

Bienvenid@s

WEBINAR



Sigue el Webinar



#WebinarsAEMAC

#WebinarsAEMAC

CATEC

ADVANCED
PROCESSES
& TESTING



‘Termografía infrarroja como técnica de inspección flexible para la mejora de procesos de fabricación y validación de estructuras ligeras.’

25 de octubre de 2023, 16:00 (Madrid, GMT+2)

Carlos Galleguillos Riobóo

Responsable de la Unidad Ensayos y Procesos Avanzados

Dra. Marta Herrera García

Ingeniera Senior en la Unidad Ensayos y Procesos Avanzados



- **La Termografía Infrarroja (TIR) como método NDT.**
- **Capacidades y Equipamiento para la TIR.**
- **Procedimiento para la inspección mediante TIR.**
- **Aplicaciones de la TIR como método NDT – Casos de uso.**
- **Conclusiones / Retos y Trabajos futuros.**

CATEC:

Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales



+100
Profesionales



+100
Clientes / Socios



5 Instalaciones
(España)

Fundación Andaluza para el Desarrollo Aeroespacial (FADA)

Patronato



Sectores



Aeronáutica



Espacio



Software



Producción



Energía



Defensa



Salud



Agro



Naval



Logística

Alta experiencia en convocatorias públicas de I+D
Nacionales y Europeas, con más de **200 proyectos**.





***Automatización y
Robótica***



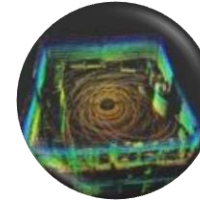
***Fabricación
Aditiva***



***Ensayos y
Procesos
Avanzados***



***Sistemas
Embarcados***



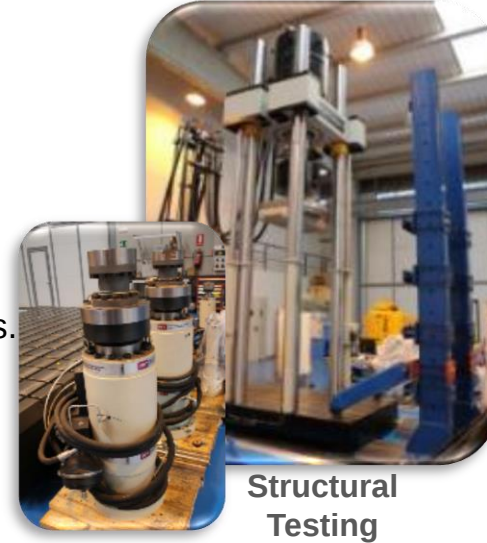
***Percepción e
Inteligencia
Artificial***



***Sistemas
Autónomos***

Nuestra propuesta de valor:
nuestra complementariedad multitecnológica

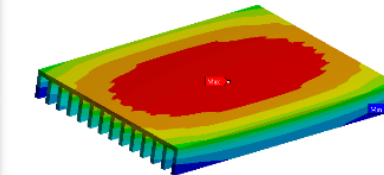
- **Fabricación de composites** fuera de Autoclave
- Inspección por **ultrasonidos** y **termografía infrarroja**.
- **Tomografía Computarizada de Rayos X** para análisis de defectos y caracterización 3D.
- **Monitorización de Salud Estructural (SHM)** de estructuras, procesos y ensayos.
- **Ensayos estructurales y ambientales**.
- **Simulaciones avanzadas** (estructurales, térmicas, procesos, CFD, etc.)



Structural Testing



Infusion unit / RTM injection System



Complex simulations



NDT inspection

La termografía infrarroja como método de inspección no destructiva.

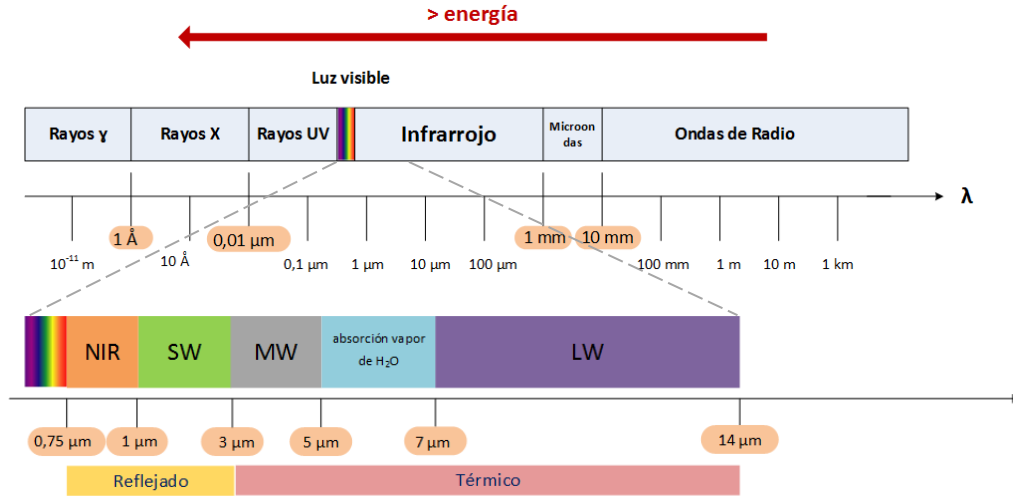
CATEC Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales

Carlos Galleguillos; Dra. Marta Herrera

25.10.2023

cgalleguillos@catec.aero ; mherrera@catec.aero

EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO



Visible: De 0,4 a 0,75 μ m

Infrarrojo reflejado: De 0,75 a 3 μ m

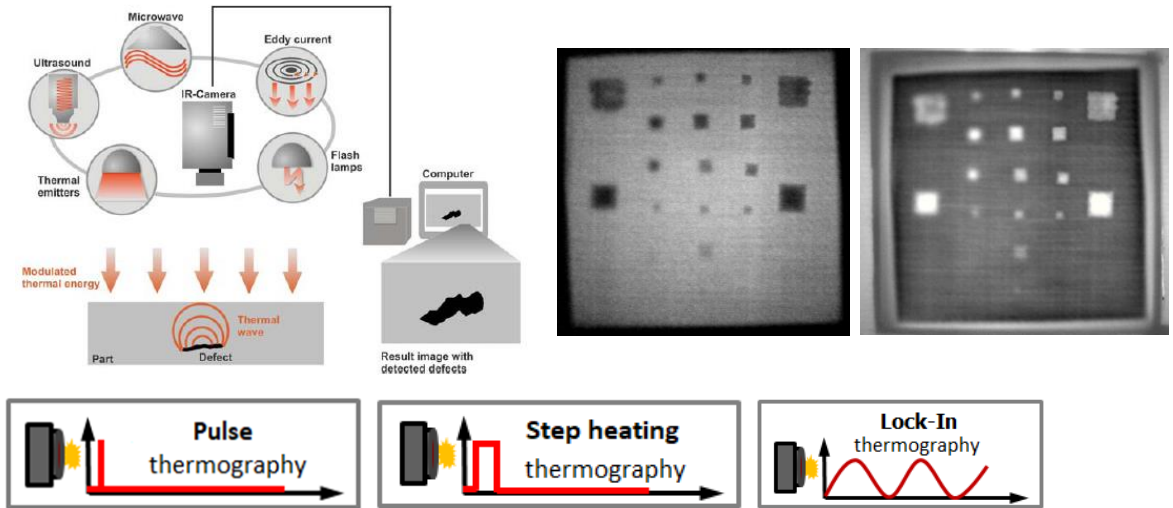
Infrarrojo térmico (emitido): De 3 a 14 μ m

- ✓ Clasificamos como **Infrarrojo (IR)** el rango electromagnético entre 0.75-1000 μ m.
- ✓ Cualquier cuerpo a una temperatura por encima de 0K emite radiación IR.
- ✓ Se considera radiación térmica porque la interacción del IR con la materia tiene como principal consecuencia el calentamiento.
- ✓ El cristalino humano es transparente hasta 1,4 μ m (incluyendo el NIR y una pequeña parte del SW).

Radiación IR

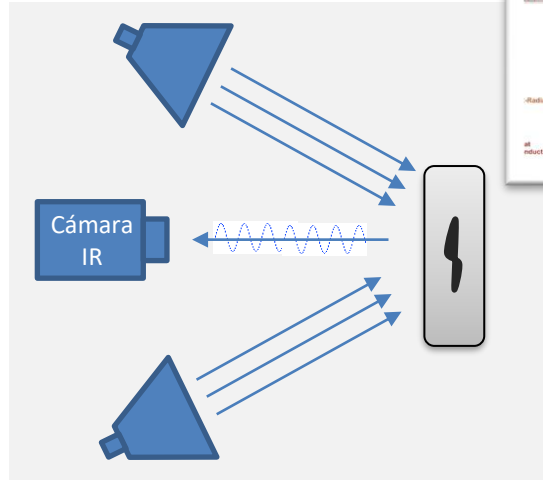


Pasiva	Activa
No se excita energéticamente por medio externos.	El cuerpo a inspeccionar se debe excitar energéticamente para conseguir un suficiente contraste de T
Las propias condiciones del ensayo generan el necesario contraste térmico.	Las Temperaturas superficiales de la muestra se modifican en función del tiempo.
Aplicaciones de mantenimiento, industriales o edificación.	El flujo de calor transitorio generado en el interior de la pieza genera un patrón térmico de temperaturas en superficie que se puede correlacionar con características internas de la pieza .



