

UNIVERSIDAD DE SEVILLA



FACULTAD DE FÍSICA

Diseño de un píxel de alto rango dinámico con control automático de exposición

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Yassine Lamouaraa Sedlackova

Tutores:

Jorge Fernandez Berni

Ricardo Carmona Galán

2020/2021

Índice

1. Introducción y objetivos	7
2. Alto rango dinámico	10
2.1. Control adaptativo	13
2.2. Mapeo de tonalidades	13
3. Sistemas de visión natural	15
4. Sensor CMOS	18
4.1. Principio de operación	19
4.2. Eficiencia	22
4.3. Eficiencia cuántica	22
4.4. Fill Factor, FF	22
4.5. Arquitecturas convencionales sensor CMOS	23
PPS	23
3T APS	24
4T APS	24
Píxel logarítmico	25
5. Diseño de píxel con alto rango dinámico y mapeo de tonos	25
5.1. Píxel con auto adaptación	25
5.2. Autoexposición mediante realimentación	29
5.3. Simplificación de circuitería	33
6. Conclusiones	37
7. Anexo: Modelo de fotodiodo	39
Fotogeneración	39
Ley de <i>Beer-Lambert</i>	40
Coeficiente de absorción	41
Capacidad del fotodiodo	42
Ganancia de conversión	43
Arquitectura $p - n^+$	43

Foto-corriente	44
8. Código verilogA Fotodiodo	48

Índice de figuras

1.	<i>a)</i> Imagen tomada al aire libre con una cámara simple, tenemos bajo contraste. <i>b)</i> Misma imagen pero tras aplicar técnicas HRD, presenta un mayor contraste en general.	7
2.	<i>a)</i> tras una serie de fotogramas con distintos tiempos de integración T , <i>b)</i> a partir de un algoritmo se forma la imagen de alto rango dinámico. Figura obtenida de [2].	8
3.	Desenfoque por movimiento. El giro del tiovivo produce zonas difuminadas que pierden el contraste por completo.	9
4.	<i>a)</i> Píxel compuesto por 2 fotodiodos, <i>b)</i> la captura realizada de manera directa en un tiempo de integración corto, y largo, formando <i>c)</i> la imagen de alto rango dinámico. Figura tomada de [4].	9
5.	<i>a)</i> Imagen con una exposición automática de 8 bits. <i>b)</i> misma imagen pero tratada con técnicas de alto rango dinámico. Figura extraída de [8].	11
6.	La salida del sol produce contrastes bruscos difíciles de adaptar en un corto periodo de tiempo. Imagen extraída de Vision Market.	12
7.	<i>a)</i> una captura con un sensor de imagen convencional, <i>b)</i> corresponde a la misma imagen tras realizar técnicas HDR. Imagen extraída de Vision Market.	12
8.	<i>a)</i> Imagen de alto rango dinámico, <i>b)</i> asignación de la información usando 8 bits, dándose lugar a pérdidas en los detalles. <i>c)</i> corresponde al uso de multi-exposición, para posteriormente en <i>d)</i> aplicar el mapeo por gradiente y obtener una imagen HDR. Figura extraída de [10]	14
9.	Esquema de modelo de adaptación visual.	14
10.	<i>a)</i> No es sencillo distinguir los faros encendidos a pleno día, <i>b)</i> pero en un entorno oscuro la luz proveniente de los faros se percibe fácilmente. Figura extraída de [8].	15
11.	Pupila. <i>a)</i> para un entorno iluminado no tenemos dilatación, <i>b)</i> mientras que para un entorno oscuro tenemos dilatación, penetrando una mayor cantidad de luz.	16
12.	Inhibición y regeneración con el tiempo de los conos y bastones por depleción química.	16

13.	Conjunto de células que presenta el tejido de la retina. Figura extraída de [11].	17
14.	Sensor de imagen CMOS, arquitectura $3T$ APS. Cada píxel se compone de circuitería de lectura, fotodiodo y buses de información (<i>columnas y filas</i>).	19
15.	a) Esquema eléctrico general del píxel. b) Simplificado.	20
16.	Ciclo de operación del APS 3-T.	20
17.	Fotorepuesta para distintos niveles de intensidad. El color verde corresponde a una intensidad incidente nula, mientras que el rojo, amarillo y azul corresponden a niveles de iluminación cada vez mayores.	21
18.	Arquitectura del PPS.	23
19.	a) Píxel 3T APS, b) Píxel 4T APS.	24
20.	Configuración logarítmica del 3T APS.	25
21.	Píxel con auto adaptación. Imagen extraída de [5].	26
22.	Diagrama temporal correspondiente a la captura. Imagen extraída de [5].	27
23.	a) Píxel con auto-adaptación de manera automática. b) Matriz 4×4 en CADENCE de píxeles con retroalimentación.	30
24.	Tensión de píxel $V_{p_{ij}}$ para distintas potencias junto a tensión normalizada $V_{a_{ij}}$	31
25.	a) Tensión de píxel $V_{p_{ij}}$ para distintas potencias, b) Tensión de normalización $V_{a_{ij}}$	31
26.	Simulación del píxel 4×4 para distintos ordenes de magnitud en la potencia lumínica respecto a la de referencia; a) $0,1 \times Pot_{ref}$, b) $0,01 \times Pot_{ref}$, c) $10 \times Pot_{ref}$, d) $100 \times Pot_{ref}$	32
27.	a) Buffer, b) Inversor en tecnología CMOS.	33
28.	Simplificación del píxel con auto-adaptación automática.	34
29.	Valor de tensión del píxel $V_{p_{ij}}$, junto con el valor de normalización $V_{a_{ij}}$ (<i>píxel simplificado</i>).	35
30.	a) Tensión de píxel $V_{p_{ij}}$ para distintas potencias, b) Tensión de normalización $V_{a_{ij}}$ (<i>píxel simplificado</i>).	35
31.	Simulación del píxel 4×4 simplificado para distintos ordenes de magnitud en la potencia lumínica respecto a la de referencia; a) $0,1 \times Pot_{ref}$, b) $0,01 \times Pot_{ref}$, c) $10 \times Pot_{ref}$, d) $100 \times Pot_{ref}$	36

32.	<i>a)</i> Aumento del fill factor, <i>b)</i> Aumento del número de píxeles, y por consiguiente la resolución, y <i>c)</i> una combinación equilibrada.	37
33.	Generación pares e^-h^+ a partir de fotogeneración.	39
34.	Flujo de fotones absorbidos en función del coeficiente de absorción α y la longitud de penetración y	40
35.	Coefficiente de absorción (α) en función de la longitud de onda (λ).	41
36.	Figura del fotodiodo $p-n^+$. <i>a)</i> visto desde arriba, <i>b)</i> corte transversal.	43
37.	Distintas contribuciones de corriente del fotodiodo en función de la distancia lateral x_s	47

Resumen

Los sensores de imagen convencionales no son capaces de capturar toda la información que contiene una escena real en una única exposición. La causa reside en el gran rango de intensidades presente, en condiciones habituales hablamos de $10^{-4} - 10^5 \text{ cd} \cdot \text{sr}/\text{m}^2$, siendo de especial importancia los casos extremos. Los sensores de imagen convencionales trabajan con un rango dinámico limitado, definido por la razón de señal más grande posible sin saturar y la señal más pequeña detectable. Exceder este rango dinámico supone utilizar nuevas estrategias a la hora de capturar la información, distintas arquitecturas de píxel, y aprovechar algoritmos que maximizan el rendimiento de sensores ya existentes. Sin embargo no están exentos de artefactos ni de limitaciones como el ruido, baja resolución, pequeño “*fill factor*”, mal mapeo de tonalidades, El mejor sensor de imagen conocido es el de los sistemas de visión naturales, capaces de auto-adaptarse de manera inmediata gracias a los distintos mecanismos que la conforman.

En este trabajo de fin de máster se explota una arquitectura de píxel ya existente, capaz de auto-adaptarse para cualquier rango de intensidades lumínicas. Haciendo uso de retroalimentación se logra una adaptación automática sin necesidad de control externo. Por último se discute la posibilidad de reducir notablemente el área que ocupan distintos elementos sin alterar la funcionalidad principal de auto-adaptación automática.

1. Introducción y objetivos

Multitud de aplicaciones actuales requieren la digitalización del entorno: *robótica, sector automovilístico, equipos médicos, equipos de visión nocturna, seguridad,...* para ello se hace uso de dispositivos **opto-electrónicos**, capaces de captar la información ambiental y transformarla en una imagen. El dispositivo más común corresponde con el **sensor de imagen**, que captura la intensidad lumínica incidente en un periodo de tiempo corto, la transforma en una señal eléctrica, y tras procesar la información se forma la imagen de la escena. El sensor está compuesto por pequeñas celdas fotosensibles denominadas píxeles (del inglés *picture elements*). Dependiendo de la arquitectura y los materiales que componen el sensor, se obtiene una serie de características u otra. Actualmente existe una tendencia en producir imágenes de alta resolución que permitan representar fielmente la realidad, por ejemplo para el control de vehículos no asistidos o en el uso de drones. Junto con la resolución, se requieren técnicas de alto rango dinámico (high dynamic range, **HDR**) que permitan trabajar en entornos que exceden fácilmente los 200dB. La Figura 1 es un claro ejemplo en el cual se observa como a partir de técnicas HDR se logra extraer más detalles de la escena.

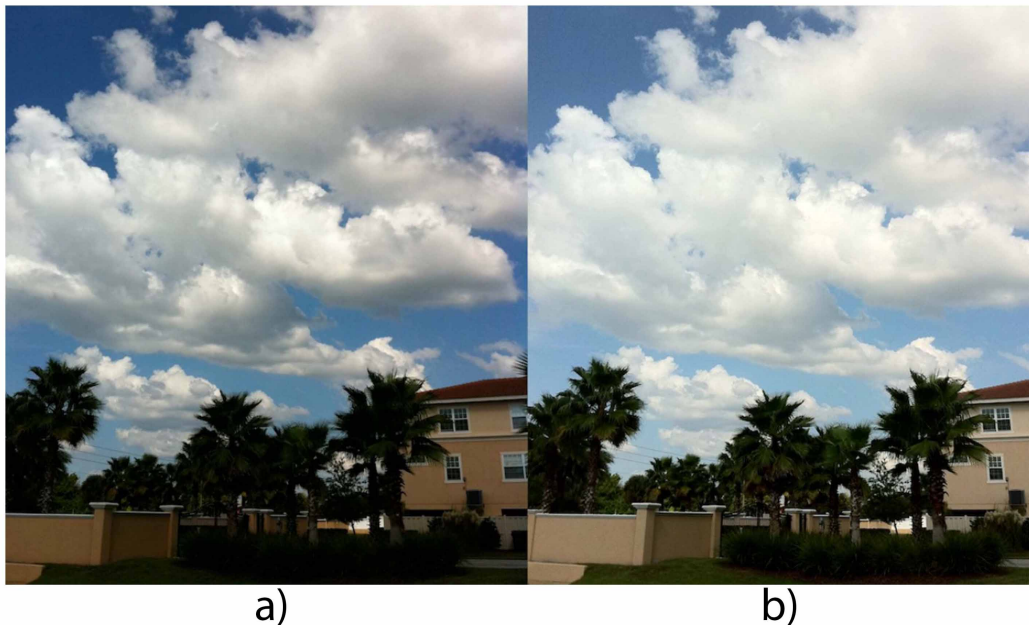


Figura 1: *a)* Imagen tomada al aire libre con una cámara simple, tenemos bajo contraste. *b)* Misma imagen pero tras aplicar técnicas HRD, presenta un mayor contraste en general.

La Figura 1 *a)* se ha capturado una escena al aire libre utilizando una cámara simple

(sensores de imagen convencionales), mientras que en la Figura 1 b) corresponde con la misma imagen una vez se han aplicado métodos de HRD, en concreto multicaptura [1], que logra imágenes de alto rango dinámico tras unir fotogramas con tiempos de exposición distintos. Cuando una escena presenta distintas intensidades lumínicas en un intervalo amplio, nos obliga a proceder de forma distinta a la habitual a la hora de captura imágenes, siendo necesarias técnicas de multicaptura (*multi exposure*). Ya vimos en la Figura 1 que tras combinar fotogramas con distintos tiempos de integración se consigue un resultado con mejor contraste ([2], [3]). No obstante estamos sujetos a condiciones temporales al ser necesario tomar una serie de fotogramas con distintos tiempos. Para situaciones que no haya movimiento, o sea muy suave no habría inconvenientes, sin embargo en el caso de escenas dinámicas no es posible utilizar estas técnicas.

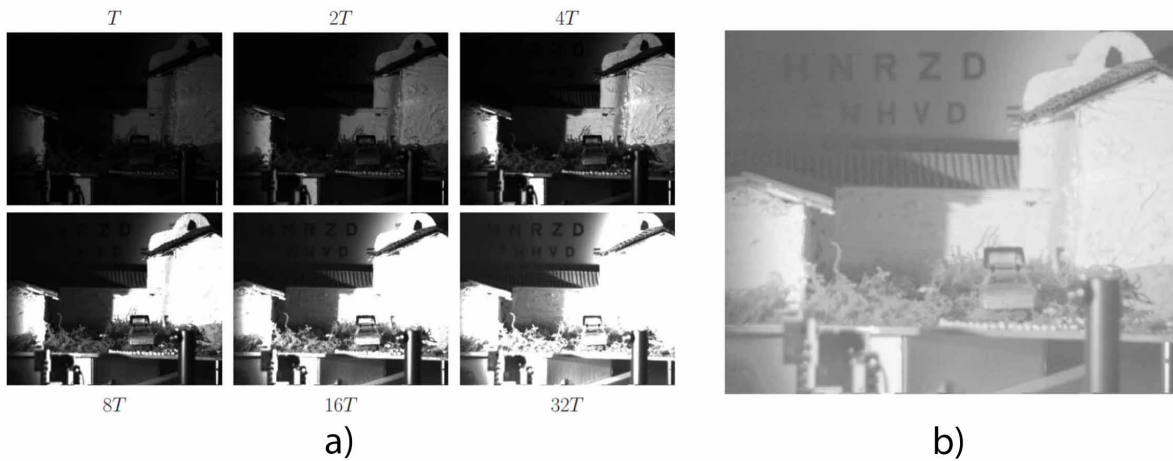


Figura 2: a) tras una serie de fotogramas con distintos tiempos de integración T , b) a partir de un algoritmo se forma la imagen de alto rango dinámico. Figura obtenida de [2].

En el caso estático la captura por multi-exposición permite unos resultados sólidos como se muestra en la Figura 2 b). Al contrario cuando tenemos objetos en movimiento, necesitamos un tiempo de integración lo suficientemente corto para formar las imágenes sin que aparezcan artefactos como el desenfoque por movimiento que corresponde con la Figura 3. Las limitaciones aparecen tanto en las estrategias empleadas a la hora de sensar la imagen, como en la propia arquitectura del píxel. Modificar la arquitectura del píxel de manera adecuada permite tener un mayor rango dinámico a expensas de sacrificar la resolución y aumentar el coste de fabricación, lo que redundaría en un menor segmento del mercado. El utilizar parte del área que presenta el píxel en implementar bloques digitales o una lectura inteligente capaz de tratar la información produce estos efectos.



Figura 3: Desenfoque por movimiento. El giro del tiiovivo produce zonas difuminadas que pierden el contraste por completo.

En la Figura 4 se presenta un ejemplo que incluye más de un fotodiodo [4]. Gracias a la circuitería presente, es posible una ganancia dependiente de las cargas acumuladas en SP1, que junto a SP2 en serie permiten mitigar los efectos por la perdida de contraste y con un tiempo de exposición relativamente corto, evitándose el desenfoque por movimiento.

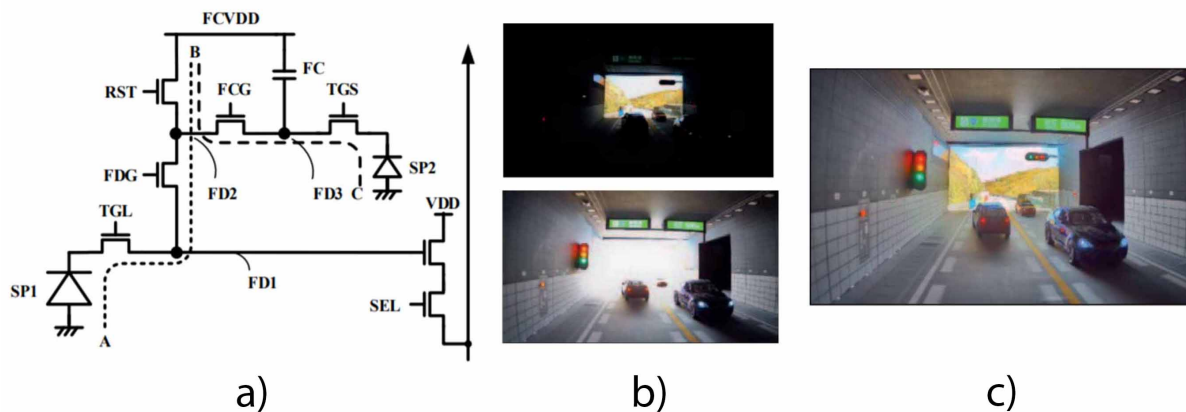


Figura 4: a) Píxel compuesto por 2 fotodiodos, b) la captura realizada de manera directa en un tiempo de integración corto, y largo, formando c) la imagen de alto rango dinámico. Figura tomada de [4].

