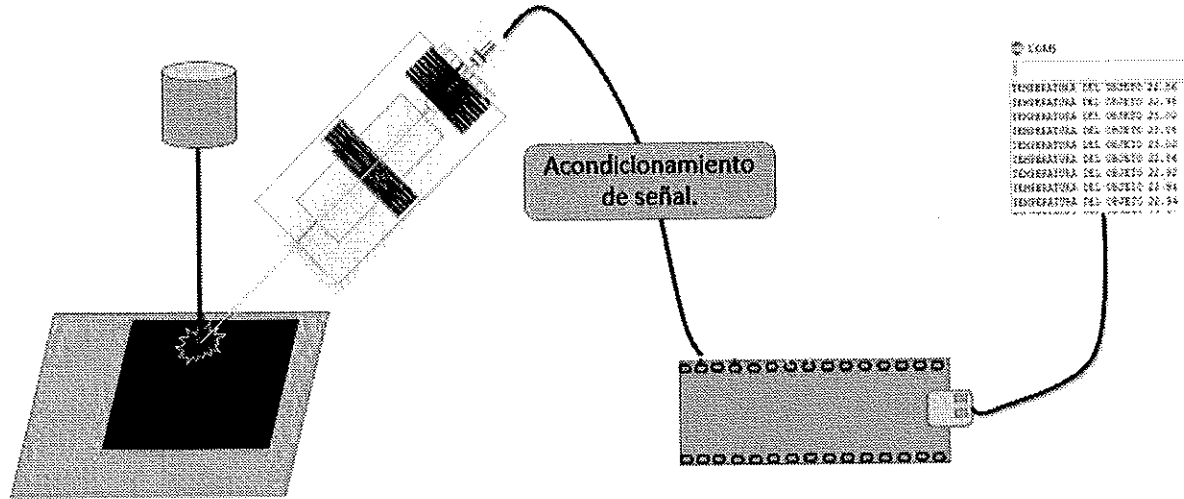
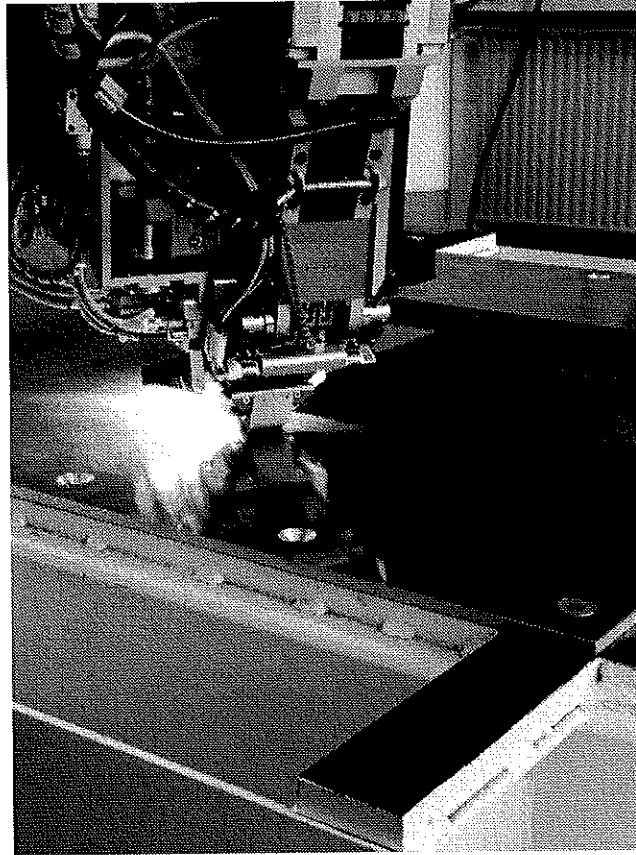


Figura 11. Sistema pirométrico.

## Resultados.



*Figura 12. Proceso de unión del mecanismo.*

Se logro hacer pruebas minimos en el proceso del mecanismo de union de las capas de fibra de carbono los valores obtenidos de esas mediciones pueden observarse en le Figura 9, las cuales se muestran desde la ventana monitor serial del programa de arduino que se encuentra en la parte superior derecha

El trabajo a futuro estará encaminado a caracterizar el sistema pirométrico desarrollado ante diferentes condiciones de trabajo (ruido de radiación), analizando su sensibilidad, resolución e incertidumbre.