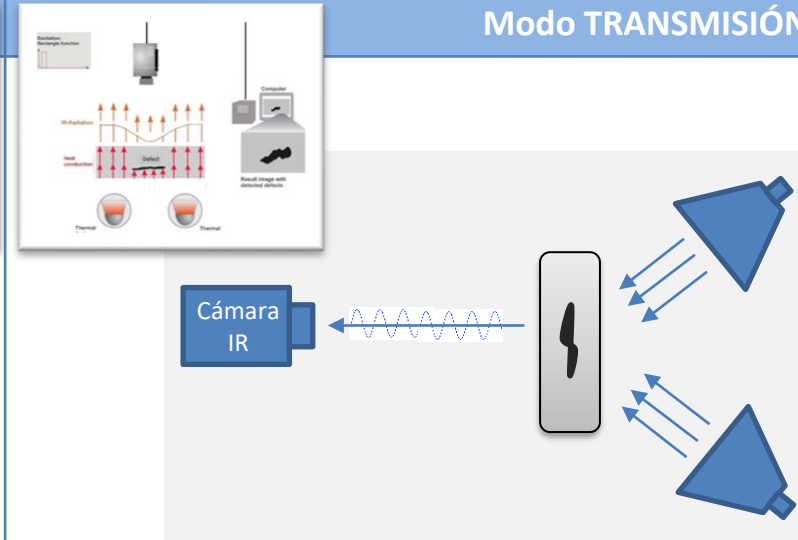
TIR Activa

Modo REFLEXIÓN



- Defectos cercanos a la superficie
- Mejor resolución
- Espesores pequeños

Modo TRANSMISIÓN



- Acceso a los 2 lados de la pieza
- Menor resolución
- Espesores mayores

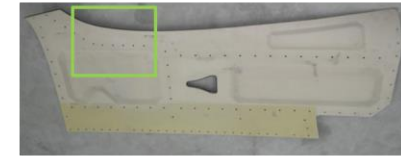
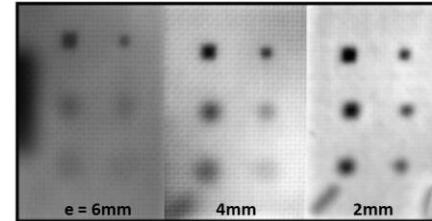
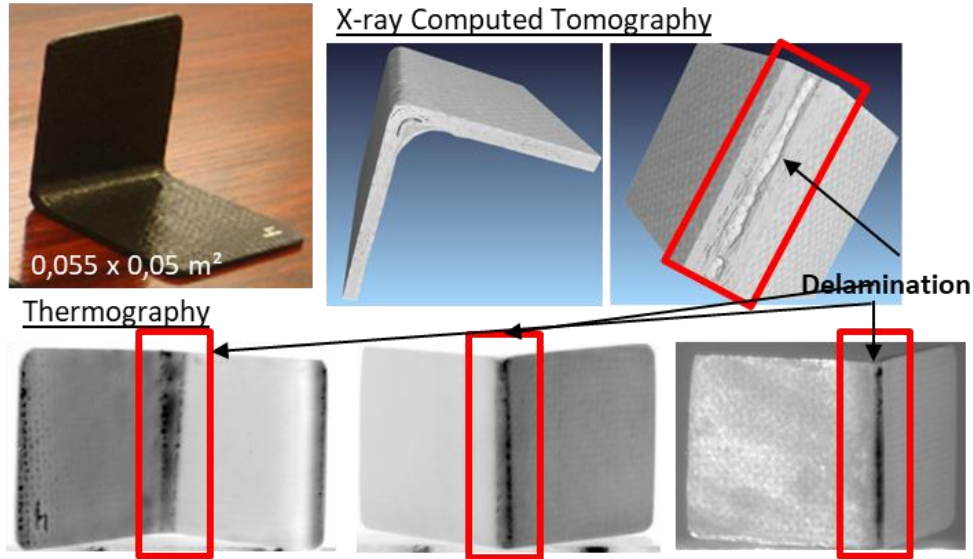
Defectología tipo más común en material compuesto

- ✓ Falta de unión
- ✓ Delaminación
- ✓ Daño del núcleo
- ✓ Impacto
- ✓ Grietas
- ✓ Inclusión de líquido (agua)
- ✓ Huecos - Porosidad
- ✓ Objetos extraños (*Foreign Object* – FOD)

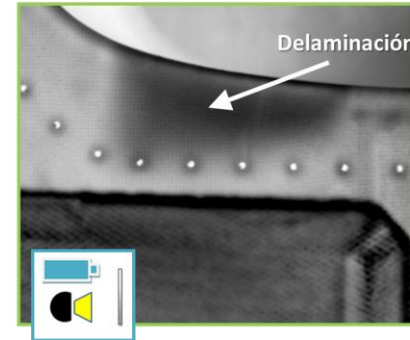
Defectología tipo más común en material compuesto

✓ *Detección de discontinuidad – huecos/porosidad*

✓ *Detección de discontinuidad - delaminaciones*

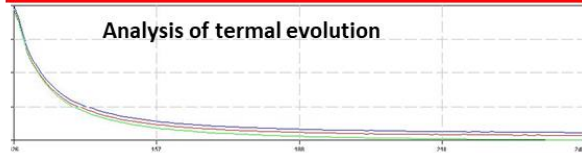
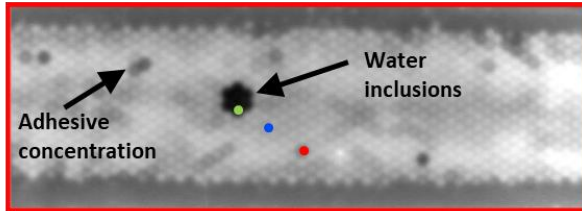
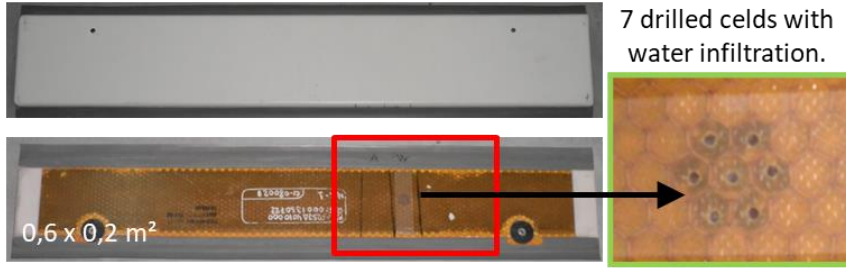


Size: 1,300 x 500 mm²

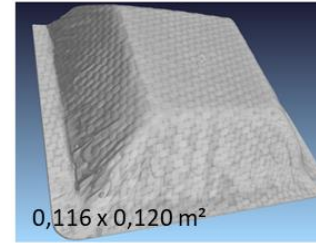


Defectología tipo más común en material compuesto

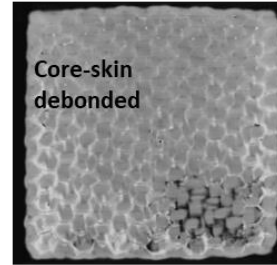
✓ *Detección de inclusión de agua en Honeycomb*



