

CARACTERIZACIÓN DE LA CÁMARA FLI

Juan José Downes Wallace ^{1,2}

RESUMEN

Se presentan los resultados de la caracterización de la cámara CCD FLI en uso en el Observatorio Astronómico Nacional de Llano del Hato. Mediante la construcción de la Curva de Transferencia Fotónica se obtuvo una ganancia $g = 1.68 \pm 0.01 e^-/C$. El Ruido de Lectura se obtuvo mediante el análisis de imágenes bias resultando $\sigma_L = 7.9 \pm 0.4 e^-$. El CCD se aleja del comportamiento lineal a partir de las 55000 C y su corriente oscura a una temperatura de $-32.8^\circ C$ es de $0.4 \pm 0.03 e^-/s$. Adicionalmente se midió la demora en la transferencia de datos desde la cámara al computador que a la fecha la controla, resultando en 9 s para un binning de 3×3 y la tasa de enfriamiento del CCD que se ubicó en $3^\circ/s$. El acuerdo con las especificaciones suministradas por el fabricante resultó satisfactorio en todos los parámetros caracterizados.

ABSTRACT

Key Words: Caracterización — CCD

1. DEFINICIONES

1.1. Ganancia

La *Ganancia* o *Factor de Conversión* g es el número promedio de fotoelectrones \bar{N}_{e^-} que generan una cuenta promedio en el CCD y se define como:

$$g = \frac{\bar{N}_{e^-}}{\bar{N}_C} \quad (1)$$

donde \bar{N}_C es el número promedio de cuentas.

1.2. Ruido de Lectura

Se llama *Ruido de Lectura* a la desviación estándar σ_L del número de cuentas producidas por la electrónica de la cámara durante el proceso de amplificación de la señal y lectura del CCD.

1.3. Ruido Térmico

Llamamos *Corriente Térmica* o *Corriente de Oscuridad* al número promedio de cuentas \bar{N}_T generadas por electrones liberados en el CCD mediante procesos térmicos. El *Ruido Térmico* es la desviación estándar σ_T del número de cuentas de origen térmico \bar{N}_T y escala como:

$$\sigma_T = \sqrt{t_{int} \times \bar{N}_T} \quad (2)$$

donde t_{int} es el tiempo de integración.

1.4. Nivel de Saturación

Una de las propiedades más importantes de los CCD es su linealidad, es decir, que el número de cuentas en una imagen aumenta linealmente con el tiempo de integración. Definimos al *Nivel de Saturación* como el número de cuentas a partir del cual el CCD se aleja del comportamiento lineal debido a que se ha sobrepasado la capacidad de almacenamiento de electrones en sus píxeles.

2. MÉTODOS DE MEDICIÓN

2.1. Curva de Transferencia Fotónica

La varianza $\sigma_{e^-}^2$ en el número de electrones totales de una imagen es la suma de una componente poissoniana σ_f^2 debida a la estadística de conteo de fotones y otra componente aleatoria debida al ruido de lectura σ_L^2 .

$$\sigma_{e^-}^2 = \sigma_f^2 + \sigma_L^2 \quad (3)$$

donde hemos despreciado la componente térmica σ_T . La llegada de fotones al CCD y, en consecuencia, la generación de fotoelectrones sigue una estadística de Poisson tal que la varianza del número de fotoelectrones N_{e^-} viene dada por:

$$\sigma_f^2 = \bar{N}_{e^-} \quad (4)$$

La varianza $\sigma_{e^-}^2$ en unidades de cuentas σ_C^2 , puede escribirse en términos de la ganancia como:

$$\sigma_C^2 = \frac{\sigma_{e^-}^2}{g^2} \quad (5)$$

¹Centro de Investigaciones de Astronomía

²Postgrado de Física, Universidad Central de Venezuela

Si sustituimos las ecuaciones 1, 4 y 5 en 3 obtenemos:

$$\sigma_C^2 = \frac{1}{g}\bar{N}_C + \frac{1}{g^2}\sigma_L^2 \quad (6)$$

La representación gráfica de esta función se conoce como *Curva de Transferencia Fotónica* (CTF). Podemos entender cada punto de la CTF como la relación entre las componentes poissoniana y de lectura que generan el ruido total de la imagen para un cierto tiempo de integración. Por ejemplo, cuando el promedio de cuentas \bar{N}_C es nulo, lo que ocurre cuando el tiempo de integración es nulo también, prevalece únicamente la componente del ruido de lectura:

$$\sigma_C = \frac{1}{g}\sigma_L \quad (7)$$

Por otra parte, la ganancia es igual al inverso de la pendiente de la función lineal que resulte del ajuste de la CTF.

