



Modelos IA Cámara Visual y Térmica

PROYECTO

Optimización de la combustión de biomasa y subproductos afines en calderas industriales, mediante el reconocimiento de imagen e interpretación de la combustión con Inteligencia Artificial

Convocatoria de Ayudas 2021 destinadas a proyectos de investigación y desarrollo en inteligencia artificial y otras tecnologías digitales y su integración en las cadenas de valor C005/21-ED. Proyecto: 2021/C005/00148852 Termosun Energías SL "3BD-Biomass Boiler Big Data"

Diciembre, 2023

Versión: 1.0



	Modelos IA Cámara visual y térmica Termosun	Fecha: 15/12/2023

Indice

1 Motivación y objetivos	3
2 Modelos para la Cámara Visual	3
2.1 Localizador de ventana de caldera	5
2.1.1 Motivación	5
2.1.2 Modelo	5
2.1.3 Uso práctico y justificación	7
2.2 Modelo de validación de Frame	10
2.2.1 Motivación	10
2.2.2 Evaluación	11
2.3 Modelo de validación de Llama	11
2.3.1 Motivación	12
2.3.2 Evaluación	12
2.4 Modelos de localización de Llama	13
2.4.1 Motivación	13
2.4.2 Evaluación	15
3 Modelo para la Cámara Térmica	19
3.1 Modelo de gradientes de temperatura	19
4 Conclusiones	19
5 Mejoras de los modelos	19

	Modelos IA Cámara visual y térmica Termosun	Fecha: 15/12/2023
-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------	-----------------------------

1 Motivación y objetivos

Actualmente ya se obtiene cierto control sobre los datos de la Caldera gracias a los datos de los sistemas actuales, aunque estos datos no solo les son útiles para entender qué tal está funcionando la caldera, también les sirven para asegurar que la caldera no llega a niveles de temperatura u oxígeno peligrosos.

Pero los técnicos operarios de caldera no solo controlan la caldera con los datos disponible, sino que también miran el interior de la caldera para revisar qué tal está quemando el combustible, si la velocidad de la parrilla es la adecuada, si se genera mucha ceniza, si entra poco combustible, si hay muchas turbulencias, si hay mucha o poca gasificación...

Es por esta razón que parte de este proyecto está orientado al desarrollo de sistemas de IA de visión que ayuden al técnico-operario a controlar la calidad de la combustión sin la necesidad de estar mirando constantemente el interior a través de las mirillas.

2 Modelos para la Cámara Visual

Hemos desarrollado cuatro modelos para el tratamiento de los datos procedentes de la cámara visual. De los cuales, dos son necesarios por procesos internos del pipeline y 2 son necesarios para el diagnóstico de funcionamiento de la caldera.

En el EDA de ingesta de datos de la cámara visual constatamos que debido a movimientos del dispositivo de fijación y el efecto túnel producido por el agujero en el material refractario, el encuadre de la cámara visual se modifica en el tiempo.

Dado que la imagen en bruto tiene una resolución de 2048x1440 píxeles y que la región de interés es de aproximadamente 400x300 píxeles, aproximadamente un 4% del total de la imagen, consideramos necesario considerar solo la región de interés.

Los modelos presentados a continuación se basan en redes neuronales profundas de convolución, cómo las mostradas en la Figura 1

