

Comparación de la eficiencia en términos de potencia y estabilidad de un preamplificador de señales con OFET y un preamplificador de señales con FET.

Yilmar Dario Benavides Jurado  
Carlos Mario Hidalgo Becerra

Institución Universitaria CESMAG  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Electrónica  
2021

Comparación de la eficiencia en términos de potencia y estabilidad de un preamplificador de señales con OFET y un preamplificador de señales con FET.

Yilmar Dario Benavides Jurado

Carlos Mario Hidalgo Becerra

Trabajo de grado presentada al comité curricular del programa de ingeniería electrónica.

Institución Universitaria CESMAG

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

2021

## Contenido

1	El problema de investigación.....	7
1.1	Objeto o tema de instigación .....	7
1.2	Línea de investigación .....	7
1.3	Descripción del problema.....	7
1.4	Formulación del problema.....	8
1.5	Objetivos.....	8
1.5.1	Objetivo general.....	8
1.5.2	Objetivos específicos. ....	8
1.6	Justificación.....	8
1.7	Viabilidad .....	9
1.8	Delimitación .....	9
2	Tópicos del marco teórico.....	10
2.1	Antecedentes.....	10
2.1.1	Ultrasensitive Multi-Functional Flexible Sensors Based on Organic Field-Effect Transistors with Polymer-Dispersed Liquid Crystal Sensing Layers .....	10
2.1.2	Modeling of fully printed organic field effect transistors for circuit design and simulation .....	10
2.1.3	Ultra-high gain diffusion-driven organic transistor .....	10
2.1.4	Analog Characteristics of Fully Printed Flexible Organic Transistors Fabricated With Low-Cost Mass-Printing Technique. ....	11
2.1.5	A Fully-Printed Self-Biased Polymeric Audio Amplifier for Driving Fully-Printed Piezoelectric Loudspeakers .....	11
2.2	Enunciados de los supuestos teóricos.....	12
2.2.1	Transistores de efecto de campo (OFET).....	12
2.2.2	Transistor de efecto de campo (FET).....	14
2.2.3	Modelamiento de transistores en pspice. ....	18
2.2.4	OFET en sistemas de amplificación.....	20

2.2.5	Parámetros necesarios para el modelo nivel uno en pspice para transistores de efecto de campo orgánicos (OFET).....	22
2.3	Hipótesis.....	24
3	Metodología.....	25
3.1	Paradigma.....	25
3.2	Enfoque.....	25
3.3	Método.....	25
3.4	Tipo de investigación.....	25
3.5	Diseño de investigación.....	25
3.6	Técnicas de recolección de información.....	28
3.6.1	Validez de las técnicas recolección de información.....	28
3.6.2	Confiabilidad de las Técnicas de Recolección de Información.....	29
3.7	Instrumentos de Recolección de Información.....	29
4	Resultados.....	29
4.1	Fase 1: Modelamiento del OFET.....	29
4.1.1	Modelo y caracterización del OFET.....	29
4.1.2	Especificación de los materiales para el OFET.....	30
4.2	Fase 2: Simulación y validación del modelo OFET.....	32
4.2.1	Simulación del OFET y resultados.....	32
4.3	Fase 3: Modelo Amplificador.....	41
5	Conclusiones.....	50
6	Discusiones.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
7	Referencias.....	55

## Introducción

Esta investigación como proyecto de grado, plantea el desarrollo de un modelo SPICE de un transistor de efecto de campo orgánico (OFET) para su estudio como componente principal de un preamplificador de señales. Con el fin de estudiar la potencia y la estabilidad de un circuito basado en OFET, se propone una comparación con un preamplificador de señales basado en FET. Dicha investigación motiva al estudio de la tecnología orgánica en el departamento de ingeniería electrónica de la Universidad CESMAG.

La característica principal de la electrónica orgánica frente a la electrónica tradicional es su fácil procesamiento, disponibilidad y reducción de costos en la producción de componentes y dispositivos electrónicos (Matsui et al., 2018).

Una de las principales causas que motivaron la búsqueda de una alternativa de implementación de OFETs en la preamplificación de señales, es que la fabricación de componentes electrónicos de forma tradicional requiere muchas exigencias tales como: el electroplateado, adelgazamiento del sustrato, procesos a altas temperaturas alrededor de 800°C y 900°C, equipo de litografía óptica, técnicas de plasma de baja densidad, aplicación de radiofrecuencia típicamente 13,56 MHz, salas limpias, entre otras. (Garrido Ariza, 2000a).

Esta investigación se realizó con el interés de conocer el funcionamiento del OFET en la preamplificación de señales para así poder identificar y relacionar sus principales ventajas y desventajas en comparación con preamplificadores basados en transistores de efecto de campo tradicionales. En este proyecto se obtuvo la medición de variables requeridas para cada modelo de transistor diseñado y para el modelo de preamplificador simulado.

Se estudió la preamplificación de señales teniendo como línea base la tecnología orgánica, es importante para la generación de nuevo material teórico y posibles aplicaciones de los OFETs en diferentes dispositivos electrónicos, aportando al conocimiento en la electrónica en Colombia.

En el ámbito profesional el interés se enfoca en conocer las posibles mejoras y aplicaciones de la tecnología orgánica en dispositivos de uso diario en la actualidad.

La metodología abarca la implementación de un circuito preamplificador tipo A con transistores de efecto de campo tradicionales, posteriormente se desarrollará el modelo nivel

uno en PSPICE del transistor de efecto de campo utilizado en la implementación. En una siguiente fase del proyecto se realizó la simulación del circuito preamplificador tipo A anteriormente nombrado, todo esto con el fin de comparar los resultados obtenidos, validando así el modelo y los resultados obtenidos.

Al llegar al punto de validación del software, se realizó el modelo nivel uno en PSPICE del transistor de efecto de campo orgánico (OFET) y se utilizó este modelo en la simulación del preamplificador tipo A para llegar al objetivo principal que es, comparar las ventajas y desventajas por medio de los resultados obtenidos en la simulación del OFET y el FET aplicados en una etapa de preamplificación de señales.

# 1 El problema de investigación

## 1.1 Objeto o tema de investigación

Rendimiento de los transistores de efecto de campo orgánico (OFETs) en potencia y estabilidad en un preamplificador.

## 1.2 Línea de investigación

**Microelectrónica:** El área de la microelectrónica del programa de Ingeniería Electrónica de la Institución Universitaria CESMAG enfoca su trabajo en la aplicación de la ingeniería electrónica a componentes y circuitos de dimensiones muy pequeñas, para producir dispositivos y equipos electrónicos de dimensiones reducidas, pero altamente funcionales(Cho et al., 2018).

## 1.3 Descripción del problema

Es de gran importancia la potencia y estabilidad de un preamplificador para obtener una señal de buena calidad(Matsui et al., 2018), los OFETs son una nueva e interesante opción ya que están siendo empleados en el desarrollo de diferentes dispositivos electrónicos como los transpondedores(*Transistor Orgánico de Efecto de Campo (Ofet), Un Método de Producción Para El Mismo, Un Circuito Integrado Construido a Partir Del Mismo y Sus Usos.*, 2001), la característica principal de los OFETs fabricados con una aleación de pentaceno y poly(triarylamine) es una frecuencia máxima de trabajo cerca a los 100Khz y una frecuencia mínima de trabajo cerca de los 20Hz ofreciendo un ancho de banda repetible y estable (Kheradmand-Boroujeni et al., 2014), por otra parte los FET tiene una frecuencia de trabajo acotada aproximadamente entre los 100Hz y 100Khz (Zhao et al., 2012). Los dos transistores ofrecen un gran margen de ancho de banda útiles para la preamplificación de señales y audio. La diferencia influye en su fabricación y el material a usarse, ya que para la fabricación de un FET se requiere de una sala limpia y una adecuación de la temperatura ambiente muy estricta(Garrido Ariza, 2000b), por el contrario la fabricación de los OFET son totalmente impresos, sin usar una sala limpia y con una temperatura ambiente inferior a los 130°C (Kheradmand-Boroujeni et al., 2014).

Se han realizado aplicaciones potenciales en sistemas de comunicación óptica, tecnología de pantallas avanzadas, iluminación y láseres orgánicos (Muccini, 2006). Teniendo en cuenta lo dicho se busca estudiar que tan eficiente y estables son los OFETs en la preamplificación destacando las siguientes variables a evaluar en el transistor OFET y en el transistor FET: capacitancia de la compuerta ( $C_{ox}$ ), movilidad de la región lineal ( $\mu$ ), movilidad de la región de saturación ( $\mu$ ) y límite de voltaje ( $V_t$ ) (Kymissis, 2009b), estas características se compararán con el rendimiento del FET en la preamplificación.

#### **1.4 Formulación del problema**

¿Cuál es la eficiencia en términos de potencia y estabilidad de los OFETs como componente principal de un preamplificador de señales?

#### **1.5 Objetivos**

##### **1.5.1 Objetivo general.**

Determinar la eficiencia en términos de potencia y estabilidad de los transistores de efecto de campo orgánicos (OFETs) frente a los transistores de efecto de campo (FET) en un preamplificador.

##### **1.5.2 Objetivos específicos.**

- Documentar el modelo OFET a simular.
- Simular y validar el modelo OFET.
- Implementar el diagrama de bloques en Simulink para el modelo del OFET.
- Simular el circuito preamplificador de señales tipo A con FET en Simulink.
- Simular el circuito preamplificador de señales tipo A con OFET en Simulink.
- Caracterizar en términos de potencia y estabilidad el circuito preamplificador basado en el OFET simulado.

#### **1.6 Justificación**

La implementación de materiales orgánicos a los dispositivos electrónicos brinda nuevas propiedades como lo es la elasticidad y plasticidad que son propias de la tecnología orgánica (Cho et al., 2018), estas propiedades se pueden aplicar a diferentes ramas de la

ingeniería, en relación con lo anterior se busca explorar el funcionamiento de los OFETs en la preamplificación de señales, dado que existen pocos estudios teóricos y de implementación, a su vez se busco como objetivo opcional una nueva alternativa de fabricación por medio de circuitos impresos en materiales orgánicos(Yi et al., 2012).

### **1.7 Viabilidad**

Para el desarrollo de la investigación se utilizó el modelamiento de un OFET en Simulink por medio de diagrama de bloques, para poder evaluar el preamplificador con OFETs. La eficiencia se evaluo teniendo en cuenta los recursos que consume el preamplificador con FETs y el preamplificador con OFETs.

### **1.8 Delimitación**

Teniendo como objetivo determinar la eficiencia en términos de potencia y estabilidad de un preamplificador con transistores de efecto de campo orgánicos (OFETs) frente a un preamplificador con transistores de efecto de campo (FET), primero se implementó el modelo OFET en Matlab utilizando Script y el diagrama de bloques de Simulink, para posteriormente trabajar la simulación y análisis del preamplificador con OFET y con FET utilizando Simulink, esta será la herramienta fundamental que permitirán el desarrollo de la investigación comparativa de OFET y FET en un preamplificador. Los resultados obtenidos por los diseños elaborados en Simulink serán fundamentales para establecer que preamplificador es más eficiente.(Báez Parra, 2016).

## **2 Tópicos del marco teórico**

### **2.1 Antecedentes**

#### **2.1.1 Ultrasensitive Multi-Functional Flexible Sensors Based on Organic Field-Effect Transistors with Polymer-Dispersed Liquid Crystal Sensing Layers**

En este antecedente se muestra los transistores de efecto de campo orgánico (OFET) de polímero líquido dispersado en polímero (PDLC), que responden de manera sensible a diversas estimulaciones, incluido el flujo de gas (aire), el contacto físico directo y la luz. Las PDLC - i - OFET flexibles se fabricaron mediante recubrimiento por rotación de las capas de poli (metacrilato de metilo) (PMMA) 4,4' - pentil - cianobifenilo (5CB) en el poli (3 - hexiltiofeno) (P3HT) capas de canales de OFET con sustratos de poli (naftalato de etileno) (PEN) de 200  $\mu\text{m}$  de espesor. Los dispositivos flexibles PDLC - i - OFET pueden detectar un flujo de gas nitrógeno muy débil (0,3 sccm), que no puede sentir la piel humana, y responde de manera estable a los toques físicos directos (0,6 ~ 4,8 g de carga). En particular, los dispositivos PDLC - i - OFET flexibles actuales podrían detectar dos estimulaciones diferentes al mismo tiempo, lo que indica capacidades prometedoras de detección múltiple.

#### **2.1.2 Modeling of fully printed organic field effect transistors for circuit design and simulation**

En este antecedente se estudió por primera vez dos modelos del OFET de señal grande que están optimizados para señal pequeña según los datos experimentales, menos sensibles al sesgo - stress. Los modelos de Li y Estrada se estudian en general en las regiones I - V, de sub - umbral a por encima del umbral, y de la región lineal de saturación con formulaciones unificadas. Se ha encontrado que El modelo de Estrada se adapta mejor a la transformación de conductancia, mientras que El modelo de Li se ajusta mejor a la ganancia intrínseca. El amplificador bootstrapped es simulado y se compara con los datos de medición.

#### **2.1.3 Ultra-high gain diffusion-driven organic transistor**

Los transistores de alta ganancia son esenciales para el desarrollo de la integración de circuitos a gran escala, los sensores de alta sensibilidad y la amplificación de la señal en los sistemas de detección. Desafortunadamente, los transistores orgánicos de efecto de campo muestran una ganancia limitada, generalmente del orden de decenas, debido a la gran resistencia de contacto y la modulación de la longitud del canal. En este antecedente se muestra una nueva arquitectura orgánica de transistores de efecto de campo con una ganancia superior a 700. En el transistor orgánico de efecto de campo propuesto, la inyección de carga y la extracción en los contactos de metal - semiconductor son impulsadas por la difusión de carga. Además, se muestran las condiciones ideales de los contactos óhmicos con resistencia de contacto insignificante y saturación de corriente plana.

#### **2.1.4 Analog Characteristics of Fully Printed Flexible Organic Transistors Fabricated With Low-Cost Mass-Printing Technique.**

Este trabajo realizado por varios miembros de la IEEE, se enfoca en encontrar la alternativa de un transistor orgánico para la amplificación de señales, este documento basa su investigación en medir la transconductancia ( $g_m$ ), la frecuencia de tránsito ( $f_T$ ) y la ganancia intrínseca de la corriente de drenaje de polarización ( $I_D$ ) y los resultados obtenidos muestran características importantes dado que la ganancia intrínseca para  $I_D > 10 \text{ nA} / \text{mm}$  (por ancho de milímetro), y alcanzan  $f_T = 64 \text{ kHz}$  con  $I_D = 16 \text{ } \mu\text{A} / \text{mm}$ , mientras que la pérdida de  $g_m$  con la frecuencia de  $64 \text{ kHz}$  es  $< 10\%$ , dando a entender que los OFET pueden ser implementados en diferentes sistemas electrónicos o microelectrónicos que trabajen con señales.

#### **2.1.5 A Fully-Printed Self-Biased Polymeric Audio Amplifier for Driving Fully-Printed Piezoelectric Loudspeakers**

El estudio de varios miembros de la IEEE se dirige específicamente a un amplificador con altavoz, transistores de efecto de campo orgánico (OFET), condensadores y resistencias, todos estos componentes se fabricaron bajo técnicas de impresión de alto rendimiento tomando como material base el sustrato de tereftalato (PET). Todo el circuito consta de grandes OFETs con una longitud de canal de  $20 \text{ } \mu\text{m}$  a una frecuencia de trabajo de más de  $700 \text{ Hz}$  a  $12.5 \text{ kHz}$ . El rendimiento del amplificador se mide en pérdidas de sonido en dB después de 5 horas de funcionamiento continuo.

## 2.2 Enunciados de los supuestos teóricos

En esta sección, se conceptualiza la teoría relacionada con el desarrollo de la tecnología orgánica y sus aplicaciones potenciales en diferentes dispositivos electrónicos (Muccini, 2006), recolectando información sobre los métodos de prueba para la caracterización de transistores y materiales orgánicos (Standard, 2004) con el propósito de evitar errores de que afecten al modelamiento y simulación del transistor de efecto de campo (OFET).

### 2.2.1 Transistores de efecto de campo (OFET)

**La tecnología orgánica:** En los últimos veinte años, la investigación sobre las aplicaciones de los semiconductores orgánicos se ha intensificado rápidamente. Los grandes avances conseguidos en los últimos años por la ciencia de los materiales orgánicos impulsaron el desarrollo de dispositivos tales como diodos orgánicos emisores de luz (OLED), Células solares, células electroquímicas, memorias orgánicas. y transistores de efectos de campo orgánicos (OFET). De la electrónica orgánica se deriva la posibilidad de producir componentes a bajo costo, de gran área, livianos y flexibles. El desarrollo de dispositivos electrónicos orgánicos integrados es una puerta de enlace para una variedad de aplicaciones, y es de gran relevancia para el propósito general de lograr mejoras en los integrados(Muccini, 2006).