COM5

```
TEMPERATURA DEL OBJETO 22.86  
TEMPERATURA DEL OBJETO 22.98  
TEMPERATURA DEL OBJETO 23.02  
TEMPERATURA DEL OBJETO 23.08  
TEMPERATURA DEL OBJETO 23.02  
TEMPERATURA DEL OBJETO 22.86  
TEMPERATURA DEL OBJETO 22.92  
TEMPERATURA DEL OBJETO 22.94  
TEMPERATURA DEL OBJETO 22.94  
TEMPERATURA DEL OBJETO 22.94  
TEMPERATURA DEL OBJETO 29.54  
TEMPERATURA DEL OBJETO 48.28  
TEMPERATURA DEL OBJETO 46.82  
TEMPERATURA DEL OBJETO 68.32  
TEMPERATURA DEL OBJETO 69.22  
TEMPERATURA DEL OBJETO 127.00  
TEMPERATURA DEL OBJETO 120.76  
TEMPERATURA DEL OBJETO 102.66  
TEMPERATURA DEL OBJETO 112.10  
TEMPERATURA DEL OBJETO 78.94
```

Figura 13. Temperaturas dadas en la experimentación.

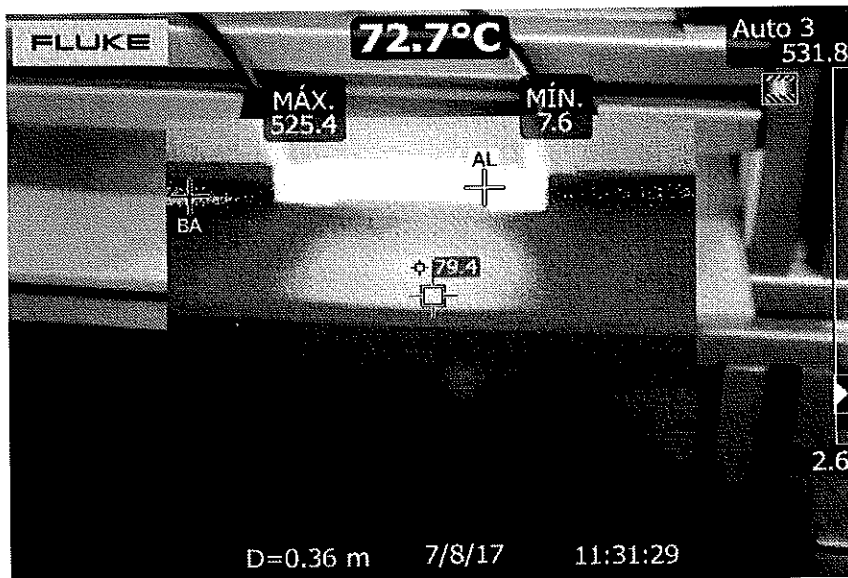
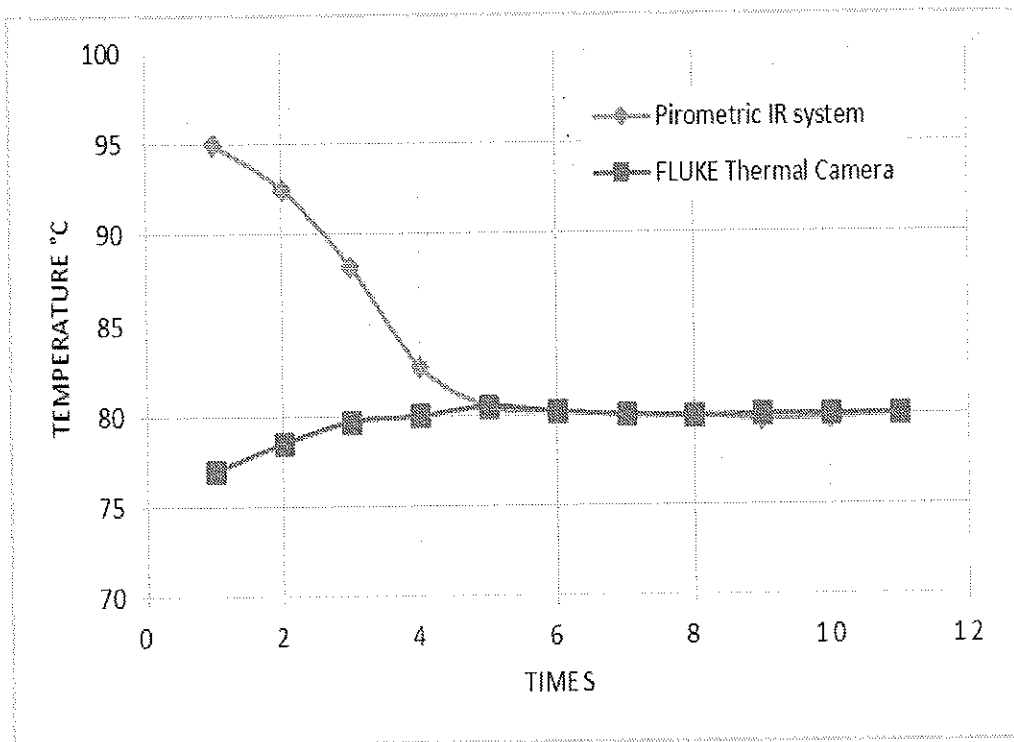


