

Sistema de Adquisición y Procesamiento de Imágenes Térmicas de Bajo Costo

Gustavo Monte, Damián Marasco, Lucas Solorzano, Norberto Scarone, Ruben Bufanio

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional del Neuquén

Plaza Huincul, Argentina

Resumen—El diagnóstico mediante el análisis de imágenes térmicas es ampliamente empleado y es una de las herramientas predilectas del mantenimiento predictivo. Debido al alto costo de las cámaras infrarrojas, este análisis se efectúa mediante inspecciones manuales periódicas reutilizando el elemento sensor para diversas aplicaciones. La reciente aparición de cámaras infrarrojas de bajo costo ha posibilitado el desarrollo de aplicaciones fijas que observan y analizan el comportamiento térmico de sistemas críticos a lo largo del tiempo. Este trabajo presenta una propuesta de sensor térmico inteligente que adquiere y procesa la imagen de baja resolución en tiempo real. El procesamiento de la imagen térmica propuesto se basa en el análisis de máximos locales y los gradientes espaciales y temporales centrados en estos máximos. La adquisición y el procesamiento de la imagen se realiza en un microcontrolador de 16 bits resultando un sensor térmico compacto, de bajo costo y con la capacidad de entender y clasificar la evolución térmica del sistema observado.

Palabras clave—cámaras infrarrojas; microcontroladores; tiempo real; termografía; procesamiento imágenes térmicas; bajo costo.

I. INTRODUCCION

El término sensor inteligente fue acuñado en la década del 90 y hacía referencia a un transductor que tenía la capacidad de transmisión digital junto con la posibilidad de identificarse sobre una red de sensores. El desafío en esa época era disponer de dispositivos “*Plug and Play*”. Para lograr que transductores de distintas marcas pudieran identificarse se creó la familia de estándares IEEE 1451 [1], que introdujo la **TEDS** (*Transducer Electronic Data Sheet*), la hoja de datos electrónica del transductor.

En el tiempo actual el desafío es otro. Un sensor inteligente debería validar sus propias mediciones, extraer información y conocimiento directamente de la señal sensorial de manera tal de poder interactuar con otros sensores o transductores y el sistema de adquisición. Este “compartir” posibilita la ejecución de algoritmos de fusión sensorial y agiliza los procesos de minería de datos además de incrementar la confiabilidad del sistema involucrado.

Existe una relación inversa entre el procesamiento de la señal sensorial y el flujo de datos en bits/seg. A medida que se incrementa el procesamiento de la señal disminuye notablemente la cantidad de bits necesaria para reportar un evento. Un sensor basado en imágenes podría reportar la imagen completa para que sea procesada en forma remota (datos), una versión comprimida de la imagen, (información) o una extracción de alguna característica de relevancia para la aplicación (conocimiento). Estas tres clases de reporte generan miles de bits/seg, hasta algunos pocos bits/seg, en el caso de reportar solamente estados como por ejemplo, normal / anormal. La convergencia tecnológica es lo que posibilita este tipo de análisis y genera nuevos paradigmas de sensado, como es el caso particular propuesto de análisis de imágenes térmicas en posición fija y en forma continua.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de adquisición y procesamiento de imágenes térmicas que emplea cámaras IR de bajo costo. Este sistema está orientado al monitoreo permanente de un proceso o dispositivo crítico que requiere monitoreo frecuente de su evolución térmica. La adquisición y procesamiento de un frame es llevada a cabo en un microcontrolador de 16 bits, generando una solución en un chip. En las secciones subsiguientes, se describe primero la naturaleza de una imagen térmica y la tecnología de las cámaras infrarrojas poniendo énfasis en sus virtudes y debilidades. Luego, se detalla la implementación de la comunicación microcontrolador - cámara IR para la configuración y adquisición de una captura. En la sección IV se describen los algoritmos empleados en el análisis de la imagen y como estos son implementados en el microcontrolador. Por último, se presentan resultados experimentales y las conclusiones.

