

DISEÑO

“CMOS Image Sensor”

Xavier Busoms Roca

Javier Fernández Cepeda

Grupo: 41

Índice

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| Diseño de la parte Analógica del “CMOS IMAGE SENSOR” | 4 |
| Características del photodiodo..... | 4 |
| Diseño del APS..... | 5 |
| Diseño del multiplexor..... | 9 |
| Diseño Analógico Completo..... | 11 |
| Diseño de la parte Digital del “CMOS IMAGE SENSOR” | 19 |
| Creación de los componentes digitales..... | 19 |
| Unidad de Proceso..... | 20 |
| Sección Digital..... | 21 |
| Análisis Sección Digital..... | 21 |
| Diseño Mixto del “CMOS IMAGE SENSOR” | 24 |
| Análisis del sistema completo..... | 24 |
| Mejora Opcional..... | 25 |
| ANEXO..... | 30 |
| Símbolos y Schematics(Analógico)..... | 30 |
| Foto-diodo..... | 30 |
| APS..... | 31 |
| Multiplexor..... | 32 |
| Schematics RTL Compiler (digital)..... | 33 |
| Comparador..... | 33 |
| Contador..... | 34 |
| Decodificador..... | 35 |
| Unidad de control..... | 36 |
| Análisis de sensibilidad en función de T_{obt} | 37 |
| Prueba de reducción del consumo disminuyendo VDD..... | 41 |

INTRODUCCIÓN

En este documento se estudia el diseño de un sensor de imagen CMOS compuesto por cuatro APSs (Active Pixel Sensor). Descompondremos el trabajo en tres partes: Diseño Analógico, Diseño Digital y Diseño Mixto.

En la parte Analógica comprobaremos el comportamiento de los dispositivos (transistores, foto-diodo...) según las características calculadas en el estudio previo y compondremos la matriz 2x2 de APSs.

En la parte Digital se diseñará el módulo de control de la secuencia de captura utilizando los elementos analizados en el segundo estudio previo.

Finalmente, en el diseño Mixto, juntaremos ambas partes y confirmaremos los resultados obtenidos durante todo el estudio. Adicionalmente hemos propuesto una posible pequeña mejora del sensor.

Diseño de la parte Analógica del “CMOS IMAGE SENSOR”

Características del photodiodo.

En primer lugar comprobamos el correcto funcionamiento de los fotodiodos que emplearemos en los APSs. Para ello obtuvimos las curvas características $I(V)$ para los valores de la corriente I_{LUM} : 100nA; 30nA; 10nA; 3nA; 1nA. Realizamos el siguiente *Schematic*:

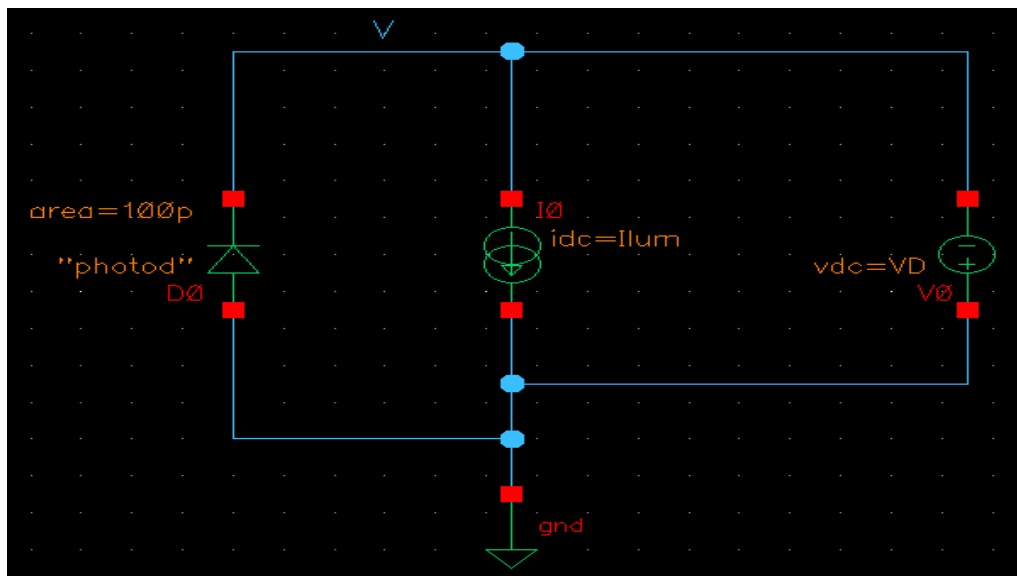


Figura 1

Tras la simulación obtenemos:

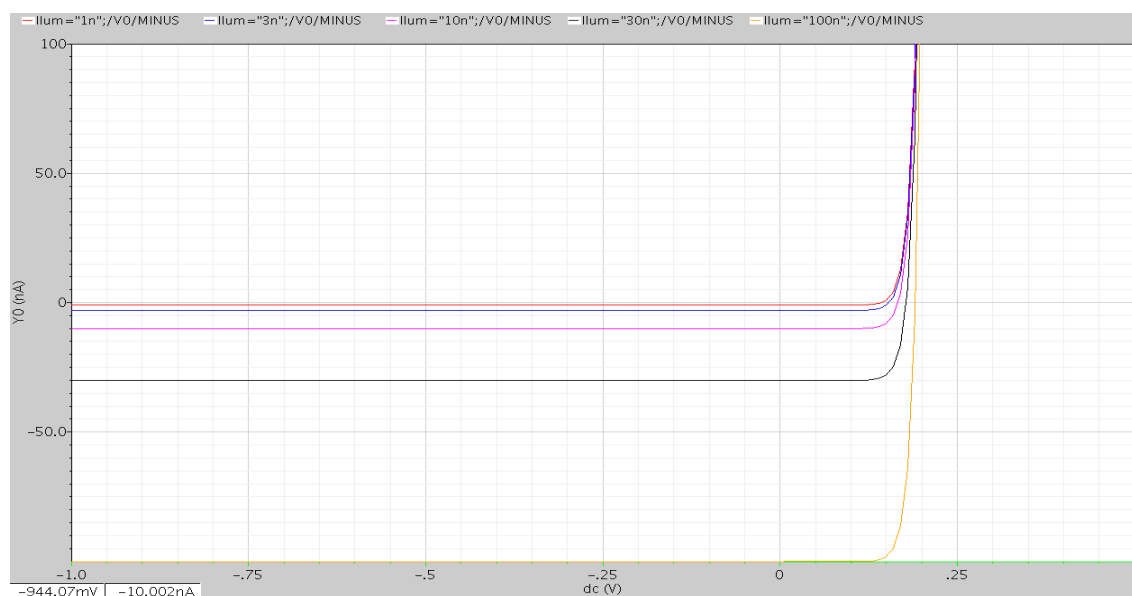


Figura 2

Vemos que para tensiones inferiores a 0,13V, la corriente que nos proporciona el dispositivo se satura al valor I_{LUM} . Según lo que habíamos estudiado anteriormente, las curvas características del diodo debían ser así:

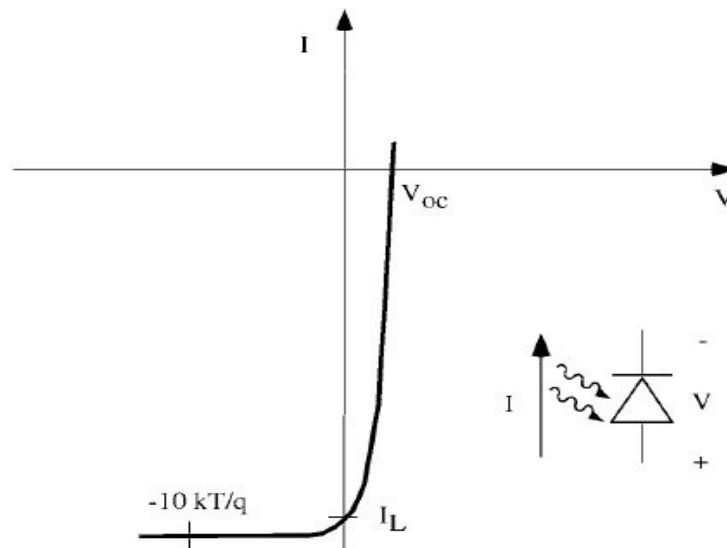


Figura 3

Se puede apreciar el parecido de las curvas. La única diferencia es que para los diferentes niveles de intensidad de luz, el foto-diodo generará una corriente u otra.

Así pues podemos concluir que nuestro foto-diodo funciona correctamente.

Diseño del APS

Para la construcción del APS creamos un símbolo que contendrá el foto-diodo(Anexo). Seguidamente, insertamos los transistores M1 y M2 y añadimos la capacidad(*). Finalmente definimos nuestras señales RST y OBT tal y como se explica en el documento “7.5.3 Operación del Pixel”(pag. 398) del Libro ***Disseny de circuits i sistemes integrats***.

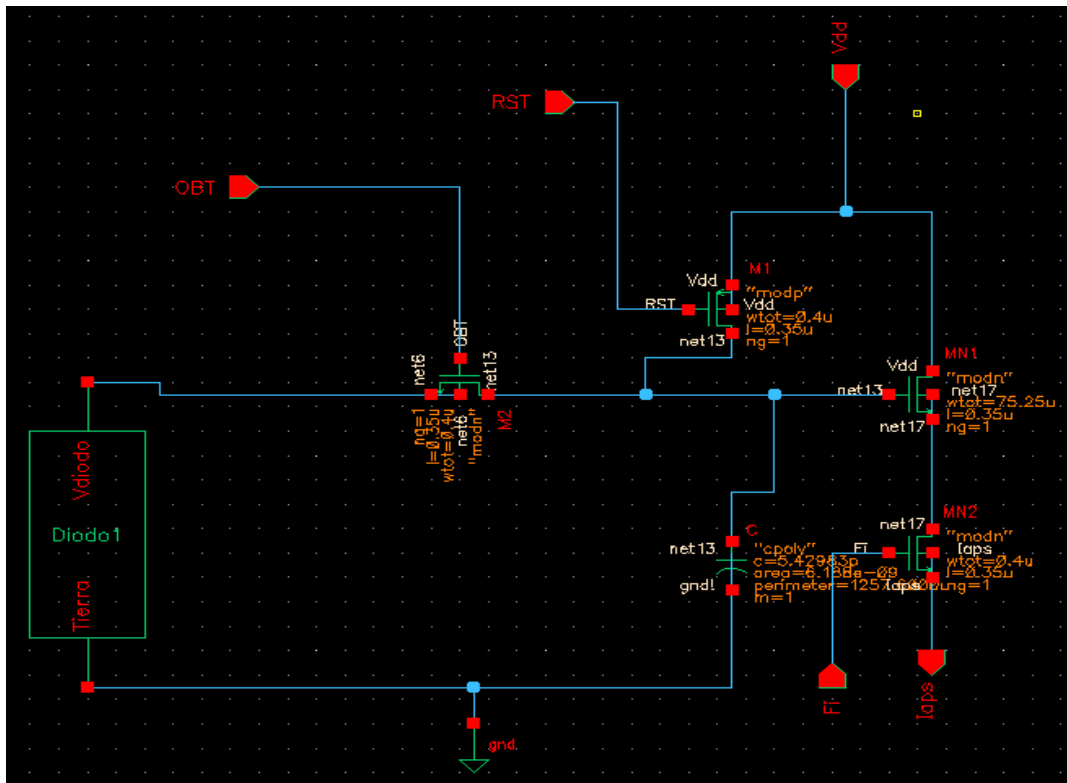


Figura 4. *Para esta primera simulación, los transistores situados más a la derecha (M3 y M4) no se emplearon para este primer análisis pese a que su presencia no afecta en el resultado.

Otorgamos a T_{OBT} el valor de $175\mu s$ y definimos el tiempo de lectura descrito en el enunciado del proyecto que es de $42\mu s$. Para ver el comportamiento de forma más completa, efectuamos un análisis paramétrico de la variable I_{LUM} con los mismos valores utilizados en el apartado anterior.

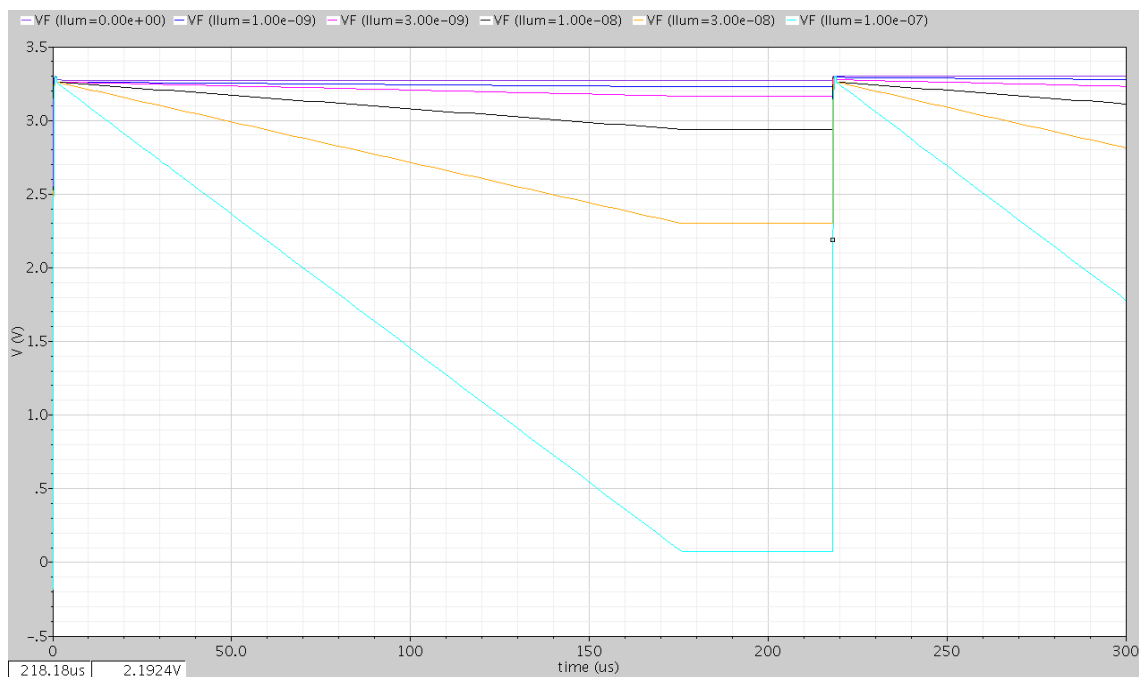


Figura 5

En esta imagen podemos apreciar el rango de iluminaciones que acepta el sensor para este tiempo de obturación. Vemos que para cada intensidad de luz nuestro APS nos genera una tensión. A continuación se verá que la tensión generada es proporcional a I_{LUM} , es decir, que existe una linealidad entre estas dos variables.

Los valores de tensión tras la obturación son los siguientes

| ILUM (nA) | 0 | 1 | 10 | 100 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| VF (V) | 3,272 | 3,229 | 2,939 | 0,073 |

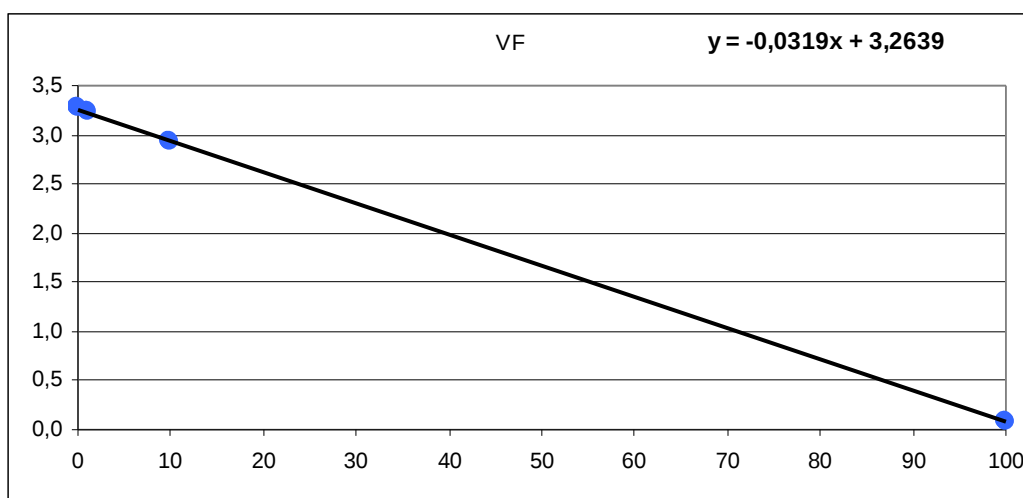


Figura 6

Una vez comprobada la linealidad del sistema, hemos añadido adicionalmente al final de este documento, la respuesta que genera nuestro dispositivo para diferentes valores de T_{obt} (1/8000, 1/4000, 1/2000,...).

A continuación, completamos el APS añadiendo los transistores M3 y M4 y definimos la entrada de la señal Fi y la salida laps. Generamos el símbolo APS con el que trabajaremos a partir de ahora (símbolo generado a partir de Figura 4).

Para comprobar que el tamaño de los transistores calculado en el pre-lab es el correcto y que el dispositivo básico del que se compone nuestro sensor de imagen funciona como teníamos previsto, lo testamos añadiendo las entradas RST, OBT, FI y Vdd y empleando a la salida el convertidor I/V visto en el ejercicio previo compuesto del transistor M5 y añadiendo la capacidad parásita Ccol con valor 100Ff. Nos queda el siguiente *Schematic*:

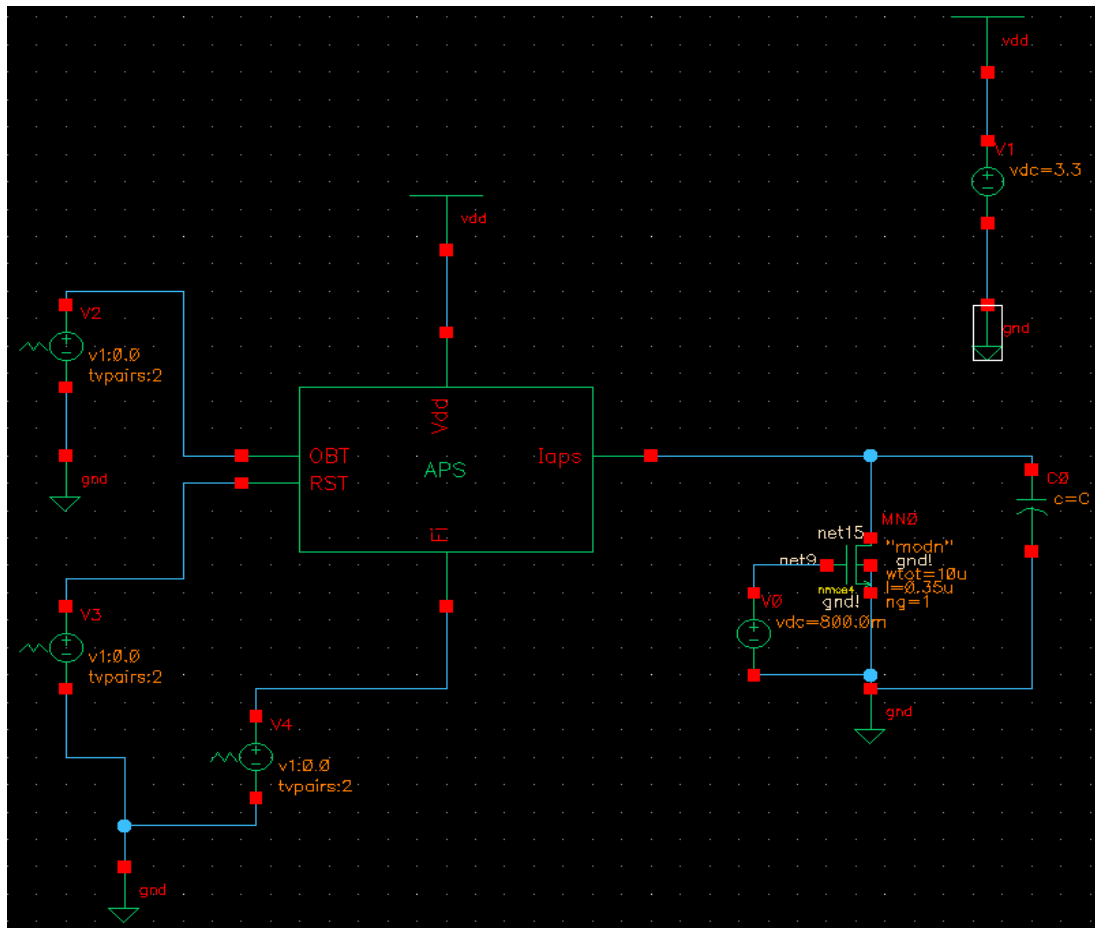


Figura 7

Seguidamente realizamos un estudio paramétrico con los valores I_{LUM} anteriores y para los 5 primeros valores de Tobt(125, 250, 500, 1000 y 2000 μ s):