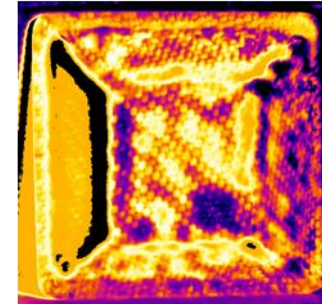
✓ *Honeycomb CFRP-Kevlar*



X-ray Computed Tomography

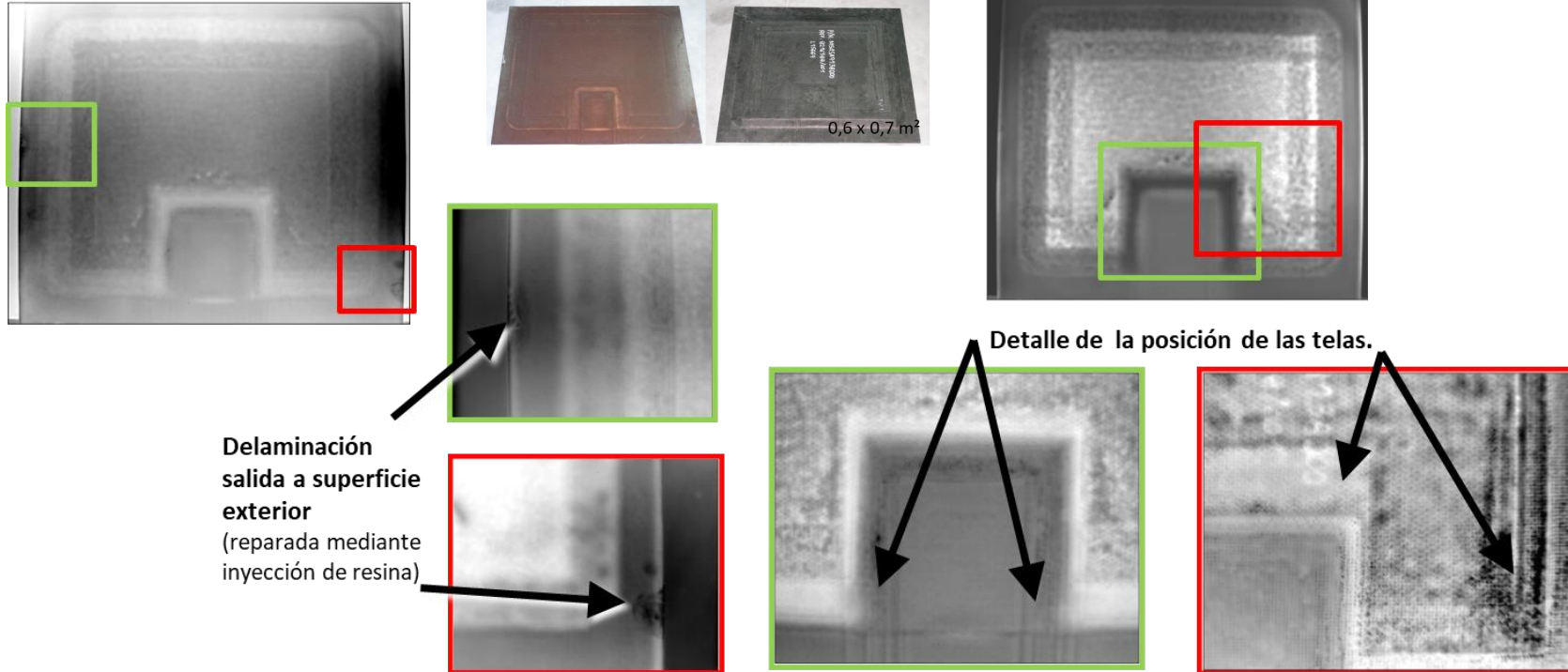


Thermography



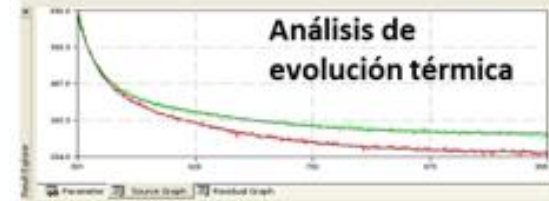
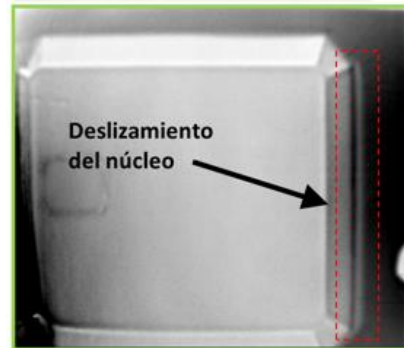
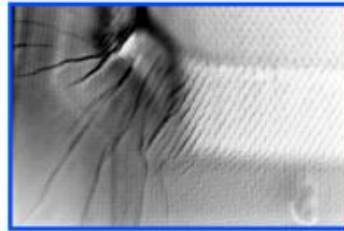
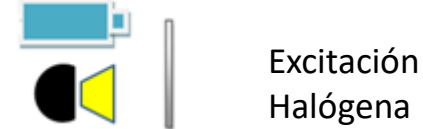
Defectología tipo más común en material compuesto

✓ *Honeycomb CFRP-CFRP*



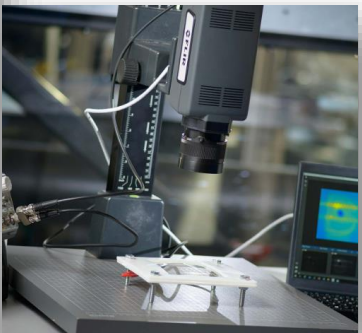
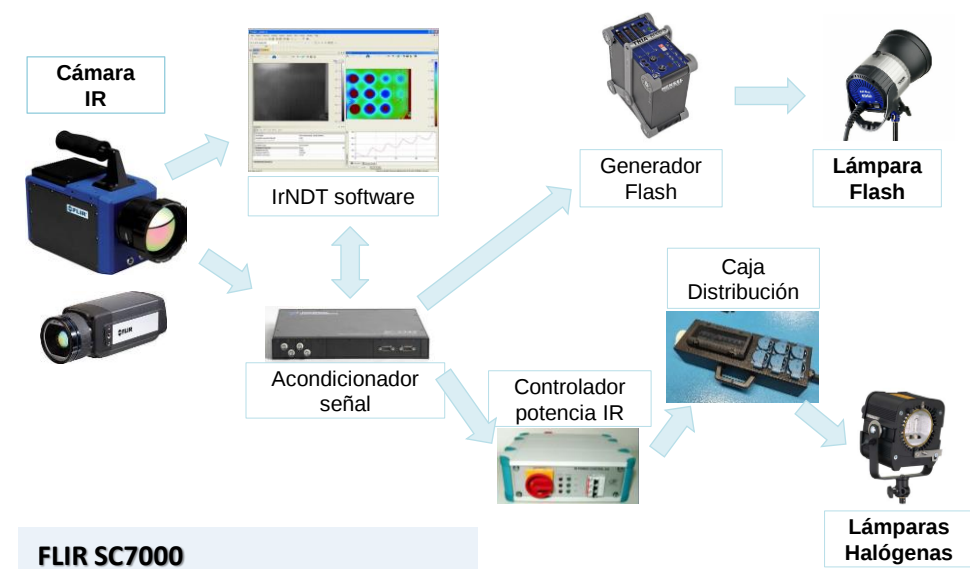
Defectología tipo más común en material compuesto

✓ Honeycomb CFRP-TEDLAR



Ventajas	Inconvenientes
Rápida velocidad de inspección	Poca uniformidad del calor aplicado
Inspección de grandes superficies y gran variedad de materiales	Difícilmente aplicable a cuerpos de muy baja emisividad
Bidimensional	Efecto de las irregularidades en la geometría
Sin contacto	Falsos positivos / Reflejos
Seguridad	Coste del equipo elevado
Extenso rango de aplicación	Espesor / Profundidad factor limitante

Capacidades y Equipamiento TIR



FLIR SC7000

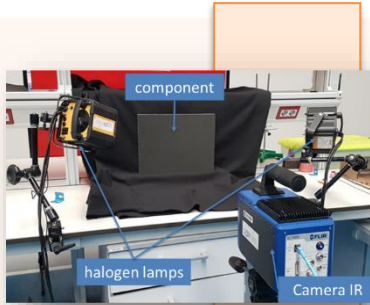
Rango espectral: 3-5 μm
Resolución: 640 x 512 píxeles
Lente: 5 mm F/2 220 x 170
NETD < 18 mK

FLIR A645sc

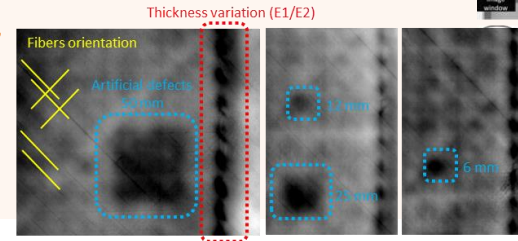
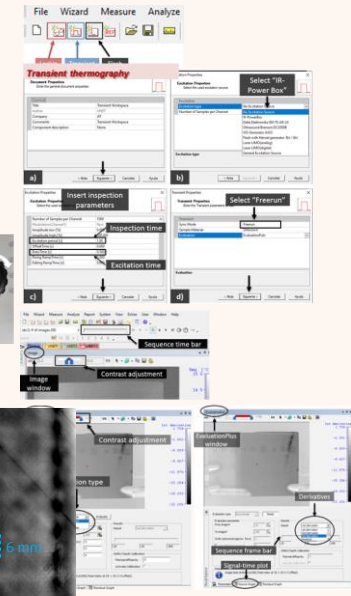
Resolución: 640 x 480 píxeles
NETD: 30 mK

Cualitativa	Cuantitativa
Analiza patrones	Implica la medida de T
Determina la existencia de anomalías	Se debe compensar la T
Se miden T aparentes (sin compensar)	No siempre es necesaria

Procedimiento para la inspección mediante TIR



- **CONTROLES PARA LA VERIFICACIÓN DEL SISTEMA PREVIO A LA INSPECCIÓN.**
- **COMPROBACIÓN DE ELEMENTOS A INSPECCIONAR PREVIO A LA INSPECCIÓN.**
- **CONFIGURACIÓN Y CONEXIONES DEL SISTEMA DE INSPECCIÓN.**
- **DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE INSPECCIÓN.**
- **ENFOQUE DE LA CÁMARA IR.**
- **MARCADORES DE REFERENCIA.**
- **CONFIGURACIÓN Y ACTIVACIÓN DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN.**
- **MONITORIZACIÓN / ADQUISICIÓN DE DATOS.**
- **PROCESAMIENTO DE DATOS.**
- **EXPORTAR DATOS.**
- **ANÁLISIS DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS.**