2.2. Construcción de la CTF

Las imágenes utilizadas para construir la CTF son secciones bien comportadas de imágenes *flats*. Con secciones bien comportadas nos referimos a aquellas con una respuesta homogénea de sus píxeles. La varianza del número de cuentas σ_C^2 y el promedio del número de cuentas \bar{N}_C pueden ser medidos mediante diferentes procedimientos. En las siguientes dos subsecciones se explican aquellos seguidos durante este trabajo.

2.2.1. Varianza del número de cuentas σ_C^2

Un método para la medición de la varianza del número de cuentas σ_C^2 consiste en obtener cada flat dos veces bajo las mismas condiciones de iluminación y temperatura e igual tiempo de integración. Cada flat debe ser corregido restando el *Nivel de Pedestal* lo cual se logra restando una imagen *bias* que resulta del promedio de varios *bias* individuales. Finalmente se restan ambos *flats* corregidos, la corriente de oscuridad en ambas imágenes por consiguiente se anula, y la varianza del número de cuentas σ_C^2 es el resultado de dividir entre $\sqrt{2}$ la desviación estándar medida directamente sobre el resultado de la resta. Los argumentos para introducir este factor son análogos a los que expondremos para deducir la ecuación 9.

2.2.2. Promedio del número de cuentas \bar{N}_C

Partiendo de los pares de *flats* que empleamos para la medición de σ_C^2 , el número promedio de cuentas \bar{N}_C , viene dado por el promedio del número de

cuentas en cada par de flats. En este caso el cálculo del promedio no elimina la componente térmica por lo que antes de las mediciones cada flat debe ser corregido sustrayendo la corriente de oscuridad además del nivel de pedestal.

2.3. Método alternativo para la medición del ruido de lectura

Vimos que el ruido de lectura σ_L puede ser calculado a partir de la CTF, pero en la práctica σ_L resulta ser un parámetro muy sensible a la calidad del ajuste lineal. Un método alternativo consiste en tomar dos imágenes *bias* B_1 y B_2 bajo las mismas condiciones. Cada una de estas imágenes presentara un patrón de ruido total σ con dos componentes: una térmica σ_T (la cual despreciaremos debido a que el tiempo de integración es nulo) y ruido de lectura σ_L además de un nivel de pedestal constante p . Si ambas imágenes se restan, la componente p se anula, a diferencia de σ_L que es propia a cada proceso de lectura del CCD. Así el ruido total σ de la resta de ambos σ_L viene dado por:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_{L_i}^2} \quad (8)$$

Si asumimos que ambas desviaciones son aproximadamente iguales $\sigma_{L_1}^2 \approx \sigma_{L_2}^2 \approx \sigma_L^2$ y el ruido de lectura σ_L viene dado por:

$$\sigma_L = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

2.4. Corriente de Oscuridad

Para cuantificar el nivel de cuentas de la corriente de oscuridad \bar{N}_T se construye una curva de \bar{N}_T como función del tiempo de integración t_{int} . Para garantizar que las cuentas no provienen del nivel de pedestal, se resta una imagen *bias* a cada uno de los darks. Las medidas nuevamente se efectúan en una sección bien comportada del CCD.

2.5. Curva de Saturación

La *Curva de Saturación* es un gráfico del número promedio de cuentas \bar{N}_C en función del tiempo de integración t_{int} . Para construir esta curva se realizan una serie de flats de una fuente de luz constante con t_{int} variable. Según lo definimos el valor de saturación corresponderá al número de cuentas \bar{N}_C^{sat} a partir del cual la curva se aleja del comportamiento lineal.

