



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL + MÁSTER EN INDUSTRIA CONECTADA

TRABAJO FIN DE MÁSTER SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN DE INTRUSIONES BASADO EN CÁMARAS TÉRMICAS 360 Y POST- PROCESADO MEDIANTE MODELOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Autor: María Cinta Urgel Fernández

Director: Emilio Manuel Domínguez Adán

Madrid, julio 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“Sistema de identificación de intrusiones basado en cámaras térmicas 360 y post-procesado
mediante modelos de inteligencia artificial”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/2025 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: María Cinta Urgel Fernández

Fecha: 14/07/2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Emilio Manuel Domínguez Adán

Fecha: 14/07/2025



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL + MÁSTER EN INDUSTRIA CONECTADA

TRABAJO FIN DE MÁSTER SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN DE INTRUSIONES BASADO EN CÁMARAS TÉRMICAS 360 Y POST- PROCESADO MEDIANTE MODELOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Autor: María Cinta Urgel Fernández

Director: Emilio Manuel Domínguez Adán

Madrid, julio 2025

SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN DE INTRUSIONES BASADO EN CÁMARAS TÉRMICAS 360 Y POST-PROCESADO MEDIANTE MODELOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Autor: Urgel Fernández, María Cinta

Director: Domínguez Adán, Emilio Manuel

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo propone un innovador sistema de videovigilancia perimetral para instalaciones donde el perímetro sea extremadamente largo, fundamentalmente plantas solares fotovoltaicas, mediante la sustitución de cámaras térmicas fijas por térmicas de 360 grados y la aplicación del modelo de Inteligencia Artificial YOLOv11. Se logró una reducción del 70% en dispositivos y un ahorro del 65% en costes, mejorando la detección de intrusiones y minimizando las falsas alarmas.

Palabras clave: seguridad perimetral, cámaras térmicas, detección de intrusiones, inteligencia artificial, YOLOv11.

1. Introducción.

El presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) aborda la optimización de la seguridad perimetral en instalaciones, como plantas fotovoltaicas y subestaciones eléctricas. Los sistemas de videovigilancia tradicionales, basados en un alto número de cámaras térmicas fijas y domos con seguimiento manual, presentan limitaciones significativas, incluyendo una elevada susceptibilidad a falsas alarmas por fauna o factores ambientales, lo que sobrecarga al personal de seguridad y compromete la detección de intrusiones reales.

Este proyecto propone una solución innovadora mediante la integración de cámaras térmicas de 360 grados y un modelo de inteligencia artificial (IA) para la detección de intrusiones. La IA permitirá la detección inicial en amplias áreas con menos dispositivos, guiando a las cámaras domo para verificación y seguimiento automático.

2. Definición del proyecto.

El proyecto tiene como objetivo general mejorar la seguridad en las instalaciones mediante una solución innovadora que integre cámaras térmicas con visión de 360° y cámaras tipo domo. Los objetivos específicos incluyen: optimizar la cobertura perimetral reduciendo el número de dispositivos, minimizar falsas alarmas mediante IA, agilizar la respuesta con seguimiento automático del domo, disminuir costes e incrementar la fiabilidad del sistema de seguridad proporcionando alertas precisas.

3. Descripción del modelo/sistema/utilidad.

La solución integra cámaras térmicas de 360 grados InfiRay XSENTRY-UM619, [1], para detección de amplias áreas en cualquier condición de visibilidad, y cámaras tipo domo Hikvision DS-2DF9C435IH-DLW, [2], para verificación visual detallada y seguimiento autónomo. Ambas se comunican para el posicionamiento del domo ante una detección térmica.



Ilustración 1 – Cámara térmica 360° InfiRay y Domo HikVision

El componente de Inteligencia Artificial se propone con YOLOv11 para el post-procesado de video y la detección de intrusiones. El trabajo previo con YOLOv8 mostró limitaciones en robustez y fiabilidad, generando falsas alarmas. YOLOv11, [3], mejora la precisión (mAP) con menor consumo computacional y mayor velocidad de inferencia, permitiendo una discriminación más precisa entre intrusiones reales y falsos positivos (fauna, vegetación).

4. Resultados

Las simulaciones confirmaron que las cámaras térmicas 360 grados permiten una reducción del 70% en dispositivos necesarios (de 15 cámaras térmicas fijas a 4 de 360°) para cubrir el mismo perímetro. Esto se traduce en un ahorro global estimado del 65% en el sistema de videovigilancia térmica, incluyendo adquisición, instalación, cableado y mantenimiento. Además, se simplifica el despliegue y aumenta la fiabilidad.

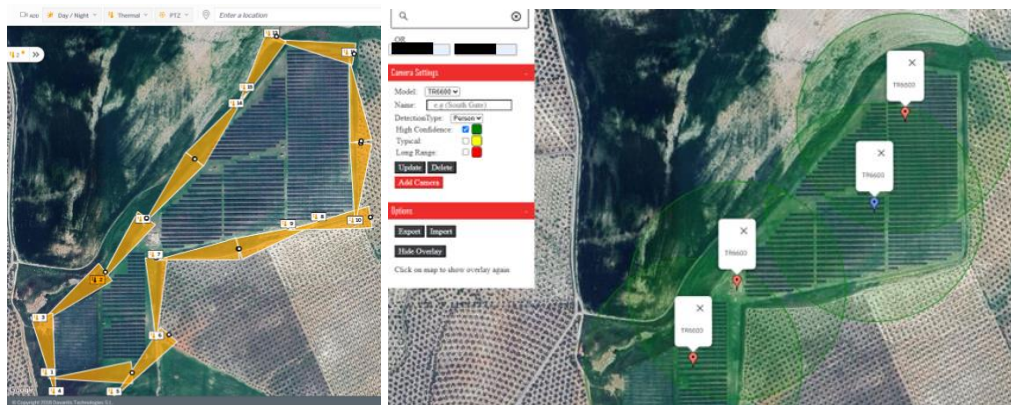


Ilustración 2 – Simulación con cámaras térmicas fijas y 360° para la misma instalación

5. Conclusiones

En conjunto, este proyecto establece un enfoque más eficiente, robusto y sostenible para la seguridad perimetral de instalaciones. La combinación de cámaras térmicas 360 grados y YOLOv11 mejora la precisión de detección, reduce falsas alarmas y agiliza la respuesta. Este avance optimiza recursos y eficiencia operativa, contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7 (Energía asequible y no contaminante), 9 (Industria, innovación e infraestructura) y 12 (Producción y consumo responsables), al proteger infraestructuras de energías renovables y fomentar un uso eficiente de recursos.

6. Referencias

- [1] Visiotech, «IRS-XSENTRY-UM619,» [En línea]. Available:
https://www.visiotechsecurity.com/en/products/ip-cctv-1/thermal-411/infray-774/irs-x Sentry-um619-detail#tab=prod_0. [Último acceso: 1 Junio 2025].
- [2] Hikvision, «9-inch 4 MP 35X DarkFighterX IR Network Speed Dome,» [En línea]. Available: <https://www.hikvision.com/my/products/IP-Products/PTZ-Cameras/Ultra-Series/DS-2DF9C435IH-DLW/>. [Último acceso: 4 Junio 2025]
- [3] Ultralytics, «YOLO11 vs YOLOv8: comparación detallada,» [En línea]. Available: <https://docs.ultralytics.com/es/compare/yolo11-vs-yolov8/>. [Último acceso: 6 Julio 2025].

INTRUSION IDENTIFICATION SYSTEM BASED ON 360 THERMAL CAMERAS AND POST-PROCESSING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE MODELS

Author: Urgel Fernández, María Cinta.

Supervisor: Domínguez Adán, Emilio Manuel.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This work proposes an innovative perimeter surveillance system for facilities where the perimeter is extremely long, mainly photovoltaic solar plants, proposing the replacement of fixed thermal cameras with 360-degree thermal cameras and the application of the YOLOv11 Artificial Intelligence model. A 70% reduction in devices and a 65% cost saving were achieved, improving intrusion detection and minimizing false alarms.

Keywords: Perimeter Security, Critical Infrastructure, Thermal Cameras, Intrusion Detection, Artificial Intelligence, YOLOv11.

1. Introduction

This Master's Thesis (TFM) addresses the optimization of perimeter security in critical facilities, such as photovoltaic plants and electrical substations. Traditional video surveillance systems, based on a high number of fixed thermal cameras and manual-tracking domes, present significant limitations, including a high susceptibility to false alarms caused by wildlife or environmental factors, which overloads security personnel and compromises the detection of real intrusions.

This project proposes an innovative solution through the integration of 360-degree thermal cameras and an Artificial Intelligence (AI) model for intrusion detection. AI will enable initial detection in wide areas with fewer devices, guiding dome cameras for verification and automatic tracking

2. Project Definition

The project's general objective is to improve security in critical facilities through an innovative solution that integrates 360° thermal cameras and dome-type cameras. Specific objectives include optimizing perimeter coverage by reducing the number of devices, minimizing false alarms through AI, streamlining response with automatic dome tracking, decreasing installation and maintenance costs, and increasing the reliability of the security system by providing precise alerts.

3. Description of the Model/System/Tool

The solution integrates 360-degree InfiRay XSENTRY-UM619 thermal cameras, [1], for wide-area detection in any visibility condition, and Hikvision DS-2DF9C435IH-

DLW dome-type cameras, [2], for detailed visual verification and autonomous tracking. Both communicate for dome positioning upon thermal detection.



Illustration 3 – 360° InfiRay Thermal Camera and HikVision Dome

The Artificial Intelligence component is proposed with YOLOv11 for video post-processing and intrusion detection. Previous work with YOLOv8 showed limitations in robustness and reliability, generating false alarms. YOLOv11, [3], improves accuracy (mAP) with lower computational consumption and faster inference speed, allowing for more precise discrimination between real intrusions and false positives (wildlife, vegetation).

4. Results

Simulations confirmed that 360-degree thermal cameras allow a 70% reduction in necessary devices (from 15 fixed thermal cameras to 4 of 360°) to cover the same perimeter. This translates into an estimated overall saving of 65% in the thermal video surveillance system, including acquisition, installation, cabling, and maintenance. Additionally, deployment is simplified, and reliability is increased.

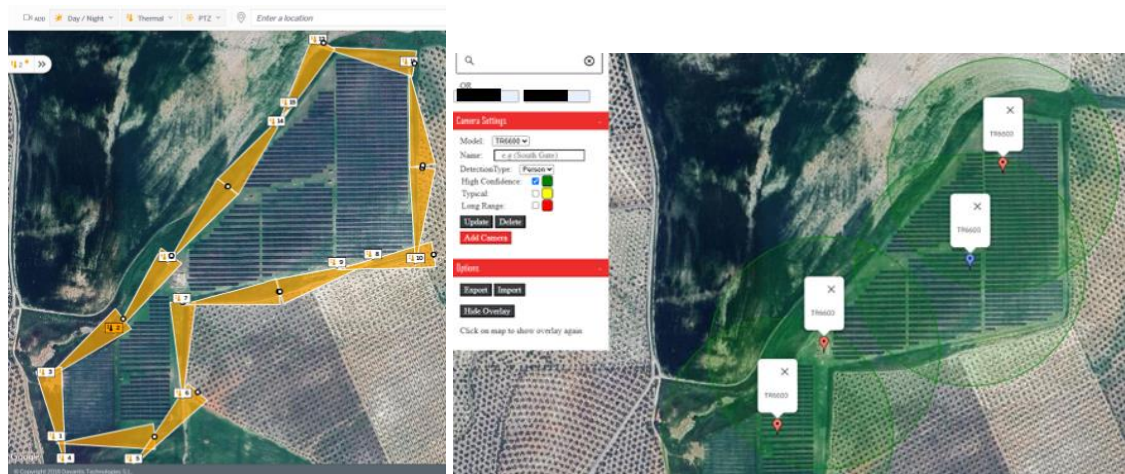


Illustration 4 – Simulation with fixed and 360° thermal cameras for the same installation

5. Conclusions

Overall, this project establishes a more efficient, robust, and sustainable approach to perimeter security for critical facilities. The combination of 360-degree thermal cameras and YOLOv11 improves detection accuracy, reduces false alarms, and speeds up response. This advance optimizes resources and operational efficiency, contributing to Sustainable Development Goals (SDGs) 7 (Affordable and Clean Energy), 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure), and 12 (Responsible Consumption and Production), by protecting renewable energy infrastructures and promoting efficient resource use.

6. References

- [1] Visiotech, «IRS-XSENTRY-UM619,» [En línea]. Available: https://www.visiotechsecurity.com/en/products/ip-cctv-1/thermal-411/infray-774/irs-xentry-um619-detail#tab=prod_0. [Último acceso: 1 Junio 2025].
- ^{7.}
[2] Hikvision, «9-inch 4 MP 35X DarkFighterX IR Network Speed Dome,» [En línea]. Available: <https://www.hikvision.com/my/products/IP-Products/PTZ-Cameras/Ultra-Series/DS-2DF9C435IH-DLW/>. [Último acceso: 4 Junio 2025]
- ^{8.}
[3] Ultralytics, «YOLO11 vs YOLOv8: comparación detallada,» [En línea]. Available: <https://docs.ultralytics.com/es/compare/yolo11-vs-yolov8/>. [Último acceso: 6 Julio 2025].

Índice de la memoria

<i>Índice de la memoria</i>	<i>I</i>
<i>Índice de figuras</i>	<i>I</i>
<i>Índice de tablas</i>	<i>III</i>
Capítulo 1. Introducción	4
1.1 Motivación del proyecto.....	5
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....	7
Capítulo 3. Estado de la Cuestión.....	8
Capítulo 4. Objetivos del Trabajo.....	9
Capítulo 5. Análisis de Cámaras Térmicas.....	11
5.1 Cámaras térmicas fijas.....	11
5.2 Cámaras térmicas 360°	15
5.3 Análisis económico	18
5.3.1 Estimación de necesidades de dispositivos por tecnología	18
5.3.2 Resultados	23
Capítulo 6. Análisis de Cámaras Tipo Domo	25
Capítulo 7. Integración Cámaras Térmicas 360° y Cámaras Domo	30
Capítulo 8. Inteligencia Artificial: Definición, orígenes y aplicación con imágenes....	32
8.1 Qué es la inteligencia artificial, evolución y tipos	32
8.2 Computer Vision	37
8.3 Utilidad de la IA en este trabajo	41
Capítulo 9. Desafíos y perspectivas futuras de la Inteligencia Artificial	42
9.1 Retos actuales en el desarrollo y la implementación de la IA	42
9.2 El horizonte de la IA	44

<i>Capítulo 10. Modelos de IA para Detección de Intrusiones</i>	<i>49</i>
10.1 Análisis del trabajo anterior: el modelo YOLOv8	49
10.2 Modelo de IA propuesto para la mejora de la detección	52
<i>Capítulo 11. Conclusiones y Futuros Pasos.....</i>	<i>57</i>
<i>Capítulo 12. Bibliografía.....</i>	<i>60</i>
<i>Anexo I: Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible</i>	<i>65</i>