Figura 14. Medición IR utilizando la cámara térmica FLUKE mientras el sistema de radiación IR estaba funcionando [13].



Utilizando una cámara térmica FLUKE, la comparación de las mediciones de salida entre la cámara térmica y el sistema IR pirométrico resulta dinámicamente, así como se ilustra en la gráfica.



*Figura 15. Comparación entre las mediciones del sistema IR pirométrico y la cámara térmica FLUKE [13].*

A través de la comparación dinámica de la gráfica de la Fig. 14, se han validado las mediciones de pyrométrico IR para los valores de estado estacionario, pero es necesario un ajuste para la respuesta transitoria y su prioridad es la comparación con una técnica de medición de temperatura de contacto para calibrar este sistema pirométrico IR [13].

### Conclusiones.

En cuanto al sistema pirométrico IR sus medidas son confiables (repetitividad y reproducibilidad) debido a la implementación de la doble cámara de agujeros en serie que hace atenuar la zona sensible de sensor afectada, tal ajuste es necesario para su monitoreo en tiempo constante.

La calibración del sistema IR pirométrico es necesaria también porque la precisión y resolución de las mediciones de temperatura son críticas para predecir la conformación molecular del mecanismo de unión (resina) entre las capas de fibra de carbono, tema que es importante para el proceso de fabricación aditivo de álabes de turbina eólica .

Se concluye que el sistema óptico integrado con el fototransistor MLX90614 y al sistema electrónico embebido, es viable y suficiente para cumplir con los requerimientos definidos por el equipo de trabajo del P02, los cuales se basan en la normativa aplicable a la manufactura aditiva con fibras de carbono.

A partir de la experimentación realizada hasta el momento para el desarrollo, la caracterización y la validación de la instrumentación correspondiente del sistema pirométrico; se concluye que el sistema óptico integrado con el fototransistor MLX90614 y al sistema electrónico embebido, es viable y suficiente para cumplir con los requerimientos definidos por el equipo de trabajo del P02, los cuales se basan en la normativa aplicable a la manufactura aditiva con fibras de carbono.

#### Referencias.

- [1] la fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos./ Manuel Zahera/. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos Valencia.
- [2] Las 7 familias de la manufactura aditiva.  
[http://www.ptmexico.com/cdn/cms/Las\\_7\\_familias\\_de\\_la\\_manufactura\\_aditiva.pdf](http://www.ptmexico.com/cdn/cms/Las_7_familias_de_la_manufactura_aditiva.pdf)
- [3] <https://www.luisllamas.es/arduino-y-el-termometro-infrarrojo-a-distancia-mlx90614/>
- [4][http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60170/fichero/02\\_ANTECEDENTES.pdf](http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60170/fichero/02_ANTECEDENTES.pdf)
- [5]Two-Color Pyrometer for Process Temperature Measurement During Machining. Alberto Tapetado. **IEEE**; JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 34.
- [6] Composición de elementos estructurales de construcción y método de elaboración. Anna Pepelyaeva.
- [7] Reporte P02. M.C. Roberto Sosa, Dr. Gámez y Dr. Rodríguez.
- [8] Revestimiento interno para palas de aerogeneradores y procedimiento de montaje del mismo. Autores: De La Peña Razquin Emmanuel Garcia.
- [9] Raided wind turbine blades and method of making same. Ronald R. Cairo
- [10] La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos. Manuel Zahera. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos Valencia.
- [11] Optical-fiber pyrometer positioning accuracy analysis. A. Tapetado; E. García; J. Díaz-Álvarez; M. H. Miguélez; C. Vazquez Proc. SPIE. 9916, Sixth European Workshop on Optical.
- [12] Effect of pressure and temperature on properties of carbon-carbon composites prepared from renewable material. D Murali Manohar; Vasanthakumari Raju. IEEE Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM)
- [13] Activation and monitoring system for resin in carbon fiber manufacturing for eolic turbine blades, E. Rodríguez, C. Caballero, J. Viveros, ROPEC 2017 IEEE, En Revisión.

