

Identificación de pulsos de rayos X emitidos desde dispositivos plasma foco, utilizando antenas UHF e Inteligencia Artificial

Orellana L.^{1*}, Avaria G.^{2,3†}, Ardila J.¹, Davis S.^{2,3}, Cevallos B.¹, Pavez C.^{2,3}, Soto L.^{2,3}

¹ Depto. Ing. Eléctrica, Universidad Técnica Federico Santa María, 8940000, Santiago, Chile.

² Comisión Chilena de Energía Nuclear, Casilla 188-D, Santiago, Chile.

³ Departamento de Ciencias Físicas, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Andrés Bello, Republica 220, Santiago 8370035, Chile.

*luis.orellanag@alumnos.usm.cl

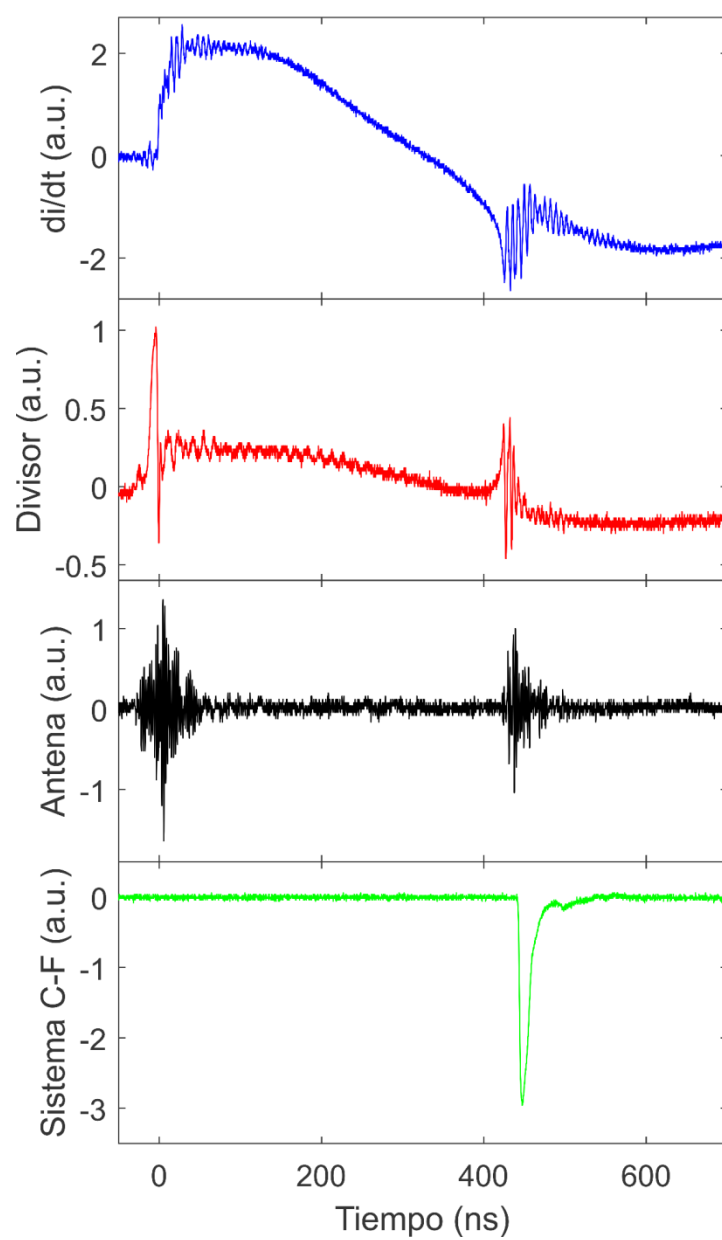
†gonzalo.avaria@cchen.cl

Resumen

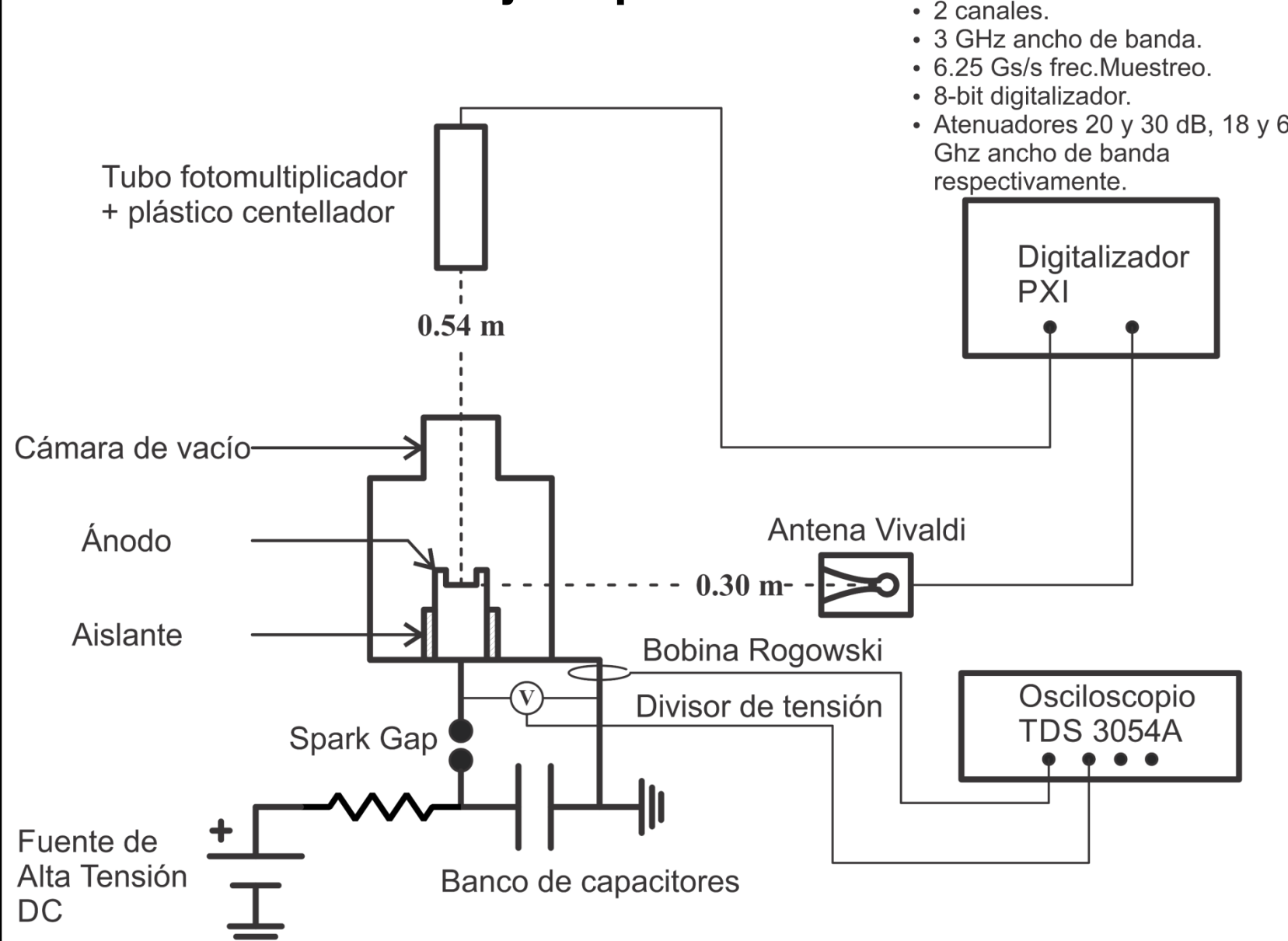
Se presentan los resultados de la medición simultánea de la radiación de radiofrecuencia en el rango UHF y de pulsos de rayos X, ambos producto de la operación de un dispositivo plasma foco de baja energía PF400J [1] (207 J, 22 kV, 6.5 mbar, 100% hidrógeno). Previamente Gerdin et al [2] y Escalona et al [3] midieron las radiaciones en radiofrecuencia, hasta microondas, utilizando antenas bocina y dipolo, respectivamente, pero sin correlacionar esta medición con la detección de rayos X. En este trabajo, para medir la radiación UHF se utiliza una antena Vivaldi ubicada en el exterior del dispositivo y, simultáneamente, se mide el conteo de rayos X con un sistema centellador-fotomultiplicador (C-F) también ubicado en el exterior. Debido a la cantidad de datos obtenida, 1199 disparos, y las diferentes formas de onda, tanto de antena como del C-F, se implementó un algoritmo de inteligencia artificial para encontrar patrones que relacionen estas señales. El algoritmo de inteligencia artificial es basado en Deep Learning [4]. Los resultados muestran que el algoritmo puede identificar, con considerable exactitud y en base a solamente la señal de antena, si hubo o no un pulso de rayos X y, en una cantidad significativa de casos, también puede determinar un rango para su intensidad de pulso o conteo de fotones de rayos X. La conclusión de este trabajo es que hay cierta correlación entre la radiación UHF emitida en el exterior del plasma foco y el conteo de fotones de rayos X, sin embargo, se requiere en el futuro determinar el mecanismo físico responsable de esto.

