

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Tunnel-FET para aplicaciones de baja potencia o  
ultralow-voltage**

Proyecto de investigación

**Jhon Jairo Paredes Mayorga**

**Ingeniería Electrónica**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Electrónico

Quito, 23 de noviembre de 2018

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Tunnel-FET para aplicaciones de baja potencia o ultralow-voltage**

**Jhon Jairo Paredes Mayorga**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Luis Miguel Prócel, Ph.D.

Firma del profesor

---

Quito, 23 de noviembre de 2018

## **DERECHOS DE AUTOR**

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: \_\_\_\_\_

Nombres y apellidos: Jhon Jairo Paredes Mayorga

Código: 00116934

Cédula de Identidad: 2100955117

Lugar y fecha: Quito, 23 de noviembre de 2018

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a mis padres, quienes me apoyaron incondicionalmente durante toda mi carrera universitaria y me dieron las fuerzas necesarias para superar todas las adversidades que se presentaron a lo largo del camino.

Agradecer a mi tutor de tesis Luis Miguel Prócel por toda la ayuda brindada y hacer que me involucre en el mundo de los circuitos integrados y la nanoelectrónica. Además quiero agradecer la ayuda de José Camacho en el desarrollo del presente trabajo y a mis compañeros.

## RESUMEN

El presente proyecto propone el desarrollo de nuevas tecnologías en el uso de circuitos básicos como son los rectificadores de onda completa en baja potencia y alta frecuencia, así como su posterior implementación y simulación en el software Custom-Compiler. La utilización de estos circuitos en baja potencia y alta frecuencia esta dada por las exigencias y aplicaciones actuales que la electrónica contemporánea necesita. Además se presentan las nuevas tecnologías que son el FinFET y el TFET, las cuales pueden satisfacer estas demandas para el funcionamiento de los rectificadores de onda completa que antiguas tecnologías como CMOS no pueden lograr.

El trabajo presenta las etapas de investigación de las nuevas tecnologías propuestas, desarrollo, implementación y simulación en el software para compararlas con las tecnologías existentes siguiendo el mismo proceso de etapas redactadas con anterioridad. Los resultados de las simulaciones presentan un correcto y optimo funcionamiento en los circuitos de rectificadores de onda completa por parte del TFET y FinFET en relación a la CMOS. De igual forma, se describen las ventajas de la implementación de estas nuevas tecnologías en estos circuitos rectificadores como es el caso de una mejor respuesta a una señal de entrada de baja potencia y alta frecuencia, con parámetros cuantitativos que son el factor del valor medio, voltaje de rizado y el factor de rizado de la onda rectificada de salida.

**Palabras clave:** Alta frecuencia, baja potencia, CMOS, FinFet, TFET, factor del valor medio, voltaje de rizado, factor de rizado.

## ABSTRACT

The present project proposes the development of new technologies in the use of basic circuits such as full wave rectifiers in low power and high frequency, as well as their subsequent implementation and simulation in the Custom-Compiler software. The use of these circuits in low power and high frequency is given by the demands and current applications that contemporary electronic needs. In addition, the new technologies that are FinFET and TFET are presented, which can satisfy these demands for the operation of full wave rectifiers that old technologies such as CMOS can not achieve.

The project presents the research stages of the proposed new technologies, development, implementation and simulation in the software to compare them with the existing technologies following the same process of stages previously written. The results of the simulations present a correct and optimal operation in the circuits of full wave rectifiers by the TFET and FinFET in relation to the CMOS. Similarly, the advantages of the implementation of these new technologies in these rectifier circuits are described, such as the case of a better response to an input signal of low power and high frequency, with quantitative parameters that are the average value factor, ripple voltage and the ripple factor of the output rectified wave.

**Key words:** High frequency, low power, CMOS, FinFet, TFET, average value factor, ripple voltage, ripple factor.

# CONTENIDO

<b>DERECHOS DE AUTOR .....</b>	<b>3</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>4</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>8</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>12</b>
<b>Tipos de rectificadores con transistores de onda completa (A, B y C).....</b>	<b>12</b>
<b>Parámetros de medición.....</b>	<b>14</b>
<b>Simulaciones propuestas.....</b>	<b>15</b>
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>17</b>
<b>Resultados con el porcentaje del valor medio del voltaje rectificado de salida.....</b>	<b>17</b>
<b>Resultados con el factor de rizado .....</b>	<b>23</b>
<b>DISCUSIONES Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>30</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>32</b>
<b>Anexo A: Layouts .....</b>	<b>33</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Circuito rectificador de onda completa tipo A topología convencional.....	12
<b>Figura 2.</b> Circuito rectificador de onda completa tipo B topología de acoplamiento cruzado de compuerta.....	13
<b>Figura 3.</b> Circuito rectificador de onda completa tipo C topología completamente acoplada.....	14
<b>Figura 4.</b> Factor del valor medio del voltaje de salida vs Frecuencia en un circuito rectificador de onda completa tipo A a 1.2 V y TFET a 0.7 V.....	17
<b>Figura 5.</b> Factor del valor medio del voltaje de salida vs Frecuencia en un circuito rectificador de onda completa tipo B a 1.2 V y TFET a 0.7 V.....	18
<b>Figura 6.</b> Factor del valor medio del voltaje de salida vs Frecuencia en un circuito rectificador de onda completa tipo C a 1.2 V y TFET a 0.7 V.....	18
<b>Figura 7.</b> Factor del valor medio del voltaje de salida vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo A a 1 MHz.....	19
<b>Figura 8.</b> Factor del valor medio del voltaje de salida vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo B a 1 MHz.....	20
<b>Figura 9.</b> Factor del valor medio del voltaje de salida vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo C a 1 MHz.....	20
<b>Figura 10.</b> Factor del valor medio del voltaje de salida vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo A a 2.45 GHz.....	21
<b>Figura 11.</b> Factor del valor medio del voltaje de salida vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo B a 2.45 GHz.....	22



<b>Figura 12.</b> Factor del valor medio del voltaje de salida vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo C a 2.45 GHz.....	22
<b>Figura 13.</b> Factor de rizado vs Frecuencia en un circuito rectificador de onda completa tipo A a 1.2 V y TFET a 0.7 V.....	23
<b>Figura 14.</b> Factor de rizado vs Frecuencia en un circuito rectificador de onda completa tipo B a 1.2 V y TFET a 0.7 V.....	24
<b>Figura 15.</b> Factor de rizado vs Frecuencia en un circuito rectificador de onda completa tipo C a 1.2 V y TFET a 0.7 V.....	24
<b>Figura 16.</b> Factor de rizado vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo A a 1 MHz.....	25
<b>Figura 17.</b> Factor de rizado vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo B a 1 MHz.....	26
<b>Figura 18.</b> Factor de rizado vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo C a 1 MHz.....	26
<b>Figura 19.</b> Factor de rizado vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo A a 2.45 GHz.....	27
<b>Figura 20.</b> Factor de rizado vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo B a 2.45 GHz.....	28
<b>Figura 21.</b> Factor de rizado vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo C a 2.45 GHz.....	28

# INTRODUCCIÓN

El rectificador es uno de los circuitos importantes en un convertidor de potencia, se usa ampliamente en varias aplicaciones. Transforma la energía de una fuente de corriente alterna en corriente continua. El circuito rectificador básico consta de alimentación de CA y cuatro diodos para rectificar la salida a CC (Wahab et al., 2016). Sin un rectificador todos los circuitos de electrónica digital no existirían, debido a que los mismos utilizan corriente continua; es decir, la electrónica moderna no hubiera hecho su auge sin estos circuitos rectificadores.

Las topologías clásicas del circuito rectificador de onda completa utilizan diodos para la conmutación. Las caídas de voltaje directo son altas, típicamente 0.7 V, en relación con el bajo voltaje de entrada dan como resultado una relación de conversión de voltaje disminuida. La solución a esta problemática de caída de voltaje es utilizar transistores que reemplacen a los diodos en procesos CMOS estándar, lo que hace posible que los rectificadores CMOS o con otros tipos de transistores de bajo voltaje de entrada estén completamente integrados (Yeo et al., 2015).

En tiempos modernos se desea un rectificador con una mejor eficiencia de conversión de energía en un amplio rango de voltaje de entrada y poder operar a altas frecuencias como a 2.45 GHz, que es la banda de frecuencia para uso industrial, científico y médico (Lau et al., 2016). La creciente necesidad de una electrónica de baja potencia requiere conceptos de dispositivos alternativos, basados en diferentes principios operativos y materiales semiconductores con respecto a la tecnología CMOS convencional (Strangio et al., 2016). Las aplicaciones electrónicas de baja potencia se han incrementado últimamente, el Tunnel-FET (TFET) y FinFET están jugando un papel importante como un nuevo concepto de dispositivos, que ofrece un mejor equilibrio del rendimiento que los CMOS convencionales. En los CMOS donde el voltaje de umbral está teóricamente limitada al límite de 60

mV/década a temperatura ambiente, los TFET y FinFET pueden ofrecer un encendido más pronunciado (Lanuzza et al., 2015).

El CMOS es un dispositivo n-p-n y p-n-p cerrado, donde un sustrato de tipo p aísla los dos pozos de fuente y drenaje de tipo n e inversamente para el p-n-p. La mayoría de los portadores en la superficie del sustrato en contacto con el óxido de la compuerta pueden invertirse eventualmente por medio del voltaje de la compuerta a la fuente aplicada. El canal de electrones resultante que une la fuente al drenaje, permite que una corriente de deriva fluya entre el drenaje y la fuente cuando se aplica un voltaje de drenaje a la fuente (Strangio, 2014). Esta tecnología posee layouts hechos para los rectificadores onda completa tanto para 90 nm como para 32 nm como se puede observar en ANEXO A: LAYOUTS.

El FinFET es un transistor que posee un canal en forma de una aleta vertical delgada con la compuerta completamente envuelta alrededor del canal formado entre la fuente y el drenaje. La compuerta del FinFET se puede considerar como una compuerta múltiple con varios Fines denominados así que rodea el canal delgado. Dicha compuerta múltiple puede agotar completamente el canal de portadores, esto da como resultado un mejor control del flujo de electrones en el canal de conducción (Kawa, 2018).

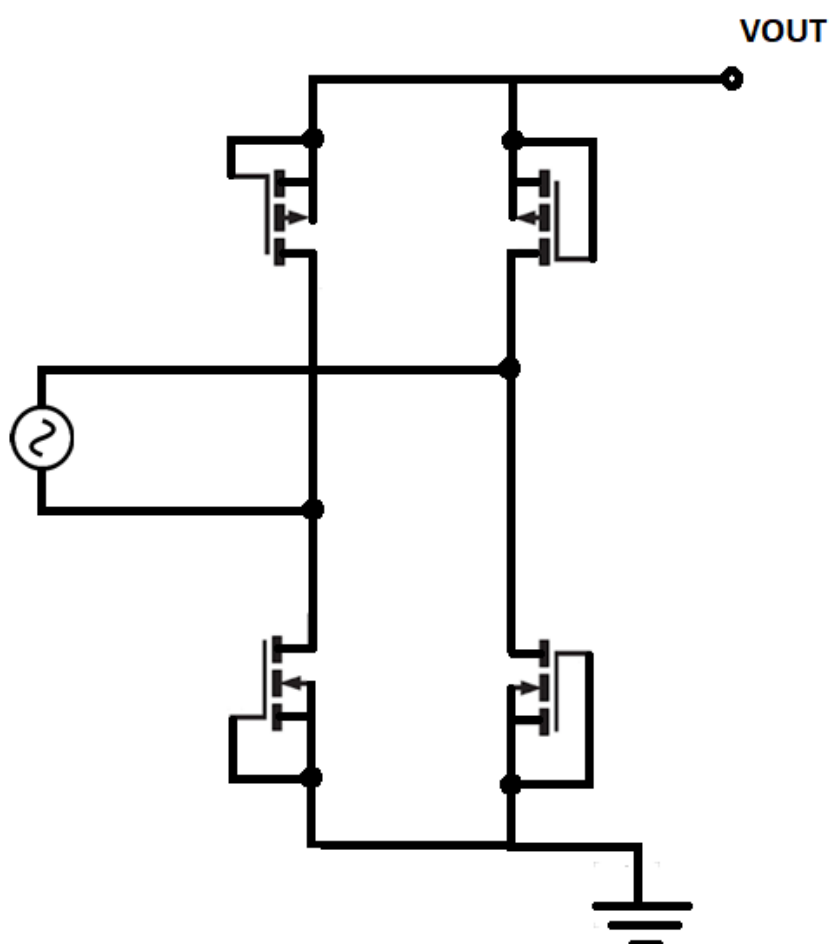
El transistor de efecto de campo BtBT llamado Tunnel-FET o TFET, es esencialmente un diodo p-i-n cerrado; es decir, fuente-canal-drenaje respectivamente que opera en una condición de polarización inversa. En VGS bajo, la barrera BtBT representada por el diodo p-i-n evita que fluya una corriente de drenaje a fuente significativa. La conducción, que se basa en el mecanismo BtBT, se habilita cuando un VGS positivo empuja la banda de conducción de la región del canal intrínseco o ligeramente dopado por debajo de la banda de valencia de la fuente con dopaje p. En conclusión, la modulación de la barrera BtBT mediante la tensión de compuerta aplicada modifica la probabilidad de tunelización de los electrones (Strangio, 2014).

## METODOLOGÍA

### Tipos de rectificadores con transistores de onda completa (A, B y C)

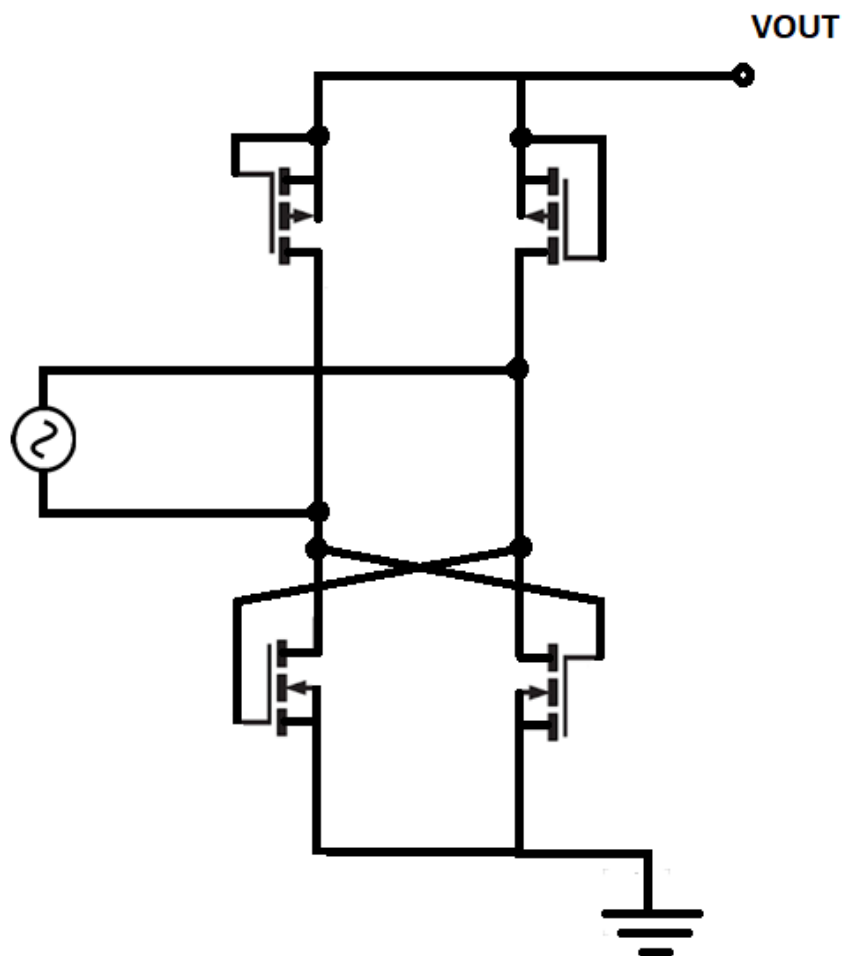
Existen tres topologías de circuitos rectificadores de onda completa que utilizan transistores para conmutar la señal de entrada.

Los rectificadores de onda completa convencionales o topología A usan cuatro interruptores para crear dos rutas de conducción de manera que una entrada de corriente alterna produce una salida de corriente continua (Yeo et al., 2015).



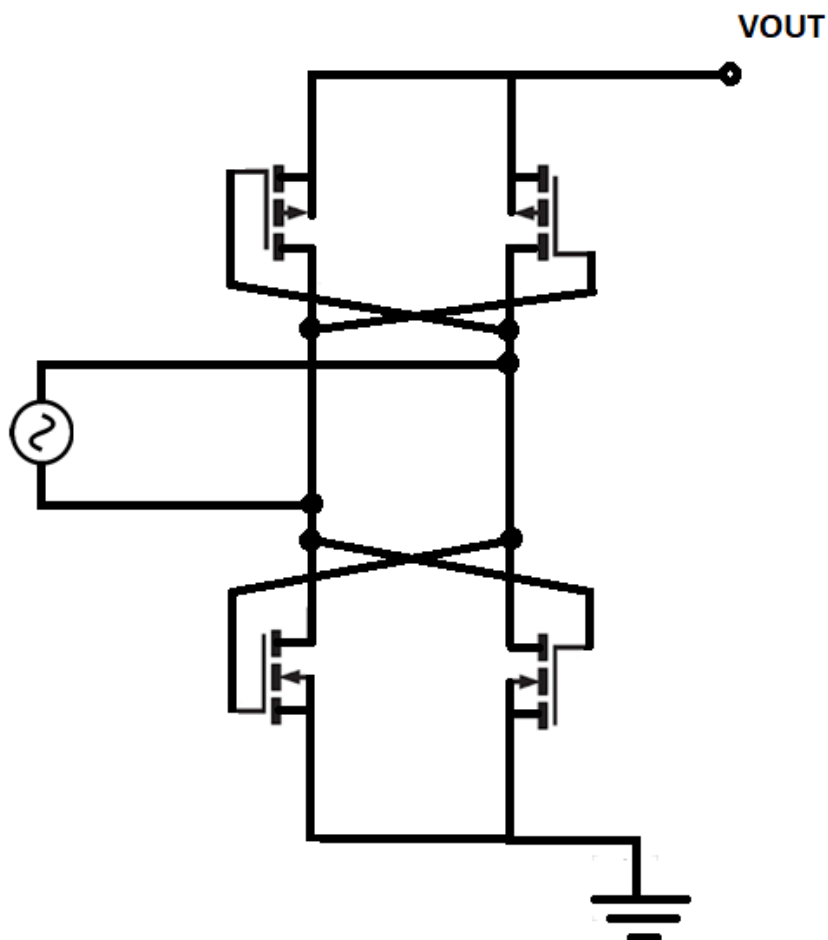
*Figura 1.* Circuito rectificador de onda completa tipo A topología convencional

En la topología B de un rectificador de onda completa hay dos transistores con sus compuertas cruzadas; es decir, una conexión de acoplamiento cruzado de compuerta (Yeo et al., 2015).



**Figura 2.** Circuito rectificador de onda completa tipo B topología de acoplamiento cruzado de compuerta

Con la topología C para reducir las caídas del voltaje de umbral de todos los transistores en la trayectoria de conducción, la topología anterior se mejora con una topología de acoplamiento cruzado completo (Yeo et al., 2015).



**Figura 3.** Circuito rectificador de onda completa tipo C topología completamente acoplada

### Parámetros de medición

Para poder diferenciar y comparar el funcionamiento de las tecnologías propuestas con anterioridad en las topologías de los circuitos rectificadores de onda completa, se recurrirá a tres parámetros en específico los cuales son los siguientes:

El factor del valor medio o valor DC del voltaje rectificado de salida es el resultado del área bajo la curva de la sinusoidal rectificada dividido para el voltaje máximo de entrada de la señal AC como la siguiente ecuación lo presenta (Miyara, 2002):

$$FV_m = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T V_{out}(t) dt}{V_{\max-in}} \quad (1.1)$$

El valor para un rectificador de onda completa ideal del porcentaje del valor medio de la señal de salida es  $0.636$  o  $V_o/2\pi$  (Miyara, 2002).

El voltaje de rizado es la diferencia entre el voltaje máximo y el voltaje mínimo de la onda rectificadora de salida (Miyara, 2002):

$$V_{rizado} = V_{max-out} - V_{min-out} \quad (1.2)$$

Para un rectificador ideal el voltaje de rizado es el valor del voltaje máximo positivo de la señal de entrada (Miyara, 2002).

Se especifica al factor de rizado como la relación porcentual entre el voltaje de rizado y el valor máximo positivo otorgado por la fuente conectada al rectificador (Miyara, 2002):

$$F_{rizado} = \frac{V_{rizado}}{V_{m\acute{a}x-in}} \times 100\% \quad (1.3)$$

El factor de rizado ideal para un rectificador funcional es el 100% (Miyara, 2002).

## **Simulaciones propuestas**

Primero se realiza las simulaciones de los tipos de rectificadores de onda completa (A, B y C) con las distintas tecnologías propuestas tanto CMOS (90 nm y 32 nm) y FinFET a 1.2 V como TFET a 0.7 V, variando la frecuencia de la fuente de 1 KHz a 3 GHz para encontrar el factor del valor medio del voltaje de salida para cada tecnología.

Después se procede con las siguientes simulaciones al igual de los tipos de rectificadores de onda completa (A, B y C) implementados con las distintas tecnologías propuestas: CMOS (90 nm y 32 nm), FinFET y TFET a 1 MHz y 2.45 GHz. En estas simulaciones se varían el voltaje aplicado de la fuente de 0.1 V a 1.2 V en pasos de 0.1 V, excepto el TFET que funciona hasta 0.8 V, y se mide el factor del valor medio del voltaje de salida para cada tecnología.

Para obtener tanto el voltaje de rizado para el factor de rizado de cada tecnología propuesta tanto CMOS (90 nm y 32 nm) y FinFET a 1.2 V como TFET a 0.7 V de los tipos de rectificadores de onda completa (A, B y C), se variará la frecuencia de la fuente de 1 KHz a 3 GHz.

Finalmente, se simula los tipos de rectificadores de onda completa (A, B y C) implementados con las distintas tecnologías propuestas, las cuales son: CMOS (90 nm y 32 nm), FinFET y TFET a 1 MHz y 2.45 GHz. Y se variará el voltaje aplicado de la fuente de 0.1 V a 1.2 V en pasos de 0.1 V, el TFET solo hasta 0.8 V, midiendo así el voltaje de rizado para el factor de rizado de cada tecnología.

Estas simulaciones se realizaron con las siguientes medidas del ancho, largo, fines y fets de las tecnologías:

Para el el CMOS de 90 nm el ancho es de 1  $\mu\text{m}$  y el largo del canal es de 0.1  $\mu\text{m}$ , en cambio para el CMOS de 32 nm tenemos que el ancho es de 0.1  $\mu\text{m}$  y el largo es de 0.03  $\mu\text{m}$ .

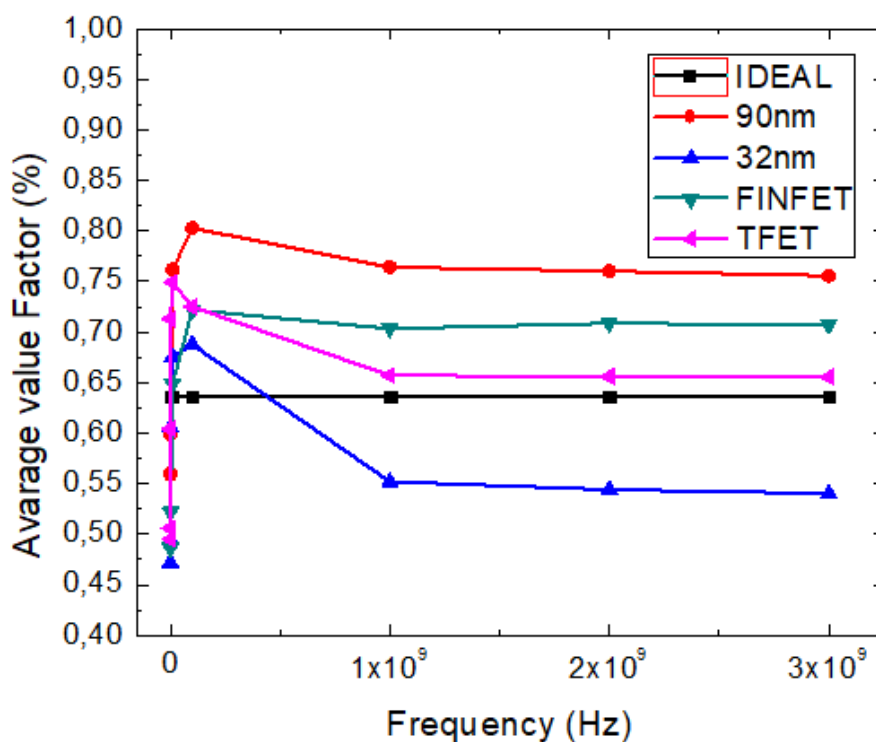
Para finalizar el FinFET se tiene que solo 1 FIN con un largo de 0.14  $\mu\text{m}$  y para el TFET será un solo FET.



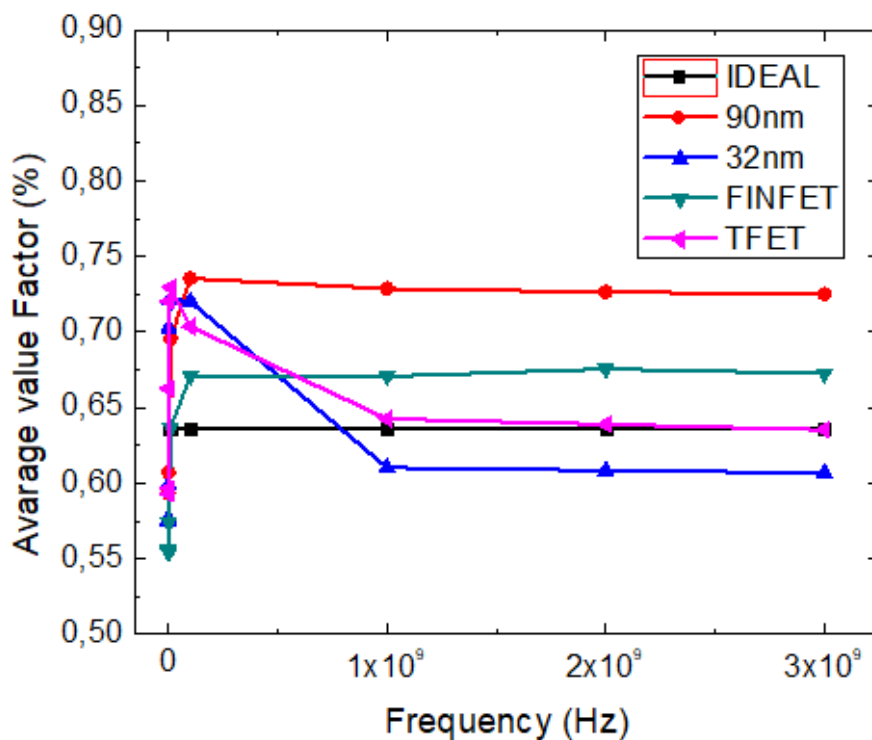
## RESULTADOS

### Resultados con el porcentaje del valor medio del voltaje rectificado de salida

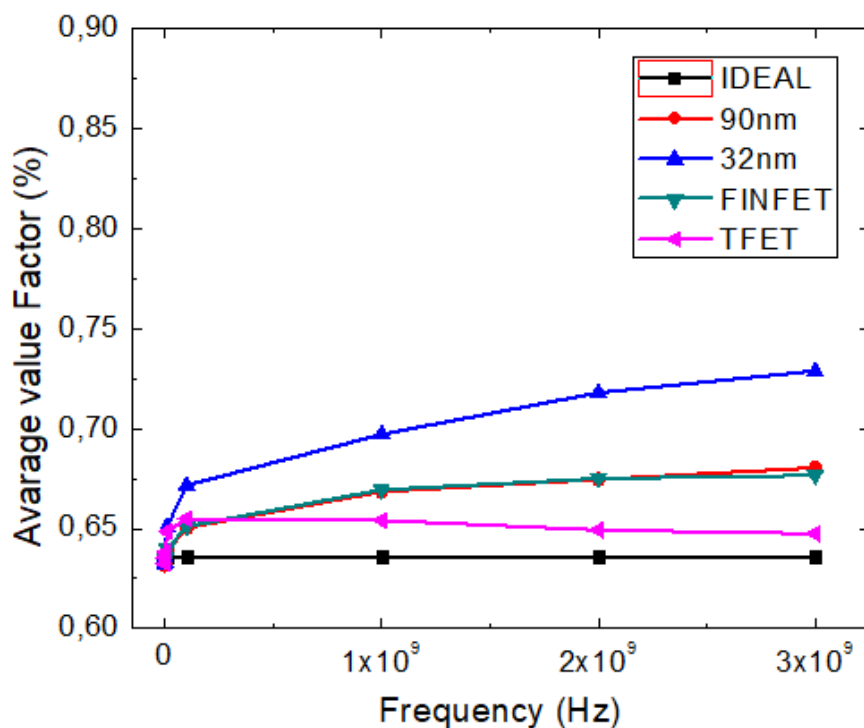
En las siguientes gráficas se observan las curvas del porcentaje del valor medio para todas las tecnologías tanto en la topología A Figura 4, en la topología B Figura 5 y en la topología C Figura 6; variando la frecuencia de la fuente AC a 1.2 V para todas las tecnologías excepto TFET a 0.7 V:



**Figura 4.** Factor del valor medio del voltaje de salida vs Frecuencia en un circuito rectificador de onda completa tipo A a 1.2 V y TFET a 0.7 V



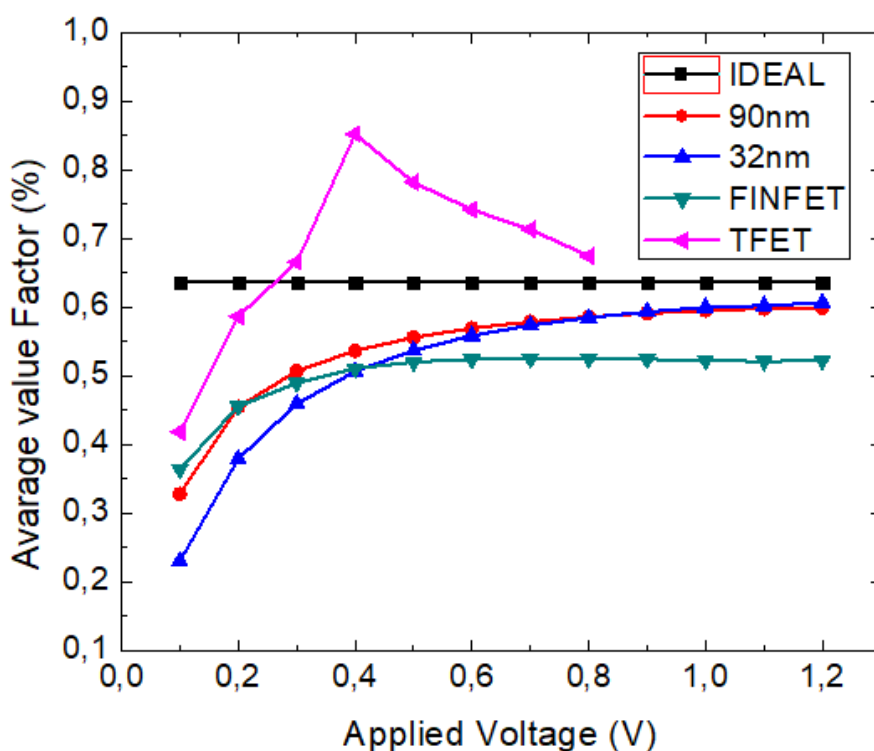
**Figura 5.** Factor del valor medio del voltaje de salida vs Frecuencia en un circuito rectificador de onda completa tipo B a 1.2 V y TFET a 0.7 V



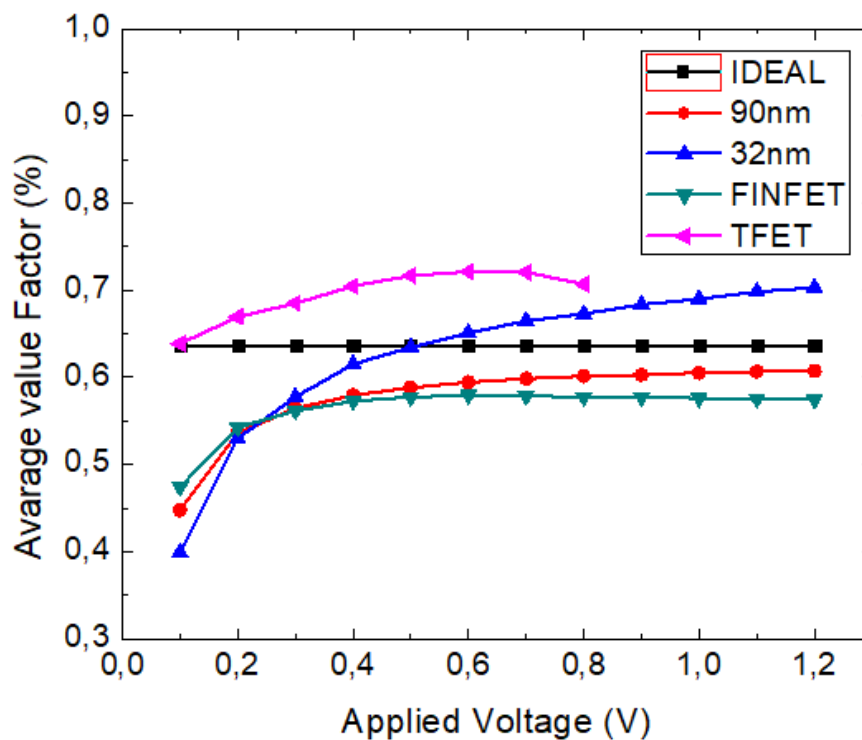
**Figura 6.** Factor del valor medio del voltaje de salida vs Frecuencia en un circuito rectificador de onda completa tipo C a 1.2 V y TFET a 0.7 V

Primero, se logro apreciar que en las graficas de las curvas del porcentaje del valor medio vs frecuencia, las cuales son: la Figura 4 para la topología A la tecnología que más se acerca al comportamiento de un rectificador ideal es el Tunnel-FET y este comportamiento sucede de similar forma para las Figuras 5 y 6 que son la topologías B y C respectivamente.

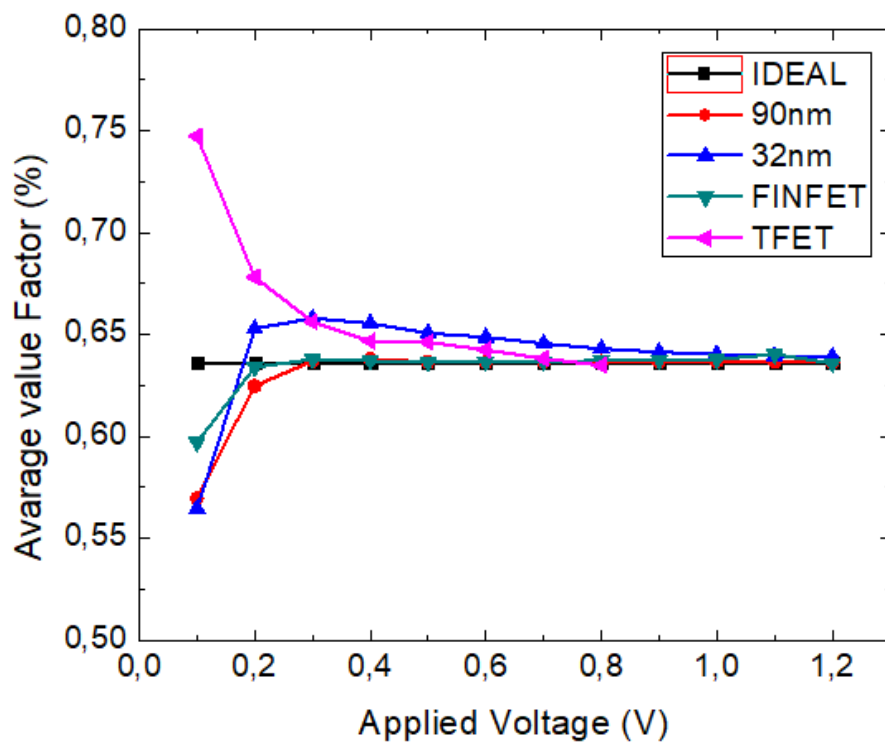
A continuación se presentan las curvas del porcentaje del valor medio para todas las tecnologías propuestas para la topología A Figura 7, la topología B Figura 8 y la topología C Figura 9; variando el voltaje de la fuente a 1 MHz constante:



**Figura 7.** Factor del valor medio del voltaje de salida vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo A a 1 MHz



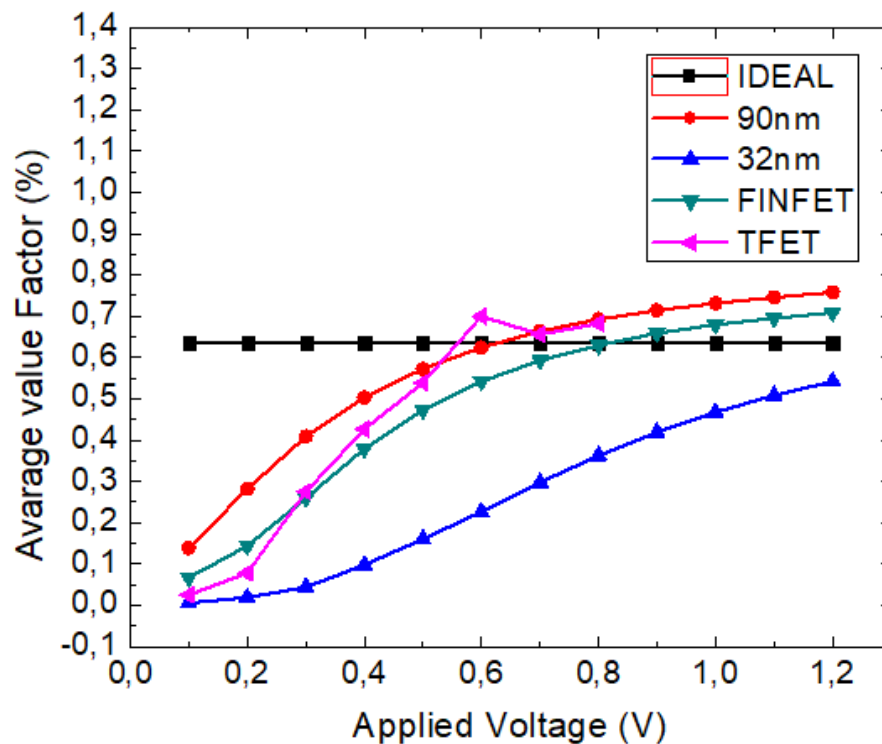
**Figura 8.** Factor del valor medio del voltaje de salida vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo B a 1 MHz



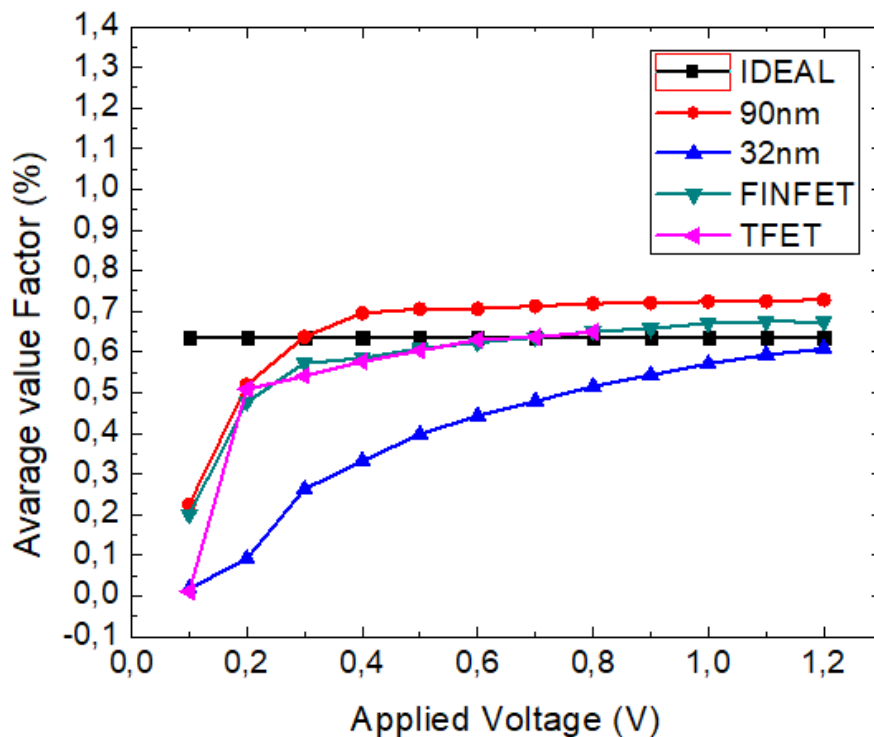
**Figura 9.** Factor del valor medio del voltaje de salida vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo C a 1 MHz

En seguida, se aprecia que en las graficas del porcentaje del valor medio vs voltaje aplicado a 1 MHz; la tecnología con funcionamiento similar para las topologías A y B, Figuras 7 y 8 respectivamente, es el Tunnel-FET y para la topología C Figura 9 es el FinFET.

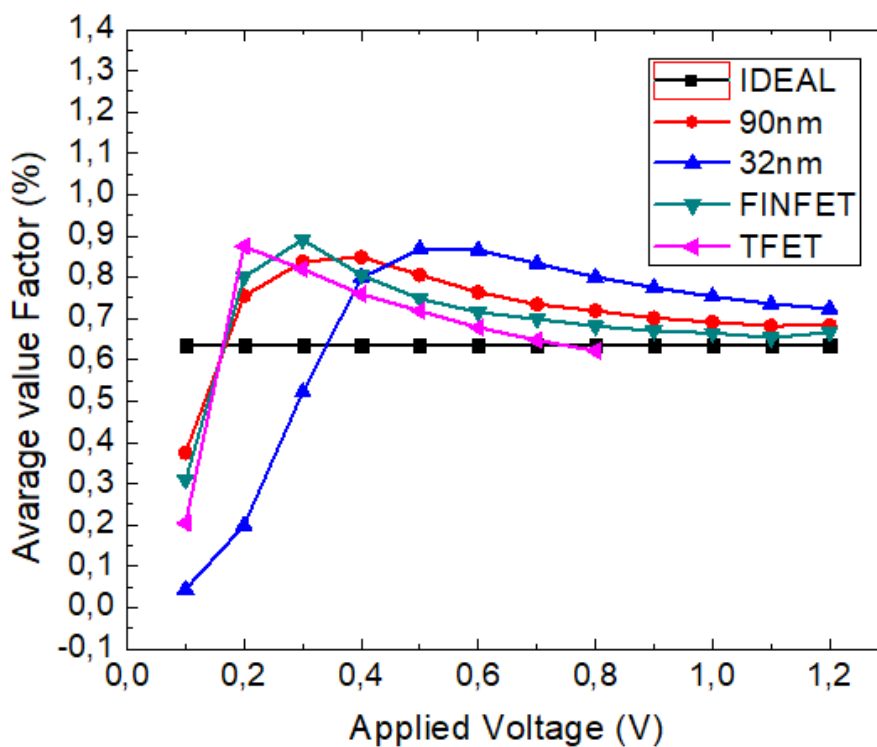
Se presentan las curvas del porcentaje del valor medio para las tecnologías propuestas con anterioridad para las topologías: A Figura 10, B Figura 11 y C Figura 12; variando el voltaje de la fuente a 2.45 GHz constante:



**Figura 10.** Factor del valor medio del voltaje de salida vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo A a 2.45 GHz



**Figura 11.** Factor del valor medio del voltaje de salida vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo B a 2.45 GHz

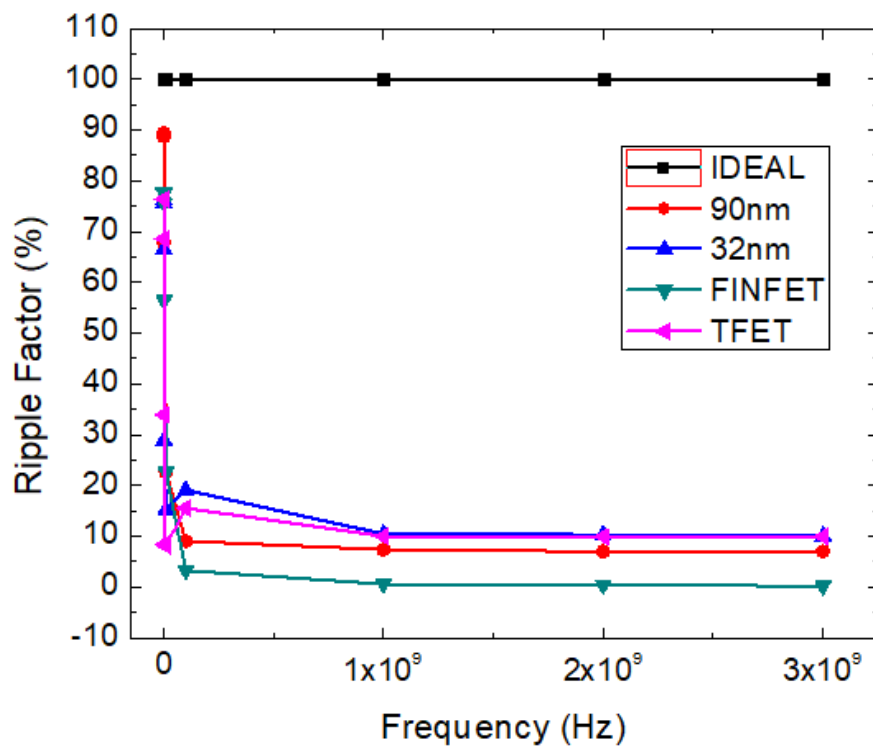


**Figura 12.** Factor del valor medio del voltaje de salida vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo C a 2.45 GHz

Brevemente, se puede observar en las graficas del porcentaje del valor medio vs voltaje aplicado a 2.45 GHz; el Tunnel-FET es la mejor opción de tecnología como rectificador ideal para las topologías A, B y C que son las Figuras 10, 11 y 12 respectivamente, también el FinFET es una buena opción para la topología B.

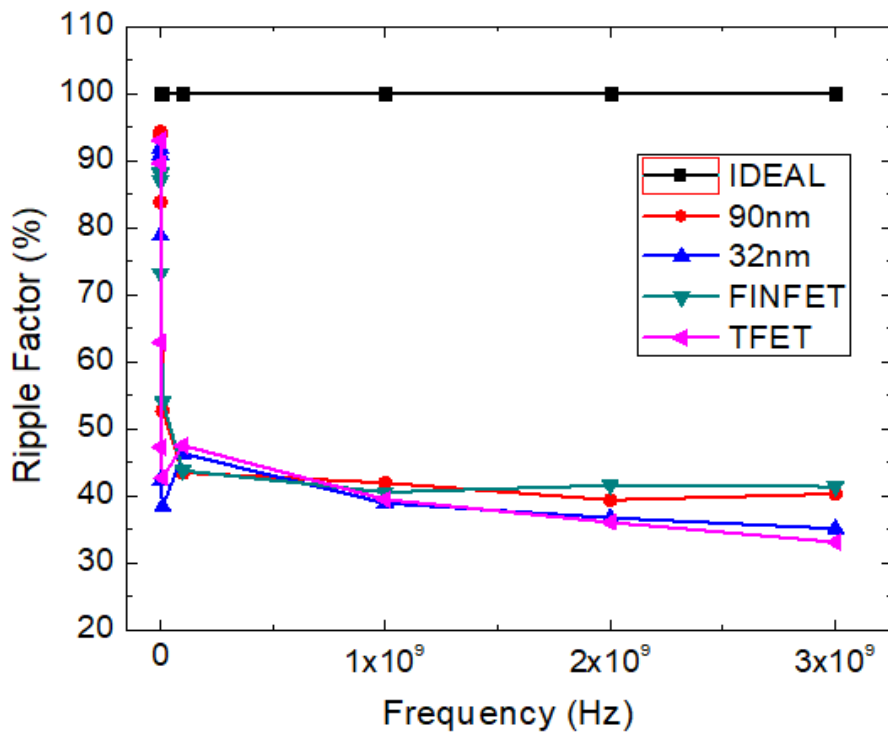
## Resultados con el factor de rizado

En las siguientes graficas se observa el factor de rizado para cada una de las tecnologías tanto en la topología A Figura 13, en la topología B Figura 14 y en la topología C Figura 15; variando la frecuencia de la fuente AC a 1.2 V para las tecnologías, excepto TFET a 0.7 V:

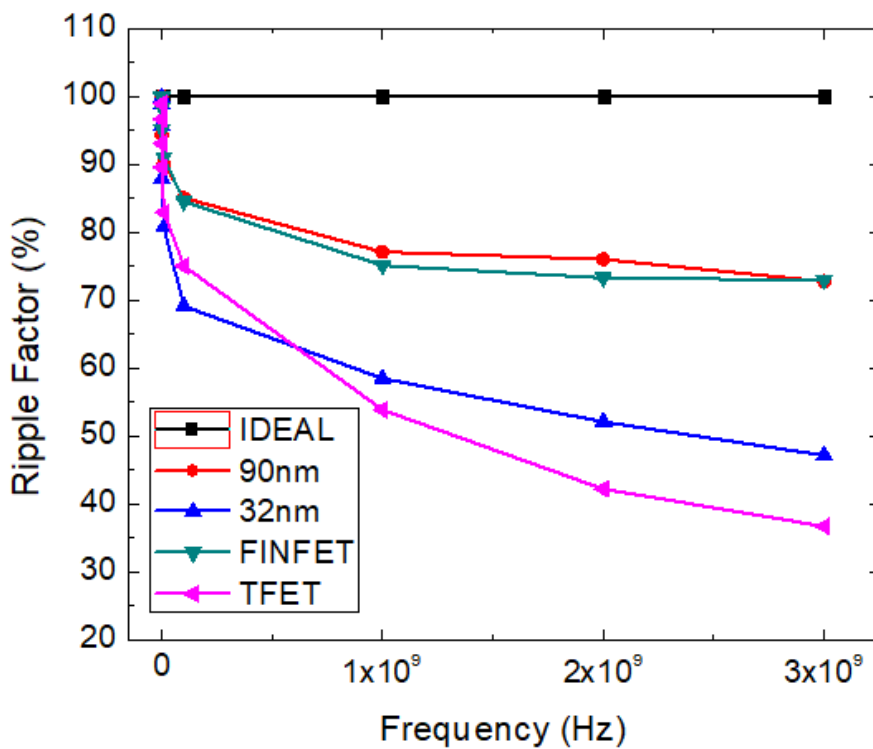


**Figura 13.** Factor de rizado vs Frecuencia en un circuito rectificador de onda completa tipo A

a 1.2 V y TFET a 0.7 V



**Figura 14.** Factor de rizado vs Frecuencia en un circuito rectificador de onda completa tipo B a 1.2 V y TFET a 0.7 V

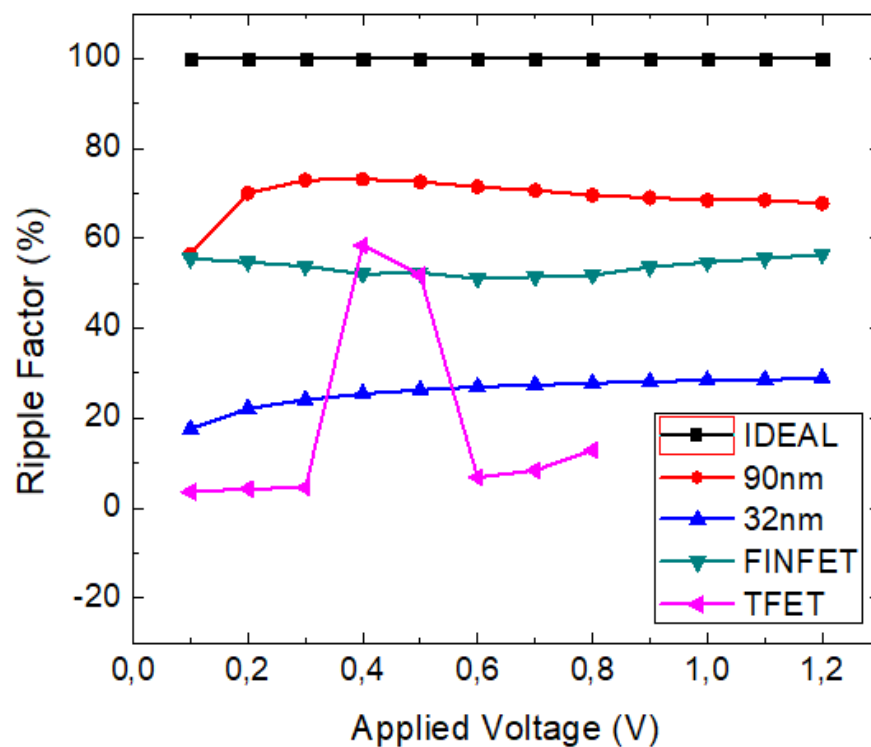


**Figura 15.** Factor de rizado vs Frecuencia en un circuito rectificador de onda completa tipo C a 1.2 V y TFET a 0.7 V

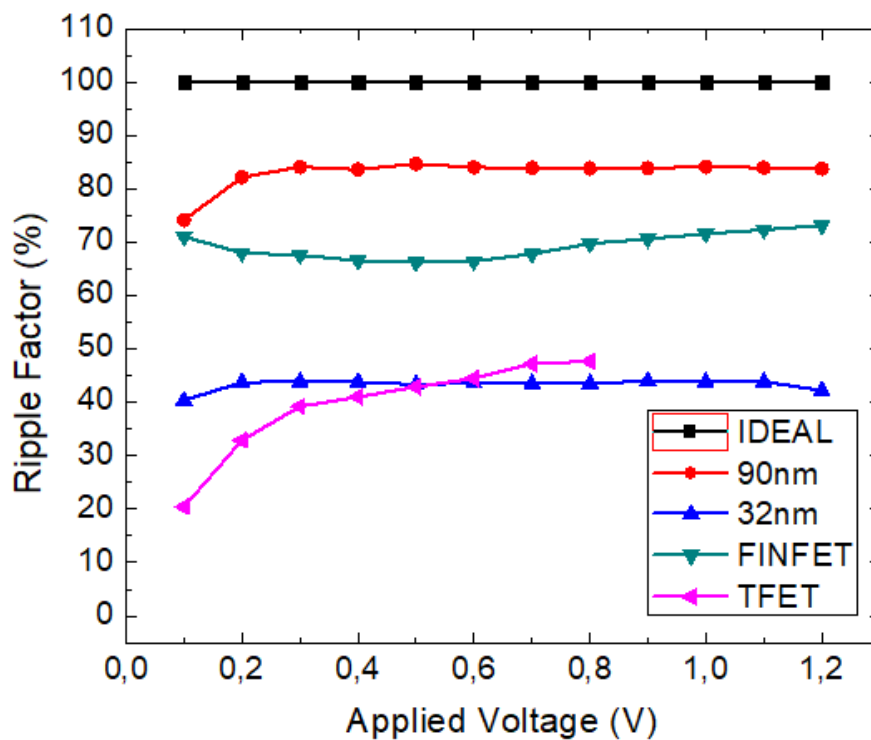


Se determina que para las gráficas de factor de rizado vs frecuencia; la topología A Figura 13 con el Tunnel-FET y CMOS de 32nm se logran un resultado ideal, para la topología B Figura 14 es con el FinFET y CMOS de 90nm, y la topología C Figura 15 se llega al resultado ideal con el FinFET y CMOS 90nm.

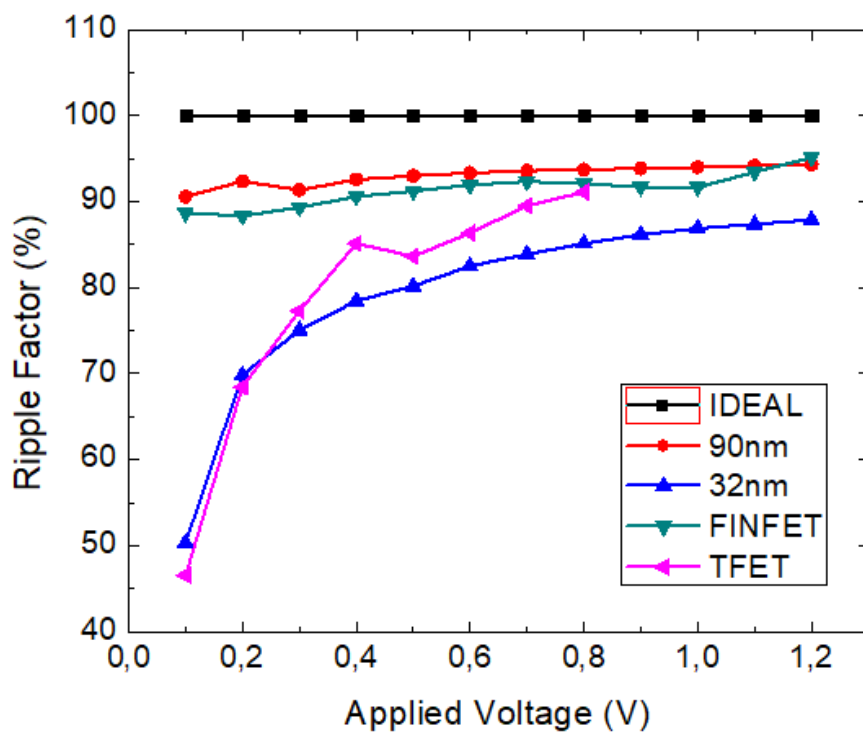
A continuación, se presentan las graficas del factor de rizado para todas las tecnologías propuestas topología A Figura 16, topología B Figura 17 y la topología C Figura 18; variando el voltaje de la fuente a 1 MHz constante:



**Figura 16.** Factor de rizado vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo A a 1 MHz



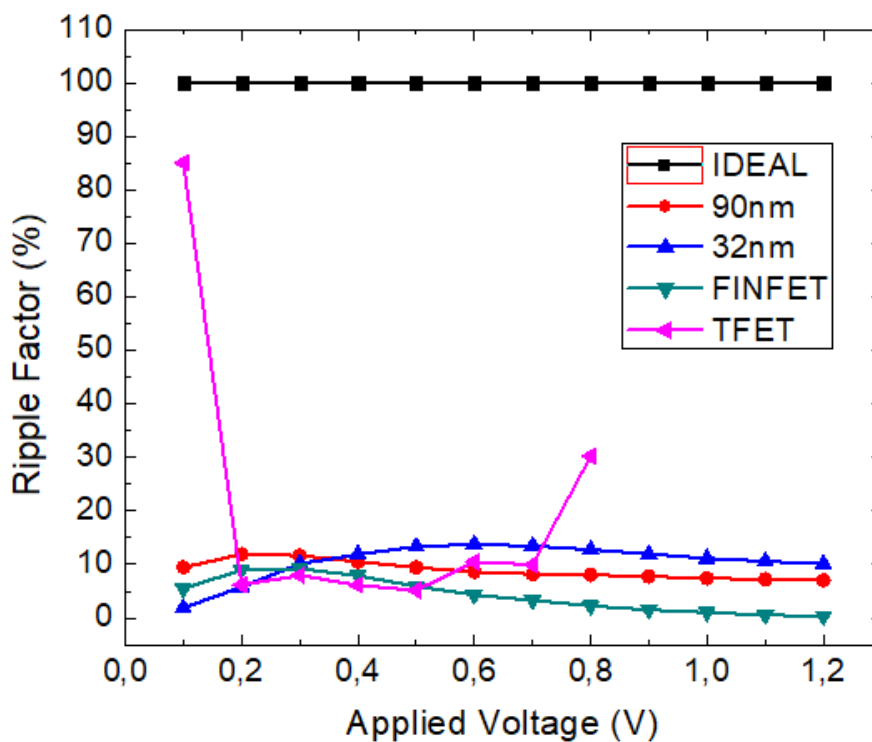
**Figura 17.** Factor de rizado vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo B a 1 MHz



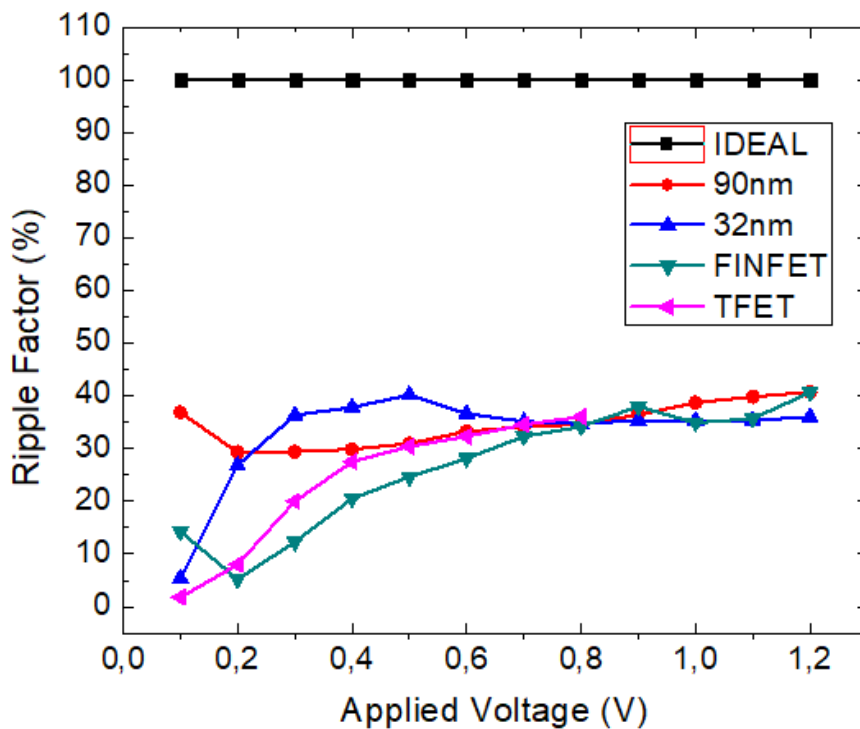
**Figura 18.** Factor de rizado vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo C a 1 MHz

Se analiza las gráficas de factor de rizado vs voltaje aplicado a 1 MHz que para las topologías A, B y C (Figura 16, 17 y 18) con el CMOS de 90nm se logra un resultado ideal.

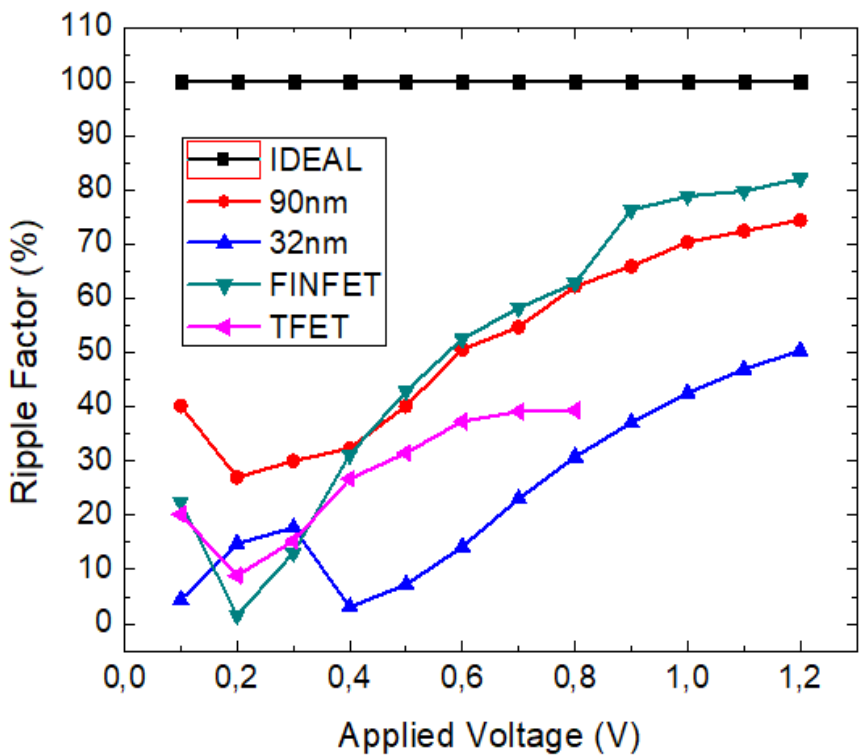
Se presentan las figuras del factor de rizado para las tecnologías propuestas con anterioridad para las topologías: A Figura 19, B Figura 20 y C Figura 21; variando el voltaje de la fuente a 2.45 GHz constante:



**Figura 19.** Factor de rizado vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo A a 2.45 GHz



**Figura 20.** Factor de rizado vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo B a 2.45 GHz



**Figura 21.** Factor de rizado vs Voltaje aplicado en un circuito rectificador de onda completa tipo C a 2.45 GHz

Finalmente, se aprecia en las graficas de factor de rizado vs voltaje aplicado a 2.45 GHz que para las topologías A, B y C (Figura 19, 20 y 21) con el CMOS de 90nm se logra un resultado ideal porque se mantiene constante en su resultado sin ningún cambio.

## DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

En el presente trabajo se logró con éxito el desarrollo de la implementación de nuevas tecnologías FinFET y TFET para aplicaciones de baja potencia y alta frecuencia como son los rectificadores de onda completa, también se comparo con éxito la gran diferencia que existe entre estas nuevas tecnologías con ya existentes como son los CMOS de 90nm y 32nm.

Las tecnologías con un funcionamiento de rectificador ideal son la FinFET y la Tunnel-FET en casi todas las graficas o figuras presentadas: factor del valor medio vs frecuencia, factor del valor medio vs voltaje aplicado a 1MHz, factor del valor medio vs voltaje aplicado a 2.45 GHz.

Se observa que para las gráficas del factor de rizado: factor de rizado vs frecuencia, factor de rizado vs voltaje aplicado a 1 MHz y factor de rizado vs voltaje aplicado a 2.45 GHz. Las nuevas tecnologías como el Tunnel-FET y FinFET no son muy aptas para un funcionamiento de rectificador de onda completa ideal y puro, pero sale un beneficio porque su comportamiento se asemeja a un rectificador más filtro siendo beneficioso para aplicaciones futuras, donde se podría controlar este comportamiento.

La topología con mejor funcionamiento similar a un rectificador ideal de onda completa es la topología C para todas las figuras y tablas presentadas con anterioridad.

La principal dificultad en el presente trabajo radica en el entendimiento de cómo funcionan las nuevas tecnologías y como las puedo aplicar para los circuitos de rectificadores de nueva onda. Se encontró un desafío al momento de realizar Layouts para las tecnologías existentes: CMOS 90nm y 32nm, ya que es difícil cumplir con todas las reglas de diseño para cada tecnología. Durante el proceso de desarrollo e investigación se observo que para un rectificador con transistores solo existen modelos o topologías que funcionen para rectificadores onda completa y no de media onda. Los cambios realizados provocaron una

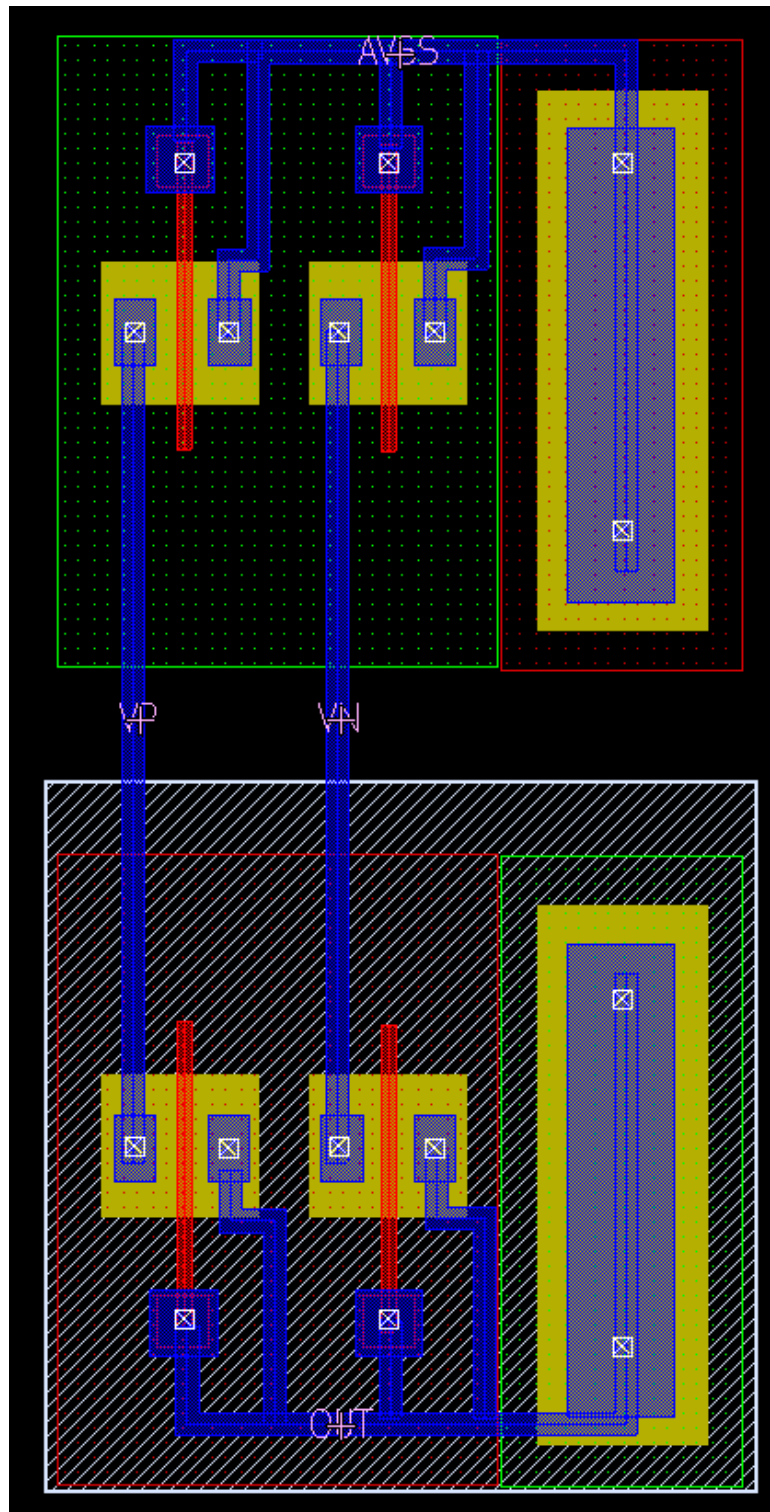
mínima reducción en la investigación, pero ayudo a aumentar el desarrollo de las nuevas tecnologías en los circuitos con topologías existentes.

## REFERENCIAS

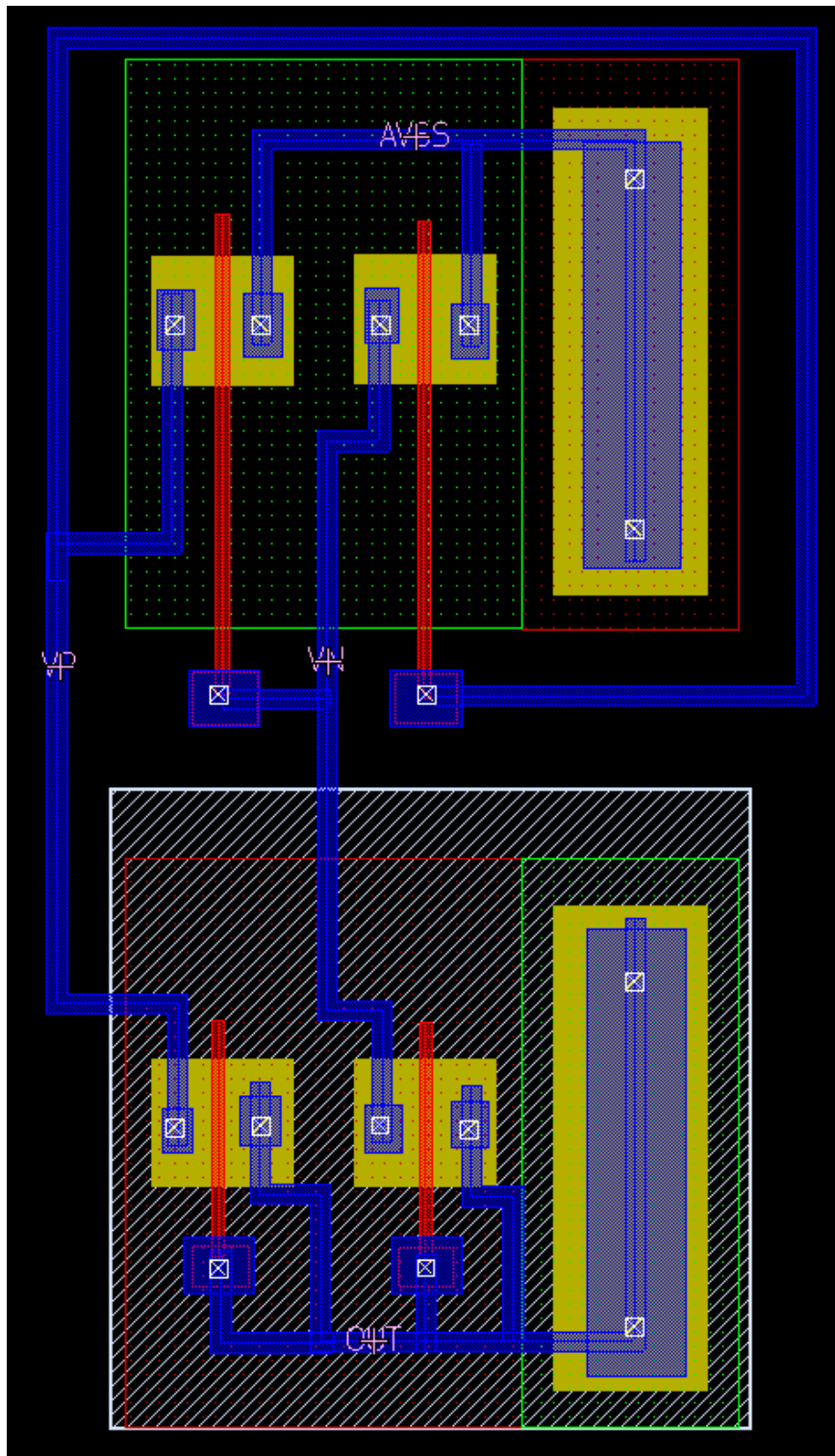
- Kawa, J. (2018). *FinFET Design, Manufacturability, Reliability*. Recuperado de: <https://www.synopsys.com/designware-ip/technical-bulletin/finfet-design.html>
- Lanuzza, M., Strangio, S., Crupi, F., Palestri, P., Esseni, D. (2015). *Mixed Tunnel-FET/MOSFET Level Shifters: A New Proposal to Extend the Tunnel-FET Application Domain*. Paper of IEEE, vol. 62, no. 12, pp. 3973-3979.
- Lau, W., Siek, L. (2016). *A 2.45 GHz CMOS Rectifier for RF Energy Harvesting*. Paper of IEEE, vol. 63, no. 4, pp. 178-186.
- Miyara, F. (2002). *Rectificación*. Argentina, Rosario: Universidad Nacional de Rosario.
- Strangio, S., Palestri, P., Lanuzza, M., Crupi, F., Esseni, D., Selmi, L. (2016). *Assessment of InAs/AlGaSb Tunnel-FET Virtual Technology Platform for Low-Power Digital Circuits*. Paper of IEEE, vol. 63, no. 7, pp. 178-186.
- Strangio, S. (2014). *Design of Tunnel-FET based circuits for ultra-low power applications*. Calabria: DIMES.
- Wahab, N., Salleh, M., Othman, N., Khalid, M., Hidayat, N. (2016). *High Efficiency CMOS Rectifier for Energy Harvesting*. Paper of IEEE, vol. 63, no. 4, pp. 123-127.
- Yeo, K., Ali, S., Susthitha, P., Islam, M., Islam, S. (2015). *Comparison of CMOS Rectifiers for Micropower Energy Harvesters*. Paper of IEEE, vol. 62, no. 7, pp. 419-423.