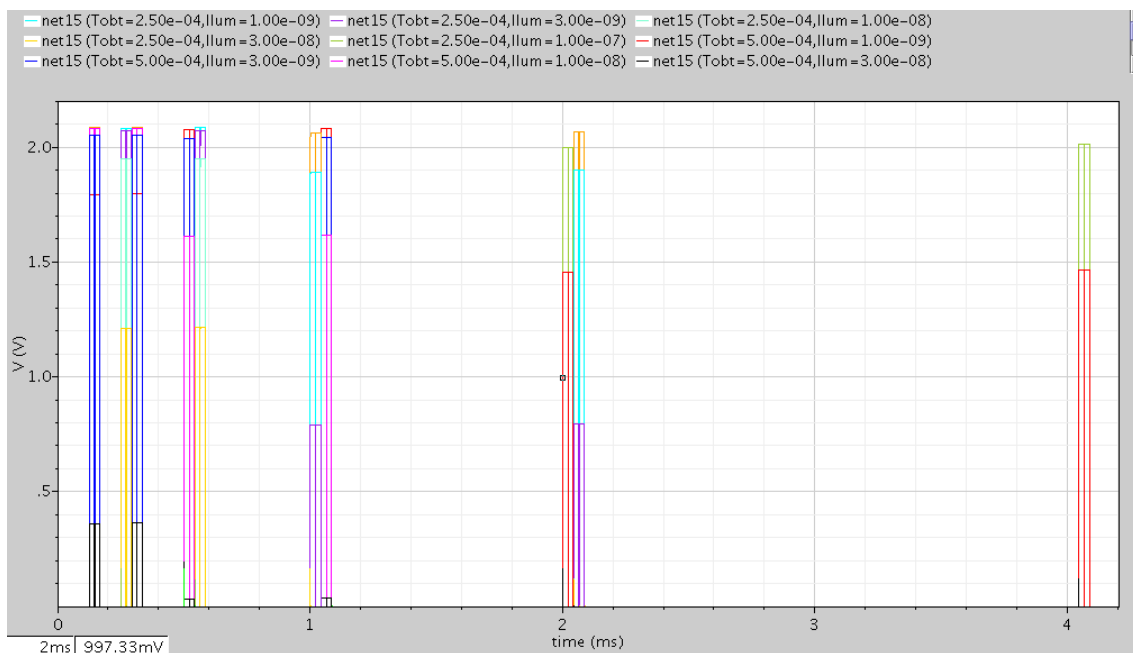


Figura 8

Centrándonos en los valores obtenidos para un tiempo de obturación de $125 \mu s$ (en la imagen, las 2 columnas de color azul-rojo-negro), observamos como sigue existiendo la linealidad deseada en el sistema. Tal y como se vio anteriormente, para cada I_{LUM} y para cada T_{obt} el sistema nos genera un valor de tensión distinto.

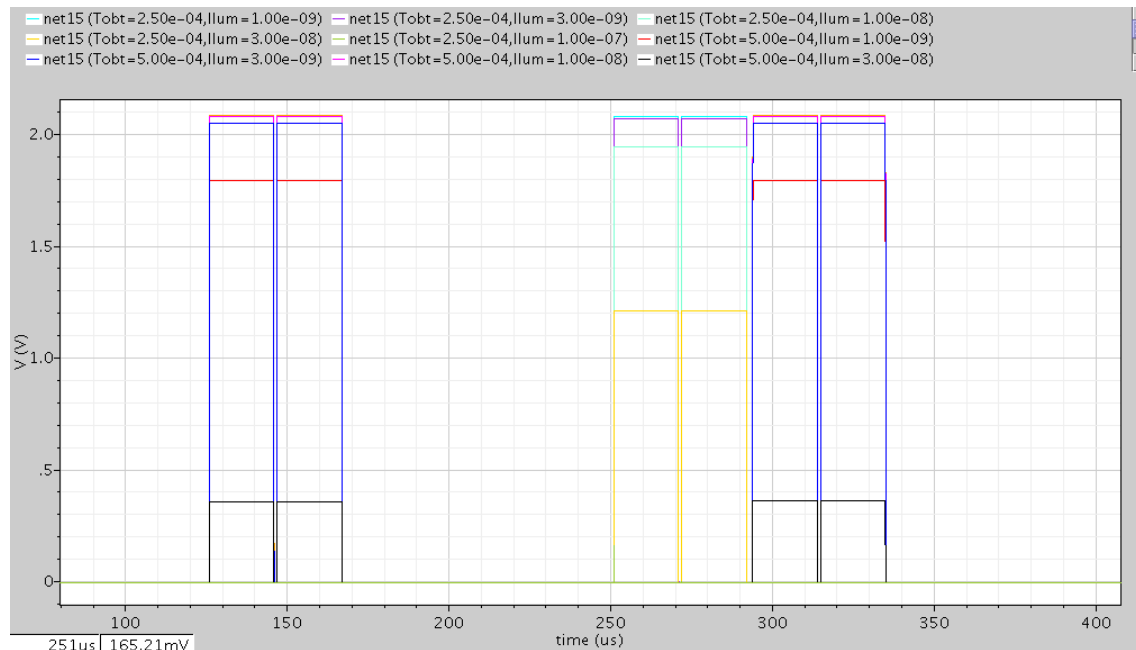


Figura 9

Así pues, una vez completado el estudio del APS, continuamos con el diseño del multiplexor.

Diseño del multiplexor

Un modelo sencillo de multiplexor es el que se muestra a continuación:

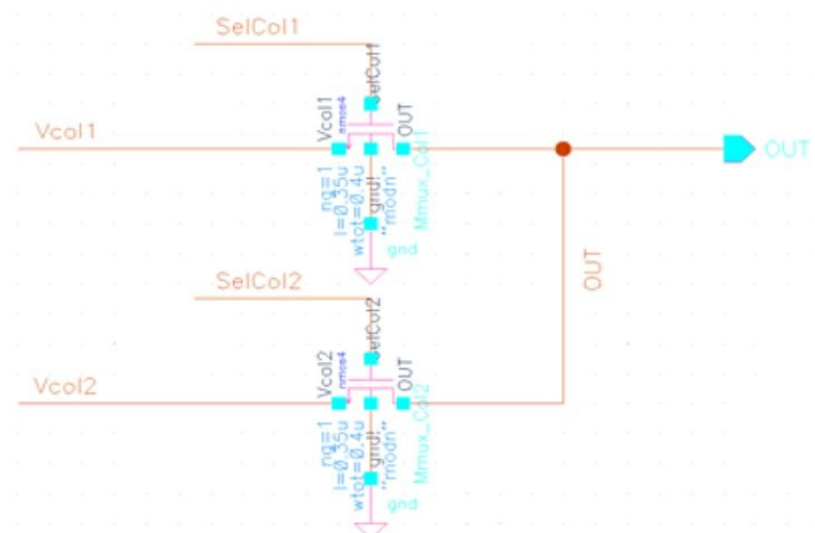


Figura 10

Para comprobar el correcto funcionamiento, generamos su símbolo y definimos las señales de entrada que más adelante generará el sistema digital (SelCol1 y SelCol2) y le introducimos en las entradas Vcol1 y Vcol2 -de donde obtendremos el valor generado por el sistema de los APSs- dos tensiones continuas de diferente valor, en concreto de 1 y 2 voltios respectivamente.

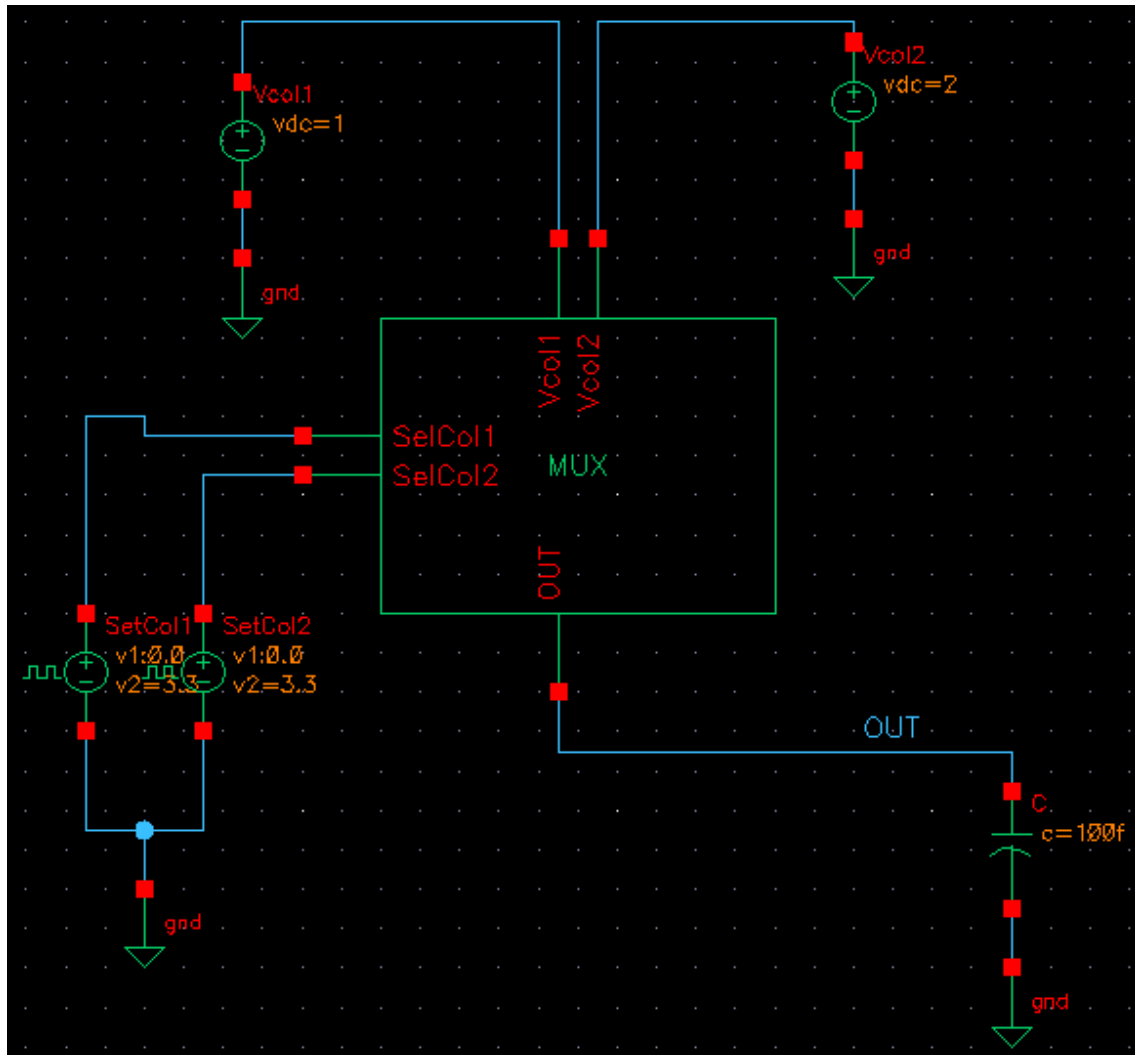


Figura 11

En la imagen presentada a continuación, observamos que cuando SelCol1 está activa y SelCol2 no, obtenemos el valor de Vcol1, y viceversa. En los instantes en los que ambas señales están activas o inactivas a la vez aparecen tensiones con valores diversos que en nuestro sistema no nos afectará ya que en la salida será ignorada. No obstante y como se mostrará más adelante, hemos diseñado un pequeño sistema (de cuestionable utilidad) para controlar que en estos momentos la tensión en el nodo de salida sea 0.

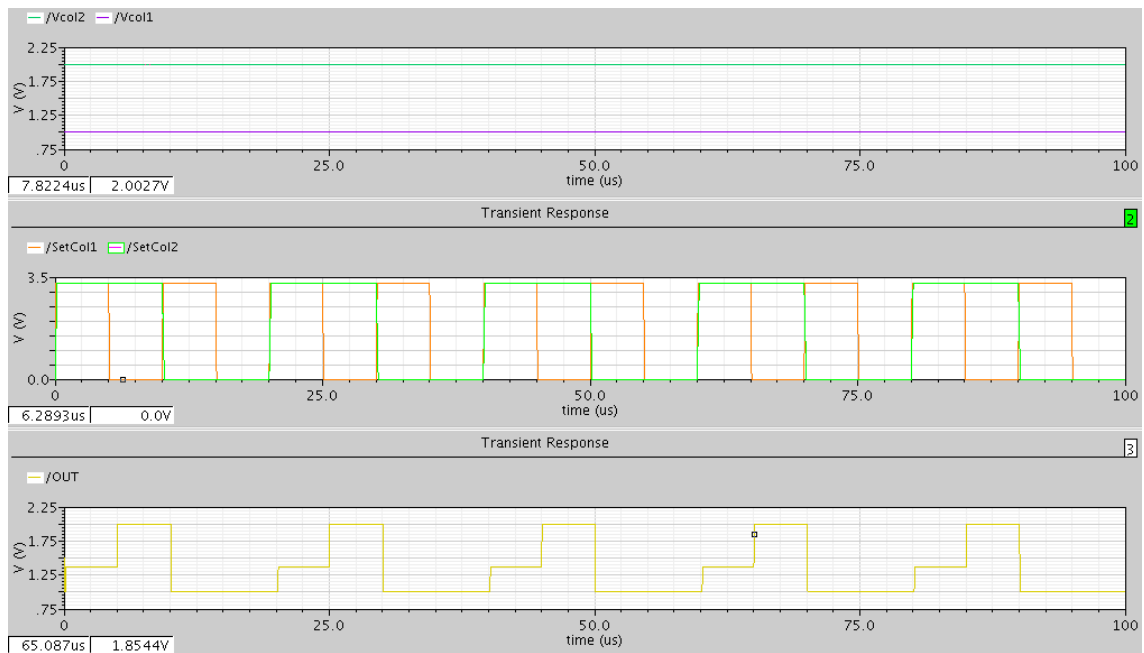


Figura 12

Así pues confirmamos que el multiplexor funciona como habíamos previsto.

Diseño Analógico Completo

El último paso para concluir este estudio analógico es juntar todos los elementos y comprobar que juntos funcionan tal y como hemos visto por separado.

Construimos el *schematic* con los 4 APS, dos convertidores (una para cada columna), el multiplexor y la capacidad parásita de salida. Empleamos las mismas señales de entrada que en los apartados anteriores, con la diferencia que en momento que se activa el reset de columnas, hemos dejado SCol2 activada porque en caso contrario, con ambos transistores en corte del multiplexor el valor de tensión a la salida se mantenía en un valor constante en instantes diferentes a los de lectura. Aunque no afectaba al sistema, eliminamos esa tensión innecesaria.

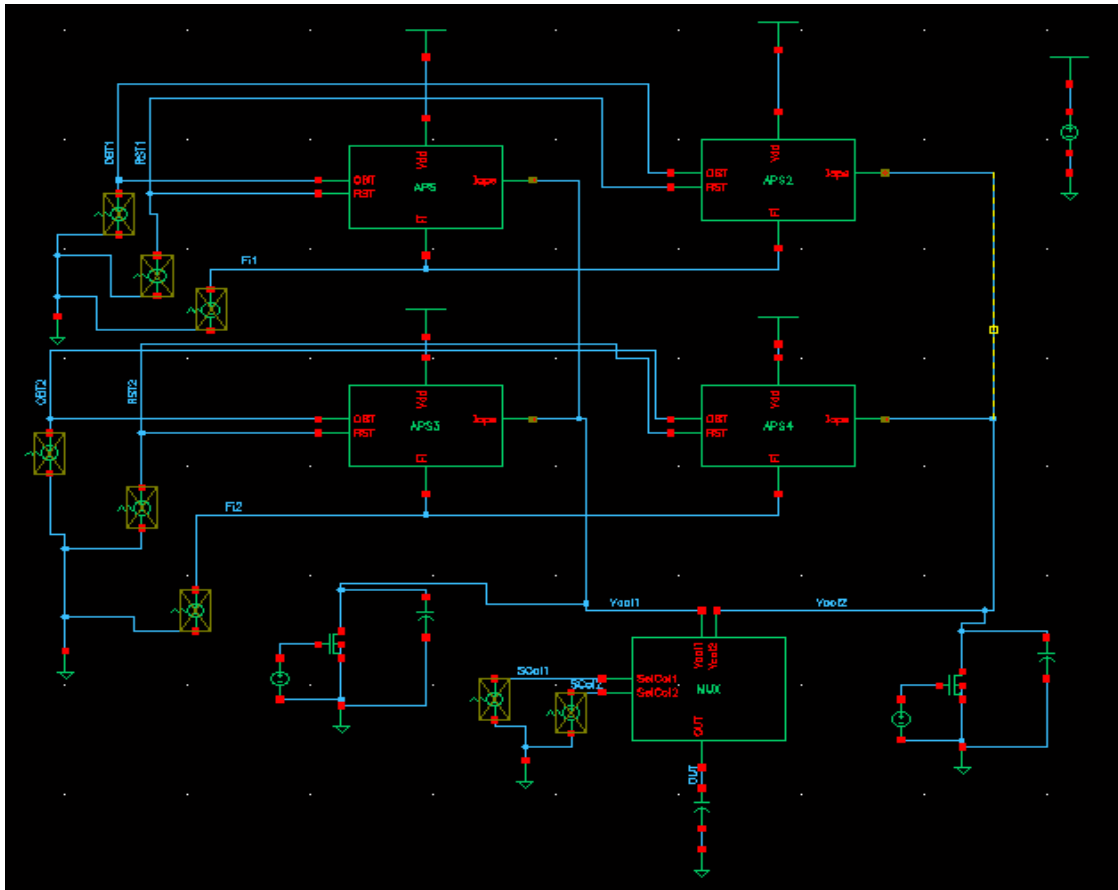


Figura 13. Nota: Los recuadros amarillos sobre las fuentes es un aviso del programa de que estamos empleando el mismo nombre en el nodo y en la fuente que lo alimenta. Mantuvimos los nombres para nuestra facilidad de comprensión de lo que sucede en los test.

En primer lugar verificamos que las señales de control diseñadas realizan lo que esperamos.

