MEJORAS EN LAS NUEVAS TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA DETECCIÓN DE ANOMALÍAS EN REACTORES NUCLEARES (INAIA)

Empar Navarro Gamón
emnaga@upvnet.upv.es

Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM)
Universitat Politècnica de València

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Jornada Anual de I+D+i
11 de Junio 2026

isirym

ÍNDICE

→ Motivación

→ Objetivos

→ Librerías empleadas

→ Datos simulados

→ Diseño de las Redes Neuronales

→ Evaluación y Resultados

→ Conclusiones

MOTIVACIÓN

Analizar el ruido neutrónico en reactores nucleares mediante técnicas de monitorización no invasivas.

Detección y ubicación de las perturbaciones causadas por las fluctuaciones de las propiedades del refrigerante y/o vibraciones de los elementos combustibles.

OBJETIVOS

Objetivo principal:

→ Desarrollar herramientas basadas en técnicas de “Deep Learning” para estudiar y monitorizar el estado del núcleo.

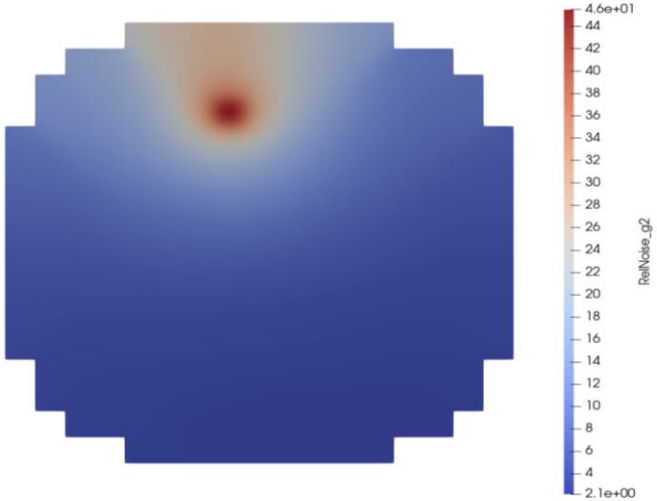
Objetivos parciales:

→ Detectar el tipo de perturbación que es.

→ Detectar el lugar donde se ha producido la perturbación.

→ Estudiar el nivel máximo de ruido en la señal que se puede llegar a clasificar correctamente.

→ Estudiar cómo afecta la disminución de detectores activos a la eficiencia.



Distribución radial del ruido neutrónico en el reactor BIBLIS 2D obtenido en FEMFFUSION

LIBRERÍAS EMPLEADAS

Librería para "Deep Learning":

→ **Tensorflow** a través del API **Keras**.

→ Lenguaje **Python**.

→ Soporte para **GPU** (NVIDIA GeForce RTX 4060. CUDA 13.0)

Librería para generar los datos de entrenamiento:

→ **FEMFFUSION**

→ Código de elementos finitos para el modelado de sistemas nucleares.

→ Escrito en lenguaje C++.

→ Librería Open Source desarrollada en la Universitat Politècnica de València.

FEMFFUSION
a finite element method code for nuclear reactor modelling

https://femffusion.webs.upv.es

DATOS SIMULADOS

CASO 2D: REACTOR BIBLIS 2D

→ Número de celdas: 257

→ Número de detectores activos: hasta 257

→ Tipos de perturbaciones introducidas:

→ Cambio en la **sección eficaz de dispersión**.

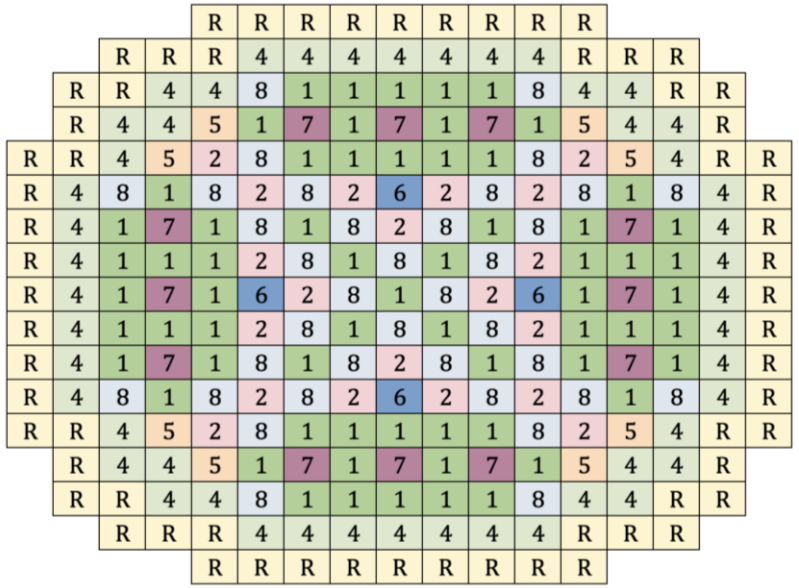
$$\Sigma_s(t) = \Sigma_s(0) + 0.01\Sigma_s(0)\sin(2\pi f t)$$

→ Cambio en la **sección eficaz de absorción**.

$$\Sigma_a(t) = \Sigma_a(0) + 0.01\Sigma_a(0)\sin(2\pi f t)$$

→ Para frecuencias: $f = 0.1, 0.5, 1, 5, 10\ Hz$

TOTAL: 2570 SEÑALES



Geometría del rector BIBLIS 2D donde se describen los distintos materiales que lo componen, con las secciones eficaces homogenizadas y dadas para 2 grupos de energía.