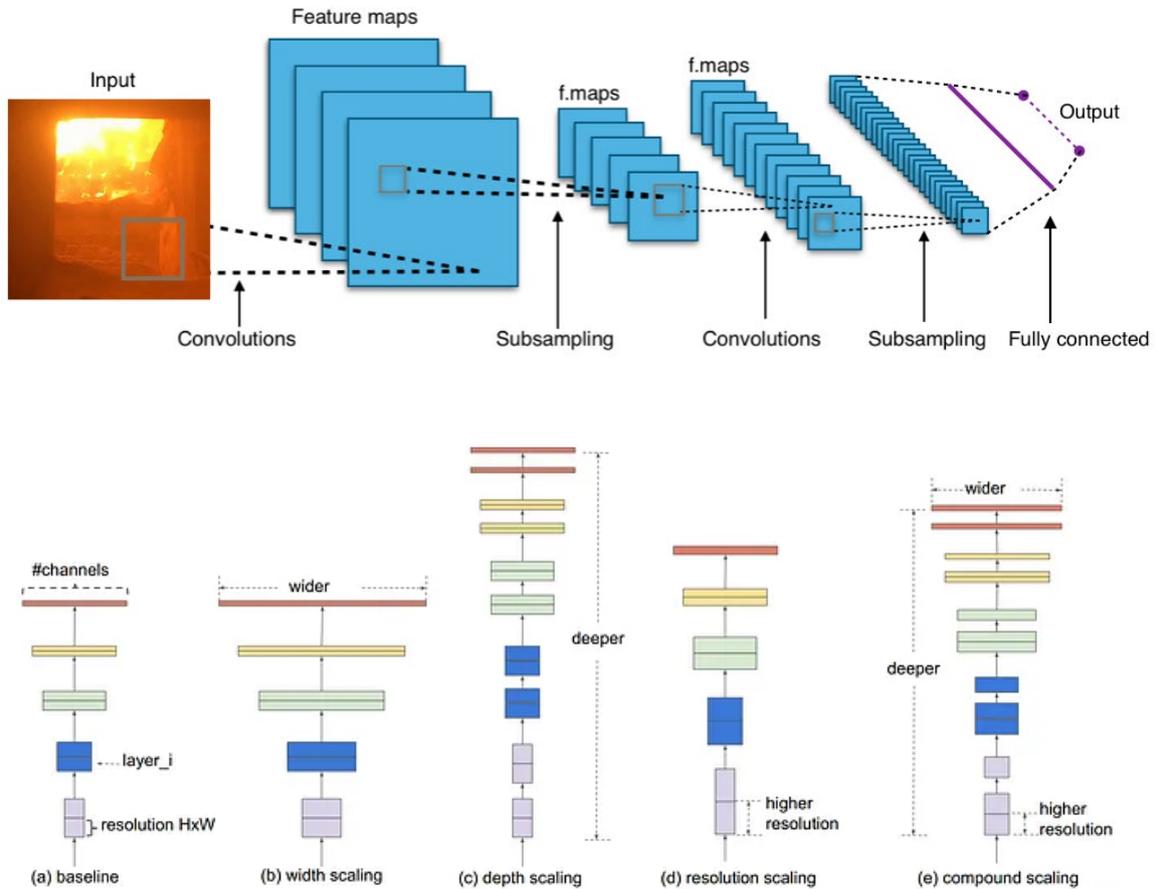


Figura 1. Arriba el esquema de una Red Neuronal de Convulación (CNN), y debajo un esquema de las redes propuestas (EfficientNet).

2.1 Localizador de ventana de caldera

2.1.1 Motivación

El EDA de cámara visual mostró la dificultad de automatizar la ingesta de datos de la cámara visual. Dado que la posición de la ventana que nos muestra el interior de la caldera cambia con el tiempo debido a la manipulación de los operarios, hemos optado por la incorporación de un modelo

	Modelos IA Cámara visual y térmica Termosun	Fecha: 15/12/2023
-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------	-----------------------------

adicional que nos permite localizar el interior de la caldera en cualquier región de la imagen capturada.



Figura 2. Imágen de muestra

2.1.2 Modelo

Para ello hemos generado un modelo de identificación de objetos (ventana a caldera). Hemos etiquetado manualmente un total de 311 imágenes de caldera del período considerando teniendo en cuenta que habíamos de incorporar imágenes de todos los tipos posibles. Las predicciones del modelo ya entrenado sobre un conjunto de test nos muestran la localización de ventanas de caldera con un nivel de seguridad del modelo (score) del 0 al 1. Vemos en encuadre propuesto para la ventana a la caldera y el valor de seguridad para cada determinación en la Figura 3.

