



## **UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIOPÁEZ**

### **AMPLIFICADOR DE RADIO FRECUENCIA DE POTENCIA PARA FUNCIONAMIENTO DE VATÍMETROS EN EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

**Autores:**

Ramón Núñez

C.I: V-24.470.106

**Tutor**

Ing. Rainier Blanco

C.I: V-11.556.607

Urb. Yuma II, Calle N°3, Municipio San Diego  
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394



**REPUBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELAS: COMPUTACIÓN, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**AMPLIFICADOR DE RADIO FRECUENCIA DE POTENCIA PARA  
FUNCIONAMIENTO DE VATÍMETROS EN EL LABORATORIO DE  
COMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

**Proyecto del Trabajo de Grado para optar al título de  
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**Autores:**

Ramón Núñez

C.I: V-24.470.106

**Tutor(a):**

Ing. Rainier Blanco

C.I: V-11.556.607

**San Diego, Octubre de 2019**



PLI-002 2019-2CR (IG)

Valencia, 19 de Julio de 2019

Ciudadanos:  
Ranton Nuñez  
C.I:24.470.105  
Presente-

Cumplo con el honor de que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2019 de fecha 19-07-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **AMPLIFICADOR DE RADIO FRECUENCIA DE POTENCIA PARA FUNCIONAMIENTO DE VATÍMETROS EN EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PAÉZ** Presentado por usted como requisitos para optar al título de Ingeniero en Telecomunicación.

Se ratifica la designación del Ing. Rainier Blaco C.I:11.556.697 y la Ing. Alicia De Pizzola C.I: 4.598.580 como Tutores Académicos y Metodológicos que les asesoraran en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Prof. Luis Lira

Decano de la Facultad de Ingeniería



cc. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (I.)

LMC



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE TELECOMUNICACIONES

### ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Rainier Blanco portador de la cédula de identidad N° 11.556.607, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el(los) ciudadano(s) Ramón Nuñez, portador de la cédula de identidad N° 24.470.106, respectivamente, titulado **AMPLIFICADOR DE RADIO FRECUENCIA DE POTENCIA PARA FUNCIONAMIENTO DE VATIMETROS MODELO 43 DEL LABORATORIO DE COMUNICACIONES DE LA UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ** presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los dos días del mes de octubre del año dos mil diecinueve.

Ing. Rainier Blanco.  
C.I. 11.556.607

## **AGRADECIMIENTO**

***Ramón J., Nuñez M.***

*A Dios*

*Por siempre brindarme un día mas para seguir adelante.*

*A mis padres ,*

*Por su incondicional apoyo.*

*A la Universidad de Carabobo y a la Universidad Jose Antonio Paez,*

*Una por formarme, la otra por dar ese empujón extra.*

*Al resto,*

*Por influir de una forma u otra en este largo camino.*

*Por último, a mi por tanto esfuerzo y dedicación.*

## **DEDICATORIA**

*A Dios: Por darme la vida y estar siempre conmigo, guiándome en mi camino.  
A mis Padres: Dicen que la mejor herencia que nos pueden dejar los padres son los estudios, sin embargo no creo que sea el único legado del cual yo particularmente me siento muy agradecido, mis padres me han permitido trazar mi camino y caminar con mis propios pies. Ellos son mis pilares de la vida, les dedico este trabajo de titulación. Gracias*

*A mis tías: Que con su apoyo también formaron parte muy importante durante todo este camino, que a pesar de que no fue un camino fácil siempre estuvieron presente cuando las necesite de verdad muy agradecido de ustedes Yaritza Morales, Mirla Morales y Yauris Morales. Infinitamente orgulloso de tenerlas.*

*A mis abuelos: Gracias a Dios por permitirme conocer a mis abuelos, gracias a la vida por permitirme **disfrutar de ustedes**, gracias a mi abuelo y abuela. A mi abuelo que hoy no se encuentra con nosotros simplemente gracias por la familia que me diste.*

*A mis amigos: Antes de hablar sobre un amigo, es vital decir lo que estos traen y significan par nuestra vida; reconocer y aceptar lo que es la amistad, saber cada cosa sobre esta, reconocerla cuando es sincera y saber cuándo no. Durante este hermoso camino hice muchos amigos que de una u otra forma marcaron mi paso por esta etapa de mi vida, para ustedes Lino Méndez, Ignacio Bragado, Pedro Pinto, Orlando Delgado, Andrés Castillo muchas gracias. Y quien no se puede quedar por fuera es una amiga muy especial que no terminaría en estas páginas de escribir todo lo que hemos pasado, a ti muchas gracias Paola Di Rauso*

## ÍNDICE GENERAL

<b>CONTENIDO</b>		<b>Pág.</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....		x
<b>ÍNDICE DE GRÁFICOS</b> .....		xi
<b>ÍNDICE DE CUADRO</b> .....		xi
<b>RESUMEN</b> .....		xii
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....		1
<b>CAPÍTULOS</b>		
<b>EL PROBLEMA</b>		
<b>I</b>		
1.1 Planteamiento del Problema.....		2
1.2 Formulación del Problema.....		3
1.3 Objetivos de la Investigación.....		3
1.3.1 Objetivo General.....		3
1.3.2 Objetivos Específicos.....		3
1.4 Justificación del problema.....		4
1.5 Alcance.....		5
<b>II MARCO TEÓRICO</b>		
2.1 Antecedentes de la Investigación.....		6
2.2 Bases Teóricas.....		9
2.1.1 Amplificador de Potencia.....		9
2.2.2 Estabilidad.....		10
2.2.3 Ganancia de Potencia.....		10
2.2.4 Clases de Operación.....		11
2.2.4.1 Clase A.....		11
2.2.4.2 Clase B.....		11
2.2.4.3 Clase AB.....		12
2.2.4.4 Clase C.....		12
2.2.5 Red de Polarización.....		14
2.2.6 Red de Adaptación.....		14
2.2.6.1 Redes de adaptación tipo L.....		15
2.2.6.2 Transformación de Imperancia.....		15
2.2.7 Filtro Pasivo.....		15

2.2.7.1 Filtro pasa bajo pasivo.....	16
2.2.7.2 Normalización.....	17
2.2.8 Acoplador direccional.....	17
2.2.9 Transistor de efecto de campo: FET.....	17
2.2.10 Mosfet.....	18
2.2.11 Modos de operación.....	18
2.2.12 Voltaje umbral.....	19
2.2.13 Disipación de potencia.....	19
2.2.14 Resistencia térmica.....	20
2.2.15 Software de diseño.....	21
2.3 Definición de Términos.....	22
<b>III MARCO METODOLÓGICO</b>	
3.1 Tipo de Investigación.....	27
3.2 Diseño de Investigación.....	28
3.3 Nivel de la Investigación.....	28
3.4 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.....	28
3.5 Población y muestra.....	29
3.6 Fases Metodológicas.....	29
<b>IV RESULTADOS</b>	
4.1 Diagnóstico de las conexiones e interoperabilidades de entrada y salida que conforman a los vatímetros del laboratorio de comunicaciones de la universidad José Antonio Páez.....	31
4.1.1 Resultados obtenidos mediante la aplicación de la técnica de la entrevista...	31
4.1.2 Análisis general de los resultados obtenidos por medio de la entrevista.....	33
4.2 Evaluación de las configuraciones y/o tipos de amplificadores .....	34
4.3 Diseño del prototipo de amplificador de radio frecuencia de potencia.....	41
4.4 Estudio de factibilidad del proyecto.....	48
<b>CONCLUSIONES</b> .....	51

<b>RECOMENDACIONES</b> .....	53
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURAS</b>	<b>Pag</b>
1 Diagrama general de un amplificador de Potencia.....	9
2 Esquema general de una red de dos puertos con impedancias de fuente y carga.....	11
3 Polarización de un amplificador Clase C.....	12
4 Esquemático simple de un amplificador Clase C.....	13
5 Ciclos de conducción de las diversas clases de amplificadores.....	13
6 Comparación entre filtros BUTTERWOTH, CHEBYSHEV, BESSEL y ELÍPTICO.....	16
7 Especificaciones generales para un filtro pasa bajos.....	16
8 Representación circuital del flujo de corriente de la unión al ambiente	21
9 Sistema característico del amplificador de potencia.....	41
10 Circuito de prueba con transistor 2SCR542P.....	42
11 Gráfica característica realizada por el fabricante.....	43
12 Circuito para probar la respuesta en frecuencia del dispositivo.....	44
13 Circuito básico del amplificador clase c sin red de adaptación de salida ni de entrada.....	45
14 Amplificador de potencia completo con red de adaptación de entrada y salida.....	46

## ÍNDICE DE GRÁFICO

### GRÁFICO

1	Distintas corrientes aplicadas a la base del transistor.....	43
2	Resultante del circuito de respuesta en frecuencia.....	44
3	Impedancia de salida y entrada del amplificador.....	46
4	Resultado de amplificación por el amplificador de potencia clase C.....	47
5	Parámetros del transistor.....	48

## ÍNDICE DE CUADRO

<b>CUADRO</b>		<b>Pag</b>
1	Entrevista Ing. Centeno.....	31
2	Presupuesto.....	49



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELAS: COMPUTACIÓN, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**AMPLIFICADOR DE RADIO FRECUENCIA DE POTENCIA PARA  
FUNCIONAMIENTO DE VATÍMETROS EN LA UNIVERSIDAD JOSÉ  
ANTONIO PÁEZ**

**Autores:** Ramón Núñez

**Tutor:** Rainier Blanco

**Fecha:** Octubre 2019

**RESUMEN**

El laboratorio de Comunicaciones de la Universidad José Antonio Páez presenta fallas al entregar potencia para que funcionen los vatímetros. La realización de las prácticas para los estudiantes es importante para su desempeño laboral. Es por ello que la presente investigación tuvo como objetivo diseñar un amplificador de radio frecuencia de potencia para el funcionamiento de vatímetros para el laboratorio, de esta manera suministrar la potencia mínima requerida para mejorar el funcionamiento de los vatímetros “Model 43” y así serán capaces de emitir una lectura mucho más precisa y confiable a la hora de realizar mediciones. Se hizo uso del software Spice para simular el circuito electrónico y para diseñar el amplificador de radio frecuencia, debido a que se está familiarizado con él y es más preciso que otros. Para cumplir con los objetivos se aplicó una entrevista al personal más cercano al laboratorio quien suministró información que justifica la problemática y su pronto diseño. Así mismo, la investigación fue de tipo proyecto factible, sustentada en un diseño de campo y un nivel descriptivo.

**Descriptor: Amplificador, potencia, diseño**

## INTRODUCCIÓN

Actualmente el laboratorio de comunicaciones de la universidad José Antonio Páez cuenta con una dotación de vatímetros de alta gama los cuales no pueden ser utilizados ya que los generadores con que se cuenta no entregan la potencia mínima requerida por dichos vatímetros. Es por esta razón que se ve la necesidad de diseñar un amplificador de radio frecuencia de potencia que nos permita amplificar la potencia entregada por los generadores hasta cumplir con los parámetros de potencia que exigen los vatímetros.

El amplificador de radio frecuencia tiene como función sintonizar de forma correcta la señal y amplificarla a fin de que al llegar al detector tenga una intensidad lo suficientemente fuerte. Los amplificadores de potencia se usan cuando la eficiencia y la salida de potencia de un circuito amplificador son las consideraciones importantes. Los diversos tipos de amplificadores de potencia se identifican por sus clases de operación, es decir, clases A, B, AB,C. Salvo los de clase A, los demás tipos de amplificadores se diferencian fácilmente de los de señal débil por sus configuraciones, sus métodos de operación o por ambos. No hay una línea definida de separación entre los amplificadores clase A y los de señal débil, la elección de términos depende de la intención del diseñador.

Para alcanzar el objetivo, el trabajo de grado se encuentra integrado en cuatro (4) capítulos. En el Capítulo I se abordará el planteamiento del problema, los objetivos específicos de la investigación y la justificación, y alcance, que motiva el proyecto. A continuación, en el Capítulo II, los antecedentes, bases teóricas y definición de términos., en el Capítulo III, se describirá la metodología utilizada para realizar el proyecto, además, se explica las técnicas y los instrumentos aplicados para recolectar los datos. Finalmente, el Capítulo IV, se distinguirán los resultados, conclusiones y recomendaciones.

## **CAPÍTULO I**

### **EL PROBLEMA**

#### **1.1 Planteamiento del problema.**

Dentro de los objetivos de la formación profesional en el campo de la ingeniería debe estar el permitir a los estudiantes desde las primeras etapas, experimentar la ciencia y la tecnología de tal manera que les de la capacidad de una activa construcción de ideas y de explicaciones que conllevara al aumento de las oportunidades para desarrollar, aprovechar y generar nuevas tecnologías. En las últimas décadas se han adelantado investigaciones sobre las prácticas de laboratorio, que permiten renovar los trabajos prácticos tradicionales (Hodson; et al 1994); generando un amplio consenso en torno a la orientación del trabajo experimental como una actividad investigativa que juega un papel primordial en la familiarización de los estudiantes con la metodología científica. Por lo que es vital que la universidad cuente con una buena variedad de equipos en los laboratorios a fin de garantizar una buena y clara enseñanza teórico-prácticas, laboratorios y proyectos finales de cursos en el fortalecimiento de los conceptos y el acercamiento de los estudiantes a la realidad de su vida profesional.

El laboratorio de comunicaciones de la universidad José Antonio Páez fue creado con la finalidad de desarrollar el contenido práctico de las materias Comunicaciones I Y II. En un principio contaban con equipos adaptados a la realidad tecnológica del momento donde se podían llevar a cabo gran cantidad de prácticas sin ningún problema.

Hoy en día el laboratorio de comunicaciones de la universidad cuenta con una dotación de Vatímetros model "43" que se encuentran inactivos debido a que los generadores con que cuenta el laboratorio no entregan la potencia mínima requerida por estos equipos y no han sido reemplazados ya que el presupuesto que se viene manejando en los últimos años en la universidad no permite el reemplazo o adquisición de nuevos generadores que entreguen la potencia requerida por los vatímetros.