CASO 2D: REACTOR BIBLIS 2D

→ Obtenemos de cada perturbación:

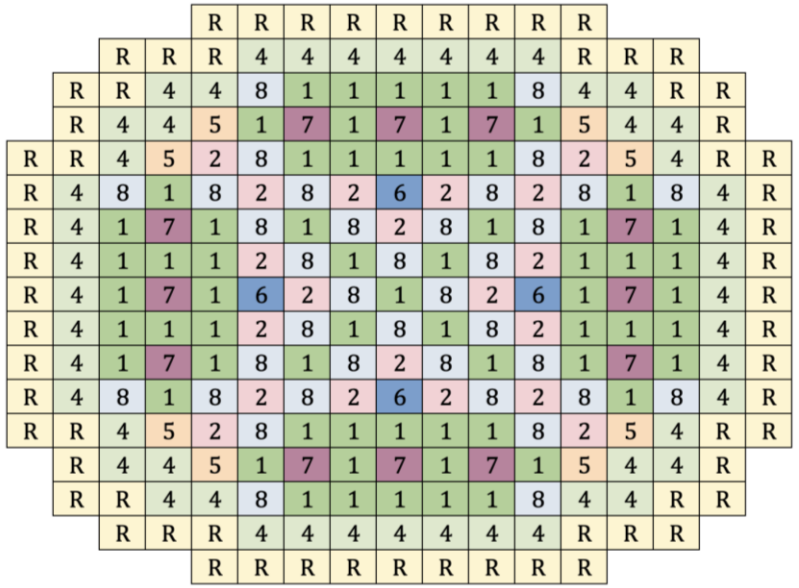
I. Potencia Neutrónica.

II. Flujo neutrónico del grupo 1 (ϕ_1).

III. Flujo neutrónico del grupo 2 (ϕ_2).

IV. Ruido Neutrónico del grupo 1 ($\delta\phi_1$).

V. Ruido Neutrónico del grupo 2 ($\delta\phi_2$).



Geometría del rector BIBLIS 2D donde se describen los distintos materiales que lo componen, con las secciones eficaces homogenizadas y dadas para 2 grupos de energía.

CASO 2D: REACTOR BIBLIS 2D

→ Aplicación de técnica de "**data augmentation**": Additive White Gaussian Noise (**AWGN**)

→ Evitar el sobreajuste del entrenamiento ("**overfitting**").

→ Evitar basarnos solamente en datos "ideales".

→ AWGN como distribución normal de media 0 y desviación típica de 1: $\mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{1})$.

→ Nivel de ruido: de 5% hasta 25% en incrementos de 2.5%

TOTAL: 25700 SEÑALES

$$\frac{|\delta\phi_2|}{\phi_2}$$

DATOS SIMULADOS

CASO 3D: REACTOR IAEA 3D

→ Número de celdas: 4579

→ Número de detectores activos: hasta 4579

→ Tipos de perturbaciones introducidas:

→ Cambio en la **sección eficaz de dispersión**.

$$\Sigma_s(t) = \Sigma_s(0) + 0.01\Sigma_s(0)\sin(2\pi f t)$$

→ Cambio en la **sección eficaz de absorción**.

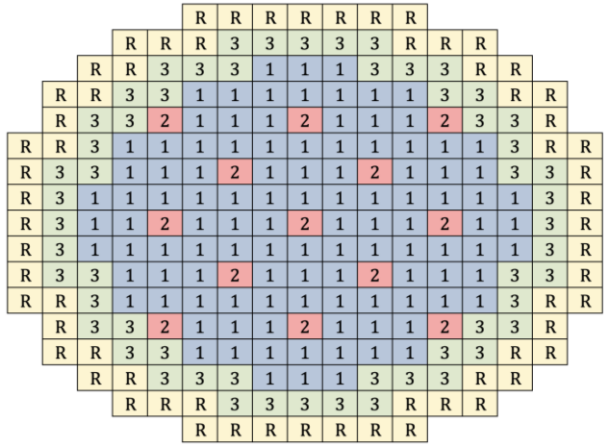
$$\Sigma_a(t) = \Sigma_a(0) + 0.01\Sigma_a(0)\sin(2\pi f t)$$

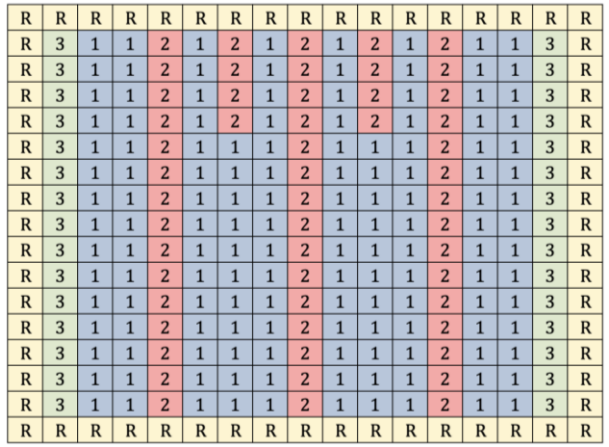
→ Cambio en la **velocidad axial**.

$$v(m/s) = 100, 200, 300, 400, 500$$

→ Para frecuencias: $f = 0.1, 0.5, 1\ Hz$

TOTAL: 31089 SEÑALES





Geometría del rector 3D-IAEA donde se describen los distintos materiales que lo componen, con las secciones eficaces homogenizadas y dadas para 2 grupos de energía.

