

DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE TRANSFERENCIA DE FOTONES, RUIDO DE LECTURA Y CORRIENTE OSCURA EN SENSORES CMOS

DETERMINATION OF THE PHOTON TRANSFER CURVE, READ NOISE, AND DARK CURRENT IN CMOS SENSORS

L. Barreiro^{*1}, F. Cammarata¹, M. Danussi¹, P. López Maggi¹, J. Pérez Lanzillotta¹, G. Schulze¹, C. Bonifazi², A. M. Botti³, E. Depaoli^{1,4}, D. Rodrigues^{1,5} y J. Tiffenberg³

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física, Buenos Aires, Argentina

²ICAS-ICIFI - Universidad de San Martín/CONICET

³Fermi National Accelerator Laboratory, PO Box 500, Batavia IL, 60510, USA

⁴Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes

⁵CONICET - Universidad de Buenos Aires, Instituto de Física de Buenos Aires (IFIBA). Buenos Aires, Argentina

Recibido: 22/04/2025 ; Aceptado: 03/06/2025

En los últimos 20 años, el uso de cámaras CMOS experimentó un fuerte auge, acompañado de notables mejoras en sus prestaciones. En este trabajo, realizamos una exhaustiva caracterización de la tecnología utilizando sensores comerciales. Presentamos la medición de su curva de transferencia de fotones, lo que nos permitió evaluar el rango dinámico y la linealidad del sensor. Medimos la tasa de corriente oscura en función de la temperatura y el efecto del filtro infrarrojo. Determinamos además el ruido de lectura, obteniendo como resultado un valor medio de $(3.06 \pm 0.01) e^-$. Los resultados presentados sobre los límites de operación y las posibles aplicaciones científicas de los sensores CMOS comerciales busca servir como punto de partida para una serie de experimentos a nivel de pregrado, así como también para su utilización en diversas aplicaciones científicas.

Palabras Clave: CMOS, PTC, Corriente Oscura, Ruido de lectura.

In the last 20 years, the use of CMOS cameras has experienced a strong growth, accompanied by significant improvements in their performance. In this work, we carry out an exhaustive characterization of this technology using commercial sensors. We present the measurement of the photon transfer curve, which allows us to evaluate the dynamic range and linearity of the sensor. We measure the dark current rate as a function of temperature and analyze the effect of the infrared filter. In addition, we determine the readout noise, obtaining an average value of $(3.06 \pm 0.01) e^-$. The results presented on the operating limits and potential scientific applications of commercial CMOS sensors are intended to serve as a starting point for a series of undergraduate-level experiments, as well as for their use in a variety of scientific applications.

Keywords: CMOS, PTC, Dark current, Readout noise.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2025.36.4.71-75>



ISSN - 1850-1168 (online)

I. Cámaras CMOS

Las cámaras CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) son una de las tecnologías de imagen más populares en la actualidad, principalmente debido a su bajo costo, tamaño compacto y versatilidad. Las CMOS son detectores de silicio con píxeles que captan la luz mediante el efecto fotoeléctrico interno. Esta tecnología ha mejorado drásticamente en las últimas tres décadas [1, 2], lo que ha llevado a su implementación en numerosos campos, desde cámaras de teléfonos inteligentes hasta aplicaciones científicas como astronomía espacial y detección de partículas [3-6]. En este contexto, se vuelve de vital importancia contar con una exhaustiva caracterización de sus parámetros de desempeño, como los que son objeto de este trabajo.