Así mismo, los estudiantes no pueden hacer las prácticas, lo que implica que culminan sus actividades sin cubrir ese vacío cognoscitivo que se presenta actualmente por no contar con el uso de dichos vatímetros. Por lo cual nace la idea de diseñar un amplificador de radio frecuencia de potencia el cual permitirá hacer uso de la potencia entregada por los generadores y amplificarla hasta obtener la potencia mínima suficiente que le garantice a los vatímetros “Model 43” dar una lectura mucho más eficaz y confiable a la hora de llevar a cabo dichas prácticas donde se requiere el uso de estos equipos para abarcar el contenido práctico de las materias citadas anteriormente.

## **1.2 Formulación del problema.**

¿De qué manera se puede adecuar la señal de potencia entregada por los generadores para poder dar funcionamiento a los Vatímetros del laboratorio de comunicaciones de la universidad José Antonio Páez?

## **1.3. Objetivos de la investigación**

### **1.3.1. Objetivo general.**

Proponer el diseño de un amplificador de radio frecuencia de potencia para funcionamiento de vatímetros en el laboratorio de comunicaciones de la universidad José Antonio Páez.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Diagnosticar las conexiones e interoperabilidades de entrada y salida que conforman a los vatímetros del laboratorio de comunicaciones de la universidad José Antonio Páez.
- Evaluar las configuraciones y/o tipos de amplificadores que se ajusten a los instrumentos electrónicos (generadores y vatímetros) presentes en el laboratorio de comunicaciones.
- Diseñar un amplificador de radio frecuencia de potencia una vez diagnosticado y evaluado el que mejor se adapte a las necesidades requeridas.

- Realizar un estudio de factibilidad tecnológica, operativa, económica, social y ambiental.

#### **1.4 Justificación del problema.**

El desarrollo de este trabajo de grado garantizará una solución al laboratorio de comunicaciones de la universidad José Antonio Páez debido que mitigará la carencia de potencia que entregan los generadores mediante el diseño de un amplificador de radio frecuencia que permita hacer uso de los vatímetros. Por otra parte, el diseño de este amplificador de radio frecuencia permitirá amplificar la potencia entregada por los generadores; pues la lectura que nos entregará el vatímetro será una lectura mucho más precisa y confiable a la hora de realizar mediciones. Se hará uso de un software para simular el circuito electrónico que se usará para diseñar el amplificador, debido a que se está familiarizado con él y es más preciso que otros.

En este sentido, se puede decir que este amplificador de radio frecuencia está enfocado principalmente en hacer uso de los vatímetros del laboratorio de comunicaciones que están situados en la universidad José Antonio Páez. ya que al contar con este dispositivo se podrán realizar prácticas que hasta ahora se hace imposible de llevar a cabo por la falta de potencia entregada por los generadores existentes así como también ampliar la promoción del conocimiento por parte de esta alma mater a todo sus estudiantes de ingeniería en electrónica y telecomunicaciones

Adicionalmente, este proyecto le permitirá al autor desarrollar sus conocimientos en electrónica para el mantenimiento de equipos de telecomunicaciones y mejorar su desempeño en el ámbito profesional a la hora de realizar actividades laborales. A su vez, este dispositivo representaría un ahorro económico para la universidad José Antonio Páez yaque el garantizará la potencia mínima exigida por los vatímetros para poder ser usados, por lo cual no se deberán remplazar los generadores existentes actualmente.

Además, desde el punto de vista metodológico la investigación servirá de base y apoyo para investigaciones futuras, ofreciendo referencias bibliográficas que sirva de consulta o guía ya que representará un conocimiento confiable.

### **1.5 Alcance.**

Con la investigación se pretende llegar a crear un diseño capaz de garantizar el uso confiable y eficaz de los vatímetros, ya que ellos van a permitir ampliar un poco más nuestros conocimientos mediante la realización de prácticas que actualmente no se pueden realizar. Así mismo se busca llegar no solo a la población de estudiantes de la escuela de Electrónica y Telecomunicaciones de la universidad José Antonio Páez sino también a nivel nacional ya que este proyecto está basado en un diseño el cual puede implementarse en cualquier institución donde se realicen estudios de Electrónica y Telecomunicaciones.

## **CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO**

## 2.1 Antecedentes de la Investigación

Gómez J.(2017) presentó en la Universidad Nacional Autónoma de México un proyecto de investigación para optar por el título de Ingeniero electrónico titulado **“Diseño de un amplificador de Potencia Clase F para microondas”**. El objetivo general de esta investigación fue diseñar un amplificador de Potencia de Clase F para microondas. Para el logro del objetivo el autor realizó una recopilación de información en diversos artículos, revistas y libros de interés para conocer los diversos tipos de amplificadores. Además de hacer una simulación en un software de onda completa llegando a diseñar dos amplificadores bajo dos esquemas distintos. De los resultados obtenidos el autor concluyó que los mismos presentan parámetros comparables con aquellos amplificadores presentados en el estado de arte. Además, el autor pudo realizar una comprobación de uno de los amplificadores diseñados mediante la fabricación y caracterización del mismo en base a las mediciones hechas tanto al transistor como al amplificador.

Así mismo, Lugo (2016), presentó en la Universidad Politécnica Nacional de México un proyecto para optar por el título de Ingeniero de telecomunicaciones titulado **“Diseño de un amplificador de potencia tipo F”**. El objetivo general de esta investigación fue diseñar un amplificador topo F. para el logro de este objetivo el autor diseño, implemento y caracterizó un amplificador tipo F mediante la utilización de un transistor basado en tecnología de heteroestructura de alta movilidad (HEMT) de Nitruro de Galio (GaN), debido a que este tipo de dispositivo presenta alta eficiencia, la potencia de salida es elevada, etc. De los resultados obtenidos, el autor concluyó que la mayor parte de potencia se aprovecha en la trasmisión de la información y no en energía que se disipa en forma de calor,

trayendo así consigo alargar la vida útil de la batería de los dispositivos, lo cual es una figura de mérito que los usuarios buscan constantemente. Además, el autor concluyo que el uso de este tipo de amplificadores proporciona: la reducción de la complejidad del circuito, mayor ganancia, bajo consumo de alimentación y mayor fiabilidad.

Por su parte Hernández(2016), de la Universidad de Carabobo presento un proyecto de investigación para optar por el título de Ingeniero de telecomunicacionestitulado **“Construcción de un amplificador de potencia para un prototipo de transmisor de fm estéreo con canales de sca”**, el mismo tuvo como objetivo general realizar una inspección al prototipo transmisor de FM para conocer de qué manera se encontraban interconectados todos los módulos que lo componen y se hizo una revisión bibliográfica. Luego de haber culminado la revisión bibliográfica estableció el uso de transistores de efecto de campo del tipo MOS, específicamente el MRF137 que permitía lograr amplificar a altas escalas de potencia. Para ello, requirió que el amplificador de potencia operara en Clase C, ya que en dicha clase es donde se logra alcanzar los valores más altos de eficiencia. Luego de conocer cuáles eran las etapas necesarias para la realización de un amplificador de potencia de RF, procedió a diseñar cada una de ellas, para lo cual utilizo herramientas computacionales y diversos calculadores virtuales. En función del estudio el autor obtuvo como conclusión que debido a que el módulo sintetizador no entregaba la señal modulada con la potencia indicada en las especificaciones técnicas de diseño del transmisorFM, 12 dBm, no se pudo lograr que el equipo con la nueva etapa de potencia alcance amplificar los 20 W, que si se obtienen cuando la señal proviene del generador de señales HP, con las características antes mencionadas.

También, Tinjaca J. (2015) presentó en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia un proyecto de investigación para optar por el título de Ingeniero electrónico titulado **“Diseño de un amplificador doherthy con etapa de pre-amplificación para aplicaciones Wimax”**. El objetivo general de esta investigación fue diseñar un amplificador doherthy con etapa de pre-amplificación para aplicaciones Wimax. Para el logro del objetivo el autor adiciono una etapa de pre-amplificación con

el objetivo de incrementar los niveles de ganancia dentro de la región Doherty, donde se tiene la mayor eficiencia del amplificador. Para ello se utilizó la estrategia de extracción de parasitas para caracterizar los dispositivos GaN HEMT de Cree Inc., y la validación de los resultados por medio del software de Keysight Advanced Design System (ADS) ®. Donde se obtiene como conclusión de los resultados de las simulaciones una máxima eficiencia de potencia agregada (PAE) de 44%, potencia de salida en saturación de hasta 43dBm y valores de ganancia en la zona Doherty que superan los 20dB, lo cual al compararlo con el amplificador Doherty en su estructura básica representó un incremento mayor al 110%.

En este mismo orden de ideas, Mandujano (2014), presentó en la Universidad Pontificia Católica del Perú un proyecto de investigación para optar por el título de Ingeniero electrónico titulado; **“Diseño de un amplificador RF para comunicaciones celulares con parámetros s”**. El objetivo general de este trabajo fue diseñar un amplificador RF para comunicaciones celulares que sirva para contrarrestar la baja cobertura radioeléctrica en zona rural y/o lugares saturados de usuarios, donde son necesarios equipos sencillos y de funcionalidad práctica. Para el logro del objetivo el autor realizó un bosquejo de información identificando las causas que producen problemas de comunicación en las redes móviles, además comparó la factibilidad técnica que ofrecen los amplificadores ante los repetidores de señal. Para el diseño el autor seleccionó un transistor de tipo PHEMT. Los resultados de diseño en el software permitieron ver el comportamiento de la ganancia y el ruido en el rango de frecuencia deseado, lo que no se pudo ver con el prototipo ya que no contaba con un generador de ruido. Como conclusión el autor alcanzó los objetivos propuestos excepto que no pudo probar funcionalidad del amplificador en zonas saturadas o rurales.

Así pues, los trabajos anteriormente mencionados servirán como fundamento y apoyo para realizar el presente proyecto. Así, el trabajo realizado por Gómez J. (2017) que hizo un diseño de un amplificador de Potencia Clase F para microonda, aportó todas las especificaciones de dichos amplificadores y además de hacer una simulación en un software de onda completa llegando a diseñar dos amplificadores bajo

dos esquemas distintos. El proyecto realizado por Lugo(2016) que ofrece una investigación donde diseña de un amplificador de potencia tipo F, aportará como diseñar, implementar y caracterizar un amplificador tipo F mediante la utilización de un transistor basado en tecnología de heteroestructura de alta movilidad (HEMT) de Nitruro de Galio (GaN). Al mismo tiempo, el trabajo de grado de Hernández(2016), ofrecerá conocer de qué manera se encuentran interconectados todos los módulos que componen a un amplificador de potencia.

Simultáneamente, la investigación de Tinjaca J. (2015), se relaciona con las ventajas de contar con una etapa de pre-amplificación con el objetivo de incrementar los niveles de ganancia dentro de la región Doherty.

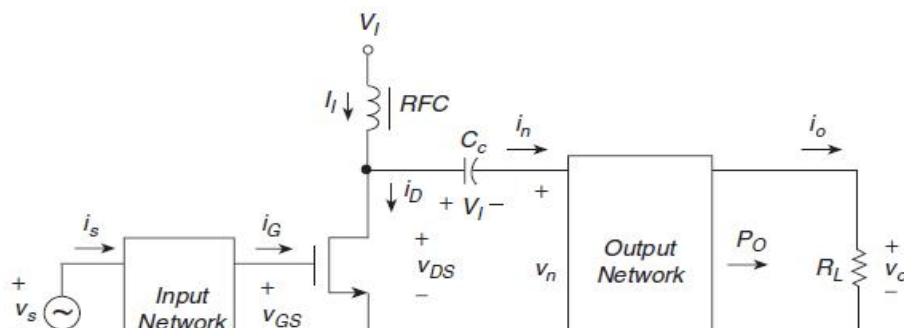
Finalmente, el trabajo de Mandujano (2014), que consistió en el diseño de un amplificador RF para comunicaciones celulares con parámetros s se relaciona con el actual trabajo de grado en como comparar la factibilidad técnica que ofrecen los amplificadores ante los repetidores de señal.

## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1 Amplificador de potencia

La figura 1 muestra un amplificador de potencia, el cual es un dispositivo que convierte la energía de una fuente de corriente continua (Polarización  $V_{cc}$  de un circuito con transistores) en una señal de potencia de salida la cual se controla utilizando una señal de entrada. Éstos pueden ser de diversas clases como son: clase A, clase B, clase AB y clase C. cada uno de estos posee características distintas de eficiencia y distorsión, razón por la cual tienen distintas aplicaciones en diversas áreas.

### 2.2.1 Amplificador de potencia



**Figura 1:** Diagrama general de un amplificador de Potencia.

Fuente: Hernández (2016)

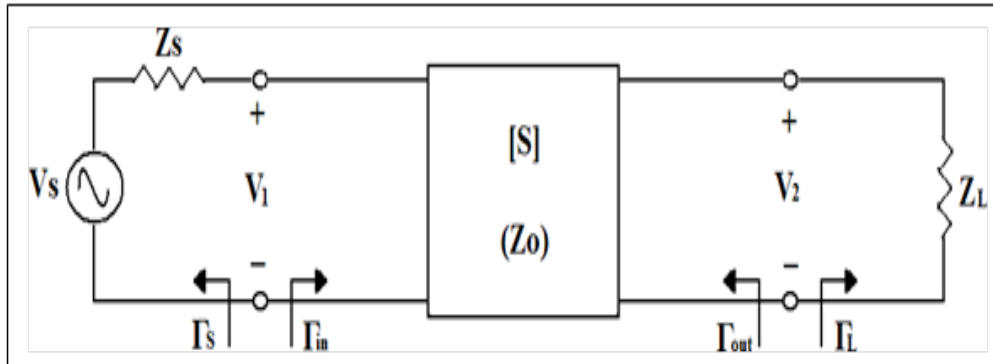
### **2.2.2 Estabilidad**

La estabilidad en un amplificador se debe garantizar no sólo en la banda de trabajo, sino para todas las frecuencias, en particular para las frecuencias bajas, donde el dispositivo podría presentar oscilaciones debido a elementos de retroalimentación intrínsecamente presentes en el circuito y en el dispositivo mismo. Por lo tanto, la adición de elementos con pérdida que actúen preferentemente en las frecuencias bajas, reducirá la ganancia y permitirá cumplir las condiciones de estabilidad.

