

Resumen del Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Caracterización de Sensores de Imagen CMOS

Autor: Manuel Lorente Almán

Tutor: Vicente Baena Lecuyer

Dep. Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación al trabajo y objetivos

El diseño de sensores de imagen CMOS al igual que el de gran cantidad de sistemas electrónicos comprenden dos procesos generales: diseño y caracterización. Éstos son diseñados con una serie de características las cuales son importantes medir con precisión. Los CIS (CMOS Image Sensors) son dispositivos electrónicos que convierten la información en forma de luz en información digital que puede ser reproducida en formato de imagen.

Eficiencia cuántica, la cual define la conversión fotón-electrón y su recolección. Capacidad de llenado, la cual si es alta indica que un gran número de electrones pueden ser almacenados en el píxel. Ganancia de conversión, que define la capacidad del sensor de convertir estos electrones almacenados en tensión. Ruidos, que establecen el rango dinámico del sensor definiendo el piso de ruido, es decir su rango de percepción de la luz, actualmente existen sensores con un piso de ruido del orden de 1 e-. Función de transferencia de modulación, el cual es un parámetro crucial en la caracterización espectral de un sensor pues define la resolución espacial y la relación de contraste en un sensor permitiendo detectar acoplos o diafonías en el mismo. Todas estas y más son las principales características a medir en un sensor de imagen para verificar que tanto el diseño como la configuración es robusta para su posterior implementación en una aplicación real como podría ser el detectar granos de arroz defectuosos en una cadena de producción a una muy alta velocidad, captar una imagen en 3D de un escenario con el fin de detectar obstáculos o detección de bordes para identificar una matrícula en una autopista de un coche a gran velocidad.

A lo largo del trabajo se irán introduciendo el resto de características y explicando sus principios físicos así como los procedimientos de medida, cálculos e instrumentación de laboratorio necesaria para asegurar que el sensor está en su punto óptimo de operación.

La principal aportación de este trabajo ha sido el desarrollo de una librería Python que comprenda tanto la simulación de características de sensores de imagen CMOS, como el análisis y cálculo de parámetros característicos típicos a partir de imágenes reales como la generación automática de reportes que de manera clara y concisa permita sacar conclusiones sobre el punto de operación de un sensor, posibles desviaciones en el comportamiento e incluso comparar diferentes sensores desde un punto de vista cualitativo.

Gracias al desarrollo de esta librería mencionada anteriormente, se ha logrado migrar a nivel empresarial en Teledyne-AnaFocus de un entorno para la caracterización de sensores CMOS basado en Matlab a un entorno Python con un significativo ahorro económico en término de licencias asociado y un aumento en cuanto a la capacidad de desarrollo de software para la caracterización debido a la gran cantidad de recursos libres en la red relativos a Python. Por otra parte, el desarrollo de esta librería ha permitido alinear métodos de trabajo en Teledyne-e2v y Teledyne-AnaFocus (comprada por Teledyne-e2v en 2015) cuyas sinergias hasta la actualidad eran casi inexistentes debido al uso de distinto software en ambas organizaciones.

1.2 Organización del trabajo

Este trabajo consta de 7 capítulos. Éste primero de ellos proporciona una introducción del proyecto e ilustra los objetivos, motivaciones y estructura del mismo.

El capítulo 2 incluye el estado del arte de sensores de imagen CMOS así como su arquitectura interna y principios de funcionamiento e interfaces de comunicaciones con el exterior, fundamentos ópticos a tener en cuenta y una introducción a estándares de medida como la EMVA1288.

El capítulo 3 desarrolla la importancia de la instrumentación de laboratorio necesaria a la hora de caracterizar sensores CMOS y testarlos funcionalmente así como los distintos instrumentos y estaciones de trabajo. Este

capítulo es seguido por el capítulo 4 el cual explica todas las pruebas funcionales a realizar idealmente, eléctricos, de consumo, visuales, de integridad de señal, así como las principales funcionalidades internas del sensor tanto a nivel de circuito integrado como CIS en general, aunque esto último variará en cada diseño. Por otra parte el capítulo 5 incluye todas las medidas y procedimientos para una caracterización óptica completa, escenarios, datos a extraer y procedimientos de medida. Llegando al final, el capítulo 6 contiene los resultados en dos casos concretos de dos sensores con características diferentes concebidos para una misma aplicación de manera que se pueda comparar ventajas y desventajas de ambos diseños, todo ello apoyándose en simulaciones y procesamiento de los datos a través de Python.