II. TERMOGRAFIA INFRARROJA

A. Cámaras termográficas

Una cámara termográfica es un dispositivo que detecta el patrón de emisión de la escena de visión en el espectro de la longitud de onda infrarroja. En la Fig. 1 se observa el espectro electromagnético detallando las bandas correspondientes a la zona infrarroja. La cámara empleada en los ensayos para este trabajo [2] posee una sensibilidad menor a 50 mK (*miligrados Kelvin*), en la región LWIR (*Long Wave Infrared*) desde 8 a 14 μm .

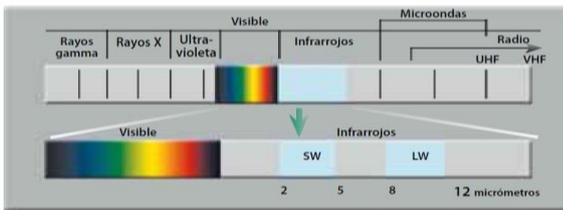


Fig. 1. Espectro electromagnético. La banda infrarroja se divide en dos subbandas principales: Short Wave IR correspondiente a una longitud de onda de 2 a 5 μm y Long Wave IR desde 8 a 12 μm .

Las cámaras termográficas están compuestas básicamente de una lente transparente a la energía infrarroja y de una matriz de $M \times N$ elementos sensibles que traducen esta energía a una señal eléctrica. Por lo tanto, las cámaras IR proporcionan la radiación de energía promedio en cada subdivisión de la escena según se proyecta a cada elemento de la matriz de sensores a través del sistema óptico. En el caso particular de la cámara empleada, la resolución es de 80×60 elementos sensibles. Cada elemento detector es un microbolómetro de óxido de vanadio, en el cual la temperatura varía según la radiación incidente. Los cambios de temperatura producen un cambio proporcional en la resistencia de cada detector. Mediante circuitos de sensado y conversores A/D la información matricial es enviada en forma secuencial mediante protocolos normalizados descritos en la sección III.

B. Radiación y temperatura superficial

La potencia de radiación de una superficie real está dada por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$\epsilon = \epsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

Donde ϵ es la emisividad, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, es la constante de Stefan-Boltzmann y T la temperatura de la superficie en grados Kelvin.

La emisividad es la relación de emisión referida a la emisión del cuerpo negro ideal, para cual toma el valor unitario. La emisividad es baja para metales pulidos. Como la emisividad es determinada por las características de la superficie del objeto, un metal pintado cambia su emisividad a la correspondiente a la pintura empleada.

Material	Emisividad (ϵ)
Cuerpo negro	1
Piel humana	0.98
Agua	0.98
Amianto	0.95
Cerámica	0.95
Barro	0.95
Cemento	0.95
Tejido	0.95
Grava	0.95
Papel	0.95
Plástico	0.95
Goma	0.95
Madera	0.95
Cobre (oxidado)	0.68
Acero inoxidable	0.1
Cobre (pulido)	0.02
Aluminio (pulido)	0.05

Fig. 2. Valores aproximados de emisividad para distintos materiales [3].

Si no se conoce la emisividad del objeto en la escena, (1) presenta dos incógnitas; ϵ y T , ya que las cámaras son sensibles a la radiación en el espectro infrarrojo.

Este análisis simplificado conduce a dos formas de emplear la termografía: análisis cualitativo y cuantitativo. La técnica de la termografía cualitativa consiste en detectar gradientes térmicos y patrones anormales en la escena de inspección. El defecto causante de este patrón térmico se localizará por comparación con otros cuerpos de esa misma condición. Una de las ventajas de esta técnica es que no necesita una medida exacta de la temperatura, sino que la clasificación normal/anormal se basa en análisis comparativo.

La termografía cuantitativa obtiene la temperatura en cada punto de la escena, lo que implica conocer la emisividad del objeto. La gran mayoría de las aplicaciones se basan en análisis cualitativo dado que la información del comportamiento térmico del objeto es función de la distribución espacial de temperaturas relativas. En aplicaciones fijas, como la propuesta en este trabajo, permite además obtener la distribución temporal al observar la misma escena a lo largo del tiempo. Esta dimensión adicional posibilita detectar condiciones anormales de operación o sobrecarga calculando los gradientes temporales de regiones de la escena.

Para ilustrar estos conceptos, en la Fig. 3 se observa la imagen térmica de un transformador de distribución de intemperie capturada con nuestro sistema de adquisición. El transformador posee una distribución uniforme de temperaturas, pero se observa una zona rectangular más fría. Esta zona corresponde a la placa metálica de identificación de la máquina eléctrica que al tener un coeficiente de emisividad bajo se observa, erróneamente como más fría.

En una aplicación de adquisición fija, los elementos de baja emisividad son conocidos de antemano, por lo tanto, pueden ser descartados del análisis del comportamiento térmico.

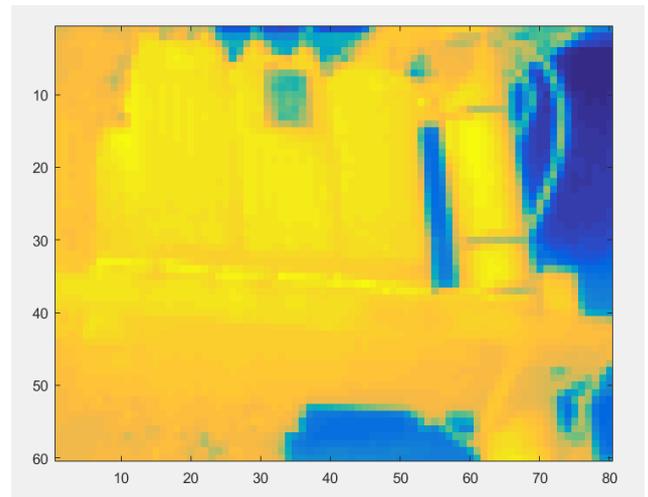


Fig. 3. Imagen térmica, obtenida con nuestro sistema de adquisición, de un transformador de distribución de intemperie. El rectángulo más frío observado corresponde a la placa identificatoria metálica de baja emisividad. Se observa una distribución homogénea de temperaturas.

III. SISTEMA DE ADQUISICIÓN

A. Cámara térmica

La cámara térmica empleada es marca FLIR de la serie LEPTON. Este dispositivo integra lentes de foco fijo, una matriz de 80x60 sensores infrarrojos, y electrónica para procesamiento digital. Puede operar tanto en su modo por default o ser configurado en otros múltiples modos, por medio de comandos y una interfaz de control integrada (CCI). En la Fig. 4 se detallan las principales especificaciones.

Características destacadas:

- Sensibilidad térmica < 50mK,
- Funciones para procesamiento de imágenes térmicas integradas, compensación automática de ambientes térmicos, filtros de ruido, corrección de no uniformidad y control de ganancia,
- Bajo consumo en operación (150 mW),
- Bajo consumo en modo Standby (4 mW).

Especificación	Descripción
Destacadas	
Tecnología del Sensor	Microbolómetros no enfriados de Oxido de Vanadio.
Rango espectral	Longitud de onda infrarroja, 8 a 14 uM
Formato de salida	Seleccionable 14 bit's u 8 bit's (AGC habilitado)
Eléctricas	
Reloj de entrada	25 MHz nominal
Interfaz de Video	VoSPI
Voltaje de alimentación	1.2 V, 2.5 V, 2.8 V
Ambiental	
Rango temperatura de operación óptimo	(-)10 °C a (+)65 °C

Fig. 4. Principales especificaciones de la cámara térmica utilizada.

La imagen, dentro de la cámara, es procesada por una serie de algoritmos para mejorarla, algunos por defecto y otros que pueden ser habilitados por medio de la interfase serial CCI. Dos algoritmos se destacan:

- NUC: es bloque de corrección de no-uniformidad,
- AGC: algoritmo de conversión de resolución completa a una imagen de formato más adaptable para mostrar.

Modos de Operación:

Modo Telemetría. Este modo está por defecto desactivado; si estuviera activado incluye en el frame de salida una serie de líneas de datos con información sobre algunos estados de la cámara y su configuración. La telemetría puede estar al inicio (Telemetry as Header) o al final (Telemetry as Footer) del frame.

Modos Radiométricos. Estos modos también están por defecto desactivados; estos modos afectan la función de transferencia entre la radiación incidente y el pixel de salida. La radiometría habilitada es preferida cuando la salida de la cámara se desea entender como una escena de temperatura proporcional. En este modo la conversión es constante sobre el rango de

operación completo. Se debe tener en cuenta que, para notar diferencias entre los modos de radiometría, debemos anteponer el modo AGC deshabilitado.

Radiometría deshabilitada: Con esta opción la temperatura es interpretada cercana a la mitad del rango de conversión, es decir que si la temperatura de un pixel de la escena es igual a la temperatura de la cámara el valor del conversor A/D estará en la mitad del rango. La respuesta a la radiación varía respecto a la temperatura de la propia cámara. En este modo se debe ajustar la temperatura de salida por pixel respecto a la temperatura ambiente en la cámara.

Radiometría habilitada: el dispositivo ajusta internamente la señal de cada pixel para tratar de compensar el efecto de la temperatura propia de la cámara. En este modo la temperatura de cada pixel, es independiente de la temperatura de la cámara.

Modo AGC: El control automático de ganancia es un método mediante el cual se optimiza el amplio rango de conversión, para dejarlo sobre un rango más apropiado para un sistema de visualización. La reducción en rango de valores tomados por la imagen se realiza por medio de una modificación propietaria del algoritmo de ecualización de histogramas acumulativos (Lepton's Variant of Histogram Equalization).

A1. Interfaz de Control:

El sistema de la cámara infrarroja Lepton, incluye una interfaz de control (CCI). La misma, es de dos conductores; similar al I2C. La diferencia sobre el I2C, es que la interfase de control es de 16 bits.

La dirección de la interfaz es 0x2A. En general, podemos utilizar esta interfaz para tres tipos de comandos:

- *Get:* lectura de datos,
- *Set:* escritura de datos,
- *Run:* ejecución de una función.

A2. Interfaz de Video:

El protocolo de transferencia es SPI, lo que permite una rápida y verificable transferencia de datos. El mismo está basado en paquetes sin temporización y sin requerimiento de control de flujo.

Toda transferencia de paquetes de datos (VoSPI packets), es controlada por el maestro y una vez recibidos los paquetes correspondientes a un frame, el maestro puede optar por des-seleccionar el dispositivo o continuar la transferencia de paquetes de datos. En este caso se generan paquetes de descarte, (VoSPI discard packets) hasta que se genere un nuevo frame.

A3. Formato del paquete VoSPI:

El paquete de video, consta de 4 bytes para encabezado y 160 bytes para datos de pixeles. En el encabezado se encuentran tanto el identificador de línea, 12 bits, como el código CRC de 16 bits empleando el siguiente polinomio generador:

$$x^{16} + x^{12} + x^5 + x^0 \quad (2)$$

ID	CRC	Pixeles
4 bytes		160 bytes

ID	CRC	Pixeles
xFxx	xxxx	Datos no utilizables

Fig. 5. Trama de pixeles enviados por la interfase SPI para datos validos y descarte. Inferior, trama de descarte codificada por el ID 0XxFxx.

Por cada pixel se envían dos bytes por lo tanto, una trama es una línea completa de 80 pixeles. La trama VoSPI de descarte se diferencia de las válidas por el ID. Todas las tramas con una 0xF en el tercer nibble son de descarte, los datos y el CRC no tienen validez. Las tramas de descarte tienen la función de mantener el flujo de datos por la SPI mientras un nuevo frame se encuentre disponible.

B. Microcontrolador

El microcontrolador elegido fue el DSPIC33EP256GP502 de *Microchip*, debido principalmente a cuatro motivos: Velocidad de ejecución, tamaño de RAM, costo y arquitectura de 16 bits para procesar eficientemente los pixeles empaquetados también en 16 bits. Posee 32Kb de RAM, opera a 70 MIPS y posee interfaces SPI, I2C y USART, las tres empleadas en el adquisidor. Para enviar comandos y adquirir las imágenes se agregó un conversor USB-USART FT230.

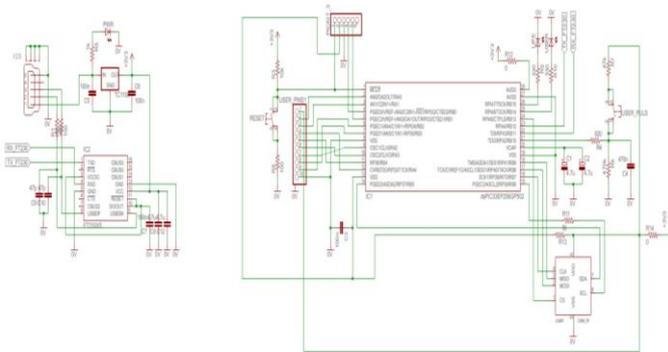


Fig. 6. Diagrama esquemático del adquisidor.

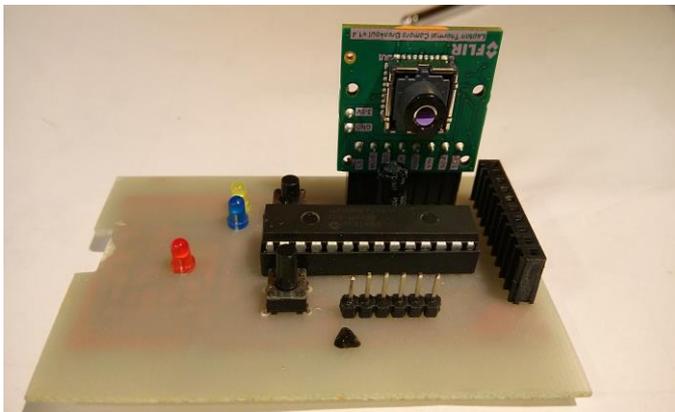


Fig. 7. Foto del prototipo de adquisidor.

En la Fig. 6 se observa el diagrama esquemático del adquisidor y en la Fig. 7 una foto del prototipo implementado.

C. Driver

El driver se ha desarrollado con el propósito de darle, a un sistema externo; una sencilla interfaz de configuración de la cámara y captura de imágenes mediante USB. Las funciones del driver son:

- Inicializar los periféricos de comunicación.
- Inicializar la cámara y verificar su normal funcionamiento.
- Esperar comandos de captura, configuración, envío de imagen, distribución térmica, validación de escena, procesamiento imagen térmica.

El software fue desarrollado según el paradigma de multitarea Estado-Cooperativo en lenguaje C empleando el compilador XC16 en el IDE MPLABX.

La función más importante del driver es establecer el sincronismo con la cámara en la interfase SPI. Conociendo el formato de la trama de video, por medio de SPI iniciamos el proceso de transferencia de datos imponiendo la señal de CLK como maestro a una frecuencia de 20 MHz.



Fig. 8. Para el sincronismo se debe detectar la primera trama con ID=0000.