Por lo general, las redes de estabilización están incrustadas en las redes de polarización, convirtiéndose así en transparente en el ancho de banda operativo. Aunque, debido a las condiciones de funcionamiento a gran señal, el problema de estabilidad se convierte en un problema no lineal intrínseco, cuyo tratamiento es complejo y con una solución difícil. Por lo cual, la estabilidad del amplificador se verifica y garantiza bajo condiciones de pequeña señal, mediante el uso del factor de Rollet (o Factor K).

### **2.2.3 Ganancia de Potencia**

Según, los valores que representan la ganancia de un amplificador, pueden ser determinados en términos de los parámetros S del transistor, representado en el esquema general de una red de dos puertos como la que se muestra en la Figura 2.



**Figura 2:** Esquema general de una red de dos puertos con impedancias de fuente y carga

Fuente: Hernández (2016)

Al ver el amplificador como una red de 2 puertos, donde se tienen como impedancias de la fuente y de la carga  $Z_s$  y  $Z_L$ , respectivamente, se derivan tres distintas definiciones de ganancia en términos de los parámetros S de dicha red.

Cabe resaltar que todas las ganancias dependen de  $Z_s$  y  $Z_L$ . Por tanto, si la entrada y la salida están acopladas al conjugado de la red de dos puertos, las ganancias se maximizan y  $G=GA=GT$ .

Donde  $Z_0$  es la impedancia característica de la red de dos puertos, generalmente 50.

## 2.2.4. Clases de Operación

### 2.2.4.1. Clase A

En clase A, el amplificador se polariza de manera que la corriente por el colector fluya durante un ciclo completo de la señal de entrada. En éste modo, el dispositivo opera por encima de su característica de transferencia lineal. Esta clase proporciona la distorsión de forma de onda más baja pero también la menor eficiencia, la cual generalmente se encuentra por el orden de 50 %. Estos amplificadores muestran una baja distorsión de intermodulación, lo que los hace muy adecuados para aplicaciones donde la linealidad es de interés primordial.

#### 2.2.4.2. Clase B

Para la clase B, se hace fluir la corriente del colector durante medio ciclo de la señal. El amplificador se polariza de forma tal que el transistor se active sólo durante la mitad del ciclo entrante, la otra mitad del ciclo se amplifica por otro transistor de modo que en la salida se reconstruye la onda completa

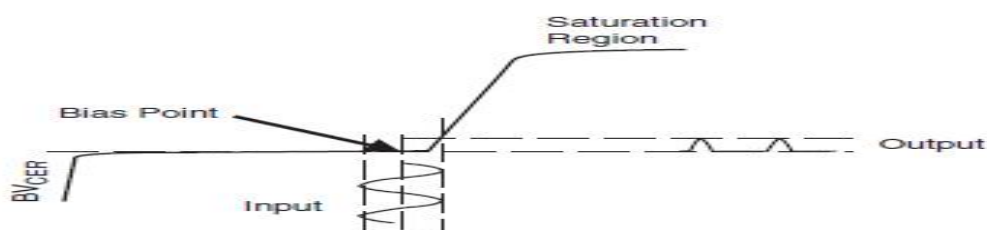
Mientras que cada transistor funciona claramente en un modo no lineal, la onda de entrada total se replica directamente en la salida; por tanto, el amplificador de clase B se clasifica como un amplificador lineal. En este modo, el dispositivo trabaja en las afueras de su característica de transferencia lineal. Esta clase proporciona una mayor eficiencia a expensas de una cierta distorsión de forma de onda. Se caracteriza por tener intensidad casi nula.

#### 2.2.4.3. Clase AB

Es una variación de la clase B, la corriente del colector abarca un ciclo menor a  $360^\circ$  pero mayor a  $180^\circ$ . La característica de transferencia para un amplificador que funciona en este modo es entre la clase A y clase B.

#### 2.2.4.4. Clase C

El funcionamiento del amplificador de clase C se caracteriza por la elección de un punto de operación en el que la corriente fluye por menos de la mitad del tiempo de la onda de entrada, en otras palabras, el ángulo de conducción es menor a  $180^\circ$ , convirtiéndolo en un amplificador no lineal ya que no replica directamente la señal de entrada. Esto se traduce en una significativa distorsión en la señal amplificada cuya forma de onda son impulsos.

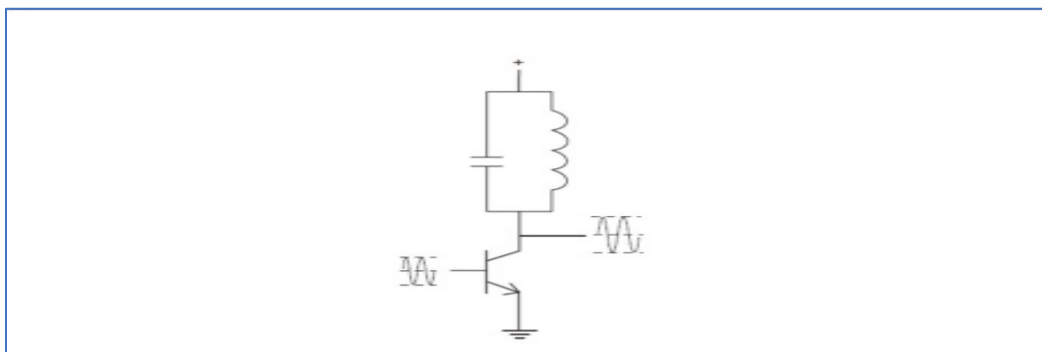


**Figura 3:** Polarización de un amplificador Clase C.

Fuente: Hernández (2016)

Los amplificadores Clase C logran alcanzar altos valores de eficiencia, hasta un 90 %, por esta razón son adecuados para aplicaciones que no requieran ningún nivel de linealidad y son muy utilizados en alta potencia. En la figura 3 puede verse que la salida es solo una porción de la onda sinusoidal de entrada y en la figura 4 se muestra que una parte clave del amplificador Clase C, es el circuito LC o circuito tanque, el cual filtra la distorsión no deseada en la salida, de forma que, la señal de salida es reconstruida.

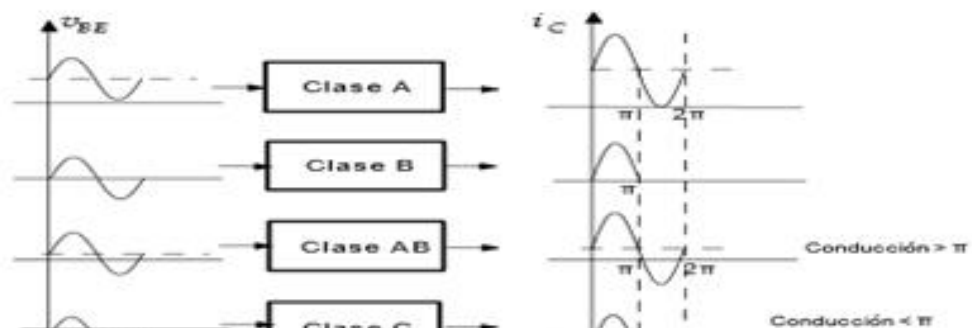
El amplificador clase C puede ser considerado básicamente como una fuente de alimentación, un circuito conmutado y un circuito sintonizado. El transistor es encendido y apagado como un interruptor que produce una señal de tipo pulso que contiene gran cantidad de armónicos. Para obtener una onda sinusoidal completa.



**Figura 4:** Esquemático simple de un amplificador Clase C.

Fuente: Hernández (2016)

Para lograr que el ángulo de conducción de la corriente del drenaje sea menor a  $180^\circ$ , el punto de operación del transistor debe localizarse en la región de corte, por ende, se debe garantizar que no haya polarización dc en la compuerta del dispositivo, o en su defecto, que ésta sea menor al voltaje umbral; haciendo que su implementación sea muy sencilla. (Ver figura 5).



**Figura 5:** Ciclos de conducción de las diversas clases de amplificadores.

Fuente: Hernández (2016)

### **2.2.5 Red de polarización.**

El propósito de una red de polarización es seleccionar el punto de trabajo adecuado y mantenerlo constante sobre las variaciones de los parámetros del transistor y la temperatura. Éste determina la potencia de salida, la cantidad de distorsión, la eficiencia, la ganancia de la etapa y la clase de operación (A, B, AB o C). Para algunas clases de amplificadores de potencia, también se espera que la red de polarización ayude a suprimir los armónicos más altos. La selección del punto de polarización óptimo, a veces puede ser difícil ya que este dependerá de los requerimientos de la etapa de amplificación

Dicha red consta de un conjunto de elementos circuítiles que se disponen en torno al dispositivo activo para asegurar que el funcionamiento de éste último se realice en el punto de reposo

### **2.2.6. Red de adaptación.**

En el diseño de un amplificador de potencia es muy importante incorporar una red de adaptación de impedancias para así optimizar dicho diseño y obtener una máxima transferencia de potencia, la cual se obtiene cuando la resistencia de carga es igual a la conjugada de la impedancia del generador; de esta forma lograr evitar pérdidas por desadaptación.

Esta puede ser con elementos concentrados o con líneas de transmisión. Existen varias configuraciones de redes de adaptación con elementos concentrados como las

redes de 2 elementos o redes tipo L y las redes de 3 elementos como las de tipo T y las de tipo.

#### **2.2.6.1.Redes de adaptación tipo L**

Esta técnica utiliza solamente elementos reactivos y recibe este nombre ya que la orientación de los mismos se asemeja a la forma de una L.

Para componentes paralelos se tiene:

#### **2.2.6.2.Transformación de impedancia**

Para grandes anchos de banda, varias redes de dos elementos pueden ser utilizadas simultáneamente, por ejemplo, utilizando dos secciones tipo L se puede adaptar desde el valor más bajo subiendo hasta una resistencia de valor intermedio y luego desde el valor intermedio hasta la resistencia de mayor valor. De esta forma, existirá una diferencia menor entre la resistencia de carga o la de la fuente y la resistencia intermedia, entonces el Q total será más bajo y el ancho de banda mayor. El máximo beneficio se obtiene cuando cada sección tipo L tiene el mismo Q y de esta forma se facilitarían los cálculos a la hora de obtener la impedancia que se desea transformar.

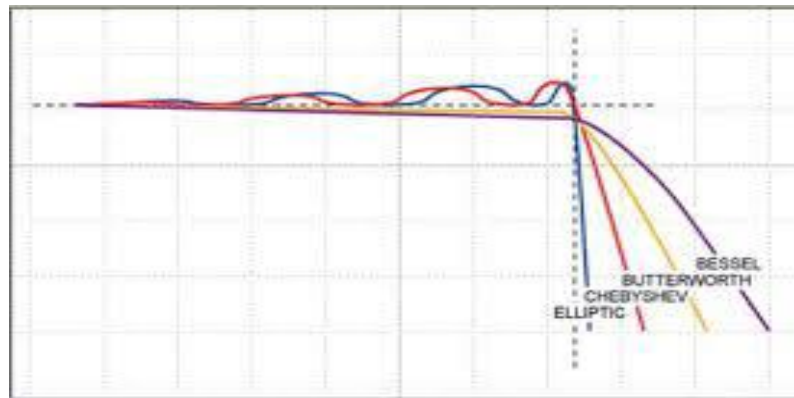
#### **2.2.7. Filtro pasivo.**

El propósito de un filtro es separar las diferentes componentes de frecuencia que conforman a la señal de entrada que atraviesa la red de filtrado.

Los filtros pueden ser de tipo pasa bajo, pasa alto, pasa banda o rechaza banda. Estos filtros tienen muy baja sensibilidad, donde su aproximación es excelente cuando el valor real de cada elemento es diferente al valor ideal.Son fabricados con capacitores, inductores y resistencias, esto los hace muy ventajosos ya que disipan poca energía.

Según el valor de los parámetros de la función de transferencia se obtienen unas características u otras en cuanto a rizado y anchura de la banda de transición. En este sentido, los filtros también pueden clasificarse según su rizado y banda de transmisión en: filtros tipo BUTTERWORTH, CHEBYSHEV, BESSEL y ELÍPTICO.

BESSEL posee una banda de transición amplia y un desfase lineal, lo que conlleva a que el tiempo de propagación sea constante. Este aspecto es importante cuando se Trabaja con la fase de la señal como parámetro portador de la información. El filtro elíptico tiene una banda de transición muy estrecha, rizado en la banda pasante y banda de rechazo y su respuesta transitoria no es mejor que la del CHEBYSHEV. (Ver figura 6).



**Figura 6:** Comparación entre filtros BUTTERWORTH, CHEBYSHEV, BESSEL y ELÍPTICO.

**Fuente:**Fuente:Hernández (2016)

### 2.2.7.1. Filtro pasa bajo pasivo

Como su nombre lo indica, este filtro deja pasar señales de baja frecuencia y gradualmente va rechazando señales por encima de una frecuencia especificada. Para diseñar este tipo de filtros se debe partir de una serie de especificaciones.(Ver en la figura 7).

fp: frecuencia final de la banda de paso.

fs: frecuencia de inicio de la banda atenuada.

Rp: Rizado máximo permitido en la banda de paso (en dB).

Rs: Atenuación mínima en la banda atenuada (en dB).