**Aplicaciones de la tecnología orgánica:** Por ejemplo, la combinación de OLEDs y OFETs para el desarrollo de tecnología de visualización de matriz activa totalmente orgánica, enfoques para integrar dispositivos OFET y OLED. Desarrollo de la electrónica orgánica en integrados de componentes y circuitos, recientemente se han demostrado se puede elaborar transistores orgánicos emisores de luz (OLET) que combinan en un solo dispositivo el funcionamiento de un transistor de efecto de campo y la capacidad de generar luz(Muccini, 2006)

**Semiconductores:** Un semiconductor es un elemento con propiedades eléctricas entre las de un conductor y las de un aislante, los mejores semiconductores tienen cuatro electrones de valencia. En la actualidad hay 2 clases de semiconductores los orgánicos e inorgánicos.(Malvino, 2000)

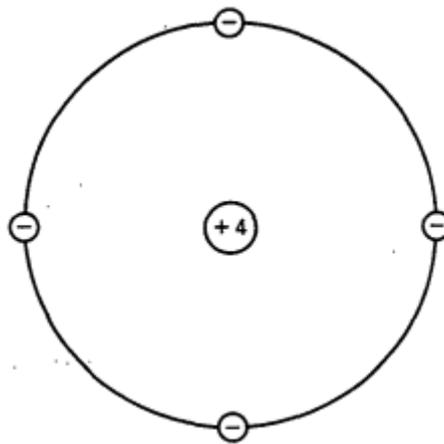
#### **Semiconductores inorgánicos:**

-Germanio

Es un ejemplo de semiconductor inorgánico. Tiene cuatro electrones en su orbital de valencia. Hace unos años el germanio era el único material adecuado para la fabricación de dispositivos semiconductores.(Malvino, 2000)

#### -Silicio

Después del oxígeno es el elemento más abundante en la tierra al igual que el germanio tiene 4 electrones en su órbita de valencia. En la actualidad el silicio es el semiconductor principal de la electrónica moderna sin él no se tendría avances en la comunicación ni en los ordenadores.(Malvino, 2000).



**Figura 1.** (Malvino, 2000)

**Semiconductores orgánicos:** Los semiconductores orgánicos son componentes prometedores para nuevos dispositivos electrónicos flexibles, como pantallas y sensores. Se puede dar una producción a gran escala a través de las impresoras de circuitos orgánicos y la flexibilidad de los materiales orgánicos son características de los semiconductores orgánicos.(Kymissis, 2009c).

Dos propiedades básicas de los semiconductores orgánicos son:

- Disfrutan de propiedades semiconductoras a nivel molecular.
- La unión entre moléculas orgánicas puede ser débil.

Debido a que no es necesario romper o reformar los enlaces covalentes, los materiales orgánicos semiconductores se pueden manipular usando una pequeña entrada energética.

Los materiales impresos, elaborados pueden formar canales semiconductores. en prácticamente cualquier sustrato.(Liu et al., 2010) No se requieren plantillas para lograr algunas propiedades semiconductoras, y los materiales pueden ser diseñados para el rendimiento del dispositivo a bajas temperaturas(Kymissis, 2009a)

### **Comportamiento del carbono como semiconductor**(Kymissis, 2009c):

El carbono es rico en su comportamiento químico por estas razones:

- El carbono tiene un tamaño relativamente pequeño. Lo cual permite una mayor variedad de compuestos.

- El carbono tiene una electronegatividad moderada. Esto le permite formar enlaces covalentes. Le unirse a prácticamente todos los materiales, incluyendo otros átomos de carbono.

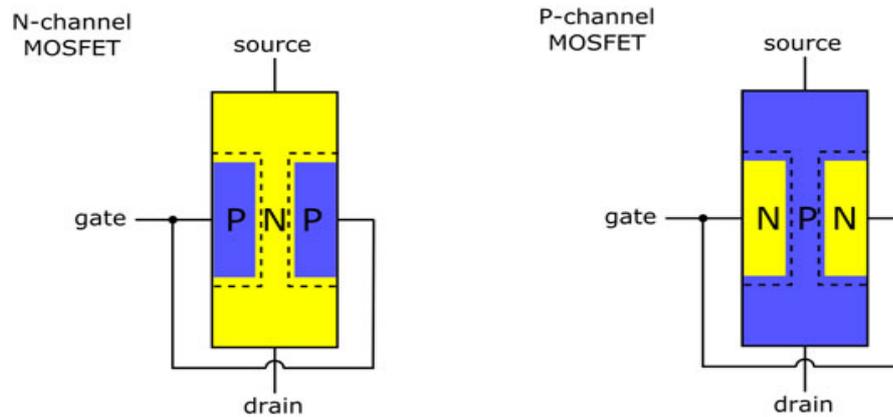
- Al ser un material del grupo IV. Tiene la capacidad de formar cuatro enlaces, aumentando su versatilidad química y ayuda a formar polímeros de cadena larga.

- El carbono se hibrida en varias formas. Esto permite una amplia variedad de configuraciones de enlace que incluyen enlaces simples, dobles y triples también.

**Semiconductores de polímero:** En la actualidad se han estudiado diferentes materiales para la fabricación de los OFETs en los cuales encontramos estos polímeros los cuales se han sido estudiados, desarrollados y demostrados en OFETs; politiofeno y polifluoreno.(Kymissis, 2009c)

### **2.2.2 Transistor de efecto de campo (FET).**

El efecto de campo es un fenómeno en el que la conductividad de un semiconductor cambia debido a la aplicación de un campo eléctrico normal a su superficie. El termino efecto de campo se relaciona con las zonas de depleción que rodean a cada zona p. Las uniones entre cada zona p y las zonas n tienen capas de depleción debido a que los electrones libres se difunden desde las zonas n en las zonas p. La recombinación de los electrones libres y los huecos crea las zonas de depleción(Malvino, 2000)



**Figura 2.** (Shamieh, 2015)

**Transistor de efecto de campo (OFET):** Los transistores de efecto de campo orgánico (OFET) son los bloques de construcción básicos para los circuitos integrados y pantallas flexibles. Para hacer OFET, se necesitan materiales que van desde conductores (para electrodos), semiconductores (para materiales de canales activos), hasta aislantes (para capas dieléctricas de compuerta).

Muchos de los OFET son transistores orgánicos de película delgada (OTFT), en que la capa semiconductor es aproximadamente bidimensional, debido a la estructura lineal de muchos de los semiconductores orgánicos se aplica un voltaje a la compuerta para controlar la cantidad de flujo de corriente entre la fuente y el drenaje.

Los OFET se colocan en prácticamente cualquier sustrato o lámina de plástico en su superficie.

**Modelos de simulación para el OFET:** Desarrollar un modelo compacto confiable es un requisito clave para el diseño y simulación de circuitos. Modelos compactos específicos se han desarrollado para el OFET debido a muchos factores nuevos, tales como la dependencia de la movilidad en la tensión de la puerta, diferentes al comportamiento del sub-umbral y regiones de saturación.(Kaveh et al., 2016).

### **Modelo de A. Li**

Este modelo se basa en la película delgada policristalina y describe los enlaces conjugados en pentaceno FETs. En esto modelo se define una nueva relación para los límites altura  $E_g$  y la compuerta de voltaje  $V_{gs}$ . (Kaveh et al., 2016).

Los parámetros que afectan la conductividad del material policristalino y la densidad portadora promedio permitieron realizar a una nueva ecuación para la movilidad efectiva la cual está indicada en la ecuación 1. (Kaveh et al., 2016).

$$\mu_{eff} = \mu_0 e^{-\frac{S_1}{V_{GS}-S_2}}, \quad (1)$$

Donde  $S_1$  y  $S_2$  son constantes empíricas y  $\mu_0$  es la movilidad del portador. La corriente de drenaje se define como:

$$I_D = \frac{W}{2L} \mu_{eff} C_{ox} [V_{gon} - (V_{gon} - V_{dseff})^2] (1 - \lambda V_{DS}), \quad (2)$$

Con  $W$  y  $L$  que son el ancho y la longitud del canal respectivamente,  $\lambda$  es la capacitancia del aislador,  $C_{ox}$  es el parámetro de modulación de longitud en el canal, y  $K_1$  es el parámetro de ajuste. (Kaveh et al., 2016).

$$V_{dseff} = \frac{V_{gon} V_{DS}}{(V_{gon}^{K_1} + V_{DS}^{K_1})^{\frac{1}{K_1}}}, \quad (3)$$

### Modelo Estrada's

Mejorar el comportamiento de saturación y la conductancia de salida en la región lineal. este modelo cubre todos regiones operativas. La corriente de drenaje se calcula por multiplicación de la conductancia del canal, tensión D / S efectiva  $V_{DSe}$ , y un término asintótico. Para este modelo, la movilidad aumenta con  $V_{GS}$ , debido al supuesto de transporte de salto:(Kaveh et al., 2016)

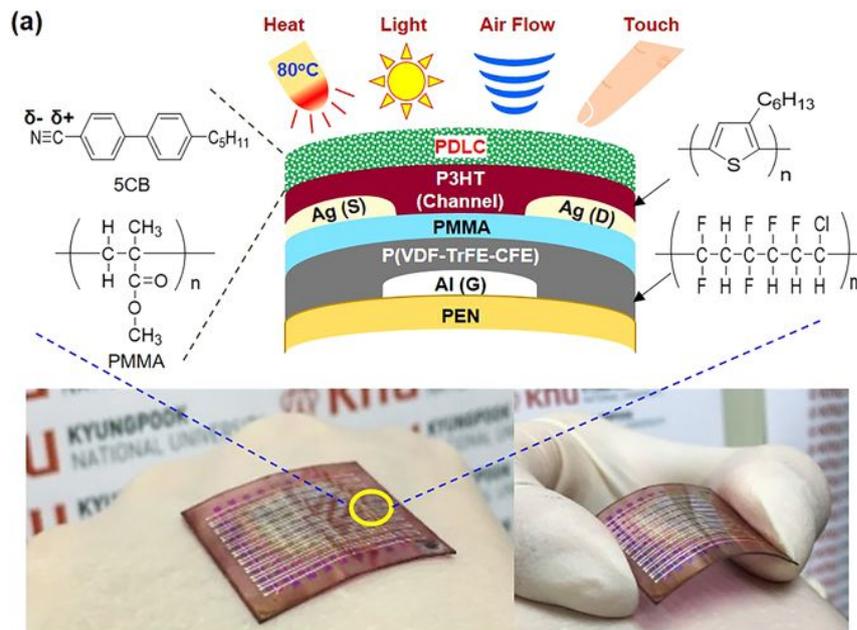
$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0}{V_{aa}^\gamma} |V_{GS} - V_T|^\gamma, \quad (4)$$

Donde  $V_T$  es la tensión de umbral,  $V_T$  es la característica exponente de movilidad,  $\gamma$  es el voltaje de mejora de movilidad, y  $V_{aa}$  es la movilidad de conversión.  $V_{DSe}$  hace una suave transición del régimen lineal al de saturación, y es definido como:

$$V_{DSe} = V_{DS} \times \left[ 1 + \left( \frac{V_{DS}}{V_{sat}} \right)^m \right]^{-\frac{1}{m}}, \quad (5)$$

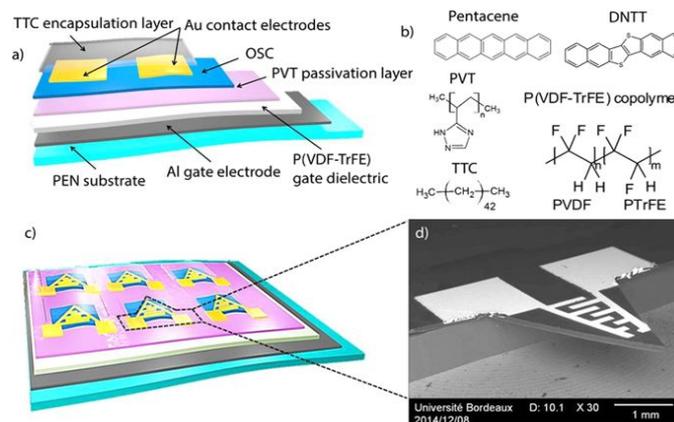
**Aplicaciones del OFET:** Los transistores de efecto de campo están surgiendo como estructuras de dispositivos útiles para la generación eficiente de luz en particular, los transistores orgánicos de efecto de campo que emiten luz son una nueva clase de dispositivos electroópticos que podrían proporcionar una arquitectura novedosa para abordar cuestiones abiertas relacionadas con la recombinación de portadores de carga y la emisión de luz en materiales orgánicos. Estos dispositivos tienen aplicaciones potenciales en sistemas de comunicación óptica, tecnología de pantalla avanzada, iluminación de estado sólido y láseres orgánicos bombeados eléctricamente. Aquí se exploran los avances recientes y las perspectivas futuras de los transistores de efecto de campo emisores de luz, con especial énfasis en los semiconductores orgánicos y el papel que desempeñan las propiedades del material (Nomura et al., 2004)

Actualmente hay un gran interés en utilizar circuitos basados en transistores orgánicos para una gran variedad de aplicaciones, como el “papel electrónico” que utiliza tintas electroforéticas con pigmentos cargados que se mueven cuando se activa el OFET por la generación de un campo eléctrico pero el más interesante es la llamada “piel electrónica” que lleva un circuito integrado de 2 micrómetros conectado directamente a la piel humana. En la siguiente figura, se esquematiza como con una delgada tira se pueden generar sensores y cambios en el transistor bajo diferentes parámetros externos además este no necesita tener un domo de aislamiento (Kaltenbrunner et al., 2013)



**Figura 3.** (Song et al., 2017).

Se prevé que el crecimiento de sensores basados en sistemas microelectromecánicos (MEMS) en el mercado electrónico se verá fortalecido pronto por el desarrollo de una nueva rama de sensores basados en MEMS hechos de materiales orgánicos. Los MEMS están abriendo camino a una nueva generación de energía con piezoeléctricos los cuales son activados por una variación en el transistor orgánico. (Thuau et al., 2016)



**Figura 4.** (Thuau et al., 2016).

### 2.2.3 Modelamiento de transistores en pspice.

¿Qué es PSpice? El programa SPICE, Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis, proporciona una herramienta muy útil para poder determinar el funcionamiento de

circuitos eléctricos y electrónicos tanto analógicos como digitales, sin necesidad de tener que recurrir a su montaje en laboratorio(Pspice et al., n.d.).

Desarrollado en los años setenta, fue mejorándose hasta aparecer en 1984 el programa PSpice, versión disponible para PC.

La absorción de la empresa Microsim Corporation, propietario del programa PSpice, por parte de OrCAD, ha supuesto lograr la unión en una sola aplicación de uno de los programas más potentes de simulación analógica y digital. El resultado es el programa llamado OrCAD PSpice release 9.1 Demo versión, Hay nuevas versiones ya desarrolladas, como la 10.0. (Pérez, n.d.)

Partes imprescindibles dentro del manejo del programa: Capture, PSpice A/D y Layout.

**Módulo Capture:** Es un capturador de esquemas que permite dibujar circuitos o modificar los ya creados. Además, dará la posibilidad de editar componentes, seleccionar el tipo de análisis, realizar chequeos eléctricos(Pspice et al., n.d.).

**Módulo PSpice A/D:** Es la parte del paquete OrCAD PSpice, encargada de realizar a la simulación del comportamiento del circuito para el análisis seleccionado. Cuenta con un capturador de ondas que posibilita visualizar los resultados de la simulación de un modo gráfico a través del monitor del ordenador. Posee como principal herramienta el uso de cursores que determinarán el valor exacto de las coordenadas de un punto cualquiera de la señal representada(Pspice et al., n.d.).

### **Características**

Para la simulación existen los siguientes límites: 64 nudos, 10 transistores, 65 dispositivos digitales, 10 transmisión línea en total, ideal o no ideal.

- La librería simple contiene 39 componentes analógicos y 134 digitales.
- No soporta la creación de ficheros de datos en formato CSDF.
- Sólo se podrán visualizar datos de la simulación realizadas con la versión Demo.

**Módulo Pspice Model Editor:** Es un programa que permitirá modelar cualquier elemento de una librería o incluso diseñar elementos propios a partir de sus características físicas(Pspice et al., n.d.).

#### **Características**

Sólo se permiten crear, editar y guardar librerías de diodos.

**Módulo Pspice Stimulus Editor:** Permitirá generar diferentes tipos de señales, con la posibilidad de visualizarlas a la vez que se están diseñando(Pspice et al., n.d.).

#### **Características**

La generación del estímulo se limita a las señales sinusoidales, analógico, y relojes, digital.

**Módulo Layout Plus.:** Permite el diseño PCB ayudándose de los módulos anteriores o ficheros de otros programas: creación del circuito con sus componentes, su ubicación o emplazamiento sobre la placa, la interconexión, la generación de máscaras y finalmente la documentación(Pspice et al., n.d.).

#### **Características**

- Sólo se permiten crear, editar y guardar pequeños diseños y librerías.
- Un máximo de 15 componentes.
- Un máximo de 100 conexiones.

#### **Limites:**

-Los diseños no deben exceder de 30 casos. Eso significa que se puede colocar 1 elemento 30 veces, 30 componentes distintos 1 vez o cualquier combinación entre ellas(Pspice et al., n.d.).

-Quince componentes por librería. No se podrá modificar o grabar un componente de esa librería si contiene más de 15 elementos.

-No podrá realizarse exportación de EDIF.

-El asistente a través de Internet no está habilitado.

### **2.2.4 OFET en sistemas de amplificación.**

El rendimiento de un transistor de efecto de campo orgánico dependerá íntimamente de tres importantes causas físicas:

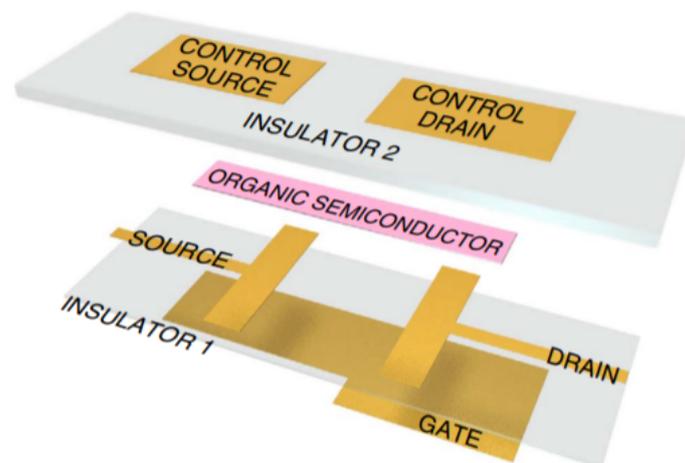
Inyección de carga desde el electrodo fuente hasta el semiconductor.