3. OTRAS PROPIEDADES ÚTILES

3.1. Demora en la transferencia de datos

El programa que controla la cámara permite incluir en el nombre de cada imagen, la hora en la que esta fué grabada en el disco del computador. Cada vez que se toma una imagen, el programa repite una rutina de tres pasos: primero realiza una limpieza de los píxeles físicos, seguidamente realiza la exposición y finalmente lee el CCD transfiriendo la información al computador. La hora que figura en el nombre de la imagen corresponde al momento en que termina la transferencia. La hora correspondiente al instante medio H_m de cada integración es función de la demora Δt_{bin} en la transferencia de los datos, que a su vez depende del área del pixel lógico, la hora de finalización de la transferencia H_f , indicada en el nombre de la imagen, y el tiempo de integración escogido por el observador t_{int} . H_m viene dada por:

$$H_m = H_f - \Delta t_{bin} - \frac{t_{int}}{2} \quad (10)$$

Así definida, H_m es independientemente tanto del tiempo que lleva la limpieza del CCD como de la demora editada en el parámetro *Delay* del menú *Secuence* del programa, pues ambos son absorbidos en H_f . Así, la única cantidad que se debe establecer experimentalmente es Δt_{bin} para diferentes áreas de píxeles lógicos en unidades de píxeles físicos.

3.2. Velocidad de enfriamiento

La cámara esta provista de un módulo Peltier como sistema de enfriamiento. Una vez indicada al programa la temperatura a la cual se desea trabajar, comienza el proceso de enfriamiento que llevará varios minutos. Para cuantificar esta demora se construye una curva de temperatura T como función del tiempo t .

4. OBSERVACIONES Y MEDIDAS

4.1. Imágenes

Para la construcción de las curvas de corriente de oscuridad se realizaron en el laboratorio tres series de 11 darks para temperaturas de $-20.3^\circ C$, $-25.3^\circ C$ y $-32.8^\circ C$ con tiempos de integración entre 10 y 1200 segundos. Para la construcción de la CTF y la curva de saturación se obtuvo una serie de 25 pares de flats a $-32.8^\circ C$ con tiempos de integración entre 1 y 190 segundos. Finalmente se obtuvo una serie de 20 bias para cada una de las temperaturas trabajadas. Todos los flats se realizaron sin filtro y simulando flats de cúpula, exponiendo el CCD a una superficie iluminada homogéneamente. Las medidas fueron hechas a temperaturas ambiente entre $12^\circ C$ y $17^\circ C$.

4.2. Transferencia de datos

Para distintos tamaños de píxeles lógicos se cronometró el tiempo de demora en la transferencia de datos desde la cámara al computador que a la fecha la controla. El computador se utilizó únicamente para éste propósito, evitando así demoras debidas al uso de otros recursos.

4.3. Enfriamiento

En el laboratorio se registró la temperatura de la cámara como función del tiempo. La temperatura fué leída directamente de la ventana del programa, en el cual se estableció una tasa de lectura de 1 lectura cada 30 segundos. Como inicio de las medidas se consideró el momento en que se solicita al programa el cambio de la temperatura a partir de la temperatura ambiente.

5. PROCESAMIENTO Y RESULTADOS

5.1. Corriente de Oscuridad

Mediante rutinas de IRAF³ se restó a las imágenes dark un bias promedio y se calcularon el número promedio de cuentas \bar{N}_T para distintos tiempos de integración t_{int} a temperaturas de $-20.3^\circ C$, $-25.3^\circ C$ y $-32.8^\circ C$. Mediante mínimos cuadrados se obtuvieron los ajustes correspondientes, graficados en el panel superior de la figura 1 e indicados a continuación:

$$\bar{N}_{T-32.8} = (0.234 \pm 0.006) \times t_{int} + (9.54 \pm 2.66) \quad (11)$$

$$\bar{N}_{T-25.3} = (0.487 \pm 0.003) \times t_{int} - (2.12 \pm 1.57) \quad (12)$$

$$\bar{N}_{T-20.3} = (0.8 \pm 4 \times 10^{-4}) \times t_{int} + (2.57 \pm 0.19) \quad (13)$$

Los coeficientes de correlación fueron 0.997, 0.999 y 1 con una desviación estándar de los residuos de 6.262, 3.716 y 0.449 C respectivamente. Multiplicando por la ganancia (sección 5.2) obtenemos una corriente de oscuridad de $0.4 \pm 0.003 e^-/s$ a una temperatura de $-32.8^\circ C$. El panel inferior de la figura 1 muestra el comportamiento de σ_T como función de \bar{N}_C y t_{int} para las tres temperaturas, donde se aprecia que las desviaciones medidas (cruces) fueron menores a las esperadas según la ecuación 2 (líneas punteadas).