**Figura 7:** Especificaciones generales para un filtro pasa bajos.

**Fuente:**Hernández (2016)

### **2.2.7.2. Normalización**

Cuando se trabaja con circuitos eléctricos es usual normalizar la frecuencia y el nivel de impedancia. La normalización no causa ninguna pérdida de generalidad y se efectúa únicamente por conveniencia en el cálculo numérico, especialmente en el cálculo a mano, para evitar la tediosa manipulación de grandes potencias de 10. También minimiza el efecto de los errores de redondeo

La normalización en frecuencia consiste simplemente en un cambio en la escala de frecuencia mediante la división de la variable de frecuencia por una frecuencia de  $n$

FET (Insulated-Gate Field-Effect Transistor). Ambos operan bajo el principio de corriente controlada mediante un campo eléctrico. la principal diferencia radica en los métodos por los cuales se realiza el elemento de control.

#### **2.2.10. Mosfet**

Es un transistor que utiliza un electrodo de control, la compuerta, para modular capacitivamente la conductancia del canal de superficie en la unión de dos contactos finales, la fuente y el drenaje. La compuerta es separada del cuerpo del semiconductor subyacente a la compuerta por una delgada capa aislante, generalmente de dióxido de silicio. El canal de superficie está formado en la interfaz entre el cuerpo del semiconductor y la capa aislante.

Existen dos tipos de transistores MOSFET, ambos basados en la estructura MOS. Los primeros son los MOSFET de enriquecimiento los cuales se basan en la creación de un canal entre el drenador y la fuente, al aplicar una tensión en la puerta. La tensión de la puerta atrae portadores minoritarios hacia el canal, de manera que se forma una región de inversión, es decir, una región con dopado opuesto al que tenía el sustrato originalmente. El término enriquecimiento hace referencia al incremento de la conductividad eléctrica debido a un aumento de la cantidad de portadores de carga en la región correspondiente al canal. El canal puede formarse con un incremento en la concentración de electrones (en un nMOSFET o NMOS), o huecos (en un pMOSFET o PMOS). De este modo un transistor NMOS se construye con un sustrato tipo p y tiene un canal de tipo n, mientras que un transistor PMOS se construye con un sustrato tipo n y tiene un canal de tipo p.

Los MOSFET de empobrecimiento o depleción tienen un canal conductor en su estado de reposo, que se debe hacer desaparecer mediante la aplicación de la tensión eléctrica en la puerta, lo cual ocasiona una disminución de la cantidad de portadores de carga y una disminución respectiva de la conductividad

#### **2.2.11. Modos de operación.**

El funcionamiento de un transistor MOSFET se puede dividir en tres diferentes regiones de operación, dependiendo de las tensiones en sus terminales. En la presente

discusión se utiliza un modelo algebraico que es válido para las tecnologías básicas antiguas. En los MOSFET modernos se requieren modelos computacionales que exhiben un comportamiento mucho más complejo.

Para un transistor NMOS de enriquecimiento se tienen las siguientes regiones:

**Región de corte:** Cuando  $V_{GS} < V_{TH}$ , donde  $V_{TH}$  es la tensión de umbral del transistor. De acuerdo con el modelo básico del transistor, en esta región el dispositivo se encuentra apagado. No hay conducción entre la fuente y el drenador, de modo que el MOSFET se comporta como un interruptor abierto.

**Región lineal:** Cuando  $V_{GS} > V_{TH}$  y  $V_{DS} < (V_{GS} - V_{TH})$ . Al polarizarse la puerta con una tensión mayor que la tensión de umbral, se crea una región de agotamiento en la región que separa la fuente y el drenador. Si esta tensión crece lo suficiente, aparecerán portadores minoritarios (huecos en PMOS, electrones en NMOS) en la región de agotamiento, que darán lugar a un canal de conducción. El transistor pasa entonces a estado de conducción, de modo que una diferencia de potencial entre drenador y fuente dará lugar a una corriente. El transistor se comporta como una resistencia controlada por la tensión de puerta.

**Región de saturación:** Cuando  $V_{GS} > V_{TH}$  y  $V_{DS} > (V_{GS} - V_{TH})$ . Cuando la tensión entre drenador y fuente supera cierto límite, el canal de conducción bajo la puerta sufre un estrangulamiento en las cercanías del drenador y desaparece. La corriente que entra por el drenador y sale por la fuente no se interrumpe, ya que es debida al campo eléctrico entre ambos, pero se hace independiente de la diferencia de potencial entre ambos terminales.

### 2.2.12. Voltaje de umbral

El Voltaje de umbral (Threshold Voltage) es aquel voltaje en la compuerta en el cual el canal empieza a formarse. En este voltaje el dispositivo comienza a cambiar de apagado a encendido y los circuitos dependen de una oscilación de tensión que se extiende a este valor. Por lo tanto, la tensión de umbral ayuda a decidir la alimentación necesaria para el funcionamiento del circuito y también ayuda en la determinación de la corriente de fuga que fluye cuando el dispositivo está apagado

### **2.2.13. Disipación de potencia**

Debido a la tendencia de miniaturización de los transistores u otros semiconductores de potencia, en general, éstos no son capaces de disipar toda la potencia que generan sin evitar alcanzar altas temperaturas en las juntas pn del dispositivo, y como es del conocimiento general, si la temperatura se eleva a un cierto límite (propio de cada material), las juntas pn desaparecen y el dispositivo queda convertido en un simple cristal, es decir, ocasionará un daño irreversible. Es por este motivo que se recomienda colocar a estos dispositivos, sobre algún elemento que sea capaz de absorber la potencia disipada y liberarla hacia el aire que lo rodea. Esta acción es la definición exacta de un Disipador.

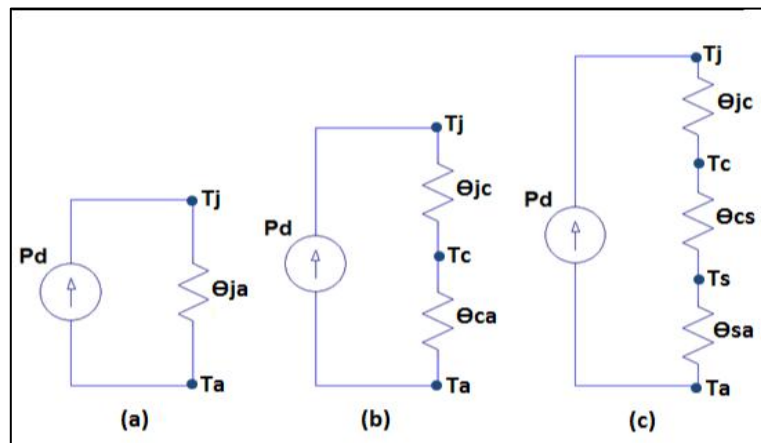
El calor se transfiere de una zona del espacio a otra básicamente por tres mecanismos: La conducción, que es la difusión del calor dentro de un medio material sin que haya desplazamiento de materia; La convección, la cual consiste en la propagación del calor por desplazamiento de porciones de materia a distinta temperatura y la radiación, que emite energía en forma de ondas electromagnéticas de diversas longitudes de ondas.

### **2.2.14. Resistencia térmica**

Los componentes de radio frecuencia (particularmente los transistores de potencia) frecuentemente tienen alguna forma de resistencia térmica especificada para mostrar las capacidades de potencia disipada. La resistencia térmica puede ser definida como el incremento de la temperatura de la junta de un componente dividido por la potencia disipada, ó grados centígrados entre vatios ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ).

El comportamiento térmico del dispositivo se puede modelar muy fácilmente utilizando un circuito eléctrico, constituido por una fuente de corriente y una resistencia (figura 8.a). La fuente de corriente es la potencia que disipa el dispositivo,  $P$ ; la resistencia es la resistencia térmica especificada por el fabricante  $R_{th}(j_a)$  y la diferencia de voltaje entre los terminales de la resistencia, calculada aplicando la ley de Ohm, es la diferencia de temperatura entre la junta y el medio ambiente,  $T_j - T_a$ . El modelo se puede mejorar separando la resistencia térmica en dos resistencias conectadas en serie:

la resistencia térmica entre la junta y el encapsulado,  $R_{th(jc)}$ , y la resistencia térmica entre el encapsulado y el medio ambiente,  $R_{th(ca)}$  (figura 8.b). Si se conoce la temperatura ambiente y la potencia que disipa el dispositivo, y el fabricante especifica las resistencias térmicas mencionadas, se puede calcular la temperatura a la que va a llegar la junta,  $T_j$ . Si el dispositivo tendrá el objetivo de disipar mucha potencia, por lo general éste cálculo arrojará valores superiores a los que puede soportar la junta.



**Figura 8:** Representación circuitual del flujo de corriente de la unión al ambiente.

Fuente: Hernández (2016)

Todos estos parámetros son obtenidos del datasheet del dispositivo. Una vez calculado el valor se busca en catálogos, suministrados por fabricantes de disipadores, algún disipador que tenga la resistencia térmica menor o igual a la calculada.

### 2.2.15. Software de diseño

El uso de paquetes de software es muy importante en el diseño, ya que previene costosos procesos de rediseño y producción de prototipos. En el mercado hay software pagado y software libre, siendo el más completo el software pagado. Se tienen tres destacados programas de diseño completo para circuitos de microondas, estas son:

- **Multisim™** es un software estándar en industria para diseño de circuitos y simulación SPICE para electrónica de potencia, analógica y digital en la educación y la investigación.

- **LogicWorks** es una herramienta de diseño interactiva de circuito prevista para enseñar y aprender lógica digital. El paquete le da la energía, la velocidad y la flexibilidad de crear y de probar un número ilimitado de los elementos de circuito en la pantalla. Esto significa que usted puede estudiar conceptos avanzados mucho más rápidamente y claramente con en la simulación de la pantalla que usted puede pasando el cableado del tiempo encima de partes costosas y daño-propensas en un laboratorio.
- **RF/MicrowaveCircuitDesign Software. - Microwave Office®** sirve para el diseño electrónico de todo tipo y circuitos de microondas, es el software que tiene la interfaz más amigable. Es la herramienta más completa e innovadora en cuanto al diseño en alta frecuencia.
- **SPICE** es un estándar internacional cuyo objetivo es simular circuitos electrónicos analógicos compuestos por resistencias, condensadores, diodos, transistores, etc. Para ello hay que describir los componentes, describir el circuito y luego elegir el tipo de simulación (temporal, en frecuencia, en continua, paramétrico, Montecarlo, etc.).

### 2.3 Definición de términos

**Acopladores direccionales:** Divisores de potencia y acopladores direccionales son dispositivos pasivos usados en el campo de la radio tecnología. Estos dispositivos acoplan parte de la potencia transmitida a través de una línea de transmisión hacia otro puerto, a menudo usando dos líneas de transmisión dispuestas lo suficientemente cerca para que la energía que circula por una de las líneas se acople a la otra.

**Amplificador RF:** Amplificar la intensidad de corriente, la tensión o la potencia de la señal que se le aplica a su entrada; obteniéndose la señal aumentada a la salida.

**Amplitud:** En física la amplitud de un movimiento oscilatorio, ondulatorio o señal electromagnética es una medida de la variación máxima del desplazamiento u otra magnitud física que varía periódica o cuasiperiódicamente en el tiempo. Es la distancia entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio o medio.

**Ancho de banda:** Para señales analógicas, el ancho de banda es la longitud, medida en Hz, de la extensión de frecuencias en la que se concentra la mayor potencia de la señal.

Se puede calcular a partir de una señal temporal mediante el análisis de Fourier. Las frecuencias que se encuentran entre esos límites se denominan también frecuencias efectivas.

**Angulo de desfase:** El desfase entre dos ondas es la diferencia entre sus dos fases. Habitualmente, esta diferencia de fases, se mide en un mismo instante para las dos ondas, pero no siempre en un mismo lugar del espacio. El desfase puede existir entre dos ondas de cualquier tipo, pero en este caso, nos referimos tan solo el existente entre dos ondas sinusoidales de la misma frecuencia.

**Bobina:** Componente de un circuito eléctrico formado por un hilo conductor aislado y arrollado repetidamente, en forma variable según su uso.

**Carga:** En electricidad, se denomina carga a cualquier componente de un circuito (resistencia, motor, equipo electrónico, etc.) que ofrece una mayor o menor resistencia al paso de la corriente, por lo que al conectarse a una fuente de fuerza electromotriz se considera como una "carga" o consumidor de energía eléctrica. Junto a las fuentes de alimentación, y el cableado forman los tres elementos básicos de todo circuito eléctrico. La carga también se puede definir como la impedancia de entrada de un circuito.

**Corriente de drenaje máxima:** Corresponde a la tensión de ruptura de la unión que forman el sustrato (unido a la fuente) y el drenador. Se mide con la puerta cortocircuitada a la fuente. Se especifica a qué pequeña circulación de corriente corresponde (por ejemplo, 0,25 mA). Ayuda a clasificar los MOSFETS en:

- Baja tensión: 15 V, 30 V, 45 V, 55 V, 60 V, 80 V
- Media tensión: 100 V, 150 V, 200 V, 400 V
- Alta tensión: 500 V, 600 V, 800 V, 1000 V

La máxima tensión drenador-fuente se representa como  $V_{DSS}$  o como  $V(BR)_{DSS}$

**Disipador:** es un instrumento que se utiliza para bajar la temperatura de algunos componentes electrónicos. Su funcionamiento se basa en la ley cero de la termodinámica, transfiriendo el calor de la parte caliente que se desea disipar al aire. Este proceso se propicia aumentando la superficie de contacto con el aire, permitiendo una eliminación más rápida del calor excedente.

**Distorsión:** Es la alteración de la forma de una señal cuando pasa a través de un sistema. La alteración ocurre cuando el sistema actúa de diferente manera sobre los componentes de la señal, cambiando amplitud, fase o frecuencia en desigual proporción; es por ello, que la amplificación, la atenuación, el desfase y la traslación en frecuencia no son distorsiones ya que todos los componentes de la señal sufren la misma modificación. La distorsión puede ser lineal o no lineal. Si la distorsión se da en un sistema óptico recibe el nombre de aberración.

**Forma de onda:** En electrónica, acústica y campos relacionados, la forma de onda de una señal es la forma de su gráfica en función del tiempo, independientemente de sus escalas de tiempo y magnitud y de cualquier desplazamiento en el tiempo. En electrónica, el término se aplica generalmente a voltajes, corrientes o campos electromagnéticos que varían periódicamente. En acústica, por lo general se aplica a sonidos periódicos constantes, variaciones de presión en el aire u otros medios. En estos casos, la forma de onda es un atributo que es independiente de la frecuencia, la amplitud o el desplazamiento de fase de la señal. El término también se puede utilizar para señales no periódicas, como chirridos y pulsos.

**Fuente de alimentación:** Dispositivo que convierte la corriente alterna en una o varias corrientes continuas que alimentan los distintos circuitos del aparato electrónico al que se conecta.

**Generador:** Un **generador** eléctrico es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrica entre dos de sus puntos (llamados polos, terminales o bornes) transformando la energía mecánica en eléctrica.

**Onda:** En física, una onda consiste en la propagación de una perturbación de alguna propiedad del espacio, por ejemplo, densidad, presión, campo eléctrico o campo magnético, implicando un transporte de energía sin transporte de materia. El espacio perturbado puede contener materia (aire, agua, entre otros) o no (vacío).

**Oscilación:** Se denomina oscilación a una variación, perturbación o fluctuación en el tiempo de un medio o sistema. Si el fenómeno se repite, se habla de oscilación periódica. Mientras que oscilación, en física, química e ingeniería es el movimiento repetido de

un lado a otro en torno a una posición central, o posición de equilibrio. El recorrido que consiste en ir desde una posición extrema a la otra y volver a la primera, pasando dos veces por la posición central, se denomina ciclo. El número de ciclos por segundo, o hercios (Hz), se conoce como frecuencia de la oscilación empleada en el movimiento armónico simple.

**Polarización electromagnética:** La polarización electromagnética es una propiedad de las ondas que pueden oscilar con más de una orientación. Esto se refiere normalmente a las llamadas ondas transversales, en particular se suele hablar de las ondas electromagnéticas.

**Puerto:** En informática, un puerto es una interfaz a través de la cual se pueden enviar y recibir los diferentes tipos de datos. La interfaz puede ser de tipo física (hardware) o puede ser a nivel lógico o de software, en cuyo caso se usa frecuentemente el término puerto lógico (por ejemplo, los puertos de redes que permiten la transmisión de datos entre diferentes computadoras).

**Punto de trabajo (Q):** En este punto se va a incidir de nuevo sobre ello, aunque de forma muy breve, lo que nos permitirá introducir el concepto de recta de carga en continua y al mismo tiempo conectar con los temas de ubicación y estabilidad del punto Q. El análisis del punto de trabajo de un dispositivo, como ya se sabe, se puede llevar a cabo de dos formas diferentes: analítica (realizando un análisis matemático de todas las ecuaciones implicadas) o gráfica (recta de carga en continua). La Obtención del punto de trabajo Q de un dispositivo consiste básicamente en obtener el valor de las diferentes tensiones y corrientes que se establecen como incógnitas en el funcionamiento el mismo.

**Radiación:** El fenómeno de la radiación es la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material.

**Resistencia térmica:** La resistencia térmica de un material representa la capacidad del material de oponerse al flujo del calor. En el caso de materiales homogéneos es la razón

entre el espesor y la conductividad térmica del material; en materiales no homogéneos la resistencia es el inverso de la conductancia térmica.

**Transistor:** El transistor es un dispositivo electrónico semiconductor utilizado para entregar una señal de salida en respuesta a una señal de entrada. Cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador.

**Vatímetro:** El vatímetro es un instrumento electrodinámico para medir la potencia eléctrica o la tasa de suministro de energía eléctrica de un circuito eléctrico dado. El dispositivo consiste en un par de bobinas fijas, llamadas «bobinas de corriente» o amperimétrica, y una bobina móvil llamada «bobina de potencial» o voltimétrica.

**Voltaje umbral:** La tensión umbral (también llamada barrera de potencial) de polarización directa coincide en valor con la tensión de la zona de carga espacial del diodo no polarizado. Al polarizar directamente el diodo, la barrera de potencial inicial se va reduciendo, incrementando la corriente ligeramente, alrededor del 1% de la nominal. Sin embargo, cuando la tensión externa supera la tensión umbral, la barrera de potencial desaparece, de forma que para pequeños incrementos de tensión se producen grandes variaciones de la intensidad. A partir de la tensión umbral, la intensidad aumenta rápidamente variando muy poco el valor de la tensión.

### **CAPÍTULO III**

#### **MARCO METODOLÓGICO**

En el campo de la investigación, se considera método al modo general o manera que se emplea para abordar un problema, y aunque resulte redundante, el camino

fundamental empleado en la investigación científica para obtener el conocimiento científico, es el método científico; que representa el conjunto de pasos, técnicas y procedimientos que se emplean para formular y resolver problemas de investigación mediante la prueba o verificación de hipótesis, Arias (2006). Es por ello, que en este capítulo se realizara el aborde metodológico para llevar a cabo el diseño de amplificador RF. Para tal fin se presentara el diseño, tipo y nivel de la investigación así como lo pasos a seguir las técnicas e instrumentos de recolección de datos y la fase metodológica.

### **3.1 Tipo de Investigación**

Un proyecto factible de acuerdo con hurtado (2008, p. 47), consiste en la elaboración de una propuesta, un plan, un programa o un modelo, como solución a un problema o necesidad de tipo práctico, ya sea de un grupo social, o de una institución, o de una región geográfica, en un área particular del conocimiento, a partir de un diagnostico preciso de las necesidades del momento, los procesos explicativos o generadores involucrados y de las tendencias futuras, es decir, con base en los resultados de un proceso investigativo. De todo lo antes mencionado se puede señalar que la investigación es un proyecto factible, por cuando consiste en diseñar un amplificador RF de potencia para el funcionamiento de los vatímetros model “33”, en el cual se realizara una verificación de las conexiones e interoperabilidades de entrada y salida que conforman al prototipo, se evaluará las configuraciones y/o tipos de amplificadores que se ajusten a los instrumentos electrónicos, se diseñara el prototipo y se simulará bajo un software computacional.

### **3.2 Diseño de investigación**

La investigación No experimental para Stracuzzi (2008), es el que se realiza sin manipular de forma deliberada ninguna variable. El investigador no sustituye intencionalmente las variables independientes. Se observan los hechos tal y como se presentan en su contexto real y en un tiempo determinado o no, para luego analizarlos. Por lo tanto, en este diseño no se construye una situación específica si no que observan las que existen. Es por ello, que este trabajo de diseñar un amplificador RF de potencia para funcionamiento de los vatímetros se clasifica como una investigación de diseño no experimental, debido a que la presente investigación utilizará información brindada por el simulador Spice para analizar el rendimiento del prototipo en el funcionamiento de los vatímetros.

### **3.3 Nivel de la investigación**

El nivel proyectivo según Hurtado (2000), es el que intenta proponer soluciones a una situación determinada. Implica explorar, describir, explicar y proponer alternativas de cambio, y no necesariamente ejecutar la propuesta. Mencionado por este autor se aplica a todas las investigaciones que conllevan a diseños o creaciones dirigidas a cubrir una necesidad y basadas en conocimientos anteriores. El investigador puede llegar a esta mediante vías diferentes, las cuales involucran procesos, enfoques, métodos y técnicas propias. En este sentido, esta investigación tiene un nivel exploratorio debido a que en la misma se busca mediante un diseño de un prototipo, dar solución a la falta de amplificadores que puedan hacer funcionar los vatímetros Model 45 del laboratorio de comunicaciones de la Universidad José Antonio Páez.

### **3.4 Técnicas e Instrumentos de recolección de información.**

Según Stracuzzi(2006), “Se entiende por técnica de investigación, la forma particular para aplicar un método y está referida a los procedimientos empleados para la recolección y tratamiento de datos. En el caso particular de la presente investigación, la técnica a utilizar será la observación, ya que el investigador se dispondrá a diseñar el prototipo y observar los resultados de la simulación en el software Spice. También se aplicará la entrevista no estructurada.

En este orden de ideas, el uso de este instrumento responde a lo planteado por Arias (2012), quien define que: “Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información”.

### **3.6 Fases metodológicas**

#### **Fase I. Diagnóstico**

En esta fase se va a realizar un diagnóstico de las conexiones e interoperabilidades de entrada y salida que conforman a los vatímetros para definir los objetos que se necesitaran para lograr el diseño del amplificador de radio frecuencia de potencia, entre los puntos que se tomaran en cuenta para cumplir con éxito esta fase es definir claramente la situación actual del funcionamiento de los vatímetros para luego con una base mas solida abordar el problema presente.

#### **Fase II: Evaluación de las configuraciones y/o tipos de amplificadores**

En esta fase se hace una evaluación detallada acerca de la configuración y/o tipos de amplificadores que más se ajustan a las necesidades presentes en el laboratorio para luego proceder a realizar el diseño con los parámetros obtenidos en dicha evaluación.

#### **Fase III: Diseño del prototipo de amplificador de radio frecuencia de potencia**

En esta fase se hará el diseño del prototipo y la simulación en el software para obtener los resultados y observar si estos están dentro de los valores esperados para poder cumplir con la visión para la cual fueron creados que es hacer funcionales los vatímetros model “43” del laboratorio de comunicaciones de la Universidad Jose Antonio Paez.

#### **Fase IV: Estudio de factibilidad del proyecto**

Es de relevante importancia para todo proyecto de ingeniería realizar un estudio de factibilidad, por lo que en la cuarta fase de efectuará un análisis de la inversión, se quiere demostrar a la empresa en términos tanto financieros como de mejora, la factibilidad de la propuesta.

**CAPÍTULO IV**  
**RESULTADOS**

Las siguientes fases describen el desarrollo de los objetivos específicos establecidos al inicio de este proyecto.

**4.1 Diagnóstico de las conexiones e interoperabilidades de entrada y salida que conforman a los vatímetros del laboratorio de comunicaciones de la universidad José Antonio Páez.**

Para el cumplimiento de la presente fase se aplicó una entrevista a José Rafael Centeno Henríquez, profesor de la escuela de Ingeniería y Telecomunicaciones de la Universidad José Antonio Páez. De esta forma, al ser informante clave se pudo conocer una visión más clara de la situación actual de los Vatímetros model “43”.

**4.1.1. Resultados obtenidos mediante la aplicación de la técnica de la entrevista.**

El presente instrumento se aplicó a través del método de la entrevista no estructurada, con el fin de conocer una perspectiva de la situación actual de los vatímetros model “43”. (Ver cuadro 1)

**Cuadro 1:** Entrevista Ing. Centeno

ENTREVISTA ENTREVISTADOR: RAMON NUÑEZ	
<p><b>Pregunta 1.</b> En su opinión, ¿Qué tan importante es contar con estos vatímetros en los laboratorios de la escuela de Electrónica y Telecomunicaciones?</p>	<p>Yo como profesor y principal guía de las asignaturas donde les damos uso a estos equipos considero que sería de suma importancia contar con el funcionamiento de estos vatímetros ya que se abriría un amplio escenario de posibilidades a la hora de realizar prácticas en las distintas asignaturas que se dictan en esta escuela.</p>

<p><b>Pregunta 2.</b> ¿Con cuántos vatímetros model “43” se cuenta en el laboratorio? y ¿Cual es la principal causa por la cual a estos vatímetros no se les da uso?</p>	<p>Se cuenta con 2 vatímetros en muy buen estado, es mas nunca se han utilizado debido a que estos equipos trabajan con potencias en el orden de vatios (W) y con los generadores que contamos en el laboratorio solo generan potencias en el orden de los milivatios (mW).</p>
<p><b>Pregunta 3.</b> ¿Con cuántos generadores se cuenta en el laboratorio de comunicaciones y en qué estado se encuentran actualmente?</p>	<p>Bueno, hoy se cuenta con cuatro (4) generadores de los cuales tres (3) están funcionando y uno (1) está dañado, recuerda que estos generadores no solo se usan en el laboratorio de comunicaciones, también se usan en las distintas asignaturas que ameritan obligatoriamente realizar prácticas para la formación completa de los estudiantes</p>
<p><b>Pregunta 4.</b> ¿A partir de que semestre los estudiantes empiezan a tener contacto directo con estos equipos?</p>	<p>Inician en el quinto y sexto semestre de la carrera con teorías en las asignaturas y práctica en los laboratorios. Por eso te repito, el diseño de un amplificador de potencia para darle uso a estos vatímetros, sería un gran aporte a la universidad ya que sin la necesidad de cambiar de equipos, en este caso (generadores) serían muchos los beneficios que se le aportaría a la escuela.</p>

**Fuente: Nuñez (2019)**

#### **4.1.2 Análisis general de los resultados obtenidos por medio de la entrevista**

Esta dotación de vatímetros model “43” llegó al laboratorio de comunicaciones de la Universidad José Antonio Páez en el año 2015 con ciertas características que no permiten ser utilizados y sacarle el provecho necesario para así enriquecer aún más la preparación de los estudiantes de las escuelas de Electrónica y Telecomunicaciones.

Según lo señalado en la anterior entrevista hoy el laboratorio de comunicaciones de la Facultad de Ingeniería de Electrónica y Telecomunicaciones cuenta con dos (2) vatímetros model “43” que se encuentran en perfecto estado.

Haciendo las pruebas pertinentes a los vatímetros y lo comentado por el profesor José Centeno, se identificaron que las características principales de estos equipos es que fueron construidos para la medición de potencias en el orden de vatios (W) lo que lo hace incompatible para hacer prácticas en el laboratorio de comunicaciones ya que los generadores y las señales que siempre se manejan en dicho laboratorio están en el orden de los milivatios (mW)

Estos generadores model “8648A” fabricados por Agilent. Se encuentran presentes en los laboratorios de Comunicaciones, antenas, Sistemas de Ondas Guiadas y Microondas. Esto quiere decir que gracias al diagnóstico realizado permitió despertar la posibilidad que estos vatímetros model “43” pueden ser utilizados para mejorar las clases prácticas de las asignaturas ya nombradas anteriormente integrando nuevas prácticas y mucho más completas.