Transporte de carga a través del semiconductor.

La extracción de carga en el electrodo de drenaje.

(Torricelli, Colalongo, Raiteri, Kovács-Vajna, & Cantatore, 2016a)

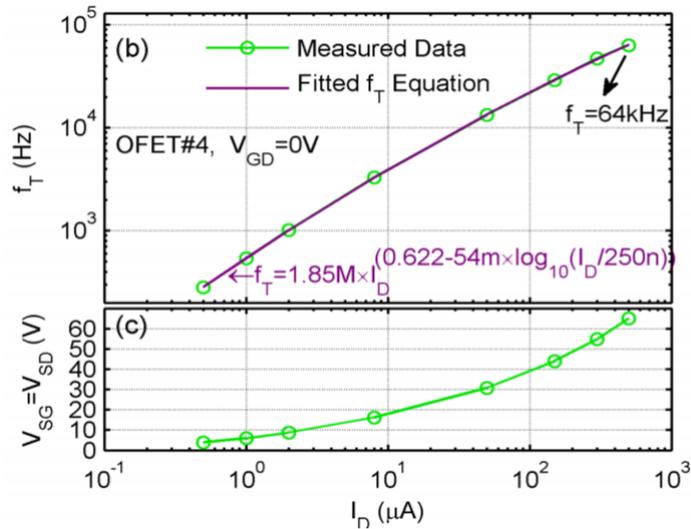
Para lograr una amplificación de señales adecuada en los OFET, se necesitan contactos de alta calidad disminuyendo la resistencia de contacto y al mismo tiempo estudiar a profundidad la modulación de la longitud del canal. La modulación del canal depende de la construcción del OFET, esto permitirá especificar como se extraen los portadores de carga en el drenaje.(Torricelli, Colalongo, Raiteri, Kovács-Vajna, & Cantatore, 2016b).



**Figura 5.** (Torricelli et al., 2016b)

En la anterior imagen, se puede apreciar de que manera se compone un OFET resaltando su característica principal la cual es el semiconductor orgánico ya que dependiendo de su ancho, longitud y altura varia la transferencia de portadores desde la fuente hasta el drenaje.

Los OFET fabricados con sustrato de polyethylene alcanzan una frecuencia de trabajo de 64kHz con una corriente de drenaje de 16  $\mu$ A, siendo útiles para aplicaciones en amplificación de señales.(Kheradmand-Boroujeni et al., 2014).



**Figura 6.** (Kheradmand-Boroujeni et al., 2014)

La imagen (b) de la figura 6 indica la ganancia de corriente de la polarización  $I_D$  y la frecuencia máxima de trabajo de un OFET basado en polyethylene (Kheradmand-Boroujeni et al., 2014).

La imagen (c) de la figura 6 indica el voltaje de polarización frente a la corriente de un OFET basado en polyethylene.

Teniendo en cuenta (Kheradmand-Boroujeni et al., 2014) y el estudio del OFET basado en polyethylene se puede afirmar que al fabricar el semiconductor en base a una aleación de pentaceno (CP-DIPS, 3M) con sus propiedades eléctricas y el polímero poly(triarylamine) (PTAA, Flexink) con su buena capacitancia, le da al OFET características óptimas para la amplificación de señales.

### 2.2.5 Parámetros necesarios para el modelo nivel uno en pspice para transistores de efecto de campo orgánicos (OFET).

Estos son los parámetros requeridos para el modelamiento nivel uno de un transistor en PSPICE (Fuller, 2013).

SPICE Parámetros	Nombre	Significado
1	Nivel	Modelo Shichman-Hodges
2	VTO	Umbral de polarización cero
3	KP	Parámetro de transconductancia.
4	GAMMA	Parámetro de umbral masivo.
5	PHI	es el potencial de inversión de la superficie, 2 x Nivel intrínseco a nivel de Fermi diferencia en voltios.

6	LAMBDA	Es el parámetro de modulación de la longitud del canal, pendiente en saturación región dividida por $I_{dsat}$ .
7	RD	La resistencia de drenaje.
8	RS	Es la fuente de la serie
9	CBD	polarización cero de la carga para drenar la capacitancia de unión
10	CBS	Capacitancia de la unión de origen a la carga cero
11	IS	Es la corriente de saturación de la unión masiva en la ecuación de diodo ideal.
12	PB	Es la unión construida en voltaje
13	CGSO	Capacitancia de superposición de puerta a la fuente (Ancho de canal por metro).
14	CGDO	Capacitancia de superposición de la puerta al drenaje (Ancho de canal por metro).
15	CGBO	Capacitancia de superposición de la puerta a la carga (Ancho de canal por metro)
16	RSH	Es la resistencia de la lámina de drenaje y fuente de difusión
17	CJ	Capacitancia del fondo de la unión de la carga de polarización cero por metro cuadrado.
18	MJ	Es el coeficiente de graduación de la unión
19	CJSW	Capacitancia de la pared lateral de la unión a la carga de polarización cero por metro de perímetro de unión
20	MJSW	Es el coeficiente de graduación de la unión
21	JS	Densidad de corriente de saturación de la unión de la carga en amperios por metro cuadrado
22	TOX	Es el espesor del óxido de la puerta
23	NSUB	El dopaje del sustrato está dado por el fabricante de la oblea o medido por la técnica de sonda de cuatro puntos
24	NSS	La densidad del estado de la superficie es un parámetro utilizado en el cálculo del voltaje de umbral de polarización cero (es decir, $V_{source} = V_{substrate}$ ), $V_{T0}$ se obtiene del transistor curvas

25	NFS	Es la densidad del estado superficial
26	TPG	Tipo de puerta
27	XJ	Profundidad de la unión metalúrgica medida por las técnicas de ranura y tención
28	LD	Distancia de difusión lateral
29	UO	Es la movilidad de superficie tomada como $\frac{1}{2}$ de movilidad en masa o extraída para dar el valor de $I_d$ correcto en las características $I_d$ Vs $V_{ds}$ medidas en la región de saturación. Para mejores resultados, hacer mediciones en un transistor con longitud de canal grande, de modo que $\lambda$ es más pequeña y la difusión lateral se puede despreciar.

**Tabla 1.** (Fuller, 2013).

Los cálculos de estos parámetros se realizarán por medio de fórmulas y cálculos ya elaborados en un documento de Excel basados del modelamiento nivel uno de un MOSFET.(Fuller, 2013)

### 2.3 Hipótesis

Un amplificador con OFETs no disminuye la ganancia en comparación a un amplificador con transistores FET.

### 3 Metodología

#### 3.1 Paradigma

El paradigma que abarca esta investigación es positivista, puesto que es experimental y manipulativa aproximándonos a la verdad teniendo en cuenta que la realidad existe, pero no es completamente aprensible.

#### 3.2 Enfoque

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, debido a las variables que se analizará con el objeto de especificar el comportamiento de un dispositivo aplicado a un determinado sistema.

#### 3.3 Método

Método cuantitativo

#### 3.4 Tipo de investigación

El tipo de investigación en la que se basó este trabajo es experimental puro, ya que el objetivo es comparar las variables dependientes y características de dos transistores implementados en un mismo sistema de amplificación e igual condiciones, siendo un transistor fabricado con materiales orgánicos y el otro con materiales convencionales.

#### 3.5 Diseño de investigación

El diseño experimental que comprendió este trabajo es con pre-prueba, pos-prueba y grupo de control, dado que se comparó la amplificación de una señal utilizando un transistor con semiconductor orgánico y el otro transistor sin semiconductor orgánico.

<b>Variables Independientes</b>	<b>Variables Dependientes</b>
Material semiconductor orgánico	Corriente de drenaje
Ancho del canal	Corriente de drenaje
Amplificador con FET	Ganancia
Amplificador con OFET	Ganancia
Voltaje Vds	Corriente de drenaje

Voltaje $V_{gs}$	Corriente de drenaje
------------------	----------------------

**Tabla 2.** Variables independientes y dependientes

G#	Nombre	X#	Nombre	O#	Nombre
G1	OFET	X1	Modulación ancha de canal	O1	Corriente de drenaje
G2	OFET	X2	Amplificador con OFET	O2	Corriente de drenaje
G3	FET	X3	Modulación Voltaje Compuerta-Fuente	O3	Corriente de drenaje
G4	FET	X4	Modulación Voltaje Emisor-Fuente	O4	Corriente de drenaje
G5	Amplificador tipo AB			O5	Corriente de drenaje
G6	Amplificador tipo AB			O6	Corriente de drenaje
				O7	Corriente de drenaje
	Corriente de drenaje			O8	Corriente de drenaje
	Corriente de drenaje				
	Corriente de drenaje			O9	Corriente de drenaje
				O10	Corriente de drenaje
				O11	Corriente de drenaje
				O12	Corriente de drenaje
				O13	Corriente de Salida en el amplificador tipo A
				O14	Corriente de Salida en el amplificador tipo A
				O15	Corriente de Salida en el amplificador tipo A

				O16	Ganancia en el amplificador tipo AB
				O17	Ganancia en el amplificador tipo AB
				O18	Ganancia en el amplificador tipo AB
				O19	Ganancia en el amplificador tipo AB

**Tabla 3.** Grupos de control, estímulos a realizar y variables a medir

### **Experimento 1**

G1 O1 X1 O2

G2 O3 -- O4

En este experimento se tomó el modelo OFET para medir la corriente de drenaje y determinar su comportamiento antes de aplicar el estímulo. Posteriormente se cambió el ancho del canal y se volvió a medir la corriente de drenaje con el objetivo de especificar de qué manera el ancho del canal afecta la corriente de drenaje en cada transistor modelado.

### **Experimento 2**

G1 O5 -- O6

G1 O7 X3 O8

En este experimento se tomó el modelo OFET para medir la corriente de drenaje y determinar su comportamiento antes de aplicar el estímulo. Posteriormente se varía el valor de Voltaje compuerta-fuente y se volvió a medir la corriente de drenaje con el objetivo de especificar de qué manera afecta el valor del voltaje compuerta-fuente en el transistor modelado.

### **Experimento 3**

G2 O9 -- O10

G2 O11 X4 O12

En este experimento se tomó el modelo OFET se midió la corriente de drenaje y se determinar su comportamiento antes de aplicar el estímulo. Posteriormente se varía el valor de Voltaje emisor-fuente con el objetivo de especificar de qué manera afecta la corriente de drenaje en el transistor modelado.

#### **Experimento 4**

G5 O12 X2 O13

G6 O14 – O15

En este experimento se tomó el amplificador tipo A con FET y se midió la corriente de salida del amplificador tipo A y determinar su comportamiento antes de aplicar el estímulo. Posteriormente se reemplazó el FET por el OFET y se volvió a medir la corriente de salida del amplificador tipo A con el objetivo de especificar de qué manera el OFET afecta a la corriente salida en el amplificador tipo A.

#### **Experimento 5**

G5 O16 X2 O17

G6 O18 – O19

En este experimento se tomó el amplificador tipo A con FET y se midió la ganancia que tiene el amplificador para determinar su comportamiento antes de aplicar el estímulo. Posteriormente se reemplazó el FET por el OFET y se volvió a medir la ganancia del amplificador tipo A con el objetivo de especificar de qué manera el OFET afecta a la ganancia en el amplificador tipo A.

### **3.6 Técnicas de recolección de información**

Se recolectó los datos mediante la herramienta de simulación Simulink, esta permitió identificar las características del OFET y los valores a comparar con un FET de características similares. Los datos que se ingresan a la simulación son datos del modelo matemático OFET ya diseñado.

#### **3.6.1 Validez de las técnicas recolección de información**

Las simulaciones en Simulink de matlab (Programa de simulación visual) es un entorno de simulación de modelos o sistemas electrónicos, en este programa se ha realizado la simulación del MOSFET con Características similares a las de un OFET, obteniendo resultados muy aproximados a los datos reales del MOSFET simulado.

### **3.6.2 Confiabilidad de las Técnicas de Recolección de Información.**

En confiabilidad de Simulink está determinada por las reiteración que tienen sus valores, al ser un software ya tiene operaciones programadas que siempre darán los mismos resultados siempre y cuando estos tengan unas características adecuadas para ser simulados.

### **3.7 Instrumentos de Recolección de Información**

Para la recolección de datos se usó la herramienta de simulación Simulink en el cual se simuló el modelo nivel 1 del transistor de efecto de campo orgánico. Estos datos se recolectarán en archivos de texto plano, en una base de datos organizada, utilizando uno método de puntos de función(Meli, 2012).

Se presenta graficas que relacionen las variables independientes y las variables dependientes con el fin de poder visualizar de mejor manera el comportamiento de cada una de las variables en ciertos parámetros y condiciones.

## **4 Resultados**

### **4.1 Fase 1: Modelamiento del OFET**

#### **4.1.1 Modelo y caracterización del OFET**

Para el modelamiento y caracterización del OFET se tuvo en cuenta el libro Organic field Effect Transistor (Kymissis, 2009d). En este libro, específicamente en el capítulo sexto (Modeling and charactaerization), se emplea un modelo matemático que se tomó como base, es necesario destacar que este modelo cumple con los estándares del método IEEE 1620 para la práctica de ajustes y caracterización de un OFET, debido a lo anterior, es viable su uso en diferentes fenómenos y tipo de materiales.

El modelo base anteriormente nombrado se presenta a continuación:

$$id = \frac{W}{L} \mu Cox \left( (V_{GS} \cdot V_{DS}) - V_t \cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right) \quad (6)$$

La ecuación (6), es el modelo base en saturación.

$$id = \frac{W}{2L} \mu Cox (V_{GS} - V_{DS})^2 \quad (7)$$

La ecuación (7), es el modelo base en triodo.

En la siguiente tabla se explicará cada uno de los parámetros del modelo base, su significado y la unidad de medida de cada uno.

Parámetro	Significado	Unidad
$I_d$	Corriente drenaje	A
$W$	Ancho del canal	$\mu\text{m}$
$L$	Longitud del canal	$\mu\text{m}$
$\mu$	Movilidad del semiconductor	$\text{Cm}^2/\text{Vs}$
$Cox$	Capacitancia del dieléctrico	$(\text{nF}/\text{Cm}^2)$
$V_t$	Voltaje de umbral	V
$V_{DS}$	Voltaje drenaje fuente	V
$V_{GS}$	Voltaje compuerta fuente	V

**Tabla 4.** Parámetros de la ecuación del modelo OFET

#### 4.1.2 Especificación de los materiales para el OFET

En esta etapa de la investigación se estudió varios tipos de materiales orgánicos con características óptimas para ser implementados en dispositivos electrónicos y circuitos electrónicos. Las características más importantes a tener en cuenta en los materiales semiconductores, fue la movilidad ( $\mu$ ) del material. Por otra parte, se tuvo en cuenta que el dieléctrico sea compatible con el semiconductor, de fácil fabricación y que este no tenga ninguna reacción química que pueda afectar las características físicas del semiconductor.

A continuación, se presenta una tabla de los materiales que se investigó y sus respectivas características:

<b>Semiconductor</b>	<b>Movilidad</b> $\mu$ ( $Cm^2/Vs$ )	<b>Dieléctrico</b>	<b>Capacitancia</b> $C_{ox}$ ( $nF/Cm^2$ )
P3HT (poly(3hexylthiophene))	0.1	PVA-m	27
PENTACENE (C22H14)	0.5	PVP	250
TIPS-PENTACENE (6,13Bis(triisopropylsilylethynyl)pentacene)	1	Cross linked PVA	12.2
pBTTTC16 (poly(2,5-bis(3-dodecylthiophene-2yl)thieno[3,2-b]thiophenes))	0.3	P(VDP TrFE CFE)	330

**Tabla 5.** *Materiales semiconductores y dieléctricos.*

Los datos de los materiales semiconductores P3HT (poly(3hexylthiophene)), PENTACENE (C22H14), TIPS-PENTACENE (6,13Bis(triisopropylsilylethynyl)pentacene) y pBTTTC16 (poly(2,5-bis(3-dodecylthiophene-2yl)thieno[3,2-b]thiophenes)) se tomaron bajo estudios, pruebas y experimentos donde se presenta valores teóricos y experimentales de la corriente de drenaje vs el voltaje de drenaje-fuente en transistores. (Lee et al., 2019; Li, Sun, & Yan, 2012; MacHado & Hummelgen, 2012).

De igual manera los datos de los materiales dieléctricos PVA-m, PVP, Cross linked PVA y P(VDP TrEECFE) se obtuvieron en base a estudios, pruebas y experimentos donde se presentan valores teóricos y experimentales de la corriente de drenaje vs voltaje de drenaje-fuente en transistores. (Chemicals, 2018; Feng, Tang, Xu, Cui, & Guo, 2013; Yang, Kim, Shin, Jeon, & Park, 2006).

Para determinar el tipo de material a usar en el modelo base del OFET que se presenta en la ecuación (6) y (7), se tuvo en cuenta el valor mas alto de movilidad del semiconductor, ya que este valor es directamente proporcional a la corriente de drenaje y el otro fundamento no menos importante para escoger el material, es la que ofrece el libro Organic field effect transistors : Theory, fabrication and characterization en el capitulo 3 titulado Organic semiconductor materials for OFETs donde especifica y deja en claro que el PENTACENE no

es una buena alternativa para la fabricación de OFETs puesto que se oxida con facilidad, pero al sintetizar grupos voluminosos en las posiciones de oxidación 6,13 del PENTACENE, da como resultado el TIPS-PENTACENE(6,13Bis(triisopropylsilylethynyl)pentacene), este semiconductor restringe la cristalización y lo vuelve altamente favorable y mejora la solubilidad para la fácil impresión, implementación y buen rendimiento en OFETs, este semiconductor orgánico a diferencia de otros materiales como el P3HT, Tetracene, PEDOT, y otros mas nombrados en este capitulo del libro que son mas dificiles de imprimir, implementar, con bajo rendimiento en movilidad y no solubles para elaborar capas en los OFETs, por lo anterior, el TIPS-PENTACENE se convirtió en un estándar para la fabricación de dispositivos electrónicos orgánicos(Kymissis, 2009e). Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, el material TIPS-PENTACEN (6,13Bis(triisopropylsilylethynyl)pentacene) con un valor de movilidad de  $1\text{Cm}^2/\text{Vs}$  y su respectivo dieléctrico el Cross linked PVA con un valor de  $12.2\text{nF}/\text{Cm}^2$ , son los mas viables por su fácil sintetización, solubilidad y buen rendimiento para la creación de OFETs.