³IRAF es distribuido por National Optical Astronomy Observatories, operados por la Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., bajo acuerdo de la National Science Foundation.

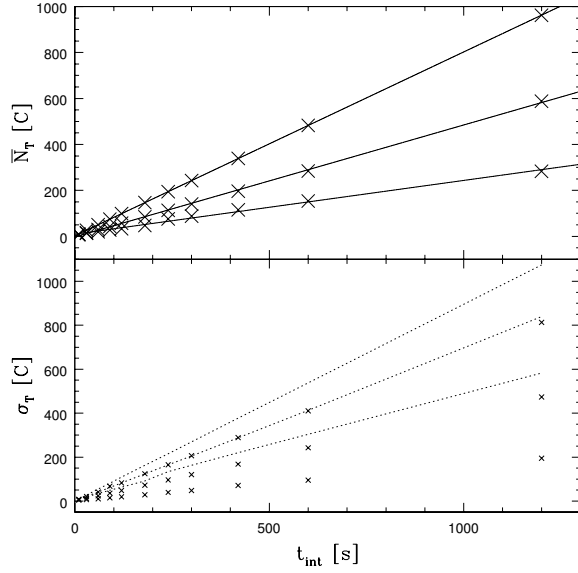


Fig. 1. Panel superior: Corriente de oscuridad \bar{N}_T como función del tiempo de integración t_{int} para temperaturas de -20.3°C (curva superior), -25.3°C (curva intermedia) y -32.8°C (curva inferior). Panel inferior: Desviación estándar σ_T de la corriente de oscuridad como función del tiempo de integración t_{int} y número de cuentas \bar{N}_T para las tres temperaturas, en el mismo orden del panel superior. La cruces indican los resultados experimentales y las líneas punteadas la predicción según la ecuación 2.

5.2. CTF y ganancia

La CTF se construyó en base a los bias y pares de flats obtenidos a -32.8°C . Se restó el bias promedio a cada elemento del par de flats, se restaron los flats resultantes y se calculó la varianza σ_L . El promedio de cuentas \bar{N}_C se calculó de la suma de las imágenes del par corregidas por corriente de oscuridad y pedestal. La corrección por corriente de oscuridad se realizó mediante la ecuación 11. La figura 2 muestra la CTF resultante. Mediante mínimos cuadrados se encontró el siguiente ajuste:

$$\sigma = (0.5938 \pm 0.005) \times \bar{N}_C + 186.32 \pm 73.73 \quad (14)$$

con un coeficiente de correlación de 0.999 y una desviación estándar de los residuos de 131,36 C. La ganancia se calculó como el inverso de la pendiente del ajuste, resultando $g = 1.684 \pm 0.014e^-/\text{C}$.

5.3. Ruido de Lectura

El ruido de lectura σ_L se calculó en base al procesamiento de bias indicado en la sección 2.3. La

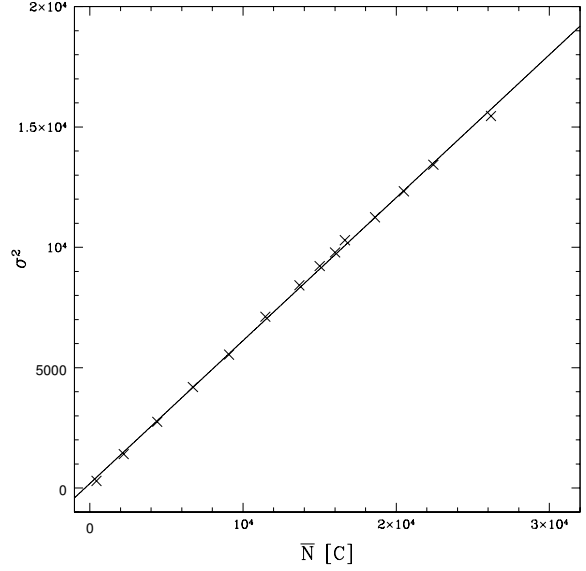


Fig. 2. Curva de transferencia fotónica a una temperatura de -32.8°C .