El laboratorio de comunicaciones hoy cuenta con una dotación de cuatro (4) generadores model “8648A” de los cuales hay tres (3) en funcionamiento y uno (1) dañado.

Las materias o asignaturas relacionadas con los vatímetros model “43” y los generadores model “8648A”, se inician en el quinto y sexto semestre de la carrera con teorías en las asignatura y práctica en los laboratorios de antenas, sistemas de ondas guiadas, comunicaciones y microondas. Queriendo decir con esto que son muchas las desventajas que existen en dichos laboratorios con la inactividad de estos vatímetros y la poca señal de potencia entregada por los generadores.

#### **4.2 Evaluación de las configuraciones y/o tipos de amplificadores**

En esta fase se hizo una evaluación de las diferentes clases de amplificadores de potencia empleados en radio frecuencias (RF), con el fin de tener un panorama global de los amplificadores comúnmente empleados. En estos casos es necesario el empleo de amplificadores con elevado nivel de potencia a la salida. Se requiere unamplificador que optimice el consumo de energía, diseñándolo del modo más

eficiente posible y con la menor distorsión posible de los armónicos superiores a la portadora y de los productos de intermodulación.

El transmisor está formado por la etapa de modulación y por sucesivas etapas amplificadoras que constituyen el amplificador de potencia. Estas etapas van elevando la potencia de la señal modulada, hasta alcanzar el valor de potencia final, necesaria sobre la antena de transmisión. Existen diferentes clases de amplificadores de. Cada una de estas clases es empleada, de acuerdo a los niveles de potencia a manejar en cada etapa amplificadora, a la eficiencia total del transmisor y al ancho de banda requerido en la transmisión. Los amplificadores de potencia de RF pueden dividirse en dos grupos fundamentales, los amplificadores de potencia lineales y los amplificadores de potencia sintonizados.

Se identificaron los amplificadores lineales básicamente como amplificadores clase A, B y AB. Estos amplificadores poseen dos características importantes: La primera es, como su nombre lo indica, la muy buena linealidad entre la potencia de entrada y la de salida. Y la segunda es su amplio ancho de banda que los hace esencialmente aplicables en equipos de muy alta frecuencia, donde se requiere de varias frecuencias de transmisión. Su desventaja principal es el bajo rendimiento alcanzado. En un amplificador clase A el rendimiento es menor al 50%, mientras que en clase AB el rendimiento está por debajo del 75%. Por esta razón se emplean en etapas de bajo nivel de potencia.

Los amplificadores sintonizados se subdividen en dos, los que emplean a los dispositivos activos como generadores de corriente, denominados clase C y sus variantes y los amplificadores que emplean a los dispositivos activos como llaves, denominados clases D, E, F, G, H, y S. En estos últimos el dispositivo conmuta entre dos estados, desde el de apagado al de encendido y viceversa. Los amplificadores de potencia sintonizados son no lineales, pero logran mayor eficiencia que los amplificadores lineales. Los amplificadores sintonizados están caracterizados por una red sintonizada que es parte integral del amplificador y por medio de la cual, se obtiene la señal de RF de salida. Por su principio de operación, los amplificadores sintonizados

son de banda angosta. A continuación describimos algunas clases de operación de alta eficiencia:

**Amplificador Clase C:** El dispositivo activo en un amplificador clase C actúa como generador de corriente dependiente de la señal de excitación de RF. El circuito sintonizado es diseñado de manera que resuene a la frecuencia de aplicación de los pulsos de corriente. La eficiencia del amplificador clase C es muy alta debido a la baja tensión impuesta sobre el transistor, cuando éste está conduciendo. La eficiencia depende del ángulo de conducción del dispositivo activo, los valores teóricos van desde 50% para  $180^\circ$  de conducción a 100% para  $0^\circ$  de conducción. Para un valor del ángulo de conducción de aproximadamente  $74^\circ$ , alcanza el valor de 85%. Los amplificadores de potencia clase C se aplican en transmisores con modulación en frecuencia o fase, donde no requieren linealidad y en etapas de salida donde se necesitan niveles altos de potencia (aún en aquellos casos que utilicen modulación lineal).

**Amplificador Clase D:** Los amplificadores sintonizados clase-D, emplean al dispositivo activo como llave y no como generador de corriente con alta impedancia de Convertidor resonante con enclave de tensión como amplificador de potencia modulado en fase 4 salida. En las clases A, B, AB y C los transistores operan en zona activa, de modo tal que la corriente de salida del elemento activo, está gobernada por la señal de RF a la entrada (o compuerta) del dispositivo. Al emplear un transistor como llave éste opera en dos estados, el de conducción (ON) y el de corte (OFF). Con esta característica la corriente de salida del dispositivo, no es gobernada por la señal de entrada, sino que queda impuesta por la carga. Esta diferencia de operación logra, valores teóricos de eficiencia del 100%, manteniendo la característica de banda angosta.

**Amplificador clase E:** Para evitar el problema de conducción simultánea podemos emplear simplemente una sola llave. Haciendo conmutar la llave en forma cíclica a la frecuencia de RF, queda configurado un amplificador clase E. El inductor RFC ofrece una reactancia suficientemente alta para suministrar una corriente constante a la frecuencia de conmutación. El circuito resonante formado por  $L_{out}$  y  $C_{out}$ , resuena a la frecuencia de conmutación y su diseño debe permitir las siguientes características:

a) La tensión resultante sobre el dispositivo activo permanece en un valor reducido, durante la transición de la llave de ON a OFF, hasta que la corriente se anule completamente.

b) La tensión sobre el dispositivo, al ser encendido, cae a cero y con pendiente próxima a cero antes que el transistor comience a conducir.

c) La corriente del transistor crece en forma suave desde cero, durante el encendido del mismo. Si estas condiciones se cumplen sobre la llave, el amplificador clase E opera en forma óptima alcanzando rendimientos cercanos al 100%. Para esto se requiere de un diseño adecuado del factor de mérito (Q) del circuito sintonizado y de la capacidad C.

**Otras clases:** Otra clase de amplificador de alta eficiencia es el denominado clase F. Esta clase de amplificadores posee un topología similar al clase E pero posee redes resonantes para la portadora y para uno o más armónicos superiores. Permitiendo obtener una muy buena eficiencia y limitar la tensión sobre el dispositivo activo al doble de la tensión de alimentación. También podemos destacar los amplificadores clase G, H y S, pensados para audio frecuencias, en donde se realiza una RFC Lout C VDD CoutRcarga i out v out M - + amplificador clase E con una llave Convertidor resonante con enclave de tensión como amplificador de potencia modulado en fase 6 modulación por ancho de impulso (PWM) con las señales a amplificar y luego mediante un filtrado de altas frecuencias de conmutación, obtener las señales de audio que alimentan al transductor de sonido.

Luego de una extensa investigación sobre las distintas variantes que presentan los amplificadores de potencia en sus distintos entornos; se seleccionó el **AMPLIFICADOR CLASE C.**

Los amplificadores de potencia clase C se caracterizan por proveer amplificación con alta eficiencia y son utilizados principalmente en aplicaciones de RF, donde se requiere un incremento en el nivel de potencia y no se requiere linealidad entre la tensión de entrada y tensión de salida. Los amplificadores Clase C pueden ser modulados en amplitud por inyección de la tensión modulante en la placa, reja ó grilla

pantalla, reja ó grilla control ó cátodo. También son utilizados para amplificar una portadora modulada en frecuencia. En el circuito de placa la eficiencia puede ser tan alta como el 85%, pero la mayoría de los amplificadores se diseñan para operar con eficiencia del orden de 75%, debido a que incrementar el rendimiento del 75% al 85% significa un aumento importante de la potencia de reja, además grandes eficiencias son obtenidas con elevadas tensiones de placa.

En un amplificador Clase C, la reja se polariza por debajo del corte y la corriente de placa circula durante menos de  $180^\circ$  por cada ciclo de la tensión de excitación de reja, por esto los amplificadores Clase C, no son usados en aplicaciones de audio debido a que la tensión de salida no es proporcional a la tensión de entrada y los pulsos de placa tendrían una excesiva distorsión. Sin embargo un amplificador Clase C puede ser usado en aplicaciones de RF, si el circuito de placa es resonante a la componente fundamental o algunas de las armónicas de la frecuencia de excitación de reja, de esta forma el pulso de la corriente de placa es filtrado por el circuito resonante de placa para proveer una salida muy cercana a una senoide. Cuando el amplificador es usado como multiplicador de frecuencia, el circuito de placa deberá resonar a alguna de las armónicas de la tensión de excitación, la potencia de salida se reduce considerablemente, siendo la eficiencia del orden del 40 a 50% cuando se los utiliza como dobladores y del 15 a 20% como triplicadores.

Este tipo de amplificadores se reconoce porque tienen, en lugar de la resistencia de colector típica, un "circuito tanque" formado por un condensador y bobina diseñados para que en un estrecho margen de frecuencias entren en sintonía -por lo que también se le llama "circuito resonante"-y, modificando la impedancia del circuito L-C produzcan la conducción del transistor. Es por eso que a este tipo de circuitos les llama amplificadores "resonantes" o "sintonizados".

En torno a la frecuencia de resonancia, estos amplificadores obtienen una ganancia altísima; fuera de esta frecuencia, la amplificación es muy reducida y el consumo es mínimo.

**Consideraciones de polarización:** Polarización de cátodo, polarización fija y polarización por escape de reja pueden ser utilizada individualmente o en combinación para proveer la polarización a un amplificador Clase C. La polarización por escape de reja es la más comúnmente utilizada y evita la necesidad de utilizar una fuente de polarización adicional. Esta polarización se regula por si sola y tiende a ajustarse automáticamente al valor pico de la tensión de excitación de reja, de modo que elimina la necesidad de un ajuste crítico de la tensión de excitación. Sin embargo, si se utiliza polarización de escape de reja, se deben tomar precauciones ya que en ausencia de señal de excitación, se puede producir una excesiva corriente de placa óreja, que puede dañar la válvula. Frecuentemente, esta precaución requiere de otras formas de polarización como ser de cátodo o polarización fija. Esta protección también puede ser realizada, mediante la incorporación de un relé de sobrecarga de corriente en serie con la alta tensión de alimentación (este relé es usualmente colocado en el terminal de tierra para reducir los requerimientos de aislación). Las pérdidas de excitación causan un incremento apreciable en la corriente de placa, la cuál acciona el relé, proveyendo la protección deseada.

**Tipo de válvulas:** Se utilizan en amplificadores Clase C, Triodos, Tetrodos y Pentodos. Los Tetrodos son preferentemente empleados a los Triodos por su baja capacitancia interna rejaplaca y por los menores requerimientos de excitación, estas consideraciones tienen especial importancia en aplicaciones de alta frecuencia como UHF. Tipo de acoplamiento: Ambos tipo de acoplamiento, inductivo y capacitivo son utilizados en los circuitos de acoplamientos de reja y circuitos de salida de placa. El acoplamiento inductivo introduce mayor atenuación a los armónicos en la carga que los acoplamientos capacitivos. Por otro lado el uso de un blindaje entre la inductancia del tanque y el circuito de salida, minimiza el acoplamiento capacitivo entre estos, disminuyendo la transferencia de armónicos a la carga.

**Neutralización:** Si el circuito sintonizado de placa se encuentra ajustado a una frecuencia ligeramente mayor que la frecuencia de excitación de reja, la corriente que

fluye a través de la capacidad reja-placa tiene una componente  $180^\circ$  desfasada con la tensión de excitación de reja.

Si la capacitancia reja-placa es suficientemente grande y si las pérdidas de reja no son excesivas, el circuito de placa acoplará una suficiente cantidad de señal en el circuito de reja que provocará oscilaciones indeseadas en el amplificador. Neutralizar consiste en aplicar una realimentación adicional entre la placa y reja de modo que refleje una resistencia en el circuito de reja, por medio de esto se cancela el efecto de la resistencia negativa producida por la corriente a través de la capacitancia reja-placa. Diferentes métodos de neutralización utilizados en amplificadores Clase C, en estos casos la neutralización utilizada actúa sobre un relativamente pequeño ancho de banda. Una simple red de neutralización de banda angosta para un amplificador de terminación única puede realizarse por la conexión de un inductor y un capacitor en serie entre la reja y la placa. El resultado es que se le ha sumado a la red de neutralización una reactancia inductiva la cual neutraliza exactamente el efecto de la reactancia capacitiva reja placa. Este particular tipo de neutralización es frecuentemente usado en amplificadores de RF. En válvulas con reja pantalla, la capacidad reja-placa es mucho menor que en los Triodos, consecuentemente los Tetrodos y Pentodos ordinariamente no necesitan ser neutralizados.

**Oscilaciones parásitas:** Son oscilaciones indeseadas que se denominan comúnmente como oscilaciones parásitas. La mayoría de los amplificadores y osciladores son susceptibles de presentar oscilaciones parásitas, lo que se debe evitar. Las oscilaciones parásitas pueden resultar en corrientes anormales, las que pueden acortar la vida de la válvula, la incapacidad de modular al 100% y fundamentalmente la interferencia con otros servicios.

Estas oscilaciones ordinariamente ocurren en frecuencias entre los 50 a los 200 MHz en el rango de frecuencia entre los 200 a los 1200 KHz. Las oscilaciones parásitas de alta frecuencia en amplificadores Clase C, son usualmente debidas a la inductancia entre los terminales de los circuitos de reja y placa y el circuito tanque resonante con la capacitancia Interelectródica y cualquier capacitancia externa.

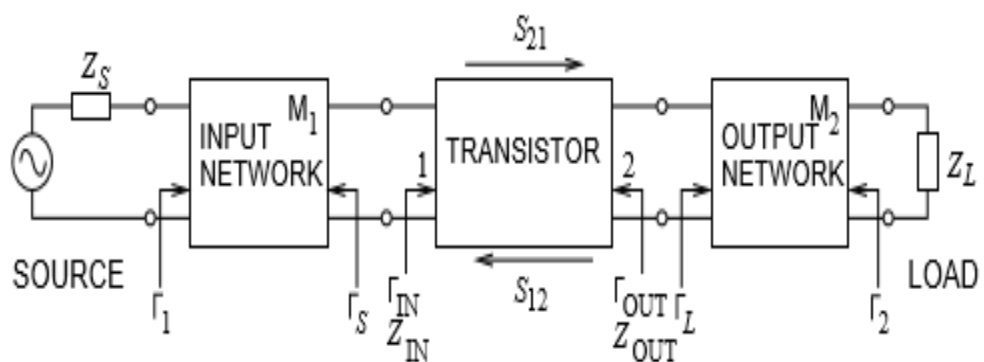
Las oscilaciones parásitas en alta frecuencia algunas veces pueden eliminarse por la resintonización del circuito de placa del oscilador que la genera a una frecuencia menor que la de reja, de modo que el amplificador no tenga grandes oscilaciones.

Un método de realizar esta re-sintonización, es hacer los terminales de reja más cortos que los terminales de placa de modo de hacer la inductancia de los terminales de placa mucho mayor a la inductancia de los terminales de reja. Igual efecto puede obtenerse colocando  $H_y$  en cada terminal. Pequeñas inductancias, usualmente unos pocos. Otro método de supresión de oscilaciones parásitas es reducir el  $Q$  del circuito parásito, colocando resistencias de unos 50 a 100 ohms en cada terminal de reja y placa de la válvula. La combinación de pequeños inductores y resistencias en cada terminal es muy usada. En estas aplicaciones la inductancia es usada a la menor frecuencia de las oscilaciones parásitas.

### 4.3 Diseño del prototipo de amplificador de radio frecuencia de potencia.

El sistema a construir estará basado en un dispositivo activo para la amplificación de las señales de entrada, entre los dispositivos posibles nos encontramos con los BJT, MOSFET y JFET, entre los más comunes para nuestro diseño utilizaremos el BJT al ser más rudimentario y robusto que los otros dos mencionados, claro esto nos puede costar algo de precisión, pero se compensa con una mayor vida útil en casos de manejo descuidado.

El sistema a construir está representado en figura 9.

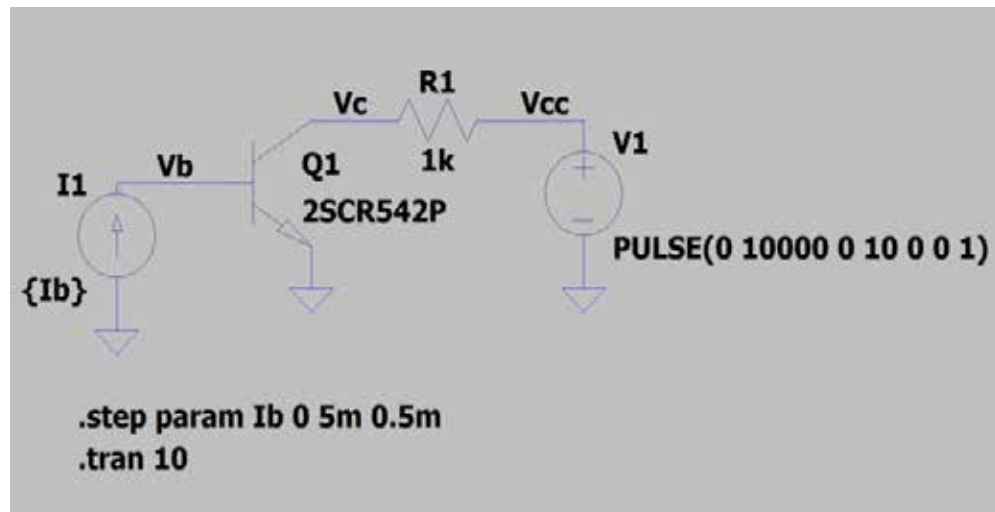


**Figura 9:** Sistema característico del amplificador de potencia.

**Fuente:** Nuñez (2019)

Donde una vez seleccionado el tipo de dispositivo activo, toca elegir el modelo, esto es importante a la hora de diseñar ya que nos permitirá los límites físicos de nuestro dispositivo, debido a que necesitamos modelar nuestro dispositivo en el ambiente LTSpice y esto es materia más avanzada optamos por seleccionar uno de sus modelos predefinidos de potencia y de una frecuencia de trabajo considerable, el mismo será el 2SCR542P, a continuación mostraremos la respuesta del dispositivo y la compararemos con su hoja de datos. Para garantizar que el dispositivo se comporta como un elemento real.

El circuito implementado para las pruebas se muestra en la figura 10.

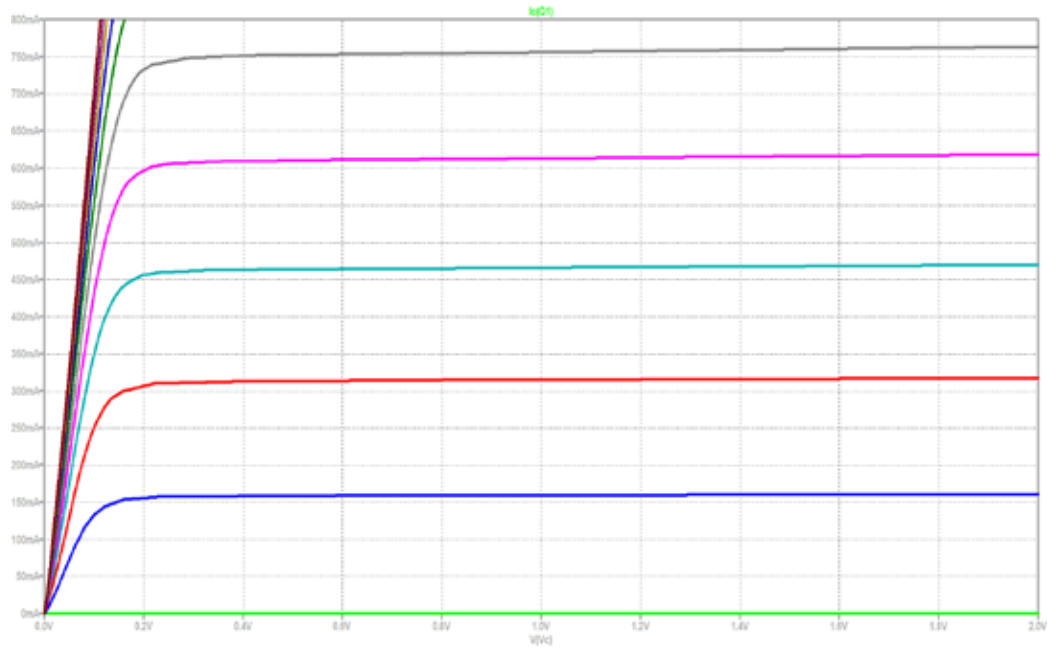


**Figura 10:** Circuito de prueba con transistor 2SCR542P.

**Fuente:** Nuñez (2019)

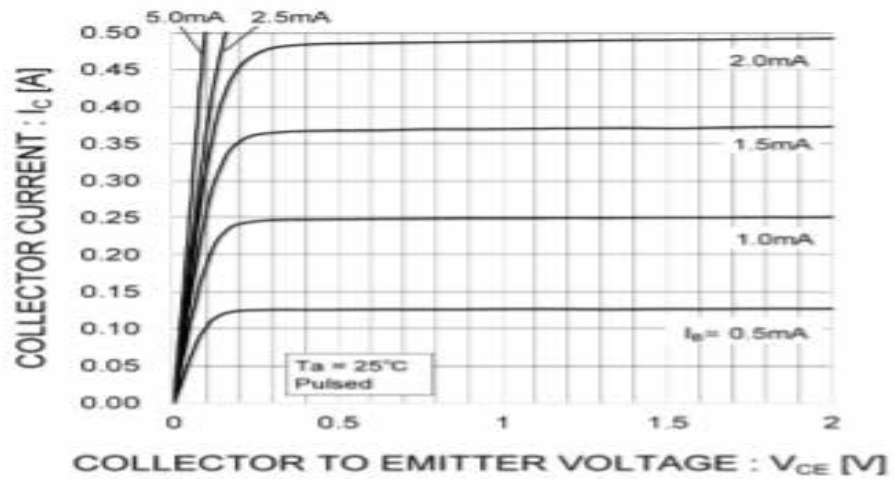
El mismo consiste en aplicarle distintas corrientes de base al transistor, mientras se hace un barrido del voltaje del colector para ver su respuesta, las corrientes de base no son arbitrarias, corresponden a las mostradas en el datasheet del dispositivo que se

mostrará más adelante, va de 0 a 5 mA con incrementos de 0.5mA, el resultado obtenido se muestra en la gráfica 1.



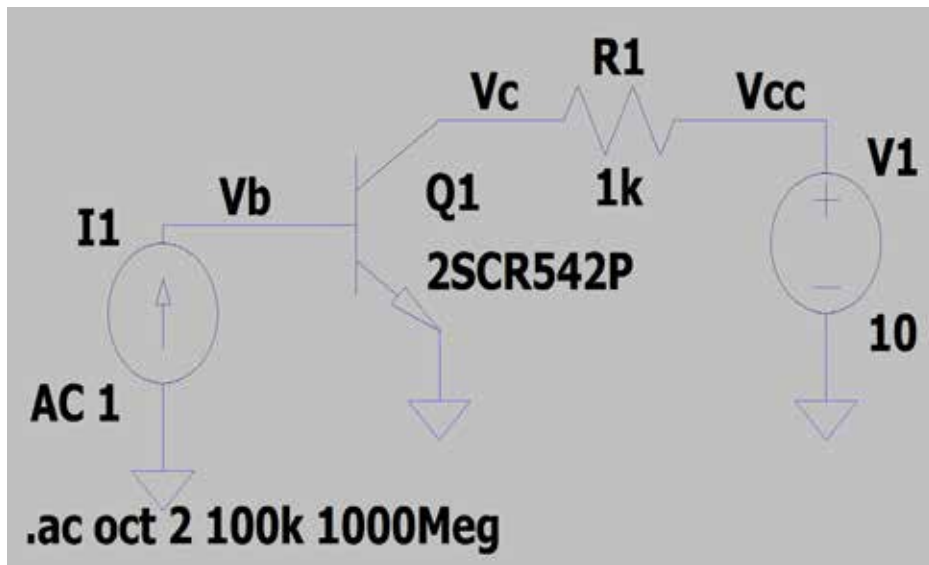
**Grafica 1** Distintas corrientes aplicadas a la base del transistor.  
**Fuente:** Nuñez (2019)

Y la gráfica característica del fabricante se muestra en la figura 11



**Figura 11:** Grafica característica realizada por el fabricante.  
**Fuente:** 2016 ROHM Co., Ltd. All rights reserved.

Una vez comprobado el funcionamiento del dispositivo se pasa a probar su respuesta en frecuencia, para eso se utiliza el circuito de la figura 12.

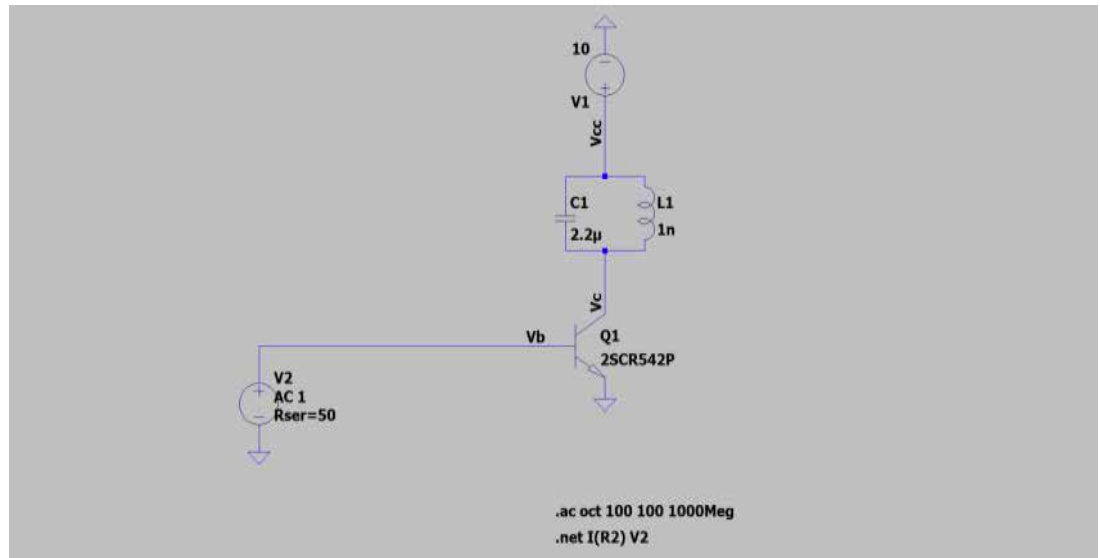


**Figura 12:** Circuito para probar la respuesta en frecuencia del dispositivo.

**Fuente:** Nuñez (2019)

Dando el siguiente resultado: (ver gráfico 2)