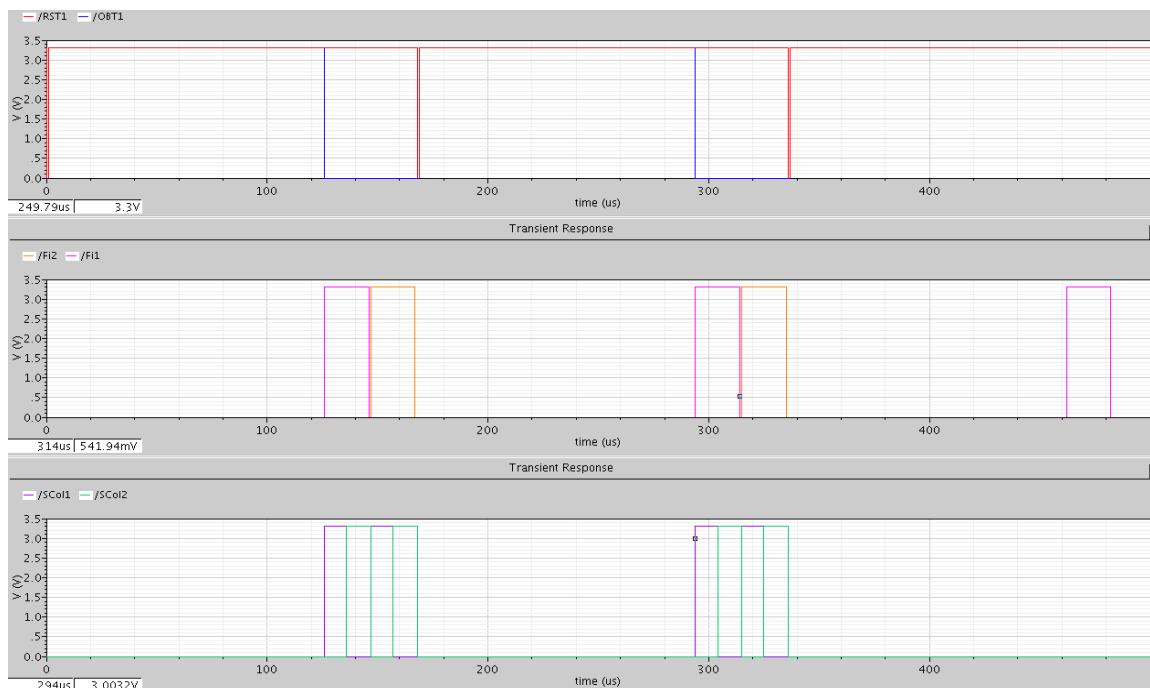


Figura 14

Para una primera comprobación del correcto funcionamiento del sistema, nos fijamos en la tensión a la salida (OUT) en función de las tensiones en cada columna:

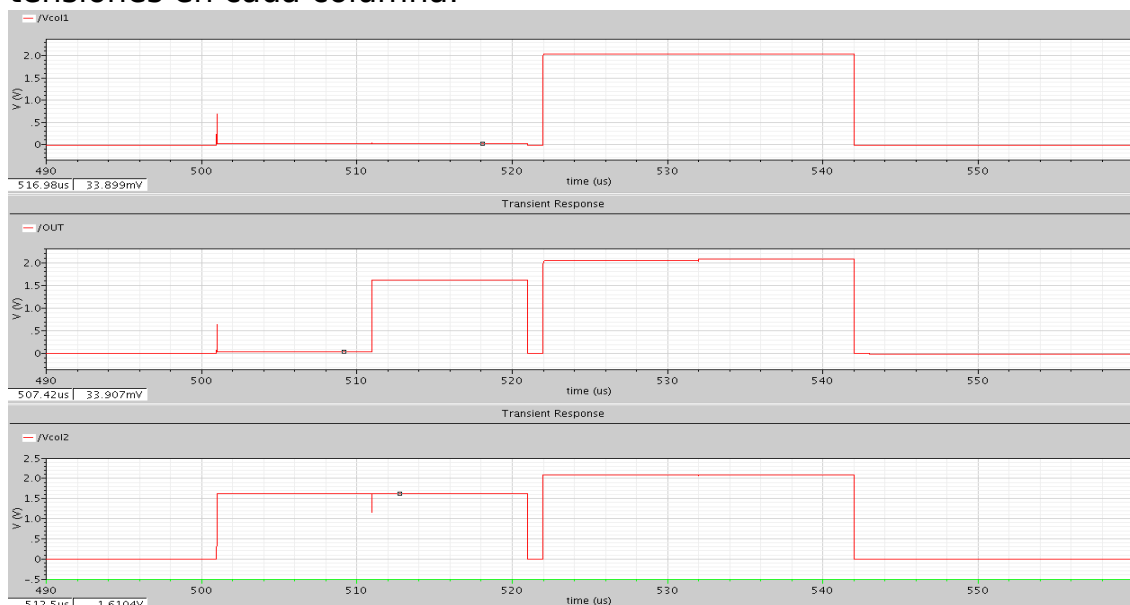


Figura 15

Vemos como efectivamente la salida es la combinación de las V_{col} . En la lectura de la primera fila se aprecia claramente el trabajo del multiplexor el cual escoge en primer lugar la columna 1 y posteriormente la columna 2. En esta captura se ha empleado un T_{obt} de 500 μs y los valores I_{LUM} de 30nA, 10nA, 3nA y 1nA (valores de izquierda a derecha en el gráfico OUT de la figura 15).

Haciendo un paramétrico del tiempo de obturación, obtenemos las diferentes señales V_{col} y OUT para distintos tiempos. En la siguiente imagen podemos verlos agrupados por señales:

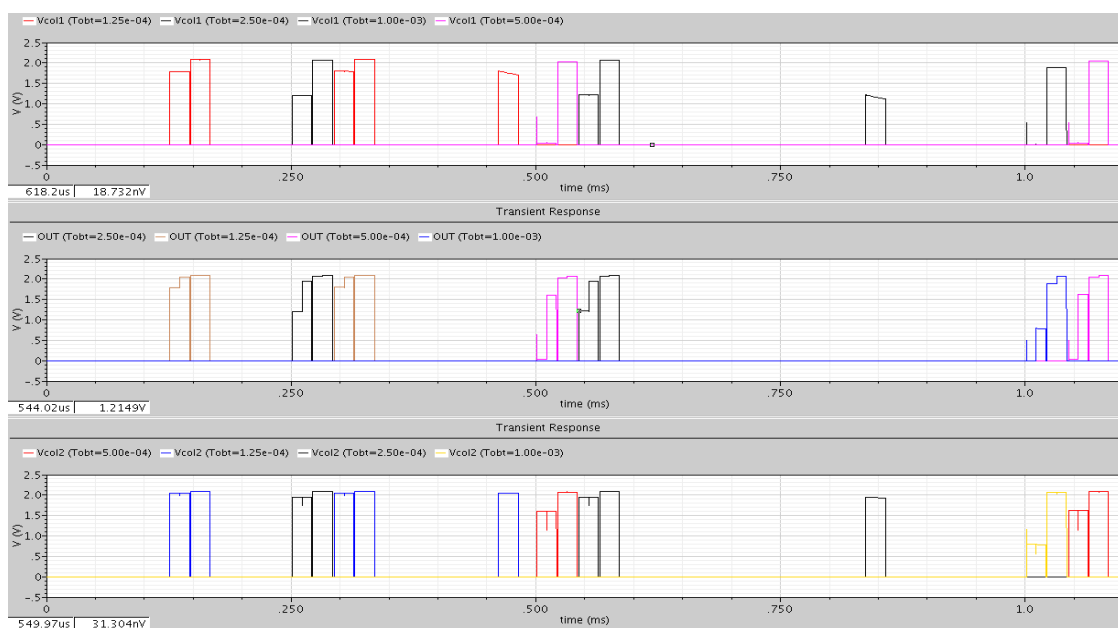


Figura 16

En esta imagen corroboramos que el dispositivo funciona para las diferentes T_{obt} posibles. En la figura 16 aparecen unos pulsos rectangulares aislados. Éstos provienen del hecho que nuestras señales de entrada están definidas para dos ciclos y el primer flanco (ya sea de subida o bajada) del tercer ciclo y hemos mantenido esa señal durante un tiempo. Como éramos conscientes de este suceso y que en simulaciones posteriores (Análisis Mixto) no aparecen -ya que se definen muchos más ciclos- no cambiamos el diseño de nuestras señales de entrada.

A continuación, para asegurarnos de que el sistema genera la salida prevista, comprobaremos que con el doble de tiempo de obturación y la mitad de la corriente de iluminación, el valor de tensión obtenido a la salida es el mismo. Los valores obtenidos en la figura 17 son:

$T_{obt} = 500\mu s$; $I_{LUM} = 15nA \rightarrow OUT = 1,2101V$ (rojo)

$T_{obt} = 250\mu s$; $I_{LUM} = 30nA \rightarrow OUT = 1,2147V$ (azul)

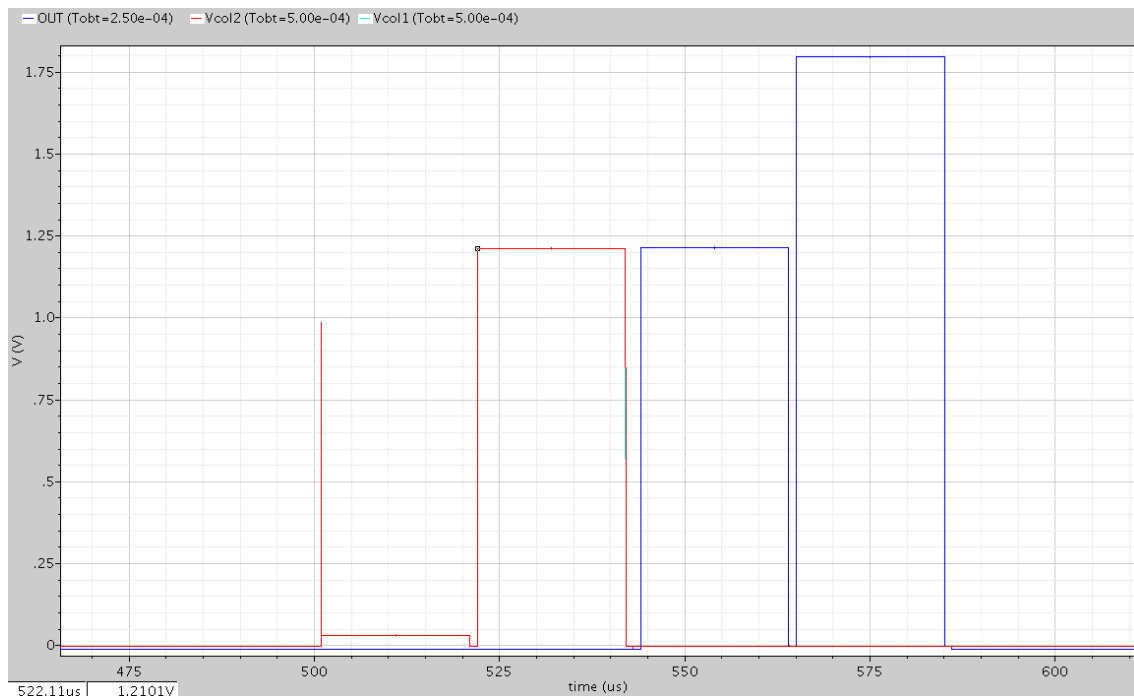


Figura 17

El valor no es exactamente el mismo, pero cualitativamente son lo suficientemente semejantes como para afirmar que el resultado es el esperado.

Finalmente, una vez sabemos que las señales de entrada están bien definidas, que el multiplexor selecciona correctamente las señales y que a la salida obtenemos los resultados esperados, creamos un último test de la parte analógica en el que veremos la linealidad de las tensiones V_F y V_{col} (y por consiguiente, V_{out}) en función de I_{LUM} . De este análisis obtendremos algunas características de nuestro sensor.

Para el análisis utilizaremos dos casos, con tiempos de obturación de 250us (Figura 18) y 500us (Figura 19):

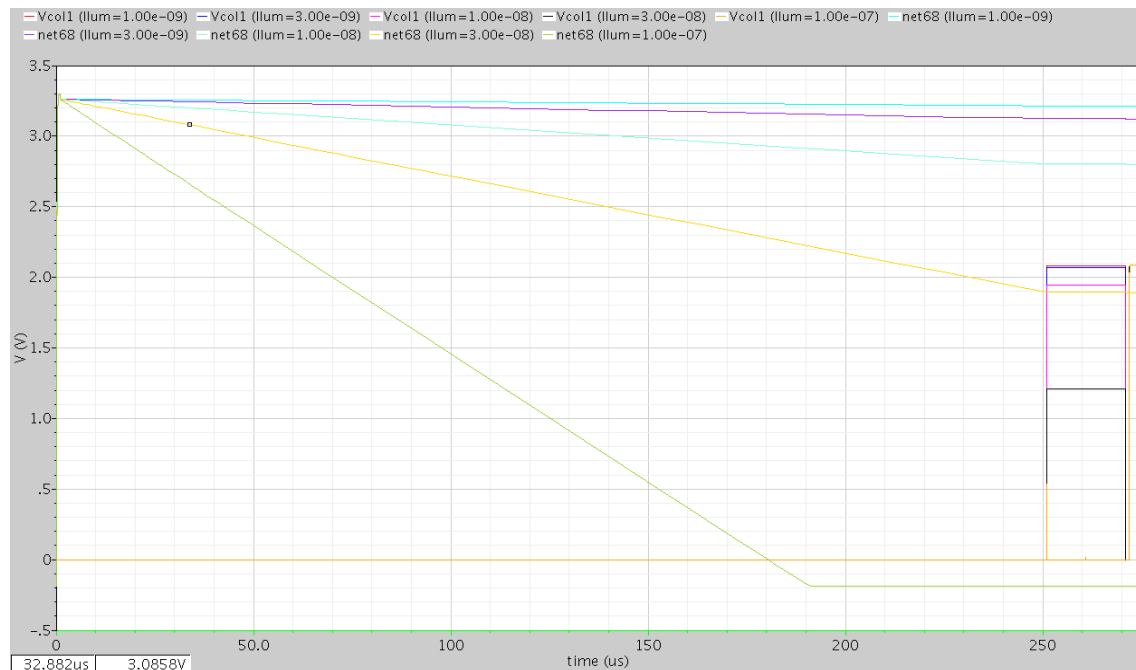


Figura 18

Los valores de tensión se recogen en la siguiente tabla:

| I_{LUM} (nA) | 1 | 3 | 10 | 30 | 100 |
|----------------|------|------|------|------|-------|
| V_F (V) | 3,21 | 3,12 | 2,8 | 1,89 | -0,18 |
| V_{COL} (V) | 2,08 | 2,07 | 1,95 | 1,21 | 0 |

Representando los datos gráficamente, vemos la linealidad de V_F respecto a I_{LUM} . Sin embargo la salida V_{col} presenta ciertas irregularidades, tanto para valores bajos de iluminación como para valores muy altos (saturado para 100nA).

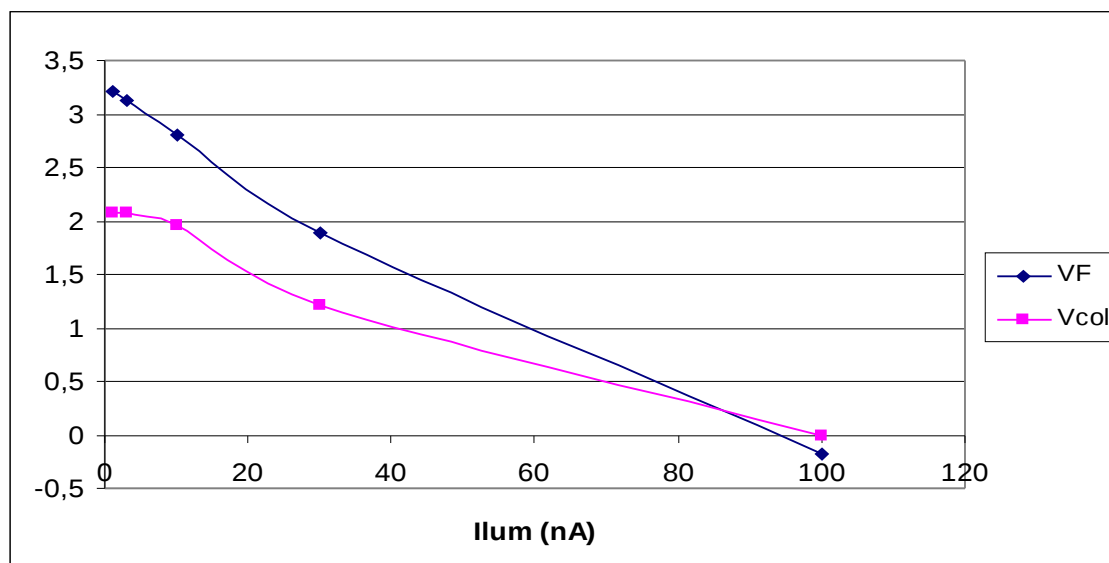


Figura 19

Para comprobar la linealidad de las tensiones, cogemos los valores de iluminación para los que el sistema es lineal (omitimos 100nA), hacemos una aproximación lineal y nos fijamos en el valor de R^2 que nos proporciona Excel para determinar cualitativamente la desviación de los valores.

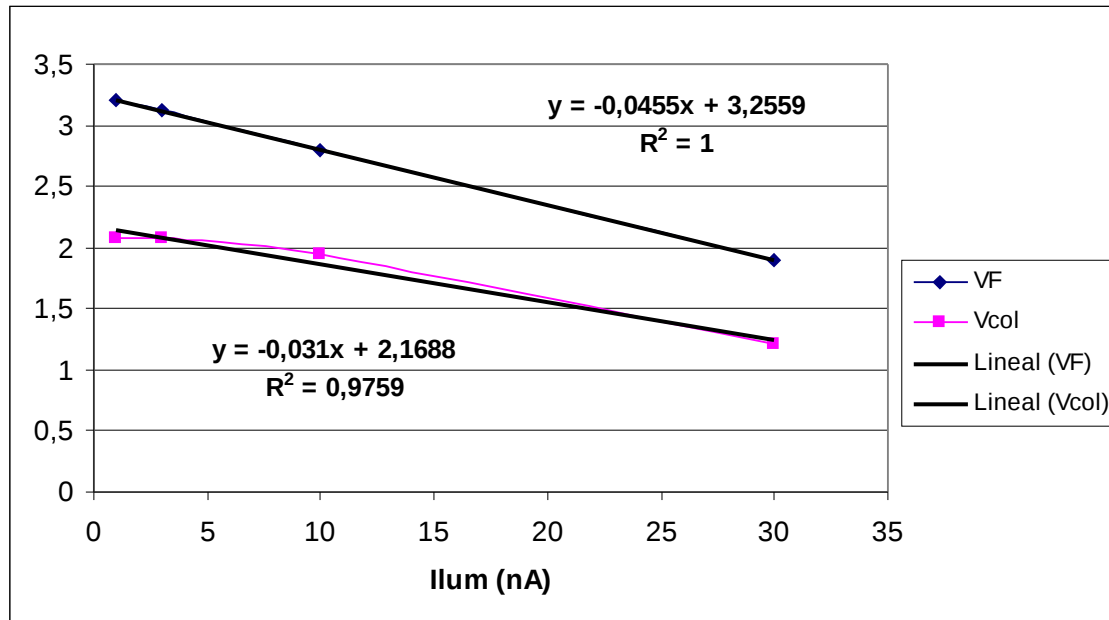


Figura 20

Vemos como V_F es perfectamente lineal (con $R^2=1$), mientras que V_{COL} presenta irregularidades importantes para iluminaciones bajas. El valor de $R^2=0,9759$ indica una cierta desviación.

La relación entre V_{COL} y I_{LUM} la aproximamos como:

$$V_{COL} = -0,031 \cdot I_{LUM} + 2,1688 \text{ V}$$

Luego la sensibilidad del sistema es de $0,031 \text{ V/nA} = 3,1 \cdot 10^7 \text{ V/A}$

La desviación máxima la encontramos para $I_{LUM} = 10 \text{ nA}$, donde el valor estimado por la aproximación lineal es de 1,8588V y el valor real es de 1,95V. La desviación máxima es de 0,0912V.