Finalmente el último capítulo incluye las conclusiones del trabajo y líneas maestras a desarrollar en un futuro en este campo de la ingeniería de test de circuitos integrados en general y sensores de imagen CMOS en particular. Así como funcionalidades a añadir en la librería desarrollada en Python.

Además tras el último capítulo se incluyen apéndices con información adicional que he utilizado durante la elaboración del trabajo como el código Python para simular el comportamiento de un CIS y su posterior medida de performance óptica, cómo generar reportes automáticos a partir del análisis de los datos de caracterización.

En la realización de este resumen de la memoria se han omitido diversos apartados de los capítulos descritos así como los capítulos 4 y 5 por contener metodología y resultados confidenciales y el capítulo 7 de conclusiones al contener información sensible.

2 GENERALIDADES SOBRE SENSORES DE IMAGEN CMOS

Este capítulo tiene como objetivo dar una breve introducción a los sensores de imagen CMOS (CIS), su funcionamiento, arquitectura interna, modos de captura, interfaces de comunicaciones para la recuperación de datos y una pequeña introducción a estándares oficiales de caracterización.

2.1 Introducción

2.1.1 Principios básicos

Los CIS son dispositivos semiconductores empleados en la fabricación de cámaras digitales. Detectan la información en forma de luz u otra radiación electromagnética y crea una imagen que representa dicha información. De manera simplificada, esta conversión consiste en un circuito integrado que capta la información y la convierte en una tensión equivalente que más tarde es traducida a un dato digital.

2.1.2 Funcionamiento

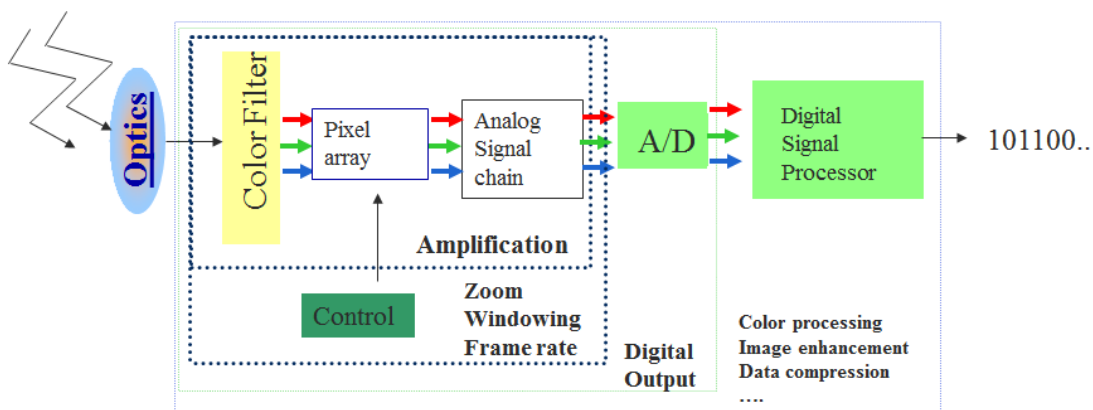


Figura 2-1 Proceso de adquisición de imagen en un CIS

La primera interfaz física que se encuentra en una cámara siempre es la óptica, la cual direcciona la luz hacia el CIS haciéndolo pasar por estructuras dedicadas a la aplicación del sensor como pudiesen ser filtros de colores para tener una cámara cromática o microlentes para obtener la mayor cantidad de información de la imagen. Tras este paso se llega al sensor donde se produce todo el proceso de adquisición de fotones y posterior conversión a señal digital por un convertidor analógico-digital. Además se le puede dotar al sensor de inteligencia como podría ser capacidad de amplificar la señal, seleccionar regiones de interés, balance de blanco y cualquier algoritmo de procesamiento. Aunque lo usual para cualquier fabricante es añadir estos algoritmos a nivel de cámara fuera del chip embebido en una FPGA o dispositivo microprocesador.