Índice de figuras

Figura 1: Planta solar Esparragal I construida por Endesa de 47,5 MW. [1]	4
Figura 2: Videovigilancia por parte del personal de seguridad. [2]	6
Figura 3: Espectro electromagnético	12
Figura 4: Cámaras térmicas fijas Hikvision. Serie HeatPro (izquierda) y serie Bullet (derecha).....	13
Figura 5: Detección térmica de persona oculta tras árbol con cámara serie HeatPro	14
Figura 6: Detección en condiciones de baja luminosidad y detección de cruce de límite ..	14
Figura 7: Cámara térmica 360 IRS-XSENTRY-UM619 de InfiRay	16
Figura 8: Características de cámara térmica 360 de InfiRay	17
Figura 9: Simulación con cámaras térmicas fijas	19
Figura 10: Especificaciones de distancia de detección según nivel de confianza y tipo de detección de cámara TR6600 de Thermal Radar.....	20
Figura 11: Especificaciones de distancia de detección de la cámara térmica 360° de InfiRay	21
Figura 12: Simulación con cámaras térmica 360°	22
Figura 13: Capacidades de una cámara PTZ	25
Figura 14: Doble sensor (luz infrarroja y luz visible)	26
Figura 15: Comparativa de rendimiento entre diferentes cámaras	27
Figura 16: Integración térmica 360° con domo [Referencia propia].....	30
Figura 17: Simulación de la inteligencia humana.	32
Figura 18: Test de Turing de Alan Turing.....	33
Figura 19: Línea del tiempo de la evolución de la IA	34
Figura 20: Tipos de IA	35
Figura 21: Jerarquía de la IA	36
Figura 22: Esencia de Computer Vision.....	37
Figura 23: Fundamentos de Computer Vision.....	38
Figura 24: Fases en el análisis de imágenes en Computer Vision.....	39
Figura 25: Capacidades de Computer Vision	40

Figura 26: Desafíos de la IA.....	42
Figura 27: Futuro de la innovación de la IA (Imagen creada con IA).....	44
Figura 28: Generative AI.....	45
Figura 29: Ventajas de Edge AI	46
Figura 30: Diferencia entre IA débil e Inteligencia Artificial General, [29].....	47
Figura 31:Futuro colaborativo entre humanos e IA.....	48
Figura 32: Red neuronal convolucional (CNN)	50
Figura 33: Metricas de rendimiento de YOLOv11 y YOLOv8	54
Figura 34: Curva de rendimiento (mAP vs. Latencia) de YOLOv11 y YOLOv8.....	55
Figura 35: 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	65

Índice de tablas

Tabla 1: Ventajas económicas de cámaras térmicas 360° frente a fijas	23
Tabla 2: Comparación características cámaras serie DarkFighterX.....	28
Tabla 3: Diferencias entre YOLOv8 y YOLOv11	54

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la seguridad de las instalaciones, como plantas fotovoltaicas o subestaciones eléctricas (ver Figura 1), ha adquirido una importancia creciente debido a los riesgos inherentes a las intrusiones y los posibles daños a las infraestructuras. Las intrusiones no solo representan amenazas para la integridad física de los equipos, sino también para la seguridad de las personas que operan en estos lugares, pudiendo desencadenar accidentes, daños eléctricos o incidentes de mayor magnitud.



Figura 1: Planta solar Esparragal I construida por Endesa de 47,5 MW. [1]

Tradicionalmente, la vigilancia de estas instalaciones se ha basado en la instalación estratégica de cámaras térmicas fijas a lo largo del perímetro para la detección inicial de posibles intrusiones. Una vez que una amenaza era detectada por estas cámaras térmicas, cámaras tipo domo eran utilizadas para la verificación visual y el seguimiento manual de lo detectado. Sin embargo, esta configuración presenta limitaciones significativas, principalmente la necesidad de un elevado número de cámaras térmicas para asegurar una cobertura completa de perímetros extensos, así como una alta susceptibilidad a falsas

alarmas originadas por la detección de fauna u otros factores ambientales ajenos a intrusiones reales.

En este contexto, el presente trabajo propone una evolución en la estrategia de la vigilancia perimetral mediante la sustitución de las cámaras térmicas fijas por cámaras térmicas con visión de 360°. Esta aproximación busca optimizar la cobertura perimetral con un menor número de dispositivos, además de mejorar significativamente la gestión de alertas y reducir la incidencia de falsos positivos mediante el post-procesado de las imágenes obtenidas a través de modelos de Inteligencia Artificial. Adicionalmente, las cámaras domo mantendrán su función de seguimiento, pero ahora de dos formas: la autónoma con posicionamiento inicial y una nueva mejora añadiendo nuevas funciones inteligentes de seguimiento automático de personas y vehículos. Serán guiadas por las alertas generadas y procesadas por la inteligencia artificial aplicada a las imágenes de la cámara térmica de 360°, optimizando así el uso de recursos humanos y la eficiencia de la respuesta.

Esta solución representa un avance en la seguridad de este tipo de instalaciones, focalizándonos en los parques solares fotovoltaicos, prometiendo una mayor eficiencia en la cobertura, menores costes de inversión y de mantenimiento, además de una reducción considerable de falsas alarmas y una capacidad de respuesta automatizada y más precisa ante amenazas reales.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La principal motivación de este proyecto radica en la necesidad de optimizar la eficiencia de la vigilancia en instalaciones cada vez más grandes, en terrenos con amplios desniveles y de difícil acceso y susceptibles a diversos incidentes de difícil previsión, relacionados con la actividad humana o de la propia fauna existente.

Actualmente, el sistema de vigilancia basado en cámaras termográficas presenta una serie de limitaciones que hacen que el proceso de monitoreo sea ineficaz. La dependencia de la revisión manual de numerosas alertas, muchas de ellas generadas por causas irrelevantes como la fauna, además de la necesidad de un gran número de dispositivos instalados en campo, provoca una sobrecarga de trabajo para el personal de seguridad tanto en las tareas operativas como de mantenimiento. Esta situación no solo reduce la productividad, sino que también aumenta el riesgo de que intrusiones reales pasen desapercibidas debido a la gran cantidad de falsos positivos.

La implementación de cámaras térmicas con visión de 360°, combinadas con cámaras tipo domo, ofrece una mejora sustancial. Esta estrategia permitirá una cobertura perimetral más amplia con un menor número de dispositivos y reducirá significativamente las falsas alarmas mediante el post-procesado con inteligencia artificial. Esto facilitará que el personal de seguridad se centre en amenazas reales, Figura 2, optimizando los recursos y disminuyendo la posibilidad de errores al descartar alertas genuinas. En consecuencia, la mejora en la capacidad de respuesta ante intrusiones reales contribuirá a una protección más efectiva de las instalaciones y a la reducción del riesgo de daños.

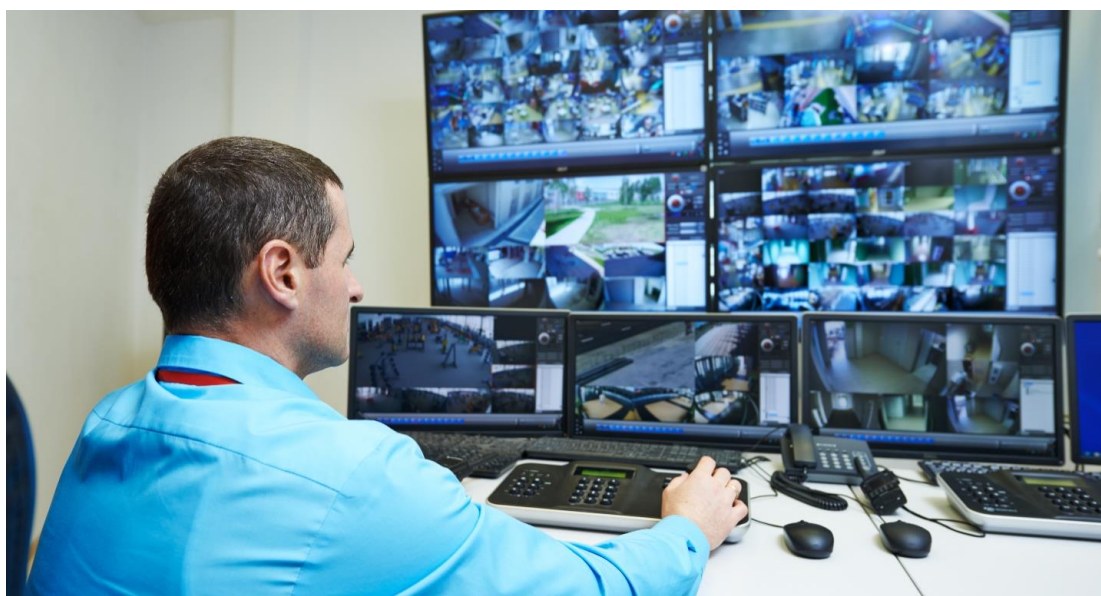


Figura 2: Videovigilancia por parte del personal de seguridad. [2]

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

La vigilancia de instalaciones ha empleado diversas tecnologías de captación de imágenes, incluyendo cámaras térmicas fijas y cámaras tipo domo. En este trabajo, se estudiarán las prestaciones de estas tecnologías, junto con las de las cámaras térmicas de 360 grados, que constituyen la base de la solución propuesta. El objetivo de este análisis es identificar las mejoras en eficiencia y cobertura que ofrece la implementación de cámaras térmicas de 360 grados en comparación con los sistemas convencionales. Las características y funcionalidades específicas de cada una de estas tecnologías (cámaras térmicas fijas, cámaras tipo domo y cámaras térmicas 360 grados) serán detalladas en capítulos posteriores.

El procesamiento de los videos procedentes de las cámaras térmicas de 360 grados se realizará mediante la propuesta de un modelo de Inteligencia Artificial específico para la detección de intrusiones. Para ello, se propondrá el modelo YOLOv11, una arquitectura de detección de objetos basada en aprendizaje profundo, como la solución principal. El objetivo final es tener un modelo robusto y eficiente, capaz de analizar las transmisiones de video en tiempo real de la cámara 360 grados para detectar intrusiones de manera precisa y reducir significativamente la tasa de falsos positivos.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

El uso de cámaras termográficas ha sido una solución ampliamente adoptada en la vigilancia perimetral. Sin embargo, las cámaras termográficas utilizadas, cámaras térmicas fijas, presentan varios desafíos:

- Cobertura limitada: su campo de visión restringido exige la instalación de múltiples unidades para cubrir la totalidad del perímetro de una instalación, lo que incrementa considerablemente los costes de adquisición, despliegue y mantenimiento, así como la complejidad general del sistema.
- Alta tasa de falsas alarmas: son susceptibles a generar un elevado número de detecciones erróneas, activando alertas ante movimientos no relevantes, como la presencia de fauna o cambios ambientales. Este volumen excesivo de alertas no solo incrementa la carga de trabajo del personal de seguridad, sino que, de manera crítica, eleva el riesgo de que intrusiones reales pasen inadvertidas en medio del ruido de falsos positivos.

En los últimos años, la tecnología avanza hacia soluciones integrales. Las cámaras térmicas de 360° superan la cobertura limitada con menos dispositivos y menores costes. Además, la alta tasa de falsas alarmas se busca mitigar aplicando modelos de IA avanzada a las imágenes de las cámaras de 360° para distinguir mejor las amenazas reales, optimizando alertas y reduciendo falsos positivos.

Capítulo 4. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El proyecto tiene como objetivo general mejorar la seguridad en las instalaciones mediante la implementación de una solución innovadora que integre cámaras térmicas con visión de 360° y cámaras tipo domo.

Los objetivos específicos son:

1. Optimizar la cobertura perimetral reduciendo el número de dispositivos: La adopción de cámaras térmicas de 360°, con su amplio campo de visión y mayor alcance, permitirá cubrir la totalidad del perímetro de las instalaciones con una menor cantidad de unidades en comparación con los sistemas actuales.
2. Minimizar el número de falsas alarmas: La implementación de cámaras térmicas de 360°, junto con la aplicación de modelos avanzados de análisis de imágenes a sus imágenes, se espera que filtre de manera más efectiva las alertas irrelevantes, lo que permitirá al personal de seguridad concentrarse en intrusiones reales, optimizando su tiempo y esfuerzo dedicados a revisar alarmas innecesarias.
3. Agilizar la respuesta ante intrusiones reales: Ante la detección de una posible intrusión por la cámara de 360°, el sistema activará automáticamente la cámara tipo domo en la ubicación precisa del evento. Anteriormente, la cámara térmica posicionaba el domo, pero el seguimiento se realizaba de forma manual. Ahora, con la implementación de nuevos domos, no solo se dirigen automáticamente al punto de detección, sino que también realizan el seguimiento de la amenaza de manera autónoma. Esto facilitará una identificación rápida y mejorará significativamente la capacidad de los operadores para tomar decisiones de respuesta inmediatas.
4. Disminuir los costes de instalación y mantenimiento: La reducción en el número de cámaras necesarias para la cobertura perimetral conllevará una disminución directa

en los gastos asociados a la instalación y el mantenimiento de los dispositivos de vigilancia.

5. Incrementar la fiabilidad del sistema de seguridad: Se busca implementar un sistema de vigilancia más robusto y preciso, proporcionando alertas fiables. Para ello, se desarrollará un modelo de análisis que procesará las imágenes capturadas por las cámaras térmicas de 360°, facilitando la identificación de eventos relevantes y reduciendo falsos positivos.

Capítulo 5. ANÁLISIS DE CÁMARAS TÉRMICAS

En el contexto del presente proyecto, las cámaras térmicas se emplean como dispositivo fundamental para la detección de intrusiones en las instalaciones. Su función principal es alertar sobre la presencia de intrusiones, permitiendo que cámaras PTZ (o domo) se posicionen y realicen el seguimiento detallado de la situación.

En este apartado, se llevará a cabo un análisis comparativo de las prestaciones y ventajas inherentes a dos tipologías de cámaras térmicas relevantes para esta aplicación: las cámaras fijas y las cámaras 360°. La exploración de las cámaras térmicas 360° responde al objetivo de optimizar la cobertura perimetral para la detección de intrusiones, buscando reducir el número de dispositivos necesarios, así como los costes de instalación y mantenimiento.

5.1 CÁMARAS TÉRMICAS FIJAS

Hasta el momento, la detección de intrusiones se ha basado en el uso de cámaras térmicas fijas. Para esta primera tipología, se analizarán algunas soluciones de la marca Hikvision, [3], la cual ofrece cámaras térmicas de seguridad diseñadas para superar desafíos habituales en la protección perimetral, tales como la limitada visibilidad en condiciones de poca luz o meteorología adversa, y las falsas alarmas.

Para abordar los desafíos de la limitada visibilidad, ya sea por la falta de luz o por inclemencias meteorológicas, la solución que ofrecen las cámaras térmicas de Hikvision se basa en su principio fundamental de funcionamiento: la detección de la radiación térmica en lugar de la luz visible. Las cámaras térmicas detectan la energía infrarroja que todos los objetos emiten debido a su temperatura, [4]. Esta radiación infrarroja se encuentra en una porción diferente del espectro electromagnético, más allá del rango que el ojo humano puede ver, Figura 3. Al medir con precisión estas variaciones de calor, las cámaras térmicas pueden

crear imágenes detalladas del entorno, incluso en la oscuridad total, a través del humo o la niebla, o con fuerte contraluz. Esta tecnología les permite generar imágenes nítidas en escenarios donde las cámaras tradicionales tendrían dificultades.