Para $T_{\text{obt}} = 500\mu\text{s}$, éste es el gráfico obtenido:

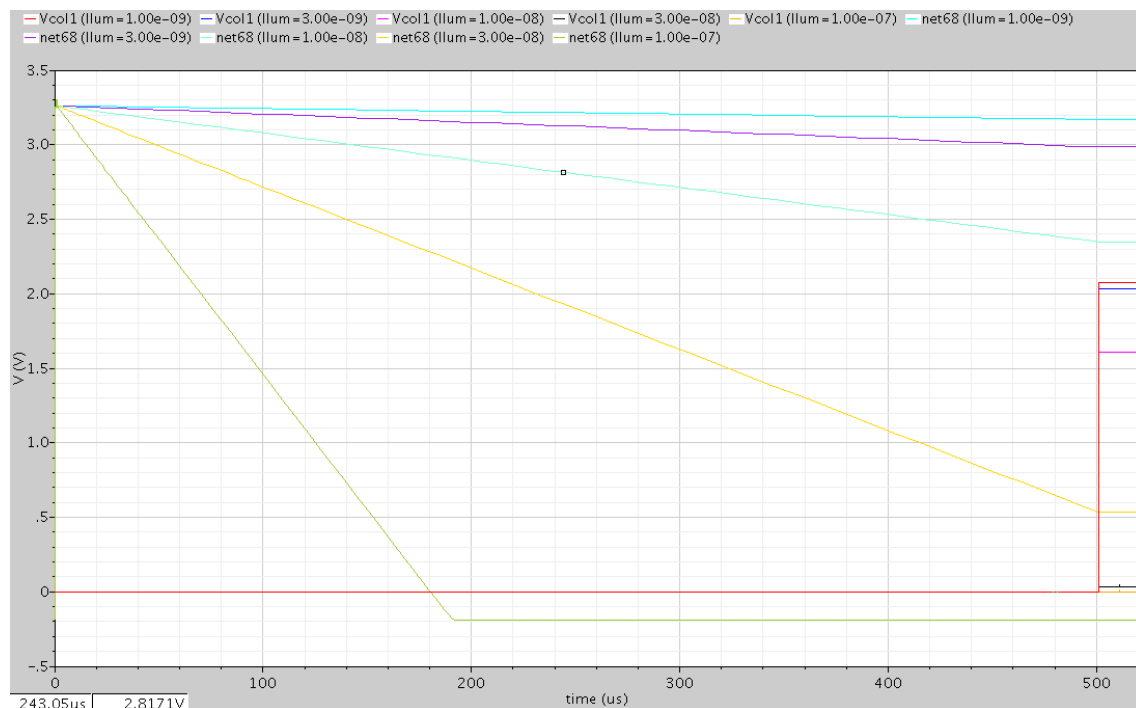


Figura 21

Los valores de tensión son los siguientes:

| I_{LUM} (nA) | 1 | 3 | 10 | 30 | 100 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| V_F (V) | 3,17 | 2,951 | 2,348 | 0,534 | -0,19 |
| V_{COL} (V) | 2,076 | 2,034 | 1,61 | 0,034 | 0 |

En la representación gráfica, volvemos a observar cierta linealidad excepto para un valor de iluminación de 100nA.

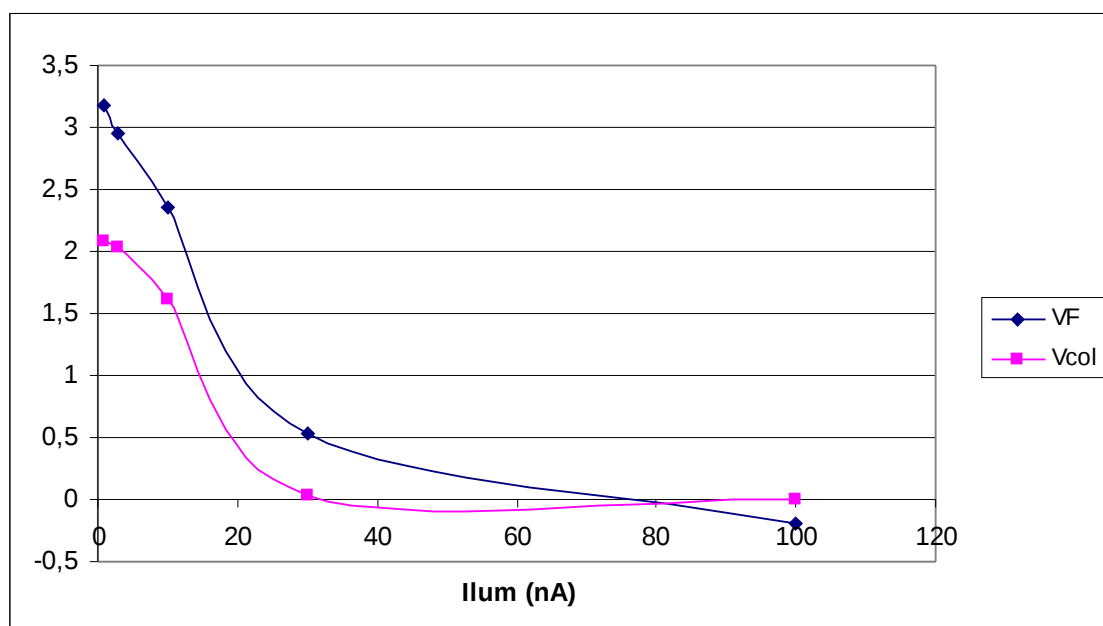


Figura 22

Para hacer la aproximación lineal, volvemos a coger la parte lineal:

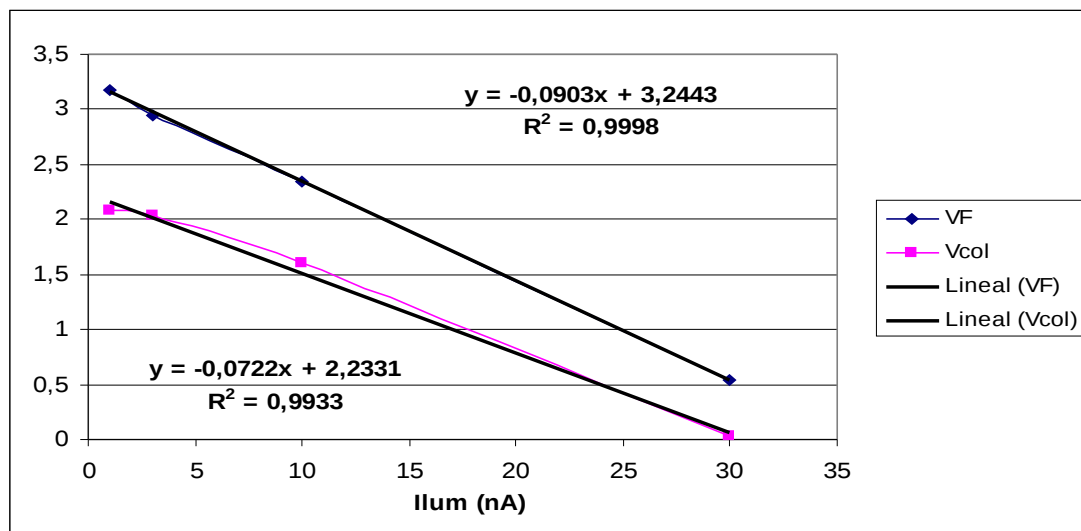


Figura 23

Vemos como V_F es casi perfectamente lineal. La ecuación de la aproximación que relaciona V_{COL} y I_{LUM} es ahora:

$$V_{COL} = -0,0722 \cdot I_{LUM} + 2,2331 \text{ V}$$

De modo que la sensibilidad del sistema es ahora $0,0722 \text{ V/nA} = 7,22 \cdot 10^7 \text{ V/A}$

La desviación máxima vuelve a darse para $I_{LUM} = 10 \text{ nA}$. El valor estimado es de $1,5111 \text{ V}$ y el valor real es de $1,61 \text{ V}$. La desviación máxima es por lo tanto de $0,0989 \text{ V}$.

La relación ideal entre ambas sensibilidades tendría que ser la misma que la relación entre tiempos de obturación, dado que para el doble de tiempo de obturación, tendría que haber el doble de variación de tensión. Sin embargo, debido a las imprecisiones del sistema, especialmente para valores de iluminación bajos tal como se puede en los gráficos, la relación entre sensibilidades es $7,22/3,1 = 2,329$ (en vez del valor ideal $500/250 = 2$).

Si queremos expresar la sensibilidad del sistema considerando también el tiempo de obturación, entonces tenemos que partir de uno de los dos casos, por ejemplo el último de $500 \mu\text{s}$, y suponer que para cualquier variación del tiempo de obturación el sistema va a seguir un comportamiento lineal. En ese caso, la tensión variará linealmente con la corriente de iluminación y también con el tiempo de obturación, de modo que al valor de sensibilidad hay que añadirle las unidades de tiempo.

La sensibilidad del sistema para el caso escogido sería de $(7,22 \cdot 10^7 \text{ V/A})/500 \mu\text{s} = 1,444 \cdot 10^{11} \text{ V/A} \cdot \text{seg}$

Diseño de la parte Digital del “CMOS IMAGE SENSOR”

Creación de los componentes digitales

Mediante la herramienta RTL Compiler vamos a sintetizar los diseños en VHDL de los cuatro elementos estudiados en el estudio previo para posteriormente exportarlos al Cadence para poder comprobar el comportamiento de la sección digital.

A continuación, presentamos los circuitos exportados al Cadence. En el Anexo de este documento mostramos los schematics de estos circuitos en RTL Compiler.

Comparador (Cadence):

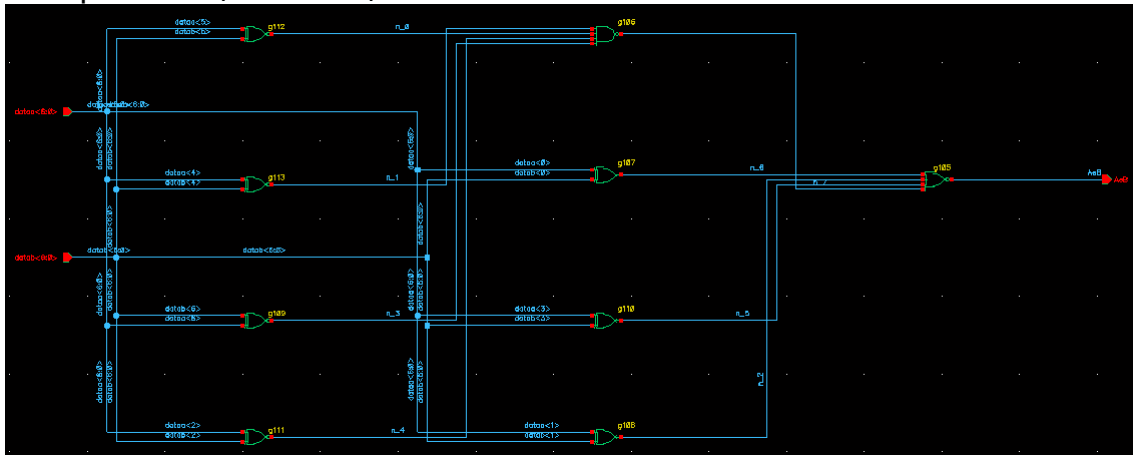


Figura 24

Contador (Cadence):

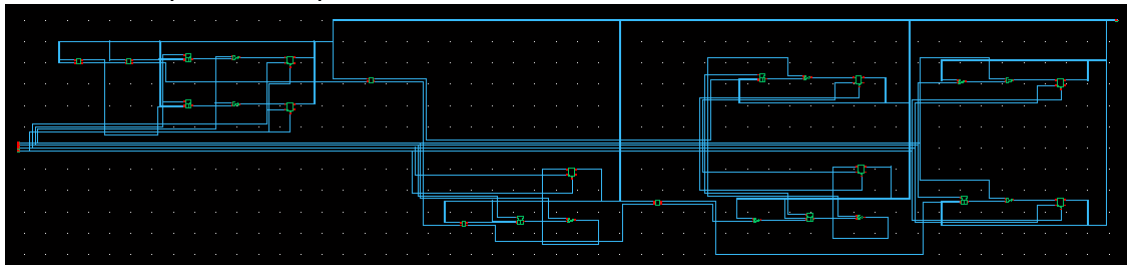


Figura 25

Decodificador (Cadence):

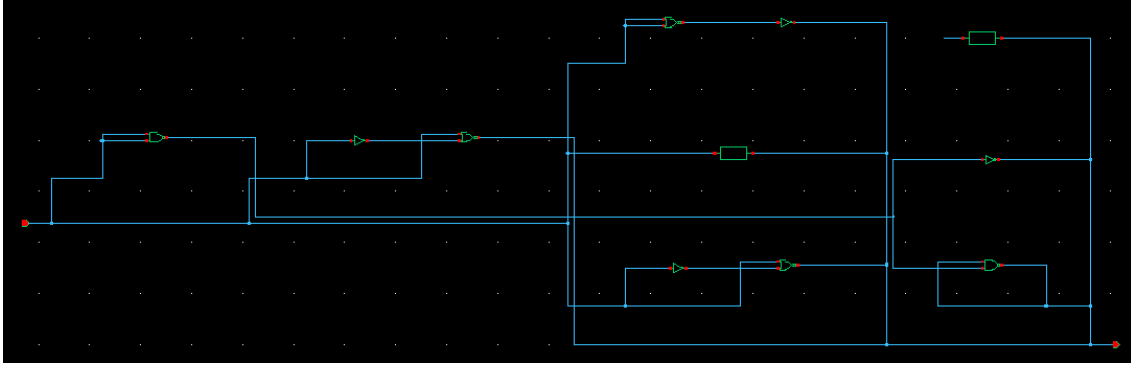


Figura 26

Unidad de control (Cadence):

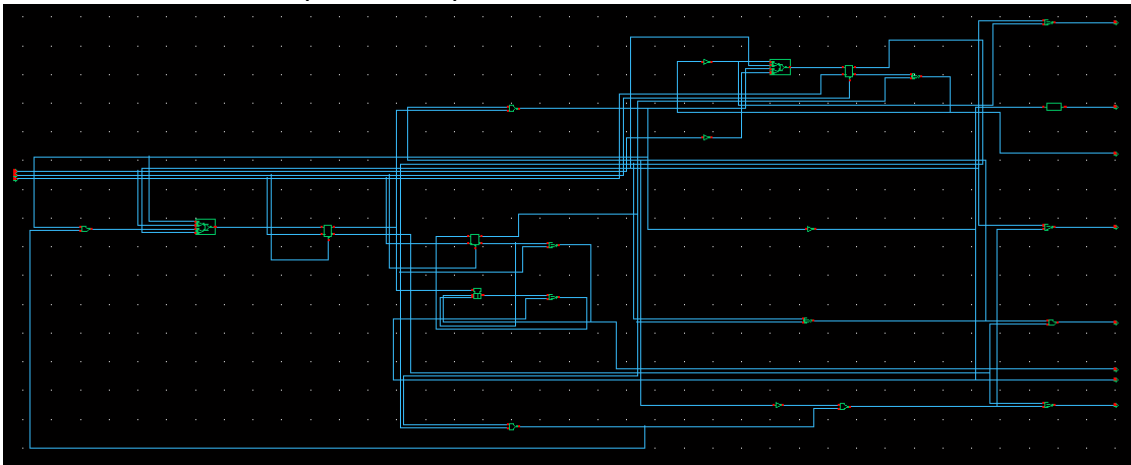


Figura 27

Unidad de Proceso

El primer paso para el diseño de la sección digital es crear nuestra unidad de proceso. Tal y como podemos ver en la figura 28, está compuesta por los correspondientes símbolos del decodificador, comparador y contador.

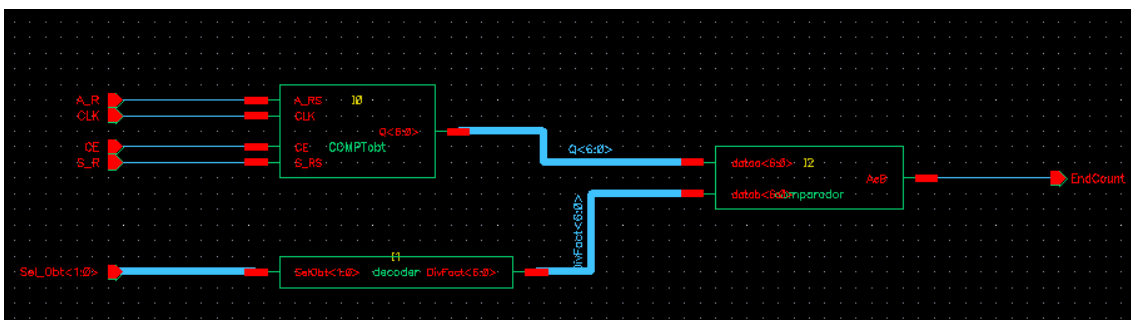


Figura 28

Sección Digital

Finalmente, el conjunto del bloque digital termina cuando juntamos la unidad de proceso (empleamos el símbolo correspondiente al schematic anterior) con la unidad de control tal y como habíamos visto en el estudio previo.

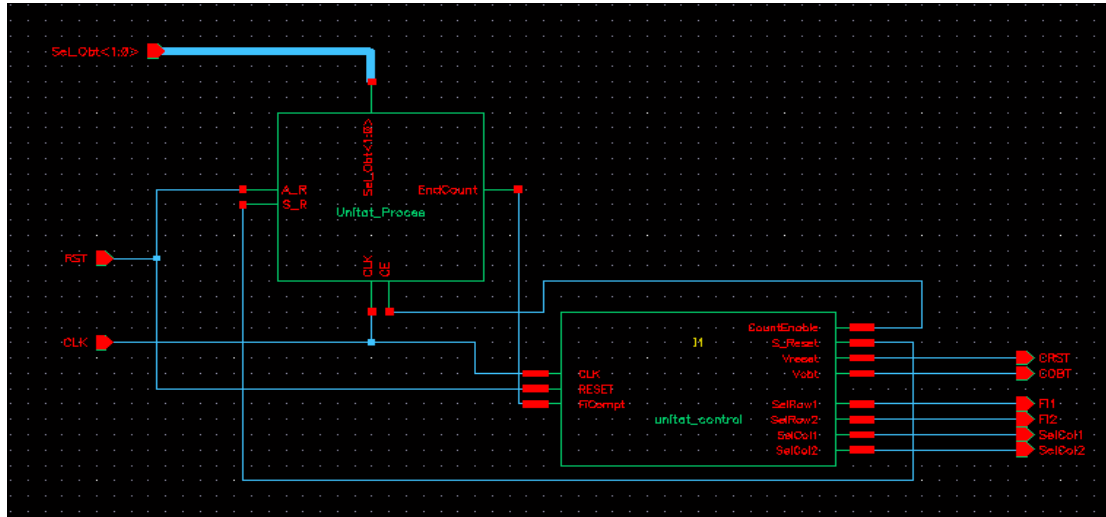


Figura 29

Análisis Sección Digital

Para verificar que las señales que genera el sistema creado anteriormente son las que esperamos, realizamos el siguiente test:

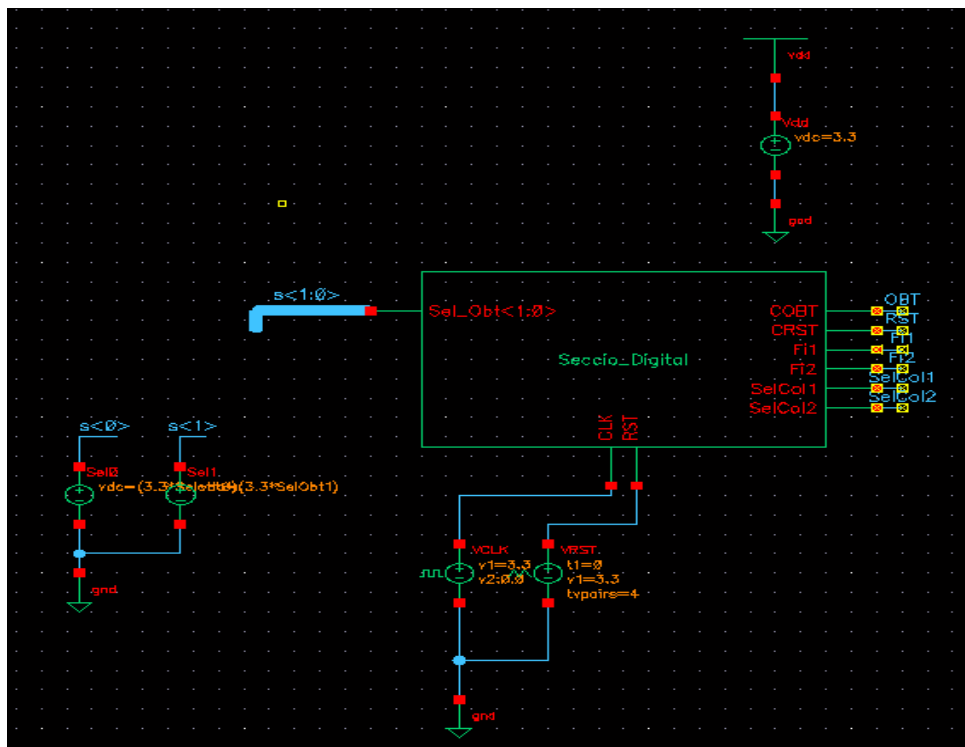


Figura 30

Hemos generado CLK mediante un generador de pulsos y la señal RST con la instancia vpwl. Hemos activado el RST durante unos pocos microsegundos.