Descarga plasma foco: PF400J

- Tensión de carga: 22 kV
- Presión: 6.5 mbar
- Gas: Hidrógeno 100 %
- Sin barras de cátodo

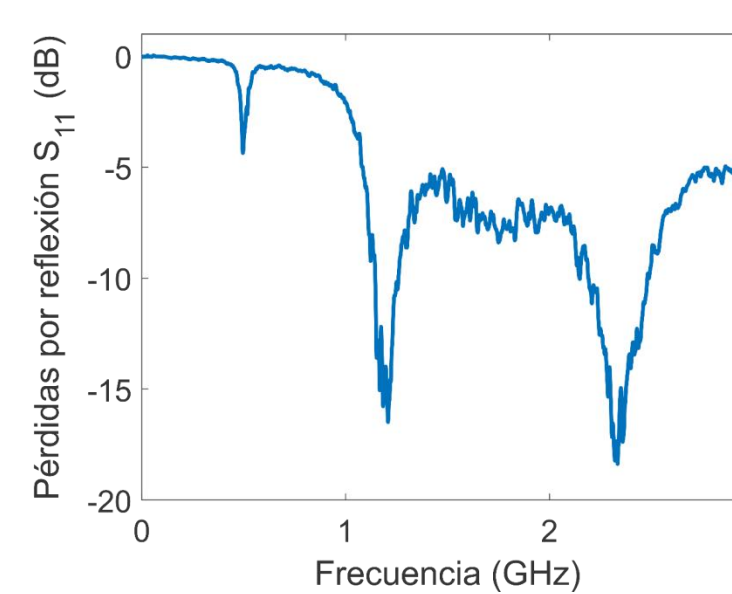
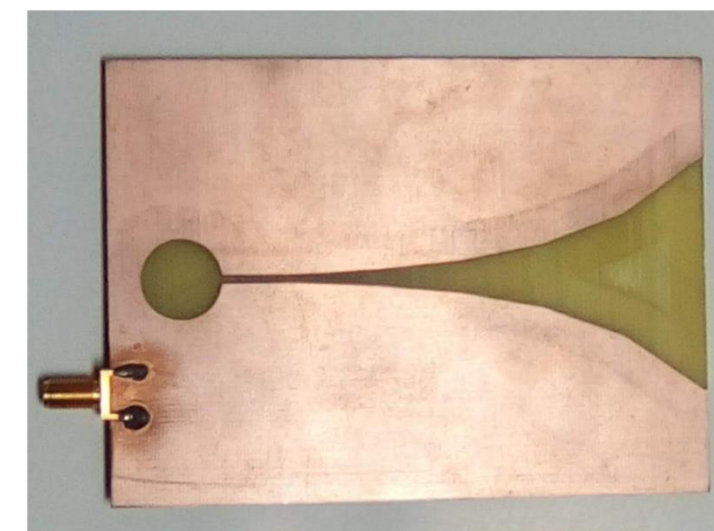


Montaje experimental



Antena Vivaldi

- Diseño plano en placa de circuito electrónico.
- Forma con abertura exponencial.
- Buena recepción en el rango de radiofrecuencia UHF: resonante en 500 Mhz y en banda entre 1.2 - 2.3 Ghz.
- Mejor recepción en dirección de la abertura (alta directividad).

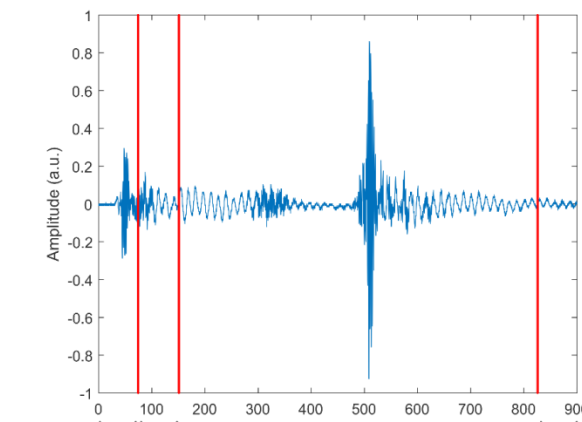


Preparación de datos y clasificación según pulso de detección de rayos X

- Para normalizar las señales de antena entregadas al algoritmo se sustrae el valor medio de cada señal de antena y se ajusta para que todas las señales tengan valores entre -1 y 1.

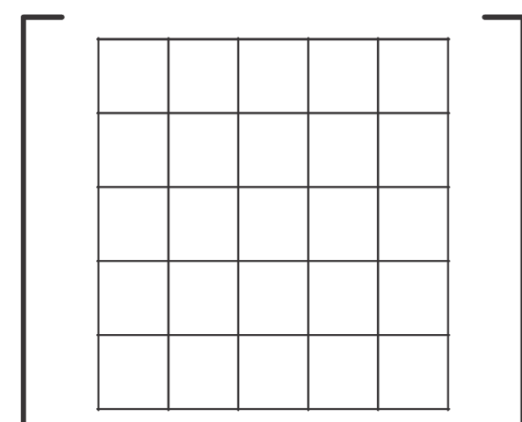
- La entrada del algoritmo requiere una matriz, por lo que cada señal se divide en tramos donde cada uno de estos pasa a ser una columna de la matriz para el algoritmo.

Señales antena: vector 1D (5625x1)



Columnas: (75x1)

Input del algoritmo: Matriz 2D (75x75)



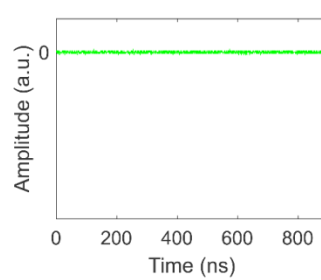
- La presencia de un pulso en la señal eléctrica del fotomultiplicador es indicador de la emisión de rayos X durante la descarga.

- La desviación estándar (S) se escoge como el parámetro que representa a la señal del fotomultiplicador. Este parámetro entrega la medida del tamaño del pulso respecto del ruido base, nivel 0.

- Se normaliza respecto de la desviación estándar de un disparo donde no hubo pulso apreciable (S_norm).

- Adicionalmente se proponen categorías según el valor de S_norm, es decir, relacionados con la cantidad de fotones de rayos X detectados.

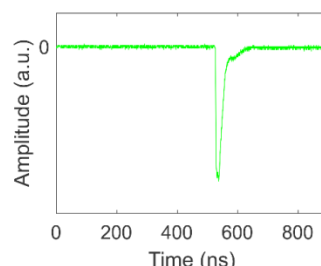
Señales fotomultiplicador: representación a través de desviación estándar (S)



Disparo sin pulso de fotomultiplicador detectable.

Valor de referencia $S = 2.0185 \cdot 10^{-4}$

$S_{norm} = 1$



Disparo con pulso de fotomultiplicador detectable.

$S_{norm} = 26.9$

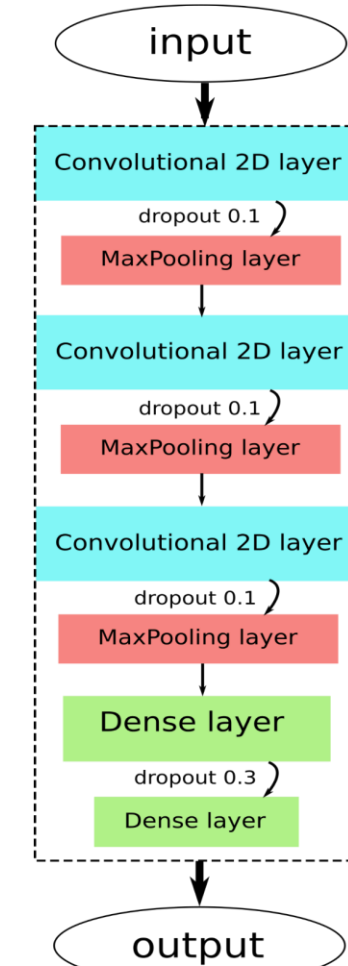
Clasificación de disparos según tamaño del pulso (conteo de fotones de rayos X)

Categoría	Descripción	Rango
A	Muy bajo	$1 \leq S_{norm} < 1.1$
B	Bajo	$1.1 \leq S_{norm} < 2.0$
C	Medio	$2.0 \leq S_{norm} < 10$
D	Alto	$S_{norm} \geq 10$

Algoritmo de clasificación

Entrenamiento: 999 disparos

- Objetivo: Identificar patrones en señal de la antena para la predicción de la categoría de S.
- Algoritmo de inteligencia artificial: Deep Learning.
- 6 redes neuronales convolucionales:



- Entrenamiento para minimizar el error cuadrático al asignar una categoría.
- Conjuntos de disparos seleccionados al azar para entrenar y evaluar cada red neuronal.

$Categoría = F(Input; Parametros)$

Clasificación de resultados

Se establecen las siguientes categorías para analizar los resultados:

- Identificación completa: predice correctamente la categoría.
- Identificación parcial: solo predice correctamente si tiene muy bajo conteo de fotones de rayos X o no.
- Falso positivo: Clasifica incorrectamente un disparo como con alto conteo. Posiblemente es evidencia de memorización por parte del algoritmo (*overfitting*).
- Falso negativo: Clasifica incorrectamente un disparo como muy bajo conteo. Posiblemente hay patrones que el algoritmo no ha identificado aún. Esto puede ser debido a que la escala vertical de adquisición de la señal del fotomultiplicador fue constante durante la medición, por lo que existen pulsos cuya intensidad se detecten en escalas más pequeñas.

Resultados

Validación: 200 disparos

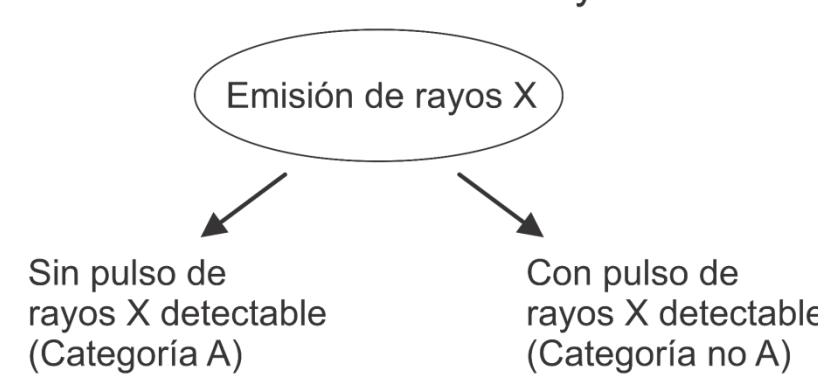
Resultado	Casos	Porcentaje
Identificación completa	92/200	46%
Identificación parcial	70/200	39.5%
Falso positivo	23/200	11.5%
Falso negativo	6/200	3%

- Notar que la probabilidad de acertar a una de las cuatro categorías debido al azar es pequeña. Esto es dado por una distribución binomial con $p=0.25$. Para la identificación completa, 92 aciertos de 200 disparos:

$$P(k = 92 | n = 200, p = 0.25) = 6.3 \cdot 10^{-11}$$

- La identificación de la detección de pulsos de rayos X puede llevarse a una clasificación binaria donde se verifica si el algoritmo predijo la señal de antena como categoría A o no A (Tabla a la derecha).

Clasificación binaria:
Con o sin detección de rayos X



Métrica	Porcentaje
Exactitud	85.5%
Precisión	88.0%
Sensibilidad	96.6%
Especificidad	11.5%
Valor-F	92.1%

Discusión y conclusiones

- Se presentan los resultados que indican que hay cierta correlación entre la radiación de radiofrecuencia emitida hacia el exterior durante la operación de un plasma foco y el conteo de fotones de rayos X.
- De forma similar a lo reportado por [2-3], el plasma foco se comporta como una antena que emite radiación electromagnética en radiofrecuencia durante su operación, en especial cuando los transitorios están asociados a bruscos cambios de corriente del circuito como lo es durante ruptura inicial y pinch. Esta radiación fue medida con antena Vivaldi en el exterior del dispositivo.
- La red neuronal, utilizando el enfoque Deep Learning, pudo reconocer patrones en la señal de la antena que se pueden utilizar para predecir, con cierto grado de exactitud, la identificación de la emisión de rayos X y, en una cantidad significativa de casos, el tamaño del pulso de detección en términos de su desviación estándar.
- La red neuronal falla en algunos casos para el reconocimiento del pulso del C-F. Estos falsos positivos y negativos se creen que se deben a *overfitting* y a limitaciones en la medición del pulso del C-F, respectivamente.
- Si bien la red neuronal permite identificar que hay un patrón, aun falta por entender el mecanismo físico que relacione ambos tipos de radiaciones.

Referencias

- [1] Silva, P., Moreno, J., Soto, L., Birstein, L. et al, Appl. Phys. Lett. **83**, 3269 (2003).
- [2] Gerdin, G., Tanis, M.J., Venneri, F. et al, Plasma physics and controlled fusion **28.3** 527 (1986).
- [3] Escalona, I., Avaria, G., Díaz, M., Ardila-Rey, J. et al, Energies **10** 1415 (2017).
- [4] LeCun, Y., Bengio, Y. & Hinton, G. Nature **521**, 436 (2015)

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento de Programa de Incentivo a la Iniciación Científica UTFSM (PIIC), Fondecyt Iniciación 11160115, CONICYT-PIA ACT 172101.