Anexos



# MLX90614 family

## Single and Dual Zone Infra Red Thermometer in TO-39

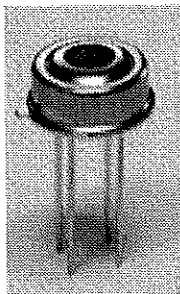
### Features and Benefits

- ❑ Small size, low cost
- ❑ Easy to integrate
- ❑ Factory calibrated in wide temperature range:
  - 40 to 125 °C for sensor temperature and
  - 70 to 380 °C for object temperature.
- ❑ High accuracy of 0.5°C over wide temperature range (0..+50°C for both Ta and To)
- ❑ High (medical) accuracy calibration
- ❑ Measurement resolution of 0.02°C
- ❑ Single and dual zone versions
- ❑ SMBus compatible digital interface
- ❑ Customizable PWM output for continuous reading
- ❑ Available in 3V and 5V versions
- ❑ Simple adaptation for 8 to 16V applications
- ❑ Power saving mode
- ❑ Different package options for applications and measurements versatility
- ❑ Automotive grade

### Applications Examples

- ❑ High precision non-contact temperature measurements;
- ❑ Thermal Comfort sensor for Mobile Air Conditioning control system;
- ❑ Temperature sensing element for residential, commercial and industrial building air conditioning;
- ❑ Windshield defogging;
- ❑ Automotive blind angle detection;
- ❑ Industrial temperature control of moving parts;
- ❑ Temperature control in printers and copiers;
- ❑ Home appliances with temperature control;
- ❑ Healthcare;
- ❑ Livestock monitoring;
- ❑ Movement detection;
- ❑ Multiple zone temperature control – up to 100 sensors can be read via common 2 wires
- ❑ Thermal relay/alert
- ❑ Body temperature measurement

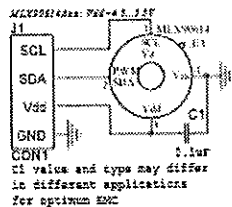
### Ordering Information



| Part No.                        | Temperature Code                        | Package Code         | - Option Code          |
|---------------------------------|---|----------------------|------------------------|
| MLX90614                        | E (-40°C to 85°C)<br>K (-40°C to 125°C) | SF (TO-39)           | - X X X<br>(1) (2) (3) |
| (1) Supply Voltage/<br>Accuracy | (2) Number of thermopiles:              | (3) Package options: |                        |
| A - 5V                          | A - single zone                         | A - Standard package |                        |
| B - 3V                          | B - dual zone                           | B - Reserved         |                        |
| C - Reserved                    |   | C - 35° FOV          |                        |
| D - 3V medical accuracy         |   |                      |                        |

Example:  
MLX90614ESF-BAA

### 1 Functional diagram



MLX90614 connection to SMBus

Figure 1 Typical application schematics

### 2 General Description

The MLX90614 is an Infra Red thermometer for non contact temperature measurements. Both the IR sensitive thermopile detector chip and the signal conditioning ASSP are integrated in the same TO-39 can. Thanks to its low noise amplifier, 17-bit ADC and powerful DSP unit, a high accuracy and resolution of the thermometer is achieved.

The thermometer comes factory calibrated with a digital PWM and SMBus (System Management Bus) output.

As a standard, the 10-bit PWM is configured to continuously transmit the measured temperature in range of -20 to 120 °C, with an output resolution of 0.14 °C and the POR default is SMBus.



## **MLX90614 family** *Single and Dual Zone Infra Red Thermometer in TO-39*

### **General description (continued)**

The MLX90614 is built from 2 chips developed and manufactured by Melexis:

- The Infra Red thermopile detector MLX81101
- The signal conditioning ASSP MLX90302, specially designed to process the output of IR sensor.

The device is available in an industry standard TO-39 package.

Thanks to the low noise amplifier, high resolution 17-bit ADC and powerful DSP unit of MLX90302 high accuracy and resolution of the thermometer is achieved. The calculated object and ambient temperatures are available in RAM of MLX90302 with resolution of 0.01 °C. They are accessible by 2 wire serial SMBus compatible protocol (0.02°C resolution) or via 10-bit PWM (Pulse Width Modulated) output of the device.