CASO 3D: REACTOR IAEA 3D

→ Aplicación de técnica de "**data augmentation**": Additive White Gaussian Noise (**AWGN**)

→ Evitar el sobreajuste del entrenamiento ("**overfitting**").

→ Evitar basarnos solamente en datos "ideales".

→ AWGN como distribución normal de media 0 y desviación típica de 1: $\mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{1})$.

→ Nivel de ruido: de 5% hasta 25% en incrementos de 2.5%

TOTAL: 310890 SEÑALES

$$\frac{|\delta\phi_2|}{\phi_2}$$

DISEÑO DE LAS REDES NEURONALES

Distribución de detectores activos:

→ **13 máscaras** de detectores activos:

a. Si la celda no tiene detector activo: valor a 0

b. Si la celda tiene detector activo: valor a 1

→ Distribución **equiespaciada** de:

→ 0, 4, 8, 16, 24, 32, 46, 64, 82, 97, 128, 184, 257

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Distribución de los 8 valores activos con los que la red entrena para cada distribución de flujo perturbado.

DISEÑO DE LAS REDES NEURONALES

Tipos de Redes Convolucionales:

→ Clase **Secuencial**: permite entrenar **por separado** la localización y la identificación.

→ Clase **Model**: permite entrenar de **forma acoplada** la localización y la identificación.

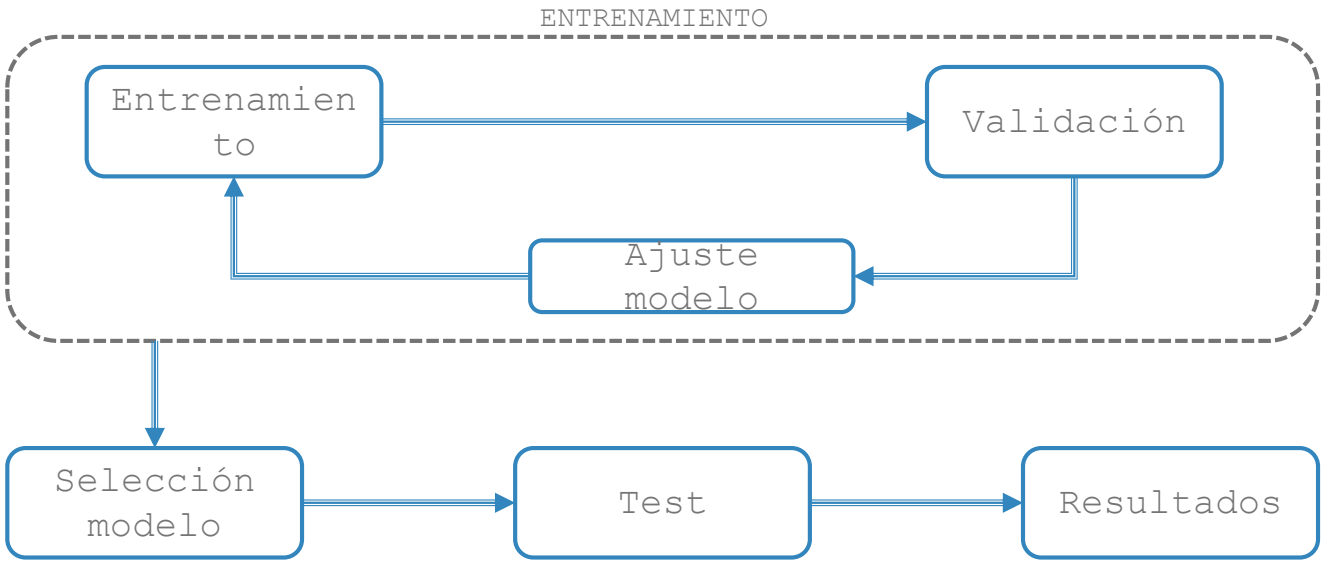
→ Nos permiten conservar la información espacial.

División de datos en 3 conjuntos:

→ Entrenamiento: 73%

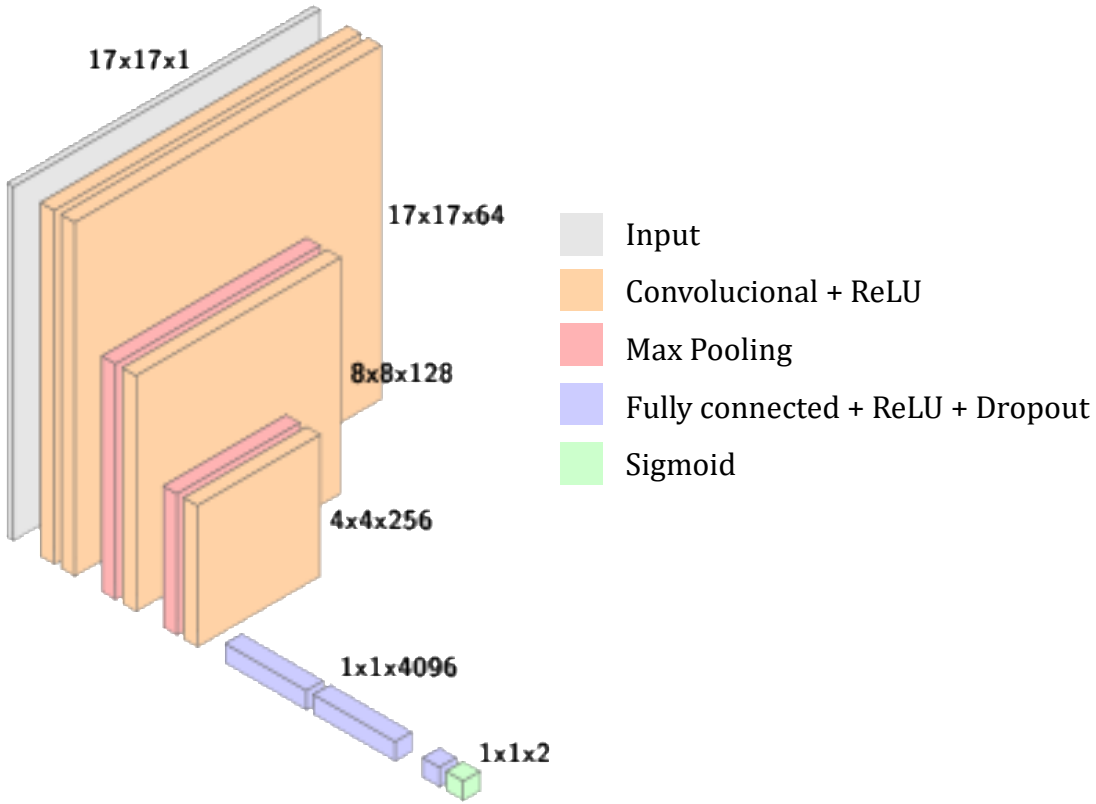
→ Validación: 12%

→ Test: 15%

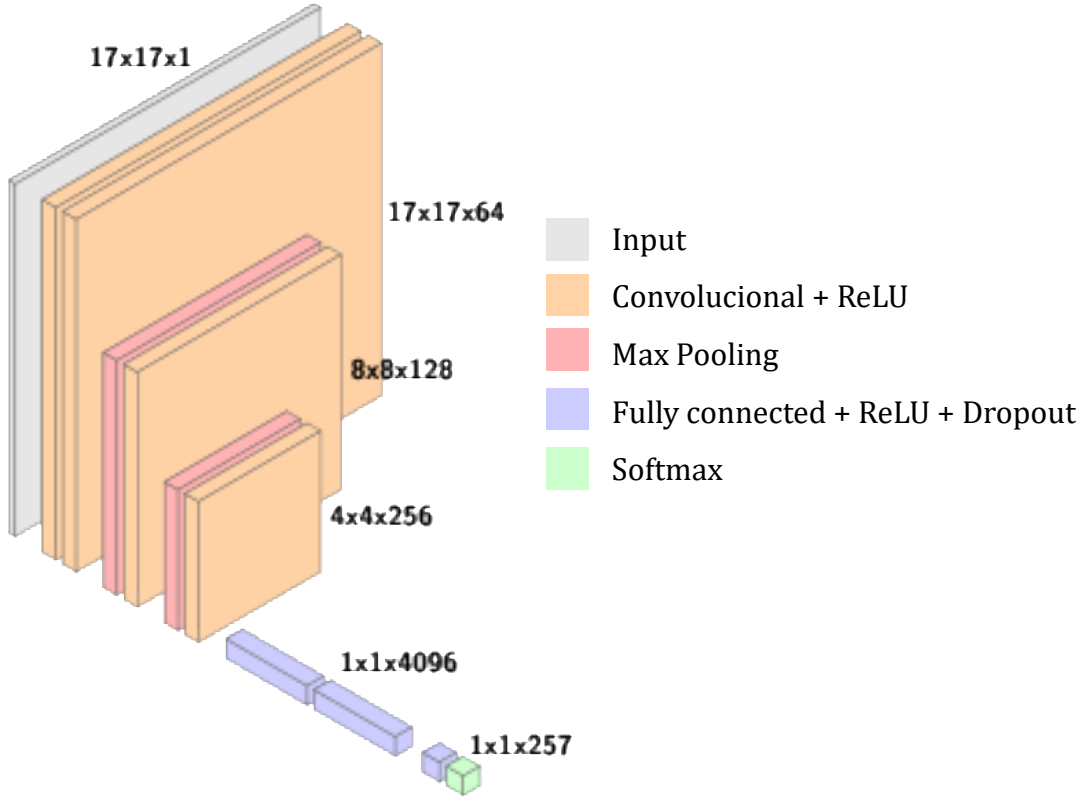


PUNTO DE PARTIDA 2D: Estructura basada en la Red VGG16

Clasificación



Localización



PUNTO DE PARTIDA 2D: Precisión de los resultados

Sin AWGN

Detectores	Clasificación	Localización
4	50.6%	92.0%
8	60.1%	95.9%
12	65.6%	96.1%
20	85.3%	99.5%
36	81.0%	99.4%
48	-	100%
65	93.8%	99.9%
257	100%	100%