El principio físico de adquisición de una imagen es tan básico como el principio fotoeléctrico el cual consiste en la emisión de electrones por un material, en este caso el silicio, al incidir sobre él una radiación electromagnética como puede ser la luz. Al excitar el silicio con la luz los electrones se les dota de energía de tal manera que si están cerca del nivel de Fermi y se les proporciona la energía suficiente para superarlo, se desprende del material y puede ser almacenado.

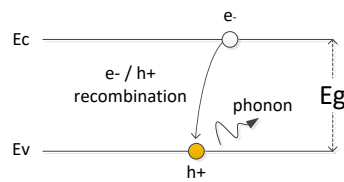


Figura 2-3 Recombinación por electrón-hueco

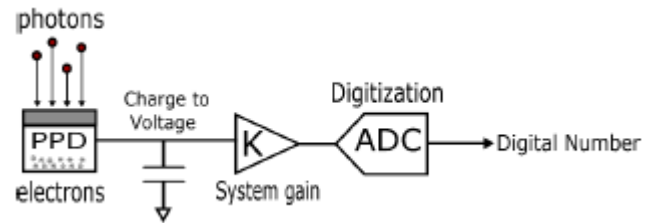
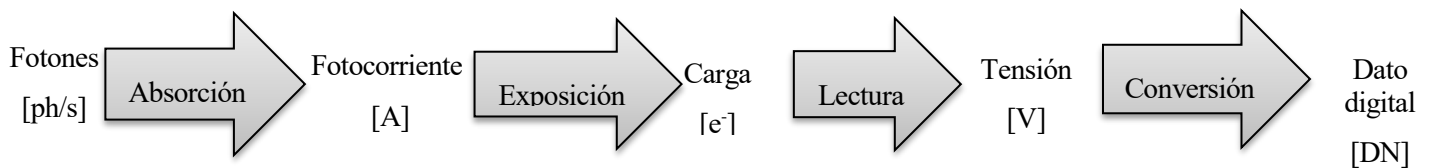


Figura 2-4 Esquema de conversión fotoeléctrica

Veamos la descripción básica de esta conversión fotoeléctrica y cómo se aprovecha para crear una información digital en forma de imagen:



1. Conversión foto-eléctrica
El fotodiodo capta los fotones incidentes y almacena los electrones durante un tiempo de integración, también llamado tiempo de exposición.
2. Conversión carga-tensión
Se hace sobre una capacidad, que puede ser la parásita del fotodiodo en una estructura 3T o sobre una separada llamada Floating Diffusion (FD) en un píxel 4T o 5T.
3. Amplificación
Gracias a un transistor tras la capacidad, llamado seguidor de corriente o *source follower* (SF).
4. Lectura
Un transistor de selección permite conectar línea por línea cada píxel a la columna y poder leer los datos.
5. Conversión analógico-digital
La señal analógica recolectada es seguida por un convertidor analógico-digital (ADC) el cual determina la resolución del sensor.

2.2 Fundamentos de los Sensores de Imagen CMOS

2.2.1 CCD vs CMOS

En la actualidad, los sensores de imagen CMOS han superado a los CCDS en la mayoría de campos. Un sensor CMOS es una tecnología integrada que ofrece un amplio rango de funcionalidades, rápida lectura, bajo consumo, bajo coste y mejores parámetros característicos.