desviación estándar promedio en el número de cuentas de la resta de dos bias resultó $\sigma = 6.599 \pm 0.2$ C. Aplicando la ecuación 9 y multiplicando por la ganancia se obtuvo un ruido de lectura $\sigma_L = 7.915 \pm 0.4e^-$.

5.4. Curva de saturación

Se midió el número promedio de cuentas \bar{N}_C como función del tiempo de integración t_{int} para un binning de 1×1 . Los resultados se muestran en la figura 3. La curva se aleja del comportamiento lineal para $\bar{N}_C > 55000$ C valor que tomamos como el límite de saturación \bar{N}_C^{sat} .

5.5. Demora en la transferencia de datos

La tabla 1 indica la demora de cada paso de la rutina seguida por la cámara durante la toma de una imagen, para cuatro tamaños diferentes de pixel lógico. El tiempo de integración en todos los casos fué de 10 segundos. Como instante inicial de las medidas se definió el momento en que inicia la limpieza del CCD. Con los resultados para los pasos I, II, III y IV de la tabla 1 se calculó la demora en la transferencia de datos Δt_{bin} también indicada en la tabla. La figura 4 muestra Δt_{bin} como función de las dimensiones del pixel lógico.

5.6. Velocidad de enfriamiento

La figura 5 muestra la curva de enfriamiento. Las medidas se iniciaron a una temperatura ambiente

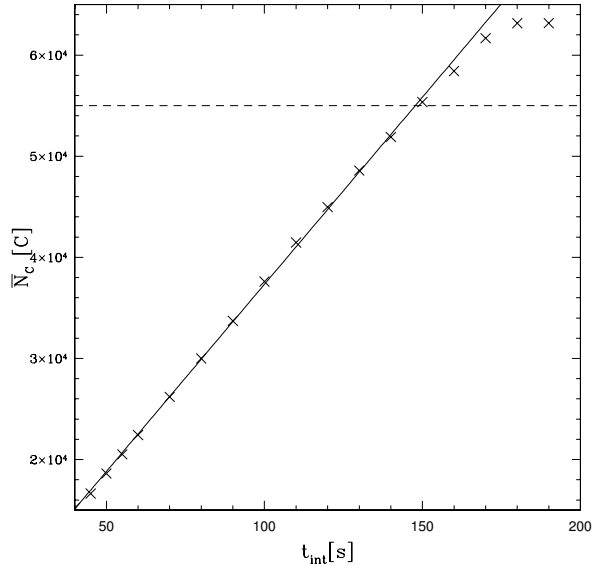


Fig. 3. Curva de saturación. Cruces: Número de cuentas medido. Línea sólida: Ajuste lineal. Línea a trazos: Nivel de saturación, ubicado en $\bar{N}_C^{sat} \approx 55000$ C.

TABLE 1

Pixel	1	4	9	16
I	0	0	0	0
II	12	12	12	12
III	22	22	22	22
IV	54	36	31	29
Δt_{bin}	32	14	9	7

Demora de los pasos seguidos por la cámara durante la toma de una imagen. Pixel es el área del pixel lógico en unidades de píxeles físicos. I Inicio de la limpieza, II inicio de la exposición, III inicio de la transferencia y IV final de la transferencia. Δt_{bin} demora total de la transferencia de datos

de $17.5^\circ \pm 0.5$ C e indicando al programa una temperatura de operación de -32.8° C. Los resultados muestran que la cámara invierte ≈ 1000 segundos (≈ 17 minutos) en descender la temperatura desde 17.5° C ± 0.5 hasta -33.0° C ± 0.5 lo que equivale a una tasa promedio de enfriamiento f de $\approx 3^\circ/min$. Los errores en la medida de temperaturas corresponden a la apreciación del termómetro de la cámara. La fluctuación observada en la temperatura para $t_{int} > 1000$ segundos es de 0.5° C y considerando las curvas de corriente de oscuridad (ecuaciones 11, 12 y 13) equivale a una fluctuación despreciable en el número de cuentas.