Las cámaras CMOS utilizan filtros Bayer para reconstruir imágenes en color, los cuales consisten en una matriz de filtros rojos, verdes y azules. Este patrón de filtros, dispuesto sobre los píxeles del sensor, se dispone con el doble

de píxeles verdes que rojos y azules, reflejando la mayor sensibilidad del ojo humano a la luz verde. Luego, algoritmos conocidos como *demosaicing* combinan esta información para producir una imagen en color completa. Además, las cámaras CMOS incorporan un filtro infrarrojo que bloquea los fotones de menor energía para evitar distorsiones y conservar la calidad de la imagen. En este trabajo, caracterizamos una cámara de alta calidad de Raspberry Pi, que consiste en un sensor CMOS retroiluminado Sony IMX477 [7] diseñado para facilitar su implementación con una Raspberry Pi. Cuenta con una resolución de (3040×4056) píxeles y un tamaño de píxel de $1.55 \mu m$. Así, cada cámara tiene 1520×2028 píxeles rojos y azules, y $2 \times 1520 \times 2028$ píxeles verdes. A diferencia de la mayoría de los sensores CMOS comerciales, el Sony IMX477 permite capturar la señal cruda del píxel, evitando el procesamiento en el chip, como el *demosaicing*, la compresión o la reducción de ruido, y preservando la intensidad original. Esta característica facilita la medición de parámetros clave del sensor, como la corriente

*lara7barreiro@gmail.com

oscura, la ganancia y el ruido de lectura, los cuales de otro modo serían inaccesibles.

En la sección II introducimos las herramientas estadísticas básicas que se utilizan en el trabajo, mientras que en la sección III, discutimos el método de calibración basado en la medición de la curva de transferencia de fotones del CMOS. En la sección IV presentamos resultados sobre la corriente oscura y el ruido de lectura. Finalmente, en la sección V comentamos sobre posibles aplicaciones de estos sensores.

II. Estadística de la distribución de cargas

Los métodos utilizados en este trabajo se basan en conocer la distribución de la variable aleatoria número de cargas, q , generadas en cada píxel, ya sea debido a la radiación incidente sobre el sensor o a mecanismos internos de producción de carga (por ejemplo, corriente oscura). Dado el gran número de píxeles y la baja probabilidad de que estos procesos ocurran en un dado píxel, la ocupación por píxel es bien descrita por una distribución de Poisson dada por la expresión (1).

$$P(Q = q) = \frac{\mu^q e^{-\mu}}{q!} \quad (1)$$

Por lo tanto, se espera que la varianza $Var(Q)$ resulte igual al valor esperado $E(Q)$. Sin embargo, dado que la carga se mide en Unidades Analógico-Digitales (ADU), la relación entre la varianza y la esperanza de la carga medida, Q_m , se expresa de acuerdo a la ecuación (2).

$$Var(g Q_m) = E(g Q_m) \Rightarrow g Var(Q_m) = E(Q_m) \quad (2)$$

donde la ganancia g se define como el factor de conversión para traducir las cargas medidas en ADU a electrones, es decir, $Q = g Q_m$.

Así es que medir $Var(Q_m)$ en función de $E(Q_m)$ para valores crecientes de Q_m proporciona información sobre la ganancia del sensor en el rango dinámico de la ocupación. Esta curva, conocida como *Curva de Transferencia de Fotones* (PTC, por sus siglas en inglés), se ha establecido como un procedimiento invaluable para caracterizar sensores pixelados y cuantificar la optimización del rendimiento. Permite la evaluación absoluta de diversas características, como el ruido de lectura, la corriente oscura, la linealidad, la no uniformidad de píxeles y el rango dinámico, entre otros [8].

III. Curva de Transferencia de Fotones

A partir del hecho de que la carga Q acumulada en un píxel individual está descrita por la estadística de Poisson, podemos calcular la ganancia del sensor para cada valor de ocupancia. Para ello, iluminamos uniformemente el sensor y determinamos la varianza y la esperanza de la distribución de carga en la imagen homogénea resultante. De esta forma, la carga en cada píxel debe considerarse como una realización independiente de la misma variable aleatoria. Luego, siguiendo la ecuación (2) y repitiendo este proceso para distintas intensidades (niveles de ocupancia), podemos construir la PTC.

Para realizar las mediciones con luz blanca homogé-

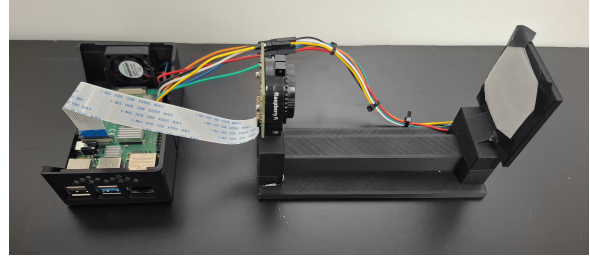


FIG. 1: Configuración experimental, donde se observa una cámara CMOS enfrentada a una pantalla RGB cubierta de papel de calcar para difuminar la luz y con ello obtener imágenes homogéneas.

nea, utilizamos una pantalla RGB como medio de iluminación. Ambos dispositivos fueron controlados desde la misma Raspberry Pi 4, y todo el sistema (ver Fig. 1) fue colocado en una caja oscura.

Fijamos un tiempo de exposición $\Delta t = 30$ segundos, dentro del cual la pantalla era encendida sólo por algunos segundos. De este modo, garantizamos que la pantalla estuviese apagada al momento de lectura del sensor; de lo contrario, se observaba la aparición de franjas horizontales en las imágenes, características de la interferencia entre la pantalla y el sensor.

Para barrer en diferentes intensidades, variamos dos parámetros: el tiempo de encendido de la pantalla y el número de píxeles encendidos. El primero varió entre 1 y 24 segundos, y el segundo fue controlado dibujando un cuadrado en el centro de la pantalla y variando su lado, de forma tal que la fracción de píxeles encendidos variase desde el 4 % hasta el 25 % del total presente en la pantalla. Estos valores fueron elegidos de forma tal de alcanzar intensidades en todo el rango dinámico del sensor CMOS (desde 0 hasta 4095 ADU), para cada uno de los cuatro filtros de colores, donde cada intensidad corresponde a una imagen tomada.

Para verificar que la iluminación en el sensor efectivamente fuera homogénea, utilizamos el hecho de que, bajo tal condición, la distribución de carga en todos sus píxeles responde a la estadística de Poisson (ver sección II). Por lo tanto, dada la distribución de carga medida en ADU debe existir un valor de ganancia que lleve dicha distribución a una en electrones bien descrita por la ecuación (1). El proceso que seguimos consistió en ensayar distintos valores de ganancia dentro de un rango razonable, y, para cada uno, realizar un ajuste del parámetro μ . En la Fig. 2 se muestra el resultado de convertir a electrones el histograma de carga de una misma imagen homogénea con tres valores de ganancia diferentes. La existencia de una ganancia para la cual la distribución de Poisson ofrece una correcta descripción del histograma (distribución central en la Fig. 2) fue tomado como indicación de que la iluminación podía considerarse homogénea. El valor de g seleccionado fue aquél que minimizó el estadístico χ^2 reducido (χ^2_{adj}). Vale mencionar, sin embargo, que el valor mínimo observado corresponde a un gradiente de inhomogeneidad en la imagen que implica un error porcentual en la ganancia menor al 5 %.

Por otra parte, en la Fig. 3 mostramos, a modo de ejemplo, la distribución de carga para una imagen iluminada inhomogéneamente. Puede verse que, en realidad, ésta es una superposición de distintas distribuciones (provenientes de

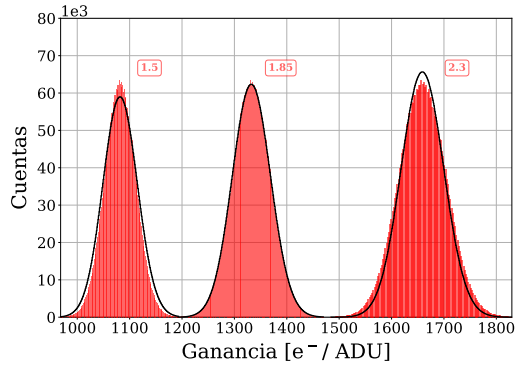


FIG. 2: Distribución de carga para tres valores de ganancia diferentes (en rojo). Cada una fue ajustada con una distribución de Poisson, evidenciando que la ganancia central ofrece la mejor descripción.

los diferentes niveles de iluminación en distintas regiones de la imagen), y que, por lo tanto, no existe un parámetro μ que permita un ajuste razonable de la ecuación (1).

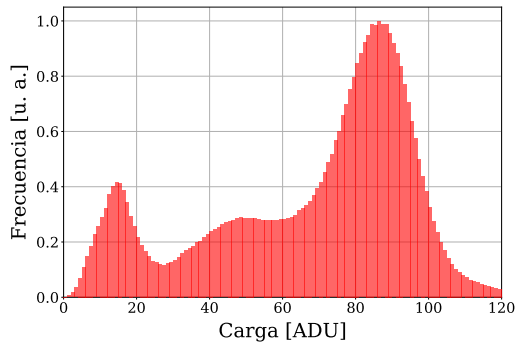


FIG. 3: Distribución de carga en ADU para los píxeles rojos de una imagen iluminada de forma inhomogénea.

Calculamos entonces la media y la varianza de la carga en los todos los píxeles de cada imagen que correspondan a un mismo color. Con estos datos, construimos las PTCs que presentamos en la Fig. 4, una para cada color. Cada punto en la gráfica corresponde a una imagen individual y representa una estadística basada en aproximadamente tres millones de píxeles, es decir, número de píxeles de un mismo color en el sensor. Lo primero que observamos de las curvas es su no linealidad, lo que indica que el factor de conversión g depende de la ocupancia. Esta no linealidad muy probablemente sea el resultado del proceso de lectura y no una característica de los píxeles propiamente dichos.

Al calcular la relación entre la media y la varianza, podemos determinar la ganancia para cada ocupancia. Esto da lugar a las curvas de ganancia mostradas en la Fig. 5, donde la no linealidad mencionada previamente se vuelve más evidente. En todos los canales, observamos que las curvas de ganancia aumentan rápidamente, alcanzan un pico en un valor de carga relativamente bajo y luego disminuyen.

IV. Corriente oscura y ruido de lectura

En los sensores CMOS existen al menos dos tipos de contribuciones internas a la carga registrada en cada píxel: la corriente oscura y el ruido de lectura.

La corriente oscura corresponde a carga eléctrica no deseada generada por agitaciones térmicas en el interior del

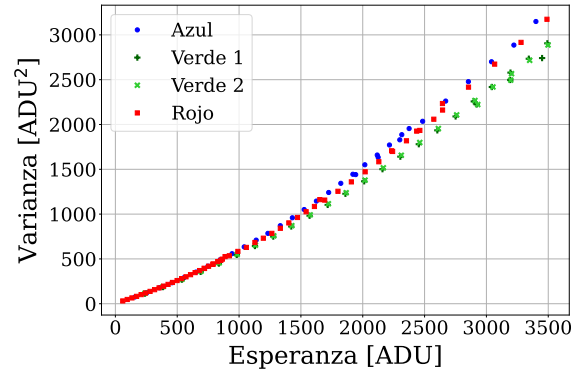


FIG. 4: Curva de transferencia de fotones usando luz blanca. Se grafican las curvas de forma independiente para cada filtro de color.

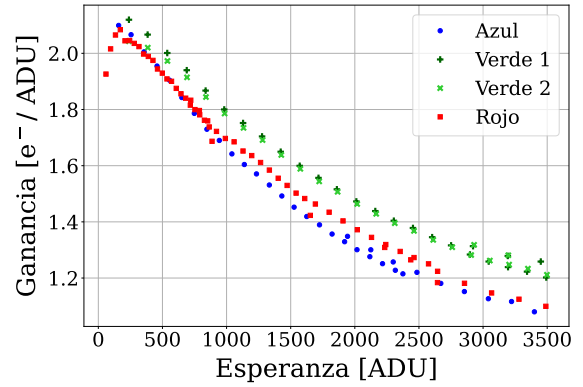


FIG. 5: Curva de ganancia en función de la ocupancia discriminando por filtro de color.

sensor. Estas excitaciones térmicas provocan que electrones del silicio se promuevan desde la banda de valencia hacia la banda de conducción, ocupando así los píxeles del sensor en ausencia de luz[9]. Al igual que la carga producida por la exposición a una fuente de luz, el número de cargas originadas en corriente oscura sigue una distribución de Poisson. Esta contribución depende del tiempo de exposición del sensor y es altamente sensible a la temperatura.

La cantidad de carga acumulada en un píxel debido a la corriente oscura crece linealmente con Δt . No obstante, estos sensores incorporan un mecanismo interno de corrección que asegura que el valor medio de la carga en un píxel, cuando esta proviene únicamente de la corriente oscura, sea nulo. Sin embargo, dado que las cargas generadas siguen una distribución de Poisson, su valor medio puede estimarse a partir de la varianza, la cual no se ve afectada por dicha corrección. Por consiguiente, la tasa de corriente oscura, η_{DC} , puede obtenerse a partir de la ecuación (3):

$$\eta_{DC} = \text{Var}^{DC}(Q_m) / \Delta t, \quad (3)$$

Para que esta ecuación sea válida es necesario que el sensor no sea expuesto a una fuente externa, por lo que para realizar estas mediciones cubrimos la cámara con papel de aluminio. Este material actúa como una jaula de Faraday, protegiendo el sistema de cualquier campo eléctrico externo. Las mediciones se realizaron con tiempos de exposición crecientes y a temperatura controlada. Al realizar las mediciones bajo estas condiciones, la curva de varianza

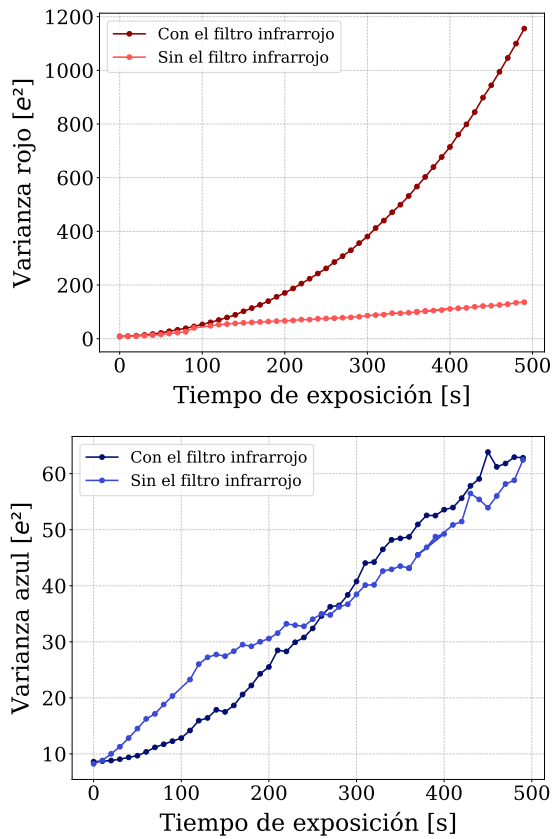


FIG. 6: Varianza electrónica en función del tiempo de exposición a una temperatura controlada de 1 °C para los píxeles bajo filtros rojos (panel superior) y bajo filtros azules (panel inferior). En ambas figuras separamos los dos casos analizados, con y sin el filtro infrarrojo.

en función del tiempo de exposición, presentó el comportamiento que se muestra en la Fig. 6 (panel superior, curva con filtro infrarrojo), lo que contradice la dependencia lineal descrita por la ecuación (3).

Este comportamiento no lineal, nos llevó a plantear la hipótesis de que el filtro infrarrojo podría estar emitiendo radiación, comportándose de manera similar a un cuerpo negro que emite en el rango del infrarrojo cercano. Como resultado, al medir la corriente oscura con el filtro, no solo estamos registrando la corriente oscura *per se*, sino también una contribución adicional detectada principalmente por los píxeles rojos. Con intenciones de comprobar la hipótesis formulada, repetimos las mediciones removiendo el filtro infrarrojo. Los resultados se presentan en las Fig. 6 (panel superior, curva sin filtro infrarrojo). Este efecto se presenta menos pronunciado en los píxeles azules, como se muestra en la Fig. 6 (panel inferior), donde se aprecia la discrepancia en la varianza de los píxeles bajo filtros azules. Esto se encuentra en concordancia con el hecho de que la distribución espectral del rojo y el azul se encuentran en extremos opuestos del espectro visible. Cabe mencionar que esta contribución adicional solo resulta apreciable en condiciones de iluminación extremadamente baja.

Finalmente, en la Fig. 7 presentamos las curvas de varianza electrónica en función del tiempo obtenidas, sin el filtro infrarrojo, para tres temperaturas controladas diferentes. Estas mediciones muestran un comportamiento más li-

neal, lo cual refuerza las hipótesis planteadas previamente. Observamos que la varianza aumenta con el incremento de la temperatura, lo cual es coherente con la naturaleza térmica de la corriente oscura.

A partir de estos resultados fuimos capaces de determinar la tasa de corriente oscura a cada temperatura, utilizando la ecuación (3). Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 1.

El ruido de lectura, otra contribución interna en este tipo de sensores, puede ser definido como la desviación estándar σ_e de la distribución gaussiana de carga en los píxeles de imágenes tomadas con tiempo de exposición nulo. El resultado obtenido tras promediar esta cantidad sobre veinte imágenes resultó en $\sigma_e = (3.06 \pm 0.01) e^-$.

V. Discusión y conclusiones

Las cámaras CMOS comercial Sony IMX477 caracterizadas en este trabajo representan una oportunidad única para la enseñanza práctica de técnicas avanzadas utilizadas en física de partículas, instrumentación y electrónica, gracias a su accesibilidad y bajo costo. Su uso en entornos educativos puede abarcar diversos enfoques experimentales. Por ejemplo, la cámara permite la detección de partículas cargadas a través de sus trazas de ionización, lo que facilita la diferenciación entre leptones cargados mediante la forma de sus trayectorias, con líneas rectas para muones y trayectorias curvas para electrones como se muestra en la Fig. 8.

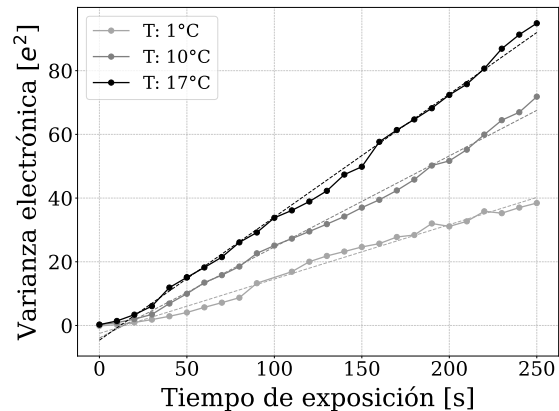


FIG. 7: Varianza electrónica debido a la contribución de la corriente oscura para tres temperaturas controladas, sin el filtro infrarrojo.

Además, al apilar dos cámaras y buscar coincidencias espaciales en las imágenes obtenidas, es posible construir un hodoscopio de muones, lo que permite rastrear su trayectoria a través de la región de detección y determinar la dirección de incidencia. Este método podría emplearse para medir la distribución angular del flujo de muones atmosféricos. Asimismo, la cámara puede utilizarse como detector de partículas para estudiar la energía depositada por muones en silicio, lo que permite obtener la pérdida de energía por unidad de longitud mediante el análisis de la carga de los píxeles. Esta aplicación resulta ideal para la enseñanza de la detección de radiación con sensores de silicio, permitiendo a los estudiantes realizar experimentos prácticos con partículas que constituyen el fondo natural de radiación. Posibilita, además, llevar a cabo análisis mediante herramientas

TABLA 1: Tasa de corriente oscura a distintas temperaturas.