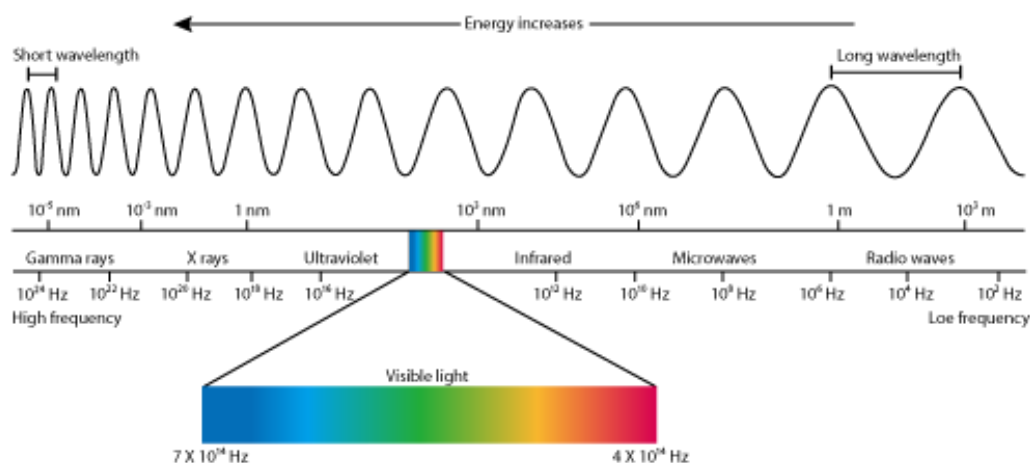


Figura 3: Espectro electromagnético

Además, estas cámaras utilizan la tecnología de fusión bi-espectro (Bi-Spectrum Image Fusion), la cual combina la información térmica capturada con los detalles visuales obtenidos por un sensor óptico. Esto da como resultado un enriquecimiento significativo de la información, facilitando la identificación y verificación de elementos presentes en la escena.

Para mitigar el problema de las falsas alarmas, las cámaras térmicas de Hikvision incorporan sistemas de alarma de alta precisión. Estos sistemas utilizan algoritmos avanzados, a menudo basados en aprendizaje profundo y procesamiento mediante unidades GPU integradas, para analizar las imágenes térmicas. Esto les permite discriminar de manera más efectiva entre amenazas reales, como personas o vehículos, y otros elementos que podrían desencadenar alarmas innecesarias, como animales, movimiento de vegetación o cambios ambientales. Como resultado, se reduce significativamente la ocurrencia de alertas no deseadas, optimizando la eficiencia de los sistemas de seguridad perimetral.

En el catálogo de productos de estas cámaras térmicas fijas, destacan las series HeatPro y Bullet, Figura 4.

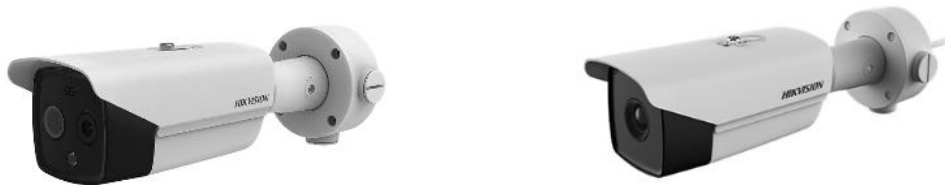


Figura 4: Cámaras térmicas fijas Hikvision. Serie HeatPro (izquierda) y serie Bullet (derecha).

La primera serie, [5], está especialmente recomendada para la protección perimetral y la detección de incendios, mientras que la serie Bullet, [6], es ampliamente utilizada en infraestructuras. Por lo tanto, ambas series se presentan como opciones potencialmente valiosas para la protección perimetral de nuestras instalaciones, el caso de aplicación que nos ocupa.

En la Figura 5, podemos observar cómo la cámara HeatPro, gracias a su tecnología térmica, identifica claramente a una persona oculta tras un árbol; a diferencia de la imagen de la cámara convencional donde, aunque se aplicara un algoritmo de detección avanzado, sería complicado detectarla debido a que apenas se distingue. Así mismo, en la Figura 6, se ilustra la capacidad de la cámara térmica HeatPro para detectar a una persona saliendo de un vehículo en condiciones de muy baja luminosidad e identificar el momento en que la persona cruza un límite predefinido.

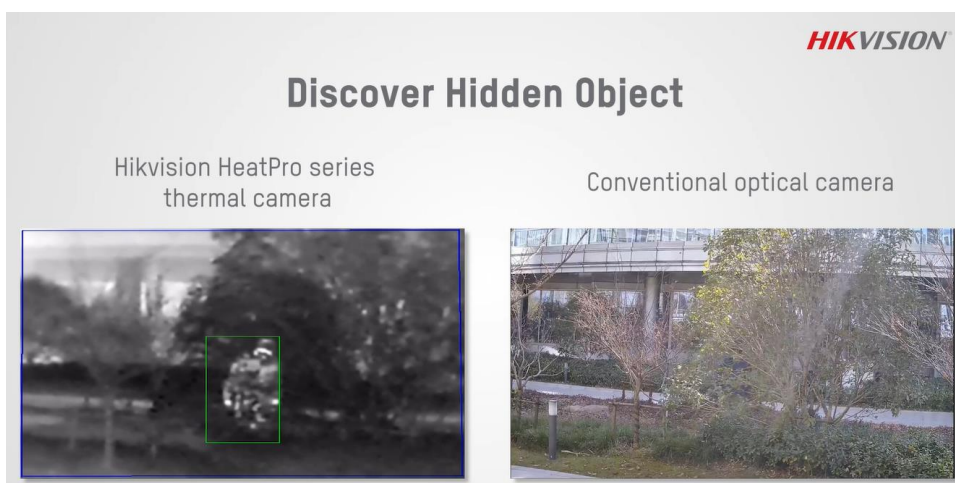


Figura 5: Detección térmica de persona oculta tras árbol con cámara serie HeatPro

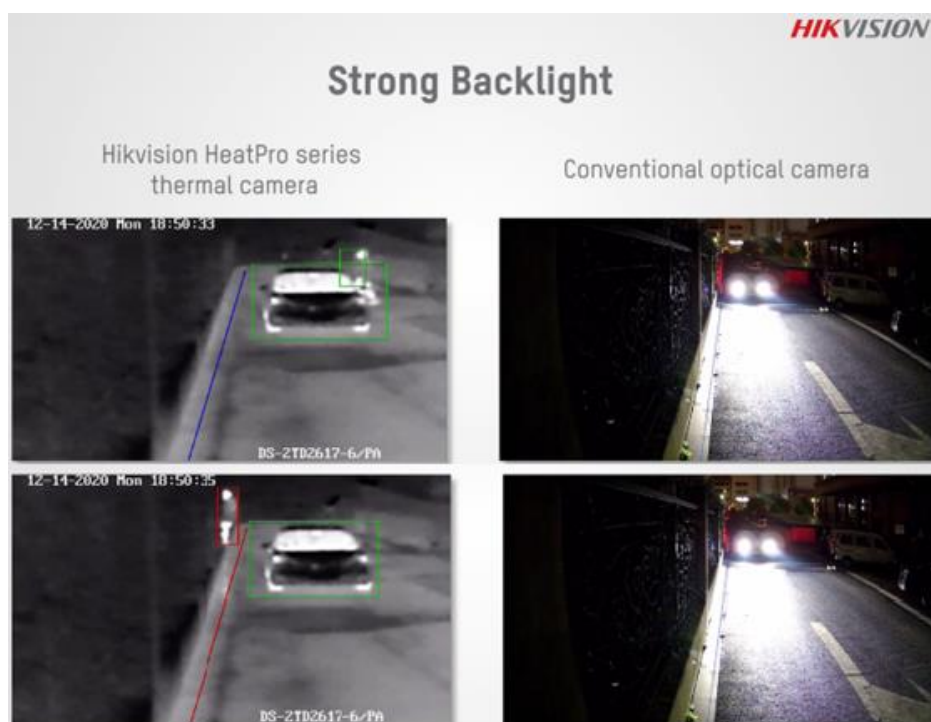


Figura 6: Detección en condiciones de baja luminosidad y detección de cruce de límite

Si bien las cámaras térmicas fijas presentan las ventajas previamente mencionadas, su despliegue para cubrir perímetros extensos conlleva el inconveniente de requerir un número elevado de dispositivos. Esto se traduce en un incremento en los costes de adquisición e instalación, así como en una mayor complejidad en la gestión y monitorización del sistema. Para optimizar la cobertura perimetral reduciendo la cantidad de dispositivos necesarios, se explora la solución de las cámaras térmicas de 360°.

5.2 CÁMARAS TÉRMICAS 360°

Como se acaba de mencionar en la sección anterior, la utilización de cámaras térmicas fijas para la protección de perímetros extensos presenta el desafío de requerir un despliegue numeroso de dispositivos, con las consiguientes complicaciones. Para optimizar la eficiencia en la cobertura perimetral, las cámaras térmicas de 360° ofrecen la ventaja de cubrir áreas mucho mayores con una menor cantidad de unidades.

Se han estado investigando distintas opciones para la térmica 360° en la página de Visiotech. Visiotech, [7], es una empresa europea líder en la distribución de equipamiento tecnológico de seguridad, con una amplia experiencia como mayorista en videovigilancia y otros sistemas. Su enfoque en la innovación y la oferta de soluciones avanzadas los convierte en un referente en el sector.

Se encontraron dos soluciones posibles para cámaras térmicas 360 de InfiRay y Raythink: los modelos XSENTRY-UM e RP-SILENTW-UM625 ([8]) respectivamente. Tras analizar las diferencias entre ellas, se observó que, si bien son muy similares, la solución de InfiRay presenta ciertas ventajas. Específicamente, la cámara InfiRay ofrece una velocidad de escaneo tanto de 360 como de 180 grados más rápida y proporciona una interfaz de datos más versátil al incluir la opción de Power over Ethernet (POE), además de DC24V. Por estas razones, se ha considerado que la solución de InfiRay es la opción preferible.

La cámara InfiRay XSENTRY, [9], es adecuada para vigilancia perimetral gracias a su detector no refrigerado de 640x512 de resolución, que ofrece imágenes térmicas detalladas para detectar intrusiones. Genera panorámicas de alta resolución (hasta 13000x512) para una amplia cobertura, y sus velocidades de escaneo de hasta 0.79Hz (360 grados) y 1.58Hz (180 grados) permiten una detección rápida de movimientos. Ofrece distancias focales de 13mm, 19mm y 25mm, que varían el campo de visión y el alcance; la mayor distancia focal permite detectar personas hasta 750m y vehículos hasta 1500m. Además, su rango de temperatura de -40°C a $+60^{\circ}\text{C}$ y la protección IP66 aseguran un funcionamiento confiable en exteriores.



Figura 7: Cámara térmica 360 IRS-XSENTRY-UM619 de InfiRay

Las características destacadas se muestran en la Figura 8. Entre ellas, la cámara InfiRay XSENTRY destaca por su Inteligencia Artificial, diseñada para reducir significativamente las falsas alarmas, lo cual es crucial para una detección precisa en la vigilancia perimetral. Además, su capacidad de vinculación inteligente con cámaras PTZ (o domo) permite un seguimiento detallado y automatizado de las intrusiones detectadas, optimizando la respuesta de seguridad. Otras características relevantes incluyen su panorama visualizado de

360° para una cobertura completa, su adaptabilidad a entornos hostiles y su calidad de imagen.



Figura 8: Características de cámara térmica 360 de InfiRay

En resumen, la cámara InfiRay XSENTRY ofrece una alternativa prometedora a las cámaras térmicas fijas en aplicaciones de protección perimetral. Mantiene prestaciones clave de las cámaras térmicas fijas, pero con la ventaja añadida de su vista panorámica de 360°. Esto permite reducir significativamente la cantidad de dispositivos necesarios para cubrir grandes áreas, mejorando la eficiencia y reduciendo la complejidad del sistema.

5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

Uno de los objetivos de este proyecto es demostrar que la implementación de cámaras térmicas 360° permite optimizar la cobertura perimetral mediante una reducción sustancial en el número de dispositivos necesarios. Esta simplificación del sistema no solo mejora su eficiencia operativa, sino que también tiene un efecto directo sobre los costes del proyecto.

Desde una perspectiva económica, contar con menos unidades implica una disminución relevante en los costes de adquisición, instalación, infraestructura auxiliar (cableado, puntos de alimentación, anclajes) y mantenimiento. En este sentido, el análisis económico busca cuantificar ese ahorro derivado del rediseño del sistema de vigilancia, reforzando así la viabilidad de la transición tecnológica propuesta desde cámaras térmicas fijas hacia cámaras térmicas 360°.

5.3.1 ESTIMACIÓN DE NECESIDADES DE DISPOSITIVOS POR TECNOLOGÍA

Para estimar el número de cámaras necesarias en cada escenario (fijas vs. 360°), se han empleado dos herramientas de simulación que permiten representar gráficamente el alcance de diferentes modelos de cámaras térmicas sobre el mapa del perímetro a vigilar. Estas herramientas permiten ajustar diferentes parámetros que facilitan una planificación realista.

La primera herramienta utilizada ha sido la plataforma de diseño proporcionada por la empresa Davantis (ver referencia [10]), ampliamente utilizada en el sector para evaluar configuraciones de videovigilancia perimetral. Aunque está orientada principalmente a cámaras térmicas fijas, también ofrece soporte para cámaras PTZ. Su principal ventaja es la posibilidad de seleccionar modelos específicos de cámaras térmicas directamente desde un catálogo que incluye fabricantes reconocidos como Hikvision, Uniview, ThermTec o InfiRay, entre otros.

Para este proyecto, se ha trabajado con el modelo DS-2TD2637-25/P Bi-spectrum, de la serie Bullet de Hikvision, serie previamente mencionada en este documento. La Figura 9 muestra una simulación del alcance de este modelo sobre una planta fotovoltaica, empleada como caso de estudio. En dicha imagen se observa que, para lograr una cobertura perimetral completa, sería necesaria la instalación de quince cámaras térmicas fijas.

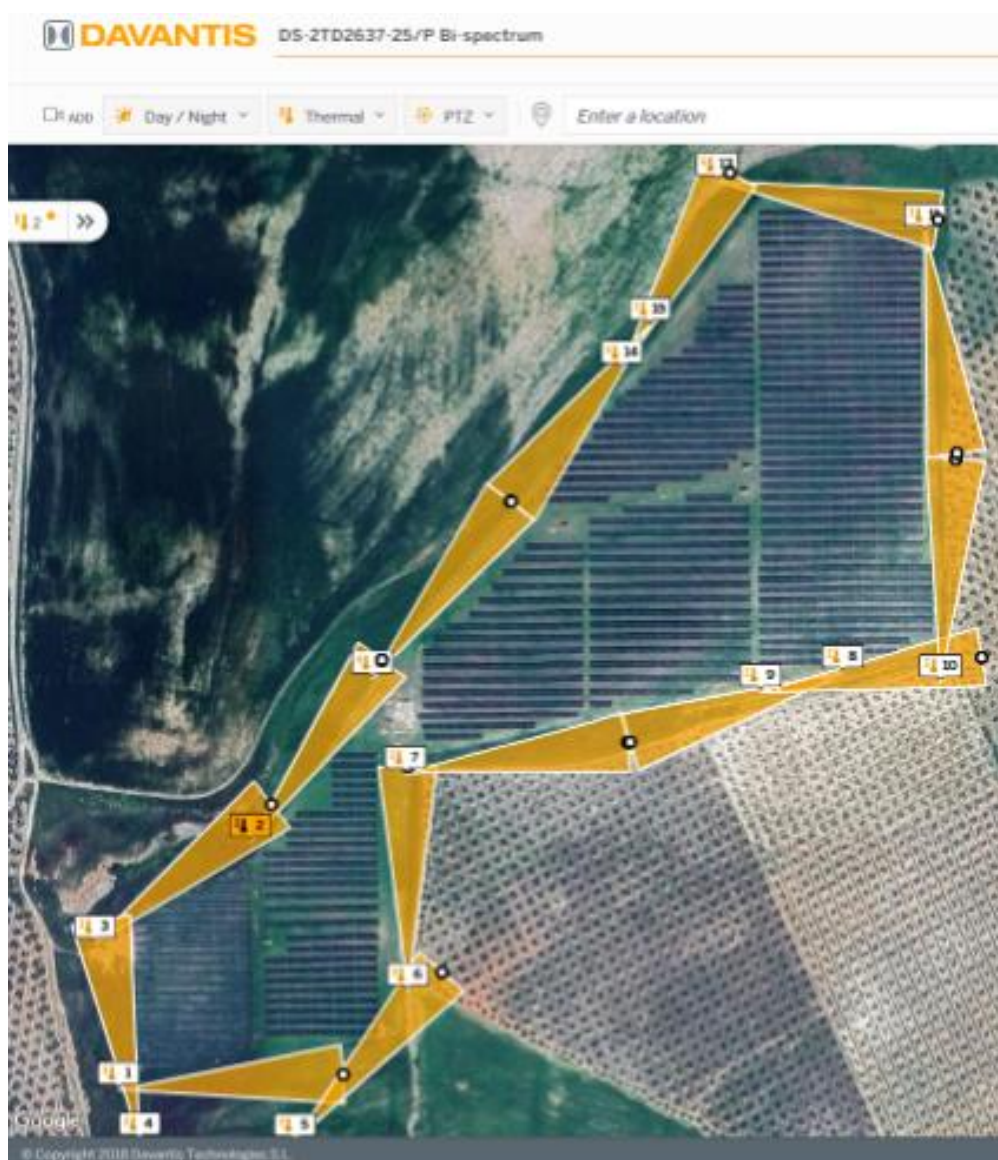


Figura 9: Simulación con cámaras térmicas fijas

En la parte superior de la interfaz se encuentran los menús desplegables que permiten seleccionar el fabricante y modelo de cámara (ver Figura 9). Una vez elegida una cámara concreta, sus propiedades - como altura de instalación, ángulo de rotación o máxima distancia - pueden configurarse haciendo clic sobre su icono en el plano. Como ejemplo, la cámara número 2 aparece resaltada en color naranja al estar seleccionada; en el margen izquierdo puede verse el icono del menú de configuración, aunque no se muestra desplegado en la imagen.