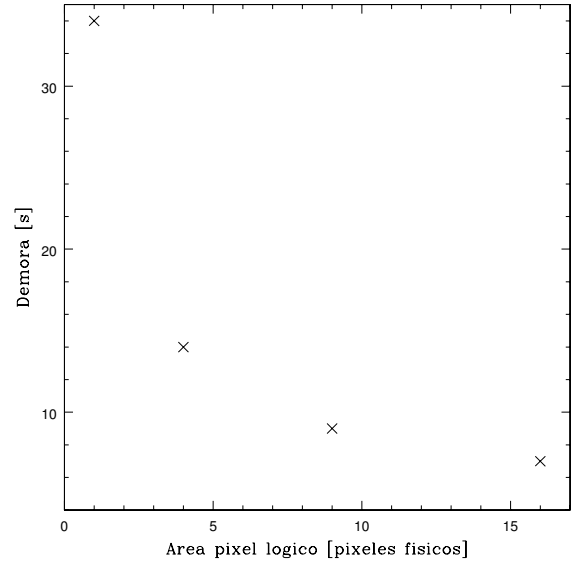


Fig. 4. Tiempo de demora en la transferencia de datos Δt_{bin} como función del tamaño el pixel lógico

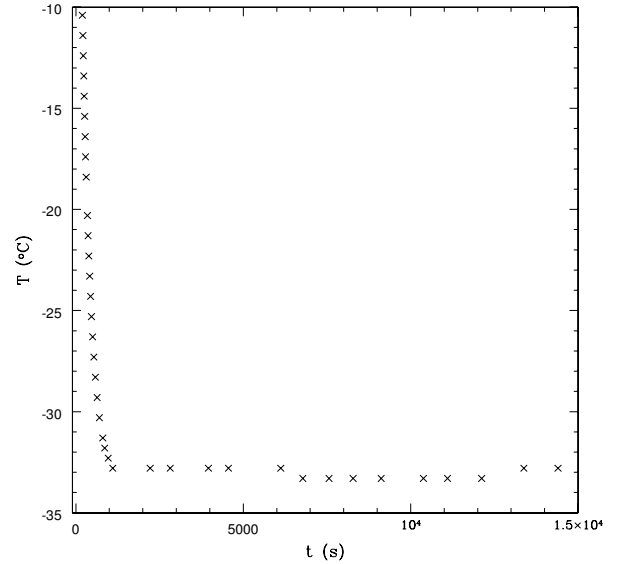


Fig. 5. Tiempo de enfriamiento. La tasa promedio de enfriamiento f es de $\approx 3^\circ/min$.

6. CONCLUSIONES

Los resultados se resumen en la tabla 2, en donde son comparados con las especificaciones suministradas por el fabricante. Se concluye que la caracterización arroja un acuerdo satisfactorio con las especificaciones suministradas por el fabricante. Un último comentario merece la desviación estándar σ_T de la corriente de oscuridad (Figura 1, panel inferior)

TABLE 2

	Medición	Fabric.
\bar{N}_T	$0.4 \pm 0.03e^-/s$	$1e^-/s$
g	$1.684 \pm 0.04e^-/C$	$2e^-/C$
σ_L	$7.915 \pm 0.4e^-$	$7e^-$
\bar{N}_C^{sat}	55000	---
Δt_{bin}	9s (binning 3×3)	---
f	$3^\circ/min$	---

Comparación de los parámetros caracterizados con las especificaciones suministradas por el fabricante. Los parámetros dependientes de la temperatura se tabulan para -32.8°C . El fabricante no suministra errores sobre los parámetros ni información sobre la saturación, demora en la transferencia de datos y tasa de enfriamiento.

que resulta sensiblemente menor a la predicha por la distribución de la ecuación 2.

REFERENCES

- Manual Practico de Astronomia con CCD. Ediciones Omega, Barcelona, 1998
 The Handbook of Astronomical Image Processing. William Bell Inc., 2001