Los valores de cada parámetro que se utilizaron en el modelo base (ecuación (6) y (7)) son los siguientes:

<b>Material</b>	<b>Parameros</b>
Cross-linked PVA(Dieléctrico orgánico)	$L=20\mu\text{m}$
TIPS-PENTACENE(Semiconductor orgánico)	$W=30\text{mm}$
	$V_t=0.9\text{v}$
	$\mu=1\text{Cm}^2/\text{Vs}$
	$C_{ox}=12.2\text{nF}/\text{Cm}^2$
	$V_{GS}=5\text{v}$
	$V_{DS}=0\text{v a }3\text{v}$

**Tabla 6.** Parámetros utilizados para el modelo OFET.

## 4.2 Fase 2: Simulación y validación del modelo OFET

### 4.2.1 Simulación del OFET y resultados.

Esta etapa se enfocó en realizar la simulación del OFET ecuación (6) y (7) con los materiales Cross Linked PVA y TIPS-PENTACENE, dieléctrico y semiconductor respectivamente.

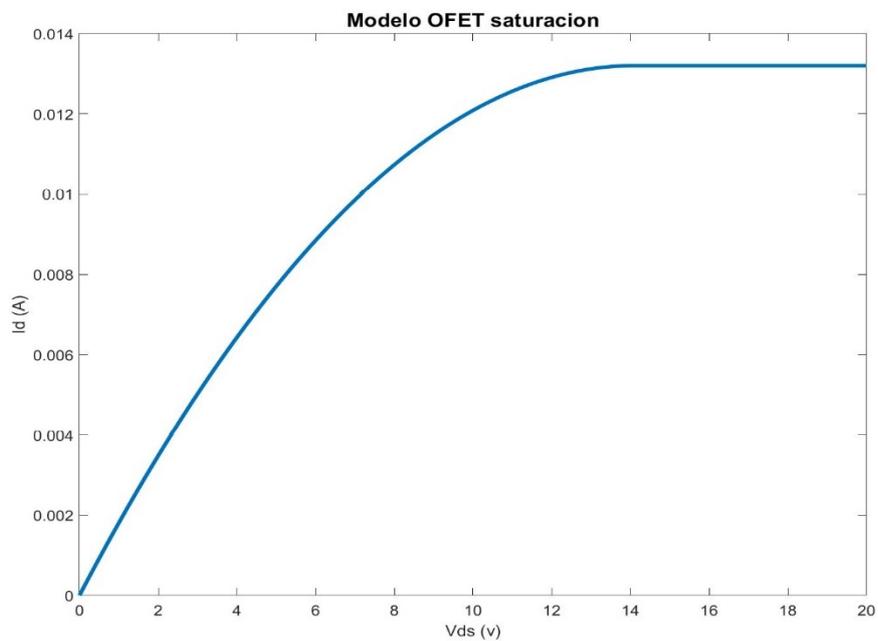
Se estableció los siguientes parámetros de simulación para la región de saturación:

### PARAMETROS PARA LA SIMULACIÓN SATURACIÓN

---

L=20 $\mu$ m  
W=30mm  
Vt=0.9v  
 $\mu=1\text{Cm}^2/\text{Vs}$   
Cox=12.2nF/Cm<sup>2</sup>  
Vgs=5v  
Vds=0v a 20v

**Tabla 7** Parámetros de simulación del modelo OFET saturación.



**Figura 7** Resultados de simulación modelo OFET saturación.

En la anterior imagen, se puede evidenciar que el transistor se encuentra en la región de saturación, ya que el voltaje de la compuerta o gate supera el valor del voltaje umbral, para que el transistor llegue al punto de saturación se debe garantizar las siguientes condiciones:

$V_{GS} > V_t$  y también  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$ , cumpliendo lo anterior se permite la circulación de corriente entre el colector y el emisor y el transistor se comporta como si fuera un interruptor cerrado.

Para evaluar el comportamiento del OFET en la región de triode se estableció los siguientes parámetros de simulación:

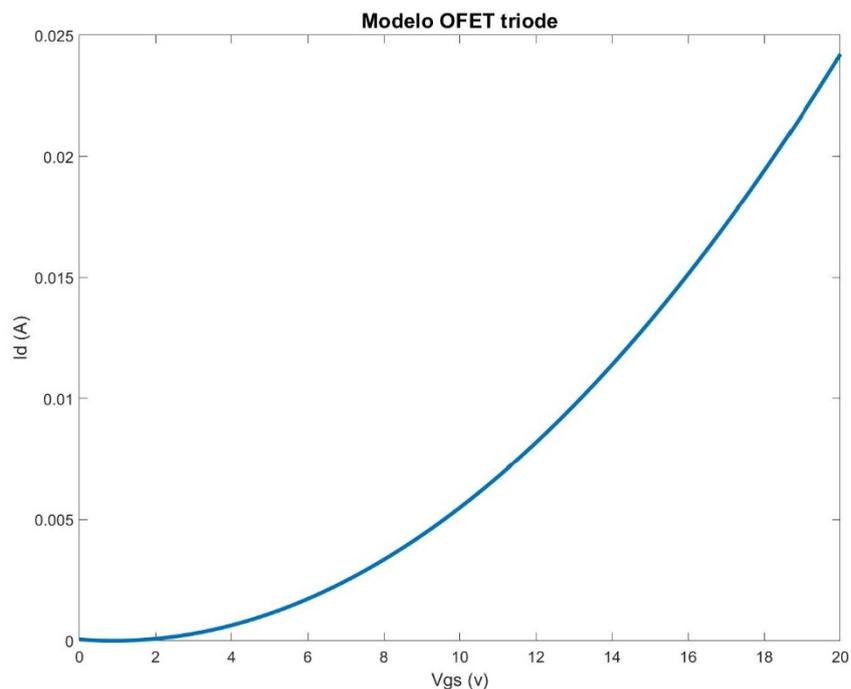
### PARAMETROS PARA LA SIMULACIÓN

#### TRIODE

---

$L=20\mu\text{m}$
$W=30\text{mm}$
$V_t=0.9\text{v}$
$\mu=1\text{Cm}^2/\text{Vs}$
$C_{ox}=12.2\text{nF}/\text{Cm}^2$
$V_{GS}=0\text{-}20\text{v}$
$V_{DS}=5\text{v}$

**Tabla 8** Parámetros de simulación del modelo OFET triode.

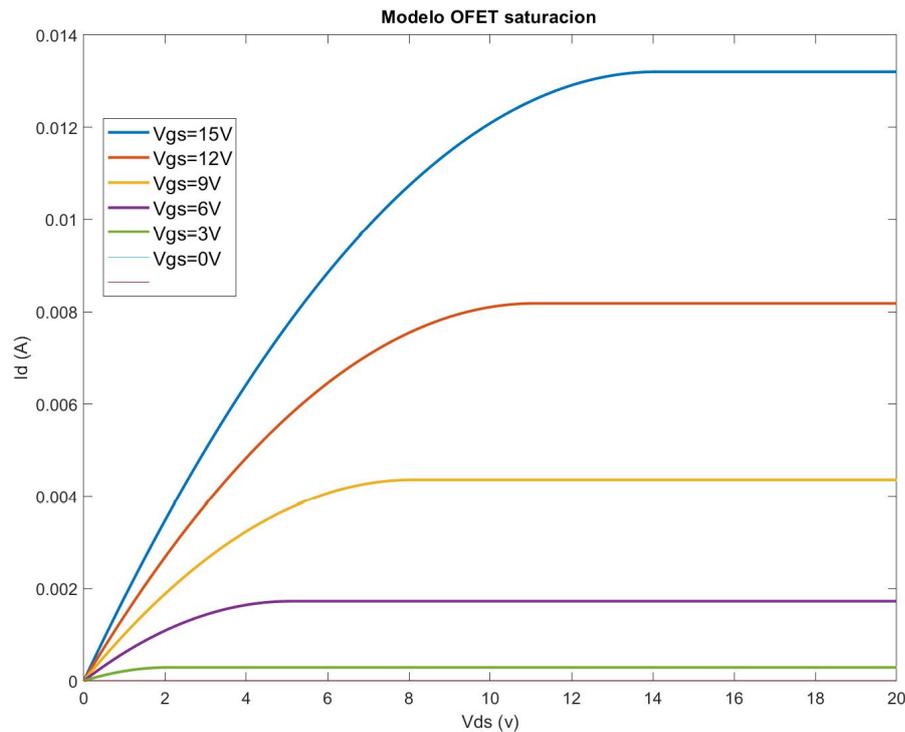


**Figura 8** Resultados de simulación modelo OFET triode.

En la figura 8, se puede observar como el OFET está en la región de triodo cuando se cumple las siguientes condiciones:  $V_{GS} > V_t$  y también  $V_{DS} < V_{GS} - V_t$ , en este caso el OFET se comporta como una resistencia funcionando como amplificador, pero emitiendo una pérdida de energía en calor muy alta, siendo así una zona no óptima de operación.

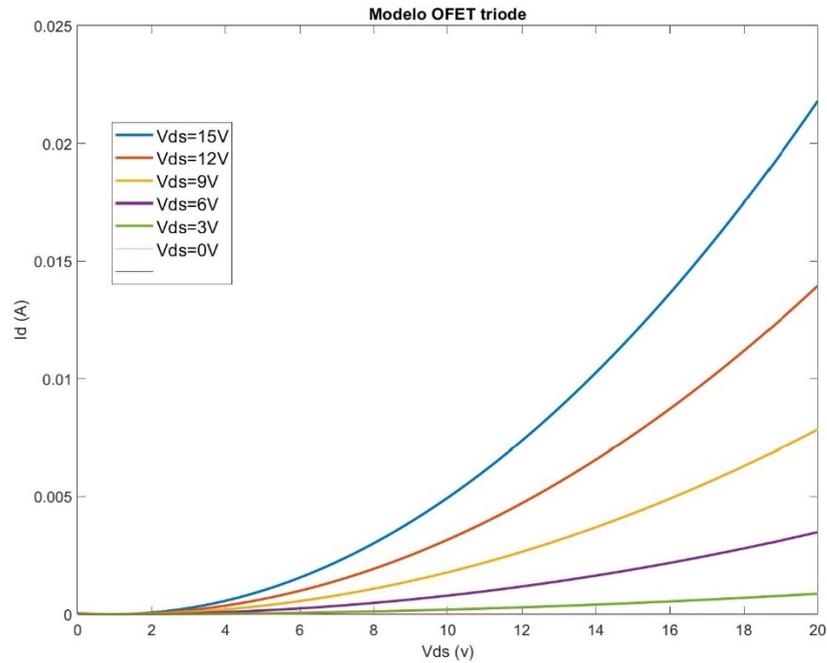
Con el propósito de obtener mayor información del comportamiento del OFET, se simuló el modelo en la región de saturación variando el valor de  $V_{DS}$  desde 0v hasta 15v y se tomó

valores fijos de  $V_{GS}$  en el siguiente orden: 0v,3v,6v,9v,12v,15v. obteniendo así seis graficas en diferentes puntos de estabilización.



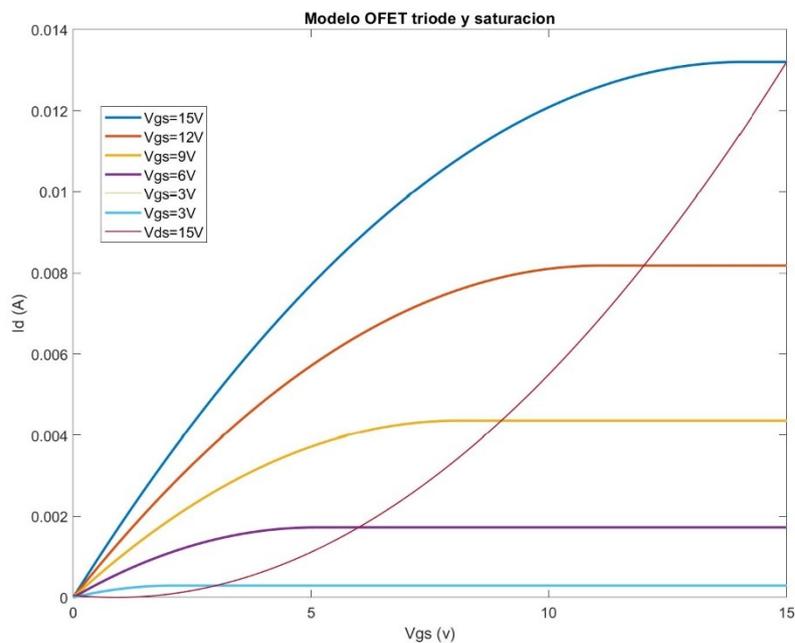
**Figura 9** Grafica del modelo OFET en saturación con diferentes valores de  $V_{GS}$ .

De lo anterior se evidencia que el valor de la corriente  $I_D$  aumenta cuando el valor de  $V_{GS}$  también aumenta, dado que en la ecuación (6) el valor de  $V_{GS}$  se multiplica con los parámetros de movilidad, capacitancia y ancho del canal. Los valores en que se estabiliza la corriente  $I_D$  es en 0.013A para un valor de  $V_{GS}$  de 15v, 0.0082A para un valor de  $V_{GS}$  de 12v, 0.0042A para un valor de  $V_{GS}$  de 9v, 0.00183A para un valor de  $V_{GS}$  de 6v, 0.0003A para un valor de  $V_{GS}$  de 3v y el ultimo valor es de 0A para un  $V_{GS}$  de 0v.



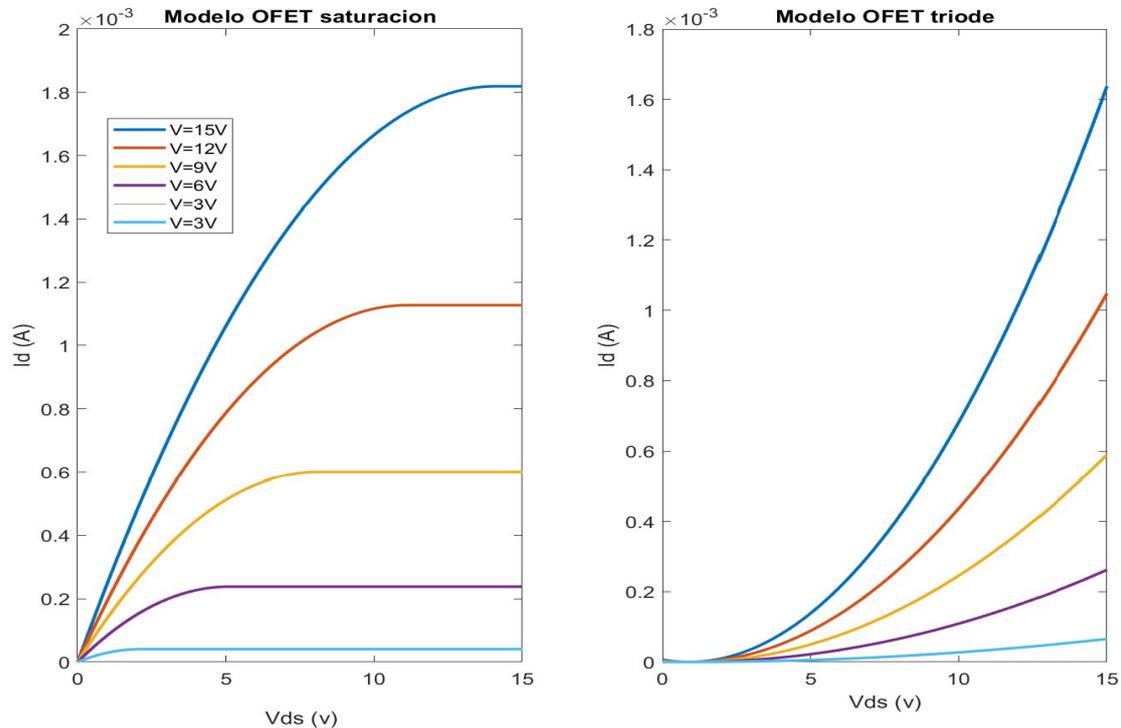
**Figura 10** Grafica del modelo OFET en triode con diferentes valores de  $V_{GS}$ .

Para la figura 10, el modelo OFET se comporta casi de forma lineal en cada variación de  $V_{GS}$  haciendo que se grafique seis diferentes  $I_D$  de igual forma, esto da a entender que el valor de  $V_{GS}$  entre mas alto sea se genere una mayor pendiente de  $I_D$  y cuando  $V_{GS}$  es menor la pendiente en  $I_D$  es menor.