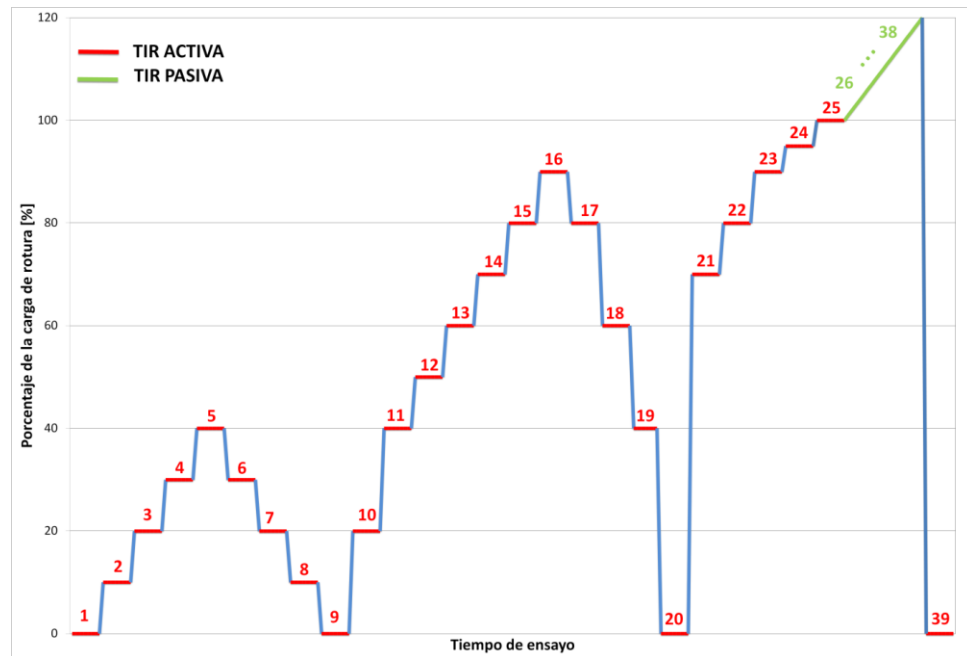
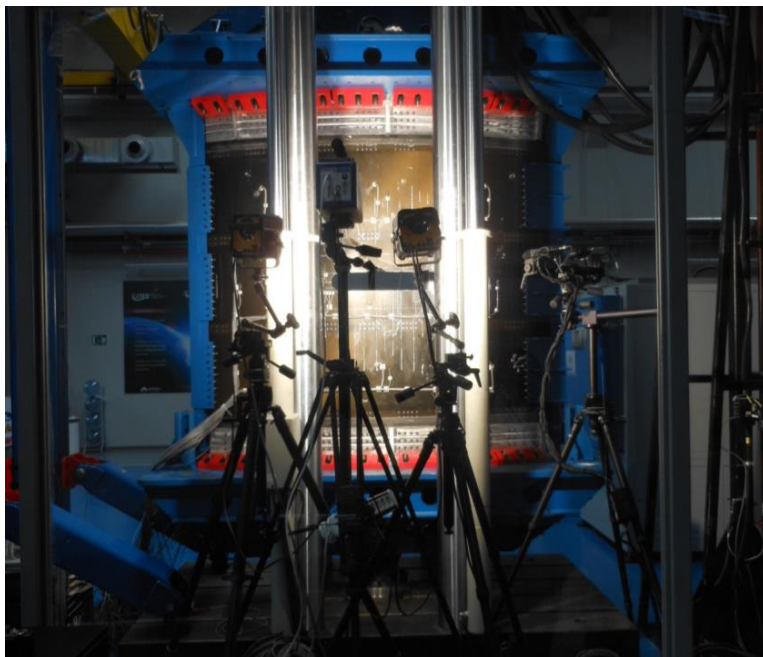


- *Horas de experiencia*
- *Curso de formación*
- *Examen certificación*

Aplicaciones / Casos de uso de la termografía infrarroja como método de inspección no destructivo.

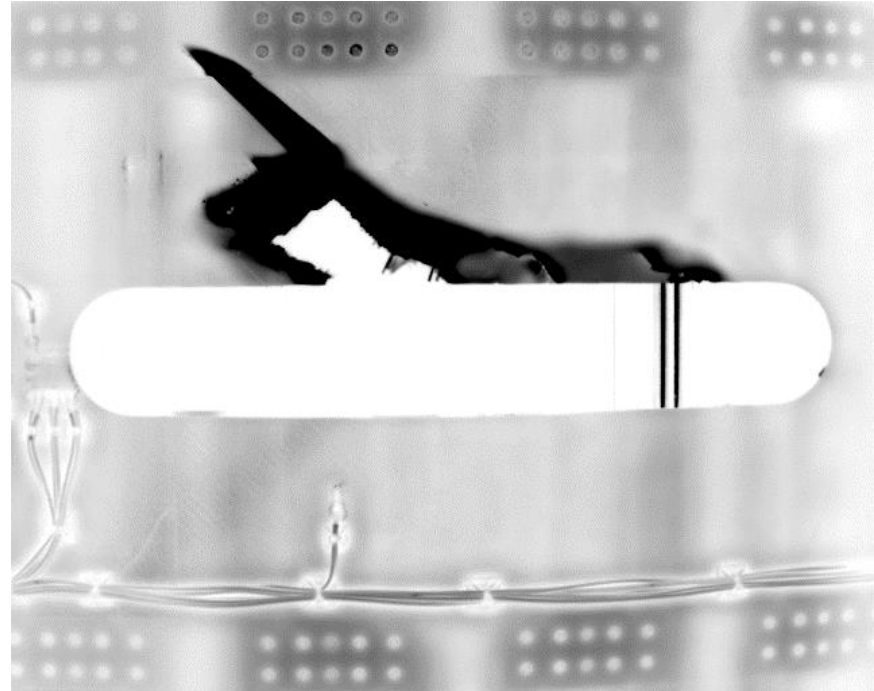
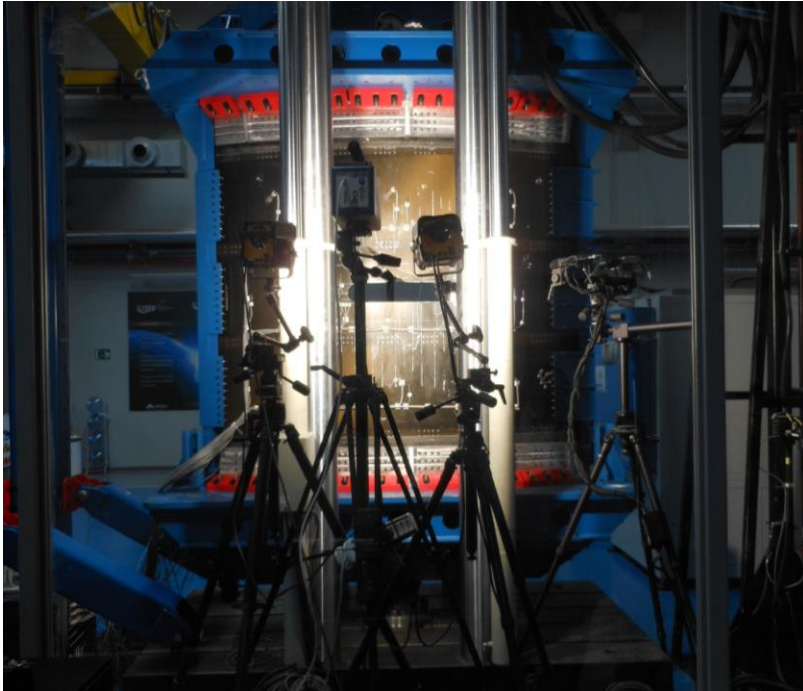
- Monitorización de ensayos y detección de defectos.
- Detección automática de defectos.
- Aumento de la detectabilidad y reducción de ruido en secuencias termográficas.
- Caracterización de uniones de material compuesto soldadas por resistencia eléctrica.
- Monitorización de procesos: *Desarrollo e implementación de un sistema flexible para monitorizar el proceso de HLU de composites antes de curado.*

- *Monitorización de ensayos y detección de defectos en estructuras de materiales compuestos por TIR*



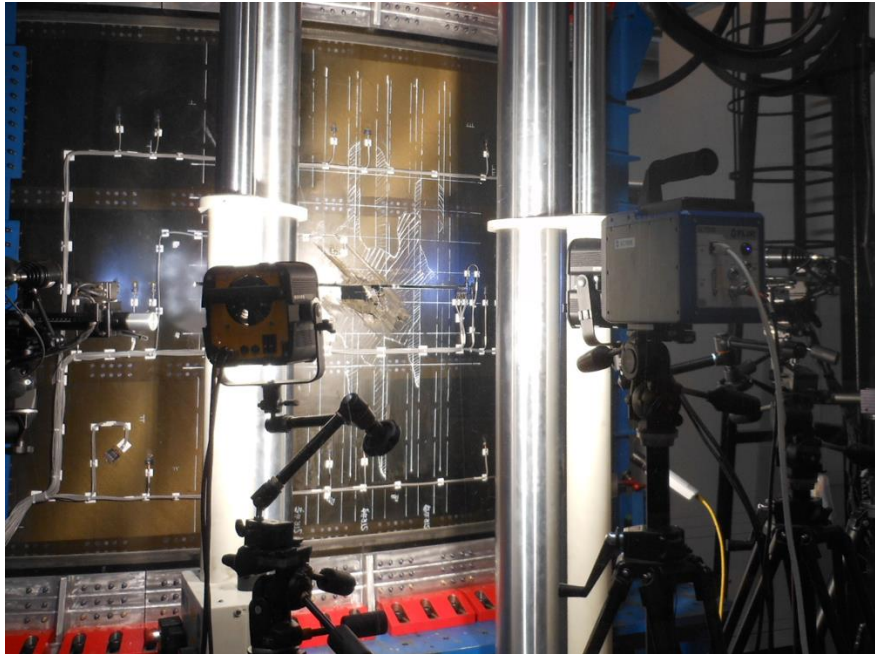
- *Monitorización de ensayos y detección de defectos en estructuras de materiales compuestos por TIR*