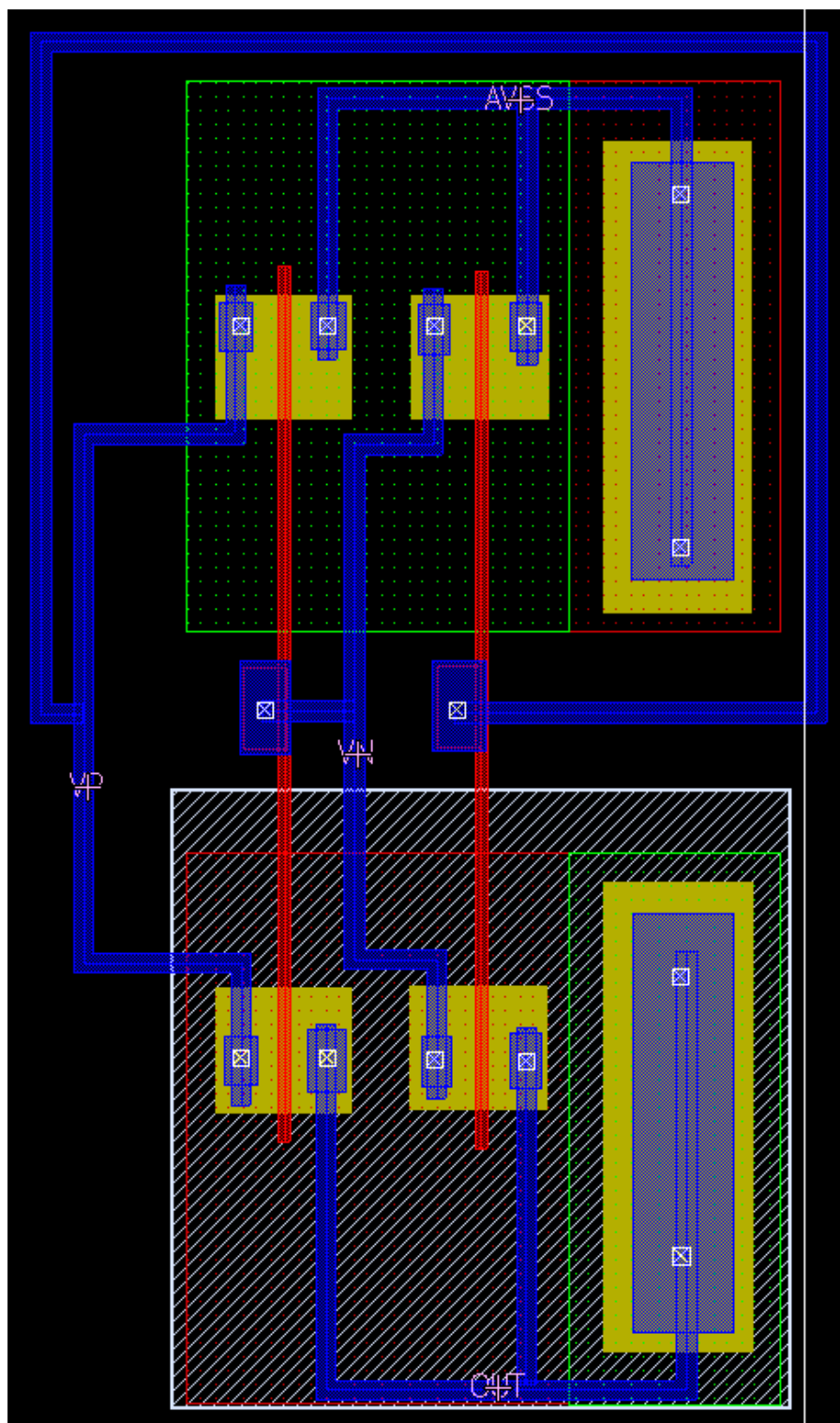
## ANEXO A: LAYOUTS



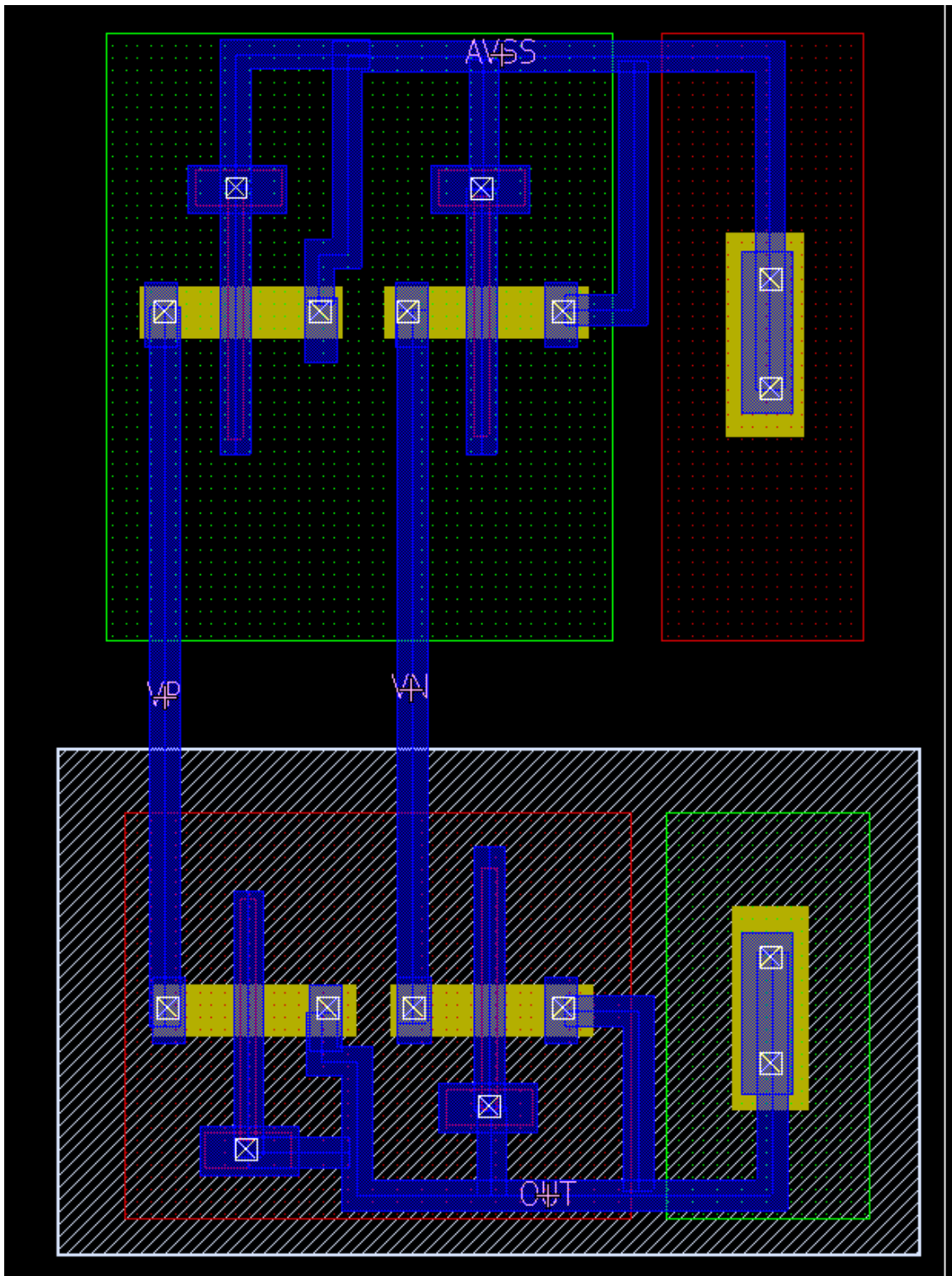
Anexo 1. Layout de rectificador de onda completa 90 nm topología A



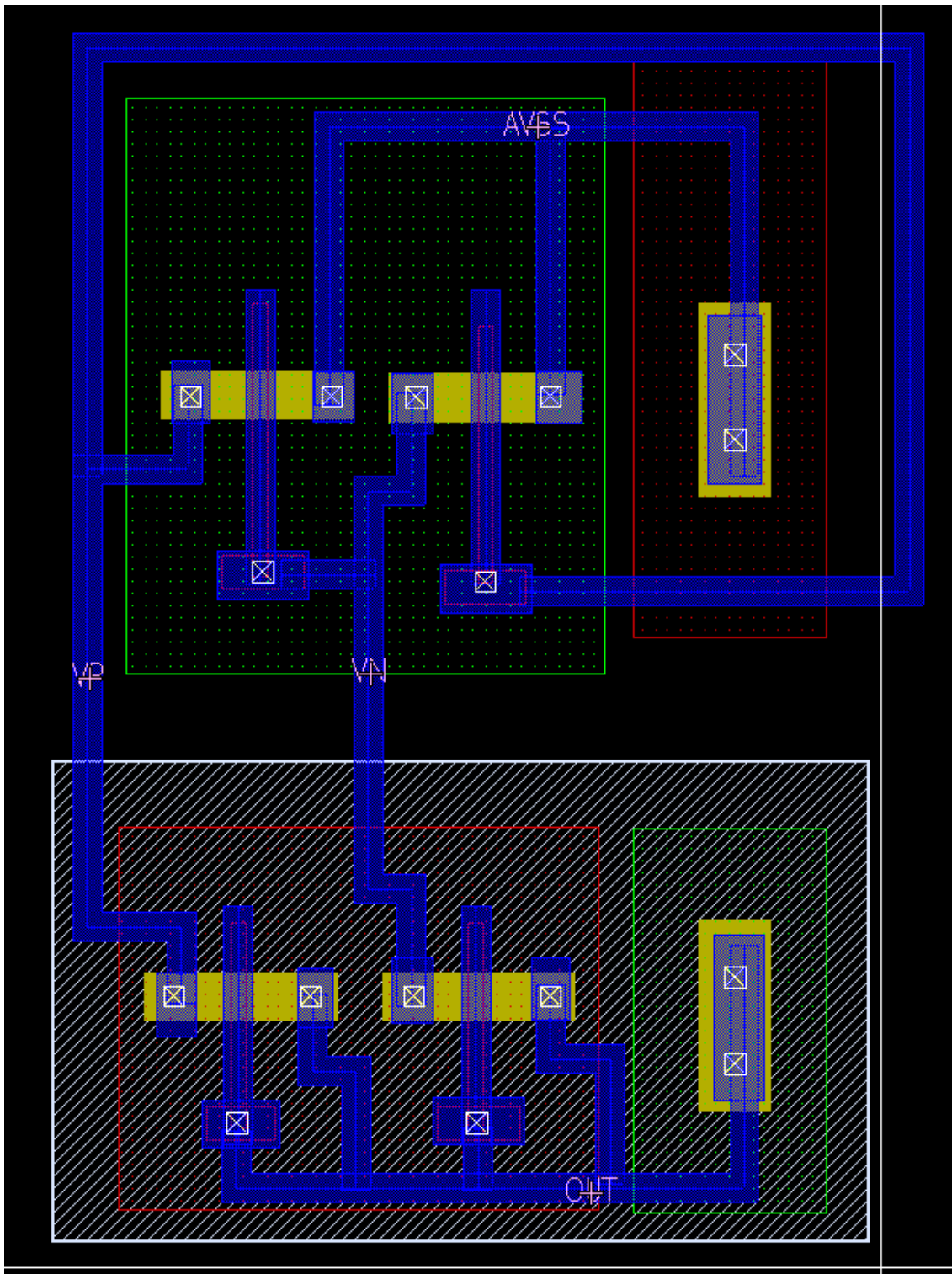
Anexo 2. Layout de rectificador de onda completa 90 nm topología B



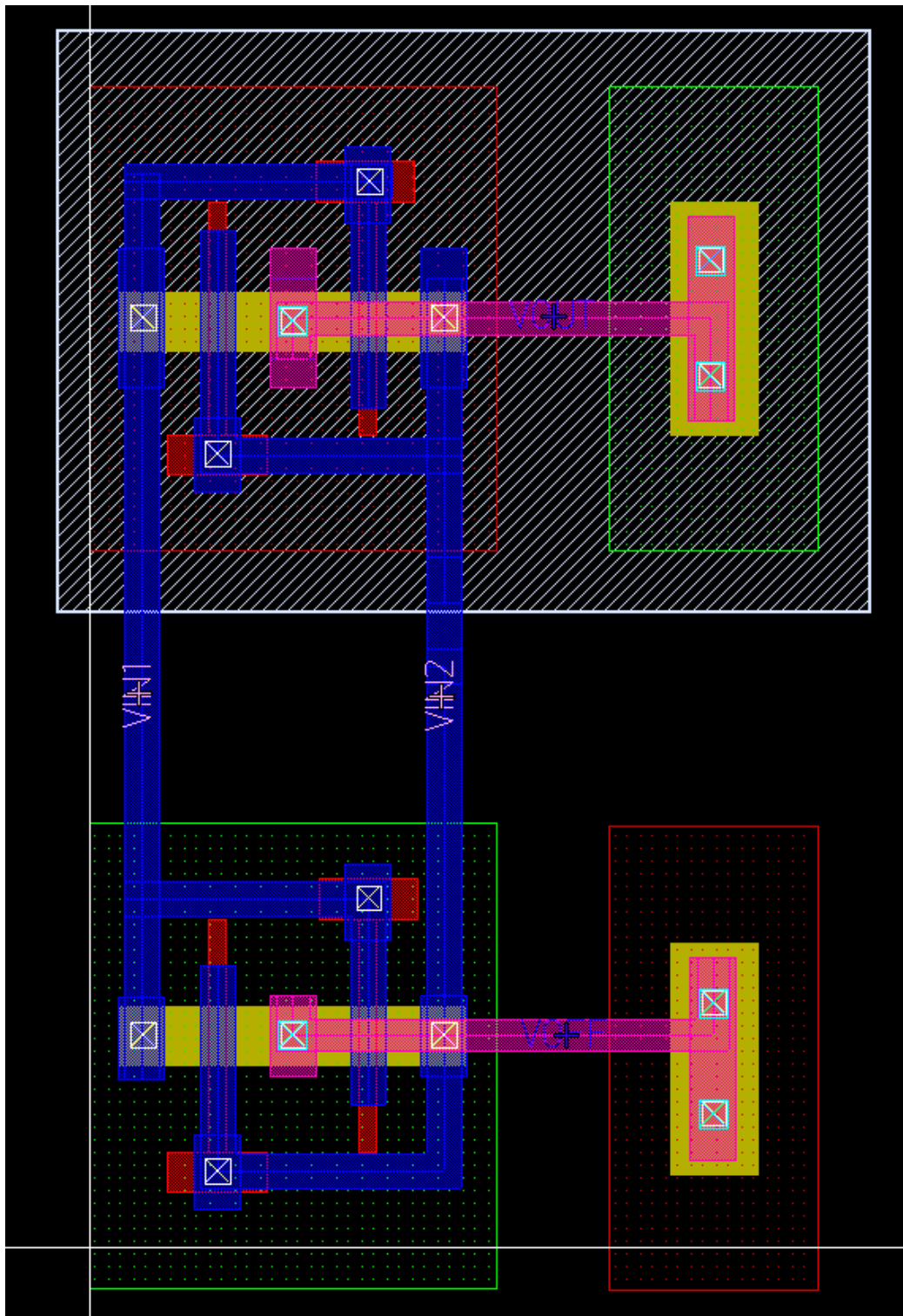
Anexo 3. Layout de rectificador de onda completa 90 nm topología C



Anexo 4. Layout de rectificador de onda completa 32 nm topología A



Anexo 5. Layout de rectificador de onda completa 32 nm topología B



Anexo 6. Layout de rectificador de onda completa 32 nm topología C