La segunda herramienta empleada ha sido la plataforma de simulación proporcionada por Thermal Radar, especializada en soluciones de videovigilancia térmica 360°. Esta herramienta permite modelar el comportamiento de distintas cámaras panorámicas configurando múltiples parámetros operativos, como el modelo de cámara, el tipo de detección (persona, vehículo o incendio) y el nivel de confianza (alto, típico o largo alcance). Cabe señalar que, cuanto menor es el nivel de confianza seleccionado, mayor es el alcance teórico estimado por la herramienta, Figura 10.

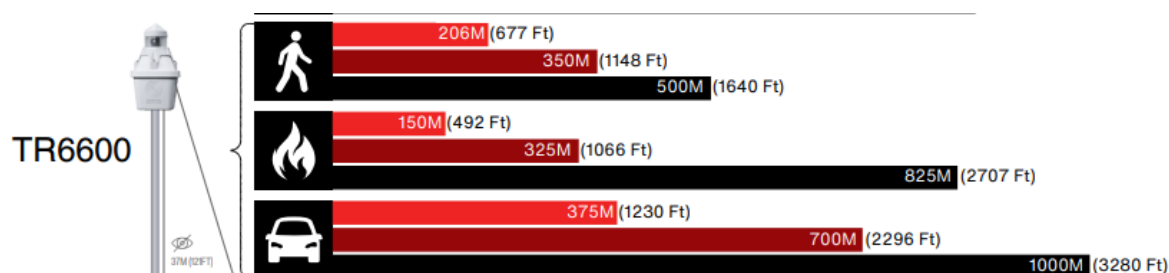


Figura 10: Especificaciones de distancia de detección según nivel de confianza y tipo de detección de cámara TR6600 de Thermal Radar

Aunque en este proyecto se ha seleccionado una cámara térmica 360° de InfiRay, se ha optado por utilizar la herramienta de Thermal Radar como referencia indirecta, [11], dado que InfiRay no dispone actualmente de una herramienta de simulación equivalente. No obstante, las cámaras de Thermal Radar presentan prestaciones similares, lo que permite realizar una estimación válida del número de dispositivos necesarios.

En concreto, se ha simulado el modelo TR6600, configurado para la detección de personas con un alto nivel de fiabilidad. Bajo esta configuración, la herramienta estima un alcance efectivo de 206 metros (Figura 10), valor inferior al ofrecido por el modelo de InfiRay previsto, cuyo alcance con la lente de menores prestaciones es de 400 metros para personas y 800 metros para vehículos, Figura 11. Por tanto, los resultados obtenidos con esta simulación incorporan un margen de seguridad añadido, al estar basados en un equipo con menor capacidad de detección que el realmente previsto en el diseño.

Product type		XSENTRY-UM613	XSENTRY-UM619	XSENTRY-UM625
Detecting distance	People (1.7m)	400m	600m	750m
	Vehicle (4m)	800m	1200m	1500m

Figura 11: Especificaciones de distancia de detección de la cámara térmica 360° de InfiRay

Aplicando esta configuración sobre el mismo perímetro analizado en la herramienta anterior, se ha determinado que únicamente serían necesarias cuatro cámaras térmicas 360° para cubrir toda la extensión de la planta fotovoltaica, como se muestra en la Figura 12, frente a las quince cámaras fijas requeridas en el escenario anterior.



Figura 12: Simulación con cámaras térmica 360°

5.3.2 RESULTADOS

A continuación, en la Tabla 1, se presenta un resumen de las principales ventajas de la implementación de cámaras térmicas 360° frente a las fijas.

Característica	Térmicas fijas	Térmicas 360°	Beneficio Directo
Número de dispositivos	15	4	Reducción del 70% en equipos instalados
Coste global del sistema de videovigilancia	Más elevado	Menor coste global	Ahorro estimado del 65% (incluye adquisición, instalación, cableado, alimentación, y mantenimiento)
Complejidad del despliegue	Mayor	Menor	Reducción de horas de trabajo, personal técnico y materiales auxiliares
Fiabilidad del sistema	Menor	Mayor	Menores costes de mantenimiento correctivo y piezas de repuesto
Cobertura	Posibles solapamientos ineficientes	Continua y optimizada	Uso eficiente de recursos, evitando sobredimensionamiento

Tabla 1: Ventajas económicas de cámaras térmicas 360° frente a fijas

A partir de los resultados obtenidos mediante las herramientas de simulación, se ha confirmado que la implementación de cámaras térmicas panorámicas de 360° permite una reducción significativa en el número total de dispositivos necesarios para cubrir el perímetro. En el caso analizado, el sistema pasa de requerir quince cámaras térmicas fijas a tan solo cuatro cámaras térmicas 360°, lo que supone una reducción aproximada del 70% en la cantidad de equipos instalados.

Esta drástica disminución en el número de dispositivos tiene un impacto económico directo y favorable. Aunque el coste unitario de una cámara 360° es más elevado que el de una cámara fija, la consolidación del sistema genera un ahorro global estimado del 65% en el sistema de videovigilancia térmica. Este cálculo se ha realizado utilizando precios de mercado actuales, e incluye no solo el coste de adquisición de los equipos, sino también los gastos asociados a instalación, cableado, canalizaciones, puntos de alimentación, elementos estructurales y mantenimiento periódico.

Además del ahorro directo, la reducción de dispositivos aporta beneficios operativos que también se traducen en ventajas económicas:

- Simplificación del despliegue: Menos puntos de instalación implican una disminución de las horas de trabajo, del personal técnico necesario y de los materiales auxiliares, reduciendo así los costes asociados a la puesta en marcha del sistema.
- Mayor fiabilidad del sistema: Un sistema con menos componentes presenta menor riesgo de fallos, lo que se traduce en una reducción de costes por mantenimiento correctivo, piezas de repuesto y desplazamientos técnicos a lo largo del ciclo de vida del sistema.
- Cobertura continua sin solapamientos ineficientes: Al maximizar el campo de visión de cada cámara y eliminar redundancias, se optimiza el uso de recursos y se evita el sobredimensionamiento del sistema, reduciendo inversiones innecesarias.

En conjunto, estos factores refuerzan la viabilidad económica, técnica y operativa del sistema basado en cámaras térmicas 360°. La solución no solo cumple con el objetivo de reducir costes de instalación y mantenimiento, sino que además aporta un enfoque más eficiente, robusto y sostenible para instalaciones como la analizada en este estudio.

Capítulo 6. ANÁLISIS DE CÁMARAS TIPO DOMO

Una vez que la cámara térmica 360° ha detectado una posible intrusión, el siguiente paso en nuestro sistema de seguridad es obtener una visión detallada del evento. Esta tarea recae en las cámaras PTZ (Pan-Tilt-Zoom), también conocidas como cámaras tipo domo.

Mientras que el enfoque principal de las cámaras térmicas radica en la identificación de variaciones térmicas para la detección de intrusiones, las cámaras domo se encargarán de proporcionarnos una imagen visual clara y detallada de la escena. Específicamente, la cámara domo se posicionará automáticamente en la ubicación donde la cámara térmica ha detectado la posible intrusión.

La cámara domo, a diferencia de la estática cámara térmica en nuestro sistema, se caracteriza por su funcionalidad PTZ: Pan (movimiento horizontal), Tilt (movimiento vertical) y Zoom (acercamiento/alejamiento). Estas capacidades de movimiento, representadas en la Figura 13, le otorgan una gran flexibilidad para realizar barridos panorámicos, ajustes de ángulo vertical y acercamientos. Esto nos permite realizar un seguimiento preciso de la intrusión y obtener imágenes claras y detalladas, cruciales para una evaluación completa de la situación, especialmente en escenarios donde la información visual es esencial.

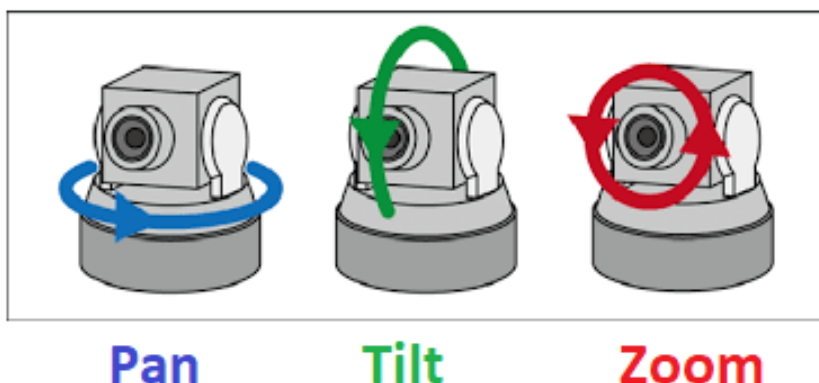


Figura 13: Capacidades de una cámara PTZ

Si bien en la sección Cámaras térmicas 360° seleccionamos una opción de InfiRay, la lógica inicial nos llevaría a considerar un domo de la misma marca para asegurar una buena integración entre los dispositivos. Sin embargo, InfiRay no ofrece una solución que se ajuste a nuestros requerimientos específicos para esta aplicación. Por este motivo, hemos explorado otras alternativas que puedan integrarse eficazmente con la cámara térmica 360° seleccionada.

Dentro de las diversas opciones que se han considerado, se centrará el análisis en una serie de la empresa Hikvision, [12], especializada en soluciones de videovigilancia de alto rendimiento. Concretamente, exploraremos la serie DarkFighterX, la cual destaca por su capacidad para ofrecer imágenes de gran calidad en entornos con escasa iluminación.

La tecnología DarkFighterX de Hikvision, [13], se basa en un concepto innovador de doble sensor, inspirado en el procesamiento de color y brillo del ojo humano. Este sistema, diseñado con una sola lente para ambos tipos de luz, utiliza un sensor especializado en la captación de luz infrarroja (IR) para asegurar la claridad de la imagen, mientras que un segundo sensor se dedica a capturar la luz visible, lo que garantiza la riqueza de los colores, Figura 14.

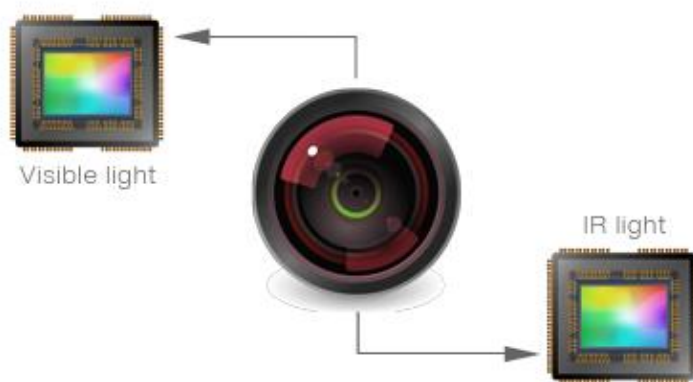


Figura 14: Doble sensor (luz infrarroja y luz visible)

Ambos conjuntos de datos se combinan mediante la tecnología de fusión de imágenes bi-espectrum, la cual integra la información de luz visible e infrarroja. El resultado de este proceso son imágenes a color que destacan por su luminosidad y nitidez, incluso en situaciones de iluminación extremadamente reducida. En la Figura 15, se puede apreciar la mejora en la calidad de imagen y la reproducción del color que ofrece la tecnología DarkFighterX en comparación con las cámaras convencionales y la serie DarkFighter original en condiciones de baja luminosidad.



Figura 15: Comparativa de rendimiento entre diferentes cámaras

Para este análisis, hemos seleccionado dos modelos de domos PTZ de la serie DarkFighterX de Hikvision: el DS-2DF9C435IH-DLW y el DS-2DF8225IH-AEL, cuyas hojas de características se pueden encontrar en las referencias [14] y [15] respectivamente. A continuación, se presenta en la Tabla 2 la comparativa con las características más relevantes para nuestra aplicación.

	DS-2DF9C435IH-DLW	DS-2DF8225IH-AEL
		
Resolución máxima	2688 × 1512 - 4MP	1920 × 1080 - 2 MP
Iluminación mínima	Color: 0.0005 lux B/W: 0.0001 lux 0 lux con IR	Color: 0.0004 lux B/W: 0.0001 lux 0 lux con IR
Alcance infrarrojo	Hasta 500 m	Hasta 200 m
Protección IP	IP67	IP66
Zoom	x35	x25

Tabla 2: Comparación características cámaras serie DarkFighterX

Para la vigilancia de seguridad en instalaciones como plantas fotovoltaicas, donde el radio de funcionamiento y la capacidad de operación con poca luz son parámetros determinantes, el modelo DS-2DF9C435IH-DLW se posiciona como la mejor elección por varias razones.

En primer lugar, su alcance infrarrojo de hasta 500 metros resulta crucial, ya que permite una cobertura de vigilancia mucho más amplia en la oscuridad como es el caso de por la noche en comparación con los 200 metros del otro modelo. Esta mayor distancia se traduce directamente en un menor número de cámaras necesarias para cubrir una misma área

extensa, lo que es especialmente relevante en instalaciones de gran tamaño como las plantas fotovoltaicas.

En segundo lugar, en cuanto a la capacidad de operación con poca luz, exhibe una sensibilidad superior con una iluminación mínima en color de 0.0005 lux, frente a los 0.001 lux de DS-2DF8225IH-AEL. Esta mayor sensibilidad permite que la cámara capte imágenes a color de mejor calidad en condiciones de luz muy tenue antes de recurrir al modo monocromático (B/W) o al IR.

Además, el zoom óptico de 35x proporciona una capacidad de acercamiento significativamente mayor, lo que es vital para identificar detalles de la intrusión a largas distancias. La resolución superior de 4 MP también contribuirá a una mayor nitidez en las imágenes capturadas.