The MLX90614 is factory calibrated in wide temperature ranges: -40 to 125 °C for the ambient temperature and -70 to 382.2 °C for the object temperature. The 10-bit PWM is as a standard configured to transmit continuously the measured object temperature for an object temperature range of -20 to 120 °C with an output resolution of 0.14 °C. The PWM can be easily customized for virtually any range desired by the customer by changing the content of 2 EEPROM cells. This has no effect on the factory calibration of the device.

The PWM pin can also be configured to act as a thermal relay (input is  $T_0$ ), thus allowing for an easy and cost effective implementation in thermostats or temperature (freezing/boiling) alert applications. The temperature threshold is user programmable. In an SMBus system this feature can act as a processor interrupt that can trigger reading all slaves on the bus and to determine the precise condition.

As a standard, the MLX90614 is calibrated for an object emissivity of 1. It can be easily customized by the customer for any other emissivity in the range 0.1-1.0 without the need of recalibration with a black body.

The thermometer is available in 2 supply voltage options: 5V compatible or 3V (battery) compatible. The 5V can be easily adopted to operate from a higher supply voltage (8-16V, for example) by use of few external components (refer to "Applications Information" section for details).

An optical filter (long-wave pass) that cuts off the visible and near infra-red radiant flux is integrated in the package to provide sunlight immunity.

## 8 Detailed description

### 8.1 Block diagram

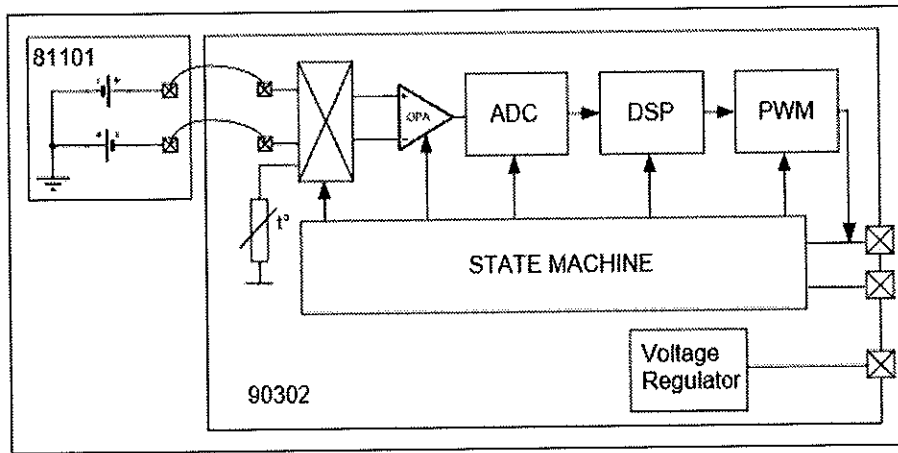


Figure 3: block diagram

### 8.2 Signal processing principle

The operation of the MLX90614 is controlled by an internal state machine, which controls the measurements and calculations of the object and ambient temperatures and does the post-processing of the temperatures to output them through the PWM output or the SMBus compatible interface.

The ASSP supports 2 IR sensors (second one not implemented in the MLX90614xAx). The output of the IR sensors is amplified by a low noise low offset chopper amplifier with programmable gain, converted by a Sigma Delta modulator to a single bit stream and fed to a powerful DSP for further processing. The signal is treated by programmable (by means of EEPROM content) FIR and IIR low pass filters for further reduction of the band width of the input signal to achieve the desired noise performance and refresh rate. The output of the IIR filter is the measurement result and is available in the internal RAM. 3 different cells are available: One for the on-board temperature sensor (on chip PTAT or PTC) and 2 for the IR sensors.

Based on results of the above measurements, the corresponding ambient temperature  $T_a$  and object temperatures  $T_o$  are calculated. Both calculated temperatures have a resolution of 0.01 °C. The data for  $T_a$  and  $T_o$  can be read in two ways: Reading RAM cells dedicated for this purpose via the 2-wire interface (0.02°C resolution, fixed ranges), or through the PWM digital output (10 bit resolution, configurable range). In the last step of the measurement cycle, the measured  $T_a$  and  $T_o$  are rescaled to the desired output resolution of the PWM) and the recalculated data is loaded in the registers of the PWM state machine, which creates a constant frequency with a duty cycle representing the measured data.