**Figura 11** Grafica del modelo OFET en saturación y corte de la señal triodo.

La figura 11 especifica desde que punto el OFET se estabiliza con diferentes valores de  $V_{GS}$  y valor constante en  $V_{DS}$ , esto da un punto de referencia donde el OFET se estabiliza. Los puntos de corte y estabilización del modelo OFET son los siguientes:



**Figura 12** Graficas del modelo OFET en saturación y triodo respectivamente.

Con los anteriores datos y graficas se verificó el buen funcionamiento del modelo OFET y se descarta algún error de modelo o de simulación realizada para el análisis en DC, estos permitieron pasar al siguiente proceso de aplicación que es el fenómeno de temperatura, en este paso se añadió al modelo un efecto de temperatura  $\mu(T)$  donde la movilidad se ve afectada por la temperatura, con ello implica un cambio en  $I_D$  teniendo en cuenta las ecuaciones (6) y (7).

La movilidad del portador es el parámetro vital para la simulación numérica de las características eléctricas en dispositivos semiconductores. Para captar la dependencia de movilidad en temperatura, dopaje y campo eléctrico (Jose et al., 2016). La ecuación de movilidad vinculada con la temperatura se tomó del artículo publicado el 2016 con el título de Analysis of Temperature Effect on MOSFET Parameter using MATLAB.

$$\mu(T) = \mu(T_r) \left( \frac{T}{T_r} \right)^{k_\mu} \quad (8)$$

Donde,

T = Temperatura absoluta

Tr = temperatura ambiente

kμ = Parámetro de ajuste con valor típico de 1.5

μ(Tr) = Temperatura de referencia (300K) = 0.14 m<sup>2</sup> /v.s

Para implementar este efecto de temperatura en el modelo OFET, se reemplaza el parámetro de μ en las ecuaciones (6) y (7) por el parámetro de μ(T) resultante de la ecuación (8), dando como resultado el siguiente modelo OFET con efecto de temperatura.

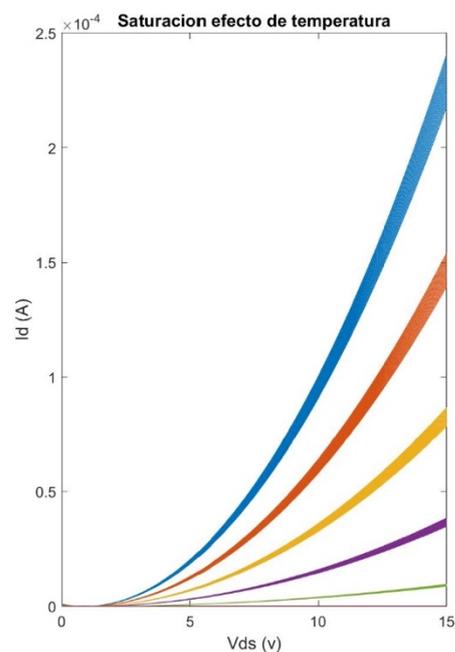
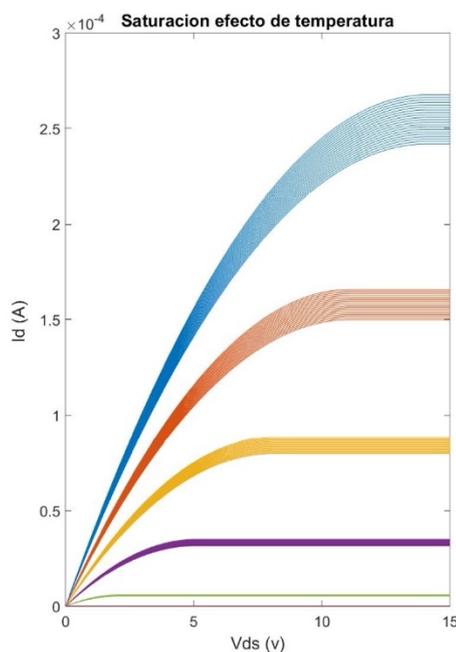
$$i_d = \frac{W}{L} (\mu(T)) Cox \left( (V_{GS} \cdot V_{DS}) - V_t \cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right) \quad (9)$$

La ecuación (9), es el modelo OFET con efecto de temperatura en saturación.

$$i_d = \frac{W}{2L} (\mu(T)) Cox (V_{GS} - V_{DS})^2 \quad (10)$$

La ecuación (10), es el modelo OFET con efecto de temperatura en triode.

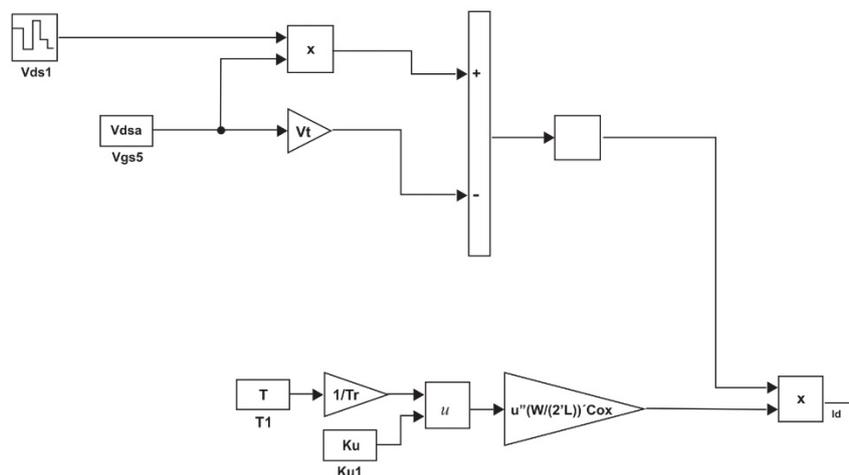
Como resultado de la implementación del efecto de temperatura en el modelo OFET se presenta a continuación como la temperatura afectar a la  $I_d$ . En la siguiente grafica se hizo variar la temperatura absoluta desde 15°C en pasos de 1°C hasta 35°C.



**Figura 13** Corriente  $I_D$  del modelo OFET en saturación y triode con efecto de temperatura.

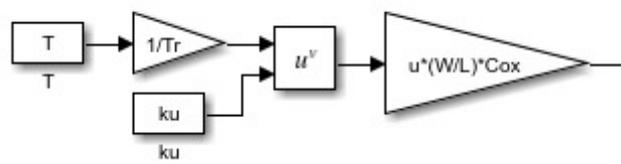
El efecto de temperatura en el modelo OFET hace que la  $I_d$  tenga una variación en micro amperios, la temperatura absoluta es directamente proporcional a la movilidad por esta razón cuanto mas alta sea la temperatura mayor movilidad habrá, lo que significa que tendrá más conductividad eléctrica.

Para obtener el modelo OFET estructurado por medio de un diagrama de bloques basado en el modelo OFET se implementó el modelo en Simulink de la siguiente manera:



**Figura 14** Diagrama de bloques del modelo OFET triode Con efecto de temperatura en Simulink.

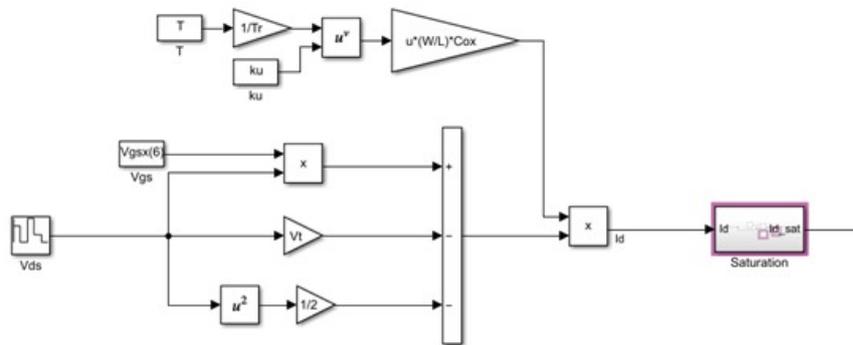
A continuación, se añadió al modelo OFET de Simulink el efecto de temperatura en diagrama de bloques reemplazando el valor  $\mu$  por  $\mu(T)$  que es la movilidad con efecto de temperatura, igual que en las ecuaciones (9) y (10). Por lo tanto, el diagrama de bloques se conformó de la siguiente manera:



**Figura 15** Diagrama de bloques del efecto de temperatura.

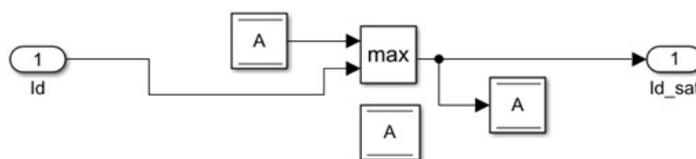
De igual manera, se desarrolló la implementación del modelo OFET en saturación utilizando la ecuación (8) dentro de la ecuación (10).

Los valores de cada parámetro se especifican en el tabal 7y tabla 8.



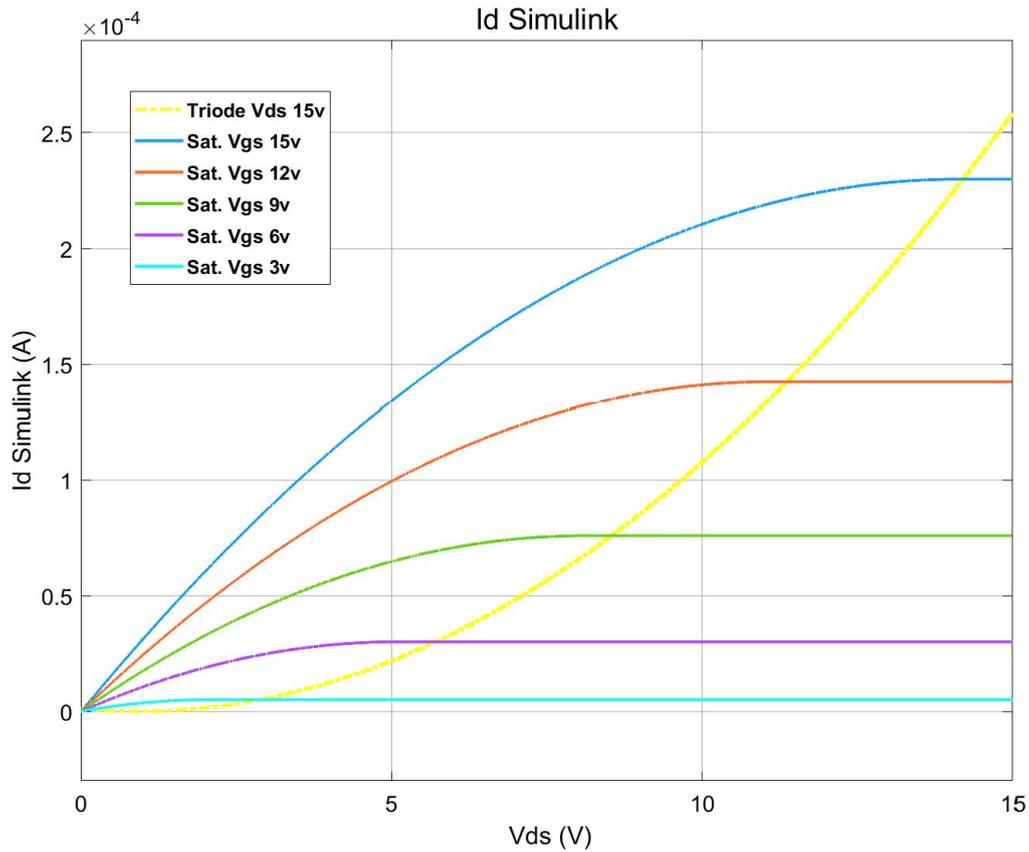
**Figura 16** Diagrama de bloques del modelo OFET en saturación con efecto de temperatura en Simulink.

En esta etapa se utilizó al igual que en la figura 14, los mismos bloques a excepción del bloque de saturación, este bloque de saturación evalúa la  $I_d$  de entrada haciendo una comparación entre  $I_{d n}$  y  $I_{d n-1}$  de la cual toma el valor máximo dando así una señal de  $I_d$  saturada y asignando el valor máximo a la variable **A**, para posteriormente repetir el mismo proceso con todos los valores de  $I_d$ , este bloque de saturación se utilizó para el MOSFET como también para el OFET ya que al llegar a su punto máximo de corriente de drenaje, empiezan a decaer porque no existe ningún parámetro en la ecuación que especifique su punto máximo de saturación y lo estabilice, A continuación, se presenta el diagrama de bloques interno que contienen el bloque de saturación:



**Figura 17** Diagrama de bloques interno del bloque de saturación utilizado en la figura 15.

En la siguiente figura se puede evidenciar el resultado que arroja Simulink en el diagrama de bloques de la  $I_D$  frente al  $V_{DS}$ .

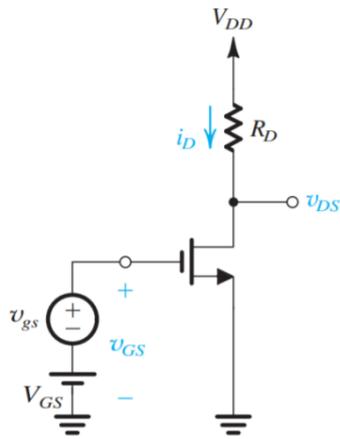


**Figura 18** Grafica de  $I_D$  frente a  $V_{DS}$  en simulink

Los valores y datos que arrojo Simulink son iguales a los de la simulación en script en Matlab, esto tiene sentido porque se implementó el mismo modelo de OFET en diagrama de bloques, todo esto con el propósito de obtener el modelo en diagrama de bloques en Simulink y así tener compatibilidad con SPICE y softwares basados en SPICE como Multisim y OrCAD.

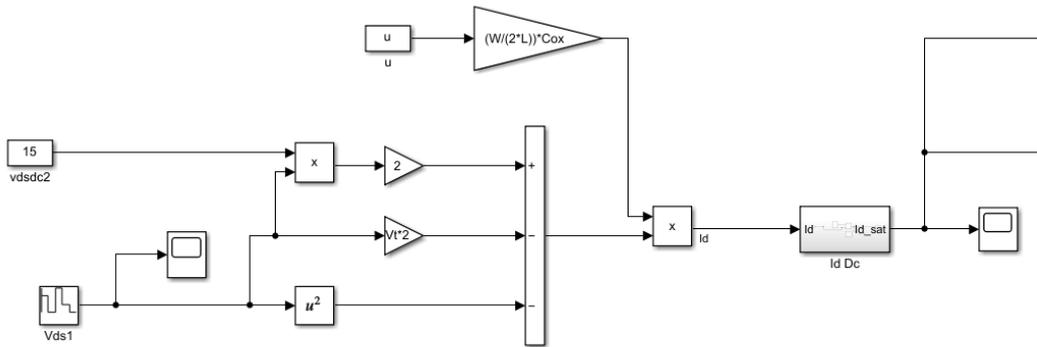
### 4.3 Fase 3: Modelo Amplificador

Para el modelo del amplificador se tomó como referencia el libro de circuitos microelectrónicos de Adel S. Sedra, donde en el capítulo 7 especifica un modelo de amplificador con MOSFET, con sus respectivas ecuaciones y funcionamiento. (Adel S. Sedra, 2015)



**Figura 19** Modelo referencia del libro *Circuitos Microelectronicos Adel S. Sedra* figura 7.10

El circuito amplificador con MOSFET realizado en Simulink al igual que el modelo OFET, en la siguiente figura se presenta la respectiva simulación.



**Figura 20** Simulación del amplificador referencia del libro *Circuitos microelectrónicos de Adel S. Sedra*

Los valores de voltaje AC y DC, se tomaron de la referencia del libro al igual que el valor de la resistencia y el MOSFET.

Donde  $V_{GS}$  toma un valor de 15v,  $V_{DS}$  de 5v,  $R_1$  de 100k ohm y un  $V_{DD}$  de 5v.

A continuación, se presenta como se desarrolló el análisis del amplificador para encontrar los valores correspondientes y necesarios de  $V_{DS}$ ,  $V_{GS}$  y  $V_{gs}$  para poder utilizar esos valores en las señales de entrada en el modelo OFET en simulink y así obtener una señal  $I_d$  amplificada.

La tensión de salida  $v_{DS}$  viene dado por la siguiente ecuación:

$$v_{DS} = V_{DD} - i_D R_D \quad (11)$$

La anterior ecuación es utilizada con valores de voltaje y corriente DC.

La señal a amplificar  $v_{gs}$  en función del tiempo t, se superpone a  $V_{GS}$ , por lo tanto, el valor total de  $v_{GS}$  se comprende de la siguiente manera:

$$v_{GS}(t) = V_{GS} + v_{gs}(t) \quad (12)$$

En la ecuación (12), se suman los voltajes de  $V_{GS} + v_{gs}$  señal DC y señal AC respectivamente, dando un valor de  $v_{GS}$  que comprende a las dos señales.

El punto de polarización de corriente DC para  $I_D$  se puede encontrar estableciendo la señal  $v_{gs}$  en cero;

$$I_D = \frac{1}{2} k_n (V_{GS} - V_t)^2 = \frac{1}{2} k_n V_{OV}^2 \quad (13)$$

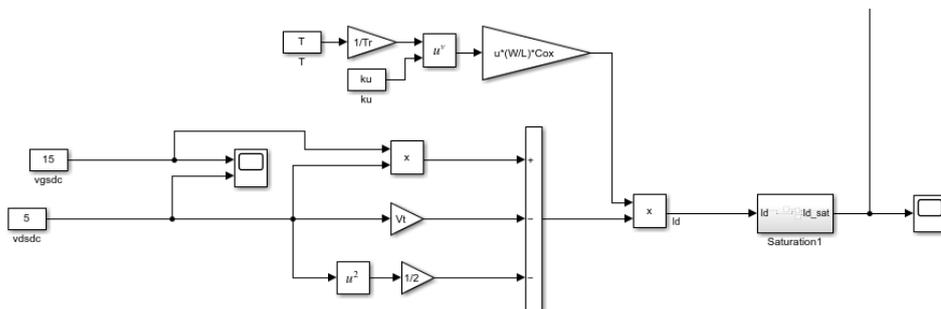
La ecuación (13), es la ecuación de corriente de drenaje de un MOSFET.

$$k_n = \frac{W}{L} (\mu) (C_{ox}) \quad (14)$$

Para asegurar el funcionamiento de la región de saturación se cumpla se debe tener en cuenta que:

$$V_{DS} > V_{OV} \quad (15)$$

Teniendo en cuenta que la Corriente  $I_D$  del circuito con OFET es diferente a la del MOSFET, se aplica la anterior teoría con valores y parámetros del modelo OFET en las ecuaciones (9) y (10), ya que estas ecuaciones son el modelo OFET.