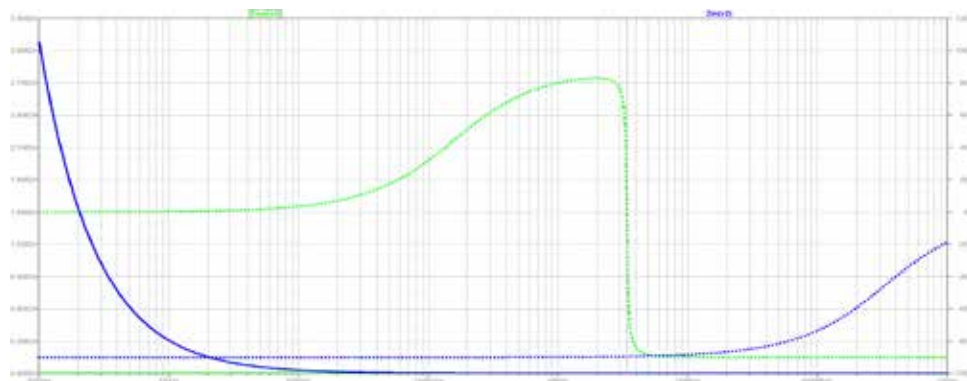




**Figura 13:** Circuito básico del amplificador clase c sin red de adaptación de salida ni de entrada.

**Fuente:** Nuñez (2019)

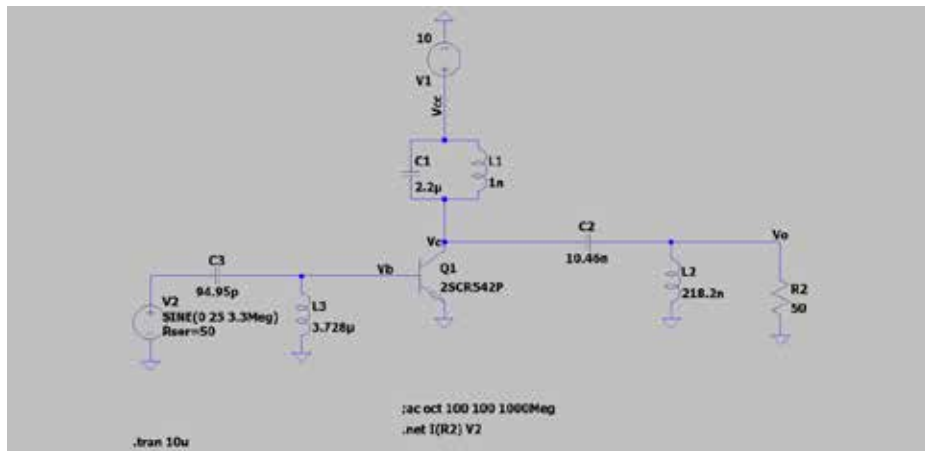
Este es el amplificador, pero no está completo, hay que recordar que el esquema del sistema planteado, necesita adaptarse, pero para esto se necesita conocer la impedancia de salida y entrada del amplificador la cual se obtendrá con un cálculo de los nodos de entrada y salida. (Ver gráfica 3)



**Grafica 3** Impedancia de salida y entrada del amplificador.

**Fuente:** Nuñez (2019)

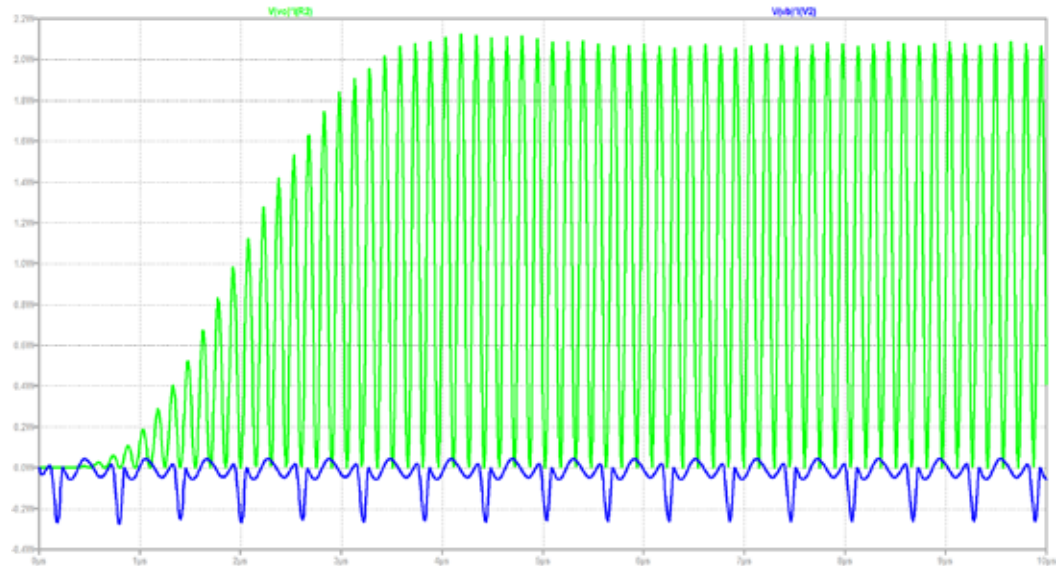
Que a 3.3MHz da una  $Z_{out} = 0.406 + 0.124j$  y una  $Z_{in} = 1.588 - 90.986j$ , con esto se puede diseñar la red de adaptación de salida y de entrada la cual queda de la forma mostrada en la figura 14.



**Figura 14** Amplificador de potencia completo con red de adaptación de entrada y salida.

**Fuente:** Núñez (2019)

Donde C2 y L2 es la red de adaptación de salida y C3, L3 la red de adaptación de entrada. Haciendo las pruebas pertinentes al sistema se obtiene la respuesta mostrada en la gráfica 4.



**Gráfica 4** Resultado de amplificación por el amplificador de potencia clase C  
**Fuente:** Nuñez (2019)

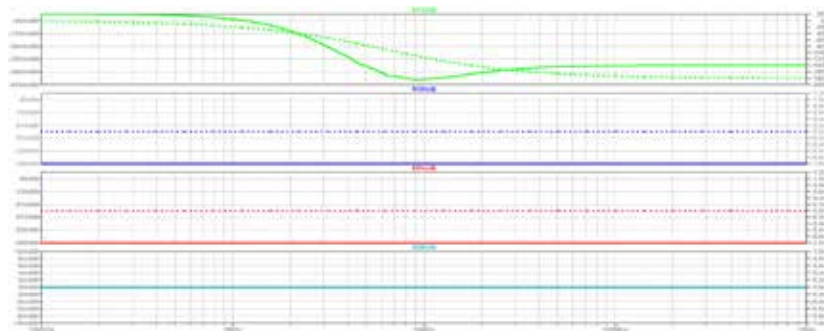
Esta es la representación temporal de la potencia de entrada (en azul) y la potencia de salida (en verde), los valores de potencia promedio obtenidos son los siguientes,

-22.257mW – entrada

1.043 W – Salida

La ganancia puede ser modificada ajustando el voltaje DC, para obtener la máxima ganancia permitible aquí probada fue con 20V de DC

En caso de necesitar los parámetros S del transistor, se observan en la gráfica 5.



### **Gráfica 5** Parámetros del transistor.

**Fuente:** Nuñez (2019)

#### **4.4 Estudio de factibilidad del proyecto**

La necesidad de amplificar la potencia entregada por los generadores Agilent modelo 8648 es casi una necesidad para los laboratorios de la escuela de electrónica y telecomunicaciones de la universidad Jose Antonio Paez. En este proceso, el transistor BJT 2SCR542P desarrolla un papel fundamental, pues bajo ciertas condiciones, puede entregar a una determinada carga una potencia de señal mayor de la que absorbe. En el amplificador gracias al transistor se consigue la intensidad de la potencias y de las señales en general.

El diseño del amplificador, empieza con la red de adaptación de entrada, esa se calcula con la impedancia del generador y la impedancia de entrada del transistor, esta red lo que hace es minimizar las reflexiones y que la transmisión de potencia entre el generador y el amplificador sea óptima.

Luego viene el amplificador como tal que se compone del transistor y el circuito oscilador, el transistor se seleccionó debido a que tenía una frecuencia de operación suficientemente alta y una potencia nominal adecuada, y el circuito oscilador se fijó en 3.3MHz.

Finalmente la red de adaptación de salida que se calcula con la impedancia de la carga y la impedancia de salida del amplificador lo que hace es eliminar las reflexiones y optimizar la transmisión de potencia

**Factibilidad técnica:** se evalúa si el equipo está disponible y por ser un pequeño amplificador de potencia, está contruido con un transistor, lo que a la hora de una posible construcción es mucho más fácil de ensamblar y reparar. Además los componentes son muy comunes y se encuentran en cualquier almacén de electrónica.

**Factibilidad económica:** En este proyecto los costos tanto de tiempo como la realización de este son totalmente factibles ya que su costo está dentro de los recursos económicos. (ver cuadro 2)

## Cuadro 2: Presupuesto

Presupuesto de Componentes		
Unidad	Componentes	Precio (US)
2	Resistencias	\$0.2 c/u
3	Condensadores	\$1 c/u
3	Bobinas	\$1.5 c/u
1	Transistor	\$1
2	Conectores	\$1 c/u
<b>total</b>		<b>\$10.9</b>

**Fuente:** Nuñez (2019)

## CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de los distintos tipos de amplificadores, para ello se hizo una investigación del estado del arte, la cual reveló los parámetros de interés de los amplificadores realizados hasta el momento. Posteriormente, se presentó el marco teórico donde se plantearon las bases requeridas para el desarrollo de esta tesis. Aquí

se discutieron los modelos de los transistores, así como los diferentes amplificadores de potencia.

Con los conocimientos obtenidos, se desarrolló un diseño de amplificador de potencia clase C, para los cuales, se detallaron las partes principales que los componen, así como el proceso que se siguió para llevarlo a cabo, comenzando desde la red de acoplamiento de salida, de entrada, así como las redes de estabilización y polarización. Con base en esto, se obtuvieron resultados simulados, los cuales, presentan parámetros comparables con aquellos amplificadores presentados en el estado del arte.

Del amplificador diseñado se realizó la comprobación mediante la simulación y caracterización del mismo. Se realizaron mediciones virtuales tanto del transistor así como del amplificador mismo.

Se ha comprobado como la eficiencia de la etapa, medida analizando la potencia que llega al vatímetro model “43” en función de la tensión correspondiente de la fuente de alimentación, presenta resultados muy óptimos logrando así poder poner en funcionamiento dichos vatímetros.

La ciencia de amplificadores se encuentra en crecimiento, por eso resulta de vital importancia el innovar en los diseños, produciendo amplificadores cada vez más eficientes a menor costo. Al momento de la escritura de este trabajo de grado, los amplificadores compuestos se encuentran llamando cada vez más la atención de los diseñadores, por lo tanto, se propone como trabajo a futuro, el incorporar amplificadores como el Clase C ya que se caracterizan por proveer amplificación con alta eficiencia. En el circuito de placa la eficiencia puede ser tan alta como el 85%, pero la mayoría de los amplificadores se diseñan para operar con eficiencia del orden de 75%, debido a que incrementar el rendimiento del 75% al 85% significa un aumento importante de la potencia de reja, además grandes eficiencias son obtenidas con elevadas tensiones de placa. Y son utilizados principalmente en aplicaciones de RF.

## **RECOMENDACIONES**

- Evaluar con mucho detenimiento el diseño de este amplificador ya que es de suma importancia tanto social como económica, y sería una pena no seguir contando con los vatímetros model “43”.
- Se sabe muy bien que la situación de Venezuela es crítica, y que las inversiones por parte de empresas grandes se piensan dos veces. Los constantes cortes eléctricos dificultan el día a día y nuestros laboratorios no se escapan de ello. Por eso en estos días cambiar de equipos no es lo más ideal por lo anterior

expuesto, además de los altos costos de dichos equipos. Por eso una pequeña inversión como lo implica este diseño de amplificador no sería una mala inversión debido a los beneficios que este traerá a los estudiantes de ingeniería en telecomunicaciones y electrónica de la Universidad Jose Antonio Paez.

- Para el diseño de este amplificador se probaron varios programas tales como **Multisim, LogicWorks, LTspice XVII** que arrojaban resultados con respecto a la señal recibida muy óptimos, pero se puede destacar que de los programas el que arrojaba resultados más precisos en cuanto a potencia fue **LTspiceXVII**, por lo que recomienda sea el usado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, F. (2007). **El proyecto de investigación**. Caracas, Venezuela: Editorial Episteme.
- Arias, F. (2012). **El proyecto de investigación**. 6ta Edición. Caracas. Venezuela:Editorial Episteme.
- Arias, F. (2016). **El proyecto de investigación** 7ma Edición. Caracas, Venezuela: Editorial Episteme.
- Gómez, J. (2017). **Diseño de un amplificador de Potencia Clase F para microondas**.Tesis de grado. Formato pdf. Consultado en línea. Abril 2019.
- Gonzales, F. (2008). **Proyecto Especiales. Ideas para su conceptualización**. Investigación y postgrado, 11, (1) pp. 127- 144.
- Hernández(2016). **Construcción de un amplificador de potencia para un prototipo de transmisor de fm estéreo con canales de sca**. Tesis de grado. Formato pdf. Consultado en línea. Abril 2019.
- Hurtado, J (2008). **“Investigación holística”**. Bogotá, Ediciones Quirón – Spypal.
- Lugo, E. (2016).**Diseño de un amplificador de potencia tipo F**.Tesis de grado. Formato pdf. Consultado en línea. Abril 2019.
- Mandujano(2014).**Diseño de un amplificador RF para comunicaciones celulares con parámetros s**. Tesis de Grado. Formato en pdf. Consultado en línea. Abril 2019. Lima, Perú.
- Monjardín, J. (2014). **Comparación de modelos lineales en modo pulsado y no pulsado de transistores GaN de potencia**. Tesis de grado. Formato pdf. Consultado en line. Abril 2019.
- Palella y Martins (2010). **“Metodología de la investigación cuantitativa”**. Caracas Editorial FEDUPEL.
- Ramírez (2009). **Metodología de la Investigación Científica**. Bogotá. Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.

Stracuzzi. (2008). **Metodología de la investigación cualitativa** 2da Edición. Caracas, Venezuela: Editorial Fedupel.

Tinjaca, J. (2015). **Diseño de un amplificador doherly con etapa de pre-amplificación para aplicaciones Wimax**. Tesis de grado. Formato pdf. Consultado en línea. Abril 2019.