**10 Performance Graphs**

**10.1 Temperature accuracy of the MLX90614**

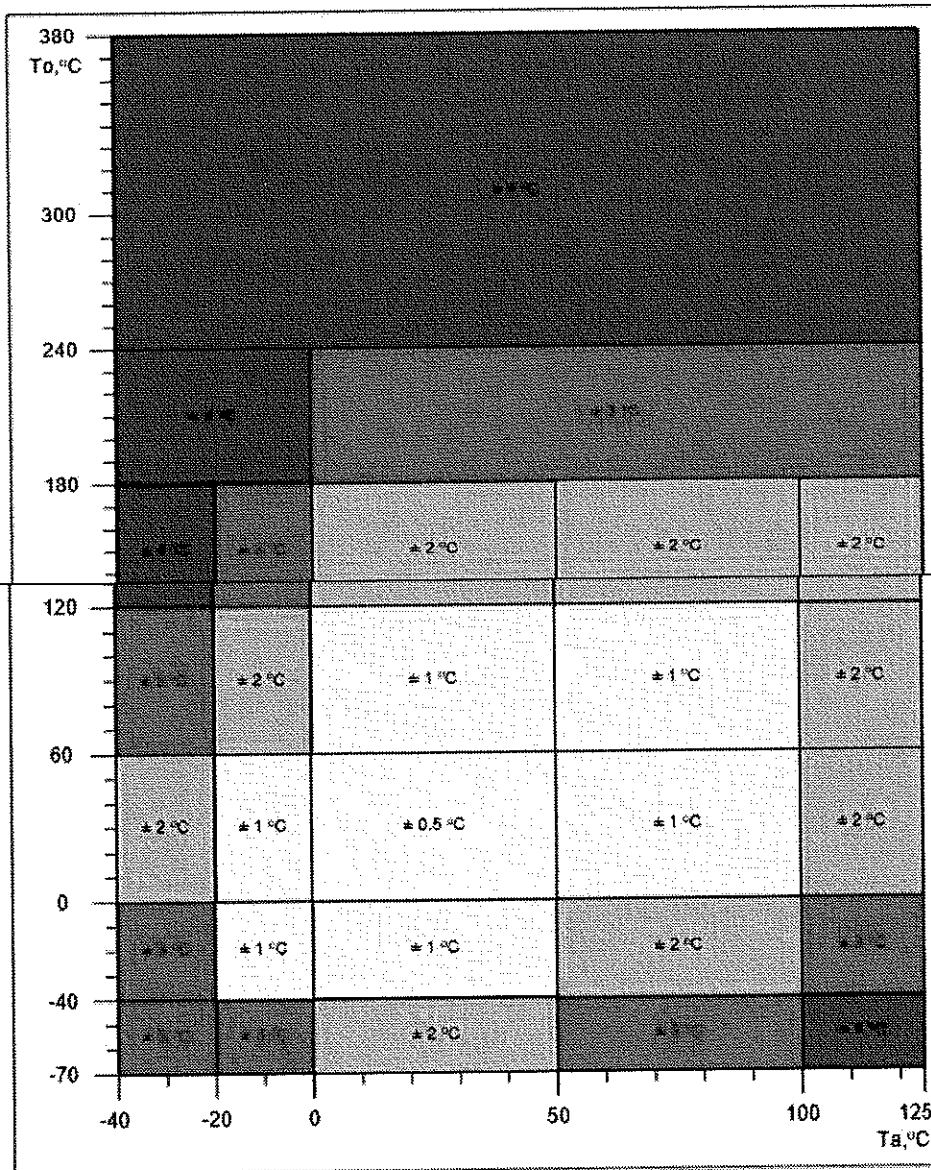


Figure 17: Preliminary accuracy of MLX90614 (Ta, To)



**10.2 Field Of View (FOV)**

Field of view is determined at 50% thermopile signal and with respect to the sensor main axis.

| Parameter    | MLX90614xAA    | MLX90614xBA | MLX90614xAC    |
|--------------|----------------|-------------|----------------|
| Peak zone 1  | ±0°            | -25°        | ±0°            |
| Width zone 1 | 90°            | 70°         | 35°            |
| Peak zone 2  | Not applicable | -25°        | Not applicable |
| Width zone 2 |                | 70°         |                |