Nuevamente aparecen inconvenientes, como la baja resolución al tener un "fill factor" menor, o el ajuste externo del tiempo de integración de los fotodiodos.

Lo ideal se corresponde con una arquitectura capaz de adaptarse a entornos extremos de

iluminación sin necesidad de señales de control externas, algoritmos, pos-procesamiento digital, etc. Como después veremos, la **visión humana** es capaz de adaptarse a la luz incidente sin pérdidas de contraste utilizando retroalimentación entre las células que forman la retina.

Este trabajo de fin de máster toma una estructura de píxel ya existente [5], y mediante modificaciones se implementa una retroalimentación entre píxeles vecinos. Los resultados obtenidos demuestran que es posible adaptar un rango extenso de iluminación incidente en el rango disponible que posee el píxel en una única exposición, consiguiendo un procesamiento rápido y sin efectos como el desenfoque por movimiento que aparecía en la multicaptura. Por último se propone una serie de simplificaciones que aumentan el "fill factor" eliminando bloques digitales presentes en el diseño original. Los resultados destacan al seguir cumpliéndose la auto-adaptación de manera automática.

2. Alto rango dinámico

En la actualidad el sensado de imágenes en tiempo real ha creado la necesidad de trabajar en alto rango dinámico al convertirse en una función de vital importancia en este campo. La intensidad lumínica presenta un amplio rango de valores que dificultan el uso de sensores convencionales. En la Tabla 1 se recogen distintos valores de iluminación dependiendo de la situación en la que nos encontremos.

Escenas	Intensidad lumínica ($\text{cd} \cdot \text{sr}/\text{m}^2$)
Bajo la luz del sol	10^5
Em plena calle	10^3
Interior de una habitación	10^2
Bajo la luz de la luna	10^{-1}
Bajo la luz de las estrellas	10^{-3}

Tabla 1: Rango de intensidades lumínicas ($\lambda = 550 \text{ nm}$).

Para lograr una imagen lo más fiel posible a la realidad se necesita una alta percepción y precisión. El término de rango dinámico hace referencia a la relación entre señal mas alta sin saturar y la señal mas baja posible que no esté afectada por el ruido de fondo. Si tomamos situaciones del día a día, como se muestra en la Tabla 1, el valor es del orden de 140 dB, $10^3/10^{-2} = 10^5 \text{ cd}/\text{m}^2$. Sensores convencionales presentan un rango dinámico

reducido que no supera los 60-70 dB, por tanto la habilidad de percibir distintos tonos en escenas de rango dinámico superior a este se va haciendo progresivamente menor. Un ejemplo típico aparece al realizar una fotografía hacia el exterior de una ventana como se muestra en la Figura 5 donde se aprecia una mezcla de zonas claras y oscuras al mismo tiempo a causa del escaso rango dinámico; no se captan todas las tonalidades presentes en una única exposición, produciéndose un mal contraste.

Aumentar el contraste requiere pasar a alto rango dinámico. Este campo ha sido de gran estudio durante los últimos años. Se han propuesto diversas técnicas para adaptación a distintos niveles de iluminación, como la ya mencionada multicaptura ([6], [3]), el almacenamiento de la información en nodos flotantes y el mapeo de tonalidades en imágenes. Procesar la información conforme se realiza la captura es otra de las técnicas más recurrentes, y están presente en los denominados sensores de imagen inteligentes (*Smart Image Sensor*, [7] capítulo 4). Al estar caracterizados por bloques o circuitería adicional localizada en el mismo píxel, realizan operaciones sobre la imagen a la par que se está realizando la captura.

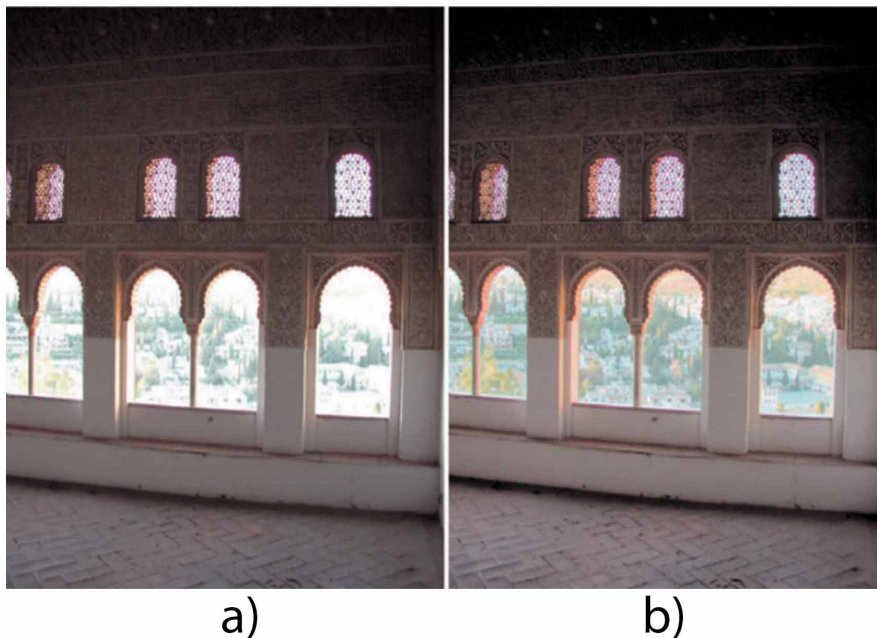


Figura 5: a) Imagen con una exposición automática de 8 bits. b) misma imagen pero tratada con técnicas de alto rango dinámico. Figura extraída de [8].

El alto rango dinámico también implica diseñar y optimizar la configuración del píxel.

De igual importancia es conseguir un sensor que se capaz de gestionar cambios muy bruscos en la intensidad lumínica. Como ejemplo, si estamos conduciendo a primera hora de la mañana y el sol está saliendo, tal y como se muestra en la Figura 6, tenemos una transición de zonas muy oscuras a zonas muy claras. Esto afecta al sensor de imagen si no es capaz de adaptarse lo suficientemente rápido.



Figura 6: La salida del sol produce contrastes bruscos difíciles de adaptar en un corto periodo de tiempo. Imagen extraída de Vision Market.

Otro ejemplo se da cuando pasamos del interior al exterior en un túnel, tal y como se muestra en la Figura 7.



Figura 7: *a)* una captura con un sensor de imagen convencional, *b)* corresponde a la misma imagen tras realizar técnicas HDR. Imagen extraída de Vision Market.

La pérdida de contraste por el cambio brusco de iluminación dificulta el uso de la

tecnología convencional en aplicaciones como la automoción sin conductor. Se estudian nuevos métodos que mejoran el tiempo de reacción con un rango de respuesta suficientemente amplio. Entre estos se haya la auto-adaptación (en inglés, *autoexposure*), en la que dependiendo de la intensidad ambiental incidente el propio sensor ajusta su tiempo de integración para abarcar el rango deseado. A continuación veremos una serie de aspectos importantes a la hora de trabajar en HDR.

2.1. Control adaptativo

Los dispositivos estándar solo capturan una fracción de la información disponible, produciendo imágenes de baja calidad cuando intentan capturar escenas de alto rango dinámico. Para adquirir la máxima información, es de vital importancia configurar adecuadamente el tiempo de fotointegración del sensor. En situaciones con mayor cantidad de luz incidente necesitaremos un menor tiempo o se dará lugar a una gran cantidad de píxeles saturados. Por el contrario, si tenemos poca iluminación, será necesario un mayor tiempo de sensado para no perder información. El conseguir adaptar el sensor para las distintas situaciones permite una flexibilidad mucho mayor en su operación. Para imágenes estáticas, el tiempo es más sencillo de ajustar, mientras que para situaciones dinámicas es necesario de control externo y retroalimentación. Normalmente este control externo está incluido en el propio sensor de imagen a nivel de *hardware*. Mediante algoritmos heurísticos y estocásticos [9] se logra dicho control por realimentación.

2.2. Mapeo de tonalidades

Los dispositivos convencionales presentan 24-bits por pixel, de forma que solo existen 256 posibles niveles de intensidad por cada color. Para imágenes de alto rango dinámico tenemos una mayor variedad de intensidades lumínicas. Esto hace que sea necesario desarrollar algoritmos que compriman el rango completo de iluminación para poder formar imágenes que se puedan representar en una pantalla digital (*LCD, IPS, etc*). Realizar un escalado o normalizar del rango de iluminación conlleva a la pérdida de información. Un simple escalado de imagen, tal y como se muestra en la Figura 8 limita los detalles a la hora de representar el alto rango dinámico en una pantalla. Es complicado designar un valor de iluminación real, a un valor digital, siendo un área de estudio en auge. Un método que permite comprimir dicho rango fue descubierto por *Raanan Fattal* y sus compañeros

[10], y se basa en la forma que tiene la retina de responder de manera local en lugar de manera global a cambios en la intensidad. Se trata de un algoritmo basado en gradientes, con lo cuál es posible asignar la información como una función de la intensidad incidente.

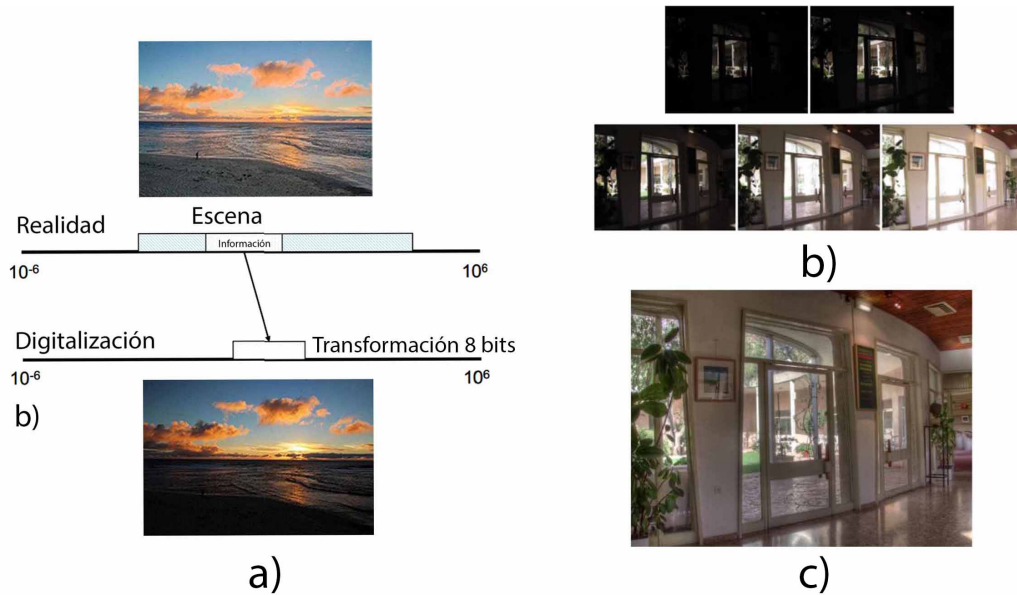


Figura 8: *a)* Imagen de alto rango dinámico, *b)* asignación de la información usando 8 bits, dándose lugar a pérdidas en los detalles. *c)* corresponde al uso de multi-exposición, para posteriormente en *d)* aplicar el mapeo por gradiente y obtener una imagen HDR. Figura extraída de [10]

El esquema que se muestra en la Figura 9 describe el procesamiento completo que debe pasar la información para lograr el alto rango dinámico: Primero captamos toda la información lumínica del ambiente, posteriormente se realiza un mapeo de tonalidades y acaba visualizándose el resultado final en una pantalla.

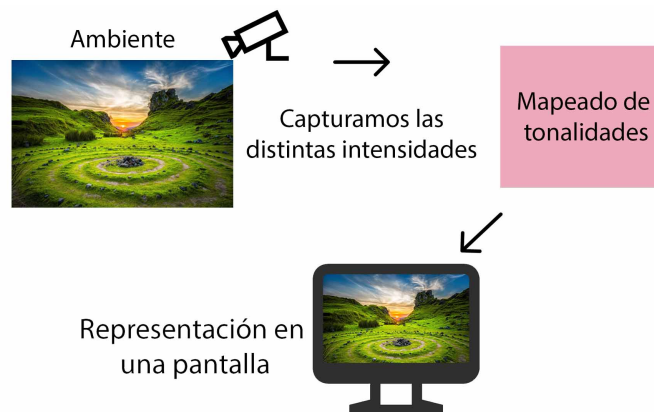


Figura 9: Esquema de modelo de adaptación visual.

El mapeo de tonalidades es un paso importante, ya que dota a la imagen de los distintos tonos oscuros y luminosos de una escena.

3. Sistemas de visión natural

Un sistema que realiza todas estas operaciones de alto rango dinámico se corresponde con el visual. La intensidad lumínica abarca un rango de intensidades que van desde el día más luminoso $10^5 \text{ cd} \cdot \text{sr}/\text{m}^2$ hasta la noche mas oscura $10^{-3} \text{ cd} \cdot \text{sr}/\text{m}^2$, dando lugar al amplio rango de tonalidades que experimentamos en el día a día. En la Figura 5 la luz incidente del exterior hacia el interior produce distintos contrastes que son complicados de capturar. Sin embargo nuestro cerebro forma una imagen de manera instantánea. La percepción de la imagen se da gracias a nuestro sistema visual, capaz de adaptarse a adaptarse a diferentes escenarios de iluminación a partir de mecanismos naturales.

La adaptación se produce en todo momento, pero se hace notar principalmente en entornos extremos a bajas intensidades lumínicas (*zonas oscuras*). El mínimo cambio se percibe de manera inmediata, tal y como se muestra en la Figura 10; En un día soleado las luces del coche son inapreciables, mientras que en la oscuridad no pasan desapercibidas.

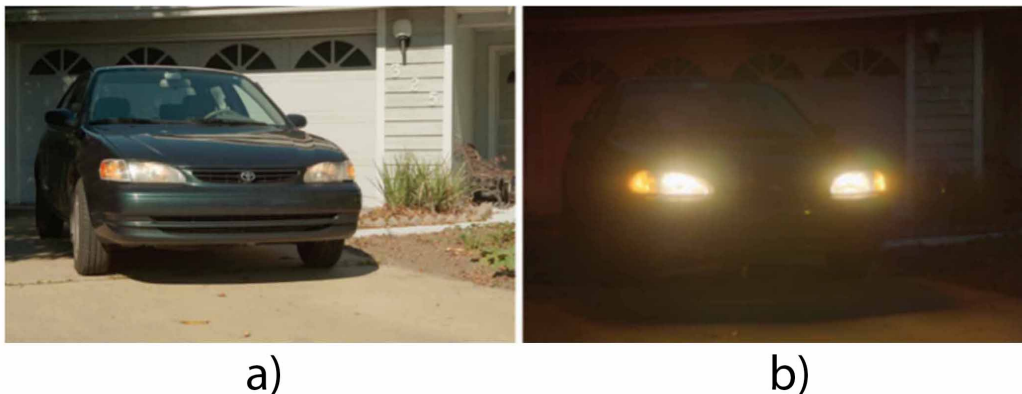


Figura 10: a) No es sencillo distinguir los faros encendidos a pleno día, b) pero en un entorno oscuro la luz proveniente de los faros se percibe fácilmente. Figura extraída de [8].

Se ha demostrado que la adaptación visual que experimenta el ser humano es un instrumento de **normalización** [8], capaz de escalar la intensidad del entorno preservando el contraste y la definición. Se trata de un mecanismo controlado y coordinado por la los

siguientes elementos: *pupila*, *reacciones químicas* y *la retina*.

- **Pupila:** Es capaz de modificar su diámetro, permitiendo así regular la cantidad de luz que atraviesa proveniente del exterior. En la Figura 11 se representa un esquema de la pupila.

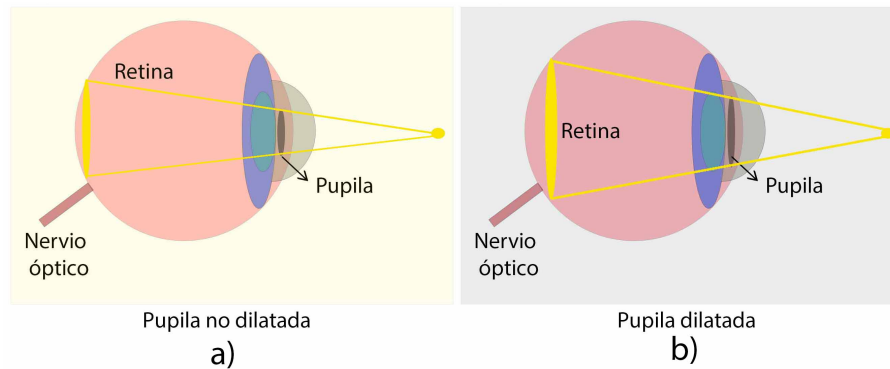


Figura 11: Pupila. a) para un entorno iluminado no tenemos dilatación, b) mientras que para un entorno oscuro tenemos dilatación, penetrando una mayor cantidad de luz.

- **Reacciones químicas de deplexión y regeneración:** Se da en pigmentos, volviéndolos insensibles o inhibiéndolos durante un periodo de tiempo dependiendo de la cantidad de luz incidente. Una ilustración de este fenómeno se muestra en la Figura 12.

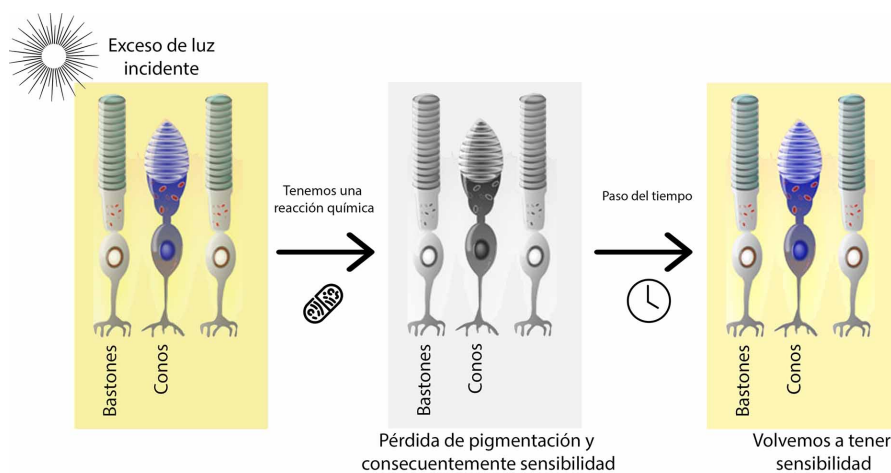


Figura 12: Inhibición y regeneración con el tiempo de los conos y bastones por deplexión química.

- **Retina:** La luz una vez atraviesa la pupila, pasa por el cuerpo vítreo, y se encuentra con la **retina**. La retina se corresponde con el tejido que recubre la zona interior del

ojo, compuesta en su mayoría por células de tipo neuronal. La Figura 13 corresponde estas células.

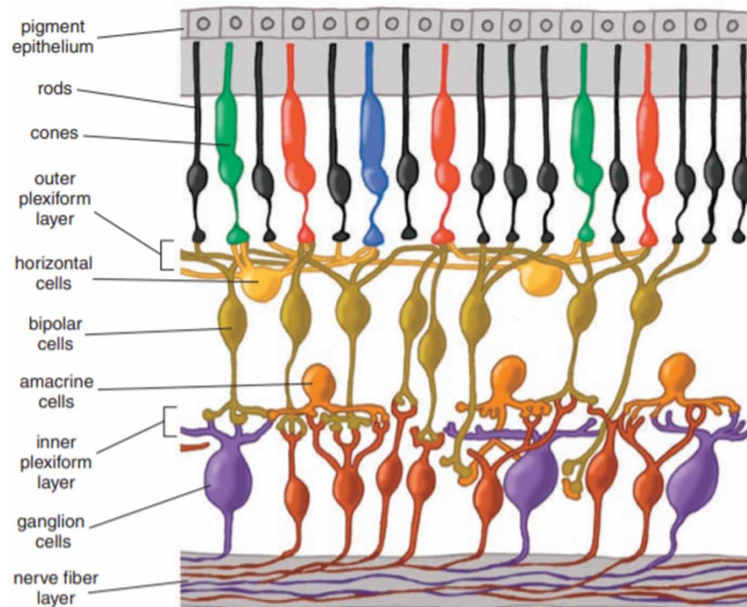


Figura 13: Conjunto de células que presenta el tejido de la retina. Figura extraída de [11].

En la retina caben destacar los conos y bastones, ya que son esenciales en la adaptación.

- Los bastones son muy sensibles a los cambios en luminosidad baja. Se encargan de adaptar la visión en entornos luminosos extremos con poca iluminación.
- Los conos son menos sensibles a cambios luminosos, se encargan de la visión en niveles de iluminación elevados.

En situaciones con iluminación pobre los bastones, al ser mas sensibles (*presentan un umbral de activación menor*), son los mediadores en la adaptación que ocurre en la retina. Conforme aumenta la iluminación, la sensibilidad de los bastones disminuye y pasamos a tener una adaptación controlada por los conos. Para intensidades mayores los bastones saturan y son incapaces de distinguir distintas intensidades lumínicas. Se verifica que el rol de los conos y bastones es importante y se debe tener en cuenta cuando trabajamos con potencias lumínicas extremas en alto rango dinámico. Sin embargo si solo tuviéramos conos y bastones, la zona intermedia de iluminación presentaría una peor adaptación. Aquí entran en juego las demás

células de la retina, en especial las que se conocen como células horizontales. A día de hoy no se sabe exactamente cómo intervienen en la adaptación visual, pero se cree que al encontrarse conectado a conos y bastones de manera lateral, permite una retroalimentación que consigue mejorar el rango de actuación para ambos conjuntos de células. Esto será de gran importancia cuando veamos la auto adaptación automática, ya que para lograr esto se necesita de algún tipo de retroalimentación.

La visión natural es muchos ordenes de magnitud más eficiente que cualquier sensor de imagen, y esconde secretos que ayudarían mejorar las existentes técnicas y estructuras actuales.

4. Sensor CMOS

La construcción del primer sensor de imagen se remonta a finales de los 60 [12] en tecnología metal-óxido-semiconductor (MOS). Se trataba de una matriz compuesta por fotodiodos de unión $p-n$ con una salida individual, permitiendo una lectura síncrona. Sin embargo existían efectos indeseados como pérdidas por corrientes parásitas, o distorsión por ruido de captura.

A finales de los 90 y con el aumento del consumo mundial, aparecieron mejoras en la fabricación de dispositivos en tecnologías MOS. Las principales causas fueron la búsqueda del abaratamiento en los costes de fabricación, además de un mayor volumen de sensores por unidad de materia prima invertida. Aparecieron arquitecturas y configuraciones ($3T APS$, $4T APS$) que mejoraban el funcionamiento y minimizaban los efectos indeseados (*fugas de corriente, ruido de captura, ...*). El sensor de imagen habitual hoy en día se compone de una matriz bidimensional formada por elementos sensibles a la luz denominados píxels. Cada píxel esta compuesto de una circuitería de control y un elemento foto-sensible, el **fotodiodo**. Lá física del fotodiodo se encuentra recogida en el Anexo de este trabajo. El esquema de sensor CMOS se muestra en la Figura 14.

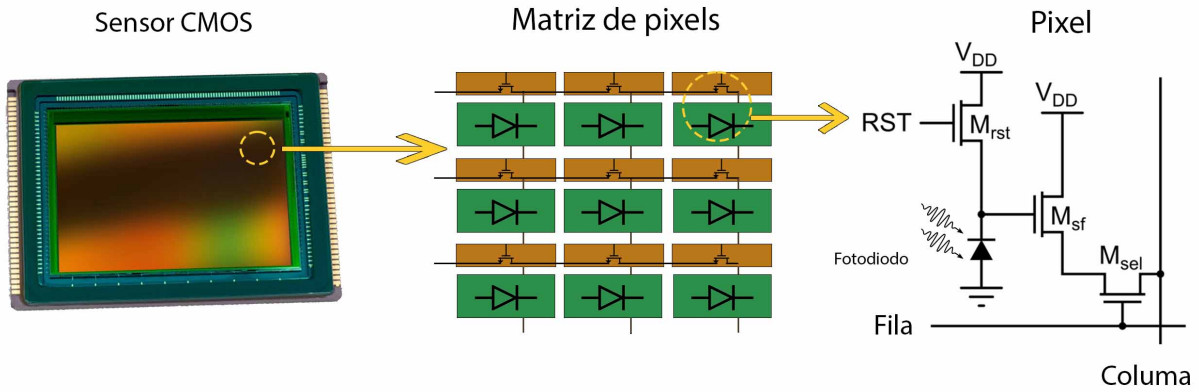


Figura 14: Sensor de imagen CMOS, arquitectura $3T APS$. Cada píxel se compone de circuitería de lectura, fotodiodo y buses de información (*columnas y filas*).

4.1. Principio de operación

Una vez inciden los fotones en el sensor de imagen, los píxeles proporcionan una tensión a la salida por foto-generación, formándose así, de forma agregada, una imagen. Los píxeles están interconectados entre sí a través de filas y columnas controladas por transistores MOS. Es posible modelar eléctricamente el fotodiodo en primera estancia como una fuente de corriente oscura I_{dark} , una fotocorriente generada I_{ph} por la intensidad incidente y una capacidad debida a la unión C_j . El fotodiodo opera en inversa, así la capacidad de unión predomina frente a la capacidad de difusión, tal y como se muestra en la Figura 15. La corriente oscura es muy pequeña cuando el diodo se encuentra polarizado en inversa, mientras que la fotocorriente se genera en la región de empobrecimiento entre los semiconductores tipo n y p del fotodiodo. La capacidad de unión juega un papel importante ya que almacena la carga que proporciona la variación de tensión que registramos a la salida. Los fotones que llegan a la zona de empobrecimiento generan pares $e^- - h^+$, posteriormente se separan por el campo eléctrico existente en la región de depleción y acaban difundiendo por las regiones neutras formando parte del circuito al que está conectado el fotodiodo produciéndose así la variación que registramos a la salida del píxel. La circuitería de control se encarga de tareas simples como el *reset* a un estado inicial, lectura, y selección de tensión a la salida. Las operaciones básicas se pueden resumir en las siguientes.

1. Tenemos el píxel en un estado arbitrario.

2. Pasamos a un estado inicial con el píxel a un valor de tensión, usualmente a V_{reset} . A causa de esto, la capacidad de unión se ve cargada con una cantidad de portadores.
3. Cuando exponemos el píxel a luz, los portadores generados en la zona de empobrecimiento se ven arrastrados por el campo eléctrico de la región de deplexión, se difunden por las regiones neutras del fotodiodo, y entran en el circuito externo. Se produce la **fotointegración**.
4. Finalmente ocurre la lectura del píxel a la salida de la columna.

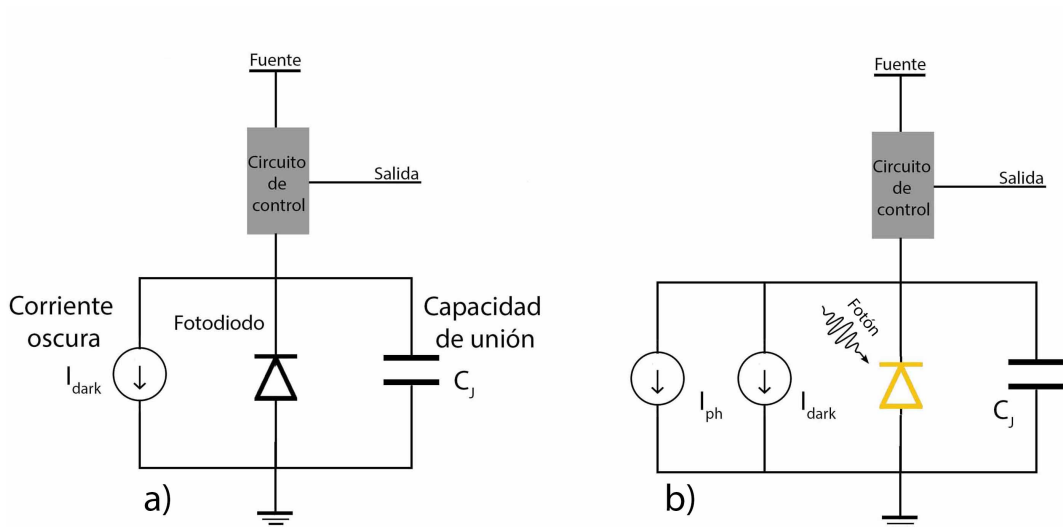


Figura 15: a) Esquema eléctrico general del píxel. b) Simplificado.

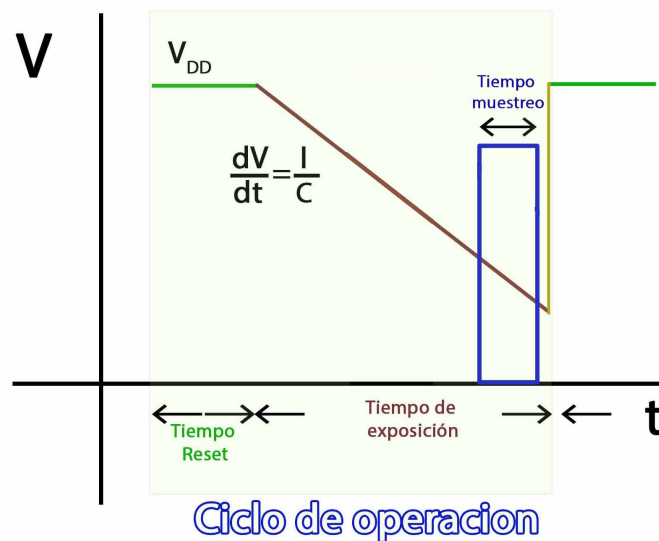


Figura 16: Ciclo de operación del APS 3-T.

La transformación que sufre la información sería la siguiente.

Fotones \rightarrow Foto-corriente \rightarrow Variación de carga almacenada \rightarrow Variación de tensión

El ciclo de operación del píxel se ilustra en la Figura 16. En el tiempo de *reset* tenemos al fotodiodo a una tensión V_{DD} o V_{reset} . Pasamos al periodo de exposición (*o periodo de integración*) en el que permitimos que la luz interaccione libremente con la estructura física del fotodiodo. El término *integración* es una referencia a la generación agregada de portadores de carga en la capacidad de unión C_j . Por último el tiempo de muestreo justo antes de terminar la integración correspondiente a muestrear el píxel.

El número de fotones que llega a la zona de depleción es una función que depende de la intensidad lumínica. Si no tuviésemos fotones incidentes, la capacidad C_j se descargaría muy lentamente a causa de la corriente oscura I_{dark} , mientras que para distintos niveles de intensidad la capacidad de unión se descargará a un ritmo mayor. Conforme aumentamos la intensidad, tenemos una mayor rapidez en la descarga tal y como se muestra en la Figura 17.

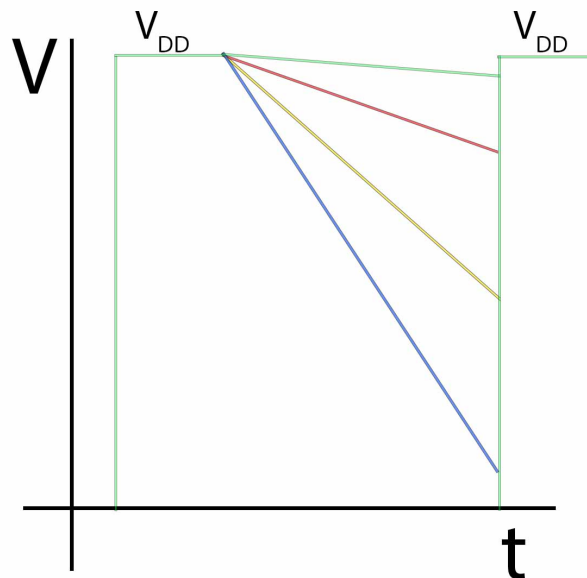


Figura 17: Fotorespuesta para distintos niveles de intensidad. El color verde corresponde a una intensidad incidente nula, mientras que el rojo, amarillo y azul corresponden a niveles de iluminación cada vez mayores.

4.2. Eficiencia

La eficiencia $\eta(\lambda)$ estima el número de fotones que acaban interactuando dentro del fotodiodo.

$$\eta(\lambda) = \frac{\text{Fracción de fotones que se miden como } e^-}{\text{Carga generada en la fotogeneración}} \quad (1)$$

Depende del tipo de sustrato, el número de impurezas, y la polarización. La carga generada en la zona de depleción acaba en su totalidad transformada en señal detectada, sin embargo existe la posibilidad de que zonas neutras produzcan pares electrones huecos.

4.3. Eficiencia cuántica

La respuesta espectral se define a partir de la eficiencia cuántica (QE), siendo esta la relación entre los fotones de la señal y el número de fotones que al final contribuyen a formar una fotocorriente.

$$QE(\lambda) = \frac{N_{\text{señal}}(\lambda)}{N_{\text{ph}}(\lambda)} \quad (2)$$

Cada una de estas cantidades depende del área del fotodiodo, la potencia de la señal y densidad de foto-corriente.

$$N_{\text{ph}} = \frac{J_{\text{ph}} A_{\text{pix}} t_{\text{int}}}{q} \quad ; \quad N_{\text{señal}} = \frac{P_{\text{opt}} A_{\text{pix}} t_{\text{int}}}{h\nu} \quad (3)$$

Donde A_{pix} denota el área del pixel, J_{ph} la densidad de foto-corriente, y t_{int} el tiempo de integración.

4.4. Fill Factor, FF

Este parámetro define la relación entre el área fotosensible y el área total del pixel.

$$FF = \frac{A_{\text{Activa}}}{A_{\text{T.pixel}}} \quad (4)$$

Se corresponde con la ventana que permite a la luz incidir sobre el fotodiodo. Cuanto mayor sea esta ventana, mayor es la sensibilidad.

4.5. Arquitecturas convencionales sensor CMOS

Las arquitecturas más comunes que podemos encontrar en un sensor de imagen CMOS son *PPS*, *3T APS*, *4T PPD*, *logarítmica*.

PPS

Es el fotodetector mas simple y se muestra en la Figura 18, presenta un fotodiodo y un transistor tipo *n* que actúan como interruptor. El modo de operación es de integración directa.

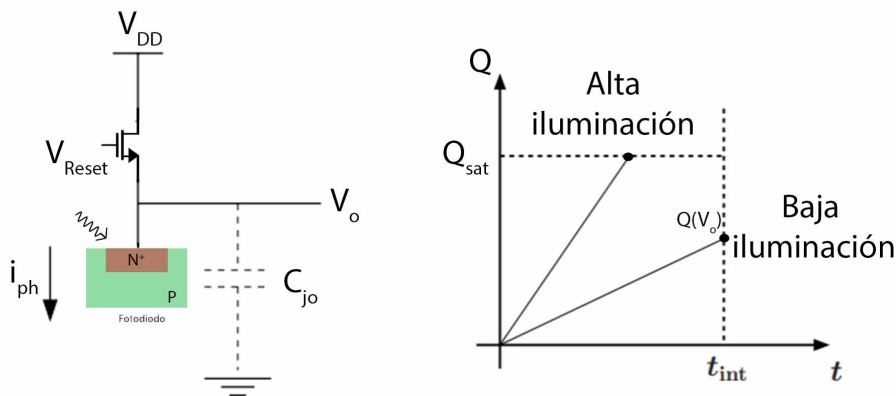


Figura 18: Arquitectura del PPS.

- El fotodetector se encuentra aislado a tensión V_{DD} .
- Tras incidir luz sobre este, la fotocorriente generada carga la capacidad de unión C_{jo} durante el tiempo de integración t_{int} ($Q(v_o)$). Se denomina carga de saturación Q_{sat} al valor máximo posible de carga que puede almacenar la unión.
- Cuando el tiempo de integración termina, se lee a la salida la tensión a la que se encuentra la capacidad (V_o).

Es necesario un único transistor *n*-MOS por píxel como se puede ver en la Figura 18 para realizar la operación de carga y descarga, convirtiéndose en el diseño más pequeño posible. Esto permite tener un porcentaje de área mayor para el fotodiodo, aumentando así el fill factor. Cuanto mayor sea el fill factor, tendremos una mayor eficiencia cuántica (*mayor cantidad de fotones incidentes logran interactuar con el fotodiodo*). Pero como veremos a continuación, otras arquitecturas (*3T APS*, *4T APS-PPD*) son más eficientes, ya que el PPS presenta una velocidad de lectura lenta, y una relación señal-ruido (*SNR*) pequeña.

3T APS

A continuación tenemos el sensor píxel activo 3T que se muestra en la Figura 19. Se utiliza en gran cantidad de aplicaciones, siendo la más popular en cámaras digitales. A diferencia del PPS, el transistor de *Reset* se utiliza para descargar la capacidad de unión, y volverla a un estado inicial. El transistor que precede permite desacoplar el nodo donde se almacena el valor de tensión tras la foto-integración, y la información pasa a un bus de columna cuando el transistor *Select* está activo. La operación de lectura se realiza cuando el tiempo de integración de cada píxel termina, fila a fila, hasta que se resetea la columna y pasamos a la $j + 1$. El píxel activo resuelve los problemas que comentamos anteriormente al conseguir una mayor velocidad de lectura a la salida, y por tanto un SNR mayor.

4T APS

Tenemos 4 transistores tipo n -MOS, y un fotodiodo tipo $p-i-n$ denominado **pinned**, como se muestra en la Figura 19 b). En la capa *pinned* ocurre el efecto de depleción que ocurría en el fotodiodo para el 3T APS, de manera que utilizando un transistor interruptor de transferencia (*TX*) es posible aislar la transferencia de carga generada hasta la salida. La capa pin p^+ minimiza las corrientes de fuga y logra una corriente oscura pequeña. También son muy útiles por que evitan el *lag* o el retraso a la hora de formar la imagen eliminando el ruido en la etapa de transferencia. Un inconveniente es el uso de un cuarto transistor, ya que disminuye el fill factor.

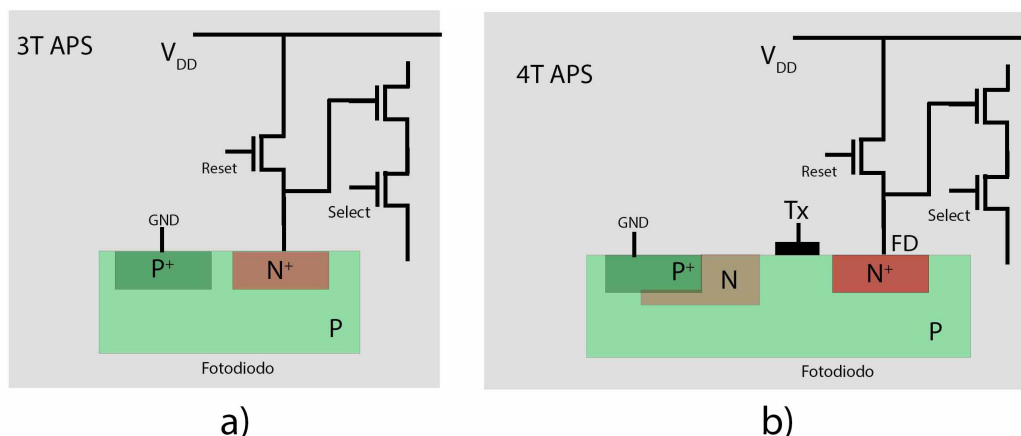


Figura 19: a) Píxel 3T APS, b) Píxel 4T APS.

Píxel logarítmico

Tomando la arquitectura del píxel 3T APS, y conectando la puerta del transistor *Reset* al valor de tensión V_{DD} , tal y como se muestra en la Figura 20, se pasa a una configuración que convierte la fotocorriente generada i_{ph} en una tensión V_{pd} de manera directa, siendo la tensión una función del logaritmo de corriente que circula por el drenador del n -MOS.

$$i_{drain} = i_d + i_{ph} = i_o e^{\kappa(V_{DD}-V_{pd})/k_B T} \rightarrow V_{pd} = V_{DD} - \frac{k_B T}{\kappa} \log \left(\frac{i_{drain}}{i_o} \right) \quad (5)$$

El parámetro κ es la eficiencia de la puerta. El inconveniente al trabajar en un modo de operación no lineal es la necesidad de procesar digitalmente la información para la creación de imágenes de manera que tenga en cuenta la característica logarítmica de la captura.

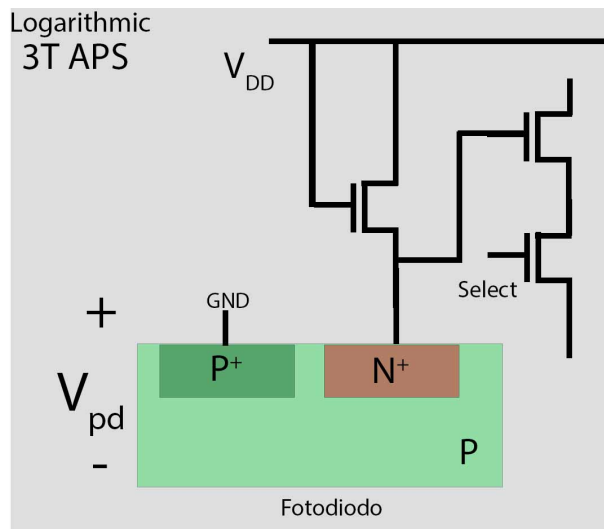


Figura 20: Configuración logarítmica del 3T APS.

5. Diseño de píxel con alto rango dinámico y mapeo de tonos

5.1. Píxel con auto adaptación

El desafío que presenta trabajar en alto rango dinámico sigue presente a la hora de diseñar el sensor de imagen. Los problemas principales abarcan el rango extenso de to-

nalidades, situaciones extremo (*alta claridad, oscuridad total*) y el tiempo de exposición (*necesidad de controlarlo en base a un análisis de imágenes previas*) entre otros aspectos. A partir de la estructura de píxel presente en mostrada en la Figura 21 y correspondiente a [5], se logra auto-adaptación en un rango amplio de iluminación gracias a la interacción entre píxeles vecinos.

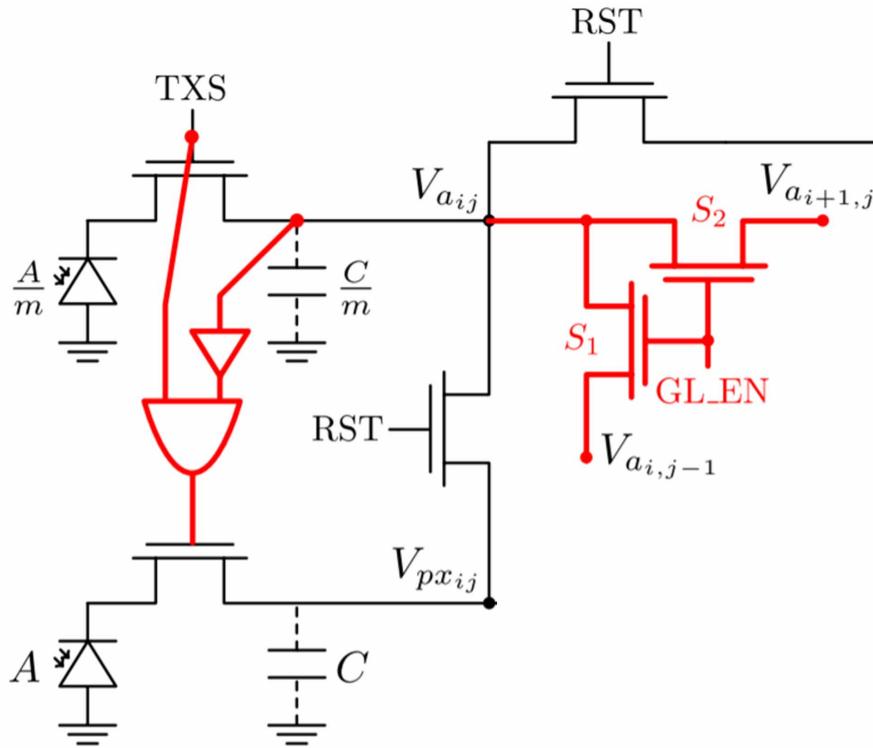


Figura 21: Píxel con auto adaptación. Imagen extraída de [5].

Principio de operación

La circuitería en rojo en la Figura 21 representa elementos añadidos a la estructura original correspondiente a un sensor comercial [13] y permite un control y adaptación global. Una serie de interruptores MOS S_{ij} conectan cada píxel a sus vecinos como se muestra en la Figura 21, de tal forma que el valor $V_{a_{ij}}$ es una función de la **iluminación media**. Cuando el valor de tensión $V_{a_{ij}}$ supera la tensión umbral de conmutación que posee la entrada del buffer, $V_{a_{ij}} > V_{\text{buffer}}$, la salida del buffer junto con la puerta AND pasan a un estado bajo cortándose por completo la integración del fotodiodo inferior. Esto establece un valor del píxel $V_{p_{ij}}$ en función del valor medio de iluminación $V_{a_{ij}}$.

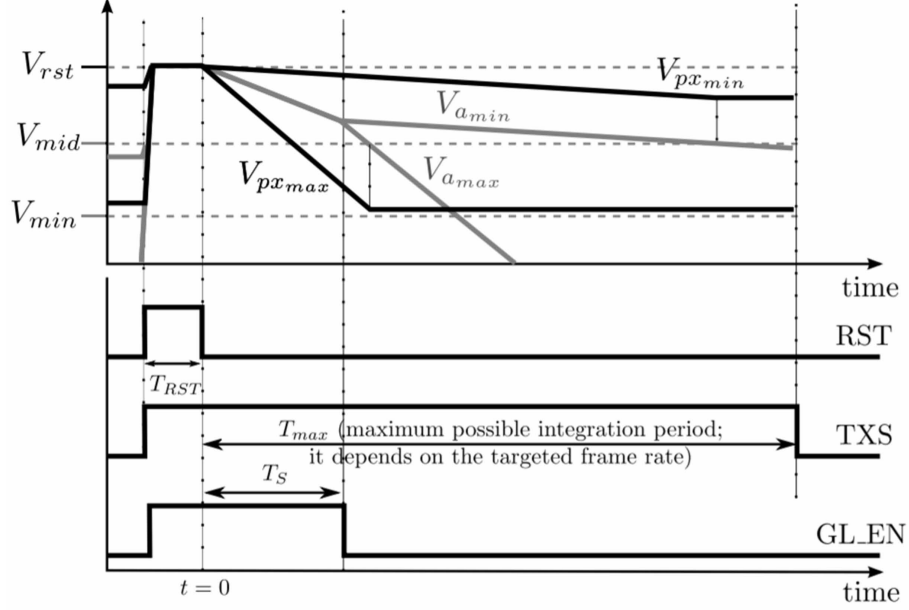


Figura 22: Diagrama temporal correspondiente a la captura. Imagen extraída de [5].

La Figura 22 presenta un diagrama temporal de las señales. Las etiquetas *max* y *min* se refieren a píxeles con iluminaciones máximas y mínimas. La señal *GL_EN* controla el tiempo necesario para la normalización de $V_{a_{ij}}$, y que se define como T_S [14]. Podemos expresar la evolución temporal de esta tensión a partir de la siguiente relación.

$$V_{a_{ij}}(t) = V_{rst} - \frac{\sum_{i,j} I_{ph_{ij}}/m}{M \times N \times C/m} t \quad (6)$$

Siendo $M \times N$ la resolución, C la capacidad de sensado, y m el parámetro que designa la relación de área entre el fotodiodo de píxel (*inferior*) y el fotodiodo de control (*superior*). Cuando el valor de la señal global *GL_EN* se corta, la tensión $V_{a_{ij}}$ incorpora información del promedio de foto-corriente de acuerdo a la siguiente expresión.

$$V_{a_{ij}}(t) = V_{rst} - \frac{\bar{I}_{ph}}{C} T_S - \frac{I_{ph_{ij}}}{C} (t - T_S) \quad ; \quad \forall t \geq T_S \quad (7)$$

Se escoge el valor del periodo de sensado (T_S) de manera que todas las tensiones $V_{a_{ij}}$ pasen por el valor del punto intermedio V_{mid} en un instante $t = T_{ij} > T_S$. El valor de la tensión umbral para el buffer conectado a $V_{a_{ij}}$ se diseña para que coincida con el valor medio del rango de señal, V_{mid} . El intervalo de foto-integración se extiende hasta $t = T_{ij}$,

de este modo el valor de la tensión para el fotodiodo inferior esta dado por 8.

$$V_{px_{ij}}(T_{ij}) = V_{rst} - \frac{I_{ph_{ij}}}{C} T_{ij} \quad (8)$$

Imponiendo la condición $V_{a_{ij}}(T_{ij}) = V_{mid}$ en la Ecuación 7, y resolviendo para T_{ij} obtenemos.

$$V_{a_{ij}}(T_{ij}) = V_{mid} = V_{rst} - \frac{\bar{I}_{ph}}{C} T_S - \frac{I_{ph_{ij}}}{C} (T_{ij} - T_S)$$

$$V_{rst} = V_{mid} + \frac{\bar{I}_{ph}}{C} T_S + \frac{I_{ph_{ij}}}{C} (T_{ij} - T_S)$$

Sustituyendo en 8 y despejando de manera algebraica.

$$V_{px_{ij}}(T_{ij}) = \left(V_{mid} + \frac{\bar{I}_{ph}}{C} T_S + \frac{I_{ph_{ij}}}{C} (T_{ij} - T_S) \right) - \frac{I_{ph_{ij}}}{C} T_{ij}$$

$$V_{px_{ij}}(T_{ij}) = V_{mid} + \frac{\bar{I}_{ph} - I_{ph_{ij}}}{C} T_S \quad (9)$$

Se obtiene la Ecuación 9, que constituye una expresión lineal para la tensión del píxel $V_{px_{ij}}$. La Ecuación demuestra que cualquier punto de la señal disponible se adapta con el valor medio de iluminación que incide sobre el sensor independientemente de dicho valor medio; esto es, en cierta manera un cierto grado de auto-adaptación. En concreto para $I_{ph_{ij}} = \bar{I}_{ph}$ la tensión del píxel sera el valor medio de señal. Tomamos ahora como condición $V_{px_{ij}}(T_{ij}) = V_{min}$ la tensión mínima del rango cuando la fotocorriente es la máxima $I_{ph_{ij}} = I_{ph_{max}}$, y la introducimos en la Ecuación 9.

$$I_{ph_{max}} = \bar{I}_{ph} + \frac{C(V_{rst} - V_{min})}{T_S} \quad (10)$$

En consecuencia no importa el valor específico de \bar{I}_{ph} , es posible sensar cualquier nivel de iluminación (*teóricamente*) mediante el ajuste pertinente de T_S . El valor mínimo de fotocorriente esta limitado por el ruido del sensor y el valor máximo de sensado T_{max} . Se concluye por tanto que tenemos un cierto grado de auto adaptación, como expresa la Ecuación (9), y que cualquier valor de foto-corriente es posible acomodarlo (teóricamente) dentro del rango de señal disponible ajustando el tiempo de sensado T_S (10).

Esta circuitería no presenta ningún límite/restricción a la hora implementar un mapeo de tonalidades, ya que cualquier condición lumínica queda dentro del rango de sensado con un ajuste adecuado de T_S . A la hora de imponer de manera física el diseño aparecen limitaciones que deben tenerse en cuenta:

- Requerimientos a nivel de sistema.
- Tasa de imágenes por segundo que se debe alcanzar, que impone un límite a T_{max} .
- Mínimo intervalo T_S que se puede conseguir de manera real.

También se introduce ruido espacial a causa de las variaciones en T_{ij} por efecto del mismatch, que produce variaciones en V_{mid} entre píxeles. Este ruido se puede tener en cuenta dentro del término de respuesta no uniforme, PRNU (*Photo-Response Non-Uniformity*). En el documento científico [5] se corrobora la validez de esta estructura de píxel a través de un prototipo experimental.

5.2. Autoexposición mediante realimentación

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, el píxel es capaz de adaptar su rango de señal a la iluminación promedio. Sin embargo para ello es necesario ir ajustando el tiempo de normalización con la señal GL_EN , es decir, T_S . Es necesario introducir una señal externa capaz de ajustarse a las condiciones de iluminación. Podríamos pensar en utilizar sensores inteligentes que estén provistos de celdas extra para que realicen una adaptación conforme se está sensando la señal. Otra posibilidad es utilizar redes neuronales capaces de adaptarse a las distintas condiciones tras un entrenamiento [15]. Pese a estas opciones, cuando las condiciones son muy cambiantes el ajuste puede que no sea lo suficientemente rápido. Esto supone una pérdida de información que puede llegar a ser crucial en muchos casos.

Para que el sensor se auto-adapte de manera automática (*auto-exposure*) sin necesidad de señales externas podemos pensar en la retina [11]. Gracias a las células que la componen, la mayor parte de la luz se procesa antes de pasar por el nervio óptico hacia el cerebro. Los bastones y conos (*responsables de la visión en todo el rango de iluminación*) se encuentran controlados por células horizontales y mediante retroalimentación existe la adaptación a

niveles intermedios. Esto es muy interesante, ya que si encontráramos una forma de retroalimentar el circuito con la propia dinámica del mismo daría lugar al ajuste automático necesario. Para eliminar el ajuste externo, y así deshacernos de GL_EN , se hace uso de la propia señal del píxel para ajustar el tiempo de integración T_S de manera automática. La Figura 23 a) representa la circuitería original con autoexposición por realimentación.

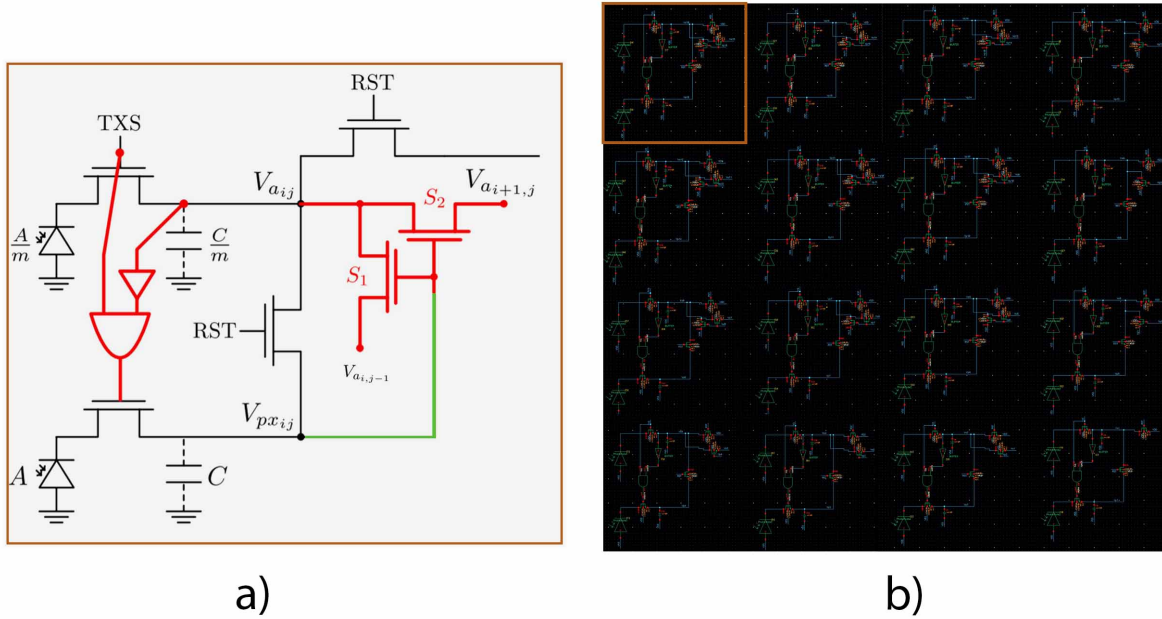


Figura 23: a) Píxel con auto-adaptación de manera automática. b) Matriz 4×4 en CA-DENCE de píxeles con retroalimentación.

Eliminar la señal GL_EN y sustituirla por la variación propia de la señal del píxel V_{pix} posibilita la modulación automática del tiempo T_S a partir del comportamiento local del píxel. Además al estar conectados en paralelo se realiza la misma operación para todos los píxeles, y por tanto auto adaptando la señal al rango disponible ($V_{rst} - V_{min}$).

Resultados

Empleando las herramientas de CA-DENCE en tecnología UMC 0-18 FDK vA02, un modelo de fotodiodo real (*Anexo: Modelo de fotodiodo*) en verilogA, y un modelo del buffer en verilogA, simulamos el comportamiento eléctrico de un píxel 4×4 , como se muestra en la Figura 23 b). La potencia lumínica incidente se elige de manera que coincida con el rango habitual de iluminación (para $\lambda = 550$ nm), siendo este $0,5 - 8$ W/m² nuestra referencia. Las unidades W/m² aparecen de manera natural al definir la potencia incidente

en el fotodiodo, para entender el rango de iluminación realizamos un cambio de unidades ($1 \text{ cd}\cdot\text{sr}/\text{m}^2 = 1,464\cdot 10^{-4} \text{ W}/\text{m}^2$). Haciendo los cálculos tenemos que el rango corresponde a $342 - 5464 \text{ cd}\cdot\text{sr}/\text{m}^2$. En los extremos de este rango tendría una situación similar a estar dentro de una habitación, y a caminar en el exterior, respectivamente. La Figura 24 se trata de un análisis en transitorio de la tensión $V_{p_{ij}}$ y $V_{a_{ij}}$ para cada píxel.

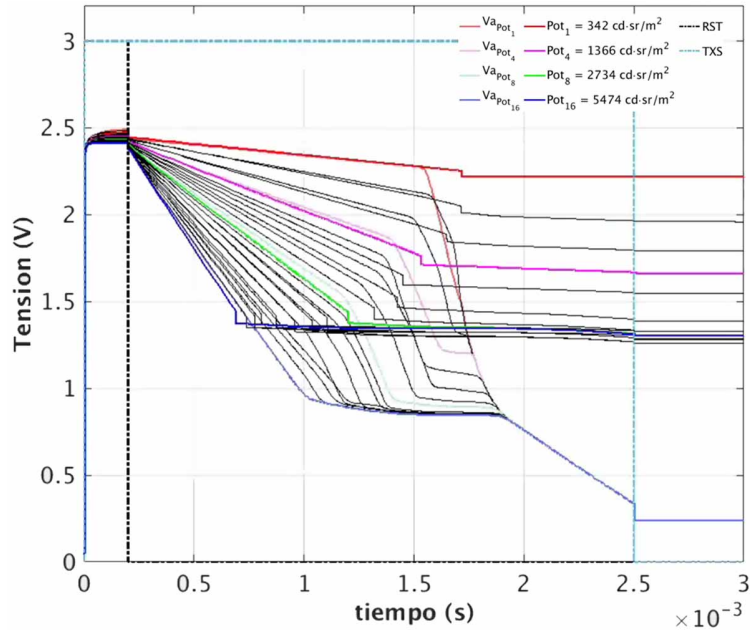


Figura 24: Tensión de píxel $V_{p_{ij}}$ para distintas potencias junto a tensión normalizada $V_{a_{ij}}$.

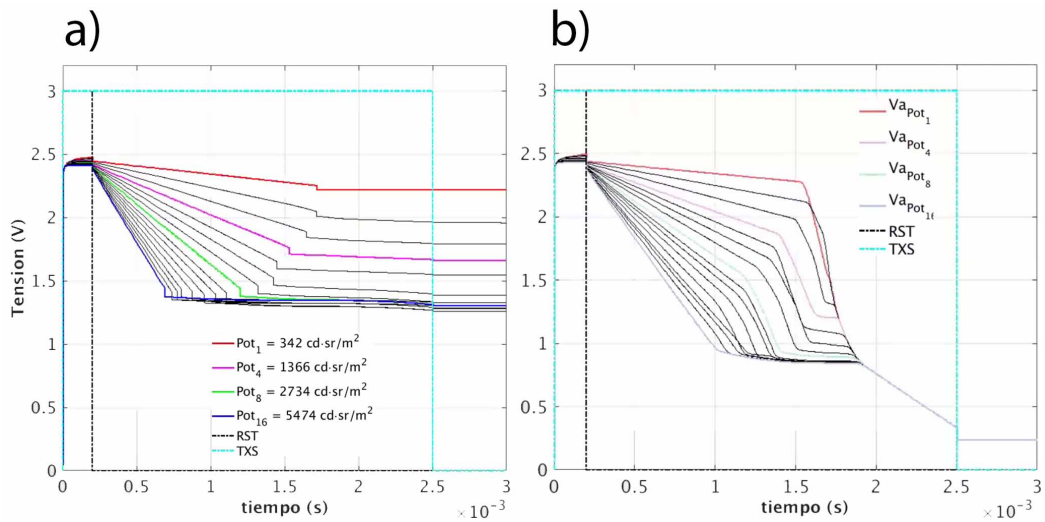


Figura 25: a) Tensión de píxel $V_{p_{ij}}$ para distintas potencias, b) Tensión de normalización $V_{a_{ij}}$.

La Figura 24 representa el valor de tensión de píxel para distintas potencias lumínicas

junto con la tensión de normalización. Se puede ver como la evolución del píxel en tensión mostrada en la Figura 25 a) queda fija entre los valores 2,5–1,2 V para potencias lumínicas comprendidas entre $10^2 - 10^5 \text{ cd}\cdot\text{sr}/\text{m}^2$, se mantiene la auto-adaptación. Si nos fijamos en la Figura 24 la tensión de normalización $V_{a_{ij}}$ permanece idéntica a la del píxel hasta cierto punto. Posteriormente evoluciona de acuerdo a la física del transistor como una función adaptativa global gracias a las demás tensiones promedio de píxeles vecinos. En la Figura 25 b) se puede ver esta variación para cada uno de los píxeles. El comportamiento físico esta relacionado con la distribución de carga en cada nodo junto con el modelo físico del transistor n -MOS. Para verificar los resultados aumentamos diez y cien veces la potencia lumínica, y también disminuimos por un factor diez y factor cien respectivamente. Los resultados se recogen en la Figura 26.

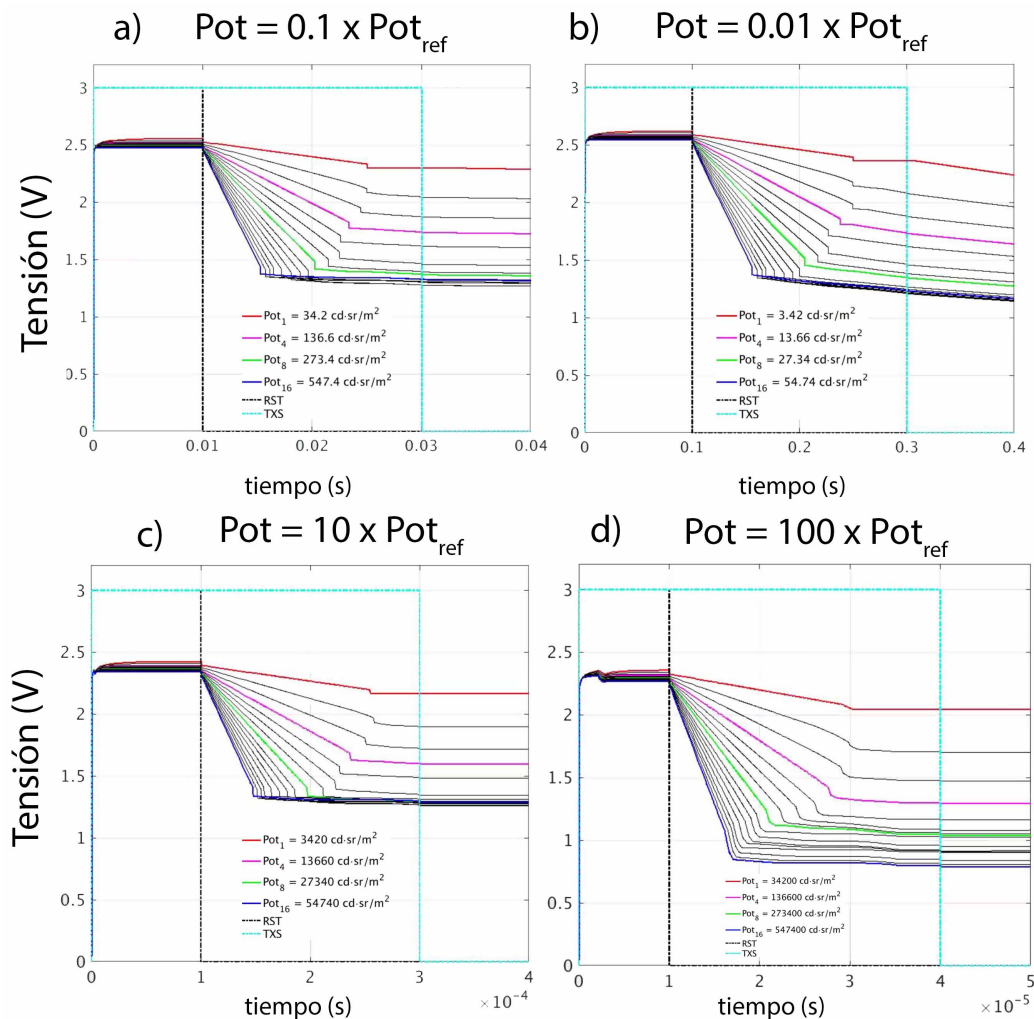


Figura 26: Simulación del píxel 4×4 para distintas ordenes de magnitud en la potencia lumínica respecto a la de referencia; a) $0,1 \times Pot_{ref}$, b) $0,01 \times Pot_{ref}$, c) $10 \times Pot_{ref}$, d) $100 \times Pot_{ref}$.

Centramos la atención en el valor del píxel puesto que es el valor relevante en términos de formación de la imagen. La Figura 26 representa la variación de $V_{p_{ij}}$ a distintos niveles de potencia respecto al de referencia establecido. Se verifica el mismo comportamiento de auto-adaptación que vimos con anterioridad, en un rango de tensiones adecuado para la posterior lectura del píxel a la salida. El cambio realizado al sustituir la señal externa GL_EN por la señal propia del píxel permite la auto-adaptación de manera automática, sin ser necesario establecer un valor T_S , ya que la señal se comprime automáticamente en un rango de tensión determinado.

5.3. Simplificación de circuitería

Los resultados anteriores confirman la auto-adaptación de manera automática que se produce al cambiar GL_EN por la propia señal $V_{p_{ij}}$. Analizando estos resultados, se prevé un comportamiento idéntico si eliminamos la puerta digital AND, y la señal TXS. La tensión de normalización $V_{a_{ij}}$ se conecta a la entrada de un inversor, y este a la puerta del transistor p -MOS transistor que controla el fotodiodo inferior. Al ser automática la adaptación, no es necesario imponer un tiempo máximo de integración, el propio píxel lo impone.

Otro aspecto que podemos simplificar es la función que realiza el buffer. En tecnología CMOS, un buffer se corresponde con dos inversores conectados para que la salida no se invierta la señal. Un cambio por un simple inversor, y el transistor del fotodiodo inferior por un p -MOS en lugar de un n -MOS da lugar a un comportamiento análogo.

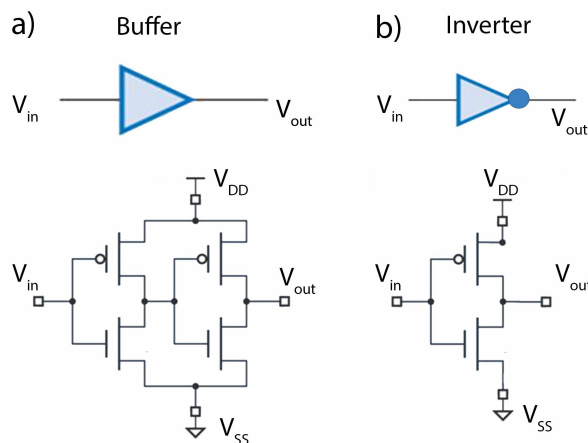


Figura 27: a) Buffer, b) Inversor en tecnología CMOS.

La nueva configuración pasaría a ser la marcada en color azul 28.

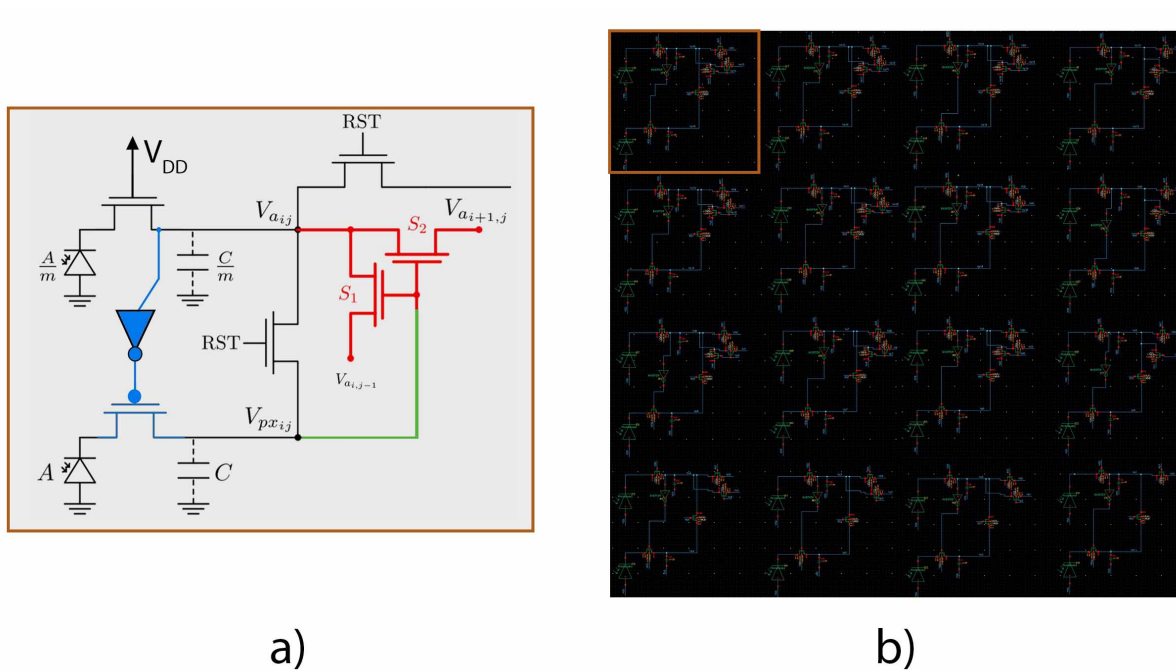


Figura 28: Simplificación del píxel con auto-adaptación automática.

La señal TXS se sustituye por la tensión máxima sometida en el circuito V_{DD} .

Resultados

Realizada la simplificación de la arquitectura, y utilizando la misma configuración, procedemos a simular los resultados utilizando las intensidades de referencia anteriores. Posteriormente se aumentan y disminuyen para verificar la auto-adaptación automática. La Figura 29 corresponde a la simulación con los valores de referencia establecidos con anterioridad.

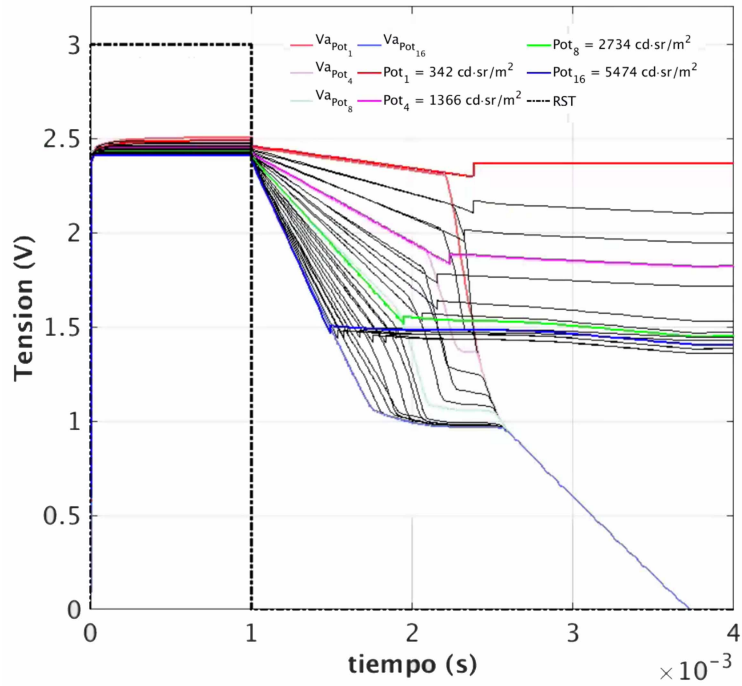


Figura 29: Valor de tensión del píxel $V_{p_{ij}}$, junto con el valor de normalización $V_{a_{ij}}$ (píxel simplificado).

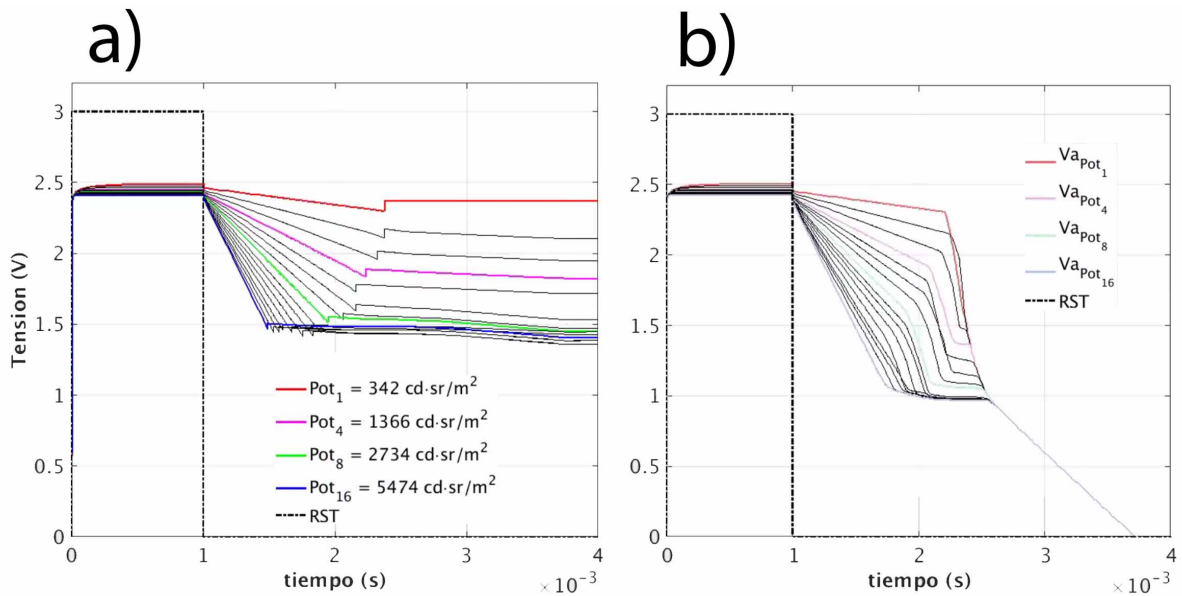


Figura 30: a) Tensión de píxel $V_{p_{ij}}$ para distintas potencias, b) Tensión de normalización $V_{a_{ij}}$ (píxel simplificado).

Al igual que en los resultados mostrados en las Figuras 25 y 26 se produce la autoadaptación automática de manera análoga, con pequeños cambios en los valores de tensión $V_{p_{ij}}$. Nuevamente la tensión de normalización es producto de la redistribución de carga y el

modelo físico del transistor, por eso centraremos nuestra atención en la tensión del píxel $V_{p_{ij}}$. Seleccionando las potencias lumínicas de manera idéntica, a ordenes de magnitud $\times 10$, $\times 100$, $\times 0,1$ y $\times 0,01$ respecto a la de referencia, se obtienen los siguientes resultados.

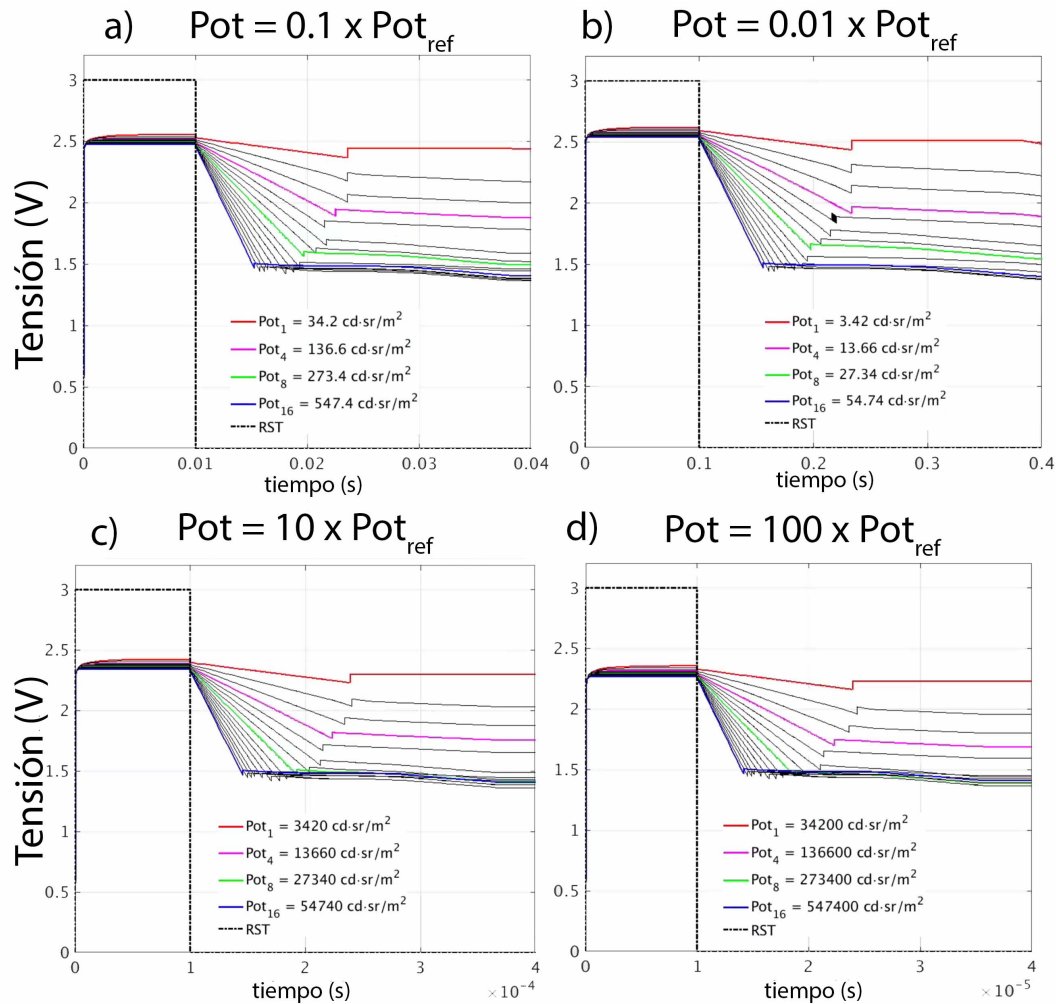


Figura 31: Simulación del píxel 4×4 simplificado para distintas ordenes de magnitud en la potencia lumínica respecto a la de referencia; a) $0,1 \times Pot_{ref}$, b) $0,01 \times Pot_{ref}$, c) $10 \times Pot_{ref}$, d) $100 \times Pot_{ref}$.

Los resultados reflejados en la Figura 31 corroboran que la simplificación no altera la funcionalidad del circuito. Esto permite aumentar el área activa, dando lugar a varias situaciones posibles. Estos casos se ilustran en la Figura 32.

1. Aumentar el área sensible del fotodiodo, es decir, el fill factor. Esto permite una mayor absorción de fotones, que a su vez se traduce en una mayor generación de portadores de carga.
2. Aumentar la cantidad de píxeles manteniendo el área del fotodiodo constante. Un

aumento de píxeles mejora la resolución al permitir una mejor caracterización de la intensidad incidente.

3. La combinación de ambas. Es posible aumentar el área y el número de píxeles de manera ponderada, mejorando así tanto la resolución como la cantidad de portadores generados.

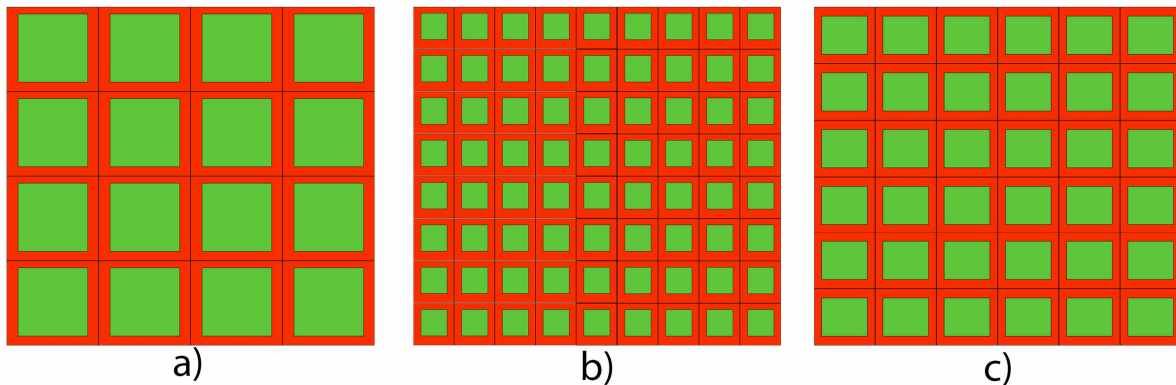


Figura 32: *a)* Aumento del fill factor, *b)* Aumento del número de píxeles, y por consiguiente la resolución, y *c)* una combinación equilibrada.

6. Conclusiones

El alto rango dinámico es un problema que se sigue estudiando al no existir una solución perfecta para todas las posibles situaciones y al que debemos enfrentarnos a la hora de diseñar un sensor de imagen. Existen configuraciones que consiguen solventar varios de los problemas extendiendo el rango dinámico del dispositivo haciendo uso de arquitecturas y técnicas, como la multicaptura, o el píxel logarítmico. Sin embargo esto requiere un coste y sacrificio en otros aspectos como el tiempo de sensado, la disminución del área activa del sensor, mayor consumo, mayor coste de producción, menor resolución

Para conseguir un sensor de imagen ideal nos podemos fijar en los sistemas de visión naturales capaces de adaptar el alto contraste de intensidades de manera eficiente y sin apenas latencia. Gracias a los distintos mecanismos que participan en el procesamiento antes de llegar al cerebro, en especial la retina, tenemos una eficiencia excelente. Al tratarse de sistemas naturales no somos capaces de modelar el comportamiento exacto, recurriéndose a modelos simplistas.

Inspirados por la retina, el píxel propuesto en la Figura 21 pretende auto adaptar la iluminación incidente para cualquier nivel de intensidad posible en una única exposición. Por otra parte se logra mediante cambios en la arquitectura mostrados en la Figura 23 para conseguir una auto adaptación automática sin necesidad de imponer un tiempo de sensado T_S .

Para finalizar, una simplificación de la arquitectura anteriormente mostrada en la Figura 28 da la posibilidad de un aumento en el fill factor y una mayor resolución al tener más área activa, al eliminarse la parte de circuitería digital (puerta *AND*), la señal de control *TXS*, y cambiar el *buffer* por un simple inversor. Los resultados mostrados en la Figura 31 demuestran que no se altera la funcionalidad de auto-adaptación en una única exposición.

7. Anexo: Modelo de fotodiodo

Una de las piezas clave a la hora de diseñar un píxel es elegir el fotodiodo correcto. Dependiendo de las propiedades del material, y la arquitectura del mismo tendremos un comportamiento y fotocorriente específicos. A continuación enumeramos una serie de propiedades esenciales que se dan a la hora de modelar fotodiodos en tecnologías CMOS avanzadas [16].

Fotogeneración

El semiconductor presenta una separación entre bandas energéticas denominada banda prohibida, que separa la banda de conducción de la de valencia. Si los fotones poseen suficiente energía, al incidir sobre el un semiconductor son capaces de producir pares electrón-hueco. Podemos expresar la energía de un foton en función de su longitud de onda de acuerdo a la siguiente expresión.

$$E_{ph}(\lambda) = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (11)$$

Cuando un foton incide con energía superior a la energía de la banda prohibida, $E_{ph}(\lambda) > E_g$, un electrón procedente de la banda de conducción promociona a la banda de valencia, creándose así los denominados pares electrón-hueco.

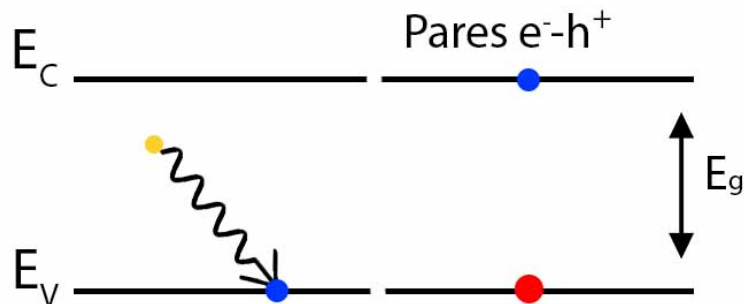


Figura 33: Generación pares e^-h^+ a partir de fotogeneración.

Si tenemos niveles con menor energía que la banda prohibida asociados a impurezas o defectos del material, podemos encontrar saltos entre estas bandas para energías menores que la banda prohibida. Los procesos de absorción de radiación electromagnética se dan conforme se atraviesa el medio por la ley *Ley de Beer-Lambert*

Ley de Beer-Lambert

El número de pares $e^- - h^+$ generados en la zona activa se puede definir como una función que decae exponencialmente con la distancia de penetración de acuerdo a la siguiente Ecuación.

$$G(y) = -\frac{\partial\Phi}{\partial y} \quad (12)$$

Siendo Φ el flujo de fotones incidente sobre el fotodiodo. La ley de Beer define que este flujo como una función que decae de manera exponencial:

$$\Phi(y) = \Phi_0 e^{-\alpha y} \quad (13)$$

Φ_0 se trata del flujo máximo de fotones y α el coeficiente de absorción. El flujo máximo de fotones esta relacionado con la luminosidad incidente dada por la siguiente expresión.

$$\Phi_0 = \frac{P_{opt} T_c \lambda}{hc} \quad (14)$$

La Figura 34 presenta la variación del flujo en función de la distancia atravesada y el coeficiente de absorción α .

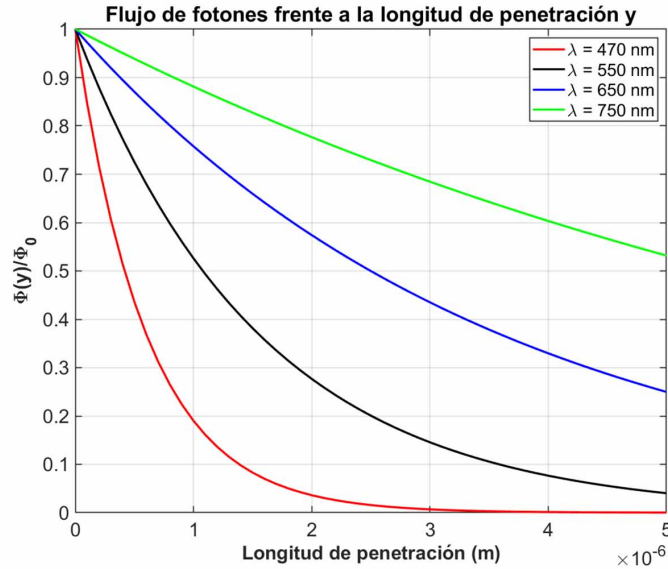


Figura 34: Flujo de fotones absorbidos en función del coeficiente de absorción α y la longitud de penetración y .

Se observa que para longitudes de onda mayores, tenemos un mayor flujo de fotones

para una penetración dada.

Coefficiente de absorción

Para silicio a temperatura ambiente el coeficiente de absorción se modela como una función de la longitud de onda incidente, y a partir de la siguiente función analítica somos capaces de calcular este parámetro.

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{E_{ph}(\lambda)} \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=-1}^1 \left(\frac{C_{ij}}{4} \{E_{ph}(\lambda) - \epsilon_1 + jd\epsilon_i + |E_{ph}(\lambda) - \epsilon_1 + jd\epsilon_i|\}^2 \right) + C_3(E_{ph}(\lambda) - \epsilon_3 + |E_{ph}(\lambda) - \epsilon_3|)^{N+dN E_{ph}(\lambda)} \right] \quad (15)$$

Siendo E_{ph} la energía del foton incidente, C_{ij} , ϵ_i , N y dN parámetros que describen la absorción del Silicio. Para $j \neq 0$, y una longitud de onda comprendida entre $460 \text{ nm} < \lambda < 1185 \text{ nm}$.

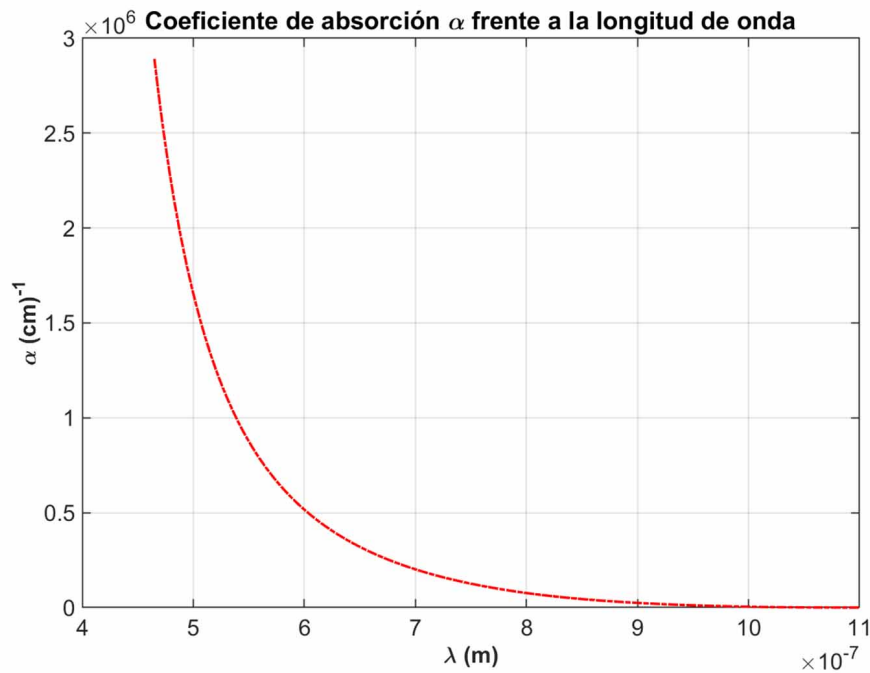


Figura 35: Coeficiente de absorción (α) en función de la longitud de onda (λ).

Se verifica el comportamiento visto en la Figura 34 ya que para valores de λ grandes el coeficiente de absorción se hace cada vez más pequeño. Los valores correspondientes a los parámetros se localizan en el documento [16].

Capacidad del fotodiodo

Cuando tenemos un fotodiodo operando en integración este presenta una capacidad máxima de carga que puede acumular. Esto se denomina *full-well capacity* (o saturación) y se puede calcular integrando para los valores mínimos y máximos de tensión con los cuales estamos trabajando.

$$N_{sat} = \frac{1}{q} \int_{V_{min}}^{V_{max}} C_{PD}(V) dV \quad (16)$$

Siendo V_{max} de manera habitual la tensión máxima que está sometida el circuito, V_{reset} , mientras que C_{PD} es la capacidad del fotodetector. En una unión $p-n$ tenemos 2 tipos de capacitancias.

- Capacidad de difusión: Esta se debe a portadores minoritarios. Esta capacidad esta presente cuando el fotodiodo esta polarizado en directa.
- Capacidad de unión: Se debe a cargas en la unión del semiconductor $p-n$, depende de la región de depleción.

Los fotodiodos trabajan en polarización inversa, por lo tanto la capacidad de unión prevalece sobre la de difusión. Definimos la capacidad como la suma del efecto que existe en la unión con la parte inferior y la lateral.

$$C_{PD} = \frac{K_s \epsilon_0}{W} A + \frac{K_s \epsilon_0}{W_l} A_p \quad (17)$$

Siendo K_s la constante dieléctrica del silicio, ϵ_0 la permitividad del vacío, junto con las alturas verticales y áreas para la zona de depleción que podemos ver en la Figura 36. A partir de la aproximación de unión abrupta podemos definir ambas contribuciones para las anchuras inferior y laterales.

$$C_{PD} = \frac{K_s \epsilon_0}{\sqrt{\frac{2K_s \epsilon_0}{q} (\phi_B - V_{PD}) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)}} A + \frac{K_s \epsilon_0}{\sqrt{\frac{2K_s \epsilon_0}{q} (\phi_{BP} - V_{PD}) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)}} A_p \quad (18)$$

Donde aparecen los potenciales ϕ_B y ϕ_{BP} para el área inferior y lateral, el potencial de polarización V_{PD} y las concentraciones de portadores N_D , N_A . Otra forma de escribir esta función sería la siguiente.

$$C_{PD} = \frac{C_{JOA}}{\left(1 - \frac{V_{PD}}{\phi_B}\right)^{M_J}} + \frac{C_{JOPAP}}{\left(1 - \frac{V_{PD}}{\phi_{BP}}\right)^{M_{JP}}} \quad (19)$$

Donde C_{JO} y C_{JOP} denotan capacitancias para una tensión de polarización nulas, además de los coeficientes M_J y M_{JP} para la unión inferior y laterales.

Ganancia de conversión

La capacidad en el nodo de sensado determina la capacidad, además de la ganancia de conversión en voltaje CG . Esto permite medir el incremento de voltaje en el fotodiodo en función de la carga acumulada. Esto es una función inversa de la capacidad total.

$$CG = \frac{q}{C_{PD}} \quad (20)$$

Arquitectura $p - n^+$

La Figura 36 muestra la estructura geométrica del fotodiodo tipo $p - n^+$ empleado.

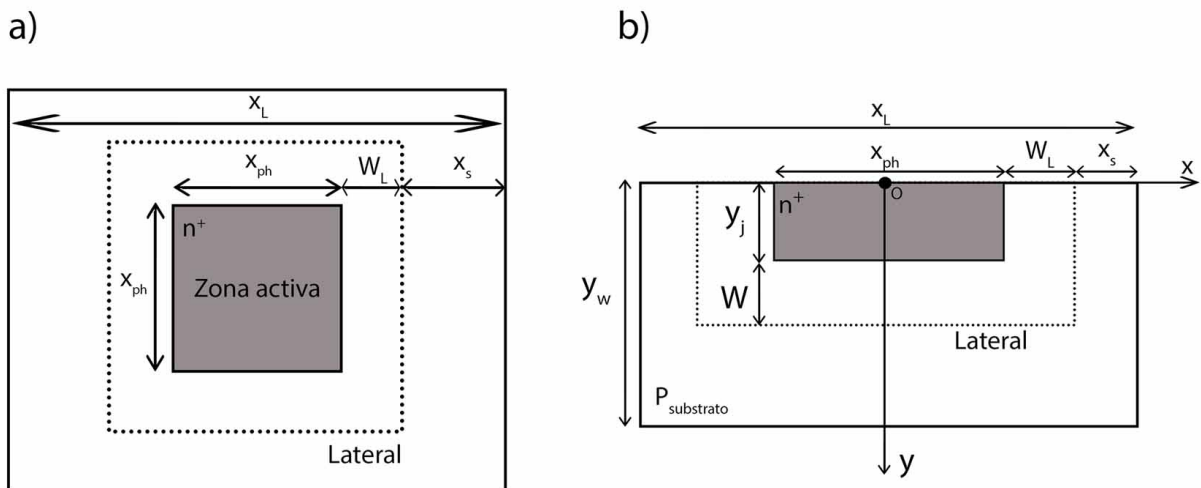


Figura 36: Figura del fotodiodo $p - n^+$. a) visto desde arriba, b) corte transversal.

Foto-corriente

Las ecuaciones matemáticas se han tomado de modelos analíticos de [16]. Se han aplicado las aproximaciones siguientes.

- Unión abrupta.
- Bajo nivel de inyección en las zonas neutras (se desprecian las variaciones de portadores mayoritarios en dichas zonas).
- Campo eléctrico nulo fuera de la región de deplexión.
- Dopado uniforme, y constantes de movimiento para e^+ y h^+ constantes.

Tras estas aproximaciones es posible resolver la ecuación de cuasi-continuidad en las zonas neutras siendo por difusión de portadores minoritarios. Estas cargas foto-generadas han sido arrastradas desde la región de deplexión a los bordes, donde se produce la difusión. La expresión siguiente corresponde a dicho efecto.

$$D_n \left(\frac{\partial(n_p - n_{p0})}{\partial y^2} \right) - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + G(y) = 0 \quad (21)$$

La solución genérica para los electrones en la región p es la siguiente.

$$n_p(y) = n_{p0} + \left(\frac{\Phi_0 \alpha \tau_n}{1 - \alpha^2 L_n^2} \right) e^{-\alpha y} + A e^{-y/L_n} + B e^{y/L_n} \quad (22)$$

Para los huecos en la región n es análoga.

$$p_n(y) = p_{n0} + \left(\frac{\Phi_0 \alpha \tau_p}{1 - \alpha^2 L_p^2} \right) e^{-\alpha y} + C e^{-y/L_n} + D e^{y/L_p} \quad (23)$$

Los parámetros n_p y p_n se tratan de la concentración de electrones y huecos respectivamente. D_n y D_p son los coeficientes de difusión, mientras que $G(y)$ se trata de una función que modela la generación de portadores por iluminación. Para resolver el problema es necesario establecer una serie de condiciones de contorno, obteniéndose los siguientes valores

para A , B , C y D .

$$A = n_{po} (e^{V/k_B T} - 1) - \frac{k_n e^{-\alpha(y_j+W)}}{e^{(-\alpha(y_j+W))/L_n}} \quad ; \quad B = 0 \quad (24)$$

$$C = \frac{[(D_p - S_p L_p) (p_{no} + k_p e^{-\alpha y_j}) + k_p L_p (S_p + \alpha D_p) e^{y_j/L_p}]}{(-D_p + S_p L_p) e^{-y_j/L_p} - (D_p + S_p L_p) e^{y_j/L_p}} \quad (25)$$

$$D = \frac{[(D_p + S_p L_p) (p_{no} + k_p e^{-\alpha y_j}) - k_p L_p (S_p + \alpha D_p) e^{-y_j/L_p}]}{(-D_p + S_p L_p) e^{-y_j/L_p} - (D_p + S_p L_p) e^{y_j/L_p}} \quad (26)$$

Tras obtener las ecuaciones para los portadores minoritarios, podemos expresar la densidad de corriente total como la suma de cada contribución.

Posteriormente se calcula la densidad de corriente de difusión en las regiones cuasi-neutras.

$$J_n(y) = q D_n \left(\frac{\partial n_p(y)}{\partial y} \right) \quad ; \quad J_p(y) = -q D_p \left(\frac{\partial p_n(y)}{\partial y} \right) \quad (27)$$

La densidad de corriente generada debido a la iluminación en la región de depleción.

$$J_w = q \int_{y_j}^{y_j+W} G(y) dy = q \phi_0 e^{-\alpha y_j} (1 - e^{-\alpha W}) \quad (28)$$

La densidad de corriente total es la suma de cada contribución.

$$J_T = J_p(y_j) + J_n(j_y + W) + J_w \quad (29)$$

La corriente corresponde a la integral en todo el área activa.

$$I_{aa} = \int_0^{x_{ph}} \int_0^{x_{ph}} J dx dz = J_T x_{ph}^2 = J_T A_{ps} \quad (30)$$

La existencia de campos eléctricos grandes producen un movimiento que las saca pares $e^- - h^+$ fuera de la región antes de que ocurra la recombinación. La corriente generada es principalmente a causa de arrastre, y se obtiene al integrar el volumen de la región lateral total.

$$I_W = q n_{laterales} \int_{-x_{ph}/2}^{x_{ph}/2} \int_0^{W_l} \int_0^{y_j+W} G(y) dy dx dz \quad (31)$$

$$I_W = 4q x_{ph} W_l \Phi_0 (1 - e^{-\alpha y_j}) \quad (32)$$

Este término es despreciable frente a las demás contribuciones de corriente.

Finalmente hay que tener en cuenta la fotocorriente lateral generada por fotones que inciden fuera de la zona de deplexión y logran llegar a la unión $p - n^+$ por difusión. Este fenómeno ocurre en fotodiodos con pequeño tamaño [16], ya que la relación entre el tamaño lateral y la zona activa pasa a ser prácticamente idéntico.

$$I_{\text{lateral}} = \frac{8x_{ph}qD_n}{y_w} \sum_{n=1}^{\infty} I_1(y_w)I_2(x_s)I_3(y_j) \quad (33)$$

Siendo cada término.

$$I_1(y_w) = (-1)^n \left[\frac{-\gamma \frac{D_n}{S_n} \cosh\left(\frac{y_w}{L_n}\right)}{\sigma_n} + \left(\frac{\kappa}{\frac{1}{L_n^2} - \alpha^2}\right) \left(\frac{\cosh\left(\frac{y_w}{L_n}\right) - e^{-\alpha y_w}}{\sigma_n} - \frac{\sinh(\alpha y_w)}{\alpha^2 + \theta_n^2} \right) \right] \quad (34)$$

$$I_2(x_s) = \frac{\sqrt{\sigma_n}(1 - \cosh(\sqrt{\sigma_n}x_s))}{\sinh(\sqrt{\sigma_n}x_s)} \quad (35)$$

$$I_3(y_j) = 1 - \cos(\theta_n y_j) \quad (36)$$

En la Figura 37 se aprecia como la contribución lateral para un fotodiodo con área $x_{ph}^2 = 1,54 \mu m^2$ es de un orden mayor conforme x_s disminuye.

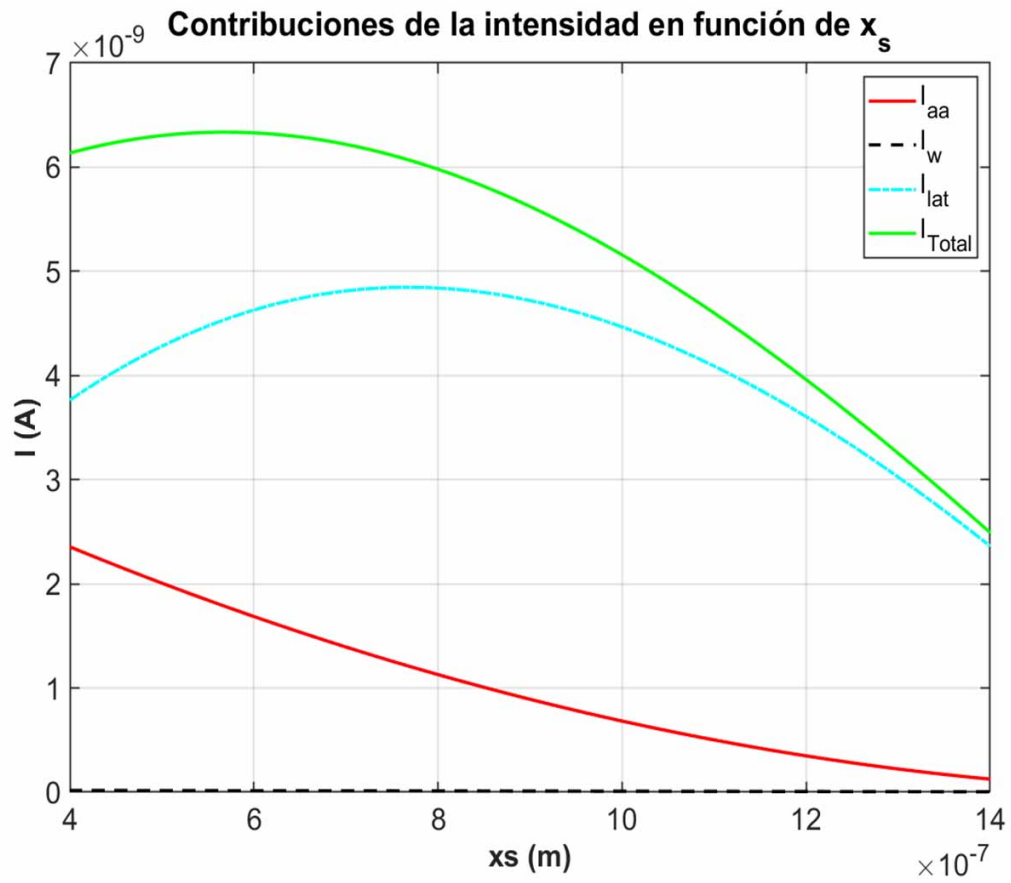


Figura 37: Distintas contribuciones de corriente del fotodiodo en función de la distancia lateral x_s .

8. Código verilogA Fotodiodo

```
'include "constants.vams"
'include "disciplines.vams"

module Photodiode2 (a,c);

parameter real T      = 300;          /*Temperatura*/
parameter real mup    = 100e-4;      /*Movilidad huecos*/
parameter real mun    = 1000e-4;     /*Movilidad electrones*/
parameter real taup   = 0.2e-6;      /*Vida media huecos*/
parameter real taun   = 200e-6;      /*Vida media electrones*/
parameter real Sp     = 0.1; /* Velocidad recombinacion huecos*/
parameter real ni     = 1e16;        /* Concentracin portadores intrnseca*/
parameter real Na     = 1e19;        /* Concentracin portadores aceptora*/
parameter real Nd     = 1e20;        /* Concentracin portadores donadora*/
parameter real lambda = 500e-9;      /* Longitud de onda*/
parameter real Popt   = 1000;        /* Potencia incidente*/
parameter real Tx     = 0.6;         /* Coeficiente transmision*/
/* parameter real W    = 0.5e-6;*/
parameter real Wl     = 0.3e-6;      /* Anchura regin deplexin*/
parameter real xph    = 1.2e-6;      /* Tamao zona activa*/
parameter real xl     = 4e-6;        /* Anchura total*/
parameter real yj     = 0.12e-6;     /* Altura zona activa*/
parameter real yw     = 5e-6;        /* Altura total */
parameter real r      = 0; /* Coef de reflexion*/
parameter real is     = 1e-14;       /* Corriente oscura*/

real alfa, ter11, ter21, ter31, ter41, ter12, ter22, ter32, ter42, Iaa,
Iw, Ilat, Q, H1, H2, PI, velC, A, C, D, Jw, Jn, Jp, K, Dp,
Dn, Lp, Ln, npo, pno, phi0, kp, kn, k, En, e1, e3, dec1,
dec2, Cons10, Cons11, Cons20, Cons21, Cons3, N, W, dN, expn, Sn, gamma, de1, de2,
```

Talfa1, Talfa2, Talfa3, Talfa4, Talfa5, Vbi, Id, eps, Coeff1, Coeff2,
ter211, ter212, ter213, ter311, ter312, ter313, ter221, ter222, ter223, ter321,
ter322, ter323;

inout a, c;
electrical a, c;

analog initial begin

PI = 3.141592; /* N Pi*/
Q = 1.602e-19; /* Carga e- (C)*/
H1 = 6.626e-34; /* % Cte Plank (J)*/
H2 = 4.1356e-15; /*% cte plack (eV)*/
velC = 2.998e8; /*% Velocidad Luz (m/s)*/
En = (H2*velC)/lambda; /*% Energia del foton (eV)*/
eps = 1.04e-12; /* Permitividad del Si (F/m)*/

/* Parametros para calcular alfa*/

e1 = 1.09969; /*(eV)*/
e3 = 1.40985; /*(eV)*/
de1 = 0.0583148; /*(eV)*/
de2 = 0.0220161; /*(eV)*/
Cons10 = 503002; /*(eV/cm)*/
Cons11 = 49391.6;
Cons20 = 163430;
Cons21 = 7940.79;
Cons3 = 104608;
N = 0.394122;
dN = 1.23084;
expn = N+dN*En;

```

/* Parametros fisicos fotodiodo*/
gamma = 35e27*lambda*Popt;
K = 8.617e-5;
Dp = 0.026*mup;
Dn = 0.026*mun;
Lp = sqrt(taup*Dp);
Ln = sqrt(taun*Dn);
npo = ni*(ni/Na);
pno = ni*(ni/Nd);
phi0 = Popt*Tx*lambda/(H1*velC);
kp = phi0*alfa*taup/(1-alfa*alfa*Lp*Lp);
kn = phi0*alfa*taun/(1-alfa*alfa*Ln*Ln);
k = phi0*(alfa/Dn);

end

analog begin
I(a,c) <+ Id;
end

analog begin
/* Potencial de contacto*/

Vbi = (K*T)*ln((Na*Nd)/ni*ni);

/* Anchura de la region de deplexion*/

W = sqrt((2*eps*(Vbi-V(a,c))/Q)*((Na+Nd)/(Na*Nd)));

/* Funcionn para calcular alfa*/

Talfa1 = (Cons10/4)*pow(En-e1-de1+abs(En-e1-de1),2);

```

Talfa2 = (Cons11/4)*pow(En-e1+de1+abs(En-e1+de1),2);

Talfa3 = (Cons20/4)*pow(En-e1-de2+abs(En-e1-de2),2);

Talfa4 = (Cons21/4)*pow(En-e1+de2+abs(En-e1+de2),2);

Talfa5 = Cons3*pow(En-e3+abs(En-e3),expn);

alfa = (1/En)*(Talfa1+Talfa4+Talfa3+Talfa4+Talfa5);

/*Velocidad de recombinacion e- en la superficie activa*/

Sn = 54.5*limexp(-76470*lambda)-1.3e12*limexp(-5.359e7*lambda);

A = (npo*(limexp(Q*V(a,c)/(K*T))-1)-
kn*limexp(-1*alfa*(yj+W))/limexp(-1*(yj+W)/Ln));

C = ((Dp-Sp*Lp)*(pno+kp*limexp(-1*alfa*yj))+
limexp(yj/Lp)*kp*Lp*(Sp+alfa*Dp))/
((-1*Dp+Sp*Lp)*limexp(-1*yj/Lp)-(Dp+Sp*Lp)*limexp(yj/Ln));

D = ((Dp+Sp*Lp)*(pno+kp*limexp(-1*alfa*yj))-
limexp(-1*yj/Lp)*kp*Lp*(Sp+alfa*Dp))/
((-1*Dp+Sp*Lp)*limexp(-1*yj/Lp)-(Dp+Sp*Lp)*limexp(yj/Ln));

/* Densidad de corriente por fotogeneracion*/

Jw = Q*phi0*limexp(-1*alfa*yj)*(1-limexp(-1*alfa*W));

/* Densidades de corriente por difusion de portadores minoritarios en la zona p y n*/

Jn = Q*Dn*(((1-phi0*alfa*alfa*taun*limexp(-1*alfa*(yj+W)))/(1-alfa*alfa*Ln*Ln))-
(A/Ln)*limexp(-1*(yj+W)/Ln));

Jp = -Q*Dp*(((1-phi0*alfa*alfa*taup*limexp(-1*alfa*yj))/(1-alfa*alfa*Lp*Lp))-

```

(C/Lp)*limexp(-1*yj/Lp)+
(D/Lp)*limexp(yj/Lp));

/* Corriente debida a la zona activa */
Iaa = (Jw+Jn+Jp)*xph*xph;

/* Contribucion lateral*/

Iw = 4*Q*xph*Wl*phi0*(1-limexp(-1*alfa*yj));

ter11 = (-1)*gamma*(Dn/Sn)*cosh((1/Ln)*yw)/(pow((1/Ln),2)+pow((PI/yw),2));

ter211 = (k/(pow((1/Ln),2)-pow(alfa,2)));
ter212 = (cosh((1/Ln)*yw)-limexp((-1)*alfa*yw))/(pow((1/Ln),2)+pow((PI/yw),2));
ter213 = sinh(alfa*yw)/(pow(alfa,2)+pow((PI/yw),2));
ter21 = ter211*(ter212-ter213);

ter311 = sqrt(pow((1/Ln),2)+pow((PI/yw),2));
ter312 = (1-cosh(sqrt(pow((1/Ln),2)+pow((PI/yw),2))*(x1/2-xph/2-Wl)));
ter313 = sinh(sqrt(pow((1/Ln),2)+pow((PI/yw),2))*(x1/2-xph/2-Wl));
ter31 = ter311*(ter312/ter313);

ter41 = (1-cos((PI/yw)*yj));

ter12 = (-1)*gamma*(Dn/Sn)*cosh((1/Ln)*yw)/(pow((1/Ln),2)+pow((2*PI/yw),2));

ter221 = (k/(pow((1/Ln),2)-pow(alfa,2)));
ter222 = (cosh((1/Ln)*yw)-limexp((-1)*alfa*yw))/(pow((1/Ln),2)+pow((2*PI/yw),2));
ter223 = sinh(alfa*yw)/(pow(alfa,2)+pow((2*PI/yw),2));
ter22 = ter221*(ter222-ter223);

```

```

ter321 = sqrt(pow((1/Ln),2)+pow((2*PI/yw),2));
ter322 = (1-cosh(sqrt(pow((1/Ln),2)+pow((2*PI/yw),2))*(x1/2-xph/2-W1)));
ter323 = sinh(sqrt(pow((1/Ln),2)+pow((2*PI/yw),2))*(x1/2-xph/2-W1));
ter32 = ter321*(ter322/ter323);

ter42 = (1-cos((2*PI/yw)*yj));

Coeff1 = (8*xph*Q*Dn)/yw;
Coeff2 = (((-1)*(ter11+ter21)*ter31*ter41)+(ter12+ter22)*ter32*ter42);

Ilat = (Coeff1*Coeff2);

if(V(a,c) < 0)
Id = (-1)*(Ilat+Iaa+Iw);
else
Id = 1e-15;

end

endmodule

```

Referencias

- [1] Donald E. Knuth (1986) *The T_EX Book*, Addison-Wesley Professional.
- [2] Leslie Lamport (1994) *L^AT_EX: a document preparation system*, Addison Wesley, Massachusetts, 2nd ed.

Referencias

- [1] Ning Sun, Hassan Mansour y Rabab Ward. “HDR image construction from multi-exposed stereo LDR images”. En: *2010 IEEE International Conference on Image Processing*. IEEE. 2010, págs. 2973-2976.
- [2] Abbas El Gamal. “High dynamic range image sensors”. En: *Tutorial at International Solid-State Circuits Conference*. Vol. 290. 2002, pág. 8.
- [3] Xinqiao Liu y Abbas El Gamal. “Simultaneous image formation and motion blur restoration via multiple capture”. En: *2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No. 01CH37221)*. Vol. 3. IEEE. 2001, págs. 1841-1844.
- [4] S Iida, Y Sakano, T Asatsuma, M Takami, I Yoshiba, N Ohba, H Mizuno, T Oka, K Yamaguchi, A Suzuki y col. “A 0.68 e-rms random-noise 121dB dynamic-range sub-pixel architecture CMOS image sensor with LED flicker mitigation”. En: *2018 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. IEEE. 2018, págs. 10-2.
- [5] Jorge Fernández-Berni, Fernanda DVR Oliveira, Ricardo Carmona-Galán y Ángel Rodríguez-Vázquez. “Image sensing scheme enabling fully-programmable light adaptation and tone mapping with a single exposure”. En: *IEEE Sensors Journal* 16.13 (2016), págs. 5121-5122.
- [6] S. Mann y R.W. Picard. *Being ‘undigital’ with digital cameras: Extending Dynamic Range by Combining Differently Exposed Pictures*. Inf. téc. 323. Also appears, IS&T’s 48th annual conference, Cambridge, Massachusetts, May 1995. Boston, Massachusetts: M.I.T. Media Lab Perceptual Computing Section, 1994, págs. 422-428.
- [7] Jun Ohta. *Smart CMOS image sensors and applications*. CRC press, 2020.
- [8] Erik Reinhard, Wolfgang Heidrich, Paul Debevec, Sumanta Pattanaik, Greg Ward y Karol Myszkowski. *High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting*. Morgan Kaufmann, 2010.
- [9] June-Sok Lee, You-Young Jung, Byung-Soo Kim y Sung-Jea Ko. “An advanced video camera system with robust AF, AE, and AWB control”. En: *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 47.3 (2001), págs. 694-699.

-
- [10] Raanan Fattal Dani Lischinski Fattal Dani, Lischinski Michael Werman y col. “Gradient domain high dynamic range compression”. En: *ACM SIGGRAPH 2002*. 2002.
- [11] Helga Kolb. “How the retina works: Much of the construction of an image takes place in the retina itself through the use of specialized neural circuits”. En: *American scientist* 91.1 (2003), págs. 28-35.
- [12] Peter JW Noble. “Self-scanned silicon image detector arrays”. En: *IEEE Transactions on electron Devices* 15.4 (1968), págs. 202-209.
- [13] Trygve Willassen, Johannes Solhusvik, Robert Johansson, Sohrab Yaghmai, Howard Rhodes, Sohei Manabe, Duli Mao, Zhiqiang Lin, Dajiang Yang, Orkun Celtek y col. “A 1280× 1080 4.2 μm split-diode pixel hdr sensor in 110 nm bsi cmos process”. En: *Proceedings of the International Image Sensor Workshop, Vaals, The Netherlands*. 2015, págs. 8-11.
- [14] Jorge Fernández-Berni, Ricardo Carmona-Galán y Ángel Rodríguez-Vázquez. “Single-exposure HDR technique based on tunable balance between local and global adaptation”. En: *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs* 63.5 (2015), págs. 488-492.
- [15] Emmanuel Onzon, Fahim Mannan y Felix Heide. “Neural Auto-Exposure for High-Dynamic Range Object Detection”. En: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2021, págs. 7710-7720.
- [16] Beatriz Blanco Filgueira. “Modelling and characterization of small photosensors in advanced CMOS technologies”. Tesis doct. Universidad de Compostela, 2012.