T [°C]	η [e/pix/s]
1	0.171 ± 0.004
10	0.286 ± 0.005
17	0.386 ± 0.005

de procesamiento de imágenes y comparar resultados con modelos teóricos.

Otra aplicación interesante es la detección de rayos X, donde la cámara CMOS permite medir la absorción en silicio a partir de una fuente radiactiva, lo que posibilita la determinación de la energía media de creación de pares electrón-hueco y la estimación del ruido de Fano. Esta experiencia educativa ayudaría a los estudiantes a comprender los principios de detección de rayos X, la calibración de energía y la mitigación del fondo.

La versatilidad del sensor abre además la posibilidad de explorar técnicas avanzadas como la imagen con apertura codificada, que podría emplearse en múltiples contextos experimentales y educativos.

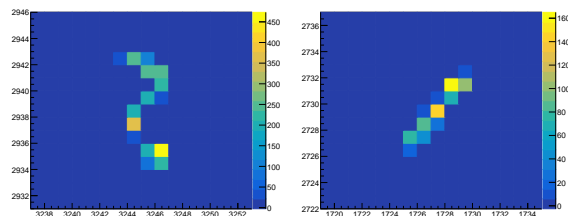


FIG. 8: Izquierda, carga generada por un electrón. Derecha, traza de carga generada por el paso de un muón.

Agradecimientos

A la universidad pública, gratuita y de calidad.

REFERENCIAS

- [1] E. Fossum. CMOS image sensors: electronic camera-on-a-chip. *IEEE Transactions on Electron Devices* **44**, 1689-1698 (1997).
- [2] A. J. P. Theuwissen. CMOS Image Sensors: State-of-the-Art Technology, Applications, and Future Trends. *Solid-State Electronics* **52**, 1401-1406 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.sse.2008.04.012>.
- [3] M. Pérez, J. Lipovetzky, M. S. Haro, I. Sidelnik, J. J. Blostein, F. A. Bessia y M. G. Berisso. Particle detection and classification using commercial off the shelf CMOS image sensors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **827**, 171-180 (2016). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216302844>.
- [4] M. Pérez, J. J. Blostein, F. P. A. Bessia, A. Tartaglione, I. P. Sidelnik, M. F. S. Haro, S. G. Suárez, M. L. Gimenez, M. G. Berisso y J. Lipovetzky. Thermal neutron detector based on COTS CMOS imagers and a conversion layer containing Gadolinium. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **893**, 157-163 (2018). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218303681>.

- [5] F. P. A. Bessia, M. Pérez, J. Lipovetzky, N. A. Piunno, H. Mateos, I. P. Sidelnik, J. J. Blostein, M. F. S. Haro y M. G. Berisso. X-ray micrographic imaging system based on COTS CMOS sensors. *International Journal of Circuit Theory and Applications* **46**, 1848-1857 (2018). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cta.2502>.
- [6] M. Pérez, O. I. Abbate, J. Lipovetzky, F. P. A. Bessia, F. A. Sánchez, M. F. S. Haro, J. M. Longhino, M. G. Berisso y J. J. Blostein. Neutron imaging based on transfer foil activation and COTS CMOS image sensors. *Journal of Instrumentation* **17**, P02004 (2022). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/02/P02004>.
- [7] Sony Corporation. *IMX477 Data Sheet* <https://docs.arducam.com/Raspberry-Pi-Camera/Native-camera/source/IMX477-DS.pdf>. Accessed: 2025-04-21. 2020.
- [8] J. Janesick. *Scientific Charge-Coupled Devices* ISBN: 0-8194-3698-4 (SPIE Press, Bellingham, Washington, 2001).
- [9] N. W. Ashcroft y N. D. Mermin. *Solid State Physics* ISBN: 0-03-083993-9 (Holt, Rinehart y Winston, 1976).