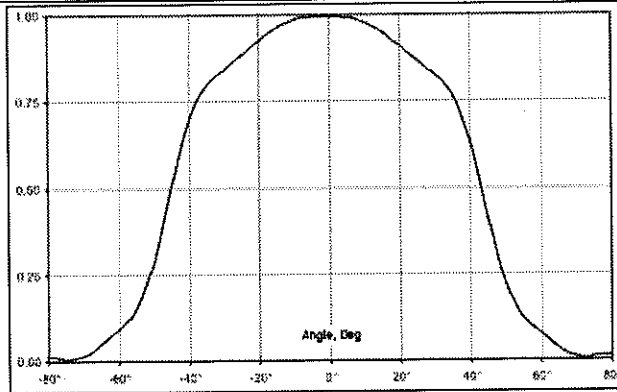


Figure 19: FOV of MLX90614xAA

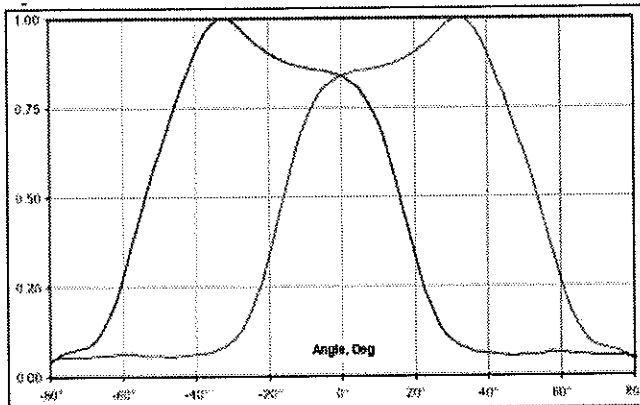


Figure 20: FOV of MLX90614xBA

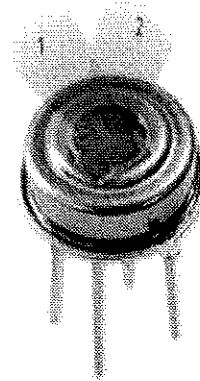
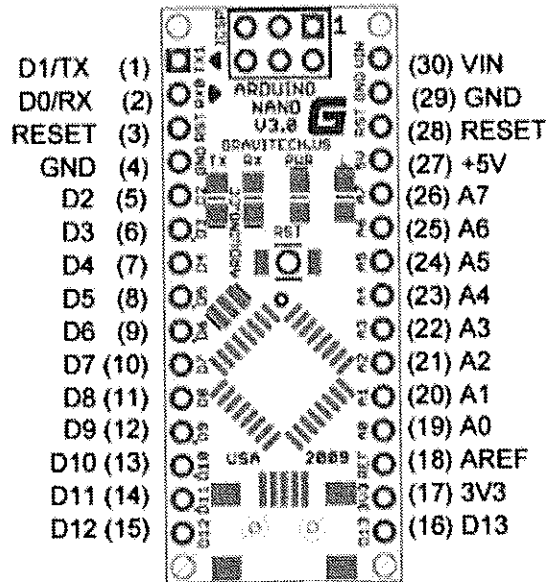
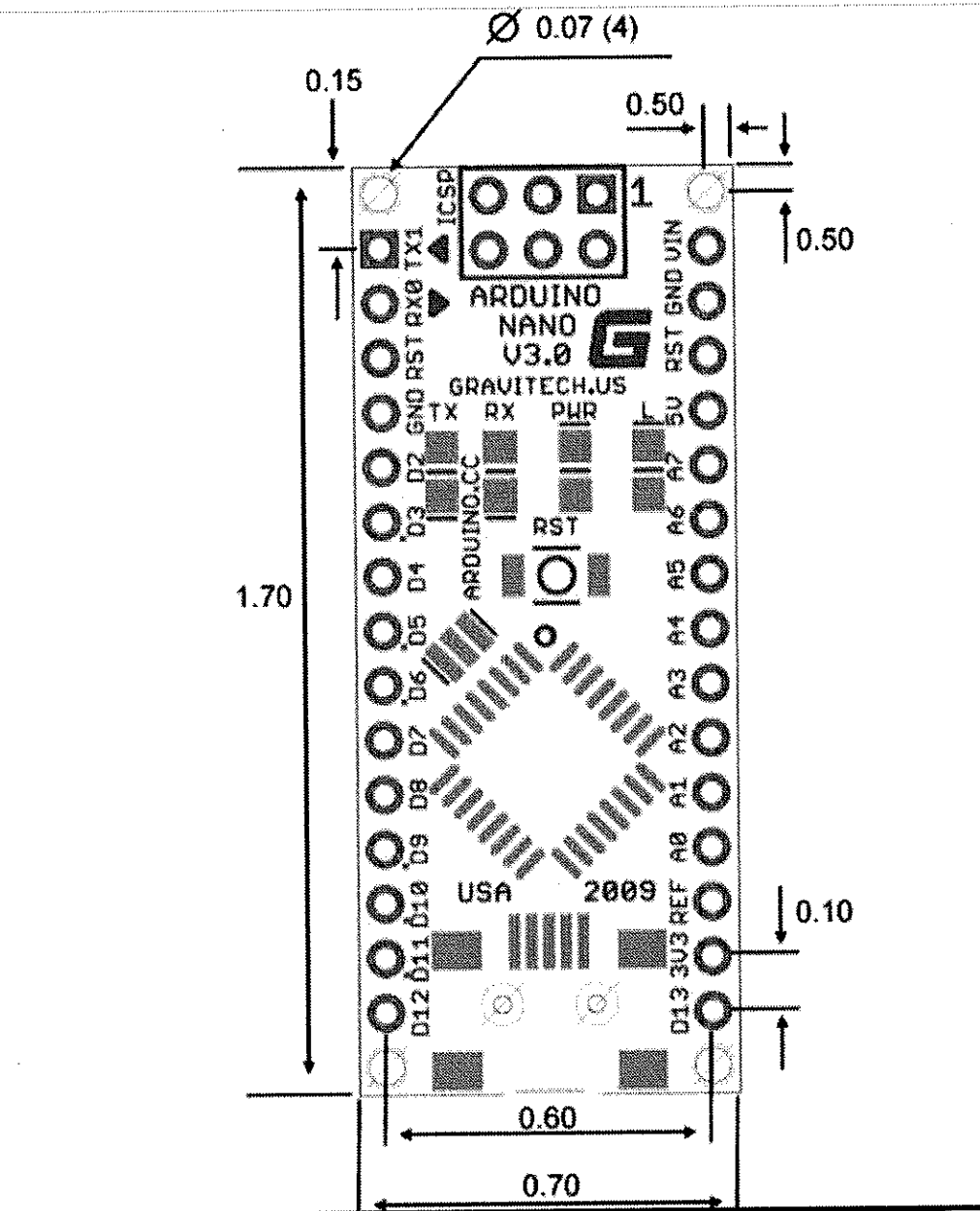