Capítulo 7. INTEGRACIÓN CÁMARAS TÉRMICAS

360° Y CÁMARAS DOMO

En el caso de aplicación, la unión de la cámara térmica 360° InfiRay XSENTRY y la cámara tipo domo Hikvision DS-2DF9C435IH-DLW crea una solución de vigilancia robusta y complementaria. Mientras que la cámara térmica se encarga de la detección inicial de posibles intrusiones en un amplio perímetro, gracias a su capacidad de escaneo térmico, la cámara domo complementa esta función al proporcionar la verificación visual y el seguimiento detallado del evento.



Figura 16: Integración térmica 360° con domo [Referencia propia]

La integración entre ambos dispositivos es fundamental para el funcionamiento del sistema. La aplicación que gestiona la cámara térmica 360° se comunica con el domo mediante una conexión TCP (Transmission Control Protocol). Previo a su operación, es indispensable realizar una calibración inicial para asegurar que la posición de la cámara domo se

corresponda con la información angular de la térmica. Este proceso se logra indicando las coordenadas equivalentes para cuatro ángulos de referencia específicos: 0°, 90°, 180° y 270°.

Una vez calibrado el sistema, cuando la cámara térmica detecta una variación que se corresponde con una posible intrusión en su área de cobertura, su aplicación genera una alerta con la información precisa de la ubicación del evento. Esta información se transmite a la cámara domo a través de comandos HTTP (Hypertext Transfer Protocol), indicando la posición exacta a la que debe dirigirse. El domo recibe esta instrucción y se posiciona automáticamente en el punto de la detección. Una vez posicionado, el domo utiliza sus capacidades de alta resolución y zoom óptico para ofrecer una visión detallada de la escena, permitiendo al personal de seguridad verificar la naturaleza de la amenaza y realizar un seguimiento continuo del objetivo.

La configuración física, donde la cámara térmica se ubica en la parte superior y el domo ligeramente debajo en el mismo báculo se ilustra en la Figura 16.

Capítulo 8. INTELIGENCIA ARTIFICIAL: DEFINICIÓN, ORÍGENES Y APLICACIÓN CON IMÁGENES

Este capítulo se adentrará en los pilares fundamentales de la inteligencia artificial, sentando las bases teóricas indispensables para comprender su relevancia y aplicación en el ámbito de los sistemas de seguridad perimetral.

8.1 QUÉ ES LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL, EVOLUCIÓN Y TIPOS

La inteligencia artificial (IA) se define como la capacidad de las computadoras y máquinas para simular y ejecutar procesos cognitivos humanos, Figura 17. Esto les permite desarrollar habilidades como el aprendizaje, la comprensión, la resolución de problemas, la toma de decisiones, la creatividad e incluso la autonomía, [16].



Figura 17: Simulación de la inteligencia humana.

El objetivo fundamental de la IA es simular la inteligencia humana en las máquinas: capacitar a las aplicaciones y dispositivos para que perciban e identifiquen objetos visualmente, comprendan y respondan al lenguaje humano, y aprendan de manera continua para hacer recomendaciones o actuar de forma independiente. De este modo, la IA busca también optimizar y automatizar tareas, reemplazando la necesidad de intervención humana directa en contextos específicos, con el fin último de mejorar la eficiencia y la capacidad de análisis en diversos campos.

El campo de la IA ha experimentado una evolución gradual, marcada por periodos de notable avance y otros de menor progresión o también conocidos como “inviernos de la IA”.

Sus orígenes conceptuales se remontan al siglo XIX, [17], con matemáticos como Boole que argumentaron que el razonamiento lógico podía ser sistematizado. Sin embargo, los fundamentos modernos de la computación y la IA se establecieron con Alan Turing, quien en 1936 introdujo el concepto de algoritmos. En 1950, Turing propuso su famosa prueba "Test de Turing", Figura 18, para evaluar la capacidad de una máquina para imitar la conversación humana, una prueba aún relevante para probar las IA.

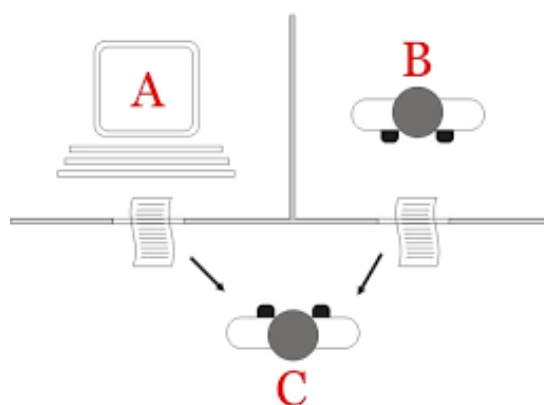


Figura 18: Test de Turing de Alan Turing

INTELIGENCIA ARTIFICIAL: DEFINICIÓN, ORÍGENES Y APLICACIÓN CON IMÁGENES

El término "Inteligencia Artificial", [18], fue acuñado formalmente por John McCarthy en 1956 durante la conferencia de Dartmouth, marcando el nacimiento oficial de la disciplina. En esta misma época, surgieron los primeros hitos prácticos: en 1943, Warren McCulloch y Walter Pitts publicaron el primer modelo matemático para una red neuronal, y en 1950, Marvin Minsky y Dean Edmonds crearon la primera computadora de red neuronal, Snarc. Arthur Samuel, pionero en la IA, desarrolló software para jugar ajedrez de forma autónoma en 1952, y acuñó el término "Machine Learning" en 1959. Otro desarrollo temprano notable fue la creación del chatbot ELIZA en 1966.

A pesar de periodos de ralentización, la IA experimentó un resurgimiento notable a finales del siglo XX y principios del XXI, impulsado por el aumento de la capacidad computacional y la disponibilidad masiva de datos. Hitos clave incluyen la victoria de IBM Deep Blue sobre Gary Kasparov en 1997, el trabajo de Andrew Ng en 2012, alimentando redes neuronales con millones de videos, y el triunfo de AlphaGo de Google DeepMind sobre Lee Sedol en 2016. La capacidad de las computadoras para pasar el Test de Turing en 2014 también marcó un avance. En los años más recientes, la IA ha continuado su vertiginosa expansión con el auge de la IA generativa, capaz de crear texto, imágenes y otros contenidos originales, y el desarrollo de grandes modelos de lenguaje (LLMs) como GPT de OpenAI o Gemini de Google, transformando la interacción humano-computadora hasta la actualidad en 2025.

En la Figura 19, se presenta una cronología simplificada de los hitos clave de la IA.

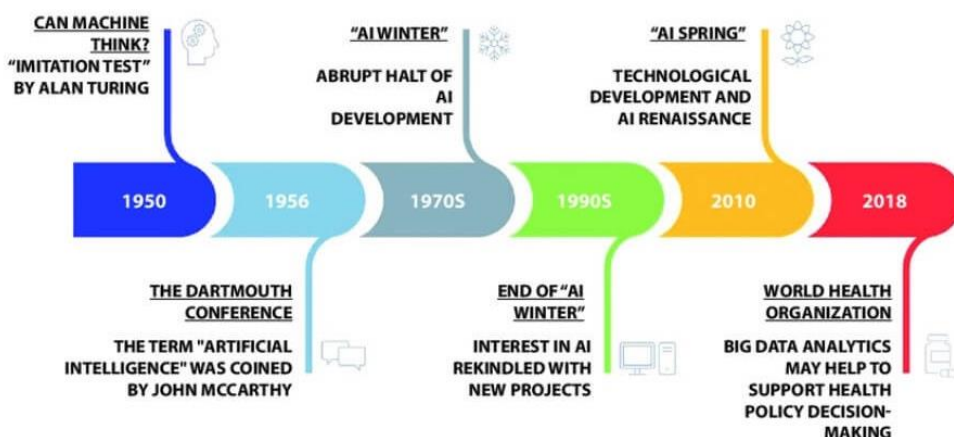


Figura 19: Línea del tiempo de la evolución de la IA

INTELIGENCIA ARTIFICIAL: DEFINICIÓN, ORÍGENES Y APLICACIÓN CON IMÁGENES

En el ámbito de la Inteligencia Artificial, se pueden distinguir diferentes niveles o tipos, Figura 20, en función de sus capacidades y autonomía, [19]:

- IA débil o especializada (Narrow AI): Este tipo de IA está diseñado para realizar tareas concretas y con un alcance limitado. Carece de inteligencia artificial general o comprensión profunda, pero opera con eficiencia en su campo predefinido bajo programación o entrenamiento específico. Ejemplos de esta IA son asistentes virtuales, sistemas de búsqueda y sistemas de recomendaciones.
- IA fuerte o general (General AI): Se caracteriza por tener una inteligencia equiparable a la de un humano, capaz de aprender, realizar y comprender cualquier tarea. Se distingue por su habilidad para adaptarse a diferentes escenarios. Actualmente, es un concepto más teórico y representa un objetivo a largo plazo en la investigación de la inteligencia artificial.
- Super IA (Super AI): Este nivel de inteligencia artificial trasciende la comprensión actual. No solo iguala la inteligencia humana como el caso del anterior nivel, sino que la supera en todos los aspectos, abarcando incluso la creatividad y la inteligencia emocional. Podría llevar a cabo investigación avanzada, resolver problemas de muy alta complejidad y mejorar su propia inteligencia de forma autónoma.

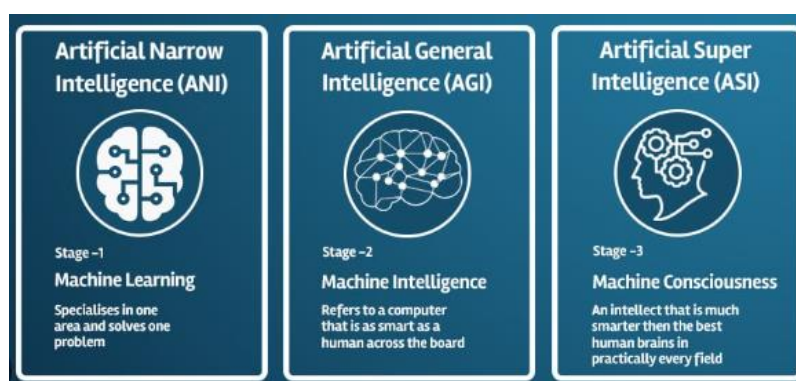


Figura 20: Tipos de IA

En el contexto de este proyecto, donde se emplean modelos de IA para detectar intrusiones reales en videos de imágenes térmicas, se está utilizando un enfoque de IA débil o especializada (Narrow AI).

INTELIGENCIA ARTIFICIAL: DEFINICIÓN, ORÍGENES Y APLICACIÓN CON IMÁGENES

Asimismo, la Inteligencia Artificial es un campo amplio que abarca el Machine Learning (ML) como una de sus estrategias principales para lograr replicar la inteligencia humana. Básicamente, el Machine Learning es un subconjunto de la IA que permite identificar patrones y extraer inferencias a partir de grandes volúmenes de datos históricos para hacer predicciones o tomar decisiones, sin necesidad de recibir instrucciones explícitas para cada tarea. En las aproximaciones tradicionales de Machine Learning, la extracción de características a menudo requiere un diseño manual o predefinido.

A su vez, el Deep Learning (DL), es una técnica avanzada dentro del Machine Learning que se inspira en la estructura del cerebro humano, utilizando redes neuronales artificiales complejas con múltiples capas internas. Esta arquitectura permite automatizar la extracción de características directamente de los datos, procesar la información y analizar y comprender representaciones abstractas y jerárquicas a partir de grandes cantidades de datos no estructurados, como imágenes y videos.

En este proyecto, la Inteligencia Artificial es el objetivo general, el Machine Learning el marco de aprendizaje y el Deep Learning el enfoque más relevante y potente para procesar videos con imágenes térmicas y detectar intrusiones en instalaciones que es nuestro objetivo. En la Figura 21, se puede observar la jerarquía de esta.

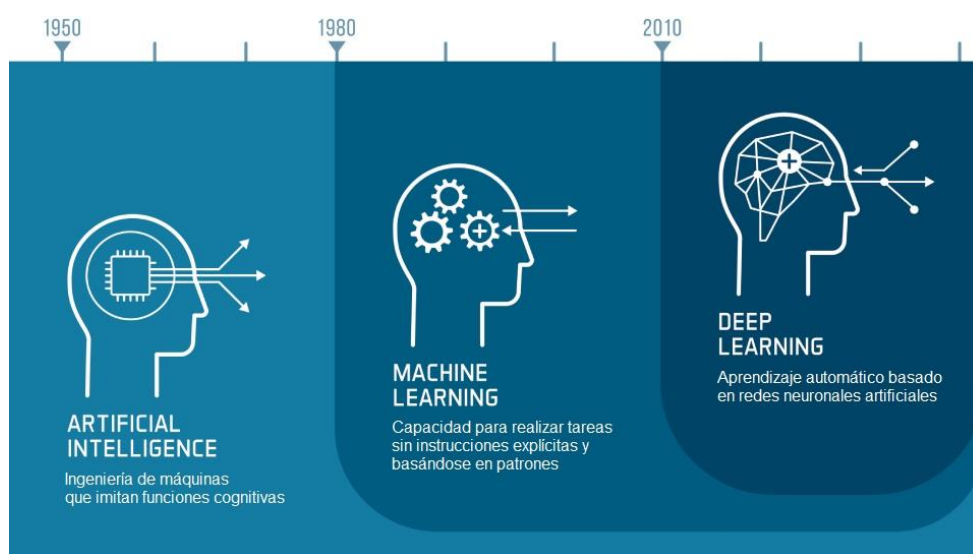


Figura 21: Jerarquía de la IA

8.2 COMPUTER VISION

La Visión por Computadora, en adelante denominada Computer Vision, es una disciplina de la Inteligencia Artificial que capacita a las máquinas para interpretar y comprender el mundo visual. Su objetivo principal reside en permitir que los sistemas deriven información significativa a partir de imágenes digitales, videos y otras entradas visuales, [20], replicando así las capacidades de la visión y la cognición humanas para identificar y entender personas, objetos y patrones (Figura 22).

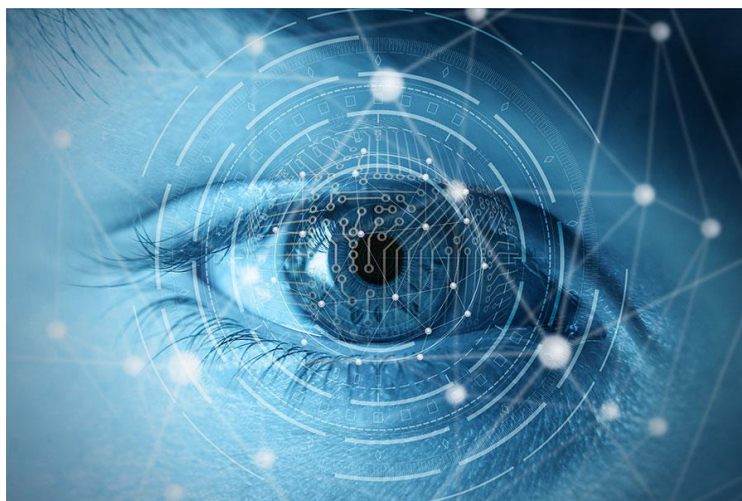


Figura 22: Esencia de Computer Vision

La relevancia actual de Computer Vision es innegable, impulsando la transformación en numerosos sectores y demostrando ser un componente fundamental de múltiples innovaciones y soluciones modernas. Sus aplicaciones se traducen en una mayor eficiencia operativa a través de la automatización de tareas, en una mejora de la experiencia del cliente para servicios personalizados, y en una seguridad mejorada al facilitar la detección temprana de anomalías en diversos ámbitos, [21]. En definitiva, está transformando la manera en que las empresas y organizaciones monitorean, analizan y responden a los datos visuales.

Para lograr esta capacidad de observación y comprensión, Computer Vision se apoya fundamentalmente en el uso de Deep Learning y redes neuronales, Figura 23, lo que le permite reconocer objetos, personas y patrones con un alto grado de precisión, [21] .

El funcionamiento de Computer Vision, [20], requiere entrenar sus modelos con una gran cantidad de datos, realizando análisis iterativos hasta que logran diferenciar elementos y finalmente identificar imágenes. El Deep Learning es fundamental porque capacita a los modelos para aprender, adquirir conocimiento y extraer automáticamente características complejas directamente de los datos no estructurados, como imágenes y videos, eliminando la necesidad de una ingeniería manual.

Para la comprensión de imágenes se utilizan Redes Neuronales Convolucionales (CNNs). Estas redes operan descomponiendo las imágenes en elementos más pequeños, realizando operaciones para generar predicciones y ajustando su comprensión de los patrones hasta que los resultados son precisos. Mientras que las CNNs se emplean en el análisis de imágenes individuales, las Redes Neuronales Recurrentes (RNNs) se emplean de manera similar en aplicaciones de video, facilitando a las computadoras la comprensión de cómo se relacionan las imágenes a lo largo de una secuencia de fotogramas. En el capítulo posterior, se profundizará en el funcionamiento detallado de estas arquitecturas de redes neuronales.



Figura 23: Fundamentos de Computer Vision

En el análisis de imágenes mediante Computer Vision, se podría estructurar el proceso en las fases que se muestran en la Figura 24 y se explican a continuación de esta.

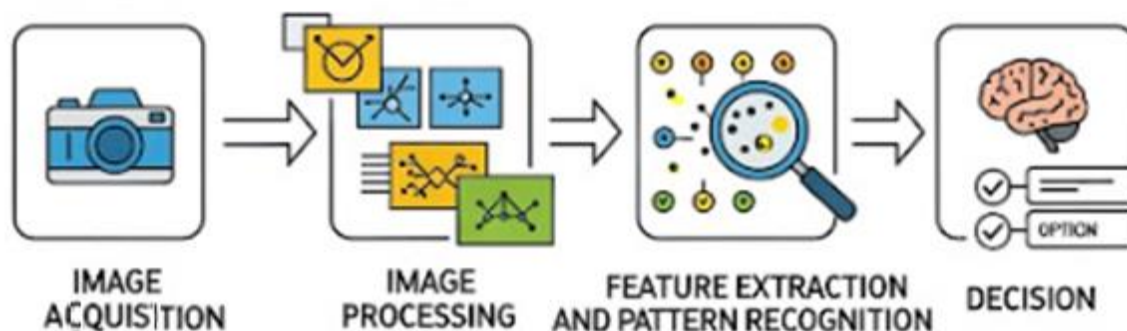


Figura 24: Fases en el análisis de imágenes en Computer Vision

El proceso comienza con la adquisición de imagen (image acquisition), donde, en nuestro caso de aplicación, los datos visuales son videos capturados por las cámaras térmicas 360 grados. Posteriormente, se realiza el procesamiento de imagen (image processing), una etapa donde el sistema de Inteligencia Artificial prepara estos datos. A continuación, se lleva a cabo la extracción de características (feature extraction), que consiste en identificar y transformar los elementos distintivos de los datos visuales en un formato procesable, seguido del reconocimiento de patrones (pattern recognition), donde se utilizan algoritmos para identificar y clasificar objetos o eventos basándose en esas características. En nuestro proyecto, el modelo de IA integrado en la cámara térmica de 360 grados lleva a cabo estas tareas, y buscamos mejorarlo para optimizar la precisión de las detecciones. Finalmente, una vez que el sistema ha analizado y comprendido, toma decisiones sobre su contenido y proporciona información relevante: en este contexto, determina si existe una intrusión en nuestra infraestructura crítica.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL: DEFINICIÓN, ORÍGENES Y APLICACIÓN CON IMÁGENES

Dentro de las funcionalidades clave que Computer Vision ofrece para comprender el contenido visual, y que son de particular interés para nuestro proyecto, destacan la clasificación de objetos, la detección y reconocimiento de objetos, y el seguimiento de objetos. Se incluyen también en estas capacidades, [22], la segmentación semántica y por instancias, la estimación de la pose o el reconocimiento óptico de caracteres, entre otras (Figura 25).

- La clasificación de objetos permite a un sistema categorizar elementos dentro de una imagen o video, asignándoles etiquetas previamente definidas. Para nuestro caso, esto significa diferenciar entre una persona, un vehículo o, por el contrario, elementos que no constituyen una amenaza como fauna o vegetación.
- La detección y reconocimiento de objetos no solo identifica la presencia de objetos específicos, sino que también localiza su posición dentro del encuadre mediante una caja que lo delimita. Permite conocer dónde se encuentra la intrusión potencial en la imagen térmica.
- El seguimiento de objetos permite rastrear el movimiento de un elemento detectado a lo largo de una secuencia de video. En nuestro proyecto, una vez que la cámara térmica ha detectado y localizado una intrusión, la cámara térmica envía la posición de la intrusión a la cámara domo (PTZ) para que esta pueda continuar el seguimiento detallado del evento.

Estas capacidades de Computer Vision son la base para desarrollar sistemas de vigilancia inteligentes que puedan automatizar la identificación y el monitoreo de intrusiones en entornos críticos.



Figura 25: Capacidades de Computer Vision

8.3 UTILIDAD DE LA IA EN ESTE TRABAJO

La utilidad de la Inteligencia Artificial es proporcional a su capacidad para impactar en los objetivos de este proyecto. La IA se erige como una herramienta indispensable para mejorar significativamente los sistemas de seguridad perimetral en infraestructuras.

La IA es crucial en este caso, ya que permite reducir el número de falsas alarmas, un problema persistente en la vigilancia actual. Mediante la propuesta del desarrollo y la mejora del modelo de IA integrado en la cámara térmica de 360 grados, aspiramos a que el sistema sea capaz de discernir con mayor precisión entre intrusiones reales (humanos o vehículos) y fuentes de ruido ambiental, como la vegetación en movimiento o la fauna. Esta optimización es vital para evitar la sobrecarga del personal de seguridad y minimizar el riesgo de que una intrusión genuina pase desapercibida.

Asimismo, la IA es fundamental para agilizar la respuesta ante intrusiones reales. Si bien los modelos de IA integrados en los domos (cámaras PTZ) ya poseen capacidades de seguimiento de objetos, su colaboración con nuestro sistema mejorado permite una acción más rápida y precisa. Una vez que la cámara térmica de 360 grados detecta y localiza una intrusión, la IA facilita que la cámara domo se posicione automáticamente y comience el seguimiento autónomo del objetivo, mejorando la fiabilidad del sistema y permitiendo una identificación más rápida y una toma de decisiones más eficaz por parte de los operadores.

La consecución de estos objetivos contribuye a un incremento sustancial en la fiabilidad general del sistema de seguridad. La IA, por tanto, no solo optimiza la eficiencia operativa, sino que también potencia la capacidad de los sistemas de vigilancia para proteger de forma proactiva las instalaciones frente a amenazas reales.

Capítulo 9. DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La inteligencia artificial (IA) ha pasado de ser una visión futurista a una fuerza transformadora, impactando profundamente en la sociedad a una velocidad revolucionaria. Este acelerado crecimiento no está exento de desafíos complejos y por ello, su desarrollo e implementación exigen abordar consideraciones éticas, técnicas y sociales para asegurar un impacto positivo, equitativo y sostenible. Al mismo tiempo, la investigación y la innovación continuas abren un horizonte de posibilidades que prometen redefinir aún más nuestro futuro.

9.1 RETOS ACTUALES EN EL DESARROLLO Y LA IMPLEMENTACIÓN DE LA IA

El avance de la inteligencia artificial trae consigo importantes desafíos en su desarrollo e implementación, Figura 26, los cuales hay que abordar para asegurar el progreso responsable de esta tecnología.



Figura 26: Desafíos de la IA

Entre los aspectos más críticos de la IA se encuentran las consideraciones éticas y los sesgos algorítmicos. Dado que los modelos de IA son entrenados y aprenden de datos que pueden reflejar prejuicios o desigualdades existentes, existe el riesgo de que conduzcan a decisiones discriminatorias. Por ello, garantizar la equidad y la responsabilidad algorítmica es fundamental para su aceptación social. La regulación y ética de la IA ha de ser una prioridad máxima, asegurando el cumplimiento de los derechos humanos y mitigando la desinformación y la discriminación, [23].

En relación con esto, la privacidad de los datos emerge como un desafío central. La IA se nutre de grandes volúmenes de información, a menudo de carácter personal, lo que plantea preocupaciones sobre su recopilación y uso. Por ello, se requiere del diseño de sistemas que integren la privacidad desde su concepción inicial, también conocido como "privacidad por diseño", garantizando la protección de los datos y el cumplimiento de normativas como el GDPR (General Data Protection Regulation), [24]. Este enfoque busca salvaguardar la información sensible frente a la captura y monetización indiscriminada, una preocupación creciente en la era digital, [25].

La ambición de la IA también implica un elevado consumo energético. El entrenamiento de modelos complejos exige gran potencia computacional y, por extensión, una considerable cantidad de energía, lo que plantea un desafío para la sostenibilidad ambiental. Por este motivo, se está investigando hacia algoritmos más eficientes y el uso de fuentes de energía sostenibles, [23].

La escasez de talento y la brecha de habilidades son obstáculos relevantes. La demanda de profesionales en ciencia de datos e ingeniería de IA supera la oferta, convirtiéndose en un cuello de botella para la implementación y escalabilidad de las soluciones en todos los sectores. Esta brecha se debe, fundamentalmente, a la cualificación del personal, ya que la complejidad inherente de la IA exige especialistas con conocimientos profundos en estadística, programación y comprensión del negocio., ([26] y [27]).

Finalmente, la regulación y gobernanza es urgente. La rápida evolución de la IA a menudo supera la capacidad de adaptación de los marcos legales. Establecer normativas claras que fomenten la innovación y protejan a la ciudadanía es un desafío global. La UE ha desarrollado directrices éticas para una IA fiable, y se discute la implementación de un "sello de aprobación de IA" que garantice su fiabilidad y seguridad, [24].

9.2 EL HORIZONTE DE LA IA

A pesar de los retos actuales, la IA ha dejado de ser una promesa de futuro y se ha convertido en una tecnología transversal, estratégica y cultural, con un potencial transformador aún en expansión. Su impacto se ha consolidado en múltiples ámbitos, desde la medicina hasta la movilidad, desde la educación hasta la defensa, y su evolución marca un punto de inflexión en la forma en que trabajamos, interactuamos y tomamos decisiones. La IA ha llegado para quedarse, Figura 27, no como un reemplazo de las capacidades humanas, sino como una extensión de las mismas, con el objetivo de transformar la forma en que los humanos se relacionan con los sistemas automatizados y digitales.



Figura 27: Futuro de la innovación de la IA (Imagen creada con IA)

Entre las tendencias emergentes más destacadas que delinear este horizonte destacan la Inteligencia Artificial Generativa (Gen AI) y los Grandes Modelos de Lenguaje (LLMs), [26], que lideran hoy la innovación. La Gen AI, Figura 28, agrupa modelos capaces de generar contenido original -texto, imágenes, código u otros formatos- que están transformando la interacción con la tecnología, automatizando procesos creativos y abriendo nuevas vías de expresión en diversos sectores. Dentro de esta categoría, los LLMs se especializan en comprender y generar lenguaje natural, con ejemplos destacados como ChatGPT de OpenAI, Gemini de Google DeepMind o Claude de Anthropic. Estas herramientas están redefiniendo la productividad, el aprendizaje automático y la generación creativa.



Figura 28: Generative AI

Otra tendencia clave es la Inteligencia Artificial en el Borde (Edge AI), [28], que traslada el procesamiento de datos y la inteligencia desde la nube hasta los dispositivos finales como cámaras, sensores, drones, módulos IoT o plataformas embebidas. Esta descentralización permite ejecutar algoritmos directamente en el punto de captura de información, reduciendo drásticamente la latencia, aliviando el tráfico de red, optimizando el ancho de banda y reforzando la privacidad, Figura 29. Gracias a su autonomía y rapidez, la Edge AI resulta especialmente valiosa en entornos donde la inmediatez y la seguridad de los datos son, como en videovigilancia o sistemas industriales entre otros.

El desarrollo de hardware especializado como NVIDIA Jetson o Google Coral ha hecho posible implementar modelos de Computer Vision en tiempo real con eficiencia energética y precisión adecuada. Gracias a estos avances, es factible implementar algoritmos de detección de objetos en tiempo real, capaces de procesar flujos de vídeo con altas tasas de cuadros por segundo (FPS), manteniendo al mismo tiempo niveles aceptables de precisión (mAP).

Esta capacidad permitiría, en contextos como el de seguridad que nos ocupa, desplegar nodos inteligentes que analicen imágenes térmicas o visuales directamente en el dispositivo, detectando intrusiones y comunicando únicamente eventos relevantes al servidor central. Esta arquitectura híbrida mejoraría la resiliencia del sistema, optimizando los recursos y reduciendo costes operativos.

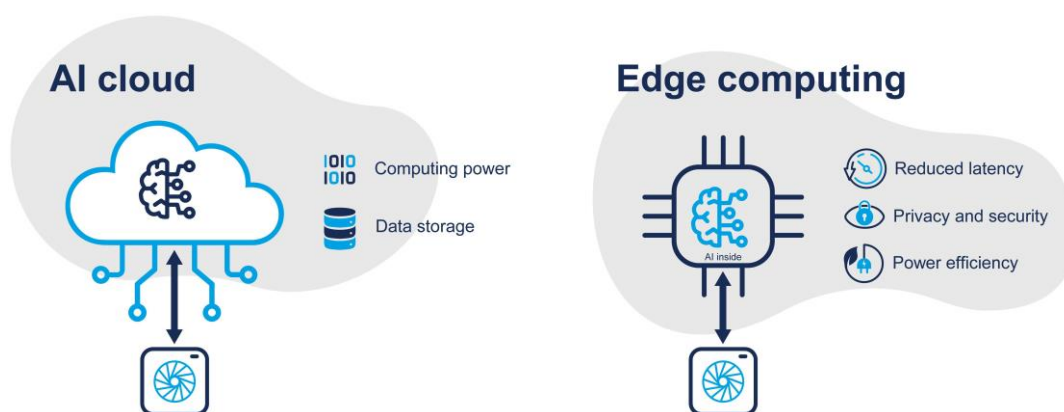


Figura 29: Ventajas de Edge AI

Además, la IA Aumentada (Augmented Intelligence), [23], está ganando protagonismo, priorizando la colaboración sobre la sustitución humana. Esta tendencia se centra en cómo la IA actúa como una aliada estratégica, potenciando nuestras capacidades y liberándonos de tareas repetitivas y monótonas a través de la automatización de estas, permitiendo a las personas concentrarse en trabajos que demandan creatividad, estrategia o juicio ético. Esta sinergia entre humanos e inteligencia artificial se perfila como el modelo dominante en el futuro de la innovación, redefiniendo el papel de la tecnología en todos los ámbitos.

Por otro lado, la Inteligencia Artificial General (AGI), [29], representa uno de los grandes retos aún por resolver y se considera un objetivo a largo plazo. A diferencia de los sistemas actuales, centrados en tareas específicas (IA débil, ver Figura 30), la AGI aspira a reproducir de forma integrada todas las capacidades cognitivas humanas: el razonamiento lógico, la comprensión del lenguaje, el aprendizaje adaptativo o la toma de decisiones en entornos inciertos. Su fin es alcanzar estas habilidades humanas creando sistemas capaces de enfrentarse a situaciones nuevas sin entrenamiento previo, interpretando distintos tipos de señales y actuando de forma autónoma y contextual. Aunque aún estamos lejos de alcanzar una AGI real, los avances en modelos multimodales, arquitecturas neuronales complejas y entornos de simulación están sentando las bases para su desarrollo.



Figura 30: Diferencia entre IA débil e Inteligencia Artificial General, [29].

En paralelo a estos avances, la Inteligencia Artificial Explicable (XAI) emerge como un requisito indispensable para garantizar la transparencia y la confianza en los sistemas inteligentes. A medida que la IA se incorpora en ámbitos críticos como la salud, la seguridad o la justicia, se vuelve esencial entender cómo y por qué una decisión ha sido tomada por un modelo. Frente a arquitecturas cada vez más complejas y opacas, la XAI busca desarrollar métodos que permitan interpretar, justificar y auditar el comportamiento de estos sistemas, tanto para usuarios técnicos como no especializados. Este enfoque no solo facilita una adopción ética y responsable, sino que será clave para cumplir con futuras normativas y generar confianza social en el uso de estas tecnologías.

DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En resumen, el horizonte de la IA se expande hacia una integración cada vez más profunda y simbiótica con las capacidades humanas (Figura 31). Este nuevo escenario promete una redefinición fundamental de nuestra relación con la tecnología y la forma en que gestionamos la información. Lejos de ser un futuro dominado por la inteligencia artificial, se perfila como un futuro del ser humano potenciado por la IA. Esta evolución marca el camino hacia sistemas más autónomos, inteligentes y colaborativos, esenciales para afrontar los desafíos y las oportunidades del mañana.

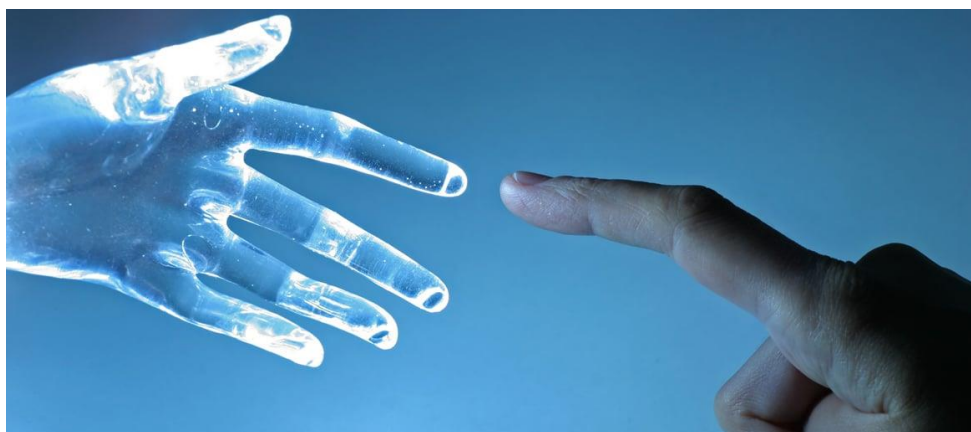


Figura 31: Futuro colaborativo entre humanos e IA

Capítulo 10. MODELOS DE IA PARA DETECCIÓN DE INTRUSIONES

La seguridad en instalaciones, especialmente en ubicaciones remotas, demanda soluciones de vigilancia avanzadas que integren la Inteligencia Artificial (IA) para el análisis de flujos de video en tiempo real.

Este capítulo aborda la detección de intrusiones en imágenes térmicas, un ámbito crucial para la seguridad perimetral. Se analizará el trabajo previo con el modelo YOLOv8 para la detección de intrusiones, identificando sus limitaciones. Posteriormente, se investigarán posibles modelos de IA, justificando su idoneidad y delineando la metodología para sugerir cómo mejorar la discriminación de intrusiones reales y minimizar las detecciones erróneas.

10.1 ANÁLISIS DEL TRABAJO ANTERIOR: EL MODELO YOLOv8

El proyecto previo, cuya información detallada se puede encontrar en la referencia [30], tuvo como propósito principal el desarrollo de un sistema que fuese capaz de identificar y clasificar objetos para anticiparse a posibles intrusiones. Este esfuerzo se enmarcó en la mejora de la seguridad de plantas industriales ubicadas en zonas remotas, lográndose mediante el tratamiento automatizado de videos. La metodología de este trabajo anterior exploró inicialmente tanto las técnicas clásicas de procesamiento de imágenes y videos implementadas a través de librerías como OpenCV, como también la aplicación de Redes Neuronales Convolucionales (CNN), lo que llevó al uso del modelo YOLOv8 para la detección de objetos.

Para la detección de intrusiones y posterior seguimiento en tiempo real, se optó por la serie YOLO (You Only Look Once), en su versión YOLOv8, debido a sus ventajas en precisión y rapidez en la detección de objetos.

YOLO es un modelo de Computer Vision y un algoritmo de detección de objetos que emplea redes neuronales convolucionales (CNN) para operar en tiempo real. Las CNNs, Figura 32, son redes neuronales especializadas en el procesamiento de datos bidimensionales como las imágenes, siendo expertas en tareas de reconocimiento visual como la detección, segmentación y clasificación de imágenes, [31].

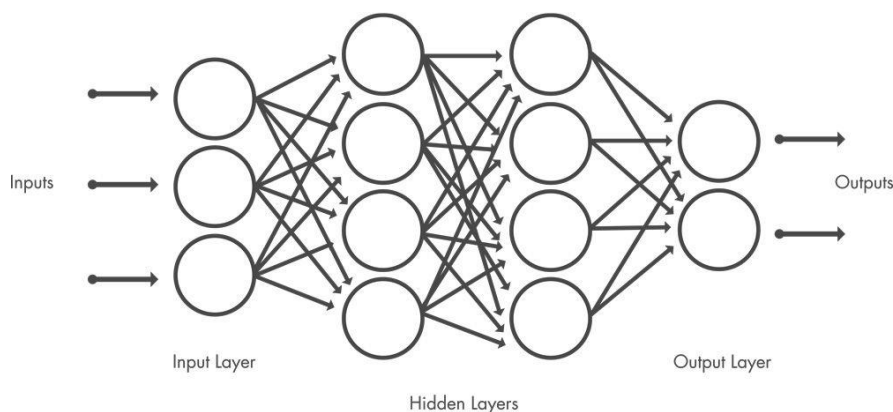


Figura 32: Red neuronal convolucional (CNN)

A diferencia de la clasificación de imágenes, la cual se limita a asignar una etiqueta general a la imagen en su conjunto, la detección de objetos va un paso más allá. No solo identifica y clasifica los elementos individuales presentes, sino que también determina y proporciona sus ubicaciones precisas mediante cuadros delimitadores. Su capacidad de procesar las imágenes en una sola pasada, de donde deriva su nombre ‘You Only Look Once’, prediciendo clases y coordenadas simultáneamente, le otorga una mayor velocidad y eficiencia en comparación con algoritmos de múltiples etapas, si bien puede implicar una precisión inicial ligeramente inferior.

El proceso de predicción de YOLO se inicia con el redimensionamiento y normalización de la imagen, tras lo cual una CNN extrae sus características visuales. La imagen se segmenta en una cuadrícula donde cada celda predice múltiples cuadros delimitadores con sus respectivas puntuaciones de confianza y probabilidades de clase. Finalmente, para refinar las detecciones y eliminar duplicados, se aplica la supresión de no máximos (NMS), conservando solo los cuadros más precisos y descartando los que se superponen significativamente con otros de mayor confianza.

La metodología que se implementó para el modelo YOLOv8 incluyó el reentrenamiento mediante transferencia de aprendizaje, utilizando una red previamente entrenada. Se utilizó un conjunto de datos personalizado de 1350 imágenes de personas y coches, anotado con 'MakeSense'. Este dataset se dividió para entrenamiento (75%) y validación (25%). El proceso implicó el ajuste de hiperparámetros como el tamaño del lote, el número de épocas y la tasa de aprendizaje.

Los resultados experimentales del modelo reentrenado mostraron una precisión aceptable en la detección de objetos. No obstante, la evaluación con videos reales de cámaras de seguridad reveló limitaciones importantes. La efectividad del modelo fue variable según el entorno, lo que indicaba una falta de robustez general. Las detecciones fallaban en presencia de obstáculos parciales, condiciones de iluminación adversas (como contraluz o baja luz), y cuando los objetos estaban demasiado lejos o no aparecían completos en el encuadre. El trabajo concluyó que se necesitaba una mayor diversificación y ampliación del conjunto de datos de entrenamiento (con más variaciones de iluminación, ángulos y distancias), el uso de técnicas de aumento de datos avanzadas y la incorporación de métodos de aprendizaje continuo para mejorar la fiabilidad y adaptabilidad del modelo en entornos reales.

10.2 MODELO DE IA PROPUESTO PARA LA MEJORA DE LA DETECCIÓN

En el proyecto anterior, el objetivo principal fue la exploración y el tratamiento de las imágenes para la detección; sin embargo, en el presente proyecto, mejorar el modelo de detección existente es uno de los objetivos a abordar.

A pesar de los logros del modelo YOLOv8 en la detección de objetos, el análisis del trabajo previo ha revelado limitaciones en la robustez y fiabilidad del modelo en escenarios reales. La variabilidad en su rendimiento bajo condiciones ambientales adversas, la presencia de obstáculos parciales o la distancia de los objetos, genera un número elevado de falsas alarmas, subrayando la necesidad de explorar un nuevo enfoque. Un modelo mejorado debe ser capaz de discriminar con mayor precisión entre intrusiones reales (personas y vehículos) y falsos positivos generados por fauna o vegetación, un aspecto crítico para evitar recursos innecesarios y mantener la eficiencia operativa del sistema de seguridad.

Para abordar estas deficiencias y garantizar una detección de intrusiones más fiable y adaptable a las complejidades del entorno, se propone la implementación de YOLOv11 como un paso significativo para superar estas deficiencias y mejorar la robustez y precisión del sistema. YOLOv11 representa la última evolución de la serie YOLO de Ultralytics, en la que introduce una serie de mejoras estructurales que permiten una detección más precisa y eficiente.

YOLOv11, [32], introduce una serie de mejoras entre las que se encuentran:

- Optimización arquitectónica: La red ha sido rediseñada para mejorar la eficiencia en la extracción de características, permitiendo alcanzar una mayor precisión (mAP) utilizando menos parámetros y operaciones (FLOPs), lo cual reduce significativamente el consumo computacional.
- Inferencia más rápida: La reducción de la complejidad del modelo se traduce en menores tiempos de inferencia, especialmente notables en CPU y dispositivos con recursos limitados.

- Marco unificado y escalable: YOLOv11 permite abordar múltiples tareas de Computer Vision (detección, segmentación, clasificación) desde una única arquitectura, optimizando la eficiencia de memoria.

Para una visión resumida de las diferencias clave entre ambos modelos, [33], la Tabla 3 presenta una tabla comparativa de sus principales características y beneficios:

	YOLOv8	YOLOv11	Beneficio / Impacto
Precisión (mAP)	Buena, pero con margen de mejora	Superior (mayor mAP)	Detecciones más fiables y consistentes.
Eficiencia (Parámetros)	Mayor número de parámetros	Menor número de parámetros	Menor consumo de memoria y computacional.
Eficiencia (FLOPs)	Mayor carga computacional	Menor carga computacional	Mayor eficiencia energética, apto para dispositivos limitados.
Velocidad de Inferencia	Rápida, pero con margen de optimización	Más rápida, especialmente en CPU	Procesamiento más veloz en tiempo real.
Robustez en entornos reales	Variable según condiciones	Mejorada	Menor susceptibilidad a obstáculos, iluminación adversa, distancia.
Arquitectura	Sólida, pero con optimizaciones posibles	Optimización arquitectónica	Extracción de características más eficiente, mayor rendimiento.

Versatilidad	Principalmente detección de objetos	Marco unificado y escalable	Soporte eficiente para detección, segmentación y clasificación.
--------------	--	--------------------------------	---

Tabla 3: Diferencias entre YOLOv8 y YOLOv11

Para visualizar el rendimiento superior de YOLOv11, se presentan a continuación los datos comparativos con YOLOv8. La Figura 33 muestra una tabla detallando métricas de rendimiento clave, como la precisión (mAP), la velocidad de inferencia, el número de parámetros y las operaciones computacionales (FLOPs) para las distintas variantes de ambos modelos, evidenciando la significativa mejora en eficiencia y capacidad de YOLOv11.

Modelo	tamaño (píxeles) $\updownarrow$	mAPval 50-95	Velocidad CPU ONNX (ms)	Velocidad T4 TensorRT10 (ms)	parámetros (M)	FLOPs (B)
YOLO11n	640	39.5	56.1	1.5	2.6	6.5
YOLO11s	640	47.0	90.0	2.5	9.4	21.5
YOLO11m	640	51.5	183.2	4.7	20.1	68.0
YOLO11l	640	53.4	238.6	6.2	25.3	86.9
YOLO11x	640	54.7	462.8	11.3	56.9	194.9
YOLOv8n	640	37.3	80.4	1.47	3.2	8.7
YOLOv8s	640	44.9	128.4	2.66	11.2	28.6
YOLOv8m	640	50.2	234.7	5.86	25.9	78.9
YOLOv8l	640	52.9	375.2	9.06	43.7	165.2
YOLOv8x	640	53.9	479.1	14.37	68.2	257.8

Figura 33: Métricas de rendimiento de YOLOv11 y YOLOv8

Por su parte, la Figura 34 ilustra la curva de rendimiento que compara la precisión (mAP) frente a la latencia de inferencia para YOLOv11 y YOLOv8. Destaca visualmente cómo

YOLOv11 logra un equilibrio superior entre precisión (alcanzando un mAP más alto) y velocidad (manteniendo una menor latencia), superando consistentemente a YOLOv8.

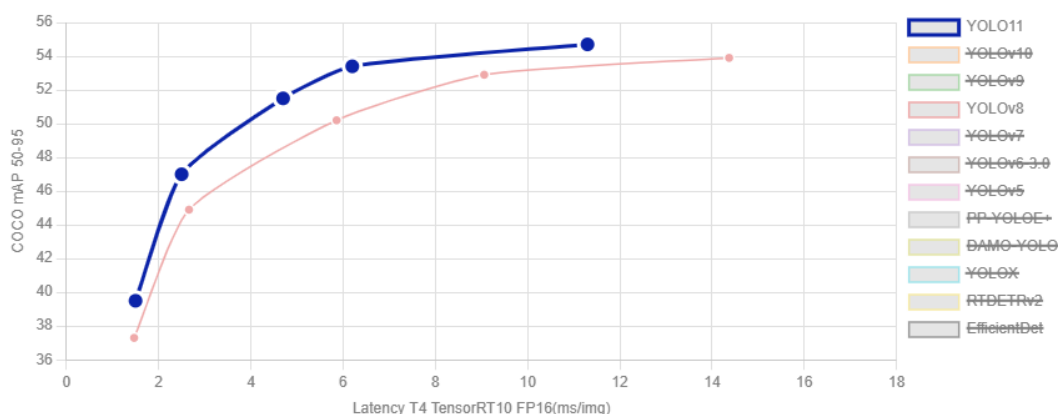


Figura 34: Curva de rendimiento (mAP vs. Latencia) de YOLOv11 y YOLOv8

Los cambios arquitectónicos introducidos en YOLOv11 se traducen en beneficios prácticos que abordan directamente las deficiencias observadas con YOLOv8:

- Mayor precisión en condiciones reales: El modelo mejora los valores de mAP en comparación con YOLOv8, lo que se traduce en detecciones más consistentes y fiables, incluso cuando los objetos aparecen parcialmente ocultos, mal iluminados o a larga distancia.
- Reducción de falsos positivos: La mayor capacidad de discriminación del modelo mejora la diferenciación entre intrusiones reales (personas y vehículos) y elementos no deseados como sombras, vegetación o animales, disminuyendo significativamente las falsas alarmas.
- Mayor velocidad de procesamiento: Esta mejora es especialmente relevante en escenarios de video en tiempo real, donde el modelo debe procesar múltiples fotogramas por segundo sin pérdida de precisión, manteniendo una alta capacidad de respuesta.
- Adaptabilidad multiplataforma: Al requerir menos recursos de memoria y computación, YOLOv11 se adapta mejor a distintas plataformas de hardware, desde

entornos embebidos hasta servidores en la nube, ampliando sus posibilidades de despliegue.

- Facilidad de desarrollo y mantenimiento: La compatibilidad con herramientas y librerías actualizadas simplifica la implementación, depuración y actualización del sistema, reduciendo la carga de trabajo a largo plazo.

En conjunto, estas características convierten a YOLOv11 en una alternativa más adecuada y robusta para abordar las limitaciones observadas con YOLOv8. Su mayor eficiencia, precisión y facilidad de integración ofrecen ventajas claras para sistemas que deben operar en entornos dinámicos, con condiciones variables y restricciones computacionales. Por ello, YOLOv11 se plantea como una alternativa más robusta como nuevo modelo base en esta etapa del proyecto.

Capítulo 11. CONCLUSIONES Y FUTUROS PASOS

El presente Trabajo de Fin de Máster ha abordado el desafío de optimizar la seguridad en instalaciones, como las plantas fotovoltaicas, mediante el desarrollo y la propuesta de un sistema de videovigilancia perimetral innovador. Se partió de la premisa de superar las limitaciones de los sistemas convencionales, basados en cámaras térmicas fijas y domos con seguimiento manual, que presentaban una cobertura ineficiente y una alta tasa de falsas alarmas.

Los objetivos planteados para este proyecto se han alcanzado, demostrando la viabilidad y las ventajas de la solución propuesta.

En primer lugar, se ha confirmado que la optimización de la cobertura perimetral es posible mediante la adopción de cámaras térmicas de 360 grados. A través de simulaciones, se determinó que el uso de estas cámaras permite una reducción del 70% en el número de dispositivos necesarios para cubrir una misma extensión, pasando de quince cámaras fijas a solo cuatro cámaras de 360 grados. Esto no solo simplifica el despliegue, sino que también genera un ahorro global estimado del 65% en los costes de adquisición, instalación, infraestructura auxiliar y mantenimiento del sistema de videovigilancia térmica.

En segundo lugar, la minimización de las falsas alarmas se abordó mediante la propuesta de integración de modelos de Inteligencia Artificial avanzados. El análisis del trabajo previo reveló que YOLOv8, aunque eficaz, presentaba limitaciones en la robustez y fiabilidad en escenarios reales, generando falsos positivos por fauna o vegetación. Por ello, se ha propuesto la implementación de YOLOv11 como un paso significativo para mejorar la precisión y eficiencia en la detección de intrusiones. YOLOv11 ofrece optimizaciones arquitectónicas que resultan en una mayor precisión (mAP), menor número de parámetros y FLOPs, y una inferencia más rápida, lo que se traduce en una mejor discriminación entre intrusiones reales y elementos irrelevantes.

En tercer lugar, se ha establecido la base para agilizar la respuesta ante intrusiones reales mediante la integración inteligente de las cámaras térmicas de 360 grados con cámaras tipo domo. Mientras que la cámara térmica de 360 grados se encarga de la detección inicial en un amplio perímetro, la cámara domo seleccionada (Hikvision DS-2DF9C435IH-DLW, con su tecnología DarkFighterX y mayor alcance infrarrojo) se posicionará automáticamente en el punto exacto de la intrusión para un seguimiento detallado y autónomo del objetivo. Esto optimiza el uso de recursos humanos y mejora la capacidad de los operadores para tomar decisiones inmediatas.

Finalmente, el proyecto subraya un incremento significativo en la fiabilidad general del sistema de seguridad. La combinación de la cobertura mejorada de las cámaras de 360 grados y la capacidad discriminatoria de la IA propuesta (YOLOv11) reduce la sobrecarga de trabajo del personal de seguridad, minimiza el riesgo de pasar por alto intrusiones genuinas y potencia la protección proactiva de las instalaciones.

Aunque el presente trabajo ha sentado una base sólida para la mejora de la seguridad en instalaciones, se identifican diversas áreas para futuras investigaciones y desarrollos que permitirán potenciar aún más la solución propuesta:

- Implementación y Validación en Campo del Modelo YOLOv11: El paso más inmediato y crucial sería la implementación práctica del modelo YOLOv11 propuesto en un entorno real. Esto implicaría el entrenamiento del modelo con un conjunto de datos específico de imágenes térmicas de la instalación crítica, seguido de una validación exhaustiva de su rendimiento en diversas condiciones ambientales (clima, luz, obstáculos) para cuantificar la reducción real de falsas alarmas y el aumento en la precisión de detección.
- Optimización del Consumo Energético del Modelo de IA (Edge AI): Dada la relevancia del consumo energético y la eficiencia operativa en los desafíos de la IA, es fundamental investigar y aplicar técnicas de Edge AI para ejecutar el modelo YOLOv11 directamente en los dispositivos de borde (cámaras de 360 grados). Al

realizar el procesamiento de las imágenes directamente en la cámara, eliminamos la necesidad de un ordenador externo dedicado para el análisis, lo que se traduce en una significativa reducción de equipos, menor latencia en la detección, optimización del ancho de banda de la red y una mejora sustancial en la eficiencia energética global del sistema.

- Estudio de Impacto Ambiental a Largo Plazo: Realizar un estudio más profundo sobre el impacto ambiental a largo plazo de la solución propuesta, incluyendo el ciclo de vida completo de los dispositivos y el consumo energético de la infraestructura de IA, para confirmar su sostenibilidad.

Estos futuros pasos no solo consolidarían los logros de este proyecto, sino que también abrirían nuevas avenidas para la investigación y el desarrollo de sistemas de seguridad perimetral aún más inteligentes, eficientes y adaptables.

Capítulo 12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Endesa, «Nueva planta solar en Sevilla,» 29 Diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.endesa.com/es/prensa/sala-de-prensa/noticias/transicion-energetica/renovables/endesa-finaliza-construccion-esparragal-nueva-planta-solar-sevilla>. [Último acceso: 27 Abril 2025].
- [2] Endesa, «Videovigilancia Urbana Inteligente,» [En línea]. Available: <https://www.enelx.com/ar/es/gobierno/video-vigilancia-urbana-inteligente>. [Último acceso: 27 Abril 2025].
- [3] Hikvision, «Cámaras térmicas de seguridad,» [En línea]. Available: <https://www.hikvision.com/es/products/Thermal-Products/Security-thermal-cameras/>. [Último acceso: 17 Mayo 2025].
- [4] Hikvision, «¿Qué es la tecnología de obtención de imágenes térmicas?,» [En línea]. Available: <https://www.hikvision.com/es/core-technologies/thermal-imaging/>. [Último acceso: 29 Mayo 2025].
- [5] Hikvision, «Cámaras térmicas de seguridad de la serie HeatPro,» [En línea]. Available: <https://www.hikvision.com/es/products/Thermal-Products/Security-thermal-cameras/heatpro-series/?category=T%C3%A9rmico+&subCategory=Security+Thermal+Cameras&series=Serie+HeatPro&checkedSubSeries=NONE>. [Último acceso: 17 Mayo 2025].
- [6] Hikvision, «Cámaras térmicas de seguridad - Bullet Series,» [En línea]. Available: <https://www.hikvision.com/es/products/Thermal-Products/Security-thermal-cameras/Bullet->

series/?category=T%C3%A9rmico+&subCategory=Security+Thermal+Cameras&series=Serie+Bullet&checkedSubSeries=NONE. [Último acceso: 17 Mayo 2025].

- [7] Visiotech, «Company,» [En línea]. Available: <https://www.visiotechsecurity.com/en/company/about-us>. [Último acceso: 6 Junio 2025].
- [8] Visiotech, «RP-SILENTW-UM625,» [En línea]. Available: https://www.visiotechsecurity.com/en/products/ip-cctv-1/thermal-411/raythink-865/rp-silentw-um625-detail#tab=prod_3. [Último acceso: 1 Junio 2025].
- [9] Visiotech, «IRS-XSENTRY-UM619,» [En línea]. Available: https://www.visiotechsecurity.com/en/products/ip-cctv-1/thermal-411/infray-774/irs-xsentry-um619-detail#tab=prod_0. [Último acceso: 1 Junio 2025].
- [10] Davantis, «Site Planning Tool,» [En línea]. Available: <https://siteplanning.davantis.com/es/>. [Último acceso: 05 Julio 2025].
- [11] T. Radar, «Custom Layout Tool,» [En línea]. Available: <https://www.thermalradar.com/layout-tool>. [Último acceso: 5 Julio 2025].
- [12] Hikvision, «Perfil de la empresa,» [En línea]. Available: <https://www.hikvision.com/es-la/about-us/company-profile/>. [Último acceso: 3 Junio 2025].
- [13] Hikvision, «What's DarkFighterX Technology?,» [En línea]. Available: <https://www.hikvision.com/us-en/core-technologies/low-light-imaging/darkfighterx/>. [Último acceso: 3 Junio 2025].

- [14] Hikvision, «9-inch 4 MP 35X DarkFighterX IR Network Speed Dome,» [En línea]. Available: <https://www.hikvision.com/my/products/IP-Products/PTZ-Cameras/Ultra-Series/DS-2DF9C435IH-DLW/>. [Último acceso: 4 Junio 2025].
- [15] Hikvision, «8-inch 2MP 25X DarkFighterX IR Network Speed Dome,» [En línea]. Available: <https://www.hikvision.com/en/products/IP-Products/PTZ-Cameras/Ultra-Series/ds-2df8225ih-ael-w-/>. [Último acceso: 4 Junio 2025].
- [16] IBM, «¿Qué es la Inteligencia Artificial (IA)?,» [En línea]. Available: <https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/artificial-intelligence>. [Último acceso: 13 Junio 2025].
- [17] N. Geographic, «Breve historia visual de la inteligencia artificial,» [En línea]. Available: https://www.nationalgeographic.com/es/ciencia/breve-historia-visual-inteligencia-artificial_14419. [Último acceso: 13 Junio 2025].
- [18] DataScientest, «Inteligencia artificial: definición, hitos, usos, peligros,» [En línea]. Available: <https://datascientest.com/es/inteligencia-artificial-definicion>. [Último acceso: 13 Junio 2025].
- [19] A. Y.-S. Y. Durán., «Unit 1 Introduction,» de *Diapositivas de la asignatura de Deep Learning*, Master in Smart Industry, Academic year 2024/2025.
- [20] IBM, «What is Computer Vision,» [En línea]. Available: <https://www.ibm.com/think/topics/computer-vision>. [Último acceso: 24 Junio 2025].
- [21] M. Azure, «¿Qué es Computer Vision?,» [En línea]. Available: <https://azure.microsoft.com/es-es/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-computer-vision>. [Último acceso: 24 Junio 2025].

- [22] Ultralytics, «Exploración del funcionamiento de las aplicaciones de visión por ordenador,» [En línea]. Available: <https://www.ultralytics.com/es/blog/exploring-how-the-applications-of-computer-vision-work>. [Último acceso: 25 Junio 2025].
- [23] Forbes, «The 10 Biggest AI Trends Of 2025 Everyone Must Be Ready For Today,» [En línea]. Available: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2024/09/24/the-10-biggest-ai-trends-of-2025-everyone-must-be-ready-for-today/>. [Último acceso: 29 Junio 2025].
- [24] D. H. Gerhard Paass, «10.5 Building Trust in AI,» de *Artificial Intelligence*, Springer.
- [25] D. H. Gerhard Paaß, «10.2.1 The Monetization of Data,» de *Artificial Intelligence*, Springer.
- [26] Q. A. b. McKinsey, «The state of AI: How organizations are rewiring to capture value,» 2025.
- [27] D. H. Gerhard Paaß, «10.2.4 Impact on the Labor Market,» de *Artificial Intelligence*, Springer.
- [28] C. L. Chowdhary, M. L. Alazab, A. L. Chaudhary, S. L. Hakak y T. R. Gadekallu, «Real-time face mask detection on edge IoT devices,» de *Computer Vision and Recognition Systems Using Machine and Deep Learning Approaches Fundamentals, Technologies and Applications*.
- [29] D. H. Gerhard Paaß, «10.3.4. Artificial General Intelligence,» de *Artificial Intelligence*, Springer.
- [30] I. B. d. l. Puerta, «Trabajo de fin de máster. Experiencias en la aplicación de librerías gráficas para el tratamiento automatizado de flujos de video y su aplicación en materia de seguridad en instalaciones,» Madrid, 2024.

- [31] IBM, «¿Qué son las redes neuronales convolucionales?,» [En línea]. Available: <https://www.ibm.com/es-es/think/topics/convolutional-neural-networks>. [Último acceso: 29 Junio 2025].
- [32] Ultralytics, «Ultralytics YOLO11,» [En línea]. Available: <https://docs.ultralytics.com/es/models/yolo11/>. [Último acceso: 6 Julio 2025].
- [33] Ultralytics, «YOLO11 vs YOLOv8: comparación detallada,» [En línea]. Available: <https://docs.ultralytics.com/es/compare/yolo11-vs-yolov8/>. [Último acceso: 6 Julio 2025].
- [34] United Nations, «Sustainable Development Goals,» 24 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>. [Último acceso: 13 Abril 2025].

ANEXO I: ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Este proyecto presenta una sinergia con diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), Figura 35, establecidos por las Naciones Unidas, [34].



Figura 35: 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible

Este trabajo contribuye de manera específica a los siguientes:

- ODS 7: Energía asequible y no contaminante.

La implementación de un sistema de vigilancia más eficiente y robusto apoya directamente la protección de infraestructuras dedicadas a la generación de energías renovables, como las plantas fotovoltaicas. Estas instalaciones son fundamentales en la transición hacia un modelo energético más limpio y sostenible, y asegurar su protección contribuye a la continuidad y estabilidad del suministro de energía no contaminante.

ANEXO I: ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura.

El proyecto promueve la adopción de tecnologías avanzadas en sistemas de seguridad, mejorando así la infraestructura de vigilancia de activos críticos. A través de la innovación en videovigilancia, específicamente mediante la integración de cámaras térmicas de 360° e inteligencia artificial, se optimiza la protección de estas infraestructuras esenciales para el desarrollo económico y social.

- ODS 12: Producción y consumo responsables.

La propuesta de reducir el número total de cámaras necesarias para la vigilancia de grandes extensiones, mediante el uso estratégico de cámaras térmicas de 360°, fomenta un uso más eficiente y responsable de los recursos tecnológicos. Esta optimización implica una disminución en la demanda de fabricación, instalación y mantenimiento de un gran número de dispositivos, lo que a su vez conlleva un menor consumo de materiales y energía a lo largo del ciclo de vida del sistema de seguridad.