Termografía activa



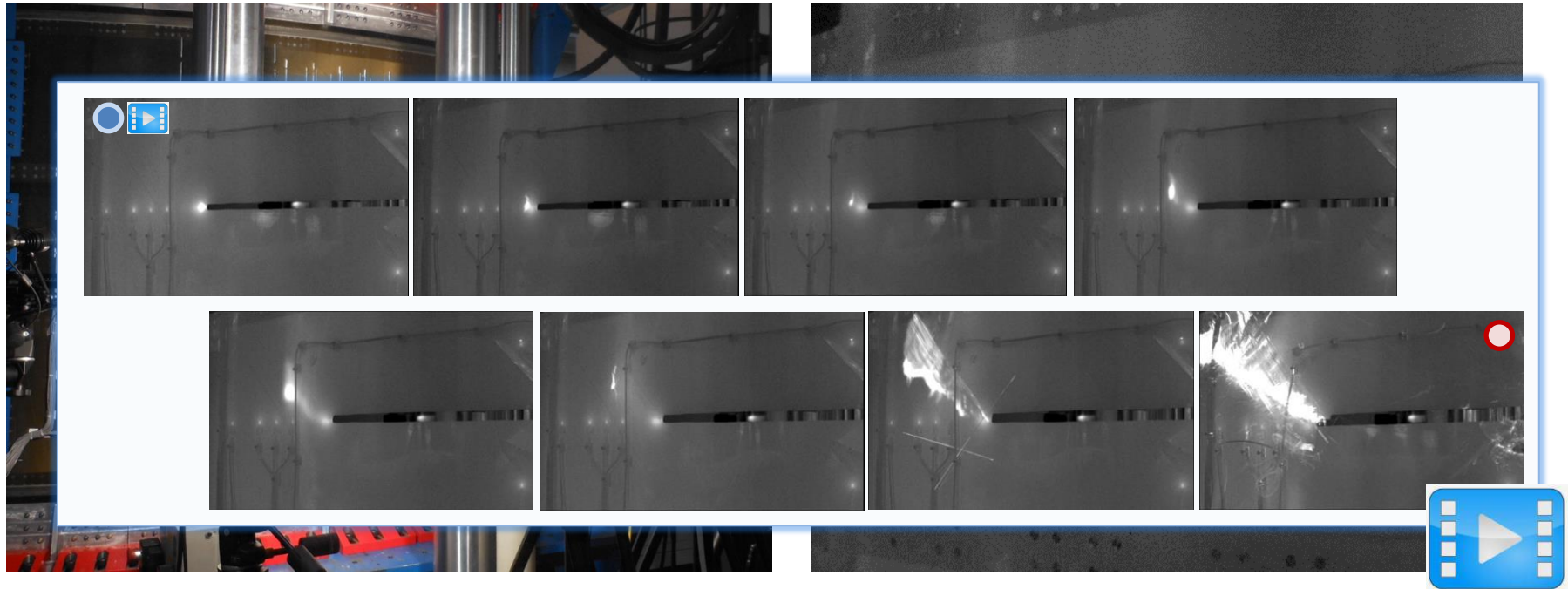
- *Monitorización de ensayos y detección de defectos en estructuras de materiales compuestos por TIR*

Termografía pasiva



- *Monitorización de ensayos y detección de defectos en estructuras de materiales compuestos por TIR*

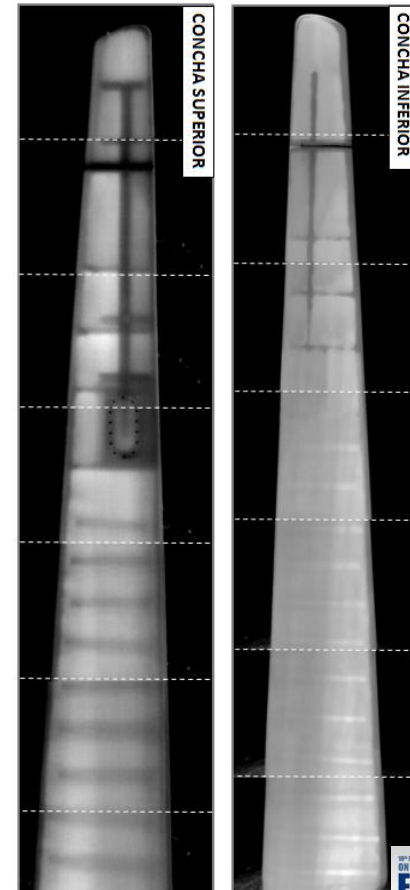
Termografía pasiva



➤ *Inspección aérea de palas de aerogeneradores*

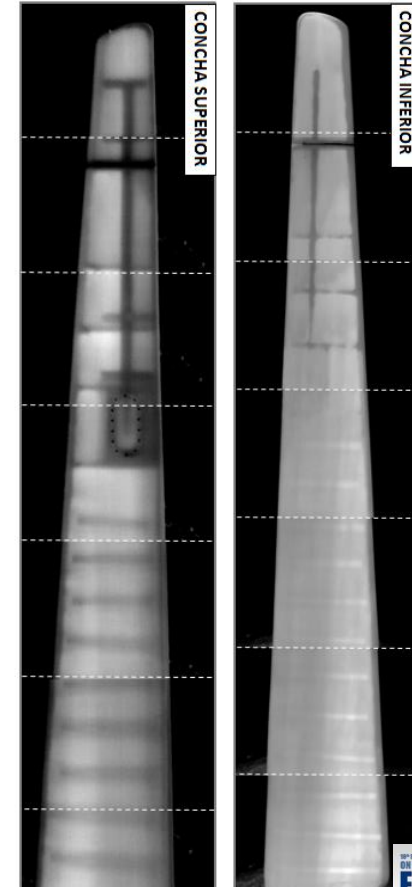
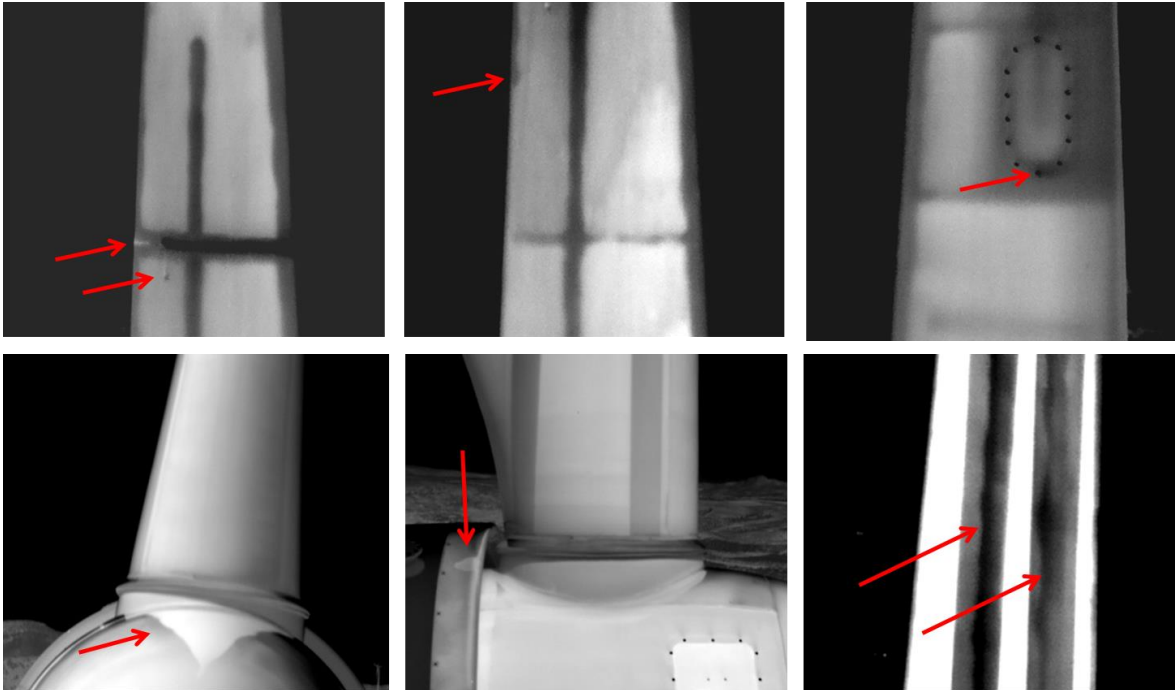


- Reducción del tiempo de preparación respecto a las estrategias de inspección convencionales.
- Detección fiable y subterránea de indicaciones.
- Información visual y termográfica (determinación de indicaciones falsas).
- Información en vivo.
- Alto potencial para inspecciones en alta mar.
- Respuesta rápida del servicio (ventanas de tiempo climático).