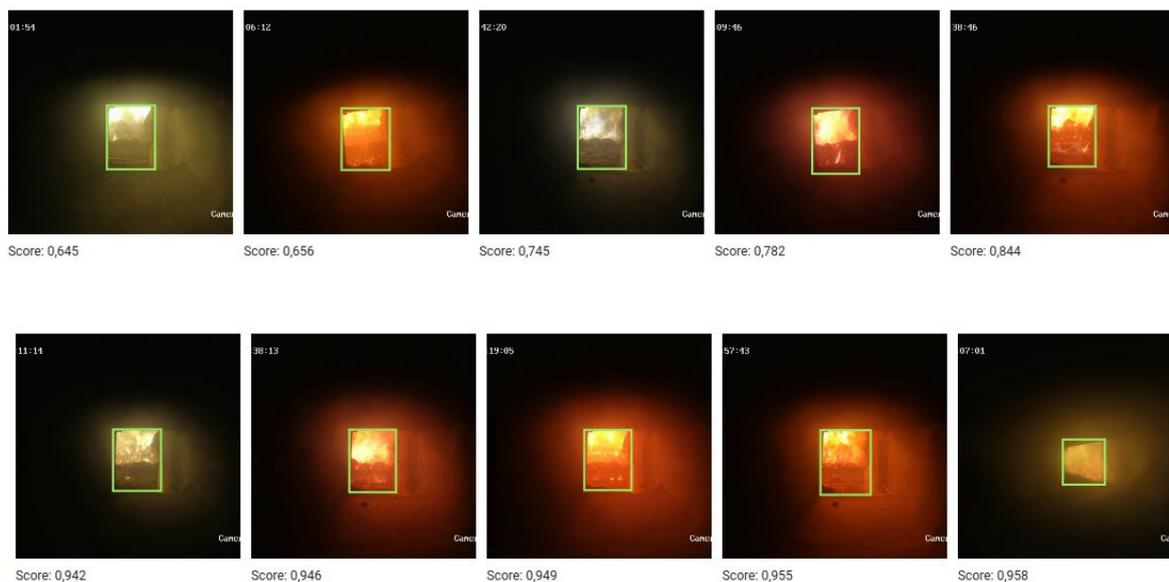


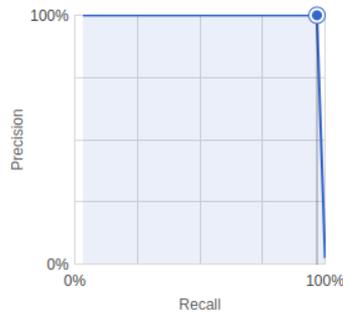
Figura 3. Vemos una buena identificación de la ventana de la caldera.

Podemos cuantificar la precisión del modelo y obtenemos la identificación de una región de llama rectangular con una cierta probabilidad. Si fijamos el valor de corte (threshold) a 0.5 nos indica que sólo consideraremos las ventanas rectangulares que el modelo considera que existen con una probabilidad superior al 50%. Las métricas del modelo nos indican una muy buena localización de la zona de llamas:

Average precision	0.958
Precision	100%
Recall	96.8%
Created	Nov 8, 2023, 5:23:06 PM
Total Images	311
Training images	249
Validation images	31
Test Images	31

To evaluate your model, set the **confidence threshold** to see how precision and recall are affected. The best confidence threshold depends on your use case. Read some [example scenarios](#) to learn how evaluation metrics can be used.