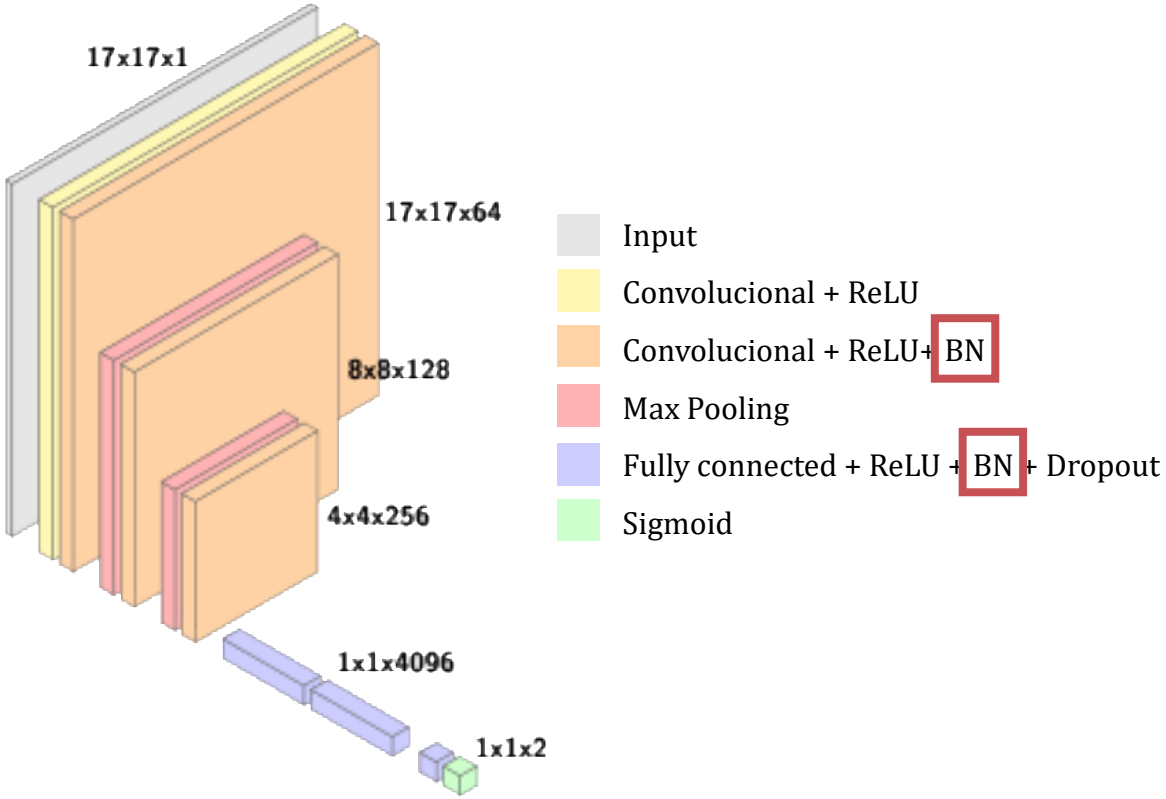
Con AWGN

Detectores	Clasificación	Localización
4	50.0%	37.0%
8	50.0%	61.6%
12	54.7%	73.2%
20	60.8%	84.2%
36	70.0%	82.0%
48	-	96.6%
65	78.4%	91.1%
257	100%	100%

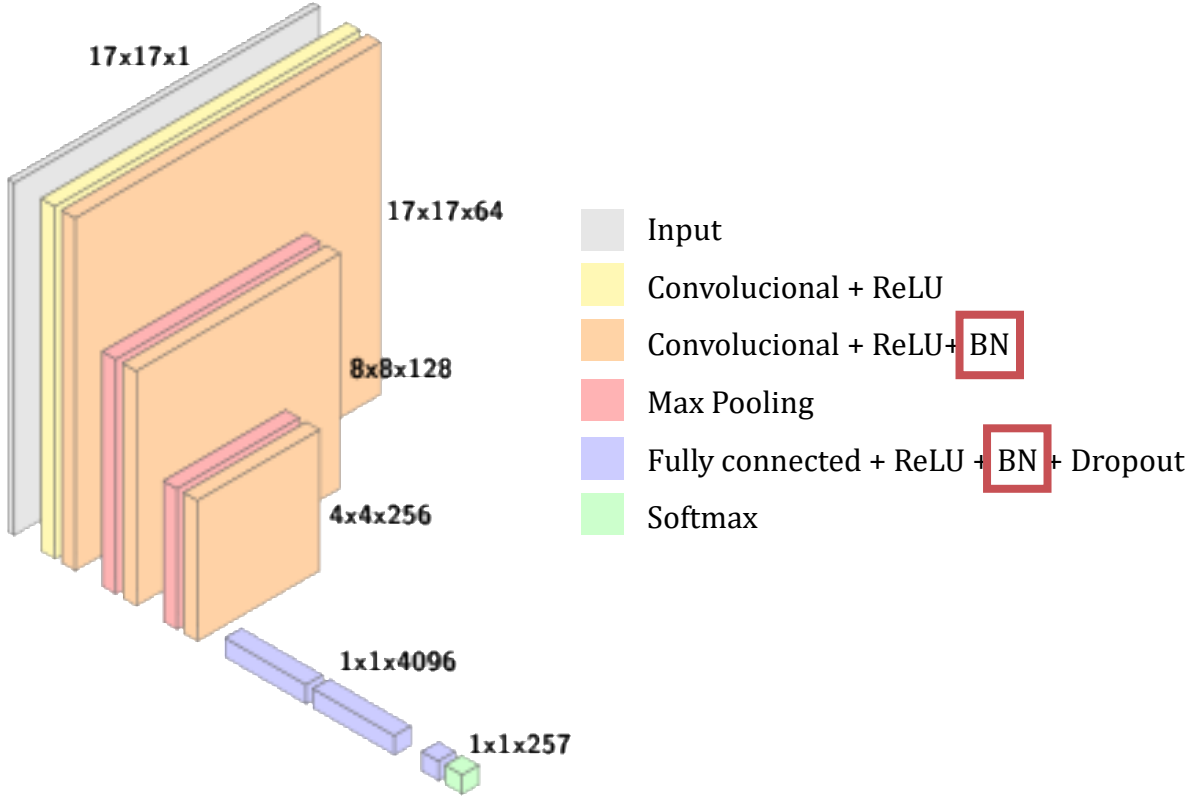
DISEÑO DE LAS REDES NEURONALES

CASO 2D: REACTOR BIBLIS 2D

Clasificación



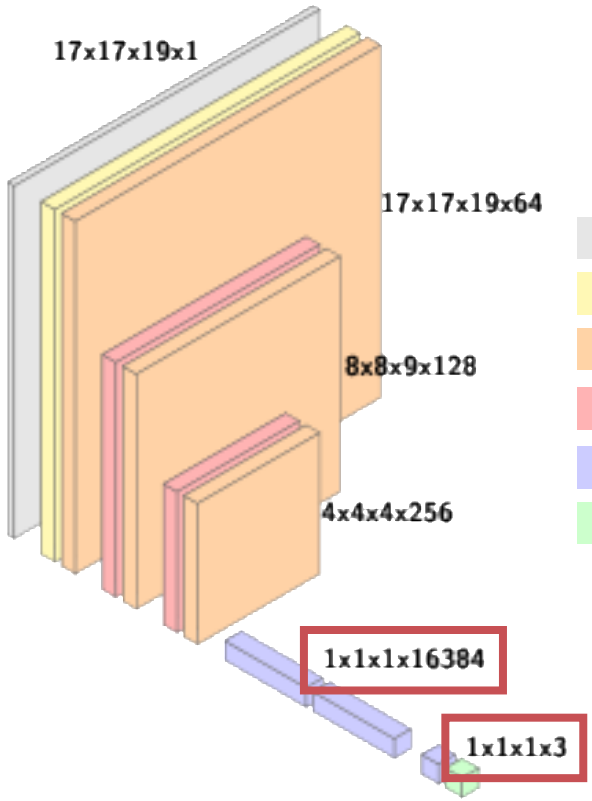
Localización



DISEÑO DE LAS REDES NEURONALES

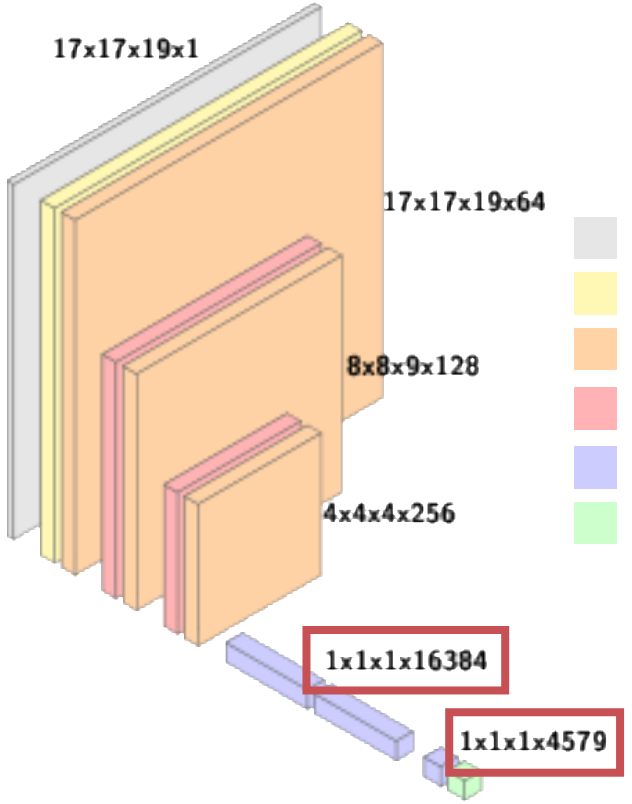
CASO 3D: REACTOR IAEA 3D

Clasificación



- Input
- Convolucional + ReLU
- Convolucional + ReLU+ BN
- Max Pooling
- Fully connected + ReLU + BN + Dropout
- Softmax