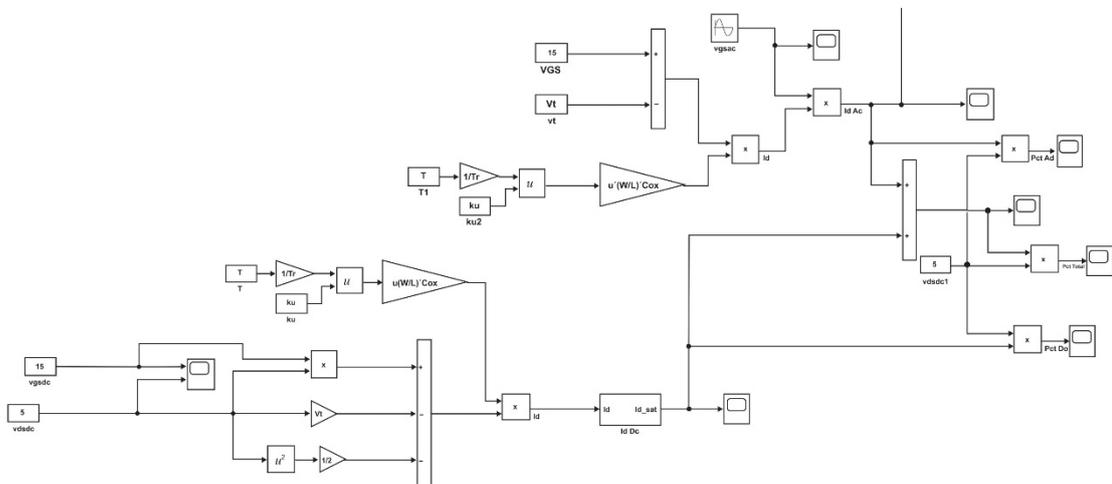


**Figura 21** Modelo OFET simulado en simulink en diagrama de bloques

Para satisfacer la condición de amplificación de señal, se tomó la ecuación (16) para obtener una  $i_D$ , donde esta  $i_D$  mencionada es la corriente de drenaje DC, más la corriente de drenaje AC.

$$i_D \approx I_D + i_d \quad (16)$$

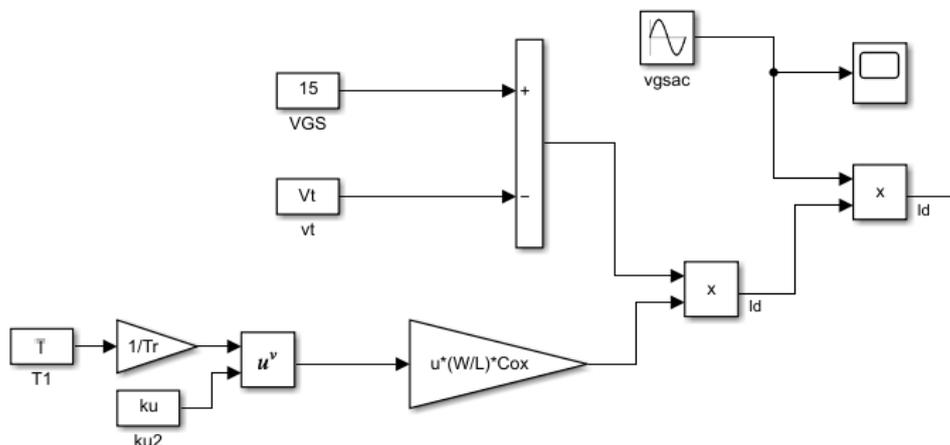
En la siguiente grafica se realizó el diagrama de bloques de la suma de estas dos corrientes, para obtener la  $i_D$  que es la señal amplificada.



**Figura 22** Simulación del amplificador en simulink con el modelo OFET sumando las señales de  $I_D$  mas  $i_d$ .

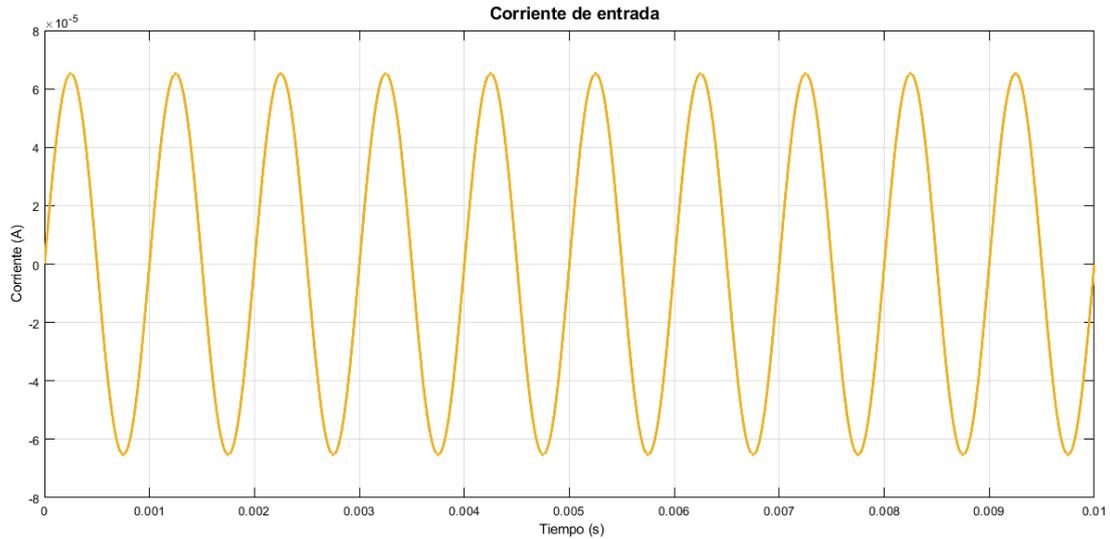
Dónde  $i_d$  es la corriente alterna resultante dada por:

$$i_d = k_n(V_{GS} - V_t)v_{gs} \quad (17)$$



**Figura 23** Simulación en diagrama de bloques de la señal  $i_d$  en simulink.

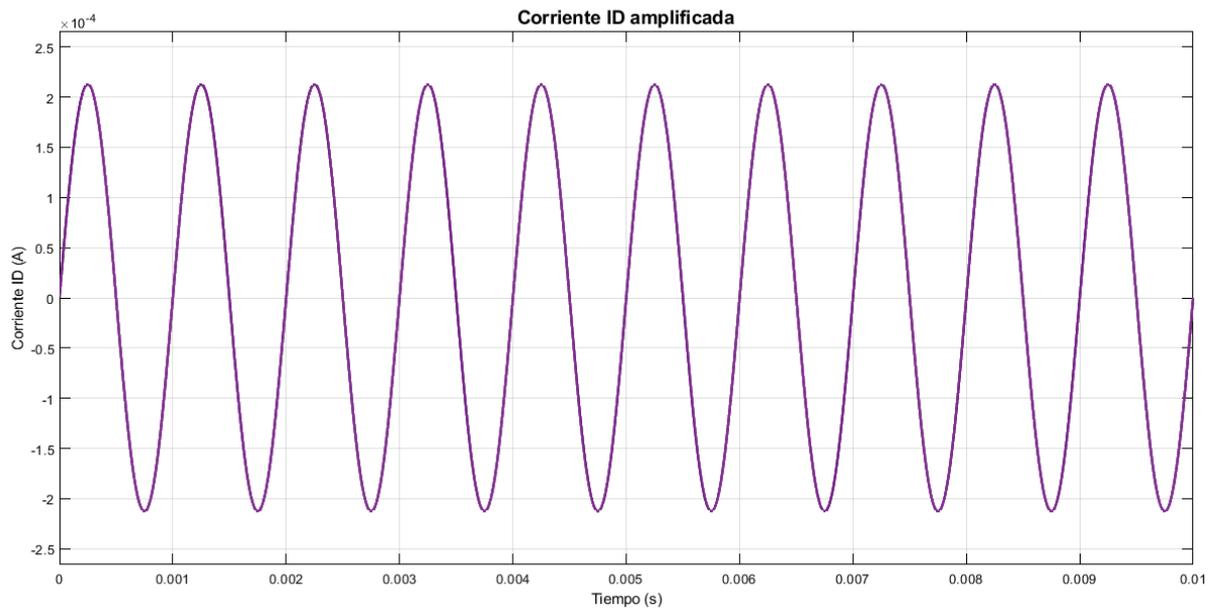
En la figura 24 se puede ver la señal  $i_d$ , antes ser sumada con la señal  $I_D$ , esto significa que la señal  $i_d$  que esta en la figura 24 es la señal sin la etapa de amplificación.



**Figura 24** Corriente  $i_d$  antes de la etapa de amplificación.

Para que la señal  $i_d$  sea amplificada debe ser sumada con la señal  $I_D$  cómo se expresa en la formula (16) y como también se muestra en la figura (22).

Cuando las dos señales de  $i_d$  mas  $I_D$  se suman, resulta una  $i_D$  que es la señal amplificada, en la siguiente figura se muestra la señal  $i_D$ .



**Figura 25** Corriente  $i_D$  o señal amplificada.

Podemos ver que en la figura 25 la amplitud de la seña aumento, esto significa que la señal fue amplificada.

El parámetro que relaciona  $i_d$  y  $v_{gs}$  es la transconductancia ( $g_m$ ) o ganancia, la cual está definida como:

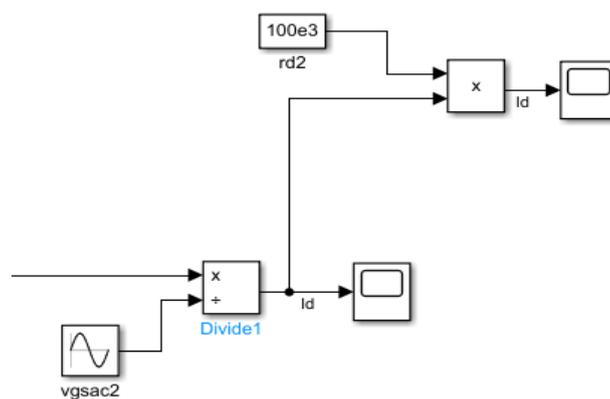
$$g_m \equiv \frac{i_d}{v_{gs}} = k_n(V_{GS} - V_t)$$

El mismo valor de transconductancia en términos de voltaje con  $V_{OV}$  se define como:

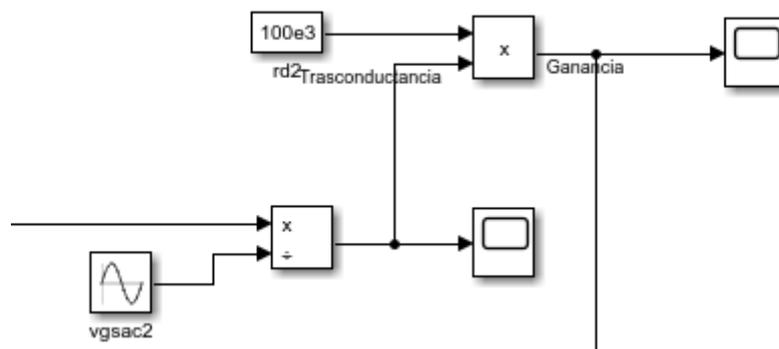
$$g_m = k_n V_{OV}$$

Por tal razón la ganancia de voltaje se puede expresar se la siguiente manera:

$$A_v \equiv \frac{v_{ds}}{v_{gs}} = -g_m R_D$$



**Figura 26** Diagrama de bloques de la transconductancia OFET.

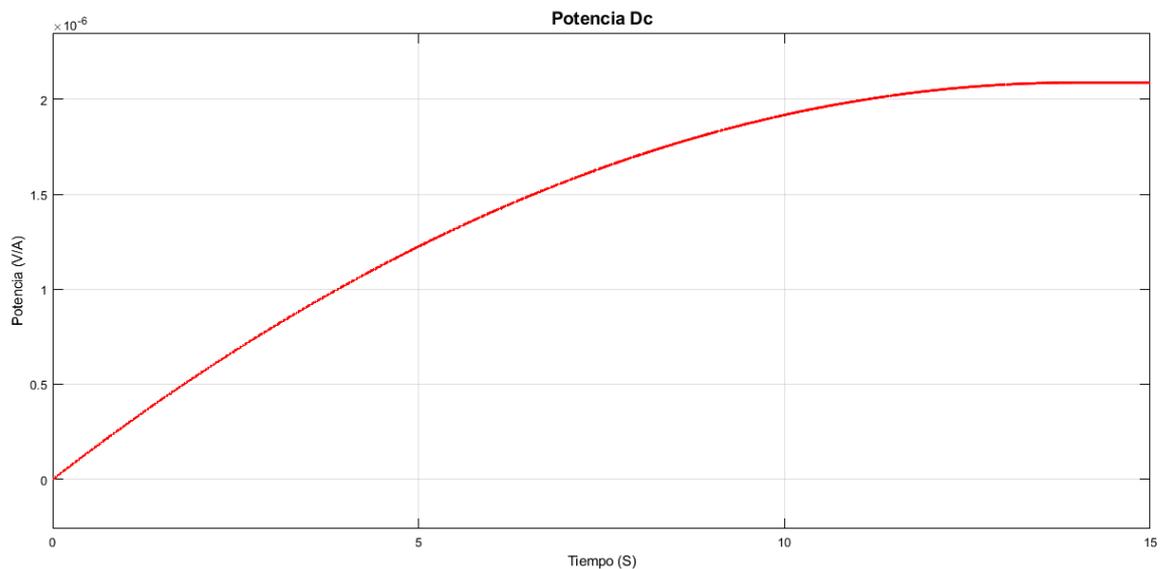


**Figura 27** Diagrama de bloques de la transconductancia MOSFET.

Los valores de transconductancia que se obtuvieron en simulink, tanto para el OFET como para el MOSFET fueron de  $32.7\mu\text{S}$  y  $0.0298\mu\text{S}$  respectivamente, esto indica que es el valor de ganancia para cada señal que se amplifique con OFET con MOSFET.

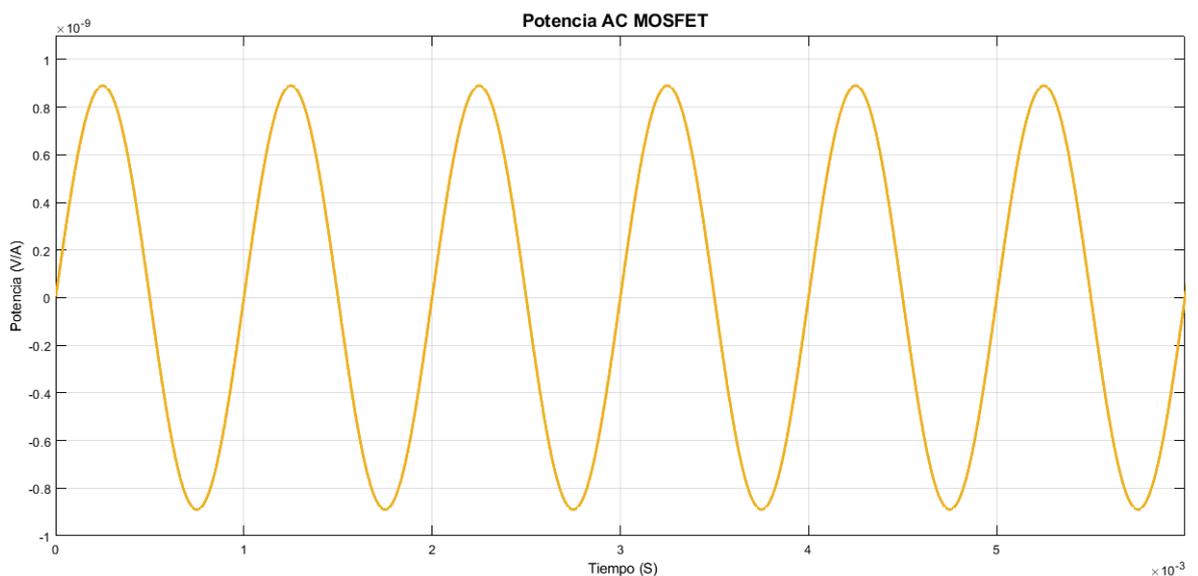
A modo de cierre, se realizó el análisis de potencia del amplificador con MOSFET y el amplificador con OFET, los valores y parámetros para cada uno de los amplificadores son iguales, a continuación, se presenta las graficas de potencia del amplificador con MOSFET.

La figura 26, representa la potencia DC del amplificador con MOSFET con un valor de  $2.1 \times 10^{-6} \text{ V/A}$ . Este valor se obtiene en el punto donde la señal DC se estabiliza después de los 11 segundos.



**Figura 26** Potencia DC del amplificador con MOSFET.

A continuación, se presenta la grafica de la potencia AC del amplificador con MOSFET con un valor pico de  $0.875 \times 10^{-9} \text{ V/A}$ . Este valor se obtiene al medir el valor pico de la señal de la figura 27.