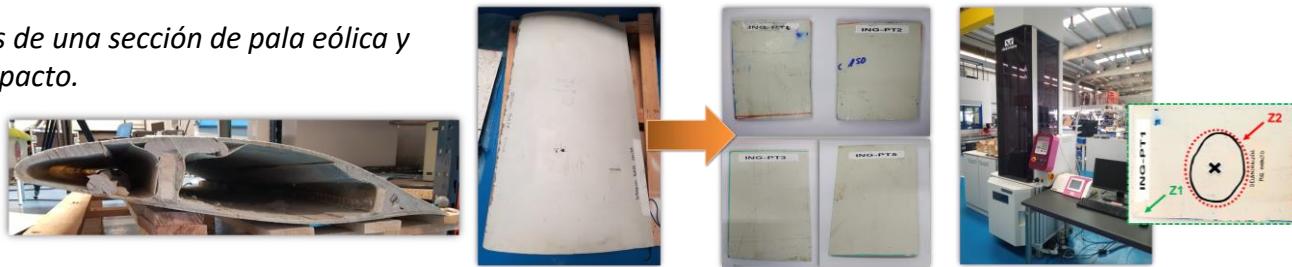
➤ Inspección aérea de palas de aerogeneradores

✓ Detección de indicaciones no observables durante inspecciones "a simple vista".

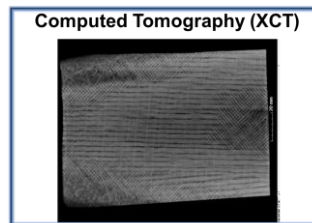
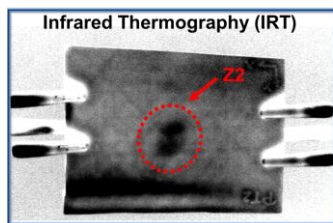


➤ *Análisis de detectabilidad de defectos por impacto en palas de aerogeneradores mediante diferentes técnicas de inspección no destructiva.*

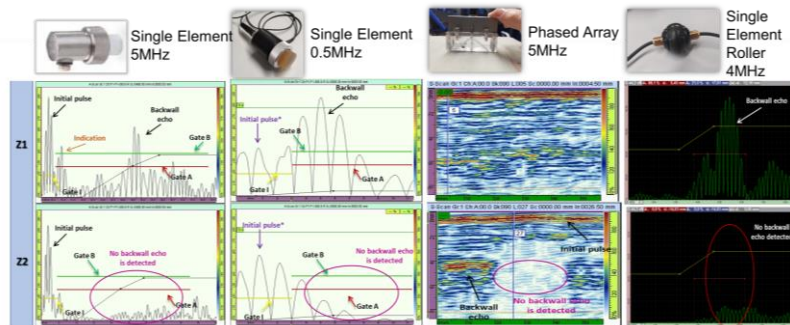
- ✓ Extracción de muestras de una sección de pala eólica y ensayos en torre de impacto.



- ✓ *Análisis de los resultados de inspección mediante TIR, XCT y ultrasonidos.*



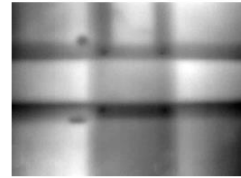
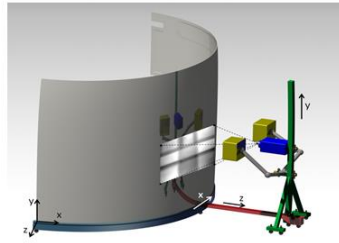
- La TIR no requiere contacto;
- Difícil la implementación del sistema de TIR activa en UAVs.



<https://www.matcomp21.org/MATCOMP21>



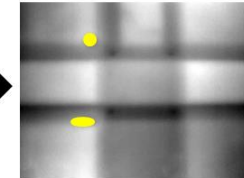
➤ Detección automática de defectos en estructuras de materiales compuestos por TIR



Termografía

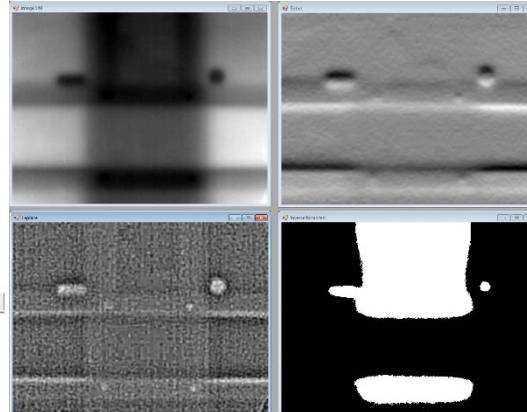
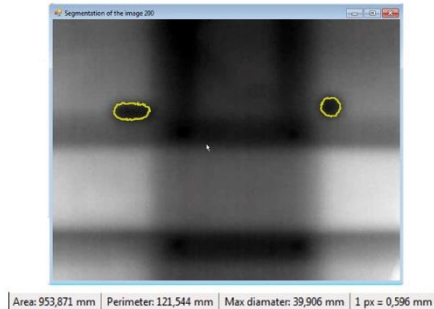


Referencia

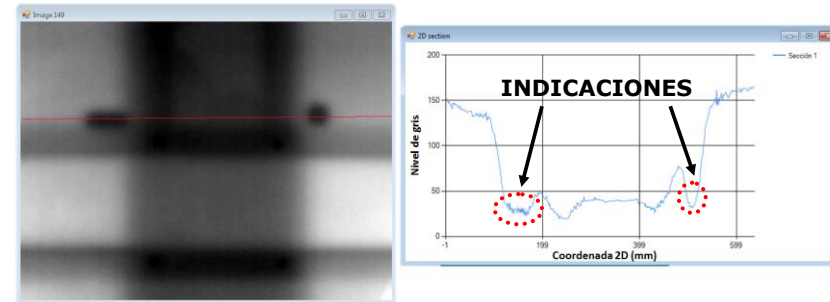


Resultado

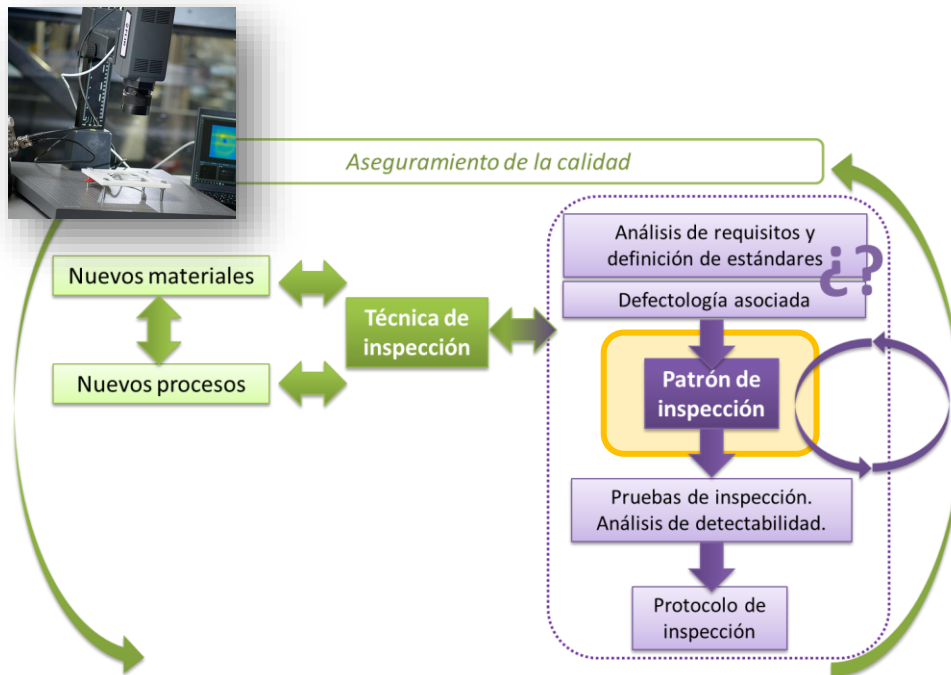
✓ Cuantificación de área de defectos y diferentes filtrados sobre la imagen



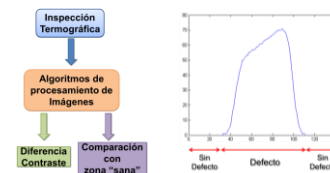
✓ Termograma y representación en 2D de la escala de grises sobre un corte en el mismo



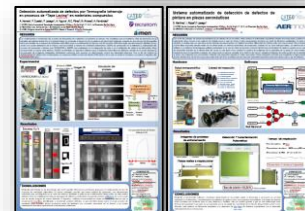
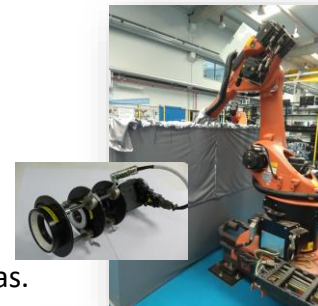
- *Detección automática de defectos en estructuras de materiales compuestos por TIR*
- *Validación de la TIR como método de inspección en procesos automatizables.*



- ✓ Detección automatizada de defectos por TIR en procesos de "Tape Laying" en materiales compuestos.