En la siguiente imagen, hemos fijado los valores SelCol<1> a 0 y SelCol<0> a 1 para estudiar el circuito para una Tobt de 250µs.

Comprobación de las señales OBT, RST y Fi:

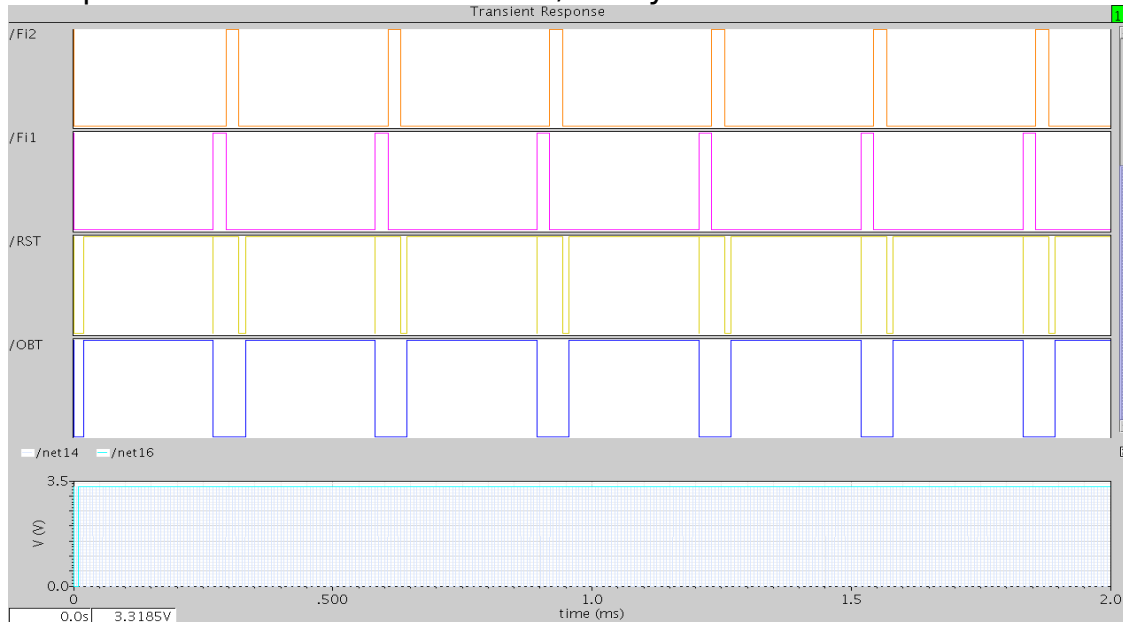


Figura 31

Si nos fijamos en la figura 14 del apartado de diseño Analógico, observamos claramente la similitud entre las señales de control. Por lo que sabemos que la secuencia de lectura de los APS es la que esperamos y que por lo tanto funcionará cuando analicemos el sistema completo.

Comprobación de las señales SetCol<0,1>:

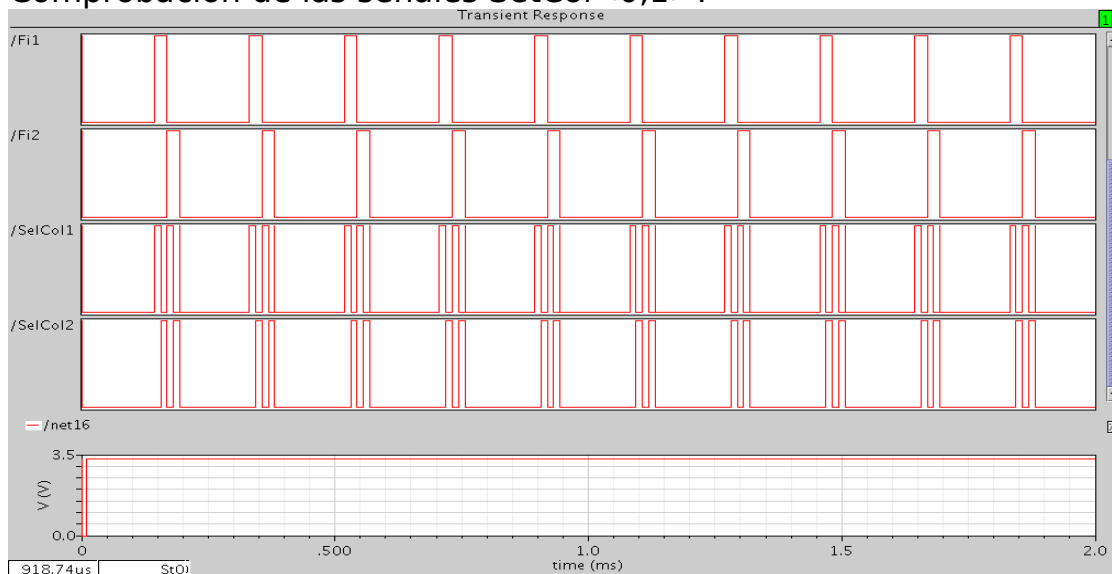


Figura 32

La secuencia corresponde con la que generamos en el estudio del multiplexor. Como veremos más adelante, en el momento que las dos señales SelCol están inactivas nos aparecerá un valor constante que no nos afectará en el sistema.

Diseño Mixto del “CMOS IMAGE SENSOR”

Análisis del sistema completo

Una vez comprobado por separado el buen funcionamiento de las componentes analógicas y digitales del sensor de imagen CMOS, las juntamos para realizar un último análisis de señal mixta.

En la parte analógica sustituimos las fuentes de alimentación por las correspondientes salidas de la Unidad de control.

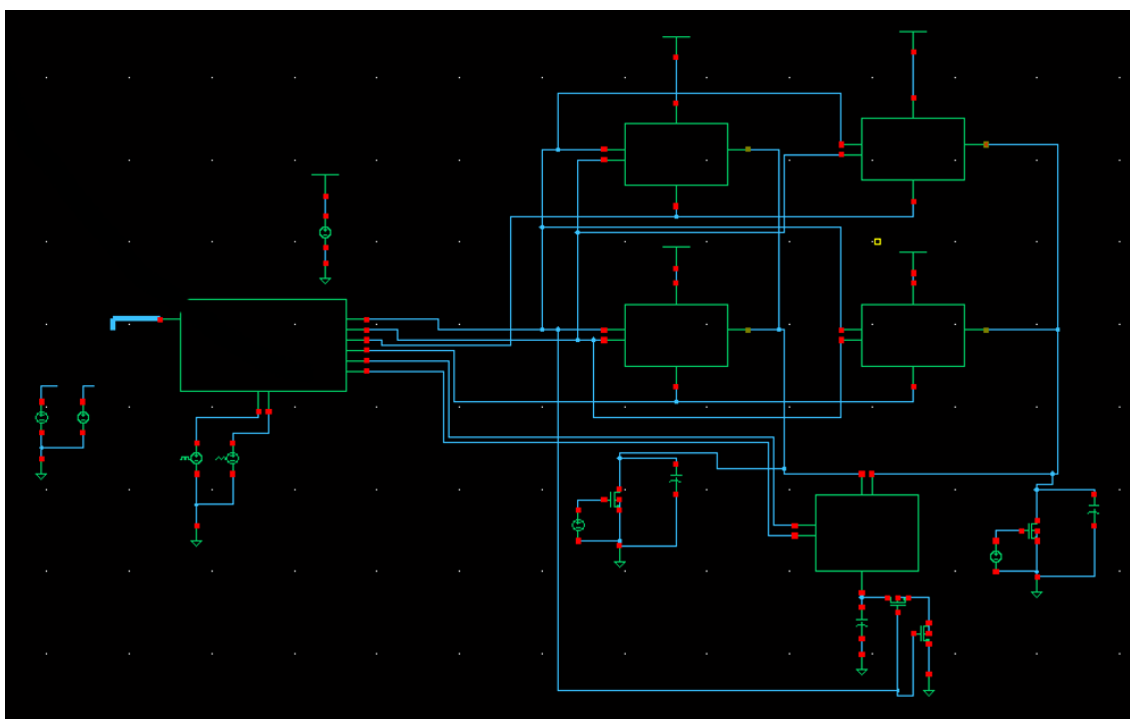


Figura 33. *Los transistores que aparecen a la salida del multiplexor pertenecen a un diseño que se explicará más adelante. En los resultados de este apartado no formaban parte del schematic.

Como en los apartados anteriores ya hemos comprobado todas las señales de control, para saber si el bloque entero obtiene los mismos resultados que los observados en la parte analógica, nos centraremos en las señales de salida, Vcol(ambas) y SelCol<1,0>.

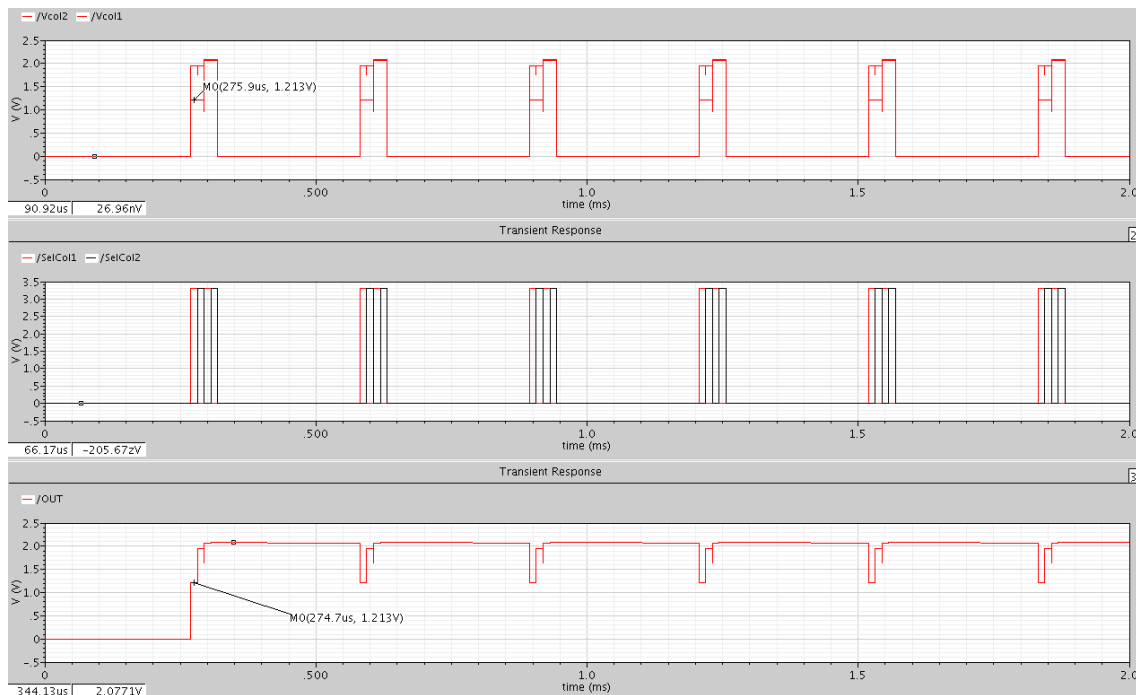


Figura 34

Vemos que las Vcol en los instantes de lectura tienen los mismos valores que los estudiados en la figura 9 (segunda columna) para un valor T_{obt} de $250\mu s$. Como Vout tiene los valores Vcol en los instantes adecuados, confirmamos que el multiplexor funciona adecuadamente y que por lo tanto el sistema no nos ha presentado ninguna modificación significativa al emplear las señales de la sección digital.

Mejora Opcional

En la gráfica anterior vemos que tras la lectura, cuando las SelCol están desactivadas, durante el tiempo de obturación a la salida tenemos un valor constante. En principio no suponen ningún problema ya que durante ese periodo no nos importa que valores de tensión haya a la salida. No obstante, hemos decidido diseñar un pequeño sistema que fuerce la tensión a 0V durante el tiempo de obturación para tener un poco más de control de lo que sucede a la salida.

La idea inicial y basada en el modelo más ideal fue añadir un transistor NMOS al lado de la capacidad parásita. El drenador lo conectamos a la salida del multiplexor, el surtidor a masa y la puerta a la señal OBT. La idea es que cuando OBT esté activa, la tensión que se conserva en el condensador se descargue por el cortocircuito que forma el NMOS. Los resultados a la salida fueron los siguientes:

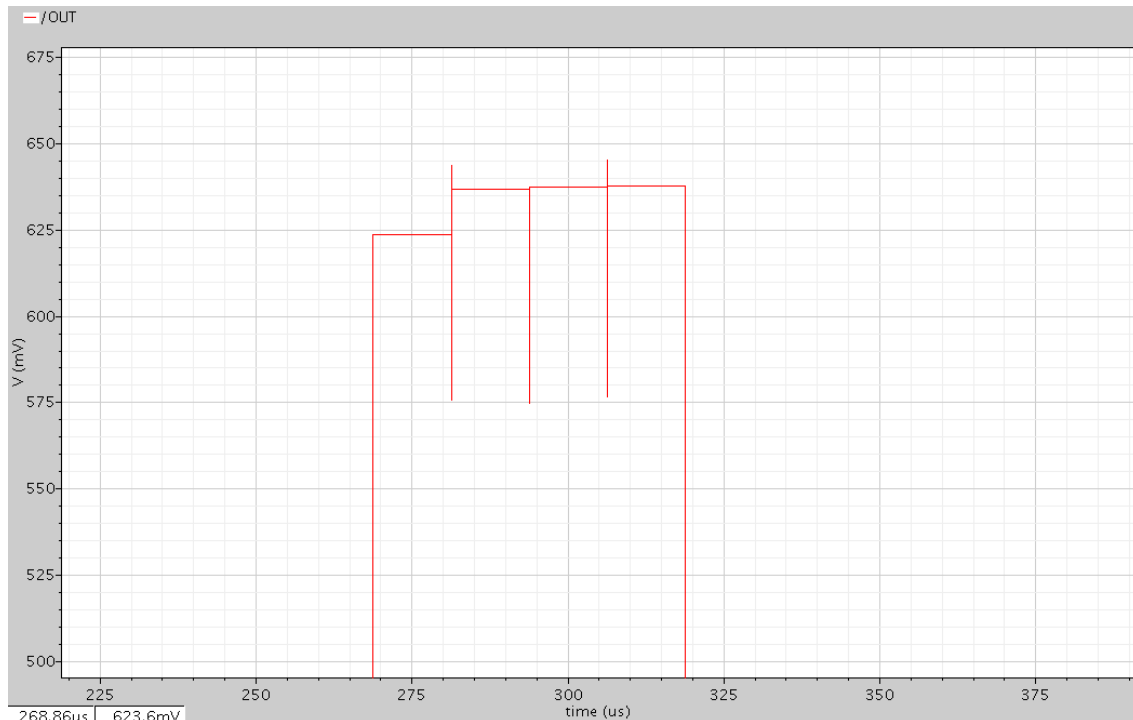


Figura 35

Efectivamente, durante el tiempo de obturación la tensión a la salida es 0, pero a cambio perdemos toda la resolución del sistema.

Pensamos que probablemente durante el tiempo de lectura una parte importante de la intensidad se desvía al NMOS debido a que realmente no forma un circuito abierto cuando no está activado, sino que actúa como una resistencia relativamente grande, pero para este caso no lo suficiente. Para comprobarlo analizamos las corrientes que circulan a la salida del multiplexor con y sin nuestro sistema.

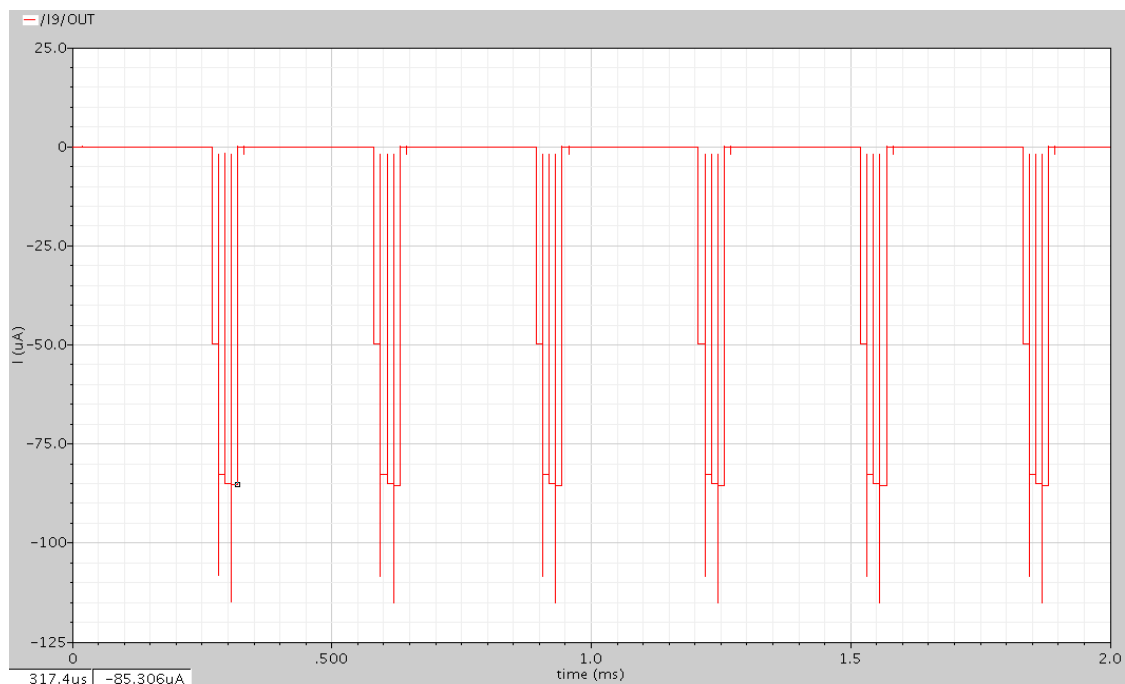


Figura 36

En la imagen vemos las corrientes a la salida del multiplexor. Como veremos más adelante, cuando funciona correctamente a la salida obtenemos unos picos de corriente, sin embargo, en esta imagen vemos un pico acompañado de una constante.

Como creíamos que el problema es que la resistencia equivalente del NMOS no era lo suficientemente grande probamos de reducir al máximo la anchura del transistor, pero no obtuvimos mejoras. Entonces añadimos una resistencia de $10\text{M}\Omega$ de la siguiente forma.