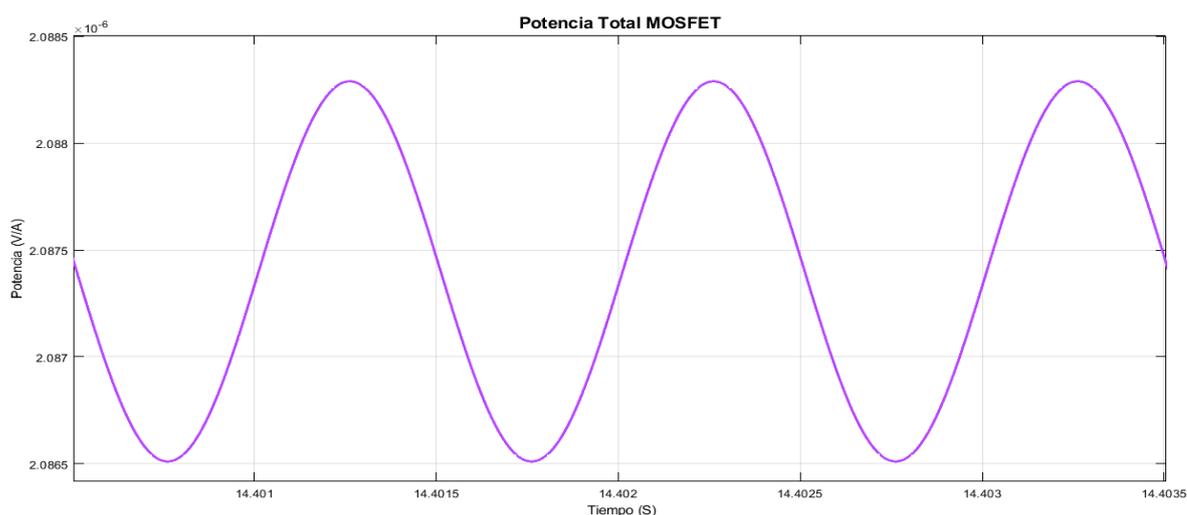
**Figura 27** Potencia AC del amplificador con MOSFET.

En la figura 28 se obtiene un valor de potencia total pico de  $2.08825 \times 10^{-6} \text{ V/A}$ , y un valor pico de la señal AC de  $0.875 \times 10^{-9} \text{ V/A}$ , o en RMS  $0.6187 \times 10^{-10} \text{ V/A}$  este valor se obtiene al medir el valor pico superior de la señal y al restar el valor pico mínimo de la señal, para posteriormente dividir el resultado entre dos, para así encontrar el valor pico de la señal.

A continuación, se presenta el calculo:

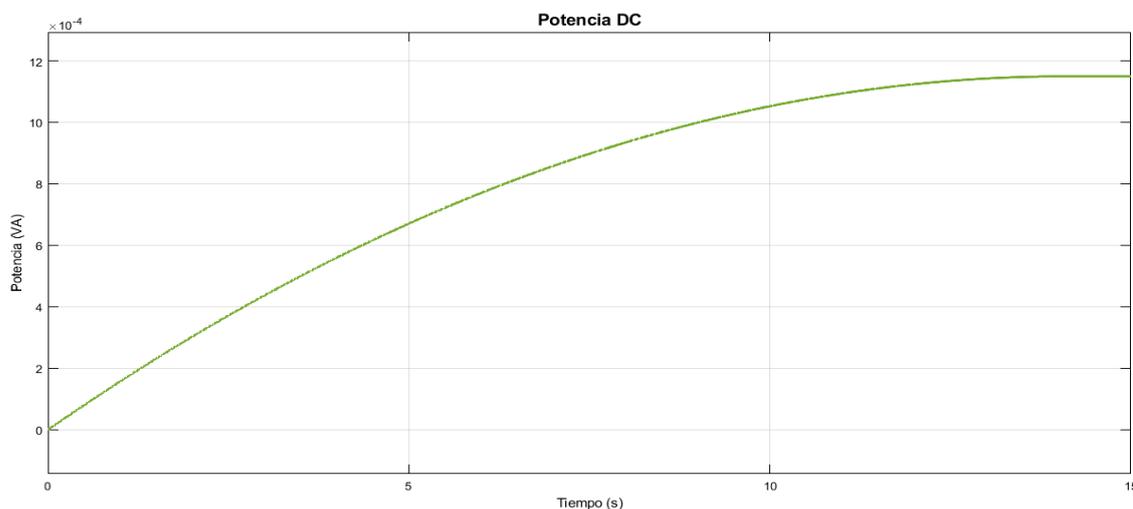
$$\frac{(2.08825 \times 10^{-6})(2.0865 \times 10^{-6})}{2} = 0.875 \times 10^{-9} \text{ V/A}$$

El proceso nombrado anteriormente es requerido por que la señal tiene la suma de la señal DC, y esta señal DC funciona como un offset haciendo que la señal se desplace hacia arriba.



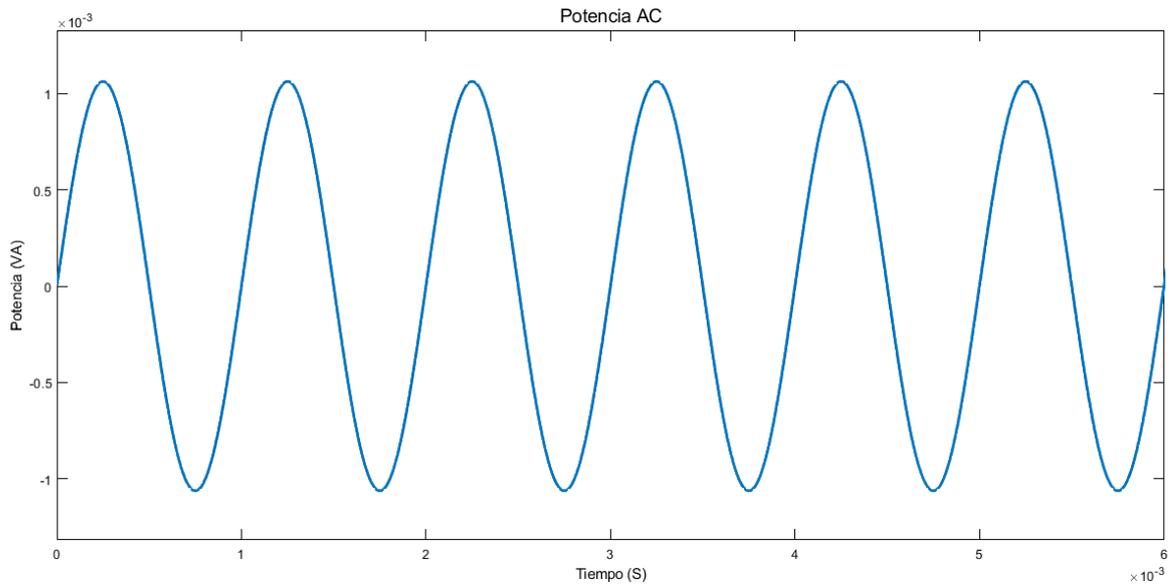
**Figura 28** Potencia total del amplificador con MOSFET.

A continuación, se presenta la grafica de la potencia DC del amplificador con OFET con un valor de  $11.5 \times 10^{-4} \text{ V/A}$ . Este valor se obtiene en el punto donde la señal DC se estabiliza después de los 11 segundos.



**Figura 29** Potencia DC del amplificador con OFET.

La figura 30, representa la potencia AC del amplificador con OFET con un valor de  $1.1 \times 10^{-3} \text{ V/A}$ . Este valor se obtiene al medir el valor pico de la señal de la figura 30.



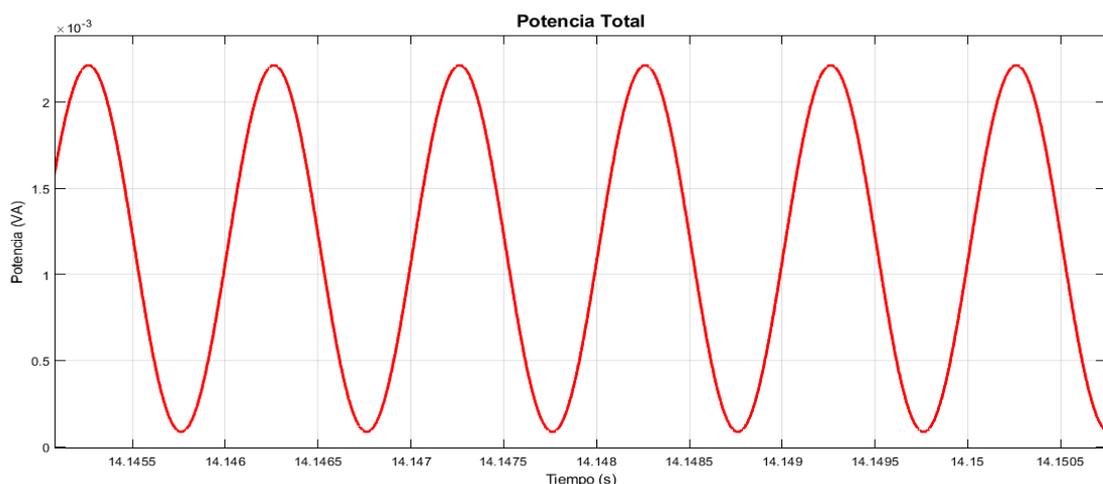
**Figura 30** Potencia AC del amplificador con OFET.

En la figura 31 se obtiene un valor de potencia total pico del amplificador con OFET de  $2.25 \times 10^{-3} \text{ V/A}$ , y un valor pico de la señal AC de  $1.1 \times 10^{-3} \text{ V/A}$  o en RMS  $0.7 \times 10^{-3} \text{ V/A}$  este valor se obtiene al medir el valor pico superior de la señal y al restar el valor pico mínimo de la señal, para posteriormente dividir el resultado entre dos, para así encontrar el valor pico de la señal.

A continuación, se presenta el calculo:

$$\frac{(2.25 \times 10^{-3})(0.1 \times 10^{-3})}{2} = 1.1 \times 10^{-3} \text{ V/A}$$

El proceso nombrado anteriormente es requerido por que la señal tiene la suma de la señal DC, y esta señal DC funciona como un offset haciendo que la señal se desplace hacia arriba.



*Figura 31 Potencia total del amplificador con OFET.*

## 5 Conclusiones

El desarrollo de esta investigación permitió indagar, entender los parámetros y funcionamiento de un OFET, abriendo así la posibilidad de predecir y modelar el comportamiento de estos, ya que la fabricación de estos dispositivos electrónicos en el sur de Colombia todavía no es posible y carece de reportes experimentales tanto como de diseño de modelos, aportando de manera significativa nuevos avances de investigación en la región.

El modelo OFET que se realizó en esta investigación aporta en futuros usos y diseños, incorporando el efecto de temperatura y modelamiento en diagrama de bloques en Simulink para una fácil compatibilidad con simuladores basados en lenguaje SPICE, esto permite obtener un mayor análisis con diferentes herramientas de otros softwares.

La variación de ancho de canal y capacitancia del modelo OFET permitió establecer valores que mejoren el modelo, dejando un valor de 30mm en el ancho del canal,  $12.2nF/Cm^2$  en el valor de capacitancia y  $1Cm^2/Vs$  en la movilidad, estos valores permiten determinar la corriente de drenaje que en comparación con otros transistores, este modelo se encuentra dentro de los datos promedios en valores de corriente, permitiendo competir con varios modelos y también poder ser utilizado en futuras investigaciones y mejoras de diseño.

El funcionamiento del modelo OFET arroja resultados similares a otros transistores no orgánicos reportados en artículos científicos como como: Low-Voltage Poly(3-Hexylthiophene)/Poly(Vinyl Alcohol) Field-Effect Transistor and Inverter, Solution Processable Low-Voltage Organic Thin Film Transistors with High-k Relaxor Ferroelectric Polymer as Gate Insulator, Ultralow-Voltage Solution-Processed Organic Transistors With Small Gate Dielectric Capacitance (Feng et al., 2013a; Li et al., 2012a; MacHado & Hummelgen, 2012a) esto significa que el modelo es funcional y cumple con los parámetros necesarios para la etapa de amplificación, en otras palabras, el diseño, permite modificar, mejorar y simular nuevos OFETs.

El modelo OFET en conjunto con el amplificador cumple con la etapa de amplificación de señales pequeñas, esto significa que puede obtener un buen desempeño en preamplificadores, esto abre la puerta a diseños de preamplificadores con materiales orgánicos.

El amplificador con MOSFET arrojó un valor de potencia de  $0.85 \times 10^{-9} V/A$  y el amplificador con OFET dio como resultado un valor de potencia de  $670 \times 10^{-6} V/A$ , estos

resultados demuestran que el amplificador con el modelo OFET tiene una ventaja en valor de potencia, ofreciendo una diferencia de 646.01uW con respecto al amplificador con MOSFET.

El amplificador con el modelo OFET, apunta a que podría ser capaz de generar un rango tensión e intensidad mas amplio que el amplificador con MOSFET, esto significa que podría entregar a la carga la potencia que se requiere.

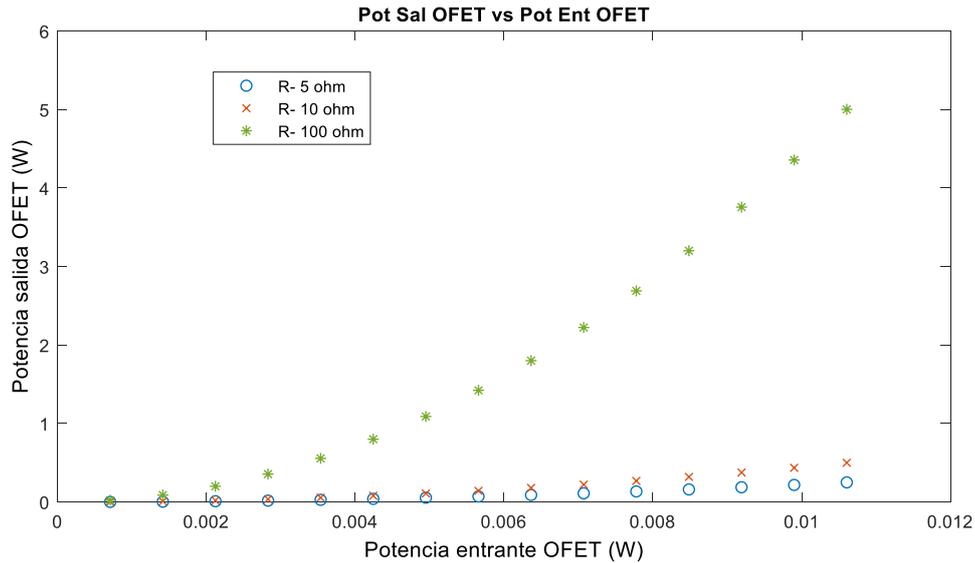
## **6 Recomendaciones**

EL modelo OFET puede ser modificado con características diferentes de movilidad, capacitancia, ancho de canal, longitud de canal, voltaje drenaje-fuente, voltaje compuerta-fuente y temperatura. Teniendo en cuenta que la modificación de estos parámetros podría afectar positiva o negativamente al modelo.

Para obtener más información sobre su comportamiento se recomienda vincular a este modelo más fenómenos como: el Efecto Early, el efecto Hall, el fenómeno de histéresis, entre otros. Estos fenómenos dan valores mucho más cercanos a la realidad para una futura construcción o mejora.

La amplificación de señales con el modelo OFET puede ser una muy buena opción frente a los MOSFET, el diseño del amplificador es un modelo básico que obtuvo buenos resultados en términos de potencia, mejorar el diseño del amplificador incrementará mucho más el rendimiento y funcionamiento de este.

El modelo OFET podría ser utilizado en pre-amplificadores de señal ya que obtuvo un valor mayor de potencia que el MOSFET.

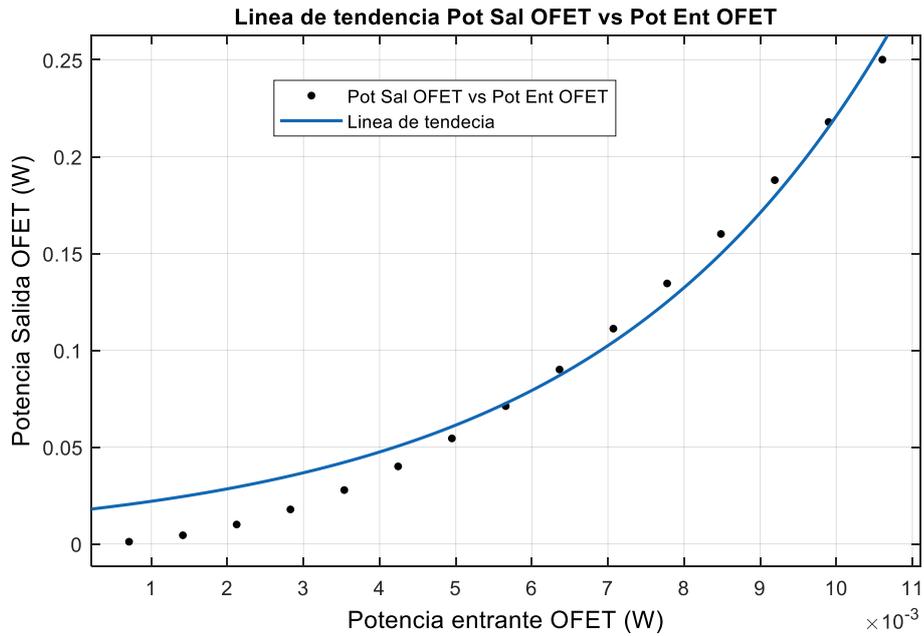


**Figura 32** Potencia de entrada vs potencia de salida del amplificador con OFET.

En la figura 32 se presenta una comparación de los datos de potencia de entrada que recibe el amplificador con OFET y la potencia de salida, en esta etapa se utilizó 3 tipos de carga con valores de 5 Ohm, 10 Ohm y 100 Ohm. Los datos que se observan en la figura permite apreciar que existe una amplificación de potencia de 0 a 5 watts donde el valor mas alto de potencia es dado por la resistencia de 100 Ohm y los valores mas bajos de potencias son dados por la resistencia de 5 Ohm.