Para la sincronización, debemos descartar todas las tramas de video desechables hasta encontrar un identificador de línea correspondiente al inicio de un frame válido (ID = 0x0000), ver Fig. 8.

El sistema externo solo interactúa con el microcontrolador por medio del protocolo serial sobre USB para adquirir la imagen, especificar una nueva configuración del modo de captura, o requerir análisis térmico según los algoritmos descritos en la sección siguiente.

IV. PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN TÉRMICA

A. Condiciones de borde

El procesamiento sobre la imagen térmica fue diseñado para ser realizado empleando los recursos del microcontrolador. Como no se conoce de antemano la escena para la aplicación final y para que sea genérico se implementaron algoritmos que extraen características comunes a numerosas aplicaciones. Además, existe la posibilidad de enviar por el puerto serial el frame completo para ser procesado en forma remota.

En general, en una imagen térmica, es útil determinar el valor absoluto de puntos calientes, el gradiente espacial de

temperatura centrado en estos puntos y la evolución temporal de ellos.

B. Máximos de la imagen

Para la detección de los máximos de la imagen, puntos calientes, se utilizó el estándar IEEE 21451-001-2017 [4], referida al tratamiento de señales aplicado a sensores inteligentes. En nuestro caso particular, se considera a la imagen como un arreglo de 60 segmentos de señales unidimensionales de 80 elementos. De acuerdo al estándar, la señal es codificada como una unión de segmentos conocidos, en [5][6]. hay una descripción completa de la codificación. Cada frame consta de 4800 pixeles. Como resultado de aplicar la técnica de muestreo sugerida en la IEEE 21451-001, se marcan pixeles solo en la unión de segmentos, quedando una cantidad considerablemente menor, que es función de la escena y de un error de interpolación prefijado. Estos pixeles se llaman esenciales y se considera a esta forma de describir la información como una compresión sin pérdida de la estructura de la información. En la unión de un segmento ascendente con uno descendente, se obtiene un máximo local de forma directa. Se procesan las filas de la imagen en forma secuencial para la obtención de los pixeles esenciales y de los máximos locales controlados por un error de interpolación.

C. Algoritmos de extracción de características

El frame adquirido es subdividido en 16 regiones de 20 x15 pixeles. Esta subdivisión es realizada por dos motivos. Primero, simplifica el análisis del comportamiento térmico y lo adapta a los recursos de microcontrolador y segundo, se obtiene una firma digital de la escena que es empleada para validarla, teniendo en cuenta que los procesos térmicos son lentos y el objetivo del adquisidor es observar procesos en forma continua.

Para cada región i,j con $i=1, 2, 3,4$ y $j=1, 2, 3,4$ se realizan los siguientes procesos.

- 1- Cantidad de pixeles esenciales. (Cpix)
- 2- Valor medio de los pixeles esenciales. (Mpix)
- 3- Cantidad de máximos. (CMax)
- 4- Máximo de mayor valor. (MMax)
- 5- Diferencia entre la media de los máximos y la media de los pixeles esenciales. (DifMpixMax)

Por lo tanto, se obtienen 80 indicadores que describen la escena, son sencillos de calcular y son empleados para validarla y analizarla.

D. Validación de la escena

Validar la escena en este contexto significa que se está adquiriendo la misma imagen o que hay energía térmica en juego en la escena. La diferencia entre dos frames seguidos obtenida en un tiempo mucho menor que las constantes de tiempo térmicas involucradas, debe ser pequeña. Dos motivos

principales generan grandes diferencias. Primero que no exista energía térmica significativa en la escena, por ejemplo, la maquina está apagada y segundo que la escena cambió en forma abrupta, por ejemplo, se interpuso algún objeto o persona. Para validar una escena se debe obtener una diferencia menor a un umbral, Thd , en una cantidad de frames consecutivos Kd . Para la validación se emplean los procesos 1 y 2 según las siguientes ecuaciones:

$$dif1 = \sum |Cpix_{i,j,n} - Cpix_{i,j,n-1}| \quad (3)$$

$$dif2 = \sum |Mpix_{i,j,n} - Mpix_{i,j,n-1}| \quad (4)$$

Donde $i=1, 2, 3,4$; $j=1, 2, 3,4$ y n es el frame actual y $n-1$ el anterior, con una diferencia temporal mucho menor que las constantes térmicas involucradas. Un nuevo frame será validado si se cumple la siguiente inecuación:

$$dif1 + dif2 < Thd \quad (5)$$

para Kd frames consecutivos.

E. Analisis térmico de frames validados

Se ejecutan dos procesos básicos: el crecimiento temporal de los máximos y la evolución espacial de la energía térmica en cada región. Se calculan los valores resultantes para cada uno de los 5 procesos en cada región. Se base a los resultados, se seleccionan las regiones que requieren atención para su seguimiento. Por ejemplo, en una región sin máximos no se realiza ningún calculo posterior. Se busca el máximo absoluto de la imagen y se registra la evolución temporal de las regiones vecinas en sucesivos frames, ver Fig. 9.

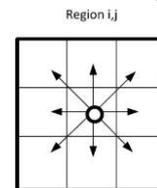


Fig. 9. Regiones vecinas centradas en el máximo absoluto de la imagen.

F. Resultados experimentales sobre imágenes reales

Se procesaron imágenes térmicas de un disipador de un transistor de potencia. Se adquirieron 30 frames a intervalos de 20 segundos. En la Fig.10 se observa la imagen térmica del disipador y en la Fig.11 la evolución temporal del máximo MMax de la imagen.

En la Fig.12 se presenta el estado térmico inicial y final del disipador luego de los 10 minutos de ensayo. Se calcularon los 5 procesos y es importante destacar la importancia del proceso 5, DifMpixMax, ya que un aumento de ese valor implica que el calor se está concentrando en pequeñas superficies o que la velocidad de generación de calor es mayor a la de evacuación. En la Fig. 13 se observa la captura de la imagen térmica de un motor, que a través de las rejillas de ventilación se puede inferir la temperatura del bobinado.

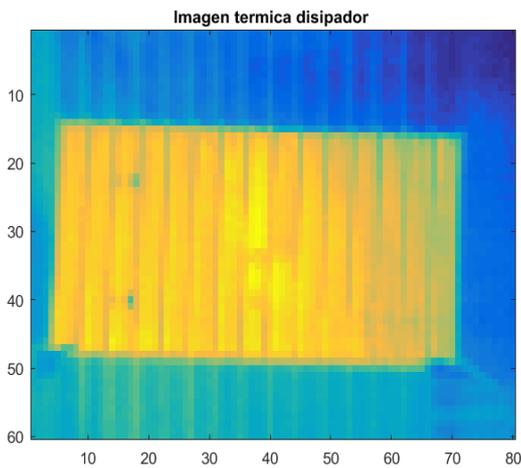


Fig. 10. Imagen termica del disipador bajo ensayo.

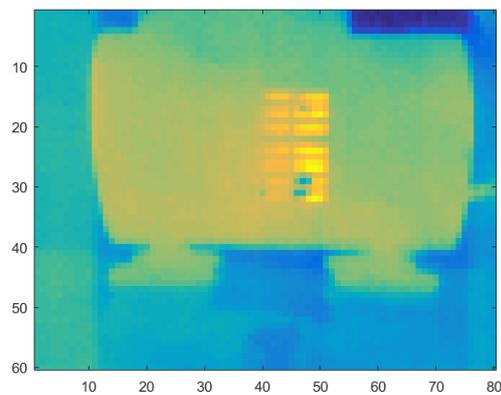


Fig. 13. Imagen térmica de un motor en el cual se puede medir la temperatura de los bobinados por las rejillas de ventilación. Capturada con el sistema de adquisición.