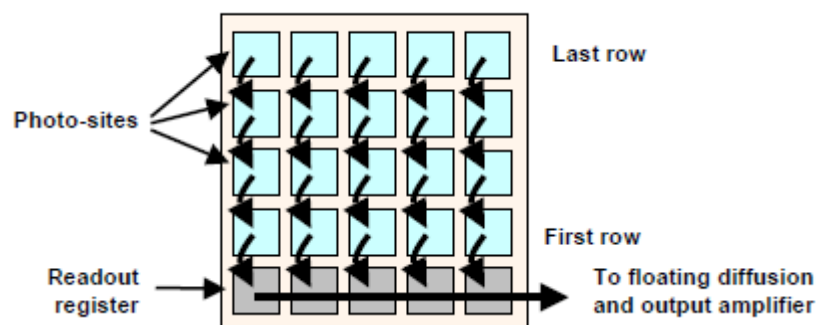


Figura 2-7 Funcionamiento sensor CCD

Aunque los CCDS ofrecen una imagen excelente, su proceso de fabricación está dedicado a elementos

fotosensibles en vez de transistores y por lo tanto esta es una dificultad importante a la hora de implementar el avance de la tecnología en los transistores usando la tecnología CCD. Sin embargo, el mismo rendimiento puede ser conseguido usando sensores CMOS, es incluso posible implementar todas los bloques funcionales embebidos en el sensor, por ejemplo, control del sensor on-chip, técnicas de doble muestreo correlado, circuitería para la supresión de ruidos de patrón fijo, etc.

El estado del arte en el diseño de sensores de imagen CMOS a día de hoy consiste en sensores de pixel activo, es decir, en un circuito integrado compuesto por una matriz de píxeles y unidades de procesamiento de señal donde además se produce una amplificación de señal dentro del píxel, de ahí la nomenclatura de activo. Idealmente un sensor de imagen CMOS debería poseer; una eficiencia cuántica del 100%, es decir, que por cada fotón incidente se genere un par electrón-hueco, alta velocidad de captura, bajo ruido, respuesta lineal, sin diafonías o acoplos y sin artefactos en las imágenes, pero veremos que esto no siempre es así.

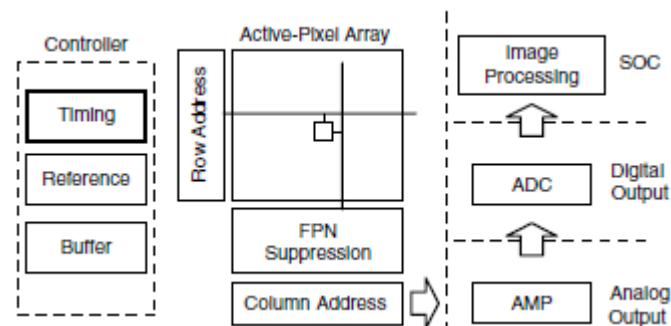


Figura 2-8 Funcionamiento sensor CMOS

Veamos a continuación las principales diferencias entre sensores CMOS y CCD.

Tabla 2-1 CCD vs CMOS

	CCD	CMOS
Ventajas	<p>Excelentes prestaciones: resolución, ruidos, uniformidad, sensibilidad</p> <p>Fill Factor o eficiencia en torno al 90%</p> <p>Corriente oscura reducida (5 pA a 0.5 nA/cm²)</p> <p>Tecnología muy madura</p>	<p>Tecnología CMOS estandarizada</p> <p>Consumo moderado</p> <p>Región de interés seleccionable</p> <p>Permite integrar conversión A/D en el chip</p> <p>Alta velocidad</p> <p>Alta escala de integración de circuitos de procesamiento de señal</p> <p>Coste razonable del Silicio (para volúmenes importantes)</p>
Inconvenientes	<p>Tensiones de alimentación elevadas (~15V)</p> <p>Alto consumo</p> <p>Ruido por transferencia de carga</p>	<p>Eficiencia del sensor en torno a un 60%</p> <p>Ruido debido al mismatch entre transistores.</p> <p>Ruido kTC</p> <p>Corriente oscura elevada (1nA/cm² standard, 50pA/cm²)</p>