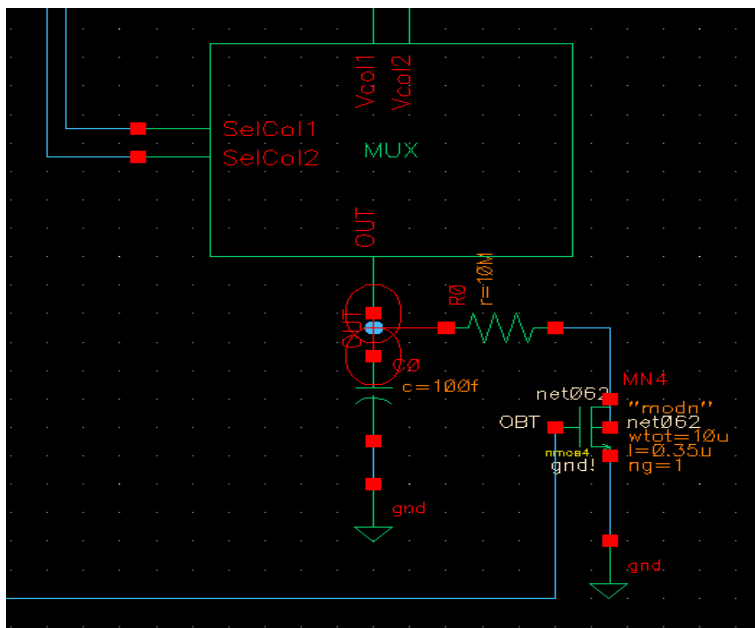


Figura 37

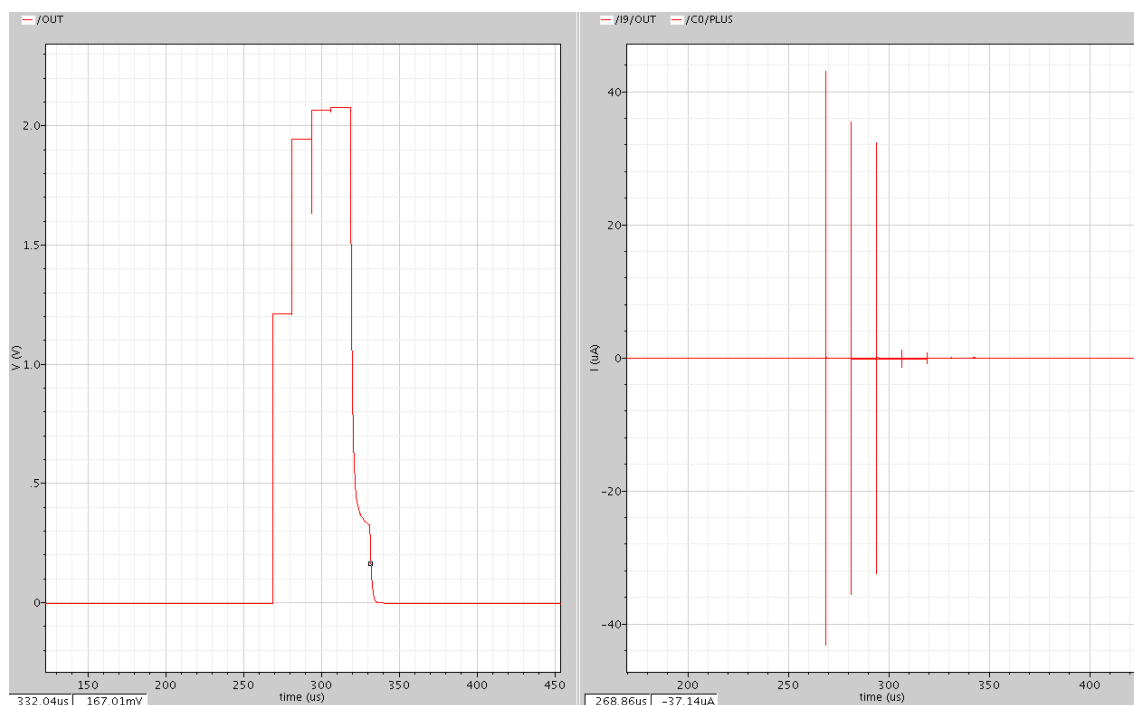
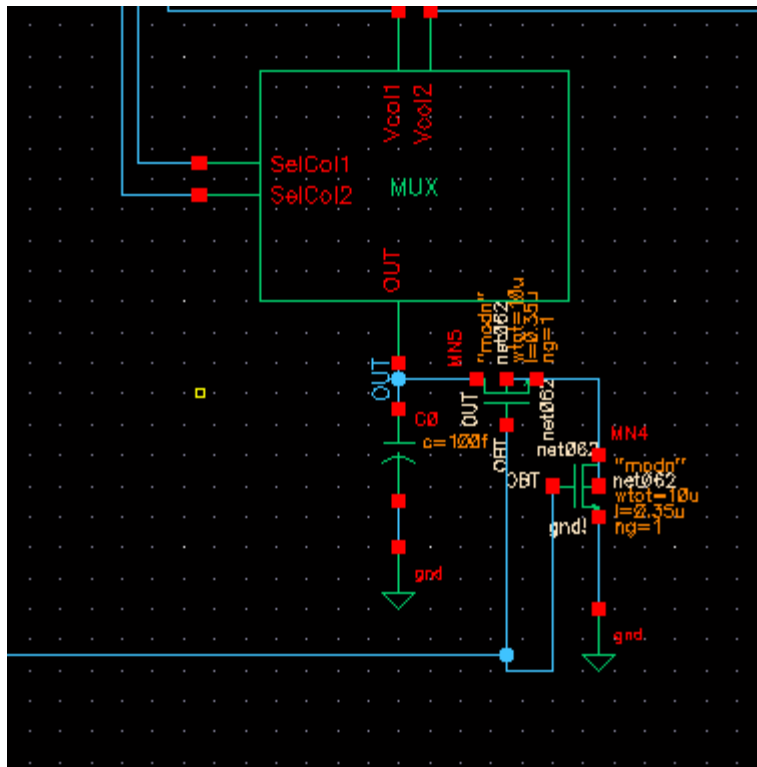


Figura 38

Una vez encontrada una posible solución, decidimos realizar el diseño sólo con transistores CMOS, ya que durante todo el proyecto, solo se ha trabajado con ellos. Basándonos en el concepto de la estructura cascode, añadimos otro transistor NMOS en serie con el anterior para incrementar la impedancia e intentar repetir el efecto de añadir una resistencia con valor elevado. El resultado fue el siguiente.



28

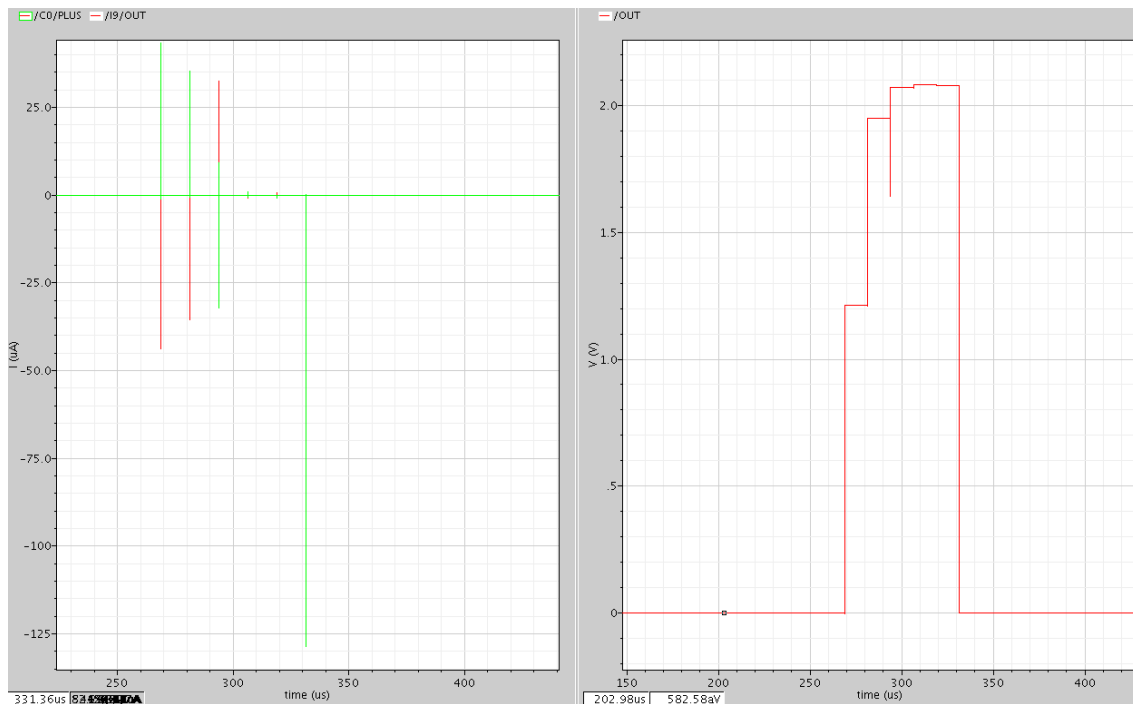


Figura 40

Conseguimos mantener la resolución y conseguimos que la tensión valga 0 antes de la siguiente lectura. No obstante nos encontramos con dos inconvenientes. El primero es que nos aparece un transitorio con un valor constante después de la última lectura con una duración igual al tiempo de conmutación del multiplexor. Esto no supondría un problema si no fuera porque nos deriva al segundo inconveniente. Durante la transición de este valor constante a 0V nos aparece un pico de corriente en el condensador muy elevado. Esta proviene de la rápida descarga de esta capacidad.

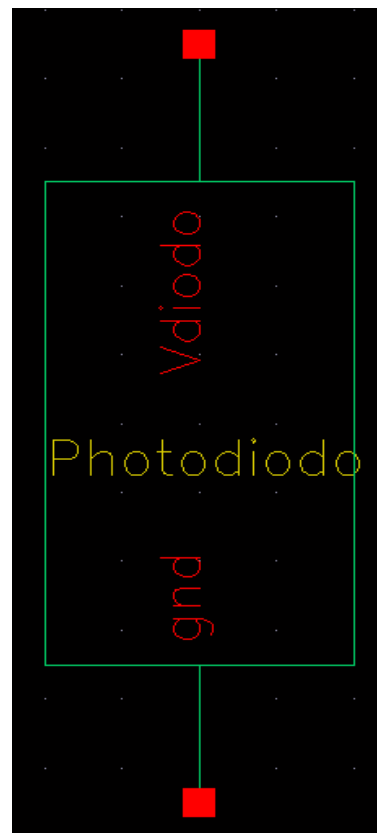
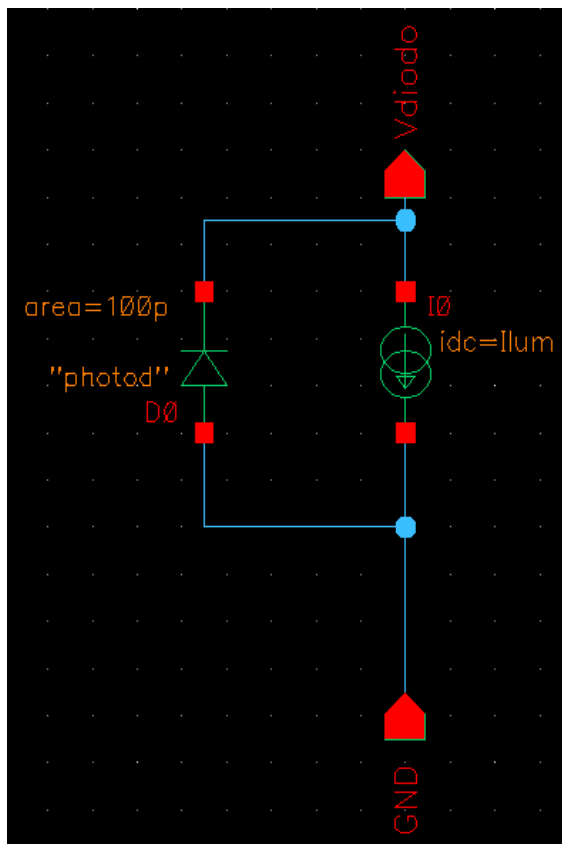
En definitiva, si realmente hubiese algún caso en el que el valor aleatorio que aparece después de la lectura afectase negativamente al sistema, nuestra mejora sería de utilidad. No obstante, como hemos comentado anteriormente, el diseño del sensor de imagen está pensado de forma que en los instantes de lectura se obtiene el valor que queremos, por lo que añadir este pequeño circuito no realiza una tarea significativa y además provoca un pequeño aumento en el consumo, que aislado es inapreciable, pero a lo largo de varias iteraciones se ha de tener en cuenta.

ANEXO

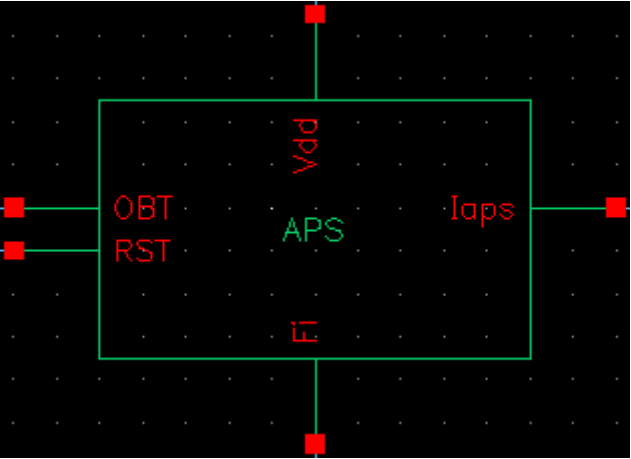
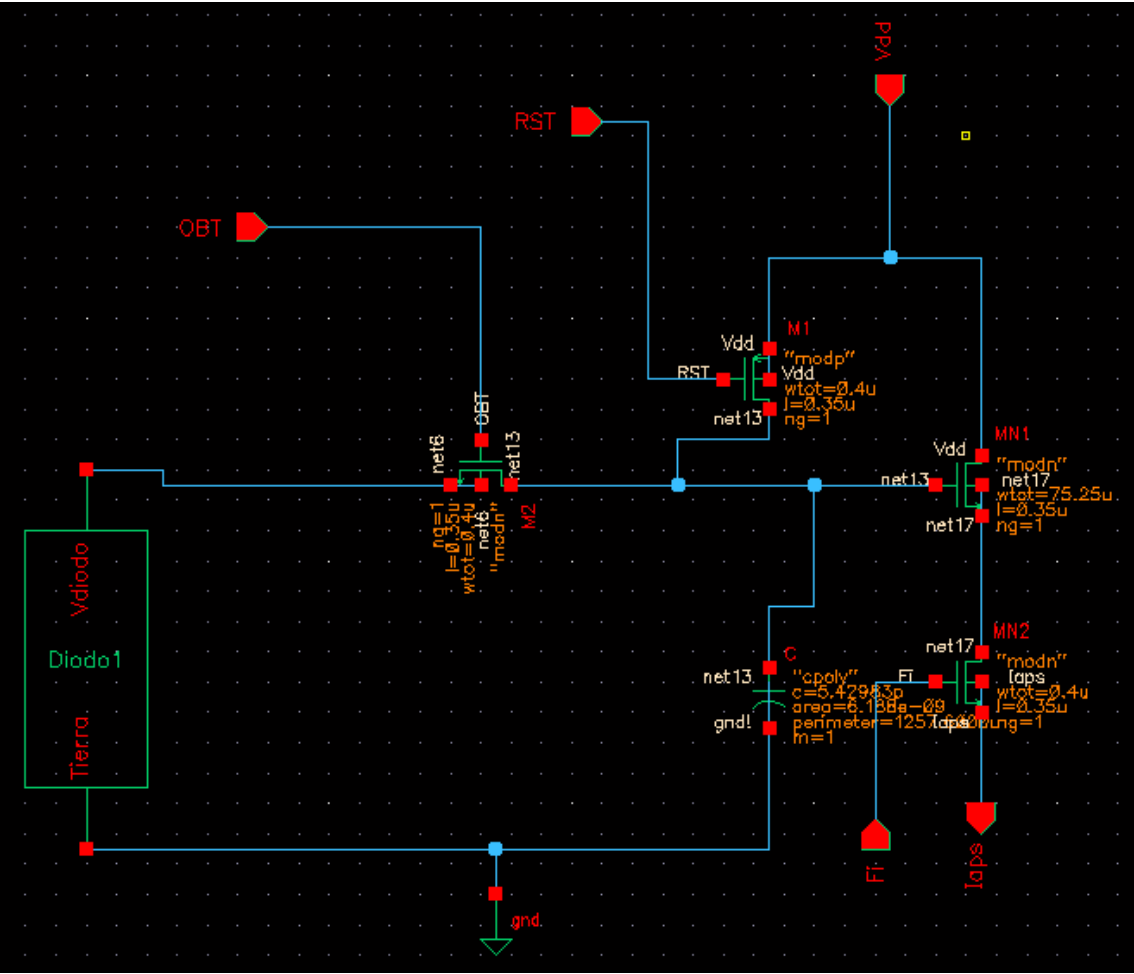
Símbolos y Schematics(Analógico)

A continuación expondremos los *Schematics* de los respectivos símbolos empleados en las imágenes de este documento:

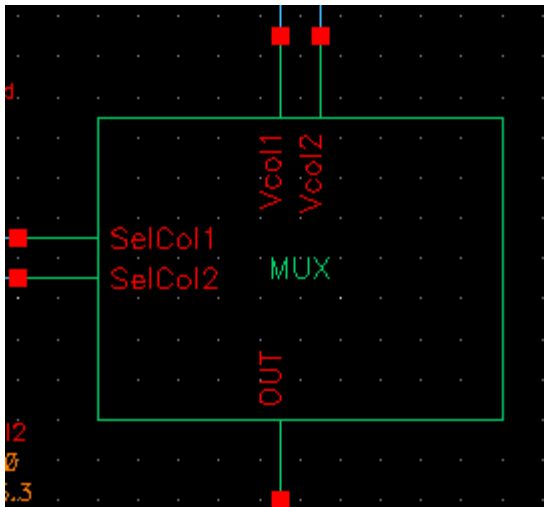
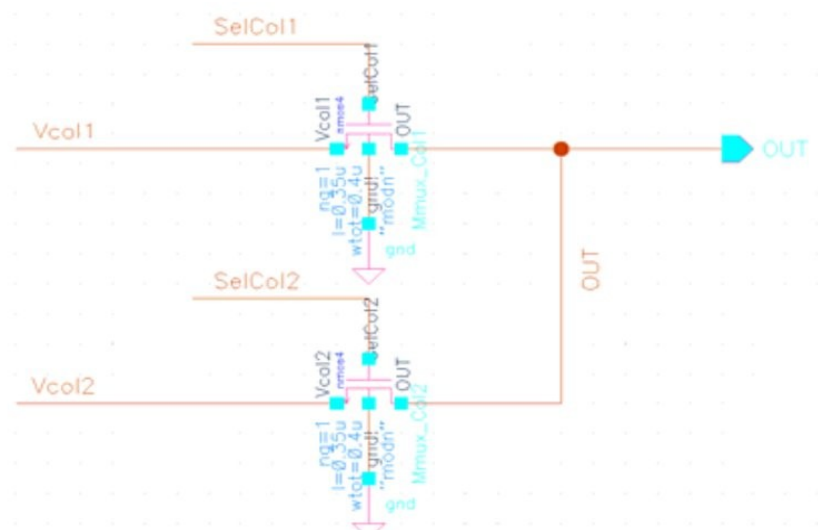
Foto-diodo