Localización

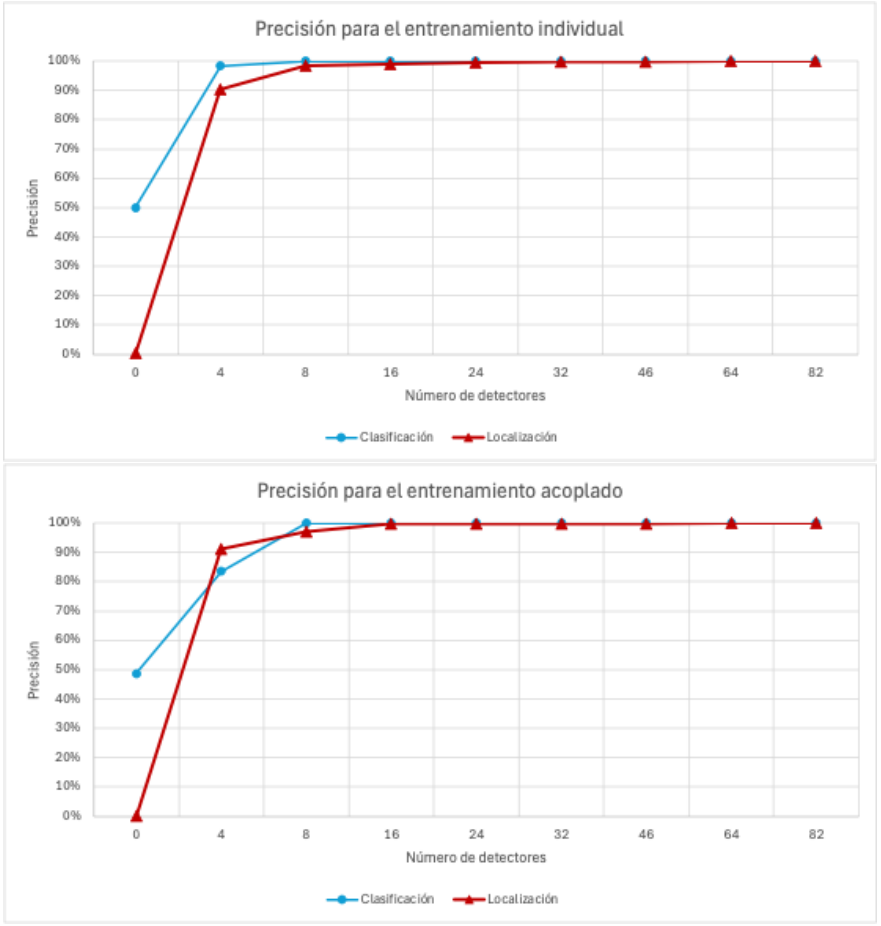


- Input
- Convolucional + ReLU
- Convolucional + ReLU+ BN
- Max Pooling
- Fully connected + ReLU + BN + Dropout
- Softmax

CASO 2D: REACTOR BIBLIS 2D

Nivel de AWGN = 25%

	Entrenamiento individual		Entrenamiento Acoplado	
Detectores	**Clasificación**	**Localización**	**Clasificación**	**Localización**
0	50.01%	0.39%	48.72%	0.28%
4	98.31%	90.35%	83.58%	91.10%
8	99.95%	98.52%	100%	97.04%
16	100%	99.04%	100%	99.69%
24	100%	99.56%	100%	99.69%
32	100%	99.69%	100%	99.77%
46	100%	99.71%	100%	99.79%
64	100%	99.97%	100%	99.97%
82	100%	100%	100%	100%
97	100%	100%	100%	100%
128	100%	100%	100%	100%
184	100%	100%	100%	100%
257	100%	100%	100%	100%

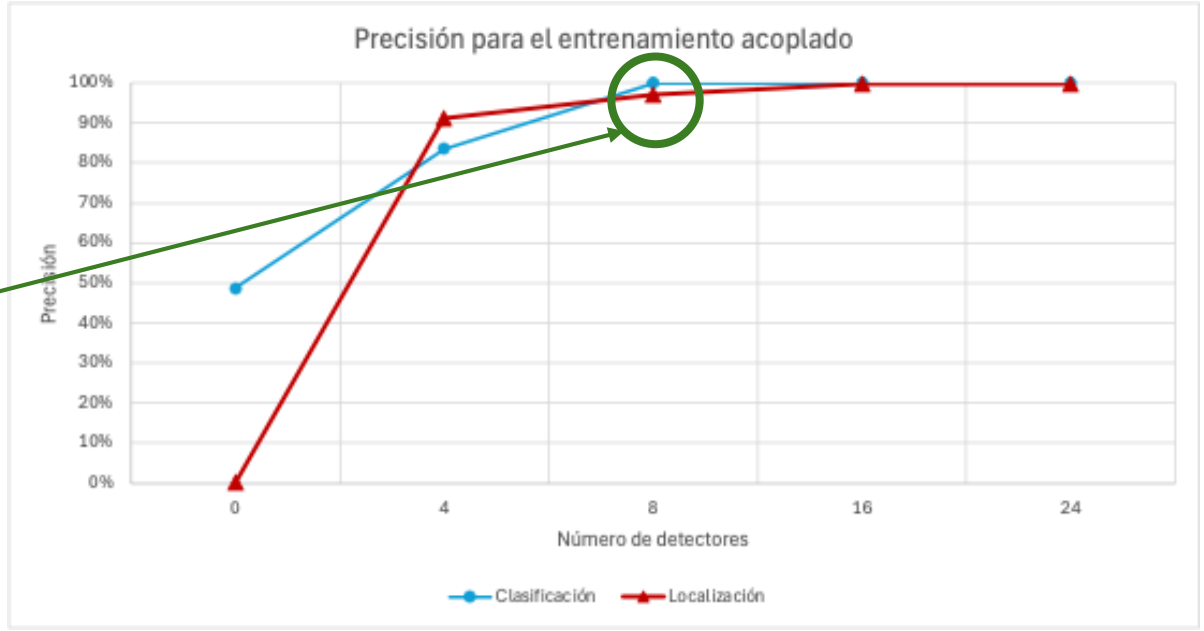


Precisión de los entrenamientos para el reactor BIBLIS 2D en función del número de detectores

CASO 2D: REACTOR BIBLIS 2D

Nivel de AWGN = 25%

	Entrenamiento individual		Entrenamiento Acoplado	
Detectores	**Clasificación**	**Localización**	**Clasificación**	**Localización**
0	50.01%	0.39%	48.72%	0.28%
4	98.31%	90.35%	83.58%	91.10%
8	**99.95%**	**98.52%**	**100%**	**97.04%**
16	100%	99.04%	100%	99.69%
24	100%	99.56%	100%	99.69%
32	100%	99.69%	100%	99.77%
46	100%	99.71%	100%	99.79%
64	100%	99.97%	100%	99.97%
82	100%	100%	100%	100%
97	100%	100%	100%	100%
128	100%	100%	100%	100%
184	100%	100%	100%	100%
257	100%	100%	100%	100%