- ✓ Sistema automatizado de detección de defectos de pintura en piezas aeronáuticas.

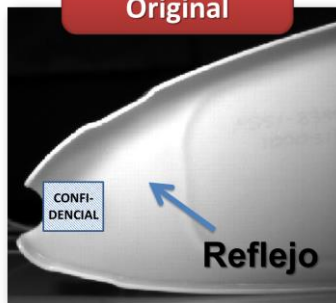


➤ Aumento de la detectabilidad y reducción de ruido en secuencias termográficas

- ✓ Los resultados obtenidos demuestran la validez de los métodos, aplicados a una estructura real de fibra de carbono y resina epoxy. Las reflexiones se han eliminado por completo, sin afectar a la identificación del defecto.



Termograma
Original



Contraste Filtrado (Filtered Contrast, FC)

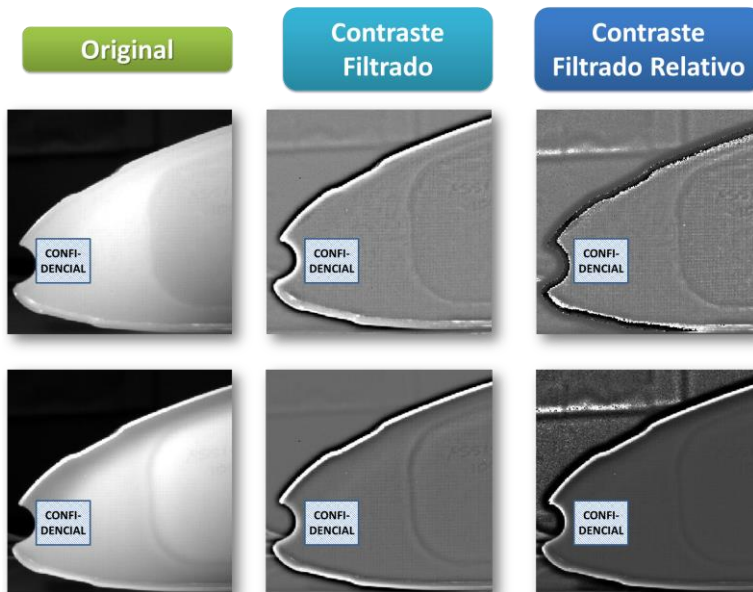
$$FC_{x,y} = T_{x,y} - \text{filter}(T_{x,y})$$

- ✓ Operación realizada pixel a pixel (x,y)
- ✓ Tx,y: Temperatura pixel x,y
- ✓ Zona sin defectos → FC_{x,y} nulo
- ✓ Filtro Gaussiano

Contraste Filtrado Relativo (Relative Filtered Contrast, RFC)

$$RFC_{x,y} = \frac{T_{x,y} - \text{filter}(T_{x,y})}{\text{filter}(T_{x,y}) - T_0}$$

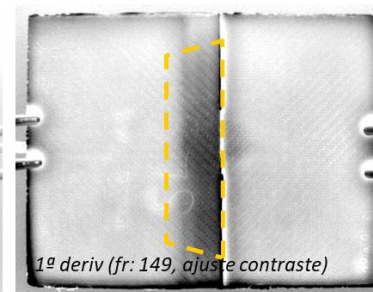
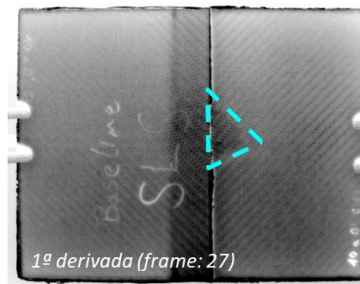
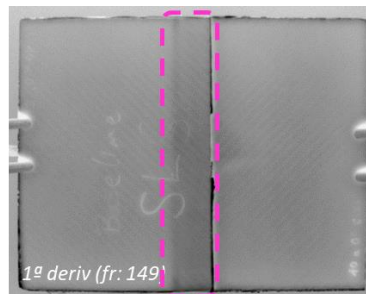
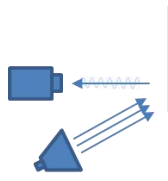
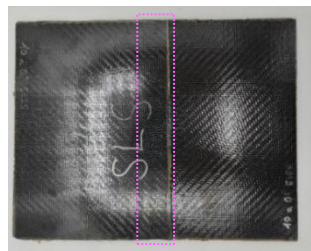
- ✓ T0: Media aritmética temperatura registrada en t=0 → previo calentamiento



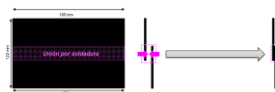
chrome-
extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmk
ai/https://www.aend.org/documentos/congr
esos/Vitoria2019/LibroCongresoVitoria19.pdf

➤ Caracterización de uniones de material compuesto soldadas por resistencia eléctrica.

- ✓ Se ha validado la **termografía infrarroja** como método de inspección no destructiva flexible, de poco tiempo de procesado y automatizable, para el análisis y evaluación de **uniones soldadas por conductividad térmica**.



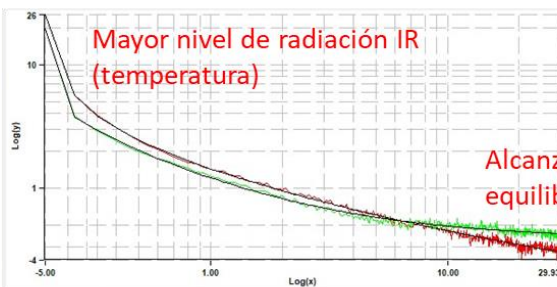
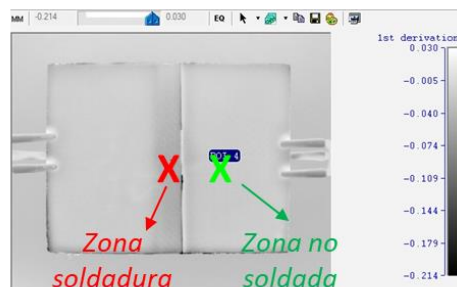
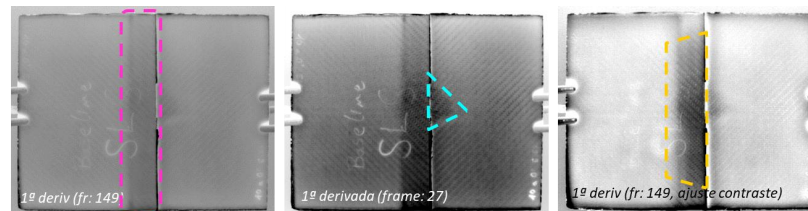
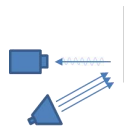
➤ Flash - Modo reflexión (Tiempos: 2 ms / 30 s)



➤ Caracterización de uniones de material compuesto soldadas por resistencia eléctrica.

✓ Se ha validado la **termografía infrarroja** como método de inspección no destructiva flexible, de poco tiempo de procesado y automatizable, para el análisis y evaluación de **uniones soldadas por conductividad térmica**.

✓ Permite contrastar **variaciones del nivel de radiación IR** con variaciones localizadas en la cantidad de resina.

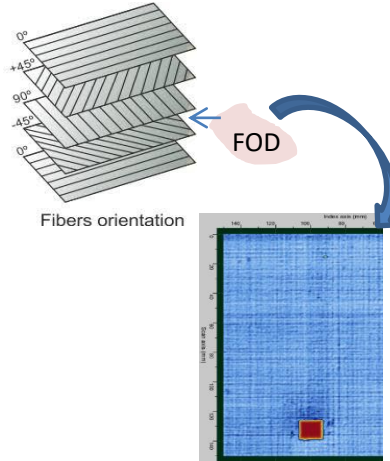


➤ Comparación de los niveles de radiación IR durante el ensayo



- *Desarrollo e implementación de un sistema flexible para monitorizar el proceso de HLU de composites antes de curado.*

Hand Lay Up – HLU



1. Apilado (Manual)
2. CURADO
3. POST-PROCESO
4. INSPECCIÓN
5. REPARACIÓN/SCRAP



Consideraciones

Raw Material → Sin contacto
Clean room → Ambiente controlado
($\Delta T < 10^\circ\text{C}$) en material