En los valores que se observan en la grafica 32 muestran como la potencia de salida crece y tiende a ser exponencial, estos valores de crecimiento permiten decir que el amplificador con OFET esta funcionando de manera correcta según el articulo An ultra-high gain and efficient amplifier based on Raman amplification in plasma (Donaldson et al., n.d.; Vieux et al., n.d.) . en este articulo se presenta un amplificador eficiente y de alta ganancia, donde los datos de potencia de salida crecen de manera exponencial de manera similar al del amplificador con OFET.

Para obtener un mayor análisis de datos, poder generar un modelo matemático y obtener el limite de confianza se utilizó la herramienta de Matlab Curve Fitting Tool (cftool) la cual arrojó la siguiente información:



**Figura 33** Potencia de entrada vs potencia de salida del amplificador con OFET utilizando la herramienta cftool de matlab.

```

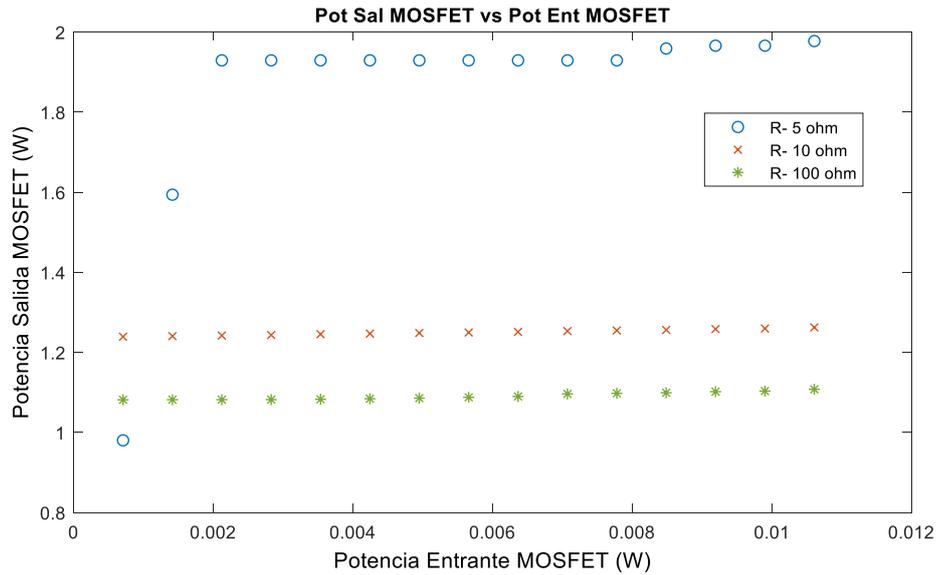
General model Exp2:
f(x) = a*exp(b*x) + c*exp(d*x)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a = 0.01703
b = 256.3
c = 0
d = 256.3

Goodness of fit:
SSE: 0.002193
R-square: 0.9766
Adjusted R-square: 0.9702
RMSE: 0.01412

```

**Figura 34** Modelo generado a partir de los datos de la figura 35

En la figura 34 se presentó el modelo con los valores de coeficientes y el limite de confianza que dio como resultado un valor del 95%.



**Figura 35** Potencia de entrada vs potencia de salida del amplificador con MOSFET.

En la figura 35 se observa los datos del amplificador con MOSFET, este amplificador no presenta un crecimiento exponencial en la potencia de salida, lo que significa que el a amplificador no esta amplificando, por lo general este tipo de amplificadores se utilizan como amplificadores de acoplamiento con el objetivo de tener la máxima transferencia de potencia entre circuitos, ya sean amplificadores, osciladores, mezcladores, etc.

Los amplificadores de acoplamiento no modifican el valor de potencia de entrada con respecto al valor de salida, lo que se tiene en cuenta principalmente es la impedancia de salida y el cambio de fase de la señal que esta pasando en ellos.(Erasmus et al., 2012)

## 7 Referencias

- Adel S. Sedra. (2015). *Circuitos Microelectronicos*. 7, 1378.
- Báez Parra, A. J. (2016). *Análisis comparativo basado en parámetros objetivos y subjetivos de diferentes modelos de preamplificadores, procesadores de frecuencia y procesadores de dinámica en sus versiones hardware y software*.
- Chemicals, A. (2018). *Chemistry for a Blue Planet; Amorphous fluoropolymer Cytop*. 1–5.
- Cho, C.-J., Chen, S.-Y., Kuo, C.-C., Veeramuthu, L., Au-Duong, A.-N., Chiu, Y.-C., & Chang, S.-H. (2018). Morphology and optoelectronic characteristics of organic field-effect transistors based on blends of polylactic acid and poly(3-hexylthiophene). *Polymer Journal*, 50(10), 975–987. <https://doi.org/10.1038/s41428-018-0087-x>
- Donaldson, R. J., Mazzarella, L., Collins, R. J., Jeffers, J., & Buller, G. S. (n.d.). *A high-gain and high-fidelity coherent state comparison amplifier*. <https://doi.org/10.1038/s42005-018-0054-z>
- Erasmó, J., Huerta, A., Díaz Méndez, A., Manuel, J., & Cortés, R. (2012). *Acoplamiento adaptable de impedancias basado en conocimiento*.

- Feng, L., Tang, W., Xu, X., Cui, Q., & Guo, X. (2013a). Ultralow-voltage solution-processed organic transistors with small gate dielectric capacitance. *IEEE Electron Device Letters*, 34(1), 129–131. <https://doi.org/10.1109/LED.2012.2227236>
- Feng, L., Tang, W., Xu, X., Cui, Q., & Guo, X. (2013b). Ultralow-voltage solution-processed organic transistors with small gate dielectric capacitance. *IEEE Electron Device Letters*, 34(1), 129–131. <https://doi.org/10.1109/LED.2012.2227236>
- Fuller, L. (2013). *SPICE Parameters for RIT MOSFET's*. Dr. Lynn Fuller.
- Garrido Ariza, J. A. (2000a). *Fabricación, caracterización y modelado de transistores de heterounión de efecto campo basados en AlGaIn/GaN*.
- Garrido Ariza, J. A. (2000b). *Fabricación, caracterización y modelado de transistores de heterounión de efecto campo basados en AlGaIn/GaN*.
- Jose, J., Nair, K. K., Ravindran, A., & Scholar, P. G. (2016). Analysis of Temperature Effect on MOSFET Parameter using MATLAB. *2016 Ijedr* |, 4(3), 1530–1533.
- Kaltenbrunner, M., Sekitani, T., Reeder, J., Yokota, T., Kuribara, K., Tokuhara, T., Drack, M., Schwödiauer, R., Graz, I., Bauer-Gogonea, S., Bauer, S., & Someya, T. (2013). An ultralightweight design for imperceptible plastic electronics. *Nature*, 499(7459), 458–463. <https://doi.org/10.1038/nature12314>
- Kaveh, O., Kheradmand-Boroujeni, B., Kasemann, D., Leo, K., & Ellinger, F. (2016). Modeling of fully printed organic field effect transistors for circuit design and simulation. *2016 13th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/SMACD.2016.7520648>
- Kheradmand-Boroujeni, B., Schmidt, G. C., Hoft, D., Shabanpour, R., Perumal, C., Meister, T., Ishida, K., Carta, C., Hubler, A. C., & Ellinger, F. (2014). Analog Characteristics of Fully Printed Flexible Organic Transistors Fabricated With Low-Cost Mass-Printing Techniques. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 61(5), 1423–1430. <https://doi.org/10.1109/TED.2014.2315038>
- Kymissis, I. (2009a). *Basic OFET fabrication* (pp. 1–27). [https://doi.org/10.1007/978-0-387-92134-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-0-387-92134-1_4)
- Kymissis, I. (2009b). *Modeling and characterization* (pp. 1–28). [https://doi.org/10.1007/978-0-387-92134-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-0-387-92134-1_6)
- Kymissis, I. (2009c). *Organic Field Effect Transistors*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-92134-1>

- Kymissis, Ioannis. (2009d). *Organic field effect transistors: theory, fabrication and characterization*. Springer.
- Kymissis, Ioannis. (2009e). *Organic field effect transistors: theory, fabrication and characterization*. Springer.
- Lee, J. H., Seo, Y., Park, Y. D., Anthony, J. E., Kwak, D. H., Lim, J. A., Ko, S., Jang, H. W., Cho, K., & Lee, W. H. (2019a). Effect of Crystallization Modes in TIPS-pentacene/Insulating Polymer Blends on the Gas Sensing Properties of Organic Field-Effect Transistors. *Scientific Reports*, 9(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36652-1>
- Lee, J. H., Seo, Y., Park, Y. D., Anthony, J. E., Kwak, D. H., Lim, J. A., Ko, S., Jang, H. W., Cho, K., & Lee, W. H. (2019b). Effect of Crystallization Modes in TIPS-pentacene/Insulating Polymer Blends on the Gas Sensing Properties of Organic Field-Effect Transistors. *Scientific Reports*, 9(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36652-1>
- Li, J., Sun, Z., & Yan, F. (2012a). Solution processable low-voltage organic thin film transistors with high-k relaxor ferroelectric polymer as gate insulator. *Advanced Materials*, 24(1), 88–93. <https://doi.org/10.1002/adma.201103542>
- Li, J., Sun, Z., & Yan, F. (2012b). Solution processable low-voltage organic thin film transistors with high-k relaxor ferroelectric polymer as gate insulator. *Advanced Materials*, 24(1), 88–93. <https://doi.org/10.1002/adma.201103542>
- Liu, Z., Kobayashi, M., Paul, B. C., Bao, Z., & Nishi, Y. (2010). Contact engineering for organic semiconductor devices via Fermi level depinning at the metal-organic interface. *Physical Review B*, 82(3), 035311. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.035311>
- MacHado, W. S., & Hummelgen, I. A. (2012a). Low-voltage poly(3-Hexylthiophene)/Poly(Vinyl Alcohol) field-effect transistor and inverter. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 59(5), 1529–1533. <https://doi.org/10.1109/TED.2012.2187904>
- MacHado, W. S., & Hummelgen, I. A. (2012b). Low-voltage poly(3-Hexylthiophene)/Poly(Vinyl Alcohol) field-effect transistor and inverter. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 59(5), 1529–1533. <https://doi.org/10.1109/TED.2012.2187904>
- Malvino, A. P. (2000). *Principios de electrónica. Sexta edición* (E. Mora, Ed.).

- Matsui, H., Hayasaka, K., Takeda, Y., Shiwaku, R., Kwon, J., & Tokito, S. (2018). Printed 5-V organic operational amplifiers for various signal processing. *Scientific Reports*, 8(1), 8980. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27205-7>
- Meli, R. (2012). *Software Measurement European Forum (Smef) 2012*.
- Muccini, M. (2006). A bright future for organic field-effect transistors. *Nature Materials*, 5(8), 605–613. <https://doi.org/10.1038/nmat1699>
- Nomura, K., Ohta, H., Takagi, A., Kamiya, T., Hirano, M., & Hosono, H. (2004). Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors. *Nature*, 432(7016), 488–492. <https://doi.org/10.1038/nature03090>
- Pérez, I. (n.d.). *Introducción a la simulación de circuitos electrónicos*. <https://doi.org/10.0>
- Pspice, O., diseño, componentes, , P., , I., Capture Cis, O., File, M., Edit, M., View , M., Place , M., Pspice, M., Options , M., Window, M., Help, M., Del Ratón, U., Del Teclado -, C., Circuito, C. U., , I., Componentes, S., Mas Comunes, F., ... Sweep, A. D. (n.d.). *OrCAD Pspice: Menús, componentes y diseño. 4.4.2.1. Generador de tensión continua Generador de señales sinusoidales moduladas en frecuencia*.
- Shamieh, C. (2015). *Electronics For Dummies, 3rd Edition*.
- Song, M., Seo, J., Kim, H., & Kim, Y. (2017). Ultrasensitive Multi-Functional Flexible Sensors Based on Organic Field-Effect Transistors with Polymer-Dispersed Liquid Crystal Sensing Layers /639/301/1005/1007 /639/301/923 /120 /123 article. *Scientific Reports*, 7(1), 2630. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02160-x>
- Thuau, D., Abbas, M., Wantz, G., Hirsch, L., Dufour, I., & Ayela, C. (2016). Piezoelectric polymer gated OFET: Cutting-edge electro-mechanical transducer for organic MEMS-based sensors. *Scientific Reports*, 6(1), 38672. <https://doi.org/10.1038/srep38672>
- Torricelli, F., Colalongo, L., Raiteri, D., Kovács-Vajna, Z. M., & Cantatore, E. (2016a). Ultra-high gain diffusion-driven organic transistor. *Nature Communications*, 7(1), 10550. <https://doi.org/10.1038/ncomms10550>
- Torricelli, F., Colalongo, L., Raiteri, D., Kovács-Vajna, Z. M., & Cantatore, E. (2016b). Ultra-high gain diffusion-driven organic transistor. *Nature Communications*, 7(1), 10550. <https://doi.org/10.1038/ncomms10550>
- Transistor orgánico de efecto de campo (ofet), un método de producción para el mismo, un circuito integrado construido a partir del mismo y sus usos*. (2001).
- Vieux, G., Cipiccia, S., Grant, D. W., Lemos, N., Grant, P., Ciocarlan, C., Ersfeld, B., Lepipas, P., Manahan, G. G., Raj, G., Gil, D. R., Subiel, A., Welsh, G. H., Wiggins, S. M., Yoffe, S. R., Farmer, J. P., Aniculaesei, C., Brunetti, E., Yang, X., ... Jaroszynski, D. A. (n.d.).

*An ultra-high gain and efficient amplifier based on Raman amplification in plasma OPEN.* <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01783-4>

Yang, S. Y., Kim, S. H., Shin, K., Jeon, H., & Park, C. E. (2006). Low-voltage pentacene field-effect transistors with ultrathin polymer gate dielectrics. *Applied Physics Letters*, 88(17), 86–89. <https://doi.org/10.1063/1.2199592>

Yi, H. T., Payne, M. M., Anthony, J. E., & Podzorov, V. (2012). Ultra-flexible solution-processed organic field-effect transistors. *Nature Communications*, 3(1), 1259. <https://doi.org/10.1038/ncomms2263>

Zhao, J., Lu, Y., & He, Q. (2012). A low noise preamplifier for AC bridges. *2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, 594–595. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2012.6251069>

 <p>UNIVERSIDAD <b>CESMAG</b> NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	<b>CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)</b>	<b>CÓDIGO:</b> AAC-BL-FR-032
		<b>VERSIÓN:</b> 1
		<b>FECHA:</b> 09/JUN/2022

San Juan de Pasto, 16 de septiembre de 2022

Biblioteca  
**REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.**  
Universidad CESMAG  
Pasto

Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado “**Comparación de la eficiencia en términos de potencia y estabilidad de un preamplificador de señales con OFET y un preamplificador de señales con FET**”, presentado por el (los) autor(es) **Yilmar Darío Benavides Jurado y Carlos Mario Hidalgo Becerra** del Programa Académico de **Ingeniería Electrónica** al correo electrónico [trabajosdegrado@unicesmag.edu.co](mailto:trabajosdegrado@unicesmag.edu.co). Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,



-----  
**Mag. CARLOS ANDRÉS CRIOLLO PAREDES**

C.C. 1.085.272.205

Programa: Ingeniería Electrónica

Cel. 3165202432

C.E. [cacriollo@unicesmag.edu.co](mailto:cacriollo@unicesmag.edu.co)

 <b>UNIVERSIDAD CESMAG</b> <small>NIT: 800.109.387-7 VIGILADA M/EDUCACIÓN</small>	<b>AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>CÓDIGO:</b> AAC-BL-FR-031
		<b>VERSIÓN:</b> 1
		<b>FECHA:</b> 09/JUN/2022

<b>INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)</b>	
<b>Nombres y apellidos del autor:</b> YILMAR DARIO BENAVIDES JURADO	<b>Documento de identidad:</b> 1.085.330.244
<b>Correo electrónico:</b> yilmarbenavides1@hotmail.com	<b>Número de contacto:</b> 3127558936
<b>Nombres y apellidos del autor:</b> CARLOS MARIO HIDALGO BECERRA	<b>Documento de identidad:</b> 1.085.326.638
<b>Correo electrónico:</b> carlitos962013@gmail.com	<b>Número de contacto:</b> 3166291304
<b>Título del trabajo de grado:</b> COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA EN TÉRMINOS DE POTENCIA Y ESTABILIDAD DE UN PREAMPLIFICADOR DE SEÑALES CON OFET Y UN PREAMPLIFICADOR DE SEÑALES CON FET	
<b>Facultad y Programa Académico:</b> FACULTAD DE INGENIERÍA – PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el termino en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve(mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje(mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.
- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndola indemne de cualquier reclamación

 <p>UNIVERSIDAD <b>CESMAG</b> NIT: 800.109.387-7 VIGILADA Mineducación</p>	<b>AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>CÓDIGO:</b> AAC-BL-FR-031
		<b>VERSIÓN:</b> 1
		<b>FECHA:</b> 09/JUN/2022

que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.

- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

**NOTA:** En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG, por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 19 días del mes de 09 del año 2022

 Firma del autor	 Firma del autor
YILMAR DARIO BENAVIDES JURADO	CARLOS MARIO HIDALGO BECERRA
Firma del autor	Firma del autor
Nombre del autor:	Nombre del autor:
 <hr/> Mag. CARLOS ANDRÉS CRIOLLO PAREDES	