Precision-recall curve



Precision-recall by threshold

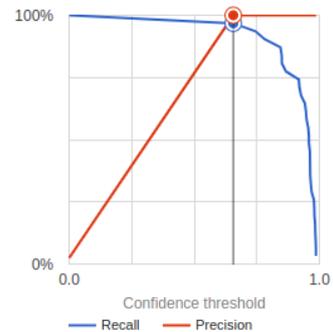


Figura 4. Curvas de precisión y recall del modelo con un *threshold* de 0.5. Podemos determinar con un 97% de acierto siempre

2.1.3 Uso práctico y justificación

Con el modelo hemos procesado un conjunto de 3.930 capturas de cámara visual y calculado la posición de la ventana de la caldera. En la Figura 5 mostramos la posición en la imagen de la ventana (bordes izquierdo y superior)

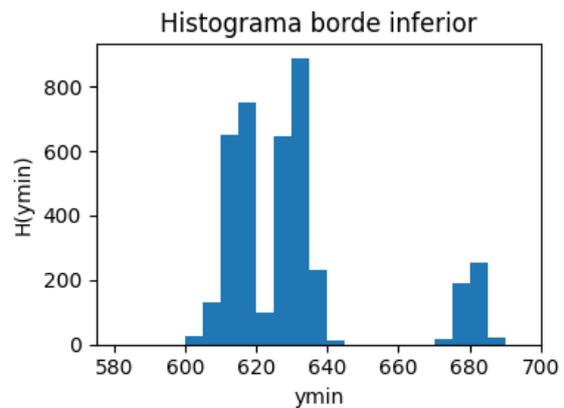
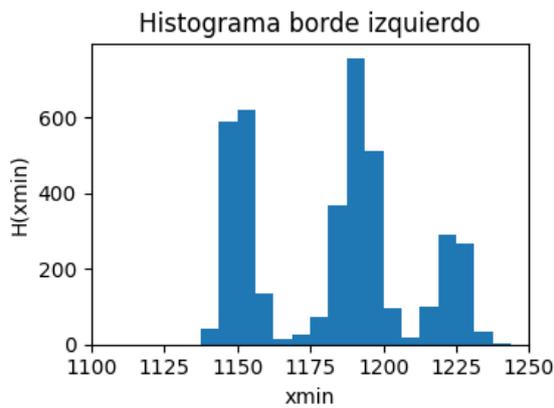


Figura 5. Localización de la ventana de la caldera a lo largo de 3 días de capturas de imágenes de la cámara visual.

Vemos que las posiciones no están centradas en un solo valor sino que aparecen distintos picos. Los picos nos indican cambios en la posición y orientación de la cámara.

El tamaño de la ventana al interior de la caldera también es un buen indicador de la posición y orientación de la cámara. En la figura 1 vemos como las mejores imágenes de caldera se corresponden más a rectángulos que a cuadrados. En las figuras 6 y 7 podemos ver la estadística detallada de las ventanas de caldera que indican que el tamaño de del recorte que nos aporta información es de aproximadamente 400x300.

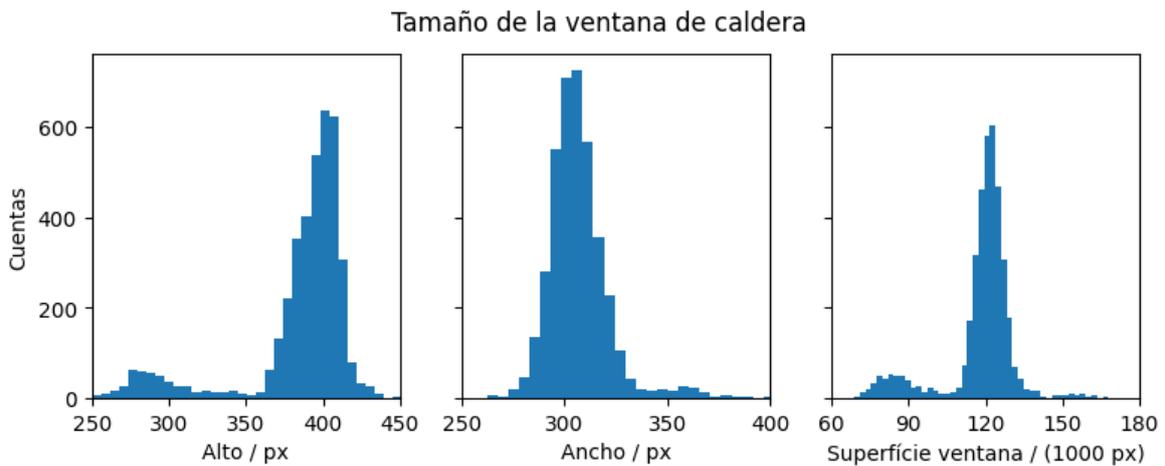


Figura 6. Estadística de las medidas de los recuadros de la ventana de la caldera. Los valores más típicos corresponden a un cuadrado de 400x300 píxeles.

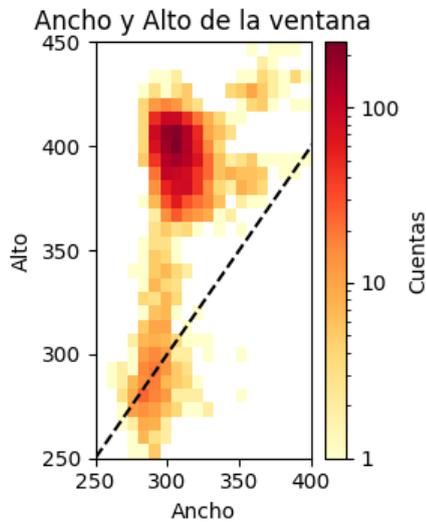


Figura 7: Histograma del valor conjunto Ancho y Alto de las identificaciones de las ventanas a la caldera. La línea punteada nos indica los puntos de ventana cuadrada.

2.2 Modelo de validación de Frame

2.2.1 Motivación

El cambio de la posición de la cámara se hace sólo esporádicamente. En este caso es útil tener un modelo más rápido que el detector de la ventana que valide si el recorte de ventana se corresponde o no al enfoque de la ventana.



Figura 8: Muestras de recuadros en los que se ve o no la ventana de la caldera.

2.2.2 Evaluación

Hemos entrenado un modelo que analiza si un recuadro incluye, o no, la ventana completa a la caldera. A continuación mostramos las métricas asociadas al modelo.

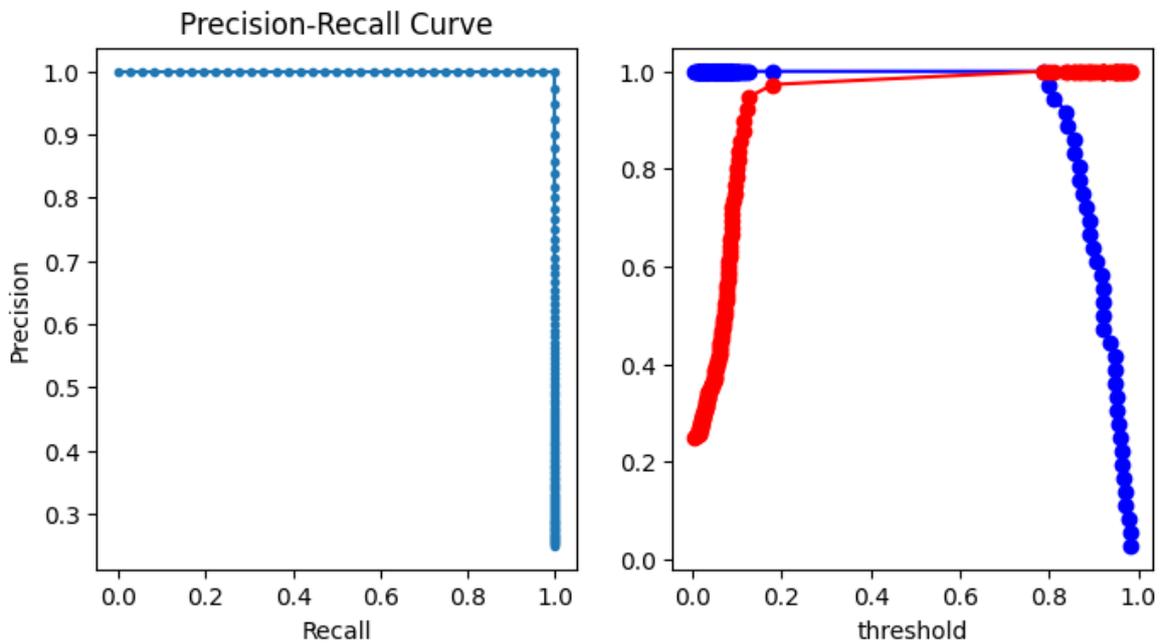


Figura 9. Métricas del modelo de determinación de ventana o no-ventana.

2.3 Modelo de validación de Llama

En total hemos capturado 3.930 imágenes de cadera y separado en conjuntos de entrenamiento, validación y test en una proporción de 70/15/15%. Hemos procesado las imágenes con el localizador de la ventana de la caldera. La localización de la ventana nos permite recortar la imagen, añadir un margen y fijar un tamaño de salida de imagen. Los modelos que entrenaremos validan la existencia o ausencia de llama en la imagen y la posición de la llama respecto a la profundidad de la caldera.

2.3.1 Motivación

Después de confirmar que estamos observando correctamente el interior de la caldera, necesitamos un modelo que nos indique si esta se encuentra encendida/apagada o si el interior

es o no visible. Puede ser que debido a la mala orientación de la cámara o la presencia de polvo el interior de la caldera no sea visible.

Para ello hemos definido un conjunto de capturas de llama bien distribuidas a lo largo de los 3 días de funcionamiento. Hemos separado las imágenes de los grupos de train, test y validación. El conjunto de test se utiliza para entrenar modelos, el de validación de emplea durante el proceso de entrenamiento para la obtención del modelo óptimo y el de test para la evaluación final del modelo entrenado.

2.3.2 Evaluación

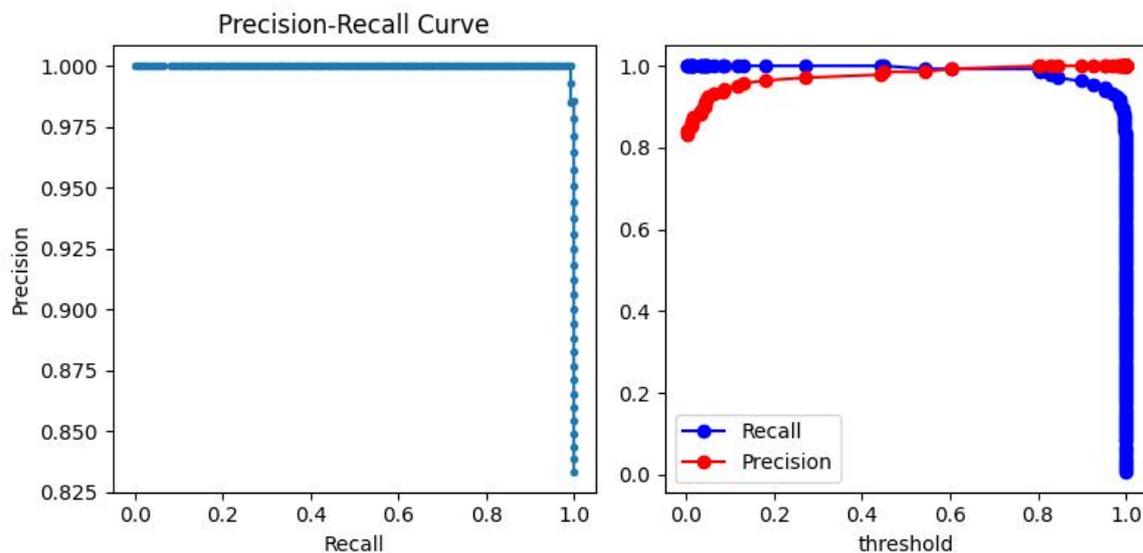


Figura 10. Curvas de precisión y recall del modelo validador de llama. Es un modelo de gran acierto.

	Modelos IA Cámara visual y térmica Termosun	Fecha: 15/12/2023
-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------	-----------------------------

2.4 Modelos de localización de Llama

En total hemos capturado 3.930 imágenes de cadera y separado en conjuntos de entrenamiento, validación y test en una proporción de 70/15/15%. Hemos procesado las imágenes con el localizador de la ventana de la caldera. La localización de la ventana nos permite recortar la imagen, añadir un margen y fijar un tamaño de salida de imagen. Los modelos que entrenaremos validan la existencia o ausencia de llama en la imagen y la posición de la llama respecto a la profundidad de la caldera.

2.4.1 Motivación

Después del EDA de cámara visual y comunicaciones con el personal que maneja la caldera consideramos que la localización de la llama es el modelo primordial y por lo tanto el que consideramos en esta fase del proyecto en la que no disponemos de una gran cantidad de imágenes. Por ello, juntamente con los operarios de la caldera, definimos 3 regiones de interés en la imagen del interior de la caldera. Si las llamas se encuentran por encima de la primera línea cyan clasificamos la posición de la llama como llama “atrás”. Para situaciones en las que la llama se encuentra entre las dos líneas cyan etiquetamos la llama en la posición “media” y finalmente, si la llama se encuentra por debajo de la última línea cyan consideramos la posición “delante” de la llama que es, al mismo tiempo, una situación de peligro y de combustión no óptima del material. En la Figura 11 mostramos una guía de etiquetado de la llama con las líneas de colores que actúan como guía al ojo para la clasificación manual de las imágenes.

img: 493



img: 986



img: 1994



img: 3245

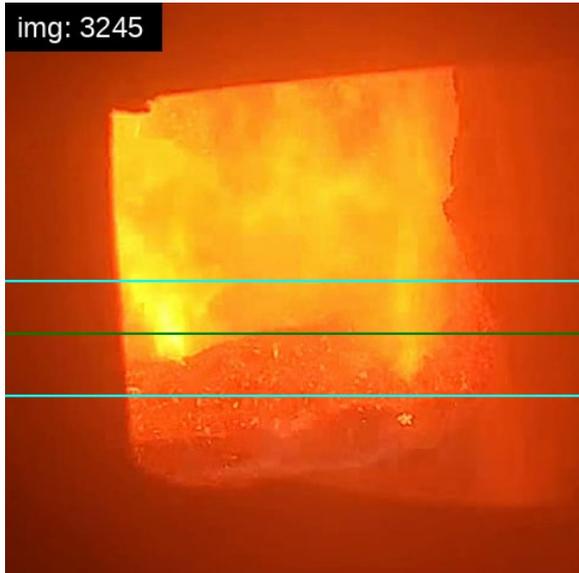


Figura 11. Ejemplo de imágenes de llama y guía de etiquetado con las líneas azul claro.

2.4.2 Evaluación

Hemos evaluado el modelo sobre el conjunto de test que contiene 649 imágenes. El resultado es de un acierto global del 84 % y, por categorías, del 92%, 78% y 57% para las posiciones detrás, en el medio, y delante.

A continuación, presentamos la matriz de confusión del clasificado en múltiples categorías. La matriz de confusión es una representación de los pares de valores de etiquetado (*true label*) y predicción (*predicted label*) para cada una de las imágenes de test. El resultado de la evaluación de los pares etiqueta predicción da lugar a la matriz de confusión con las clasificaciones que se corresponden al valor de etiquetado en la diagonal de la misma.

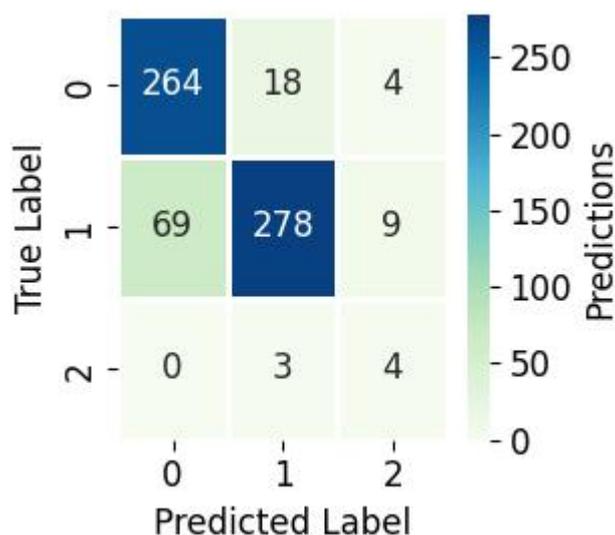


Figura 12. Matriz de confusión sobre las imágenes de test. Representa una accuracy global del 84 %.

Vemos que la capacidad de predicción de posición de llama en la parte delantera no es excesivamente alta, pero aun así y dado el bajo volúmen de datos el modelo es capaz de hacer

	Modelos IA Cámara visual y térmica Termosun	Fecha: 15/12/2023

predicciones de posición de llama delantera. A continuación, de la figura 13 a la 18, mostramos imágenes de la clasificación correcta e incorrecta de la posición de la llama.



Figura 13. Aciertos Etiqueta (0). La llama está detrás.



Figura 14. Fallos Etiqueta (0). La llama está detrás.



Figura 15. Aciertos Etiqueta (1). La llama está en el medio.



Figura 16. Fallos Etiqueta (1). La llama está en el medio.



Figura 17. Aciertos Etiqueta (2). La llama está delante.



Figura 18. Aciertos Etiqueta (2). La llama está delante.

3 Modelo para la Cámara Térmica

	Modelos IA Cámara visual y térmica Termosun	Fecha: 15/12/2023
-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------	-----------------------------

Las imágenes de la cámara térmica muestran el interior de la caldera. Los datos de caldera incorporan distintas sondas de temperatura situadas en el interior de la caldera. Mediante la cámara térmica, podemos medir la temperatura de la llama con más exactitud. El modelo que presentamos de gradientes de temperatura se detalla a continuación:

3.1 Modelo de gradientes de temperatura

Los datos en 2 dimensiones de la temperatura local e instantánea de la caldera nos aportan información hasta ahora inaccesible mediante la colocación de sondas en la caldera.

En este sentido, y como complemento a las medidas de la instrumentación de la caldera aportamos una red de puntos dentro del campo de visión de la cámara térmica que nos indican la temperatura en distintas zonas de llama, brasa y refractario.

4 Conclusiones

Los modelos desarrollados nos permiten la evaluación a tiempo real de la determinación de presencia y posición de la llama en el interior de la caldera. El sistema es robusto a cambios de encuadre de la región de interés y nos aporta información fiable de la posición de la base de la llama. Esto permite al operario decidir si hay que avanzar, o no, el material de combustión. La ausencia de datos en distintos regímenes de funcionamiento, es decir, la captura conjunta de datos a lo largo de varios meses, no nos permiten combinar con fiabilidad los datos visuales del interior de la caldera con las lecturas de PLC para el desarrollo del modelo de vigilante ni para el generador de estados de combustión óptima.

5 Mejoras de los modelos

Existe una mejora potencial en cuanto a la incorporación de los datos de la cámara térmica y la cámara visual a los modelos de monitorización de la caldera.

	Modelos IA Cámara visual y térmica Termosun	Fecha: 15/12/2023
-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------	-----------------------------

El uso de los datos de temperatura por cámara de infrarrojos puede ser usada en versiones mejoradas del mecanismo automático de diagnóstico del funcionamiento de caldera (el modelo de vigilante) y para el modelo generador de nuevas configuraciones de funcionamiento de la caldera. La información de la posición de la llama, así como un potencial modelo visor de la gasificación a tiempo real también puede incorporada en dichas versiones mejoradas del mecanismo automático de diagnóstico y optimización del funcionamiento de la caldera.