Solución propuesta

Termografía Infrarroja
Modo Activo



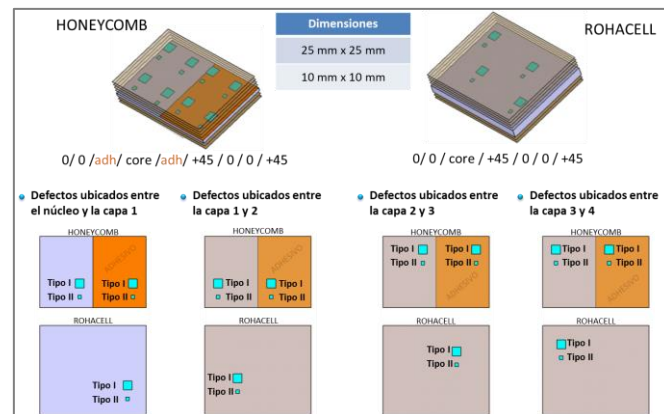
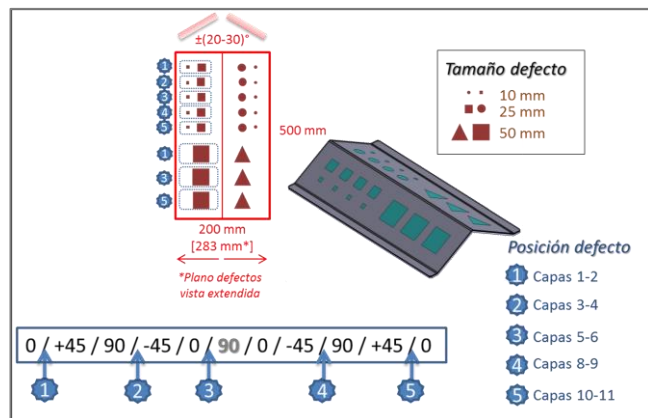
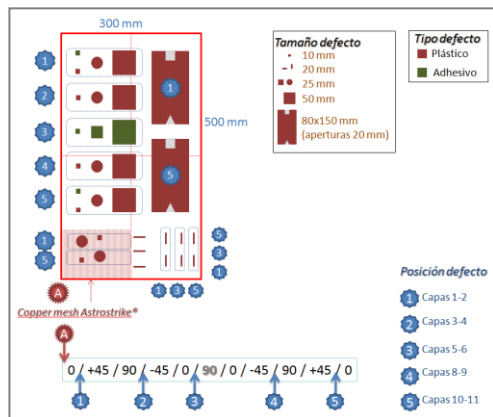
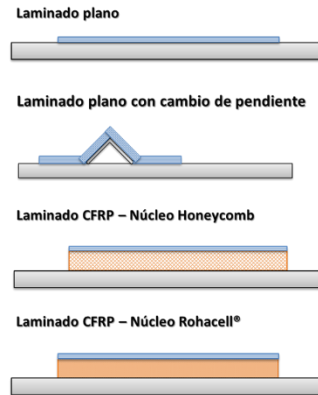
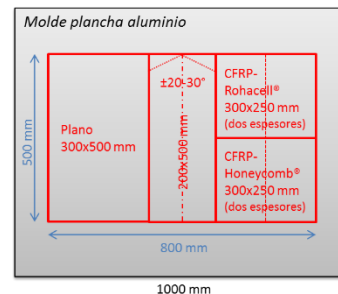
<https://www.matcomp21.org/MATCOMP21>



- **Desarrollo e implementación de un sistema flexible para monitorizar el proceso de HLU de composites antes de curado.**

Casos de estudio

- Laminado plano / con malla metálica (Ejemplo: malla de Cu Astrostrike®).
- Laminado con cambios de pendiente y/o formas curvas.
- Laminado plano con núcleo de Honeycomb.
- Laminado plano con núcleo de Rohacell®.



- **Desarrollo e implementación de un sistema flexible para monitorizar el proceso de HLU de composites antes de curado.**

✓ Colocación de defectos en el laminado

Defectos entre la capa 1 y 2



Defectos entre la capa 3 y 4



Defectos entre la capa 8 y 9



Defectos entre la capa 5 y 6



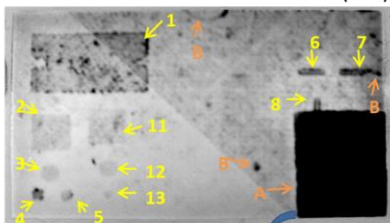
Defectos entre la capa 10 y 11



✓ Inspección TIR tras la colocación de diferentes capas

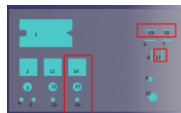
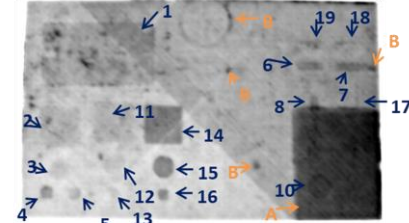
Inspección tras lámina 4

Conf. 4 (t = 1s)



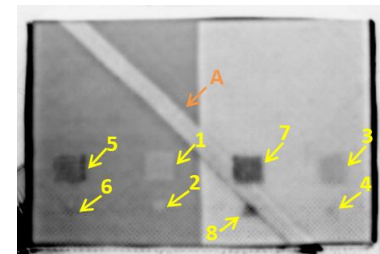
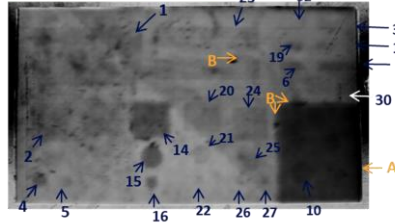
Inspección tras lámina 8

Conf. 6 (t = 20s)



Inspección tras lámina 11

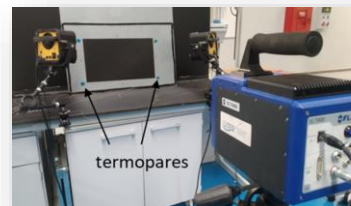
Conf. 6 (t = 25s)



- Se observa una pérdida progresiva de detectabilidad con el número de capas acumuladas.
- El solape de indicaciones puede afectar a la detectabilidad.

➤ Desarrollo e implementación de un sistema flexible para monitorizar el proceso de HLU de composites antes de curado.

- ✓ A través de las distintas configuraciones se definieron los diferentes parámetros para el sistema de inspección:

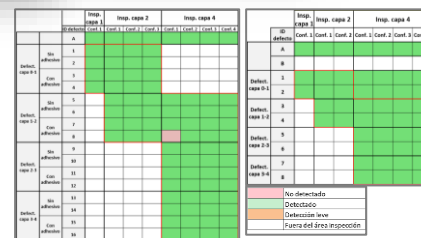
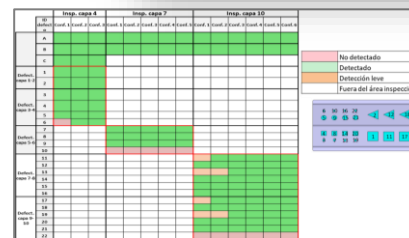


Modo reflexión

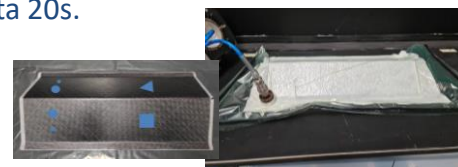
Cámara: FLIR SC7600

- Tiempo de excitación
- Tiempo de inspección
- Distancia focos-laminado
- Distancia cámara - laminado

✓ Análisis de detectabilidad

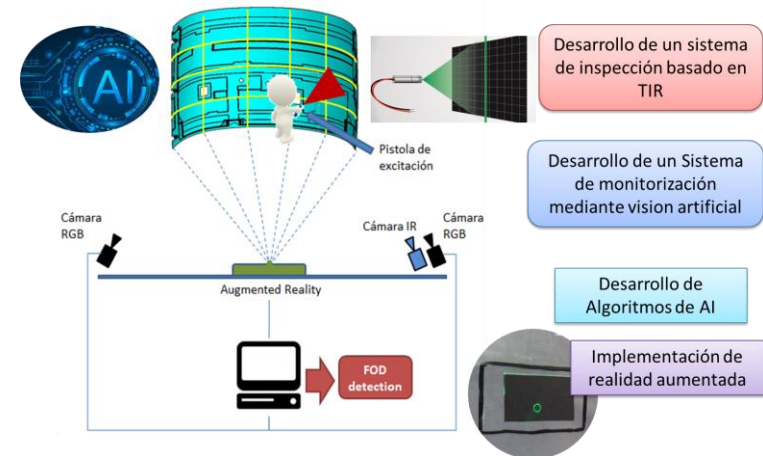


- TIR es una herramienta potente para evaluar elementos en estado fresco, no requiere de contacto para la inspección.
- Se ha logrado un **control térmico con un $DT < 10^{\circ}C$** , con tiempos de excitación de hasta 20s.
- Es necesario un **proceso de compactación (vacío)**, antes de la inspección.
- Limitación encontrada a partir de **tamaño de Insertos < 20 mm**.



Conclusiones / Retos y Trabajos futuros:

- La implementación de la **termografía infrarroja como técnica de inspección flexible y sin contacto** en procesos de fabricación y validación de estructuras de material compuesto, mejorando la calidad de los procesos y con ello aumentando las tasas productividad.
- Es necesaria la **validación de la TIR** cómo método de inspección en **procesos automatizables**.
- Desarrollo de **sistemas automatizados para inspección / monitorización** mediante TIR y aplicación de soluciones basadas en **Visión Artificial – Inteligencia Artificial – Realidad Aumentada**.



Contacto

Carlos Galleguillos Riobóo

Responsable de la Unidad de Ensayos y Procesos Avanzados
cgalleguillos@catec.aero

Dra. Marta Herrera García

Ingeniera Senior en la Unidad de Ensayos y Procesos Avanzados
mherrera@catec.aero

CATEC Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales

Parque Tecnológico y Aeronáutico de Andalucía

C/ Wilbur y Orville Wright 19 - 41309 La Rinconada, Sevilla

Teléfono: +34 954 179 002

www.catec.aero

www.atlascenter.aero



CATEC

Follow us!



www.catec.aero

www.atlascenter.aero

¡Gracias
por su atención!