2.2.2 Ejemplos de layout de un CIS

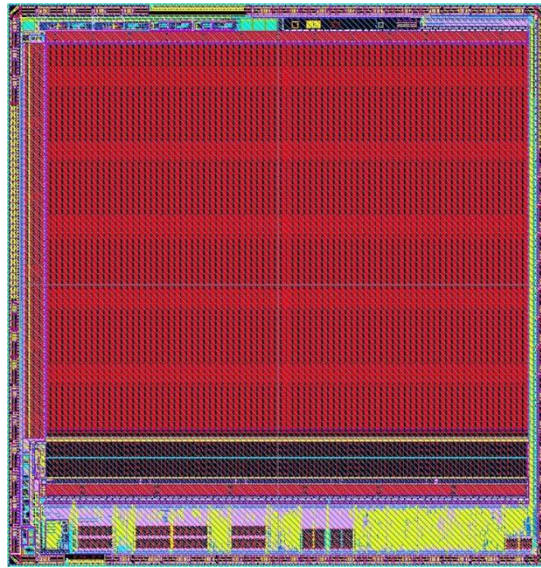


Figura 2-9 Layout CIS de área

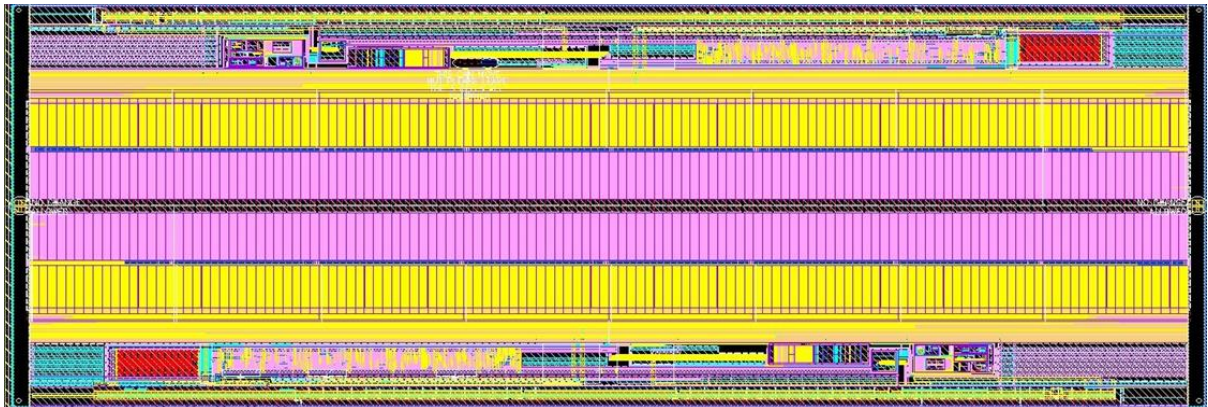


Figura 2-10 Layout CIS lineal

2.2.3 Principales características de los CIS

Las principales características de los sensores de imagen y sobre las que pivotarán el resto de capítulos que siguen son las siguientes:

- Rango dinámico; o rango de niveles de iluminación que puede ser representado en una imagen, en dB.
- Sensibilidad; que es la mínima cantidad de exposición detectable por el sensor, en Lux·s. Es el primer parámetro que te permite directamente comparar dos sensores de imagen en condiciones de baja iluminación.
- Relación señal a ruido.
- Ruidos que provocan artefactos en las imágenes o deterioran su calidad.
- Función transferencia de modulación; permite medir la resolución espacial de un sensor.

2.3 Arquitectura del píxel

2.3.1 Fotodiodo

El fotodiodo es un dispositivo semiconductor que convierte la luz en corriente. El funcionamiento del fotodiodo se basa en el efecto fotoeléctrico que establece que cuando un fotón con suficiente energía incide en

un fotodiodo este crea un par electrón-hueco. A partir de esta transformación se crea un campo eléctrico en el fotodiodo que polariza el diodo de manera que conduzca corriente. Un fotodiodo enclavado (pinned) es una variación en la estructura del fotodetector con una gran región de deplexión la cual permite bajo ruido, baja corriente oscura y una eficiencia elevada.