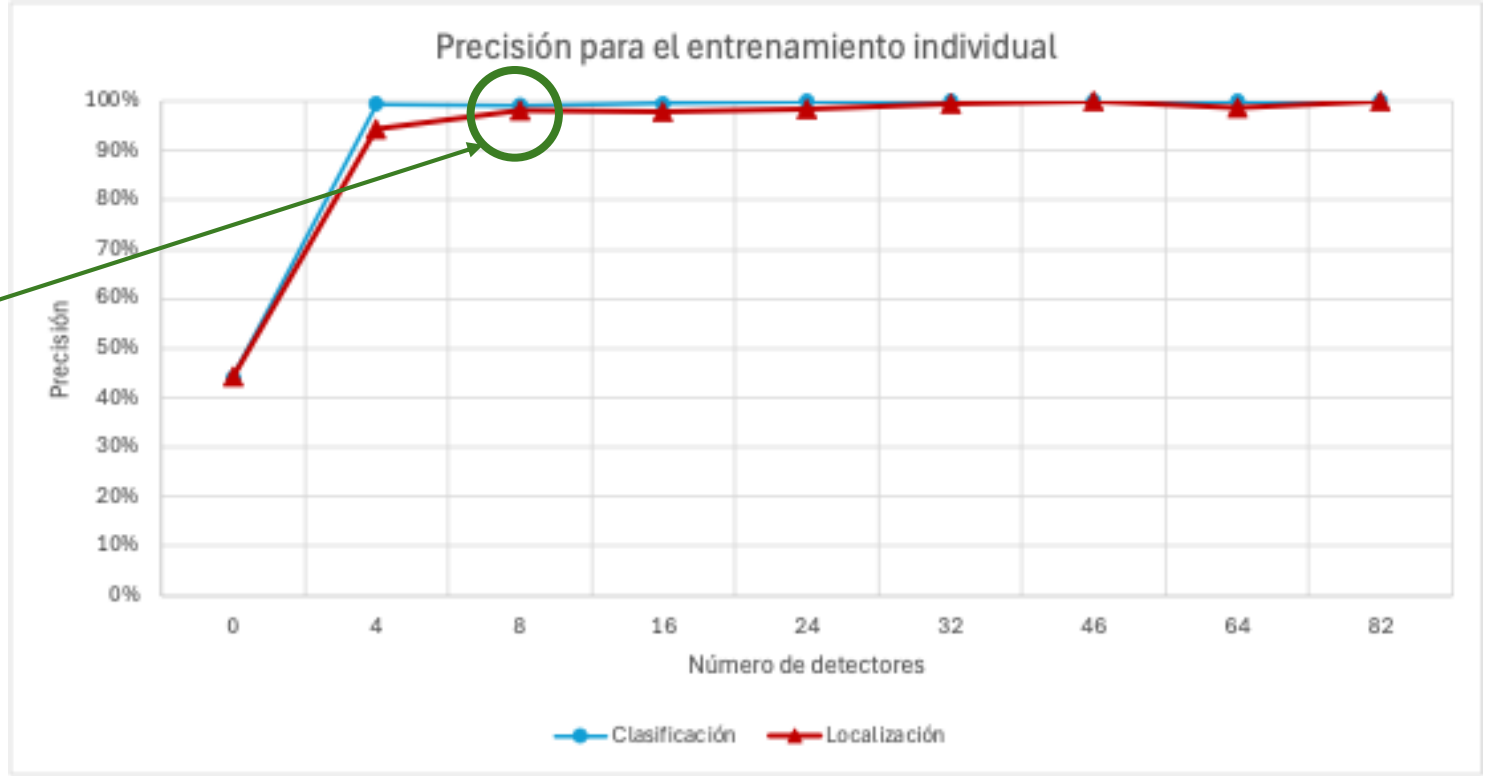


Precisión del entrenamiento acoplado para el reactor BIBLIS 2D en función del número de detectores

CASO 3D: REACTOR IAEA 3D

Nivel de AWGN = 25%

	Entrenamiento individual	
Detectores	**Clasificación**	**Localización**
0	44.18%	44.19%
4	99.39%	94.34%
8	**99.11%**	**98.26%**
16	99.57%	97.80%
24	100%	98.47%
32	100%	99.48%
46	100%	100%
64	100%	98.72%
82	100%	99.97%
97	100%	100%
128	100%	100%
184	100%	100%
257	100%	100%



Precisión del entrenamiento individual para el reactor IAEA 3D en función del número de detectores.

CONCLUSIONES

→ Se han desarrollado Redes Neuronales Convolucionales capaces de identificar y localizar perturbaciones en reactores 2D y 3D.

→ Se observa una relación directa entre la precisión del entrenamiento y el número de detectores activos, siendo más preciso el entrenamiento cuantos más detectores hay presentes. No obstante, para ambos casos de estudio, la mejora deja de ser relevante a partir de los 24 detectores, luego se conviene que con 8 detectores la precisión sería suficiente.

→ Se ha evaluado la importancia del pre-proceso de datos. La correcta generación y preparación de los datos ha sido fundamental para alcanzar las precisiones mostradas. Emplear técnicas para evitar el sobreajuste de las redes y aumentar la cantidad de datos de entrada es esencial para el obtener resultados óptimos.

MEJORAS EN LAS NUEVAS TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA DETECCIÓN DE ANOMALÍAS EN REACTORES NUCLEARES (INAIA)

Empar Navarro Gamón
emnaga@upvnet.upv.es

Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM)
Universitat Politècnica de València

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Jornada Anual de I+D+i
11 de Junio 2026

isirym