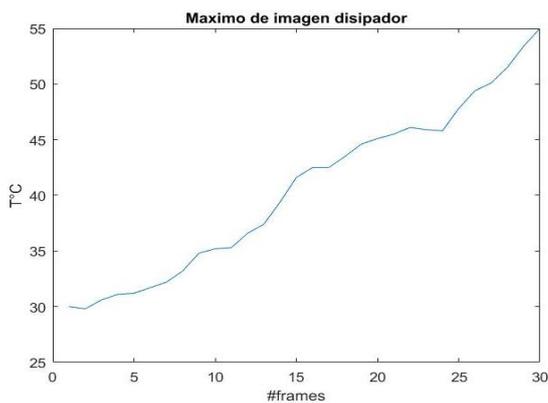


Fig. 11. Evolucion temporal del máximo MMax de la imagen disipador

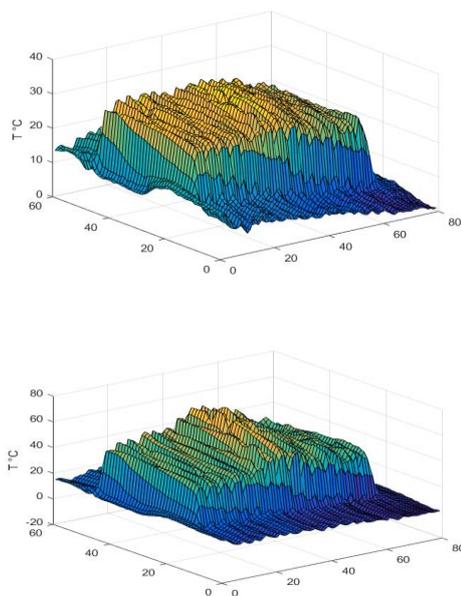


Fig. 12. Imagen termica del disipador al principio (superior) y al final del ensayo (inferior).

V. CONCLUSIONES

La termografía presenta la gran ventaja de observar un proceso o dispositivo sin contacto. En el caso presentado en este trabajo la resolución es de 80 x 60. Aunque es baja, es como observar al proceso con 4800 termómetros. Al bajar los costos de las cámaras infrarrojas se disparan aplicaciones con capturas fijas que permiten evaluar el comportamiento térmico con la filosofía de un sensor inteligente. Las aplicaciones son innumerables, no solo para inferir patrones anormales, sino que además para validar el correcto desempeño de un sistema, por ejemplo, verificar que alcanza el régimen permanente con normalidad. Se proponen 5 indicadores de comportamiento térmico y el seguimiento de regiones que presentan características de evolución térmica.

En algunas aplicaciones también son importantes los valores mínimos de una imagen, como por ejemplo en estudios de eficiencia energética. Los máximos y los mínimos locales son resultados inmediatos del estándar IEEE 21451-001 y puede ser implementada en microcontroladores de mediana complejidad.

REFERENCIAS

- [1] E. Song and K. Lee, "Understanding IEEE 1451-networked smart transducer interface standard – what is a smart transducer?" IEEE Instr.Meas. Mag., vol. 11, no. 2, pp. 11–17, 2008.
- [2] <http://www.flir.com/cores/content/?id=66257>
- [3] <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/31411-La-termografia-en-la-industria-del-plastico.html>.
- [4] <https://standards.ieee.org/findstds/standard/21451-001-2017.html>
- [5] G. Monte, "Sensor Signal Preprocessing Techniques for Analysis and Prediction" Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE. pp 1788-1793. ISBN 978-114244-1766-7.
- [6] Monte ,G Abate, F; Huang, V;; Paciello V; Pietrosanto A; Industrial Informatics (INDIN), 2015 IEEE 13th International Conference on Trabajo: "Real time transducer signal features extraction: A standard approach". Print ISSN: 1935-4576, Electronic ISSN: 2378-363X