2.3.2 Píxel 4T

Aunque existe la única diferencia de un transistor entre la arquitectura 3T y 4T del píxel, hay una diferencia significativa en prestaciones del píxel. La siguiente figura muestra el diseño y el principio de funcionamiento de un píxel 4T. El esquema de un píxel 4T consiste básicamente en un fotodiodo p+/n/p, un transistor de transferencia de carga (TG) desde el PPD hasta un nodo de difusión flotante (FD) de capacidad C_{FD} para almacenar carga del fotodiodo. Además, posee un transistor de reset para resetear el nodo FD tras cada lectura, un seguidor de corriente que actúa como buffer, y de amplificador que aísla el nodo de sensado el canal de lectura además de un transistor de selección de fila.

La principal diferencia entre el píxel 3T y el 4T es el transistor de transferencia TG, el cual separa el PDD de la FD. Por lo tanto, un píxel 4T permite almacenar la señal lo que nos posibilita el poder hacer concurrencia entre integración de señal y lectura del dato anterior; es decir, leer la señal de un frame anterior mientras se está exponiendo el siguiente frame. Lo cual proporciona más velocidad de lectura y mayor SNR. Además, a diferencia del píxel 3T, el 4T permite implementar la técnica CDS, la cual es útil a la hora de eliminar el ruido de reset, esta técnica se discutirá más adelante. La otra ventaja de la TG es que previene de diafonías e interferencias con los píxeles vecinos mitigando efectos como el blooming (exceso de carga en los píxeles vecinos cuando saturan que hace que se contaminen sus píxeles adyacentes).

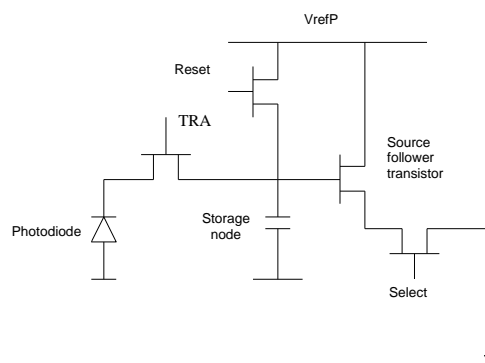


Figura 2-14 Píxel 4T

2.3.3 EMVA₁₂₈₈

La EMVA₁₂₈₈ es un estándar de medida desarrollado por la Asociación Europea de Visión Industrial (European Machine Vision Association) cuyo propósito es definir métodos de medida y caracterización de sensores de imagen y cámaras utilizados en aplicaciones en entornos industriales.

Para este propósito son necesarios varios requisitos:

- Una fuente de luz homogénea para las medidas de sensibilidad, linealidad y no uniformidades.
- Una cámara climática para las medidas de corriente oscura dependiente de temperatura.
- Banco óptico para las medidas espectrales y eficiencia cuántica en el espectro de luz visible (410nm – 1050nm) así como para las medidas de eficiencia parásita a la luz.
- Un mecanismo de luz pulsada sincronizada con la adquisición de imágenes para la medida de lag.
- Píxeles tapados en el área sensora con el propósito de medida de blooming.
- Plataforma rotatoria y banco óptico para medir la respuesta angular.
- Banco necesario para la medida de la resolución efectiva o MTF.

3 CARACTERIZACIÓN DE SENSORES DE IMAGEN CMOS

Este capítulo desarrolla la importancia de la instrumentación de laboratorio necesaria a la hora de caracterizar sensores de imagen CMOS y testarlos funcionalmente así como los distintos instrumentos y características de los mismos que influyen en la medida.

3.1 Introducción

Si echamos un vistazo en perspectiva a la caracterización de CIS encontraremos los siguientes objetivos:

- Búsqueda del punto de operación.
- Medidas electroópticas estándar: EMVA1288, señal oscura, ruidos temporal y de patrón fijo.
- Medidas electroópticas específicas: MTF, QE, PSRR, eficiencia del shutter, lag, blooming, etc.
- Validación funcional: secuencias internas, bloques digitales, consumo, salida LVDS, etc.