APS



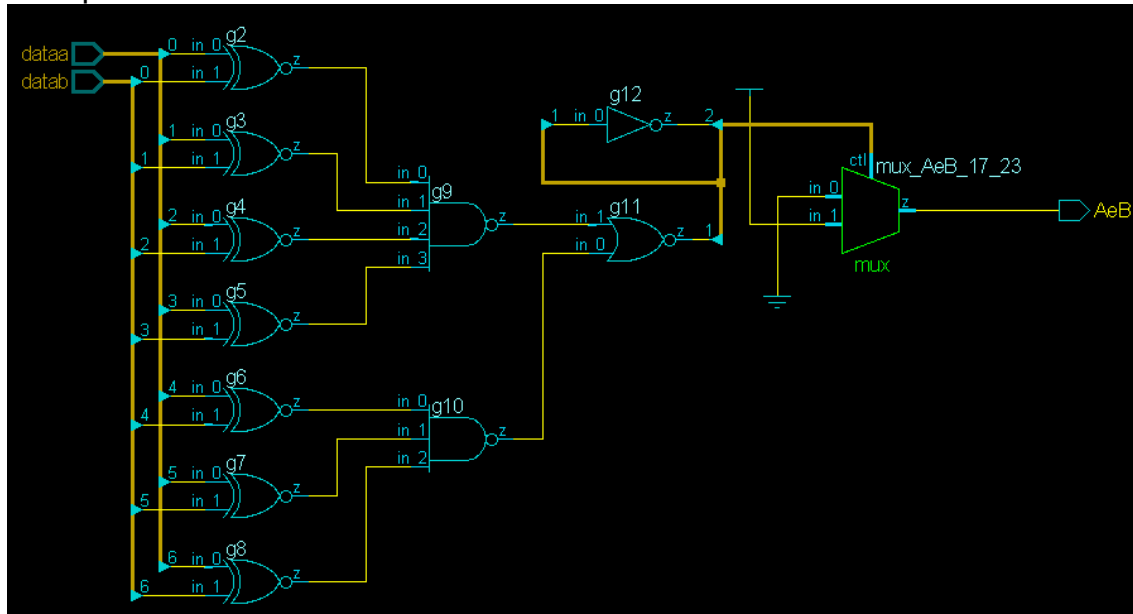
Multiplexor



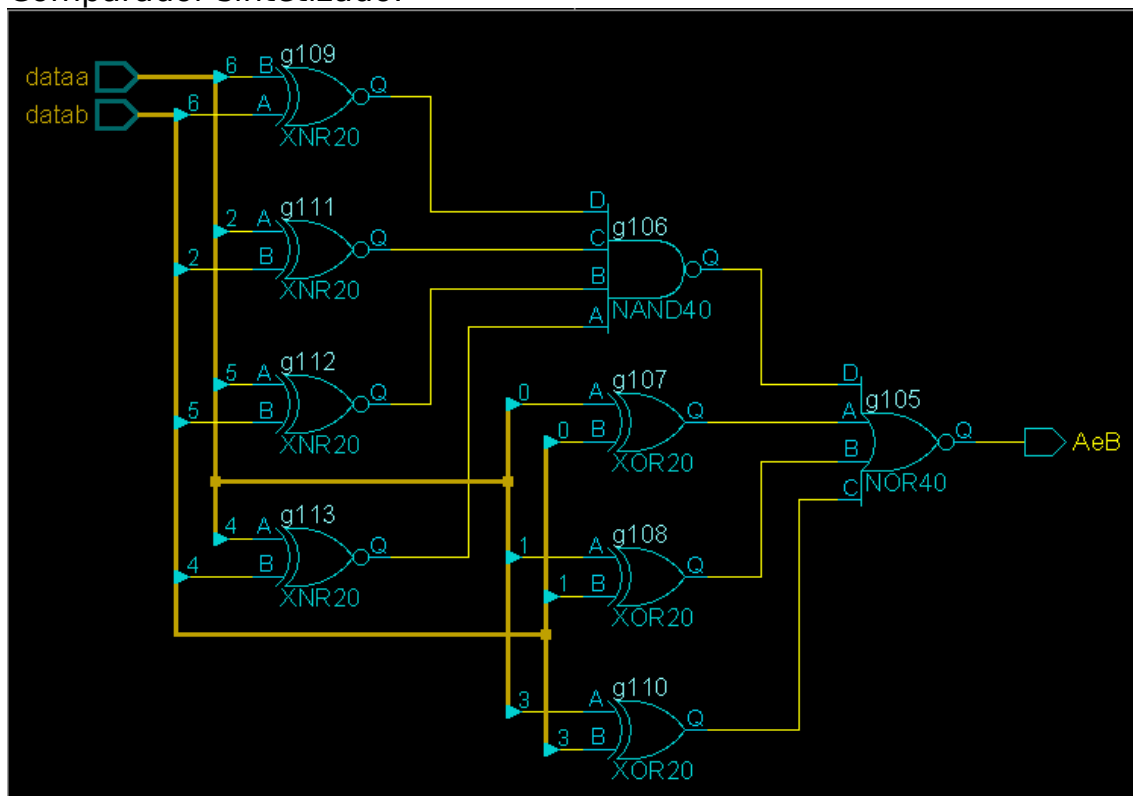
Schematics RTL Compiler (digital)

Comparador

Comparador no sintetizado:

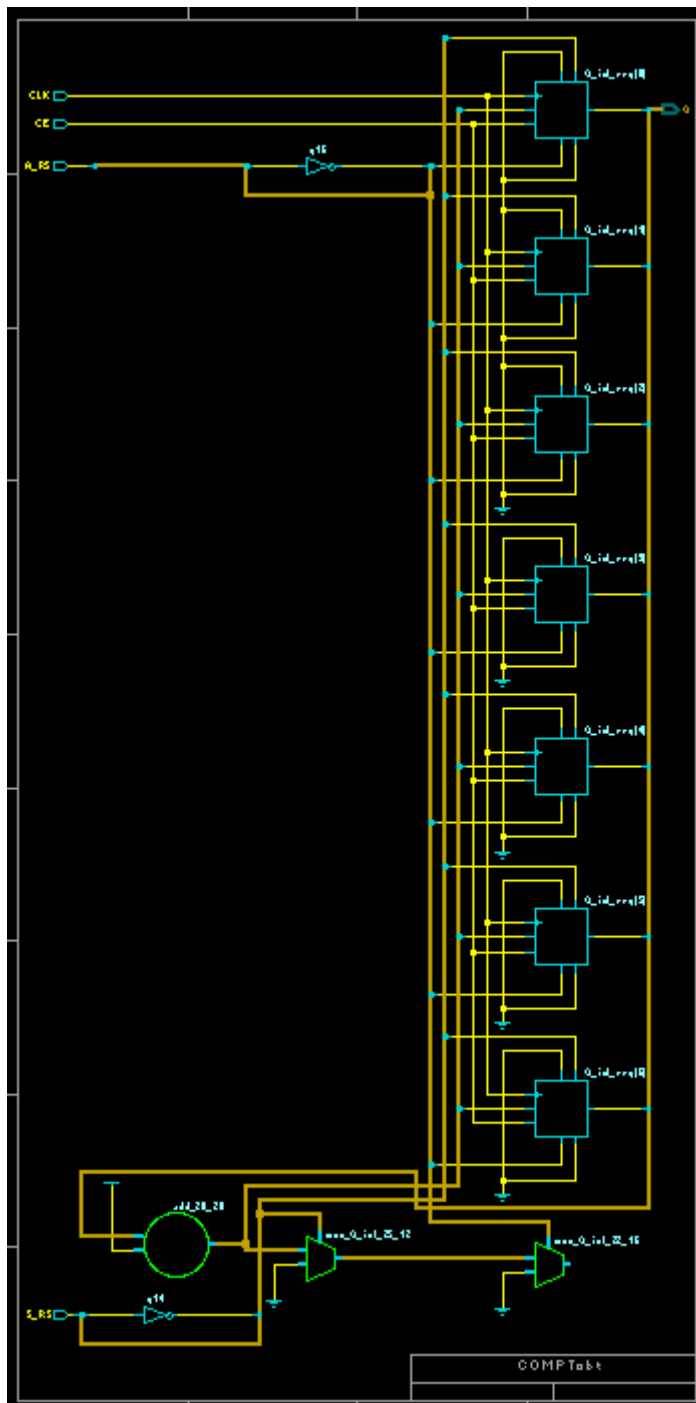


Comparador sintetizado:

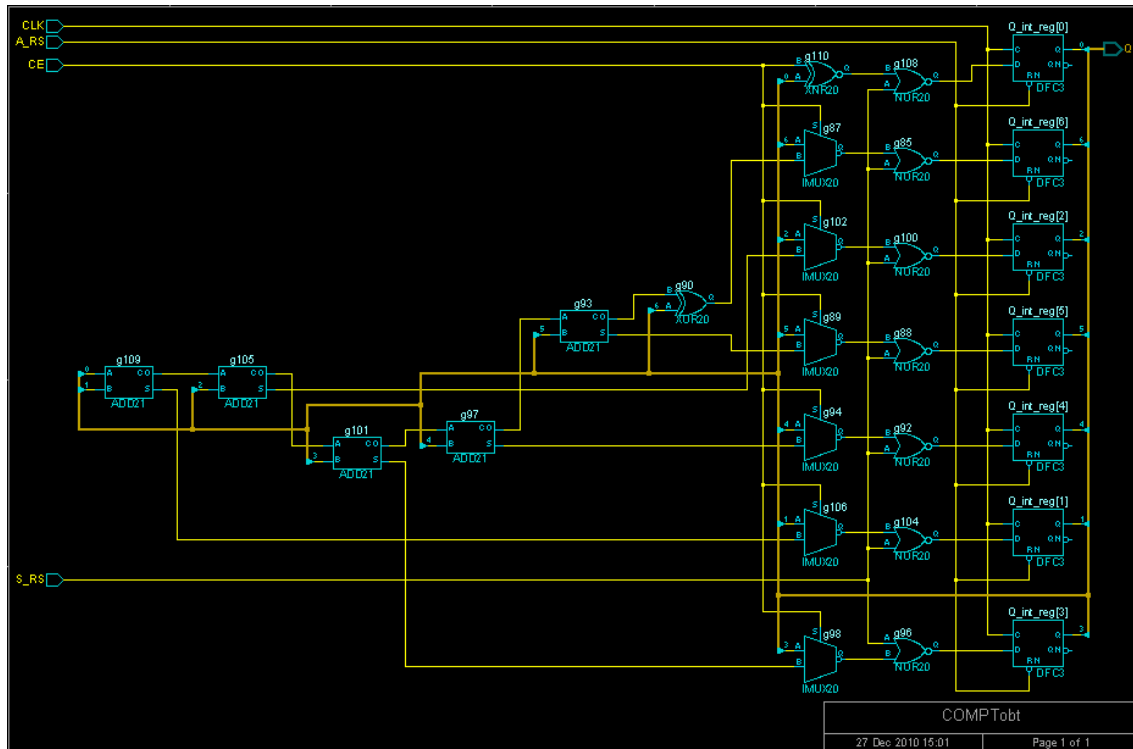


Contador

Contador no sintetizado:

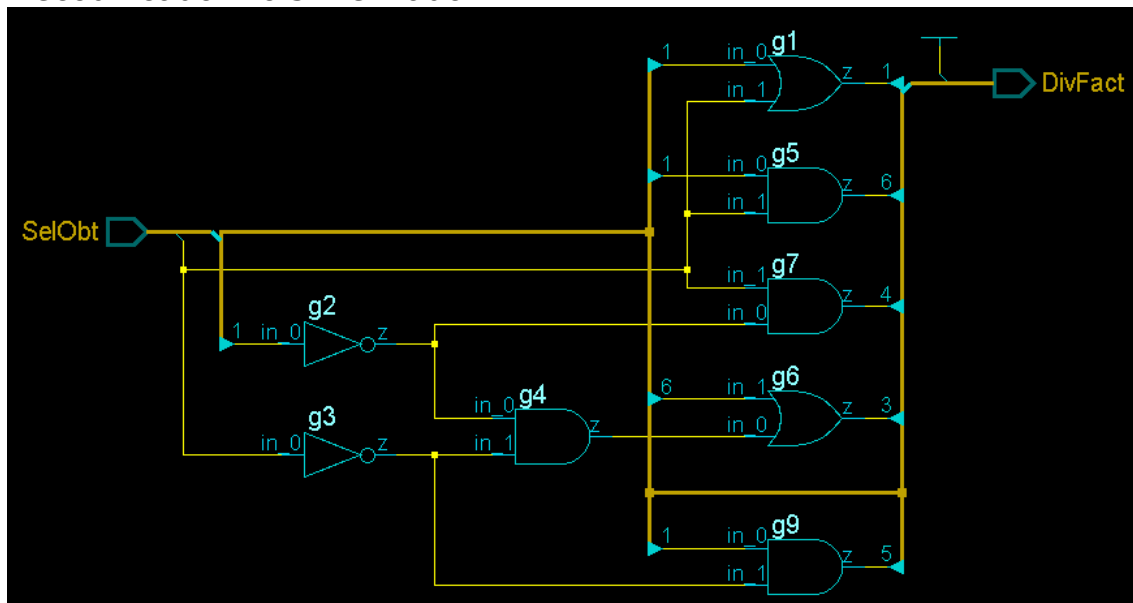


Contador sintetizado:

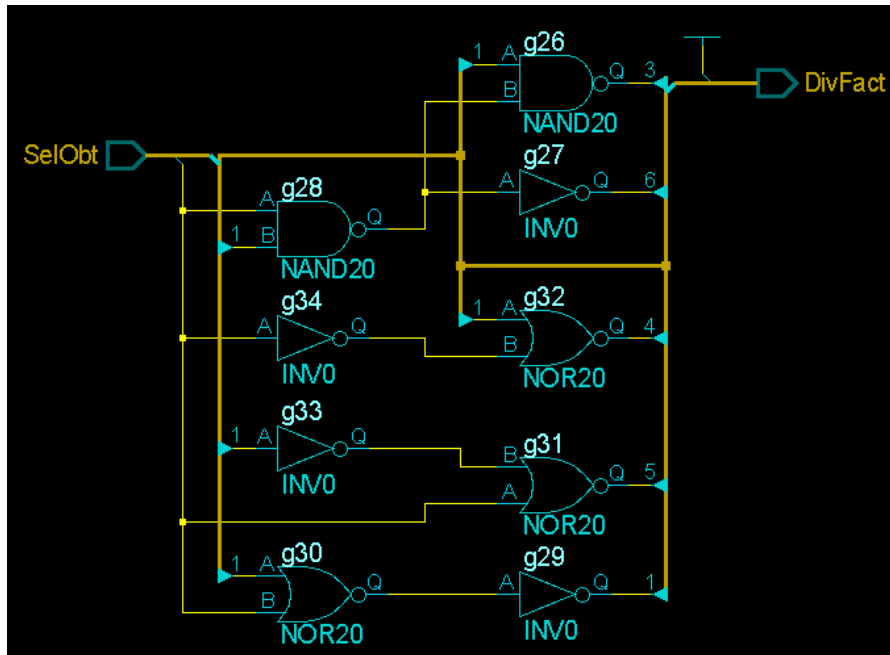


Decodificador

Decodificador no sintetizado:

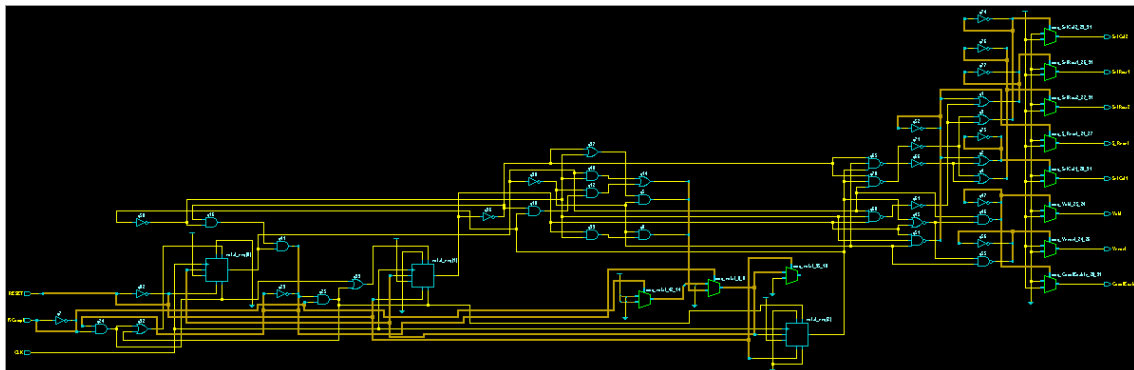


Decodificador sintetizado:

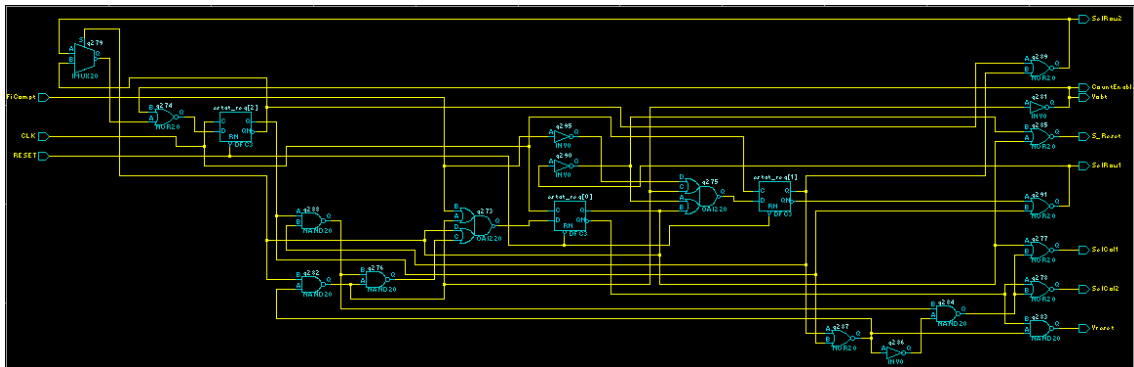


Unidad de control

Unidad de control no sintetizada:



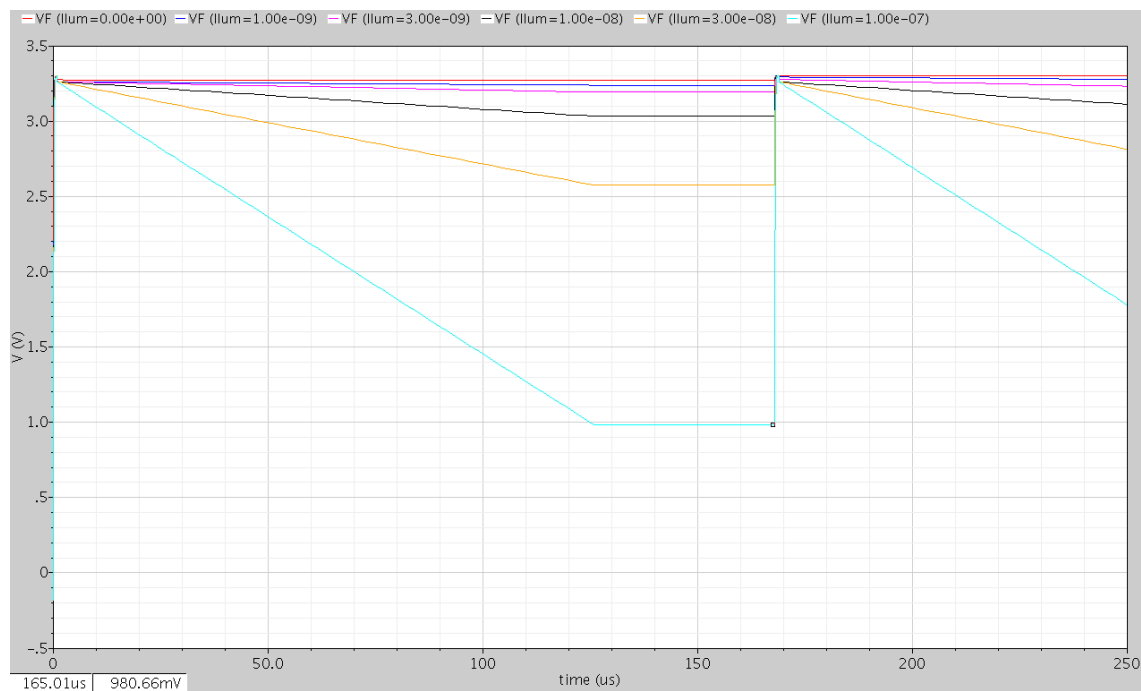
Unidad de control sintetizada:



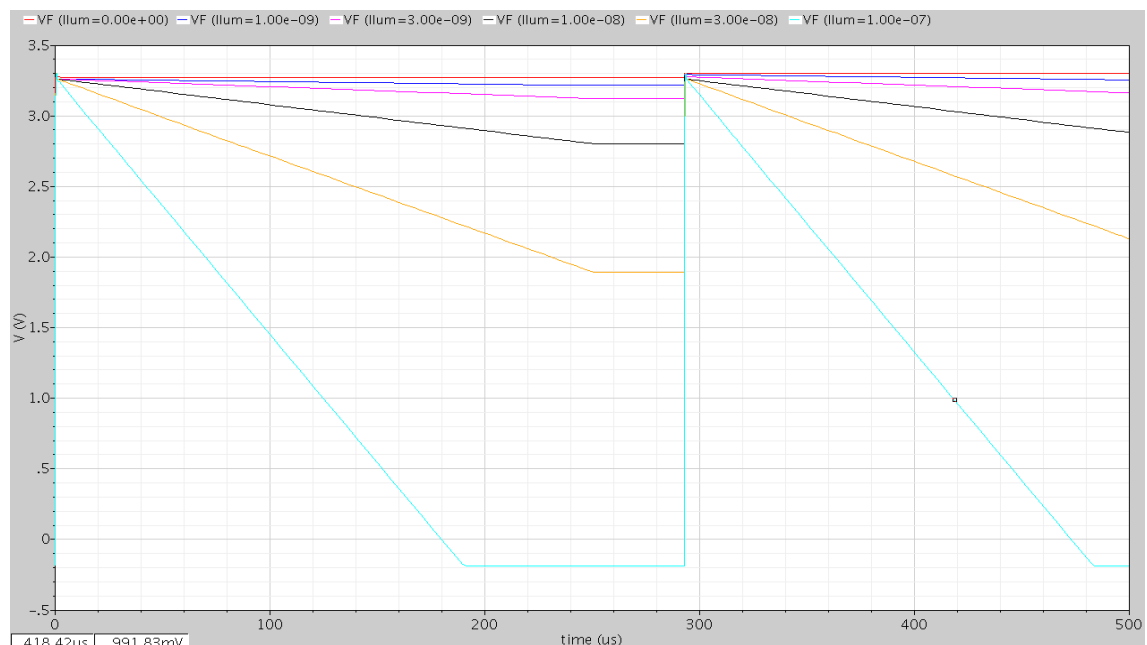
Análisis de sensibilidad en función de T_{obt}

Presentamos las tensiones obtenidas en la capacidad de la figura 4(*) de este documento para diferentes valores de T_{obt} . Podemos ver como a medida que se incrementa el tiempo de obturación, la tensión baja cada vez más para una misma iluminación, hasta el punto en que se satura en su valor mínimo.