Figure 21: identification of zone 1&2 relative to alignment tab.

Hoja de datos Arduino nano.



| Pin No.   | Name   | Type            | Description  |
|-----------|--------|-----------------|--|
| 1-2, 5-16 | D0-D13 | I/O             | Digital input/output port 0 to 13  |
| 3, 28     | RESET  | Input           | Reset (active low)   |
| 4, 29     | GND    | PWR             | Supply ground  |
| 17        | 3V3    | Output          | +3.3V output (from FTDI)   |
| 18        | AREF   | Input           | ADC reference  |
| 19-26     | A0-A7  | Input           | Analog input channel 0 to 7  |
| 27        | +5V    | Output or Input | +5V output (from on-board regulator) or +5V (input from external power supply) |
| 30        | VIN    | PWR             | Supply voltage   |



Código en Arduino:

```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MLX90614.h>
#include <i2cmaster.h>

Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  Serial.println("Adafruit MLX90614 test");
  i2c_init(); //Initialise the i2c bus
  PORTC = (1 << PORTC4) | (1 << PORTC5); //enable pullups
  mlx.begin();
}

void loop() {
  int dev = 0x5A << 1;
  int data_low = 0;
  int data_high = 0;
  int pec = 0;

  i2c_start_wait(dev+I2C_WRITE);
  i2c_write(0x07);

  // read
  i2c_rep_start(dev+I2C_READ);
  data_low = i2c_readAck(); //Read 1 byte and then send ack

```

```

data_high = i2c_readAck(); //Read 1 byte and then send ack
pec = i2c_readNak();
i2c_stop();

//This converts high and low bytes together and processes temperature, MSB is
a error bit and is ignored for temps
double tempFactor = 0.02; // 0.02 degrees per LSB (measurement resolution of
the MLX90614)
double tempData = 0x0000; // zero out the data
int frac; // data past the decimal point

// This masks off the error bit of the high byte, then moves it left 8 bits and adds
the low byte.
tempData = (double)((((data_high & 0x007F) << 8) + data_low));
tempData = (tempData * tempFactor)-0.01;

float celcius = tempData - 273.15;

Serial.print("TEMPERATURA DEL OBJETO ");
Serial.println(celcius);
delay(1000); // wait a second before printing again
}

```