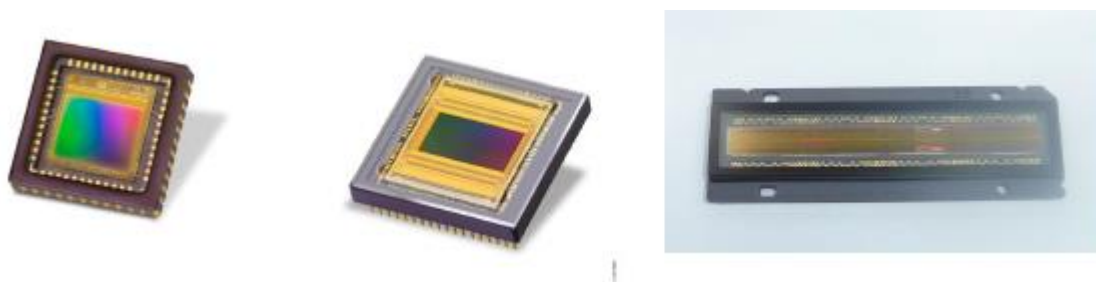


Figura 3-1 Sensores de Imagen CMOS de área y línea

3.2 Flujo típico de caracterización

Una buena planificación de la caracterización es vital para generar datos fiables en tiempo y coste. La planificación del proceso debe cubrir aspectos como los objetivos de las medidas, información necesaria adicional a calcular, selección de los métodos apropiados o el detallado del reporte final.

La mayor parte de las medidas que se realizan son evoluciones de las propuestas por la EMVA1288 para adaptarlas a las necesidades tanto de los clientes, como de la aplicación, como al software y hardware dedicado que se diseña para cada producto.

Los procedimientos de medida deben incluir toda la información básica para poder reproducir de nuevo la medida, como la configuración del sensor, el set-up de medida, las condiciones y los objetivos de la medida así como posibles factores a tener en cuenta o posibles fuentes de error.

Tabla 3-2 Plan típico de caracterización

	Test	Tarea	Descripción
Tests funcionales	Secuencia de inicio	Bonding	Comprobar que cada pad del anillo de pads está correctamente conectado según el diseño referencia del chip
		Power up	Comprobar integridad de las alimentaciones y las tierras

		Consumo de corriente	Medir consume en espera y en funcionamiento del sensor y comparar con valores de simulación
	Comunicaciones y programabilidad	Funcionalidad SPI	Lectura ID del chip
			Lectura STATUS del chip
			Correcta lectura/escritura de registros internos del sensor
			Lanzar instrucción START/STOP de operación del sensor y comprobar su aplicación
		LVDS	Comprobar con un patrón conocido
		Reset externo	Escribir registros internos con valores conocidos no por defecto
			Aplicar un reset externo al senso
			Comprobar que los registros contienen los valores por defecto
	Bloques de señal mixta	Power on Reset	Chequear reset al inicio del sistema
		Referencias internas	Comprobar referencias internas de tensión de los bloques digitales y analógicos
	Circuitería de lectura	Funcionalidad	Leer fila de test con y sin iluminación
Medidas de caracterización	Performance óptica		DR, SnR, DSNU, PRNU, VFPN/HFPN in dark, Temp Noise, NEE, CG, Dark Current, Response curves, QExFF
	Consumos	Medida corrientes	Medida de consumo para los modos más depurados y demandados

6 SIMULACIONES Y RESULTADOS

Este capítulo 6 contiene la introducción al software empleado y los resultados en dos casos concretos de dos sensores con características diferentes.

6.1 Lenguaje y entorno



Figura 6-1 Entorno Python de trabajo

6.2 Librería en Python

Se ha creado una librería escrita en Python que con la siguiente taxonomía definida a continuación y detallada en el capítulo de anexos:

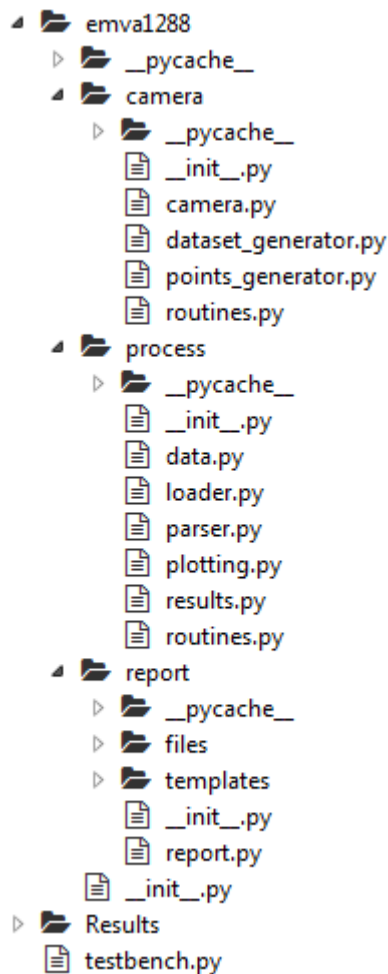


Figura 6-2 Librería creada para caracterización y simulación

Tabla 6-1 Descripción funciones y scripts creados

<i>camera.camera.py</i>	Contiene las clases y rutinas necesarias para simular el comportamiento de un CIS a partir de unos parámetros típicos propios del sensor.
<i>camera.dataset_generator.py</i>	Permite crear un fichero descriptor y sus correspondientes imágenes siguiendo los parámetros generados por <i>camera.py</i> .
<i>camera.points_generator.py</i>	Contiene las clases y rutinas precisas para poder crear vectores de puntos para parámetros como la exposición o la irradiancia.
<i>camera.routines.py</i>	Rutinas para calcular QE, irradiancia y demás parámetros útiles haciendo uso de las ecuaciones matemáticas descritas en la memoria.
<i>process.data.py</i>	Clase que permite leer del fichero descriptor generado, cargar las imágenes indicadas y crea un objeto de datos para ser procesado según la EMVA1288.
<i>process.loader.py</i>	Clase que obtiene la información relevante de una imagen para el cálculo de performances.
<i>process.parser.py</i>	Clase que traduce la información del fichero descriptor a información útil para la carga de imágenes.
<i>process.plotting.py</i>	Clase que a partir de los resultados del procesamiento dibuja las gráficas necesarias para el reporte final.
<i>process.results.py</i>	Clase que a partir de los datos procesados realiza todos los cálculos siguiendo el estándar EMVA1288 como se ha descrito a lo largo del proyecto.
<i>process.routines.py</i>	Funciones útiles a la hora de calcular ajustes lineales, formas de las imágenes, FFT, etc.
<i>report.report.py</i>	Conjunto de funciones que a partir de los resultados y las gráficas generadas crea un reporte automático en LaTeX.
<i>testbench.py</i>	Script de pruebas utilizado para testar todas las funciones y realización de las simulaciones propuestas.

6.3 Gráficas y resultados

Se van a generar dos sets de datos para procesarlos posteriormente y mostrar los conceptos más importantes en un sistema simulado de manera fiel al real. Por lo que nos encontraremos dos casos:

Tabla 6-2 Sensores simulados para la comparativa

	Sensor A	Sensor B
Sensor type	Area	Area
Resolution [pixels]	4320x2048	640x480
Data output [bits]	8	12

Pixel size [μm]	5x5	5x5
Frame-rate	35fps	120fps
Interface type	Camera-Link	GigE
Light source	Led	Led

El procesamiento de las imágenes generadas en ambos casos queda resumido en la siguiente tabla:

Tabla 6-3 Comparativa performance electro-óptica para los dos casos en estudio

	Sensor A	Sensor B
QE [%]	56.05	49.86
CG [DN/e⁻]	0.117	0.183
$\sigma_{y,\text{dark}}$ [e⁻]	4.598	4.182
SNR_{max} [dB]	32.93	42.52
$\mu_{e,\text{min}}$ [e⁻]	5.721	4.968
$\mu_{e,\text{sat}}$ [e⁻]	1964	17867
DR [dB]	50.7	71.1
DSNU [%]	< 0.1	< 0.1
PRNU [%]	< 0.1	< 0.1
Linearity error [%]	0.002	0.004
Dark current [e⁻/s]	3.78	1.573
PTC		