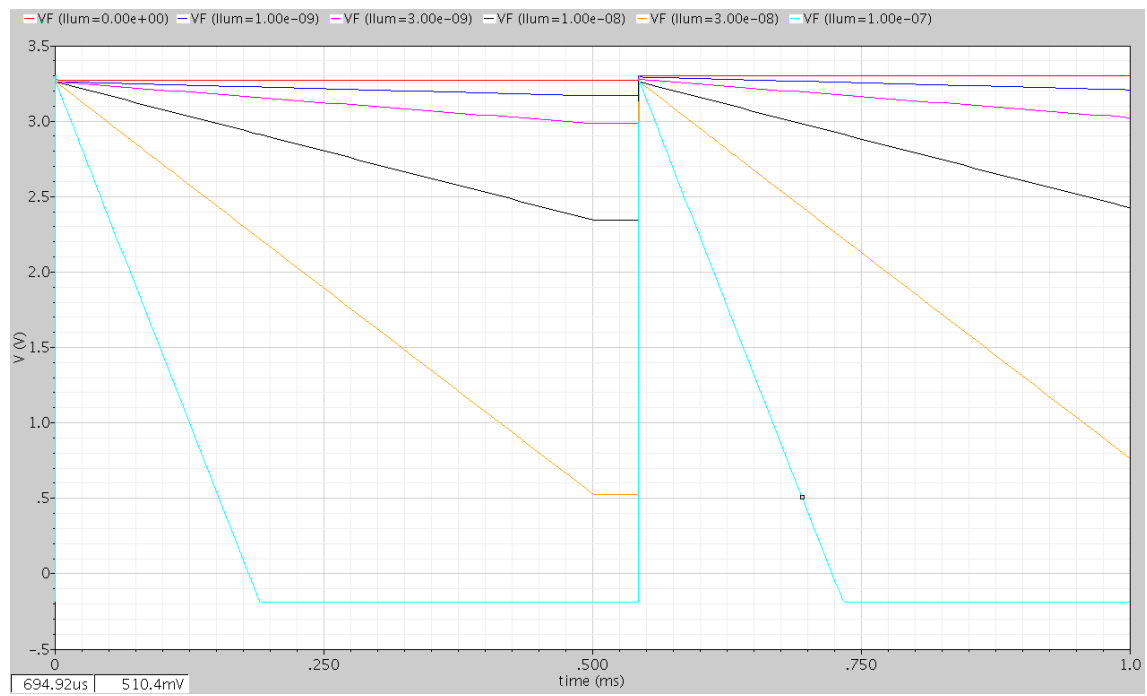
$T_{obt} = 1/8000 \rightarrow 125 \mu s$



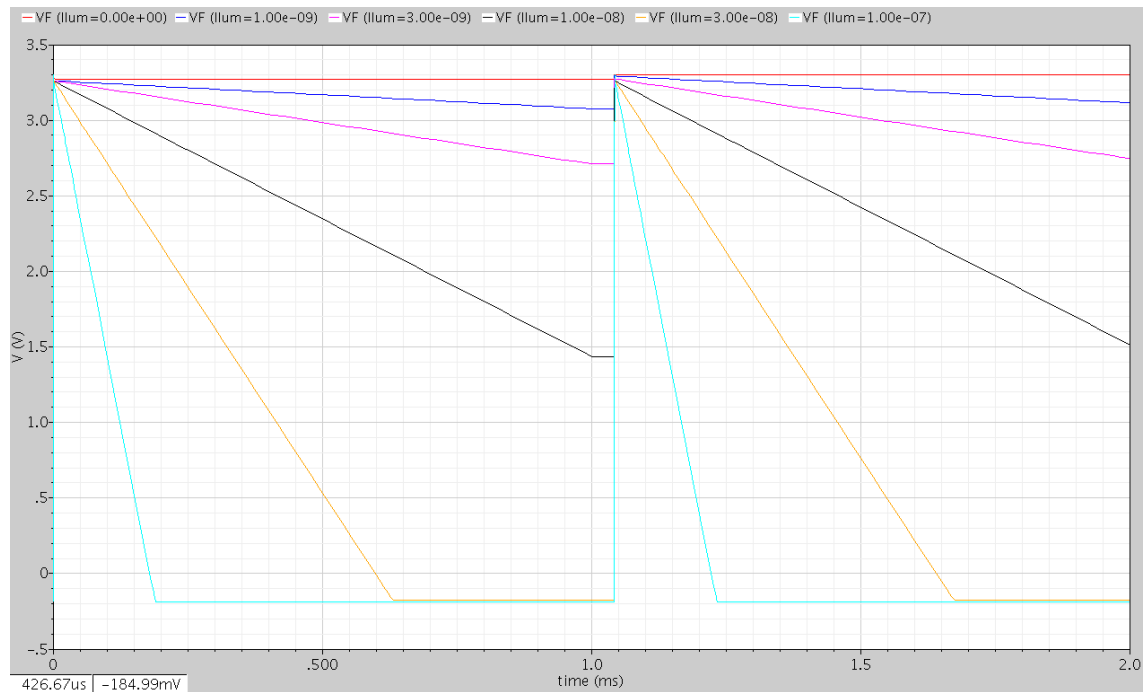
$T_{obt} = 1/4000 \rightarrow 250 \mu s$



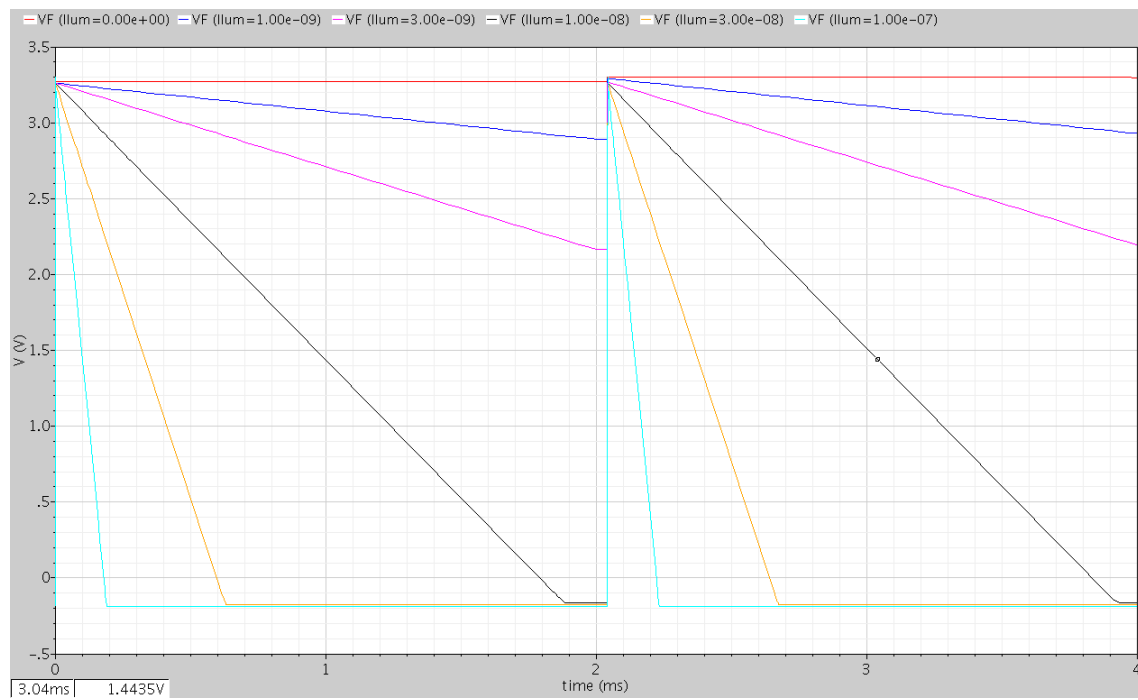
$T_{\text{obt}} = 1/2000 \rightarrow 500\mu\text{s}$



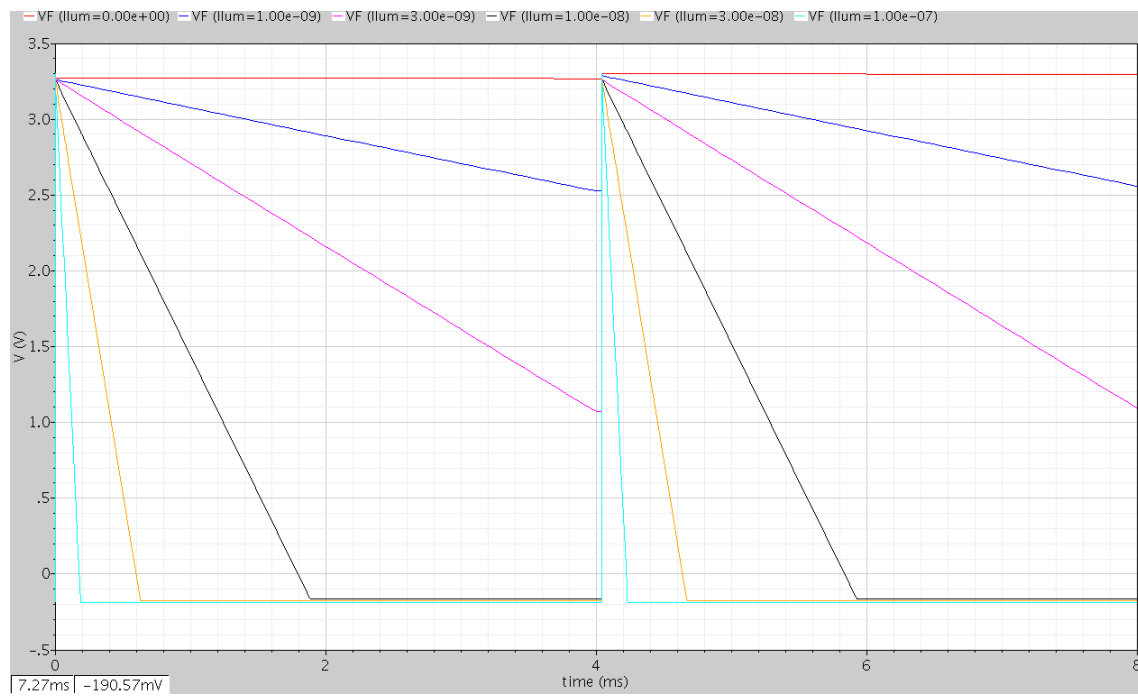
$T_{\text{obt}} = 1/1000 \rightarrow 1\text{ms}$



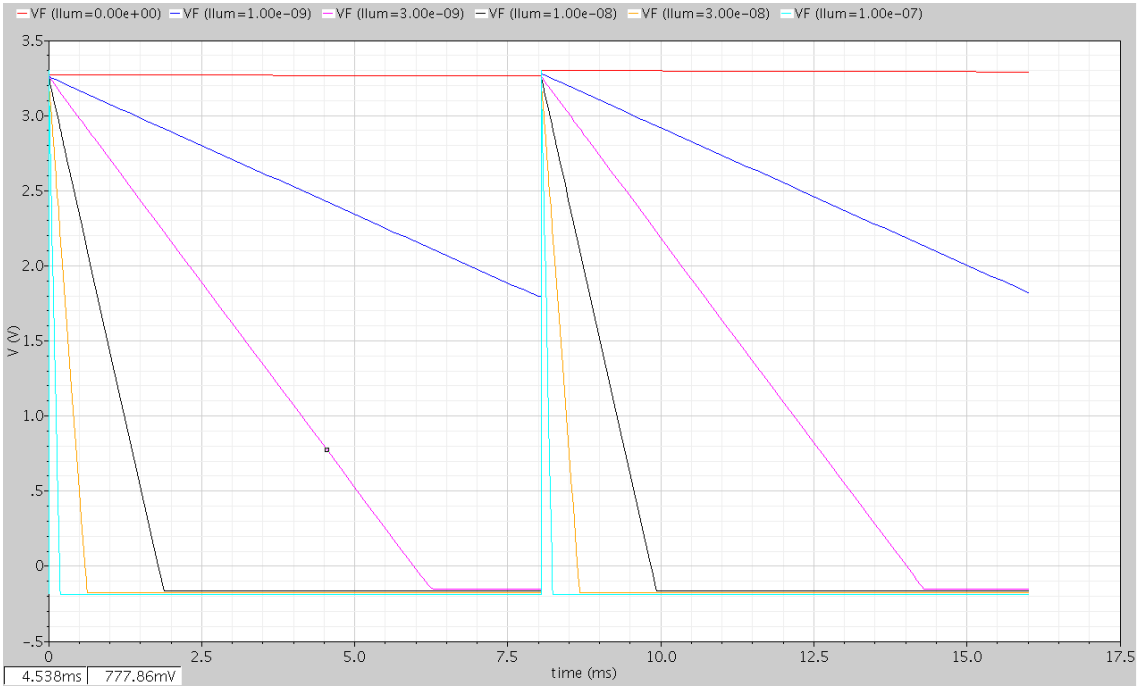
$T_{\text{obt}} = 1/500 \rightarrow 2\text{ms}$



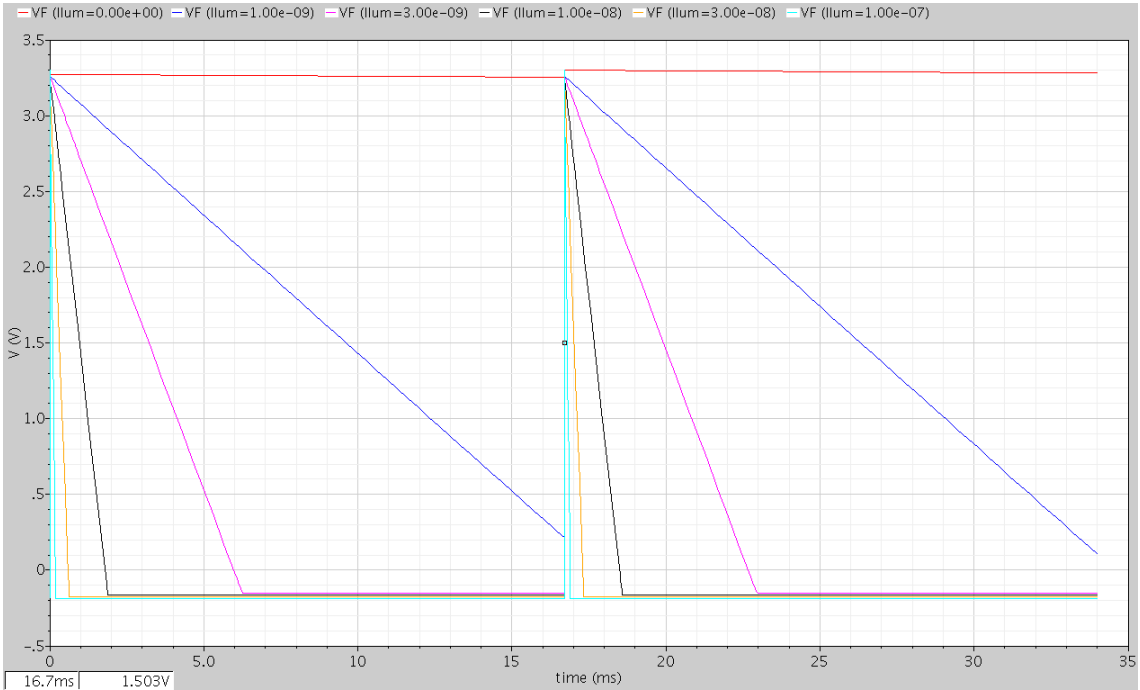
$T_{\text{obt}} = 1/250 \rightarrow 4\text{ms}$



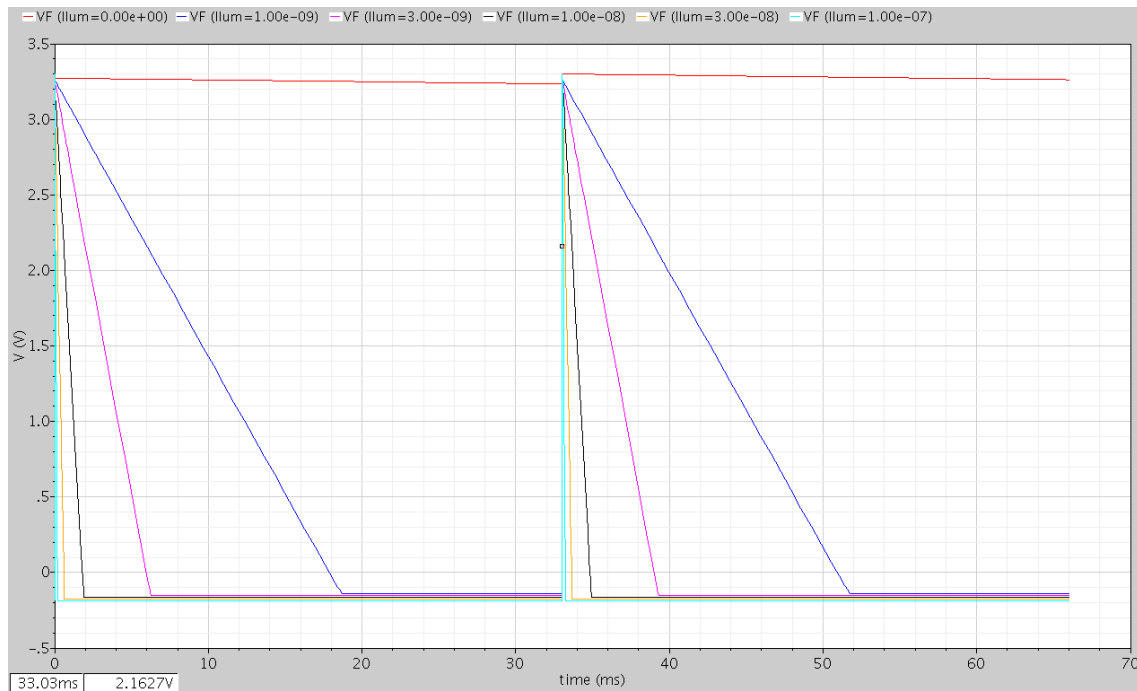
$T_{obt} = 1/125 \rightarrow 8\text{ms}$



$T_{obt} = 1/60 \rightarrow 16,666\text{ms}$



$$T_{\text{obt}} = 1/30 \rightarrow 33,333\text{ms}$$



Prueba de reducción del consumo disminuyendo V_{DD}

Hemos intentado bajar la tensión de alimentación a $V_{DD} = 1\text{V}$, aunque como podemos ver en la siguiente imagen el comportamiento ya no es el deseado ya que no obtenemos los valores V_F esperados en el APS:

