



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CIRCUITO
OSCILADOR SINUSOIDAL PARA USO PRÁCTICO
EN TÉCNICAS DE MODULACIÓN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO
P R E S E N T A :
MARGARITA SALOMÓN ATALA AVILA



DIRECTOR DE TESIS: M.I. JUVENTINO CUELLAR GONZÁLEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA

MÉXICO, D.F. NOVIEMBRE 2007.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatorias

Esta tesis se la dedico en especial a la memoria de...

Mi Abuelita Elenita,

Por todo el amor que me diste, por toda tu paciencia, por enseñarme a vivir con una sonrisa cada día, por ser la luz y la alegría de mi vida.

A mi Abuelito Ricardo Avila,

Por todo el amor que me diste, por todo lo que me enseñaste, por ser parte de mí, por impulsarme cada día, por la fuerza que me diste, por que sin ti no hubiera llegado hasta aquí.

Por que nos lo debo...

Ésta tesis es en especial para ti.

A mi Madre,

Por creer en mí, por tu apoyo incondicional, por tu comprensión, por todo tu amor y por el maravilloso ejemplo que siempre me has dado. Gracias!

A mis hermanos Jorge y Aura

Por todo su apoyo, por su cariño, por aguantarme, por consentirme y por impulsarme a ser mejor cada día.

A las Nenas: Cinthya, Marielena, Mabe y Tere.

Por la fortuna de haberlas encontrado y brindarme su amistad, por no dejarme sola en ningún momento, por aguantarme y aceptarme como soy.

A mi Facultad de Ingeniería

Por enseñarme a ser fuerte, a ser disciplinada, a pensar y no dejarme llevar, por darme las herramientas necesarias para continuar trayectoria profesional.

A la UNAM,

Por el privilegio de ser parte de ella desde que tengo memoria, por darme la oportunidad de crecer como profesionista y persona cada día.

A mis amigos, Rolando, Vladimir, Miguel, Yonathan, Alfredo, Rodrigo, Jorge, Eduardo, Roberto, Luis, Salvador, Miguel Ángel y todos aquellos que no me han dejado claudicar y han estado ahí para apoyarme.

A Lorenzo Miranda,

Gracias por su apoyo, su amistad, por creer en mí y no dejarme huir.

A mis Maestros y amigos

La lista sería interminable si quisiera mencionar a todos y cada uno de ustedes, pero saben que si he llegado hasta aquí es por que he tenido la oportunidad de conocerlos. En especial a ustedes (en orden alfabético): Alberto Fuentes, Alejandro Sosa, Francisco Rodríguez, Juventino Cuellar, Miguel Moctezuma, Ricardo Garibay, Salvador Villalobos, Víctor García Garduño... Gracias!

A Anselmo Salinas

Por su amistad, por su apoyo incondicional y por salvarme en momentos importantes, gracias!

A mi tío Sergio Avila

Por su cariño permanente!

A mi Papá, Berenice y Yamil

Por todo su cariño.

A Azuat, por pasar junto a mí todo el tiempo que me llevó concluir este trabajo y hacerme reír cada día.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	I
1.INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. LA IMPORTANCIA DE LA ENSEÑANZA INTEGRAL TEÓRICO-PRÁCTICA.	7
1.3. EL LABORATORIO DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES Y RADIO FRECUENCIA.	13
1.4. PROPUESTA	14
2.TÉCNICAS DE MODULACIÓN ANALÓGICA	16
2.1. MODULACIÓN	16
2.2. MODULACIÓN EN AMPLITUD	19
2.3. MODULACIÓN EN FRECUENCIA	26
2.4. MODULACIÓN EN FASE	32
3.OSCILADORES SINUSOIDALES	35
3.1. ALGUNOS TIPOS DE CIRCUITOS OSCILADORES SINUSOIDALES	39
3.1.1. OSCILADOR HARTLEY	39
3.1.2. OSCILADOR COLPITTS	41
3.1.3. OSCILADOR POR CORRIMIENTO, ROTACIÓN O DESPLAZAMIENTO DE FASE	44
3.1.4. OSCILADOR PUENTE DE WIEN	46
3.1.5. OSCILADORES DE CRISTAL	48
4.DISEÑO DEL CIRCUITO OSCILADOR SINUSOIDAL	57
4.1. ANÁLISIS	57
4.2. OSCILADOR SINUSOIDAL PUENTE DE WIEN.	60

4.3. DISEÑO	67
<u>5.CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO OSCILADOR SINUSOIDAL</u>	<u>70</u>
5.1. SIMULACIÓN	70
5.2. CONSTRUCCIÓN	74
5.3. RESULTADOS	80
<u>CONCLUSIONES</u>	<u>81</u>
<u>APÉNDICE A. MATERIALES UTILIZADOS</u>	<u>83</u>
<u>APÉNDICE B. CIRCUITO INTEGRADO LF351</u>	<u>84</u>
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>93</u>

1. Introducción

La creciente necesidad de formar profesionistas que estén capacitados para afrontar los retos que imponen las Nuevas Tecnologías de Información y Comunicación, requiere de nuevos planteamientos educativos que permitan a los estudiantes un mayor y mejor aprovechamiento de los conocimientos adquiridos durante su el periodo de estudio, es por esto que el presente trabajo tratará de posicionar al lector dentro del contexto general en que se encuentra el desarrollo de nuevas tecnologías y la respuesta que ha tenido a estas necesidades la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México a ésta demanda.

Dentro de éste contexto crece la necesidad de un mayor acercamiento del estudiante a los problemas reales de su profesión, este tema se abordará de manera general explicando la importancia de la enseñanza teórico-práctica dentro de la formación profesional.

El presente trabajo se enfocará a optimizar recursos del laboratorio de Sistemas de Comunicaciones y Radio Frecuencia a cargo del Departamento de Telecomunicaciones (FI-UNAM), particularmente desarrollando un circuito Oscilador Sinusoidal para la realización de prácticas de Técnicas de modulación AM, con el objetivo de evitar el uso de dos generadores de funciones en cada equipo de trabajo de estudiantes por práctica. Abordará los temas que se consideran importantes conocer de forma general de desde un punto de vista práctico.

Para poder realizar este diseño, es importante entender de forma general que es la modulación, como se clasifica y en que consisten las tres técnicas de modulación analógica utilizadas en el laboratorio arriba mencionado, tema que se abordará en el segundo capítulo.

Continuando en el tercer capítulo con la teoría general de Osciladores, su clasificación y características principales para luego describir desde un enfoque de aplicación los cinco Circuitos Osciladores Armónicos comúnmente utilizados.

En el cuarto capítulo se definirán los criterios de diseño del Oscilador, se realizará un análisis general para poder seleccionar el circuito que mejor se adapte a las necesidades del laboratorio, explicar más a detalle su funcionamiento, para luego realizar los cálculos correspondientes y poder elaborar el diagrama eléctrico del circuito anexando la lista de material utilizado y los costos de los mismos.

Después en el capítulo quinto se realizarán las simulaciones del circuito diseñado, en se presentaran los resultados obtenidos para proceder a la construcción del circuito. Y finalmente las conclusiones se de la realización de este trabajo se exponen en el sexto y último capítulo.

1.1. Antecedentes

Los grandes avances en Nuevas Tecnologías de Información y Comunicación (NTIC) han caracterizado el final del siglo XX y el principio del siglo XXI. Este desarrollo de nivel mundial impacta directamente la vida social, política, cultural, económica, científica y académica de cualquier país, en todos sus niveles.

El desarrollo de nuevas tecnologías en el campo de las Telecomunicaciones ha generado una “Brecha Digital”, término creado para definir la brecha existente entre países, comunidades o personas que pueden tener acceso y utilizan las NTIC y aquellos que no tienen

acceso o aún cuando cuenten con ellas no saben como utilizarlas. También es posible definir la Brecha Digital como la desigualdad de oportunidad que hay para acceder al conocimiento, información y sobre todo a la educación mediante el uso y aprovechamiento de las alternativas tecnológicas que nos brindan las NTIC.

La Brecha digital no se refiere única y exclusivamente al área tecnológica, aunque se encuentra limitada directamente por la infraestructura informática y en telecomunicaciones con las que cuenta el país, comunidad o individuo, es más bien el resultado de una combinación de factores socioeconómicos.

La educación es uno de los medios por los cuales es posible disminuir esta Brecha Digital, adecuando los programas de estudio de educación básica y educación media para introducir a los alumnos en el uso y aprovechamiento general de las NTIC y en la educación superior en el uso, aplicación y diseño de NTIC preparando profesionistas altamente capacitados para afrontar los retos que este nuevo siglo nos demanda, en donde las NTIC se han convertido en un área prioritaria de desarrollo de un país, estado, empresa (gubernamental/privada) o individuo.

Uno de los compromisos que la Facultad de Ingeniería tiene con la sociedad mexicana es reducir la Brecha Digital existente en nuestro país mediante la formación de sus estudiantes, académicos e investigadores.

En general el sector de Telecomunicaciones en nuestro país se encuentra en pleno desarrollo y demanda cada día más profesionistas altamente capacitados y preparados para enfrentar los retos del sector.

Por lo antes expuesto el departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería realizó una revisión en su plan de estudios y su propuesta de nuevo plan fue aprobada en el 2005, los cambios realizados responden a la necesidad de enfocar el plan de estudios de la carrera de Ingeniero en Telecomunicaciones a su área de competencia, dándole una formación profesional mas adecuada a las necesidades del sector.

Por otra parte, con el nuevo plan de estudios los alumnos de esta carrera comienzan a introducirse en la base de los conocimientos propios de Telecomunicaciones a partir del cuarto semestre, lo cual no ocurría en el plan de estudios anterior en donde se impartían asignaturas mas generales y no era sino hasta el sexto semestre en el cual comenzaban a incorporarse en el estudio de las Telecomunicaciones.

Dentro de los cambios realizados al plan de estudios, el Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería clasificó en áreas de conocimiento las asignaturas que imparte. Considero importante mencionar de forma general las asignaturas obligatorias que comprenden el área de Sistemas de Radio Frecuencia, con el fin de enfatizar la importancia de proporcionar al alumno apoyo mediante prácticas de laboratorio que le permitan asimilar, integrar, aplicar y por ende apropiarse de los conocimientos teóricos que se le proporcionan, ya que uno de los objetivos de el presente trabajo es apoyar la enseñanza mediante el diseño y construcción de un circuito oscilador sinusoidal para su uso práctico en el laboratorio de Sistemas de Comunicaciones y Radio Frecuencia.

El área de Sistemas de Radio Frecuencia está comprendida por las siguientes materias obligatorias:

1. Dispositivos de Radio Frecuencia

Esta asignatura se imparte en el quinto semestre de la carrera, es la primera dentro del área de Sistemas de Radio Frecuencia, tiene por objetivo que el alumno comprenda el funcionamiento, los parámetros y las características de los dispositivos activos, ya sean semiconductores o de vacío, elementos empleados en sistemas de telecomunicaciones de las bandas de radiofrecuencia, bandas ópticas y de microondas, también conocerá las aplicaciones de los dispositivos en diversos equipos y sistemas de telecomunicaciones.

Dentro de esta asignatura se le proporcionará al alumno de las herramientas necesarias para poder realizar un análisis adecuado para la elección de dispositivos requeridos en determinadas aplicaciones proporcionándole las bases de circuitos electrónicos analógicos y digitales enfocados a las comunicaciones en radiofrecuencia.

2. Circuitos de Radio Frecuencia

La asignatura se imparte en el sexto semestre de la carrera y es la segunda dentro del área, su objetivo es proporcionar al alumno las herramientas necesarias para analizar y diseñar diversos circuitos electrónicos analógicos y digitales enfocados a las comunicaciones en radiofrecuencia y sus aplicaciones, además tendrá la capacidad de elegir las técnicas adecuadas de acuerdo a una aplicación determinada. Esta asignatura también le proporciona al alumno los conocimientos básicos y fundamentales para poder cursar de forma adecuada la asignatura de Receptores.

3. Receptores

Esta asignatura se imparte durante el séptimo semestre de la carrera, es la tercera dentro del área y se encuentra seriada con la asignatura de Circuitos de Radio Frecuencia ya que es necesario que el alumno que cuente con ciertos conocimientos previos que serán aplicados durante el curso para poder comprender e integrarlos con lo aprendido obteniendo un mejor aprovechamiento.

Su objetivo es que el alumno conozca y comprenda el funcionamiento de los receptores de señales de diferentes tipos y características, proporcionarle las herramientas necesarias para que el alumno sea capaz de elegir el tipo y características de equipos receptores en función de ciertos parámetros de un sistema de comunicaciones y/o de alguna aplicación determinada.

4. Transmisores

Se imparte durante el octavo semestre de la carrera, es la cuarta asignatura obligatoria del área de Sistemas de Radio Frecuencia, su objetivo es que el alumno conozca y comprenda el funcionamiento de los transmisores de señales de diferentes tipos y características, proporcionarle las herramientas necesarias para que el alumno sea capaz de elegir el tipo y características de equipos transmisores adecuados en función de ciertos parámetros de un sistema de comunicaciones y/o de alguna aplicación determinada mediante el uso de metodologías de cálculo de las principales características de los equipos de transmisión.

Es indispensable que las asignaturas de Sistemas de Radio Frecuencia se encuentren apoyadas con prácticas de laboratorio, diseñadas especialmente para cubrir sus objetivos particulares y en las cuales se aborden las aplicaciones más significativas de cada una, para que de ésta manera sea posible reforzar los conocimientos adquiridos. Éste es precisamente uno de los objetivos del presente trabajo, en donde se propondrá un circuito oscilador sinusoidal que permita optimizar el uso de los equipos de laboratorio.

1.2. La importancia de la enseñanza integral Teórico-Práctica.

Si tenemos en cuenta que la educación es la base fundamental del desarrollo de cualquier individuo, empresa, estado o país, debemos poner mucha atención en la forma en la cual se deberá propiciar la apropiación de conocimientos por parte del alumno para que su aprovechamiento sea el mayor posible.

Actualmente la docencia en general se enfrenta a nuevos escenarios en donde se requiere de un mayor compromiso y participación por parte de los docentes y estudiantes con el objeto de poder responder al dinamismo con el cual se comportan las sociedades actuales, es imprescindible desarrollar en el estudiante una mayor capacidad de resolución de problemas y destrezas creativas.

Considero que la docencia no tiene sus límites en las aulas de una facultad, la docencia es algo que va mas allá dentro de la formación universitaria y su objetivo primordial es preparar al alumno en todas aquellas tareas a las que se deberá enfrentar en su vida profesional, es por esta razón que las metodologías de enseñanza enfocadas a ingeniería deberán integrar el conocimiento teórico soportado con la

apropiación práctica de cada concepto, lo cual permitirá al alumno apropiarse de conocimiento teórico mediante experiencias prácticas.

Las enseñanza y sus metodologías no son temas nuevos, las formas en las cuales es posible que un individuo aprenda son temas que se abordan desde el siglo XVI con Amos Comenius (1592-1670) quien fue un gran teólogo, filósofo y al que se le conoce como padre de la pedagogía por su obra mas importante “Didáctica Magna” en la cual estructura la pedagogía como una ciencia autónoma, establece sus principios fundamentales, propone una enseñanza sistematizada y preocupada por que el alumno llegue a resultados formativos sin olvidarse de la importancia de los profesores como el medio para la lograr transformar la escuela y la enseñanza.

La transformación de la enseñanza propuesta por Comenius busca alcanzar un ideal social que se basa en la formación del hombre no como individuo sino como un ser social, en donde sus acciones afectan de manera directa a su entorno y por ende a la sociedad a la que pertenece.

A partir de Comenius tenemos diversas teorías pedagógicas en las cuales se enfatiza la importancia de que el estudiante realice actividades que le permitan apropiarse del conocimiento teórico de una forma más sencilla y adecuada.

Otro aporte importante a la pedagogía lo realizó el biólogo y doctorado Honoris Causa por Harvard Jean Piaget (1896-1980), a quien sus diversas investigaciones lo llevaron a proponer la teoría de que el proceso cognitivo o pensamiento de los niños es inherentemente diferente del de los adultos lo que resulto en una teoría global de las

etapas del desarrollo, afirmando que los individuos exhiben ciertos patrones de cognición comunes y diferenciables en cada período de su desarrollo. Además publicó varios estudios sobre psicología infantil y elaboró una teoría de la inteligencia sensorio-motriz que describe el desarrollo casi espontáneo de una inteligencia práctica que se sustenta en la acción (praxis -en plural: praxia).

La teoría de Piaget ha sido denominada epistemología genética porque estudió el origen y desarrollo de las capacidades cognitivas desde su base orgánica, biológica, genética, encontrando que cada individuo se desarrolla a su propio ritmo y describe la forma del desarrollo cognitivo desde la fase del recién nacido hasta la etapa adulta que es caracterizada por procesos conscientes de comportamiento regulado. Dentro del desarrollo genético del individuo es posible identificar y diferenciar periodos de desarrollo intelectual. Piaget considera el pensamiento y la inteligencia como procesos cognitivos que tienen su base en un substrato orgánico-biológico determinado que se va desarrollando de forma paralela con la maduración y el crecimiento biológico.

En otro de sus estudios Piaget hace notar que la capacidad cognitiva y la inteligencia se encuentran estrechamente ligadas al medio social y físico. Piaget considera que los dos procesos que caracterizan a la evolución y adaptación del psiquismo humano son los de la *asimilación* y *acomodación*. Ambas capacidades innatas que por factores genéticos se van desplegando ante determinados estímulos en determinadas etapas del desarrollo y en determinadas edades sucesivas.

"La asimilación mental consiste en la incorporación de los objetos dentro de los esquemas de comportamiento, esquemas que no son otra cosa

sino el armazón de acciones que el hombre puede reproducir activamente en la realidad" (Piaget, 1948) y se refiere al modo en el cual un individuo u organismo se enfrenta a un estímulo de su entorno en términos de su organización actual y la acomodación implica una modificación de la organización actual como respuesta a las demandas del medio. Este es el proceso mediante el cual el individuo u organismo se ajusta a las condiciones externas.

Si consideramos que ningún conocimiento se constituye como una copia de lo real, porque forzosamente incluye un proceso de asimilación a estructuras anteriores, esto es, que el individuo u organismo requiere realizar una integración de estructuras previas. La asimilación maneja dos elementos importantes: lo que se acaba de conocer y lo que significa dentro del contexto del ser humano que es lo que aprendió. Es por esta razón que el conocimiento no es copiar lo real, sino actuar en la realidad y transformarla.

De forma general podemos decir que el desarrollo cognitivo ocurre con la reorganización de las estructuras cognitivas como una consecuencia de procesos adaptativos al medio a partir de la asimilación de experiencias y acomodación de las mismas de acuerdo con el bagaje previo de las estructuras cognitivas de los individuos u organismos. Si la experiencia física o social entra en conflicto con los conocimientos previos, las estructuras cognitivas se verán en la necesidad de reacomodarse para incorporar la nueva experiencia, esto es lo que se considera como aprendizaje.

Con esto Piaget nos dice que el contenido del aprendizaje se deberá organizar en esquemas de conocimiento que presentan diferentes niveles de complejidad dependiendo del grado de desarrollo del

estudiante al que se esté enfocado. La experiencia escolar, por tanto, requiere promover el conflicto cognitivo en el aprendiz mediante diferentes actividades, tales como las preguntas desafiantes de su saber previo, las situaciones desestabilizadoras, las propuestas o proyectos retadores, etc.

En el caso de un aula de clases Piaget también considera que los factores que motivan la situación del desarrollo cognitivo son inherentes al estudiante y no son, por lo tanto, manipulables directamente por el profesor. La motivación del estudiante es una consecuencia de la existencia de un desequilibrio conceptual y de la necesidad que tenga el estudiante de restablecer su equilibrio.

Es por esta razón que la enseñanza debe ser planeada de tal forma que permita que el estudiante manipule los objetos de su ambiente, transformándolos, encontrándoles sentido, disociándolos, introduciéndoles variaciones en sus diversos aspectos, hasta estar en condiciones de hacer inferencias lógicas y desarrollar nuevos esquemas y nuevas estructuras mentales. Es decir, apropiarse del conocimiento, actuar en la realidad y transformarla a partir de lo aprendido.

Las teorías y estudios de Piaget han sido las bases de innumerables teorías y corrientes pedagógicas que actualmente se están enriqueciendo gracias a los avances de las NTIC ya que estas se han convertido en herramientas fundamentales en la enseñanza básica, media y de manera fundamental en la enseñanza superior, permitiendo integrar al alumno desde edades muy tempranas en el uso y aplicación de las nuevas tecnologías y con esto disminuir la brecha digital existente.

Actualmente han surgido metodologías de enseñanza como e-learning, educación a distancia, robótica pedagógica, los ambientes virtuales como apoyo a la enseñanza, mindtools, etc.... en las cuales la enseñanza integra herramientas tecnológicas para lograr el aprendizaje del alumno.

Las NTIC tienen el potencial para mejorar el aprendizaje en diversas áreas del conocimiento, mejorar la comprensión de conceptos y desarrollar las capacidades de los estudiantes, un de ellos es creando ambientes virtuales de educación y la UNESCO (1998) en su informe de mundial de la educación indica que los entornos virtuales de aprendizaje constituyen una forma completamente nueva de Tecnología de la Educación y ofrece una compleja serie de oportunidades y tareas a las instituciones de enseñanza en todo el mundo y en donde definen al entorno de aprendizaje virtual como un programa informático interactivo de carácter pedagógico que posee la capacidad de comunicación integrada, es decir, esta estrechamente asociado a las NTIC.

El impacto de las NTICs en la educación no solo se circunscribe al uso de las herramientas tecnológicas como apoyo la docencia como una herramienta más, si no que se requiere de un nuevo planteamiento educativo en el cual el aprendizaje del alumno sea integral es decir, permita la integración del conocimiento teórico y práctico mediante el uso de herramientas tecnológicas, en nuestro caso la inclusión de programas de simulación y prácticas diseñadas para el reforzamiento de la asimilación y apropiación del conocimiento.

Logrando con la debida orientación de parte de los profesores, que la capacidad de investigación y proposición de los alumnos se vea incrementada y ésta capacidad se reflejará a futuro en una mayor

confianza por parte del de los estudiantes, al enfrentarse a la resolución de problemas en cualquier ámbito, ya que de esta forma les brindamos las herramientas necesarias para aprovechar la infraestructura que se tiene (la cual en general esta un poco atrasada con respecto a países desarrollados) y poderla adecuar para aprovecharla al máximo proponiendo alternativas y realizando estudios en laboratorios durante su vida profesional.

Por las razones antes expuestas y en mi opinión no existe nada mejor para la apropiación del conocimiento que la práctica, la práctica hace que cada estudiante mediante la realización de experimentos pueda corroborar la teoría y por otra parte le permite enfrentarse al reto de resolver de forma práctica un problema teórico, por así decirlo aterrizar sus conocimientos.

Además se propicia la aplicación del método investigativo en el alumno ya que en el momento en que el alumno además de apropiarse del conocimiento también comienza a preguntarse y cuestionarse si existen otros métodos para resolver el problema y un laboratorio es el lugar ideal para que los estudiantes puedan ensayar e incrementar su capacidad de plantear diversas alternativas para la resolución de un problema específico.

1.3. El laboratorio de Sistemas de Comunicaciones y Radio Frecuencia.

Uno de los problemas de la enseñanza de las ingenierías en general es contar con los equipos adecuados, para que los alumnos puedan realizar experimentos en donde puedan constatar de manera práctica los conocimientos teóricos que van adquiriendo a lo largo de la carrera,

recrear algunos de los problemas a los cuales se pueden enfrentar en su vida profesional y lo mas importante, que tengan un espacio en donde puedan experimentar, crear y proponer nuevas alternativas de solución. Desafortunadamente en el área de Telecomunicaciones estos equipos son costosos y delicados, razón por la cual es necesario optimizar su uso, con el fin de atender a una mayor cantidad de alumnos de una mejor manera.

1.4. Propuesta

El caso particular que abordaremos en éste trabajo es el del laboratorio de Sistemas de Comunicaciones y Radio Frecuencia. Teniendo en cuenta que para realizar cualquier práctica de comunicaciones en donde se requiera una señal de mensaje y una señal portadora, se requieren actualmente dos generadores de funciones por práctica, esto limita la capacidad del laboratorio. Ahora bien, lo que se pretende con este trabajo es diseñar un circuito oscilador sinusoidal que permita generar una señal que emule el mensaje, de tal manera que solo se ocupe un generador de funciones para realizar las prácticas y se pueda optimizar el uso de generadores de funciones en el laboratorio, con el fin de atender a una mayor cantidad de alumnos por sesión.

La propuesta de optimización de los equipos de laboratorio que planteo en este trabajo es mediante el diseño y construcción de un circuito oscilador sinusoidal que permita generar una señal que emule el mensaje y pueda ser usado en las diferentes prácticas que se realizan en el laboratorio de Sistemas de Comunicaciones y Radio Frecuencia.

Considero importante comenzar mencionando de manera general las diferentes técnicas de modulación tanto en amplitud como en frecuencia,

conocer sus características, aplicaciones, ventajas y desventajas desde el punto de vista de telecomunicaciones.

Para continuar con la propuesta del circuito oscilador sinusoidal que permita optimizar el equipo del laboratorio, será necesario hacer un análisis de las características de los diversos tipos de osciladores y realizar estudio comparativo de sus características, con el objeto de elegir el mas adecuado a las necesidades de las asignaturas que se impartan en este laboratorio, además deberá ser un circuito que permita su uso regular, es decir sea robusto y por supuesto económico.

Después de haber realizado el estudio de los diferentes tipos de osciladores sinusoidales y de haber elegido el más adecuado realizaré el diseño del circuito y expondré sus características en frecuencia y amplitud además de presentar su diagrama eléctrico.

Posteriormente realizaré la simulación del circuito propuesto en MultiSim9 de Workbench y procederé a la construcción preliminar del circuito para realizar pruebas de funcionamiento y seguridad. Finalmente se construirá el circuito definitivo para su entrega al laboratorio de Sistemas de Comunicaciones y Radio Frecuencia.

2. Técnicas de Modulación Analógica

2.1. Modulación

La propagación de señales de información a través de un determinado medio de transmisión depende de las características de dicho medio, por lo cual es necesario adecuar las señales de información que se quieren transmitir a las características del canal de comunicaciones que se utilizará como medio de transmisión. A éste proceso de adaptación de señales se le conoce como *Modulación*.

Se define la *Modulación* como el proceso de transformar información de su forma original a una forma mas adecuada para su transmisión, este proceso se lleva a cabo mediante la variación de alguno de los parámetros de la señal portadora de manera linealmente proporcional al valor instantáneo de la señal de información.

La modulación se realiza en el transmisor en un circuito llamado *Modulador* y la demodulación que es su proceso inverso se realiza en el receptor en un circuito *Demodulador* o *Detector*.

Los elementos básicos que componen un sistema de comunicaciones son los que se listan a continuación y se encuentran representados en la figura 1.

- Emisor: Es el dispositivo encargado de generar la señal de información o mensaje $[m(t)]$ que se va a transmitir.
- Modulador: Es el dispositivo que realiza la adaptación de la señal de información $[s(t)]$ a las características específicas del Canal de Transmisión.

- Canal de Comunicaciones o Medio de Transmisión: es el medio encargado de soportar la transmisión de la señal de información (radio, coaxial, fibra óptica, etc.) $[x(t)]$.
- Demodulador: Es el dispositivo que realiza la recuperación de la señal de información a partir de la señal recibida del Canal de Comunicaciones $[y(t)]$.
- Receptor: Es el destinatario que recibe la señal de información o mensaje.
- Perturbaciones: es el ruido o interferencia causada por elementos inherentes al medio canal de comunicaciones y a los dispositivos.

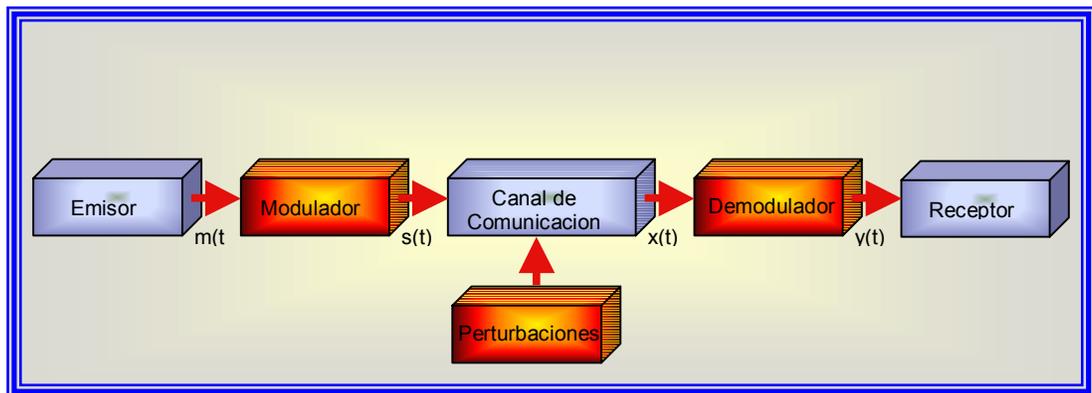


Figura No. 1. *Diagrama de Bloques de Sistema de Comunicaciones General*

El principal objetivo de la transmisión de información es que la señal de información $m(t)$ llegue a su destinatario, por lo que la situación ideal sería que $m(t)$ fuera igual que $y(t)$, sin embargo en la realidad esto no sucede y se tiene que $m(t)$ es muy diferente a $y(t)$. La diferencia entre estas dos señales se debe principalmente al ruido generado por las perturbaciones del medio que afectan el canal de transmisión y a las deficiencias en los procesos de modulación y demodulación de las señales.

Una señal puede ser transmitida de dos diferentes formas, de manera digital o analógica. Las señales digitales usan un recurso de codificación

de pulsos a diferencia de las señales analógicas que utilizan la técnica de modulación para ser transmitidas sin perder su integridad.

En las prácticas que se realizan en el laboratorio de Sistemas de Comunicaciones se utiliza la modulación analógica, por lo que no mencionaremos en este trabajo las técnicas de modulación digital.

Las ondas portadoras por excelencia son las señales sinusoidales en los diferentes tipos de modulación, la onda portadora está definida unívocamente por su amplitud, su frecuencia y su fase como se muestra en la siguiente ecuación:

$$x_p(t) = A_p \cdot \cos(\omega_p t + \varphi)$$

Donde: A_p Es la amplitud de la onda portadora

ω_p Es la pulsación angular de la portadora y está relacionada con la frecuencia de onda a través de la siguiente expresión $\omega_c = 2\pi f_p$ y φ es la fase de la señal portadora.

Entonces podemos decir que el proceso de modulación de una señal consiste en hacer variar alguno de éstos parámetros de la onda portadora $x_p(t)$, en función de la señal de información, dando así lugar a los diferentes tipos de modulación analógica:

- Modulación de Amplitud, consiste en hacer variar la amplitud de la onda portadora en función de la señal de información: $A_p = F(x(t))$
- Modulación de Frecuencia, la frecuencia de la onda portadora varía en función de la señal de información: $f_p = F(x(t))$
- Modulación de Fase, consiste en variar la fase de la señal portadora en función de la señal de información: $\varphi = F(x(t))$

Como resultado del proceso de modulación se obtiene la onda modulada $s(t)$, que es la señal que se envía por el canal de comunicaciones transmitiéndose de más forma eficiente y sin perder su integridad, a diferencia de que se enviara la señal en banda base, $m(t)$.

A continuación mencionaremos de forma general cada uno de los tipos de modulación analógica mencionados anteriormente.

2.2. Modulación en Amplitud

La modulación en amplitud como su nombre lo dice, consiste en hacer variar la amplitud de la señal portadora en función de la amplitud de la señal de información, este proceso se puede definir como una mezcla de señales de audio frecuencia (mensaje) y radiofrecuencia (portadora), de tal forma que las variaciones de amplitud de la señal de audio frecuencia alteran la amplitud de la señal de radio frecuencia.

Esta es una forma de modulación relativamente económica pero de baja calidad de transmisión y es utilizada generalmente en radiodifusión de señales de audio y video. La banda de radiodifusión comercial AM abarca desde los 535 a 1605 KHz.

La modulación en amplitud también es utilizada para las comunicaciones de radio móviles de dos sentidos, tales como las comunicaciones entre el aeropuerto y los aviones que van de 118 a 136 MHz y la banda civil (CB) de 26.965 a 27.405 MHz.

Un modulador de AM es un dispositivo lineal con dos señales de entrada como se puede apreciar en la en figura 2, la primer señal de entrada es la portadora $x_p(t)$, de amplitud constante y frecuencia única; la segunda

es la señal de información o mensaje $x_m(t)$, ésta puede ser simple o compuesta de diversas frecuencias, de una o más fuentes y actúa o modula a la señal portadora.

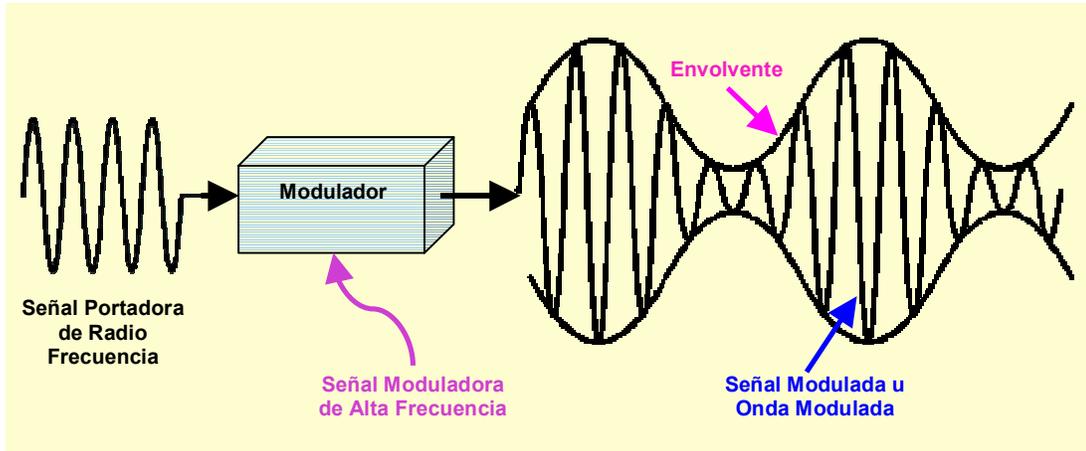


Figura No. 2. Proceso General de Modulación

Debido a que la señal de información actúa sobre la portadora, se le denomina señal moduladora $x_{am}(t)$. La resultante de la unión de estas dos señales se le llama onda modulada o señal modulada.

Al realizar ésta unión o mezcla de señales, se obtienen al menos tres frecuencias:

- La frecuencia de la portadora f_p la cual se mantiene constante durante el proceso de modulación.
- La frecuencia de la suma de la señal portadora y la señal de información $f_p + f_m$
- La frecuencia de la diferencia de la señal portadora y la señal de información $f_p - f_m$

Para que exista modulación se debe cumplir con la condición de que $f_p \gg f_m$ y se debe cuidar que la amplitud de la señal de información no sea

mayor a la amplitud de la portadora o esto generará distorsión (sobremodulación) y la transmisión de la información será incorrecta.

La figura 3 ejemplifica claramente el proceso de modulación en el dominio del tiempo, en donde se muestra una señal de información con una sola frecuencia que modula a la señal portadora con una frecuencia mayor, también podemos observar que la frecuencia de la portadora se mantiene constante durante este proceso, sin embargo sufre variaciones en su amplitud de acuerdo con la señal de información, por consiguiente cualquier aumento o disminución en la amplitud de la señal de información dará como consecuencia un incremento o decremento en los picos positivo y negativo de la amplitud de la señal portadora.

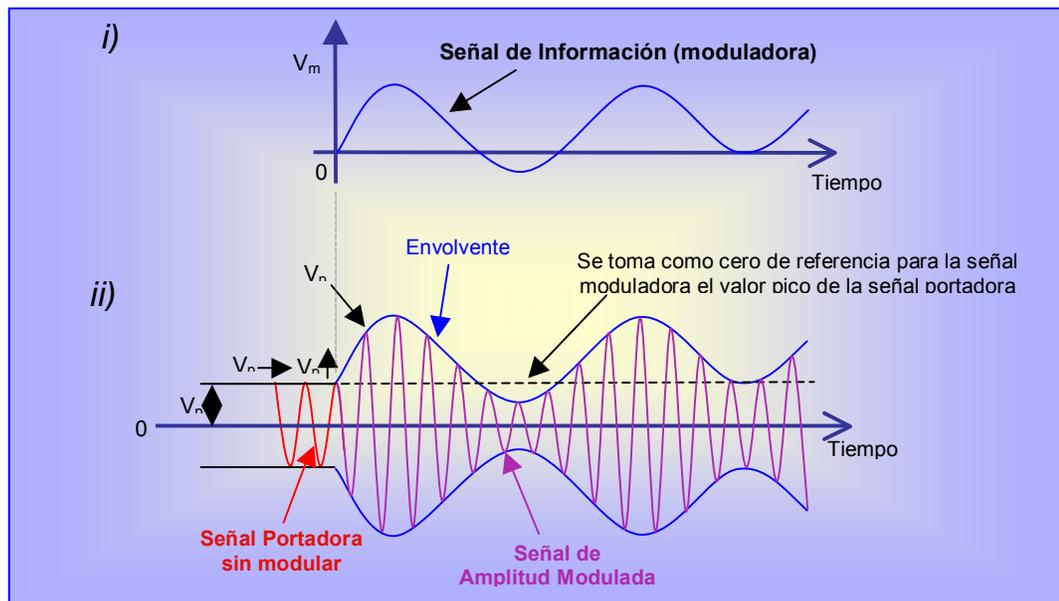


Figura No. 3 Modulación de Amplitud i) Señal de Información o Moduladora, ii) Señal portadora modulada

La envolvente se define como la línea imaginaria que conecta los picos positivo y negativo de la forma de onda de la señal portadora y ésta proporciona la reproducción exacta de la señal de información (moduladora), esta se puede identificar claramente en la figura antes mencionada.

En esta figura también se puede apreciar que la señal de información utiliza como referencia el valor pico de la portadora en lugar del cero, por lo tanto la envolvente de ésta señal va a variar por arriba o debajo de la amplitud de la portadora, es decir, el cero de referencia utilizado en la señal de información coincide con el valor pico de la señal portadora no modulada. Lo anterior da como consecuencia que la amplitud de la señal de información deberá ser menor a la amplitud de la señal portadora, de lo contrario se genera sobremodulación y la transmisión de la señal de información será incorrecta.

Las señales portadora y de información se pueden expresar mediante funciones trigonométricas sencillas de la siguiente forma:

La señal portadora $v_p = V_p \text{sen}(2\pi f_p t)$

Donde:

v_p Es el valor instantáneo del voltaje de la portadora en un determinado tiempo del ciclo.

V_p Es el valor pico de la portadora no modulada, (entre 0 y la amplitud máxima de las alternancias positiva y negativa)

f_p Es la frecuencia de la portadora

t Es un punto determinado en el tiempo durante el ciclo de la portadora

La señal de información (moduladora) $v_m = V_m \text{sen}(2\pi f_m t)$

Donde:

v_m Es el valor instantáneo del voltaje de la señal de información en un determinado tiempo del ciclo

V_m Es la amplitud pico de la señal de información

f_m Es la frecuencia de la señal de información

Para que la transmisión de la información sea correcta debemos de considerar que $v_m < v_p$

Utilizando los valores de la señal de información y la señal portadora podemos expresar la onda modulada completa, si tomamos en cuenta que la señal de información toma como referencia el valor pico de la portadora entonces, al valor pico de la señal portadora se le suma o resta el valor de la señal de información, entonces es posible calcular el valor instantáneo máximo o mínimo de la envolvente de voltaje mediante la suma algebraica del valor instantáneo de la señal de información, al valor pico de la señal portadora como se muestra en la siguiente expresión:

$$v_1 = V_p + v_m = V_p + V_m \text{ sen } 2\pi f_m t$$

Por lo tanto, el valor instantáneo de la onda modulada completa v_2 queda expresado como:

$$v_2 = v_1 \text{ sen } 2\pi f_p t$$

Substituyendo v_1 en v_2

$$\begin{aligned} v_2 &= (V_p + V_m \text{ sen } 2\pi f_m t) \text{ sen } 2\pi f_p t \\ &= V_p \text{ sen } 2\pi f_p t + (V_m \text{ sen } 2\pi f_m t) (\text{ sen } 2\pi f_p t) \end{aligned}$$

Donde,

v_2 es el valor instantáneo de la señal modulada de AM o v_{AM}

$(V_m \text{ sen } 2\pi f_m t) (\text{ sen } 2\pi f_p t)$ es la forma de onda de la multiplicación de la señal portadora por la señal de información

Para que sea posible la modulación en AM sin distorsión, el voltaje de la señal de información debe ser menor al voltaje de la señal portadora, entonces como habíamos dicho anteriormente, la amplitud de la señal de

información deberá ser menor a la amplitud de la señal portadora en voltaje.

A ésta relación se le conoce como índice de modulación m (también es llamado factor o grado o coeficiente de modulación) y es el resultado del cociente:

$$m = \frac{V_m}{V_p} \quad \text{donde } V_m \text{ y } V_p \text{ son los valores pico de las señales sin modulación}$$

Si multiplicamos este índice por 100 se obtiene el porcentaje de modulación.

Entonces, la señal de AM es diferente a la señal portadora sin modular como consecuencia del proceso de modulación en donde se generan dos frecuencias laterales del mismo nivel entre si de amplitud $= m \frac{V_p}{2}$, estas dos frecuencias laterales son simétricas en relación a la frecuencia de la portadora f_p , siendo la frecuencia lateral superior $f_p + f_m$ y la frecuencia lateral inferior $f_p - f_m$.

En la siguiente figura se muestra la forma de onda y el espectro para diferentes índices de modulación.

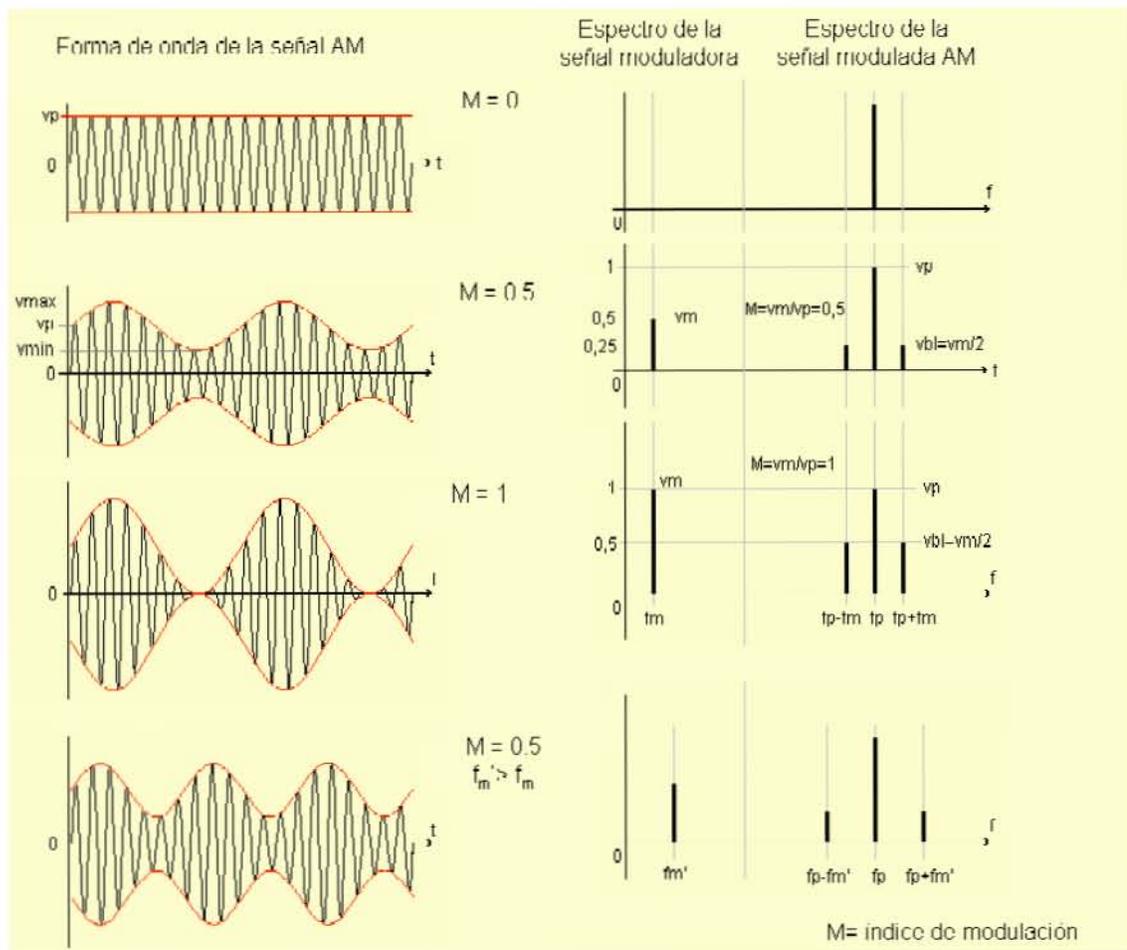


Figura No. 4. Índice de Modulación, AM

La modulación de amplitud se puede realizar de diversas formas, las más comunes son: AM convencional (arriba mencionada), Doble Banda Lateral con Portadora Suprimida (DBSC o DSB) y Banda Lateral Única (BLU), entre otras.

Cuando se modula en DBSC se elimina la señal portadora para no desperdiciar su potencia y se conservan las bandas laterales, éste tipo de modulación se considera como un caso especial de la AM sin portadora y una de sus ventajas es que ahorra considerablemente energía pero no es utilizada comúnmente ya que el proceso de demodulación es complejo.

En el caso de modulación BLU, ésta mejora la eficiencia eliminando la señal portadora y una de las bandas laterales, como resultado de este proceso se reduce el ancho de banda ocupado y disminuye el ruido, además es posible canalizar la potencia de las señales suprimidas a la banda lateral única y por ende se obtiene una señal mas fuerte y confiable. Sin embargo su desventaja es el proceso de demodulación que es mas complicado que el de AM convencional.

2.3. Modulación en Frecuencia

La modulación en frecuencia consiste en hacer variar la frecuencia instantánea de la onda portadora de acuerdo con la señal de información, esta modulación puede ser tanto en forma digital como analógica y requiere de un ancho de banda mayor que la modulación en amplitud, sin embargo es por esta misma razón que la señal modulada sea mas resistente a las interferencias y el ruido, es decir es una señal mas robusta, su uso típico es en radiodifusión en FM y ha sido elegida como norma de modulación para las transmisiones radiofónicas de alta fidelidad.

La señal modulada en frecuencia también puede ser utilizada para transportar una señal estereofónica mediante la multiplexación (antes de la modulación en frecuencia) y demultiplexación (después de la demodulación de la señal FM) de los canales izquierdo y derecho de la señal estéreo del proceso de modulación de frecuencia, por lo cual a éste proceso se le considera totalmente ajeno a la modulación en frecuencia propiamente dicha.

Una de las ventajas de modulación en FM es que el ruido y las interferencias que alteran la amplitud de la onda no afectan a la

información transmitida ya que la información se extrae de la variación de frecuencia y no de la amplitud de la onda que permanece constante. A consecuencia de las características de modulación en FM, la calidad del sonido o imagen es mayor que cuando se modula en AM, además como no se altera la frecuencia de la portadora, es posible transmitir señales sonoras o de otro tipo, tales como imágenes o datos, que abarcan una gama mayor de frecuencias moduladoras sin abarcar un mayor ancho de banda.

En FM la amplitud de la señal portadora se mantiene constante durante el proceso de modulación mientras que su frecuencia cambia en función de la señal de información. A medida que la amplitud de la señal de información varía se producen corrimientos proporcionales en la frecuencia de la portadora.

Se le llama desviación de frecuencia f_d , al aumento de la frecuencia en la portadora que genera la señal de información (moduladora), la desviación máxima se produce cuando la señal de información llega a su máximo valor de amplitud. Por lo tanto, la relación de desviación en frecuencia esta determinada por la amplitud de la señal de información, es decir cuantas veces por segundo la frecuencia de la portadora se desvía arriba o debajo de su frecuencia central.

La desviación de la frecuencia f_d es directamente proporcional a la amplitud de la señal de información. La desviación máxima se alcanza cuando la señal de información llega a sus picos de amplitud, tanto negativa como positiva.

En la figura 5 se muestra una señal de FM, se puede observar que la señal portadora es de frecuencia constante y la señal de información es

una onda senoidal de frecuencia baja. La onda modulada FM aumenta su frecuencia cuando la onda moduladora (señal de información) se hace positiva llegando a su máxima frecuencia en el punto pico de amplitud de la señal de información y viceversa, cuando la señal de información disminuye su amplitud y llega a su valor pico negativo la frecuencia de la onda modulada es mínima. Cuando la amplitud de la señal de información llega cero entonces la frecuencia de la modulada se encuentra en su frecuencia central.

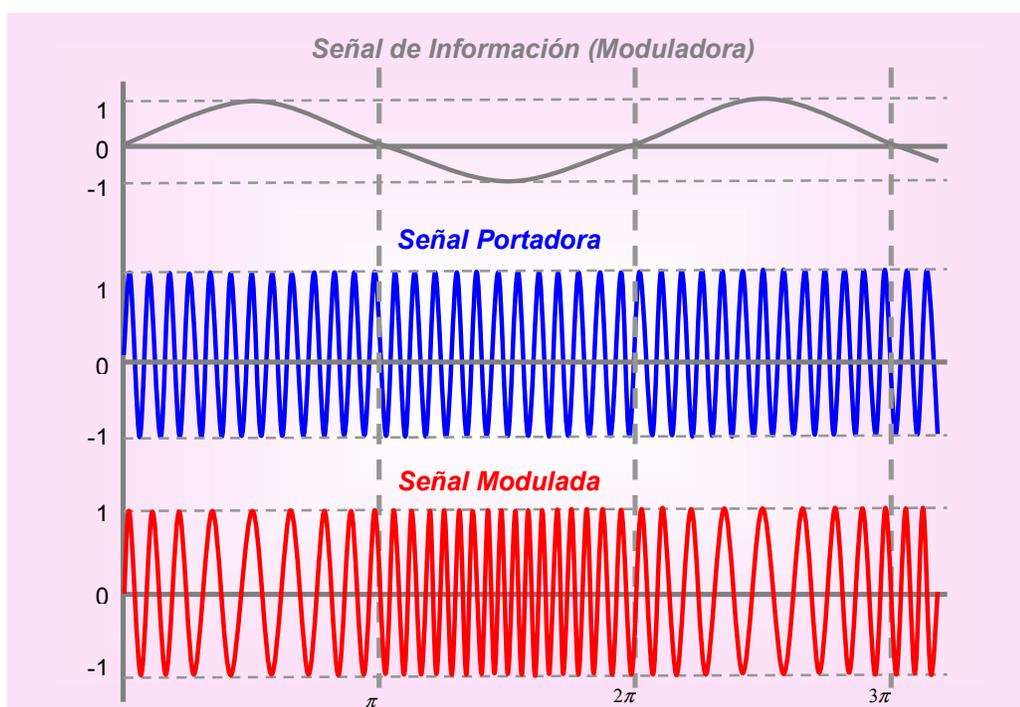


Figura No. 5. Ejemplo de Modulación de Frecuencia

Cualquier proceso de modulación produce bandas laterales al igual que en AM, que son la suma y la diferencia de las frecuencias de la señal portadora y la señal de información. Además en FM y PM (que se explicará más adelante) se forman un gran número de pares de bandas laterales entonces el espectro de las señales FM y PM es mucho mayor que el de una señal equivalente de AM.

A continuación se presenta un ejemplo del espectro de frecuencias de una señal típica de FM en la figura 6, en ésta se puede observar que las bandas laterales se encuentran espaciadas de la frecuencia de la portadora f_p por la frecuencia de la señal de información f_m tanto en las bandas superiores e inferiores.

Debido a que la señal de FM es producto de las bandas laterales, la amplitud de estas bandas deberán variar conforme a la desviación de la frecuencia y a la frecuencia de la señal de información, su suma produce una amplitud constante pero de frecuencia variable.

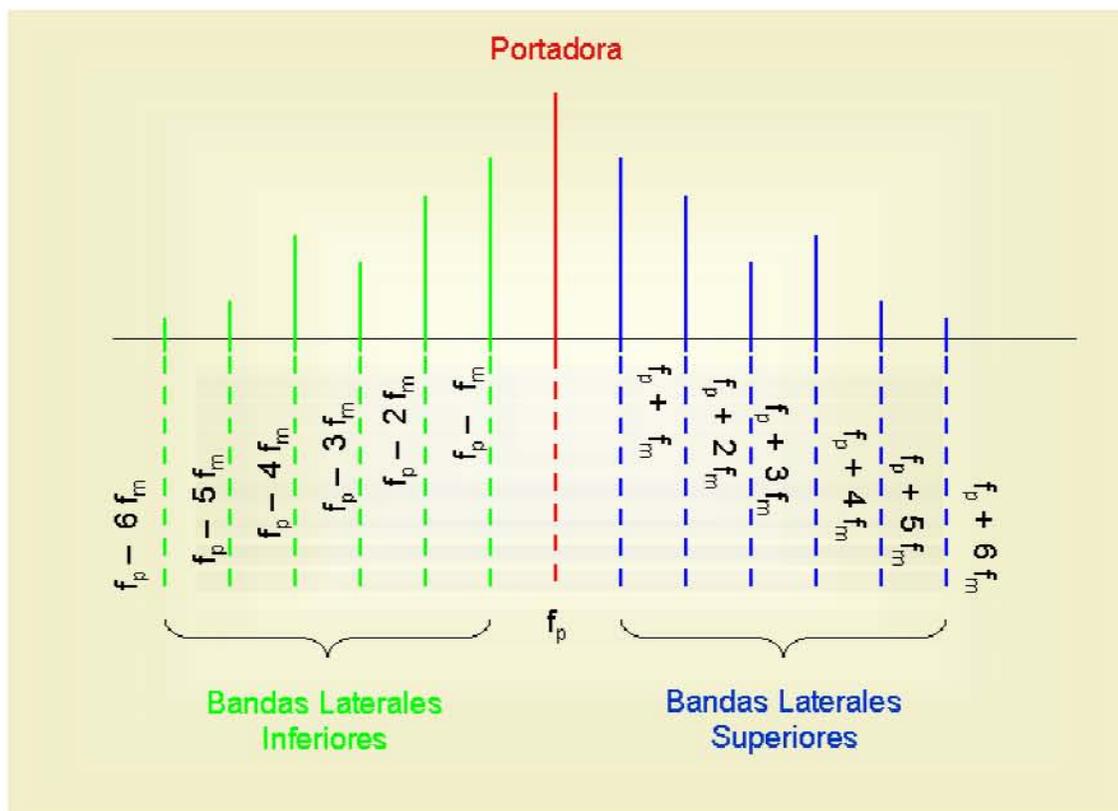


Figura No. 6. Espectro de Frecuencias de FM

Nota: Considerar que este es solo un ejemplo ya que las amplitudes de la señal dependen del índice de modulación

Como se mencionó anteriormente la modulación en FM produce un número infinito de bandas laterales superiores e inferiores, sin embargo no todas estas bandas nos permiten transmitir información, solo aquellas

bandas laterales cuya amplitud sea mayor al 1% de la señal portadora no modulada serán utilizadas y no se consideran despreciables.

Se le llama índice de modulación m_f , a la relación existente entre la desviación de frecuencia y la frecuencia de la señal de información, también es conocida como *relación de desviación*.

$$m_f = \frac{f_d}{f_m} \quad \text{donde:} \quad \begin{array}{l} f_d \text{ es la desviación de la frecuencia} \\ f_m \text{ es la frecuencia de la señal de} \\ \text{información} \end{array}$$

Si el índice de modulación en FM es alto se producirán un mayor número de bandas laterales significativas y también será mayor el ancho de banda de la señal.

El ancho de banda se calcula de forma general con la siguiente ecuación:

$$BW = 2f_m N$$

Donde: N es el número de bandas significativas

Si se utiliza la Regla de Carson el ancho de banda obtenido siempre será menor al ancho de banda calculado de forma general y está definida por la siguiente expresión:

$$BW = f_{d(\text{máx})} + f_{d(\text{mín})}$$

Ésta regla solo reconoce la potencia de las bandas laterales más significativas, las bandas laterales deberán tener una amplitud mayor al 2% de la señal portadora.

A partir de todos los conceptos expuestos anteriormente, la ecuación básica de una señal FM se puede expresar de la siguiente manera:

$$v_{FM}(t) = V_p \text{sen} [2\pi f_p + m_f \text{sen}(2\pi f_m t)]$$

Donde:

v_{FM} es el valor instantáneo de la señal FM,

m_f es el índice de modulación

el término $m_f \text{sen}(2\pi f_m t)$ es el ángulo de fase de la portadora

Las funciones de Bessel resuelven este proceso complejo de la siguiente forma:

$$v_{FM} = V_p \{ J_0 [\text{sen } \omega_p t] + J_1 [\text{sen}(\omega_p + \omega_m)t - \text{sen}(\omega_p - \omega_m)t] \\ + J_2 [\text{sen}(\omega_p + 2\omega_m)t + \text{sen}(\omega_p - 2\omega_m)t] \\ + J_3 [\text{sen}(\omega_p + 3\omega_m)t - \text{sen}(\omega_p - 3\omega_m)t] \\ + J_4 [\text{sen}(\omega_p + 4\omega_m)t + \text{sen}(\omega_p - 4\omega_m)t] \\ + J_5 [\text{sen} \dots] + \dots \}$$

donde: $\omega_p = 2\pi f_p$ es la frecuencia de la señal portadora

$\omega_m = 2\pi f_m$ es la frecuencia de la señal de información

V_p es el valor pico de señal portadora sin modulación

Los coeficientes J_n determinan las amplitudes de las bandas laterales y estos se calculan mediante la siguiente expresión:

$$J_n(m_f) = \left(\frac{m_f}{2}\right)^n \left[\frac{1}{n} - \frac{\left(\frac{m_f}{2}\right)^2}{1!(n+1)!} + \frac{\left(\frac{m_f}{2}\right)^4}{2!(n+2)!} - \frac{\left(\frac{m_f}{2}\right)^6}{3!(n+1)!} + \dots \right]$$

No es necesario calcular estos coeficientes ya que éstos se encuentran en tablas para los diferentes índices de modulación.

2.4. Modulación en Fase

La modulación de fase mejor conocida como modulación PM, consiste en hacer variar el parámetro de fase de la señal portadora en función de la señal de información (moduladora), es decir, se produce un cambio en el valor de corrimiento de fase de la señal portadora dependiendo de los valores de amplitud de la señal de información.

Ésta modulación se encuentra estrechamente vinculada con la modulación en Frecuencia ya que al haber un cambio en el corrimiento de fase de la señal portadora también es posible producir FM, por lo que, al conjunto formado por FM y PM también se les conoce como modulación angular.

La modulación PM no se utiliza comúnmente debido a que los equipos que se requieren para su recepción son mucho más complejos que los utilizados en FM y además en algunos casos llega a presentar problemas de ambigüedad al momento de determinar ciertas fases como por ejemplo a 0° o 180° .

Se produce modulación PM al hacer variar de forma instantánea la fase de la portadora a una velocidad proporcional a la frecuencia de modulación y por un cierto valor proporcional a la amplitud instantánea de la señal de información.

Si consideramos que la fase de la señal portadora es el parámetro que vamos a hacer variar, entonces: $\varphi(t) = \Delta\varphi v_m(t) = \Delta\varphi V_m \text{sen}(2\pi f_m t)$

Donde: $\Delta\varphi$ es la constante de desviación de fase

V_m es el máximo valor que puede tomar

La máxima variación de $\Delta\phi$ será $-V_m \cdot \Delta\phi \leq \phi(t) \leq V_m \cdot \Delta\phi$

Debido a $|v_m(t)| \leq V_m$

Por lo tanto, la señal modulada se encuentra expresada por la siguiente ecuación:

$$v_{PM}(t) = V_p \cos[2\pi f_p t + \beta \text{sen}(2\pi f_m t)]$$

Donde $\beta = \Delta\phi V_m$ es el índice de modulación y es independiente de la frecuencia.

Se puede apreciar en la figura 7 un ejemplo de modulación de fase, la señal modulada resultante es muy parecida a la modulación de frecuencia de la figura 5.

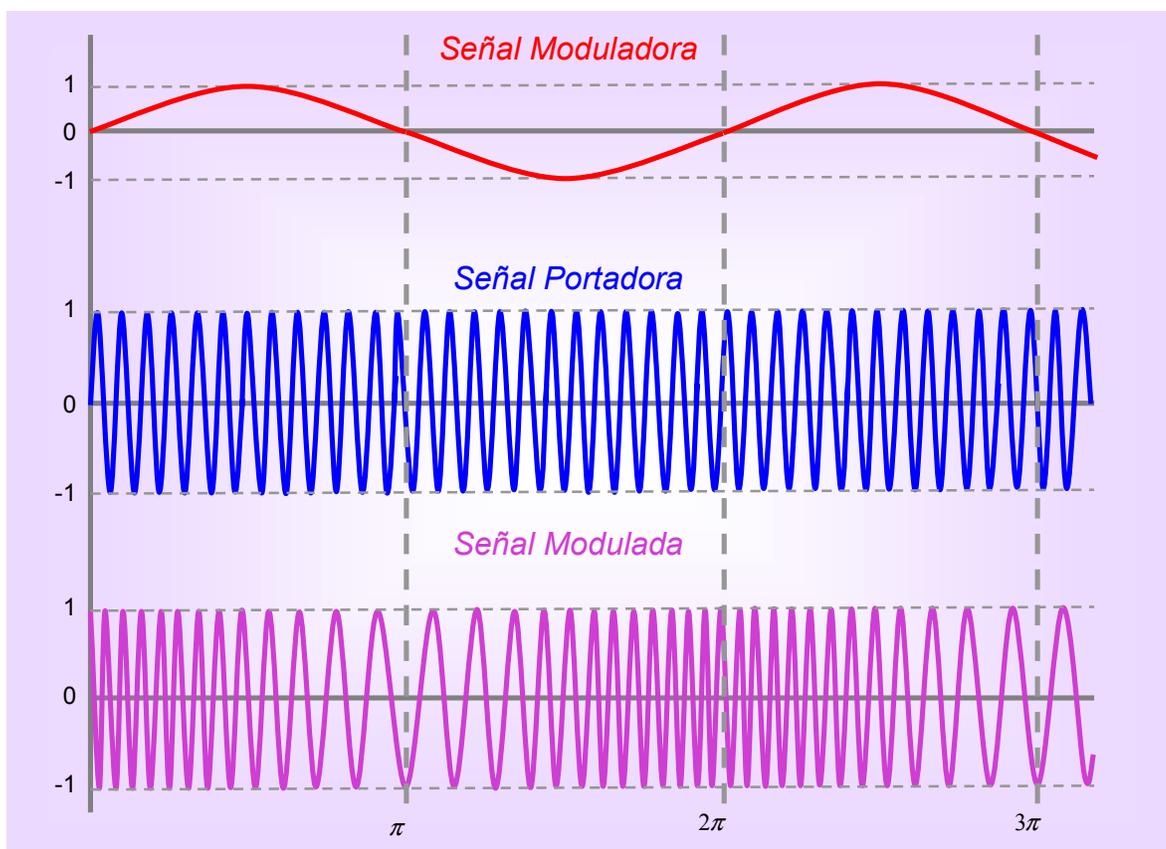


Figura No. 7. Ejemplo de Modulación de Fase

Aunque parezca que la modulación en FM y PM son prácticamente iguales debido a que los parámetros de frecuencia y fase varían, la diferencia radica en cual de estos parámetros varía directamente en función de la amplitud de la señal de información y cual sufre cambios indirectamente. Mejor dicho, para modulación en FM el parámetro que varía directamente en función de la amplitud de la señal de información es la frecuencia e indirectamente varía la fase, en cambio en PM el parámetro que varía en función de la amplitud de la señal de información es la fase y como consecuencia varía la frecuencia.

3. Osciladores Sinusoidales

Un oscilador es un sistema capaz de producir perturbaciones o cambios periódicos en un medio determinado. Dentro del campo de la electrónica un oscilador se define como un circuito autónomo capaz de transformar corriente continua en una corriente que varía de manera periódica en el tiempo (corriente periódica) y dependiendo de la onda producida, las oscilaciones pueden ser senoidales, cuadradas, triangulares, etc. Es resumen, un oscilador consiste fundamentalmente en un circuito que produce una señal periódica por sí mismo sin tener la necesidad de aplicarle una señal de entrada.

Los osciladores se clasifican en:

- Armónicos, son aquellos que emplean un sistema de creación de polos conjugados exactamente en el eje imaginario con el objeto de mantener de forma sostenida una oscilación sinusoidal, éstos producen señales senoidales.
- De relajación, estos emplean dispositivos biestables como conmutadores, flip-flops, puertas lógicas, entre otros, que cargan y descargan condensadores repetidamente, por ejemplo los multivibradores o los osciladores basados en compuertas lógicas o en temporizadores, este tipo de osciladores producen señales no senoidales tales como, señales cuadradas, triangulares, etc.

En el presente trabajo nos enfocaremos al estudio de los osciladores armónicos, también llamados sintonizados, senoidales o sinusoidales.

Los Osciladores Armónicos son utilizados generalmente para establecer la frecuencia de la señal portadora dentro de la etapa de transmisión, también llegan a ser utilizados en algunos casos para aplicar su señal de salida a sistemas más complejos como convertidores de frecuencia (mezcladores y convertidores) y equipos de prueba, tales como analizadores de espectro, microvoltímetros, puentes de impedancia, etc.

Un oscilador sinusoidal genera una onda senoidal a la salida, con una frecuencia y potencia determinada mediante amplificación y realimentación, su elemento activo por lo general es un transistor único.

La estructura principal de un oscilador sinusoidal reside en un amplificador A y una red selectiva de frecuencia B , que puede estar constituida por un circuito oscilante eléctrico (LC), electromecánico (cuarzo) o bien un retardador de fase (RC) o puente de Wien, conectada en un lazo de realimentación positiva como se puede apreciar en el diagrama de bloques de la figura No. 8.

Si bien un oscilador no tiene señal de entrada, es posible obtener la ganancia de lazo del amplificador realimentado A_f gracias a la realimentación positiva como se expresa en la siguiente ecuación:

$$A_f = \frac{A}{1 + BA}$$

Considerando que $A = A(f)$ y $B = B(f)$, dependen de la frecuencia f y donde:

A es la ganancia de lazo abierto del Amplificador Operacional.

B es la Ganancia del circuito de realimentación

Si existe una frecuencia f_0 tal que $BA = -1$ entonces el valor del denominador se hace cero y la ganancia con realimentación A_f es infinita, de tal forma que una señal infinitesimal puede llegar a proporcionar un voltaje de salida cuantificable y el circuito actúa como oscilador sin necesidad de una señal de entrada.

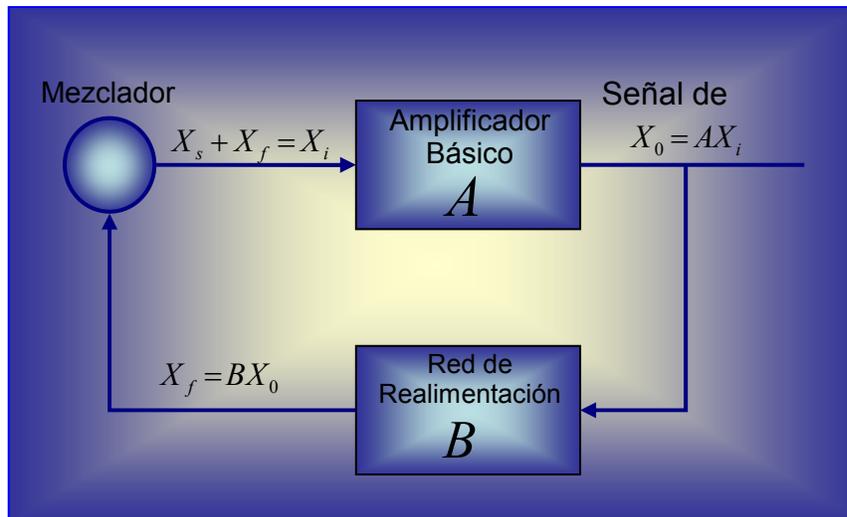


Figura No. 8. Estructura Principal de un Oscilador Sinusoidal

Las condiciones de Oscilación que se deben cumplir son las siguientes:

- Un circuito con una red de realimentación oscilará si su ganancia de entrada es mayor a la unidad y su desfase es nulo.
- Un amplificador oscilará si el factor K de Stern es menor a la unidad, (este factor se refiere a la estabilidad del circuito completo, tanto al amplificador como a las cargas y no a un solo dispositivo)
- Un circuito oscilará si el determinante de las ecuaciones de análisis de mallas es nulo.
- Un circuito puede oscilar si la parte activa tiene una resistencia negativa, esta es una condición necesaria más no suficiente ya que se puede dar el caso de que una impedancia de carga impida las oscilaciones.

Las características básicas de los osciladores son:

- La Frecuencia f_0 es la frecuencia fundamental de oscilación
- La Potencia P_L es la potencia suministrada a la carga a la frecuencia de oscilación
- El Rendimiento η , se calcula mediante el cociente de la potencia suministrada a la carga y la potencia consumida en DC:

$$\eta = \frac{P_L}{P_{DC}}$$

- El Nivel de Armónicos es el cociente entre la potencia del mayor armónico no deseado y la potencia de la frecuencia fundamental,

$$\frac{P_{A \max}}{P_L}$$

- Sintonía (Δf) es el rango de frecuencias que puede barrer un oscilador cuando se modifica alguno de sus parámetros (aplicando tensión a un elemento de control)
- El Pushing es la variación de la frecuencia con la tensión de alimentación, depende del factor de calidad Q y del elemento

activo, $\frac{\partial f_0}{\partial V_{DC}}$

- El Pulling es la variación de la frecuencia con respecto a la impedancia de carga, depende del factor de calidad Q y del

acoplamiento de carga $\frac{\partial f_0}{\partial R_L}$

- Espectro de Ruido alrededor de la frecuencia fundamental f_0 (ruido de amplitud, frecuencia y fase).

Existen muchos tipos de osciladores, sin embargo algunos de los factores que se deben considerar para hacer la elección del circuito a emplear son:

1. La frecuencia de operación,
2. la amplitud o potencia de salida,
3. la estabilidad de la frecuencia,
4. la pureza (contenido de armónicos),
5. la posibilidad de modo de operación no deseado,
6. el arranque seguro y
7. el rendimiento.

A continuación mencionaremos de manera general los diferentes tipos de circuitos de osciladores sinusoidales más comunes, con el objeto de conocer sus características principales y de esta forma estar en posibilidades de elegir el más adecuado para emular uno de los equipos generadores de funciones del laboratorio de Sistemas de Comunicaciones y Radio Frecuencia.

3.1. Algunos tipos de Circuitos Osciladores Sinusoidales

3.1.1. Oscilador Hartley

El oscilador Hartley es un oscilador sinusoidal en donde la frecuencia de oscilación esta determinada por el elemento activo, éste es un circuito sintonizado LC en paralelo conectado entre las terminales de entrada y salida del dispositivo activo, de tal forma que se obtiene una realimentación positiva al conectar la toma intermedia de la bobina con la terminal común del dispositivo activo como se observa en la figura No. 9 que muestra los circuitos básicos de éste oscilador tanto su configuración con un transistor como con un FET.

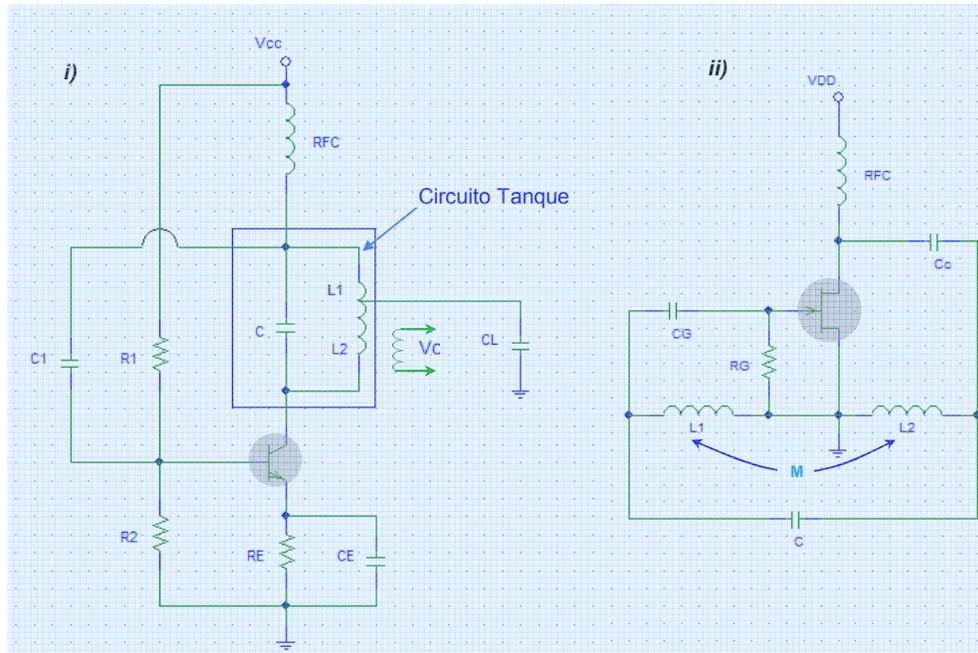


Figura No. 9. Circuitos básicos del Oscilador Hartley
 i) Oscilador Hartley Transistor, ii) Oscilador Hartley FET

Una de las principales características de este circuito oscilador es que para su red de realimentación es posible aprovechar parte de la bobina del circuito tanque dividiendo ésta en dos partes L1 y L2 como se aprecia en la figura para no utilizar una bobina auxiliar y se colocan dos resistencias para poder polarizar adecuadamente el transistor.

Este tipo de configuración permite dos formas de alimentación, en serie y paralelo. La alimentación en serie se realiza a través de la bobina L2 y en paralelo a través de la resistencia del colector, en este caso quedan completamente aislados el componente de continua y el componente de alterna de la señal.

La reacción de oscilación de este circuito se obtiene a través de la fuerza electromotriz inducida en la bobina L1 y esta misma fuerza es aplicada a la base del transistor por medio de un condensador.

La frecuencia en estos circuitos depende de la capacidad del capacitor C y de las dos partes de la bobina L1 y L2, según sea colocada la toma intermedia de la bobina esta va a producir una determinada amplitud de tensión pudiendo llegar a conectarse o desconectarse el circuito.

A partir del criterio de Barkhausen y de la obtención de los circuitos equivalentes de parámetros h del transistor es posible obtener las expresiones que describen el comportamiento de este oscilador, es necesario tomar en cuenta que las bobinas L_1 y L_2 tienen un acoplamiento mutuo M que debe ser tomado en cuenta para poder determinar la inductancia equivalente para el circuito tanque resonante, que está dada por la siguiente ecuación:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + 2M$$

Entonces la frecuencia de oscilación de ambos circuitos está dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C}}$$

La condición de arranque:

Para transistor $h_f e > \frac{L_1}{L_2}$, para FET $g_m > 0$

Este tipo de circuito es utilizado frecuentemente en receptores de radio ya que una de sus ventajas es su facilidad de adaptarse a una amplia gama de frecuencias y su amplitud de salida es constante, sin embargo, genera una gran cantidad de armónicos y su salida no es una onda senoidal pura.

3.1.2. Oscilador Colpitts

El circuito oscilador Colpitts es muy parecido al anterior ya que también emplea un circuito tanque, sin embargo a diferencia del oscilador Hartley

este circuito utiliza un divisor de tensión formado por dos capacitores los cuales se encuentran divididos por una tierra y de esta manera la tensión en las terminales superior de C_1 e inferior de C_2 serán opuestas. La realimentación positiva se obtiene de la terminal inferior de C_2 conectada a la base del transistor a través de una resistencia y un capacitor, en la siguiente figura se presentan los dos circuitos básicos tanto su configuración con transistor como con FET.

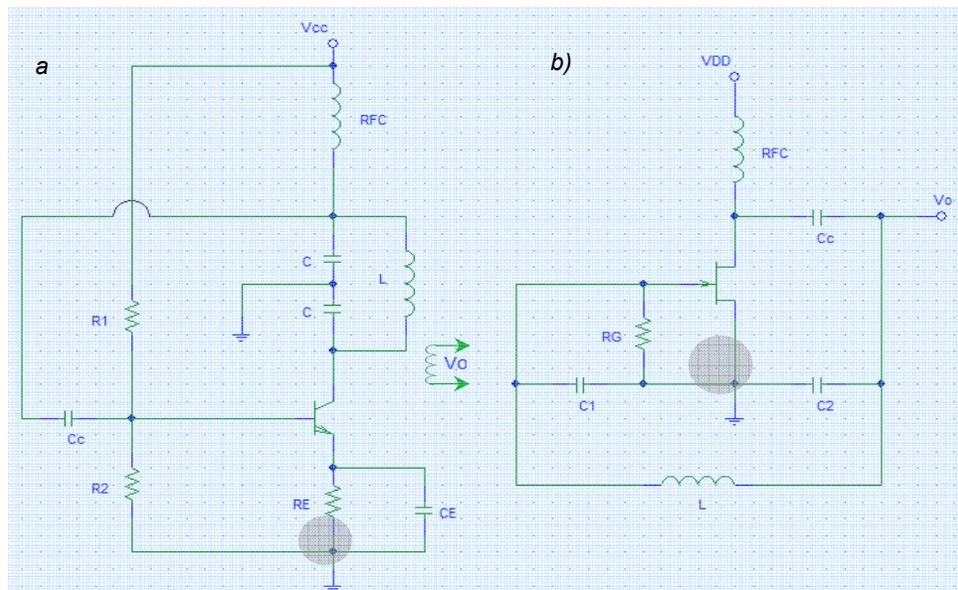


Figura No. 10. Circuitos básicos del Oscilador Colpitts
a) Oscilador Colpitts Transistor, b) Oscilador Colpitts FET

La bobina L_{RFC} se usa para evitar que la señal alterna pase a la fuente V_{DD} , este tipo de osciladores se utiliza comúnmente para bandas de VHF (Very High Frequency) que se encuentran dentro de un rango de frecuencia de 1 MHz. a 30 MHz.

La frecuencia de oscilación de ambos circuitos está dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{eq}}} \quad \text{donde:} \quad C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Su condición de arranque esta dada por:

Para Transistor: $h_f e > \frac{C_2}{C_1}$ Para FET: $g_m > 0$

El oscilador Colpitts con FET tiene la ventaja de que como se aplica la señal de realimentación en la gate, el efecto sobre el circuito tanque es menor debido a que la resistencia de entrada al gate es mayor que con un transistor. También es importante cuidar que la frecuencia de oscilación sea menor a la frecuencia de corto del amplificador con FET, de lo contrario el desplazamiento de fase adicional a través del amplificador puede llegar a evitar que el oscilador arranque.

Los osciladores Colpitts constan de dos capacitores y un inductor a diferencia de los Hartley que se componen con dos inductores y un capacitor, en la siguiente tabla se muestra un resumen los seis casos posibles de osciladores según la ubicación de las reactancias capacitivas e inductivas.

Ganancia	Reactancias	Oscilador
$g_m > 0$	L_1, L_2, C_3	Hartley
	C_1, C_2, L_3	Colpitts
$g_m < 0$	L_1, C_2, C_3	Colpitts
	C_1, L_2, C_3	
	L_1, C_2, L_3	Hartley
	C_1, L_2, L_3	

3.1.3. Oscilador por corrimiento, rotación o desplazamiento de fase

Este circuito consiste en varios circuitos de adelanto en cascada RC y un elemento activo inversor, tal que, la suma de los corrimientos proporcionen los 180° que se necesitan para cumplir con el *Criterio de Barkhausen*.

Como sabemos un circuito de adelanto produce un desplazamiento de fase entre 0° y 90° , dependiendo de la frecuencia entonces, en alguna frecuencia la suma del desplazamiento de fase total de los tres circuitos de adelanto es igual a 180° (aprox. 60° cada uno de ellos). En la siguiente figura se presenta la estructura general de este tipo de oscilador, cuyo bucle abierto podemos observar en la figura 12 y la salida de éste circuito se obtiene de la salida del elemento activo.

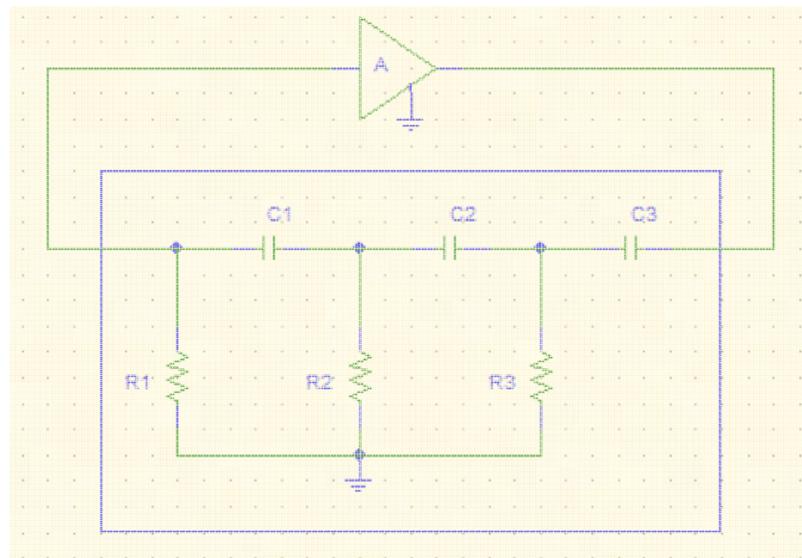


Figura No. 11. Esquema básico de un Oscilador de Corrimiento de Fase

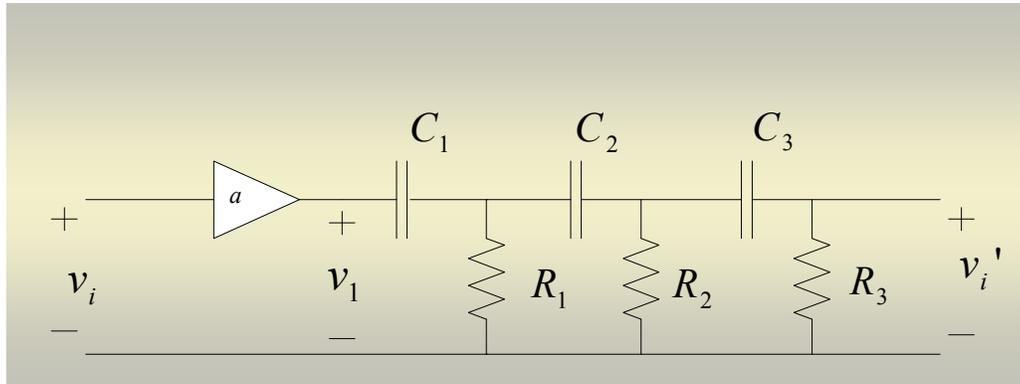


Figura No. 12. Bucle abierto del Oscilador de Corrimiento de Fase

La frecuencia esta dada por la siguiente ecuación: $f = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}}$

El circuito oscilará si $\text{Im}\left(\frac{V_i'}{V_i}\right) = 0$, lo cual ocurre cuando $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{6}RC}$

A esta frecuencia la ganancia esta dada por:

$$\frac{V_i'}{V_i} = -\frac{a}{29}$$

Entonces el circuito oscilará si esta ganancia es mayor a 1, es decir si la ganancia del amplificador cumplir con: $-a > 29$

Por lo tanto el amplificador inversor deberá tener una ganancia mayor a 29, en la siguiente figura se muestran dos ejemplos de configuración de este oscilador.

Para el caso del circuito con transistor se deberá cumplir con que $R_1 // R_2 // r_{\pi} = R$ de lo contrario aunque el circuito oscile, éste lo hará a una frecuencia diferente a la calculada.

Este tipo de oscilador es muy sencillo y funciona con relativa facilidad, sin embargo su estabilidad en frecuencia es pobre por lo cual es poco viable para aplicaciones de precisión.

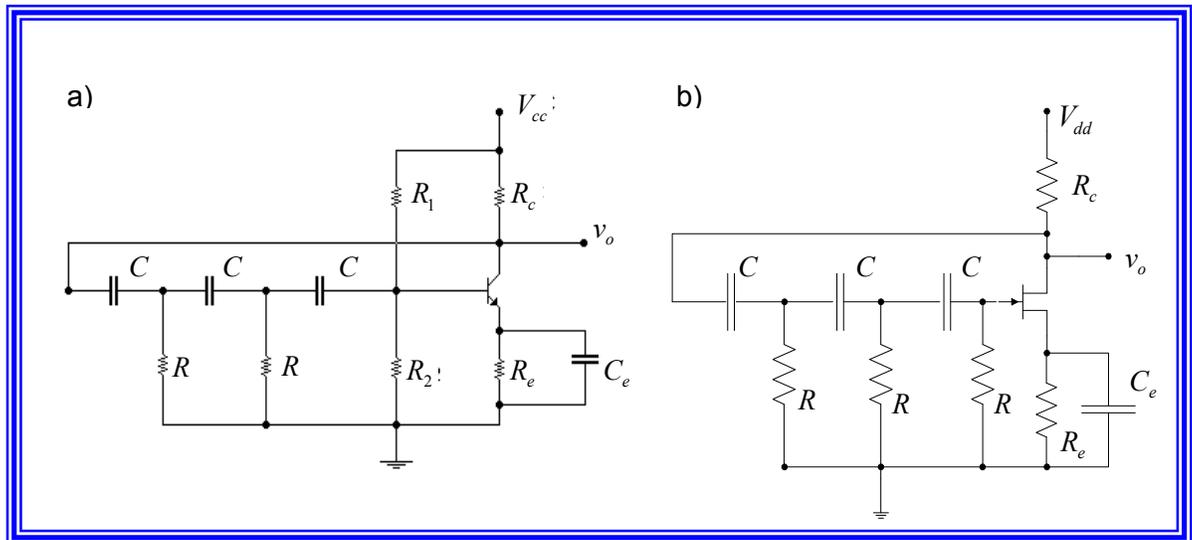


Figura No. 13. Oscilador de Corrimiento de Fase. a) Con Transistor b) con FET

3.1.4. Oscilador Puente de Wien

El *Oscilador Puente de Wien* al igual que el *Oscilador de Corrimiento de Fase* es del tipo RC y se recomienda utilizarlos cuando se trabaja a bajas frecuencias ya que no es posible utilizar los osciladores tipo LC debido a que, el valor de los inductores y las resistencias serían muy grandes y esto incrementaría el costo del circuito en gran medida.

A frecuencias relativamente bajas, el oscilador Puente de Wien es una buena fuente de señales senoidales de pequeña distorsión, siendo el más empleado en aplicaciones de baja frecuencia.

Es un circuito oscilador práctico que emplea un amplificador operacional en un circuito puente tipo RC, la frecuencia de este oscilador esta determinada por sus componentes de R y C. En la figura 14 se representa la versión básica del circuito oscilador Puente de Wien, como se puede observar las resistencias R_1, R_2 y los capacitores C_1, C_2 conforman los elementos de ajuste de frecuencia, mientras que las

resistencias R_3 y R_4 son parte de la ruta de alimentación. La salida del amplificador operacional esta conectada a la entrada del puente en el punto a y c , mientras que la salida del circuito puente se conecta a la entrada del amplificador operacional en los puntos b y d .

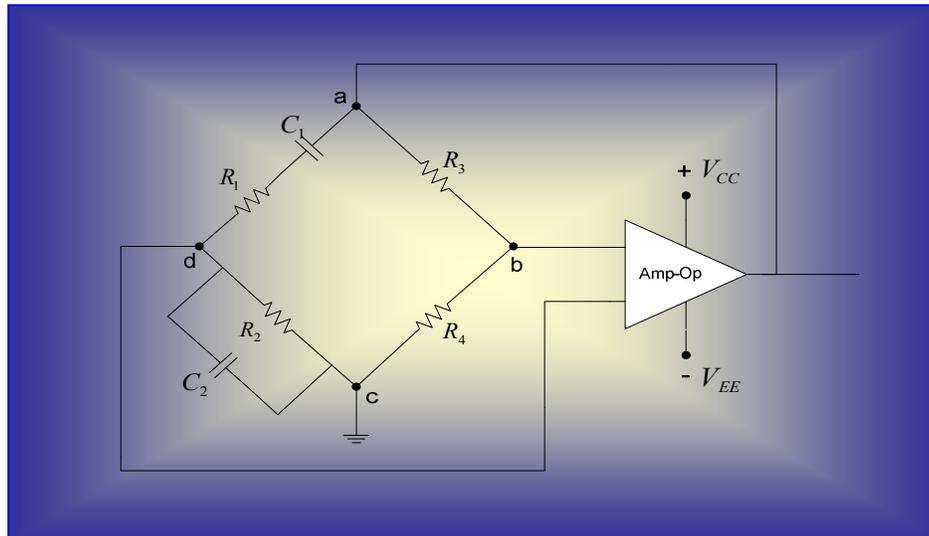


Figura No. 14. Circuito Oscilador Puentes de Wien con Amplificador Operacional

Por las condiciones del puente en equilibrio se tiene que:

$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}$, donde la frecuencia del circuito está dada por la siguiente ecuación:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} \quad \Rightarrow \quad f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$

En el caso particular de que los valores de $R_1 = R_2 = R$ y $C_1 = C_2 = C$ entonces la frecuencia del oscilador esta determinada por:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \quad \text{y} \quad \frac{R_3}{R_4} = 2.$$

Esta relación proporciona suficiente ganancia de bucle para que el circuito oscile a la frecuencia calculada.

Algunas de las ventajas del circuito oscilador Puente de Wien son su gran estabilidad a la frecuencia de resonancia, su fácil construcción y un amplio margen de frecuencias en las que trabaja perfectamente además de la posibilidad de obtener una onda sinusoidal pura siempre y cuando se tenga la suficiente ganancia para mantener las oscilaciones. Sin embargo una de sus desventajas es que se pueden producir pérdidas en las resistencias y por consecuencia se tendría una salida variable con la frecuencia de resonancia.

3.1.5. Osciladores de Cristal

Los osciladores de cristal son circuitos osciladores de realimentación en donde el circuito tanque LC es remplazado por un cristal en el componente que determina la frecuencia, el cristal (en general de cuarzo) actúa de manera similar al circuito tanque LC, excepto por que tiene ciertas ventajas propias, posee una mayor estabilidad para mantener la frecuencia de operación a la que originalmente se haya cortado.

Por las propiedades químicas, mecánicas y eléctricas, el cuarzo es el material más apropiado para fabricar estos dispositivos con una frecuencia bien controlada.

Un cristal presenta varias frecuencias, la menor es la Frecuencia de Resonancia Fundamental y es la que aparece primero, las subsecuentes se les llama sobretonos que son como armónicas de la fundamental, cuando se adquiere un cristal es importante especificar si es en fundamental o sobretono, los cristales más comunes son en sobretono y los menos comunes en fundamental.

El cristal de cuarzo presenta una propiedad denominada efecto piezoeléctrico que al aplicar una presión mecánica a través de la superficie de éste desarrolla una tensión en las caras opuestas. De forma similar al aplicar una cierta tensión en las caras del cristal se origina una distorsión mecánica en la superficie. Una tensión alterna produce vibraciones mecánicas cuya frecuencia natural es muy estable y depende de la naturaleza y el tallado del cristal.

Los cristales a veces son llamados resonadores de cristal por su capacidad de producir frecuencias precisas y estables para contadores de frecuencias, sistemas electrónicos de navegación, transmisores y receptores de radio, televisores, video caseteras, relojes para sistemas de computación y muchas otras aplicaciones.

El circuito eléctrico equivalente que se muestra en la siguiente figura, es un esquema del cristal de cuarzo trabajando a determinada frecuencia de resonancia.

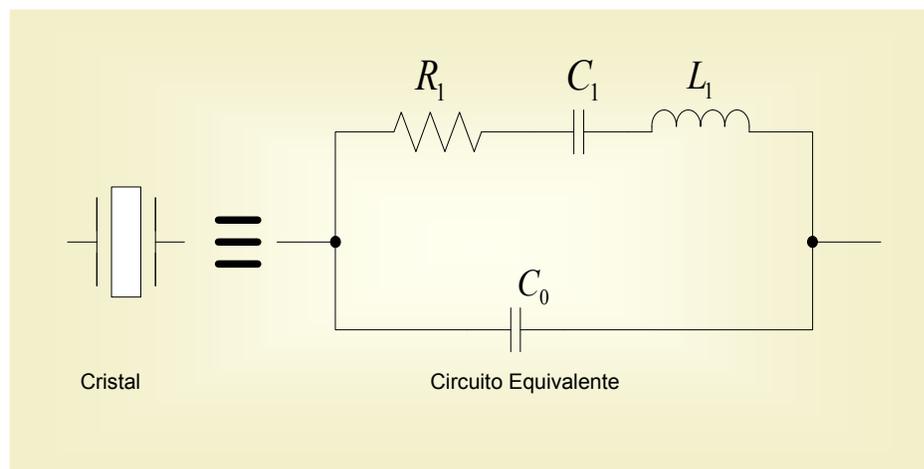


Figura No. 15. Esquema de un Cristal de Cuarzo, símbolo y circuito equivalente

En la figura 15, el capacitor C_0 o capacitancia en paralelo representa la capacidad de los electrodos del cristal más la capacidad de la carcaza y sus terminales. La rama principal del cristal está representada por R_1, C_1 y L_1 , en donde:

- R_1 representa las pérdidas que ocurren dentro del cristal
- C_1 representa la elasticidad del cristal
- L_1 es la masa vibrante del cristal

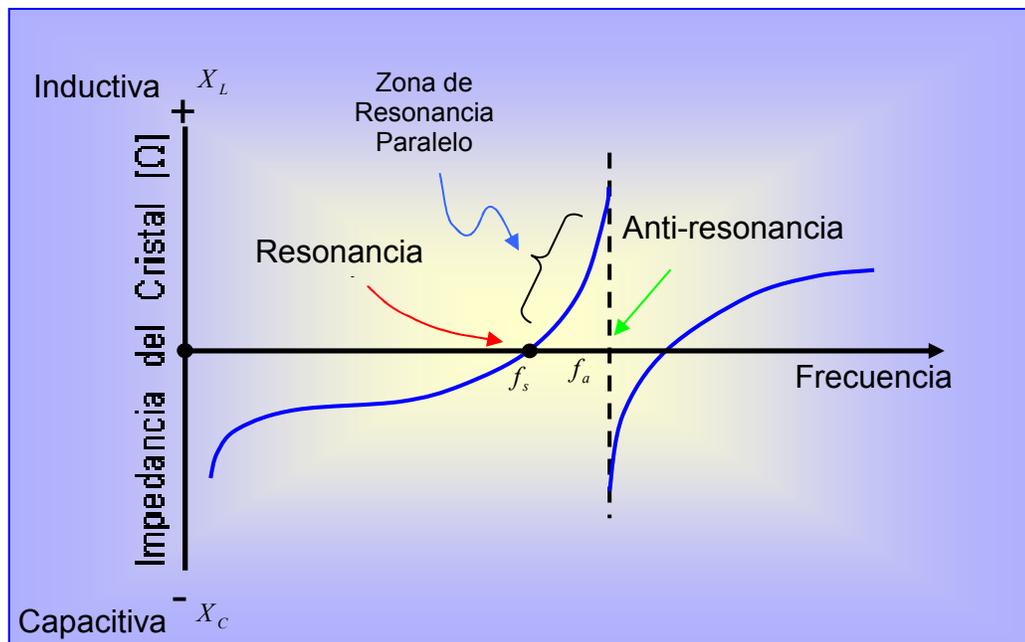


Figura No. 16. Curva de Impedancia de un Cristal de Cuarzo

Como podemos observar en la figura anterior, un cristal tiene dos frecuencias de resonancia, la frecuencia de Resonancia Serie [f_s] es la más baja, en este punto el cristal se comporta como una resistencia, la impedancia está en el mínimo por lo que la corriente que circula es máxima. A medida que se va incrementando la frecuencia, el cristal pasa a la zona de Resonancia Paralelo hasta llegar a la frecuencia de Anti-resonancia [f_a] en la que la impedancia es máxima y las reactancias de

L_1 y C_0 se cancelan. En éste punto la corriente que circula por el cristal es mínima. Por lo general, la frecuencia paralelo varía menos del 1% por arriba de la frecuencia serie en los cristales.

La máxima estabilidad que se puede obtener de un cristal, depende de valor del factor de calidad $[Q]$. Si observamos la figura anterior, existe una separación entre las frecuencias serie y paralelo, esta separación es el ancho de banda, cuanto más pequeño se hace el ancho de banda el valor del factor de calidad se incrementa.

Los cambios en la reactancia del circuito externo tienen un menor impacto en un cristal con un alto factor de calidad y como consecuencia de esto la frecuencia es en definitiva más estable.

Las frecuencias de resonancia son:

- Serie
$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$
- Paralelo o Anti-resonancia
$$f_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1}}}$$

A continuación se presentan los dos circuitos básicos osciladores con cristal:

Oscilador de Cristal Resonante en Serie:

Los circuitos resonantes serie son generalmente utilizados debido a que utilizan pocos componentes, sin embargo estos circuitos pueden tener componentes parásitos que intervienen en la realimentación y si se da el

caso de que el cristal deje de funcionar oscilarán a una frecuencia impredecible.

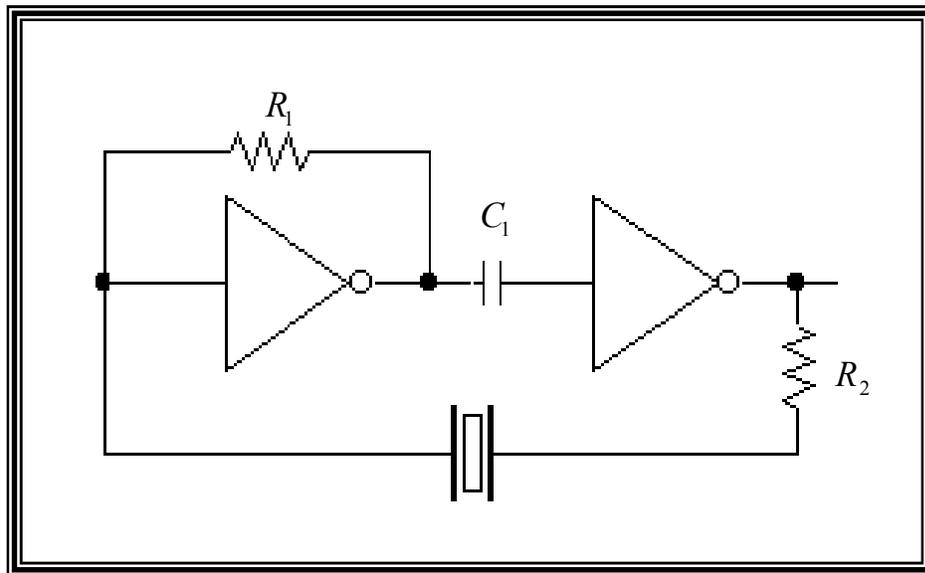


Figura No. 17. Circuito Básico Oscilador Resonante Serie

El circuito básico Oscilador Resonante Serie se muestra en la figura 17, utiliza un cristal diseñado para oscilar en su frecuencia resonante serie natural, no utiliza capacitores en la red de realimentación.

También podemos observar en esta misma figura que no existen componentes para ajustar la frecuencia de oscilación. Para polarizar el inversor en su región lineal de operación y proveer una realimentación negativa al inversor se utiliza a la resistencia R_1 , se usa a C_1 como capacitor de acople para bloquear la componente continua y por último para poder controlar la potencia que se le entrega al cristal se utiliza a R_2 limitando la corriente que pasa a través de él.

La figura siguiente presenta como ejemplo las estructuras de dos osciladores resonantes serie, utilizando un Transistor y un JFET.

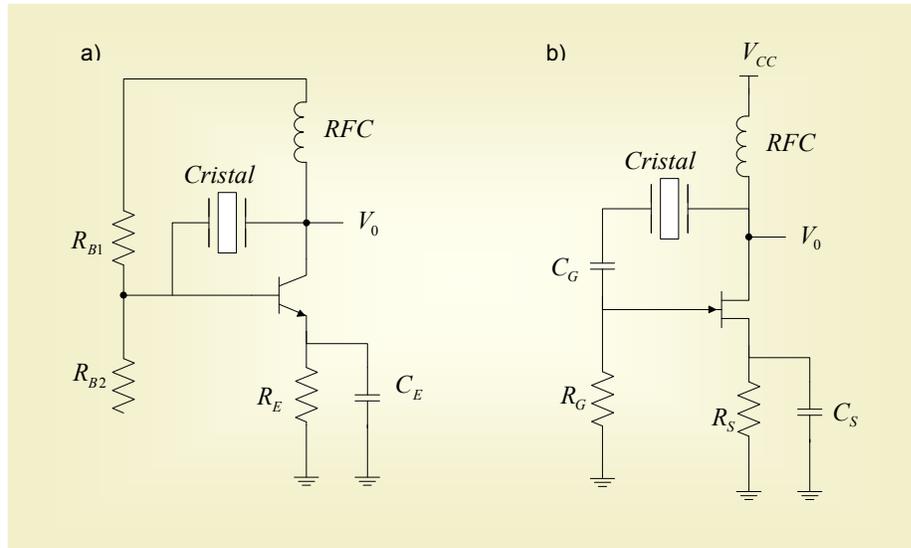


Figura No. 18. Circuito Oscilador de Cristal Serie: a) Circuito con Transistor, b) Circuito con JFET

Oscilador de Cristal Resonante en Paralelo:

Este tipo de circuito oscilador utiliza un cristal diseñado para operar a un valor determinado de capacidad de carga, lo cual ocasionará que el cristal tenga una frecuencia mayor que la frecuencia resonante serie y menor que la verdadera frecuencia resonante paralelo. Por lo tanto el cristal se comporta de manera inductiva y opera entre la frecuencia de resonancia serie y la frecuencia de anti-resonancia.

Este circuito utiliza un inversor simple para conformar el oscilador, tanto R_1 y R_2 realizan las mismas funciones que en el circuito del oscilador resonante serie, los dos capacitores en la realimentación que componen la capacidad de carga junto con el cristal determinarán la frecuencia a la que el circuito oscilará, como se aprecia en la figura siguiente.

Entonces, si se realizan ajustes en los capacitores de carga, estos darán lugar a una pequeña variación en la frecuencia de oscilación, de tal

forma que se pueda realizar un ajuste fino de la misma frecuencia de oscilación.

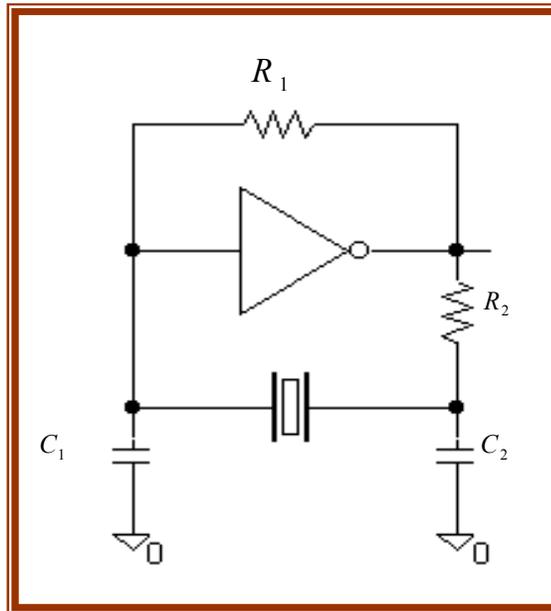


Figura No. 19. Circuito Básico Oscilador Resonante Paralelo

El cristal resonante paralelo es especificado para trabajar a una cierta capacidad de carga a la frecuencia deseada, con la tolerancia y estabilidad deseada.

La capacidad de carga $[C_L]$ del cristal en este circuito puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$C_L = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_s$$

Donde para inversores de las familias lógicas CMOS de alta velocidad:

- C_s es la capacidad parásita del circuito y por lo general se estima entre $3[pf]$ y $10[pf]$.
- R_1 es del orden de $8.2[M\Omega]$ a $10[M\Omega]$

- R_2 es del orden de $470[\Omega]$ a $2200[\Omega]$
- Los valores típicos de C_1 y C_2 son del orden de los $62[pf]$

A continuación se presenta como ejemplo las estructuras de dos osciladores resonantes paralelo, utilizando un Transistor y un JFET.

El cristal de la figura 20.a actúa como un elemento inductor cuya salida de tensión esta acoplada al emisor a través de C_1 y C_2 , por otra parte en la figura 20.b se utiliza un circuito sintonizado LC de salida, la máxima tensión de puerta del JFET se produce a la frecuencia de anti-resonancia del cristal.

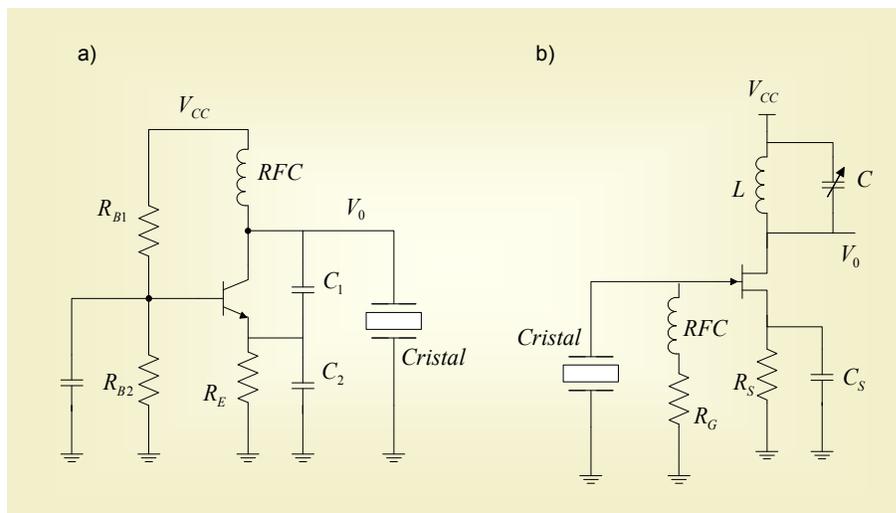


Figura No. 20. Circuito Oscilador de Cristal Paralelo: a) Circuito con Transistor, b) Circuito con JFET

Los osciladores de cristal trabajan muy bien en un rango de frecuencias de $20[kHz]$ a $50[MHz]$ o hasta $300[kHz]$ en sobretono y son comúnmente utilizados para osciladores, filtros IF y filtros SSB.

A continuación se muestra la tabla de comportamiento general de los osciladores en función de su elemento resonante.

Circuito Resonante	Factor de Calidad [Q]	Estabilidad	Banda de Frecuencia
RC	< 10	Mala	< 1 [MHz]
LC	50 – 200	Regular	100[KHz] – 500 [MHz]
Cristal de Cuarzo	$10^4 - 10^5$	Muy buena	1 – 300 [MHz]

Para frecuencias superiores a los 300 [MHz] se utilizan Cavidades resonantes, SAW (resonadores de onda acústica superficial), líneas de transmisión resonantes y multiplicadores.

4. Diseño del Circuito Oscilador Sinusoidal

El objetivo de realizar el diseño de un circuito oscilador sinusoidal es que sea utilizado en las prácticas de técnicas de modulación en AM del laboratorio de Sistemas de Comunicaciones y Radio Frecuencia, por lo cual la elección del circuito oscilador se realiza en función de las necesidades del laboratorio.

Las prácticas de técnicas de modulación en AM requieren, además de otros dispositivos y equipos, dos generadores de funciones, uno de los generadores emite la señal portadora y el otro la señal de información (mensaje), ésta es la señal que emula el circuito que se propone en este trabajo.

Para poder eliminar un generador de funciones, el circuito debe generar tres señales de frecuencia fija, y cumplir con las siguientes especificaciones:

1. Una primera señal sinusoidal con una frecuencia de 500 [Hz]
2. Una segunda señal sinusoidal con frecuencia de 1 [KHz]
3. Una tercera señal sinusoidal con frecuencia de 2 [KHz]
4. El circuito debe tener la mayor estabilidad posible
5. Debe ser un circuito robusto que pueda ser utilizado constantemente
6. El circuito debe ser económico y de fácil reparación

4.1. Análisis

Los circuitos osciladores Hartley y Colpitts son del tipo LC, en general tienen un factor de calidad entre 50 y 200, su estabilidad es regular,

operan dentro de un rango de frecuencias de 100 [KHz] a 500 [MHz], adicionalmente generan una gran cantidad de armónicos, no se recomienda su uso a frecuencias relativamente bajas debido a que, el valor de las resistencias e inductores es muy alto lo cual incrementa el costo del circuito de manera significativa, además su salida no es una onda sinusoidal pura.

El circuito oscilador por Corrimiento de Fase es del tipo RC, funciona con relativa facilidad, tiene un factor de calidad menor a 10, opera a frecuencias menores de 1 [MHz], su estabilidad es pobre por lo cual es poco recomendable para aplicaciones de precisión.

El circuito oscilador Puente de Wien, también es un circuito del tipo RC al igual que el oscilador de corrimiento de fase, tiene un factor de calidad menor a 10, opera a frecuencias menores de 1 [MHz], su estabilidad no es muy buena, sin embargo tiene la posibilidad de obtener una onda sinusoidal pura si se logra la suficiente ganancia para mantener las oscilaciones, es un circuito sencillo y de fácil construcción, además de ser el circuito más utilizado a frecuencias relativamente bajas.

Los circuitos Osciladores de Cristal actúan de manera muy similar a un circuito de tipo LC, posee un factor de calidad del orden de 10^4 a 10^5 , tienen una excelente estabilidad y la banda de frecuencia a la que operan esta entre los 1[MHz] y 300 [MHz], sin embargo algunas de sus configuraciones presentan muy buena estabilidad a corto plazo y requieren de una ganancia de voltaje relativamente alta para no introducir pérdidas sustanciales, también existe el problema de la poca variedad de valores que existen comercialmente.

En realidad para realizar el diseño del circuito oscilador propuesto para las prácticas de Técnicas de modulación de AM, cualquiera de los osciladores antes descritos podría llegar a funcionar. Sin embargo, se recuerda que las frecuencias a las que debe trabajar este circuito son de 0.5, 1.0 y 2.0 [KHz] que son consideradas relativamente bajas, además la señal que debe generar es una onda sinusoidal lo mas pura posible.

Entonces, de manera general se puede descartar los osciladores tipo RC (Hartley y Colpitts), ya que la banda de frecuencia en que operan se encuentra entre 100 [KHz] y 500 [MHz], además requieren de resistencias e inductores de valores muy altos para asegurar su estabilidad a “bajas frecuencias”.

También se descartan los osciladores de cristal debido a que operan dentro de una banda de frecuencia de entre 1 [MHz] y 300 [MHz] y a pesar de que éstos son en general circuitos de frecuencia muy estable, algunas de sus configuraciones mantienen ésta estabilidad a corto plazo y realmente se recomienda su uso para aplicaciones de precisión y alta frecuencia, su diseño es ligeramente mas complicado y costoso a comparación de los otros osciladores y existe poca variedad en el mercado como mencionamos anteriormente.

Por último, quedan los osciladores por Corrimiento de Fase y el Puente de Wien que operan dentro en una banda de frecuencias menor a [1 MHz], ambos son circuitos recomendados para trabajar relativamente a bajas frecuencias, son sencillos y fáciles de implementar, sin embargo las ventajas de utilizar el oscilador Puente de Wien en lugar del de Corrimiento de Fase, es que se puede lograr una señal sinusoidal más pura con relativa facilidad y se tiene el control de la ganancia mediante el amplificador operacional.

El principal problema de utilizar osciladores tipo LC, es la dificultad para encontrar los componentes de inductancias, ya que no existen inductancias de todos los valores, lo cual complica su diseño. Algo similar ocurre con los elementos de cristal al no contar con gran variedad de ellos, por lo anterior es mucho mas sencillo realizar un diseño de un oscilador tipo RC, ya que existe gran variedad de capacitancias comerciales para calcular la resistencia correspondiente.

4.2. Oscilador Sinusoidal Puente de Wien.

Como se vio en el capítulo anterior, el oscilador Puente de Wien es un circuito práctico que emplea un amplificador operacional en un circuito puente RC, el cual se elige para realizar el circuito oscilador sinusoidal de uso práctico.

Para realizar este diseño se debe considerar dos partes importantes que conforman este oscilador, el puente de Wien y el amplificador operacional asociado a través de una realimentación positiva.

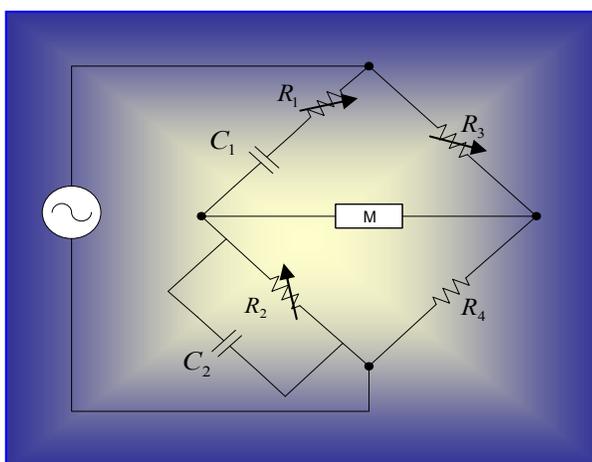


Figura No. 21. Esquema del circuito Puente de Wien

El esquema del puente se presenta en la figura 21, en donde “M” es un dispositivo de equilibrio o indicador de cero, capaz de responder a las variaciones de las corrientes alternas del circuito.

Condición de Equilibrio:

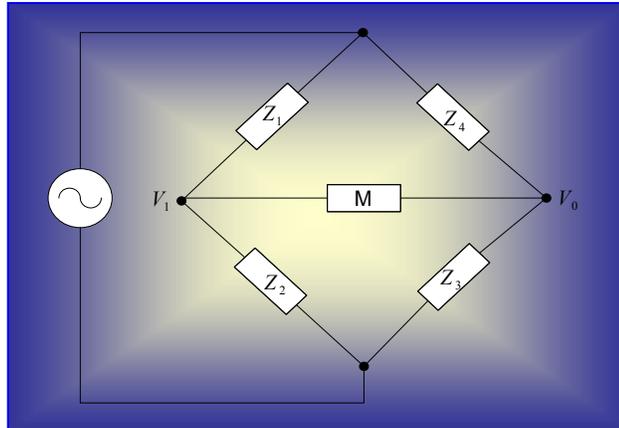


Figura No. 22. Esquema de Impedancias del Circuito Puente de Wien

De la figura anterior se puede observar que para que se cumpla la condición de equilibrio es necesario que:

$$V_{Z1} = V_{Z3} \quad ; \quad V_{Z2} = V_{Z4}$$

$$\therefore I_1 Z_1 = I_2 Z_3$$

$$I_1 Z_2 = I_2 Z_4$$

Igualando $I_1 Z_1 = I_2 Z_2$

$$\frac{I_1 Z_1}{I_1 Z_2} = \frac{I_2 Z_3}{I_2 Z_4} \Rightarrow \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$$

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \quad ; \quad Z_2 = \frac{\frac{R_2}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{R_2}{R_2 j\omega C_2 + 1}$$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\frac{R_1 C_1 j\omega + 1}{C_1 j\omega}}{\frac{R_2}{R_2 C_2 j\omega + 1}} = \frac{(R_1 C_1 j\omega + 1)(R_2 C_2 j\omega + 1)}{R_2 C_1 j\omega}$$

$$\Rightarrow \frac{Z_1}{Z_2} = \underbrace{\left[\frac{R_1}{R_2} + \frac{C_1}{C_2} \right]}_{\text{parte real}} + \underbrace{\left[R_1 C_2 + \frac{1}{R_2 C_1 j^2 \omega^2} \right]}_{\text{parte imaginaria}} j\omega$$

Entonces cuando el puente se encuentra en equilibrio se cumple que

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}$$

Y de la parte imaginaria se obtiene:

$$R_1 C_2 \omega j + \frac{1}{R_2 C_1 \omega j} = 0$$

$$R_1 C_2 \omega j = -\frac{1}{R_2 C_1 \omega j}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

Por lo tanto la frecuencia del puente es $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$

Cuando se asocia el puente de Wien mediante una realimentación positiva se obtiene el esquema básico del circuito que se muestra en la figura 23, la frecuencia del puente determinará la frecuencia de oscilación del circuito.

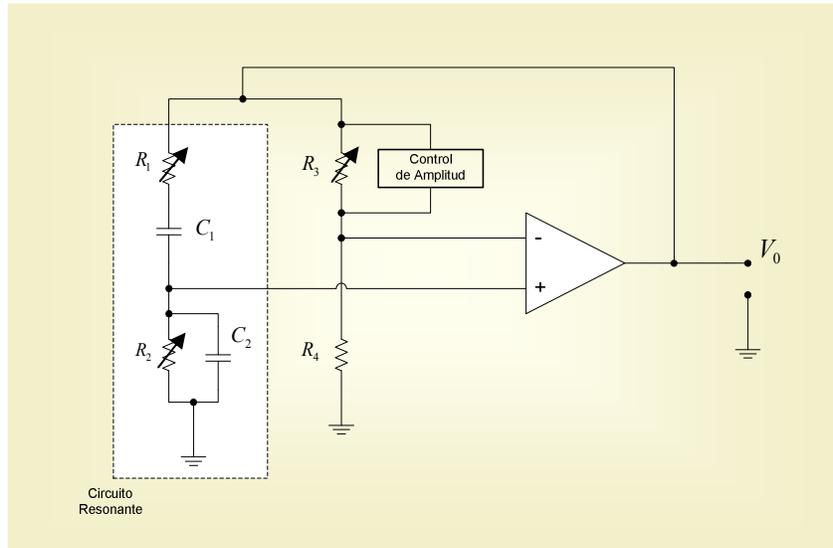


Figura No. 23. Esquema Básico Circuito Oscilador Puente de Wien

Lo que permite limitar la amplitud de la señal de salida es la existencia de un lazo de realimentación negativa, esta limitación es muy importante ya que de no existir se distorsionaría la señal sinusoidal de salida debido a que la realimentación positiva provocaría la saturación del circuito como se observa en la figura 24.

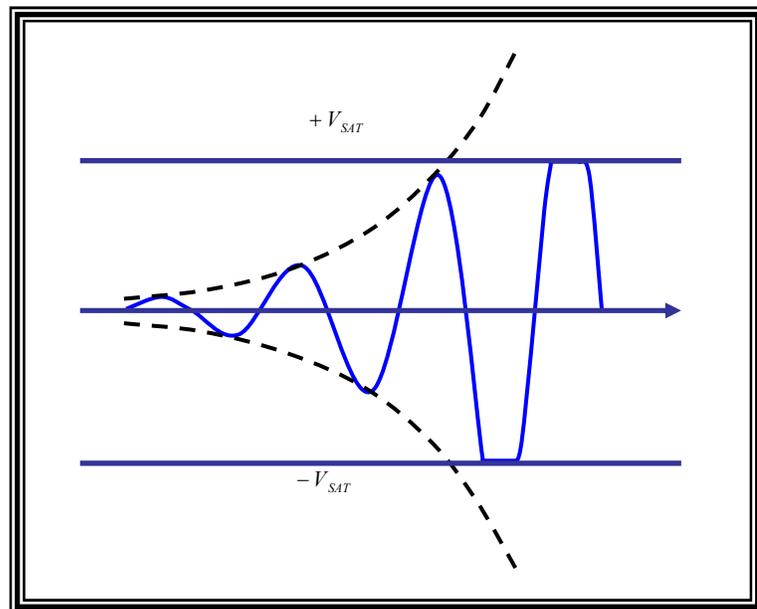


Figura No. 24. Gráfico de Ejemplo de Saturación

Se puede limitar la amplitud de varias formas como por ejemplo, sustituyendo la resistencia R_4 por una lámpara, utilizando diodos de señal en antiparalelo o bien diodos tipo Zener, también se utilizan los dispositivos JFET o MOSFET para circuitos un poco mas sofisticados.

Para este diseño se utiliza un circuito Oscilador Puente de Wien en donde el control de la amplitud y la estabilidad está determinado por dos diodos de conmutación rápida, también se utiliza un potenciómetro en serie con la resistencia R_3' para el ajuste de la ganancia del amplificador operacional.

Como se puede observar a continuación, la resistencia R_3 del circuito de la figura 23 corresponde a la resistencia R_3' de éste circuito (figura 25) y representa la resistencia a la corriente alterna del diodo que se encuentre conduciendo en cada momento.

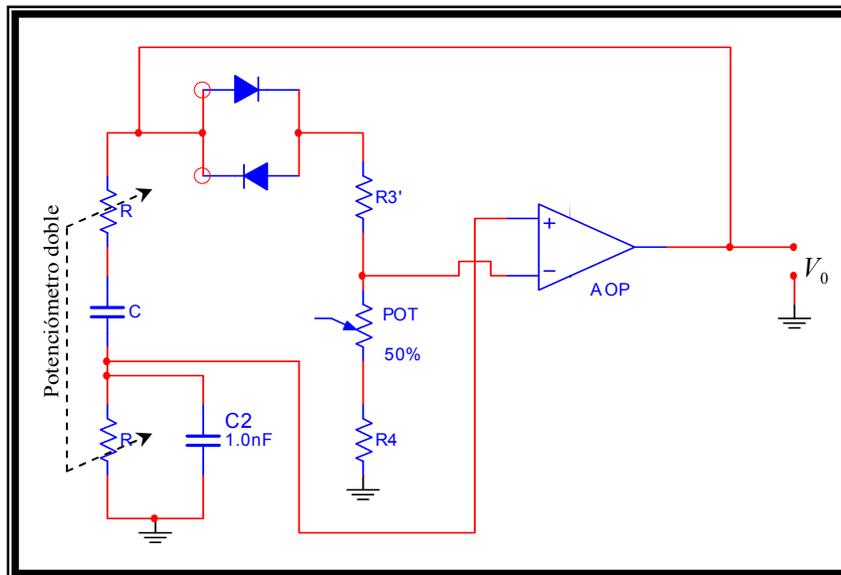


Figura No. 25. Circuito Oscilador Puente de Wien con AOP

Entonces, si igualamos las resistencias y los capacitores del circuito

resonante y los sustituimos en la ecuación $\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}$ se obtiene:

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R}{R} + \frac{C}{C} = 1 + 1 = 2$$

$$\therefore R_3 = 2R_4$$

Si se considera que $R_3 = R'_3 + POT$

$$\Rightarrow R'_3 + POT = 2R_4$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

Por lo tanto, la frecuencia de oscilación está dada por:

Al considerar la ganancia del circuito básico como una relación entre el

V_0 y V_1 , se tiene que:

$$V_0 = \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right) V_1$$

$$\Rightarrow V_0 = \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) V_1, \text{ substituyendo } R_3$$

$$= \left(1 + \frac{2R_4}{R_4}\right) V_1 = 3$$

$$\therefore \frac{V_0}{V_1} = 3$$

Para el caso particular de la figura 25, si se sustituye la resistencia R_3 , la ecuación queda como se muestra a continuación y la relación se mantiene.

$$V_0 = \left(1 + \frac{R'_3 + POT}{R_4}\right) V_1, \text{ entonces } \frac{V_0}{V_1} = 3$$

Esta ecuación solo es válida para la frecuencia de oscilación f_0 , dado que el potencial en el punto "A" es aproximadamente igual a V_1 , el

arranque del oscilador comienza cuando se logra establecer la relación

$\frac{V_0}{V_1} = 3$ mediante el ajuste del potenciómetro *POT*.

Ambos diodos llevan a cabo el control automático de la ganancia, debido a que si la tensión de salida V_0 se incrementa, entonces la resistencia CA del diodo que esté conduciendo disminuye por el incremento en la corriente instantánea que circula por él a temperatura ambiente. Entonces el factor de realimentación negativa aumenta y la relación

$\frac{V_0}{V_1}$ es menor a 3, amortiguando la amplitud de oscilación. En caso contrario si V_0 disminuye, aumenta la resistencia del diodo que esté

conduciendo y por consecuencia la relación $\frac{V_0}{V_1}$ es mayor a 3 lo que provoca oscilaciones de amplitud creciente distorsionando la señal y por ende se satura el circuito.

Por lo anterior, para estabilizar el circuito, la relación $\frac{V_0}{V_1} = 3$ debe cumplirse.

Según la ecuación de $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ es posible ajustar la frecuencia a través de R o de C , por lo general es preferible variar las resistencias mediante un potenciómetro doble de manera continua e idéntica como se aprecia en la figura 25, la variación de los capacitores se recomienda que se haga en función a los valores disponibles comercialmente y preferiblemente evitar que éstos sean capacitores electrolíticos.

Las principales ventajas de diseñar un circuito utilizando un Oscilador Puente de Wien es la facilidad de tener el control de la ganancia y que la salida sea una señal sinusoidal muy estable.

4.3. Diseño

El circuito oscilador de esta propuesta, está compuesto por tres circuitos osciladores Puente de Wien para poder generar cada una de las frecuencias que se requieren en las prácticas de técnicas de modulación, el circuito permite ajustar la amplitud de las señales de salida y se elige la frecuencia con la que se quiere trabajar con un selector, también se incluye un regulador de voltaje como un elemento de seguridad, para prevenir daños en el circuito en caso de que sea conectado en forma incorrecta.

Para realizar este diseño se calcula la resistencia R con base a los

valores comerciales de los capacitores C y la ecuación:

$$R = \frac{1}{C f_0 2\pi}$$

El tipo de capacitor, sus valores comerciales y el resultado del cálculo de R para cada una de las frecuencias requeridas se presenta en la siguiente tabla.

Capacitor [pF]	A 0.50 [KHz], R= ? [KΩ]	A 1.00 [KHz], R= ? [KΩ]	A 2.00 [KHz], R= ? [KΩ]
1,000	318.31	159.15	79.58
2,200	144.69	72.34	36.17
4,700	67.72	33.86	16.93
10,000	31.83	15.91	7.96
22,000	14.47	7.23	3.62
47,000	6.77	3.39	1.69
100,000	3.18	1.59	0.79

Con los resultados del cálculo de R , se busca dentro de los valores comerciales de las resistencias, aquellos que se aproximen más y se trata de ajustarlos hasta casi igualarlos colocando otra resistencia en paralelo o en serie de ser necesario.

Los datos que se muestran sombreados en azul claro son los elegidos para cada una de las frecuencias, se buscaron los valores de resistencias comerciales en serie o paralelo que se acercan más al valor obtenido de R para cada frecuencia, a continuación se muestra cada uno de los cálculos tanto de R como la comprobación, haciendo el cálculo de C a partir de las resistencias obtenidas y en los tres casos conectando resistencias en paralelo se pudo aproximar bastante bien al valor teórico de R .

Para el circuito 1 a la frecuencia de 0.5 [KHz]:

$$\text{Si } C = 1000[\text{pF}] \text{ y } R_{500} = 318.3[\text{K}\Omega]$$

$$\Rightarrow R_{500} = 270 + 47 + 1.2[\text{K}\Omega] \quad \text{donde} \quad R_1 = 270.0[\text{K}\Omega]$$

$$R_2 = 47.0[\text{K}\Omega]$$

$$R_3 = 1.2[\text{K}\Omega]$$

$$\therefore R_{500} = 318.2[\text{K}\Omega] \cong 318.3[\text{K}\Omega]$$

Comprobando:

$$C_{500} = \frac{1}{R f_0 2\pi} = \frac{1}{(318.2 \times 10^3)(500)2\pi} = 1000[\text{pF}]$$

Calculando las resistencias y el potenciómetro:

$$R_3' + POT = 2R_4 \quad \text{Si } R_3' = 100[\text{K}\Omega] \text{ y } POT = 100[\text{K}\Omega]$$

$$\rightarrow 100\text{K} + 100\text{K} = 2R_4$$

$$\therefore R_4 = 100[\text{K}\Omega]$$

Dado que estas resistencias no afectan la estabilidad del circuito y permiten controlar la amplitud de la señal, se utilizan los mismos valores aquí calculados para los dos circuitos restantes.

Para la frecuencia 2 de 1.0 [KHz]:

$$\text{Sí } C = 4700[pF] \text{ y } R_{1000} = 33.86[K\Omega]$$

$$\Rightarrow R_{1000} = 27 + 6.8[K\Omega] \quad \text{donde} \quad \begin{aligned} R_1 &= 27.0[K\Omega] \\ R_2 &= 6.8[K\Omega] \end{aligned}$$

$$\therefore R_{1000} = 33.80[K\Omega] \cong 33.86[K\Omega]$$

Comprobando :

$$C_{1000} = \frac{1}{R f_0 2\pi} = \frac{1}{(33.8 \times 10^3)(1000)2\pi} = 4700[pF]$$

Para la frecuencia 3 de 2.0 [KHz]:

$$\text{Sí } C = 1000[pF] \text{ y } R_{2000} = 79.58[K\Omega]$$

$$\Rightarrow R_{2000} = 68 + 10 + 1.5[K\Omega] \quad \text{donde} \quad \begin{aligned} R_1 &= 68.0[K\Omega] \\ R_2 &= 10.0[K\Omega] \\ R_3 &= 1.5[K\Omega] \end{aligned}$$

$$\therefore R_{2000} = 79.50[K\Omega] \cong 79.58[K\Omega]$$

Comprobando

$$C_{2000} = \frac{1}{R f_0 2\pi} = \frac{1}{(79.50 \times 10^3)(2000)2\pi} = 1000[pF]$$

Para cada uno de los tres circuitos se utiliza además de los capacitores y las resistencias, dos diodos de conmutación rápida (1N4148 o 1N914), un amplificador operacional de precisión (LF318 o LF351). El dispositivo de seguridad del circuito es un regulador de voltaje 7812 y para poder integrar estos tres circuitos con una sola alimentación se emplea un selector de tres posiciones.

5. Construcción del Circuito Oscilador Sinusoidal

5.1. Simulación

Antes de iniciar la construcción del circuito, primero se realizó la simulación de cada una de las partes que integran el Oscilador sinusoidal de tres frecuencias, a continuación se presenta el diagrama eléctrico del circuito de prueba, figura No. 26, en el cual solo se cambian los valores de las resistencias y capacitores en función de la frecuencia que se genera (para el propósito de este trabajo de 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz), y se muestran los resultados.

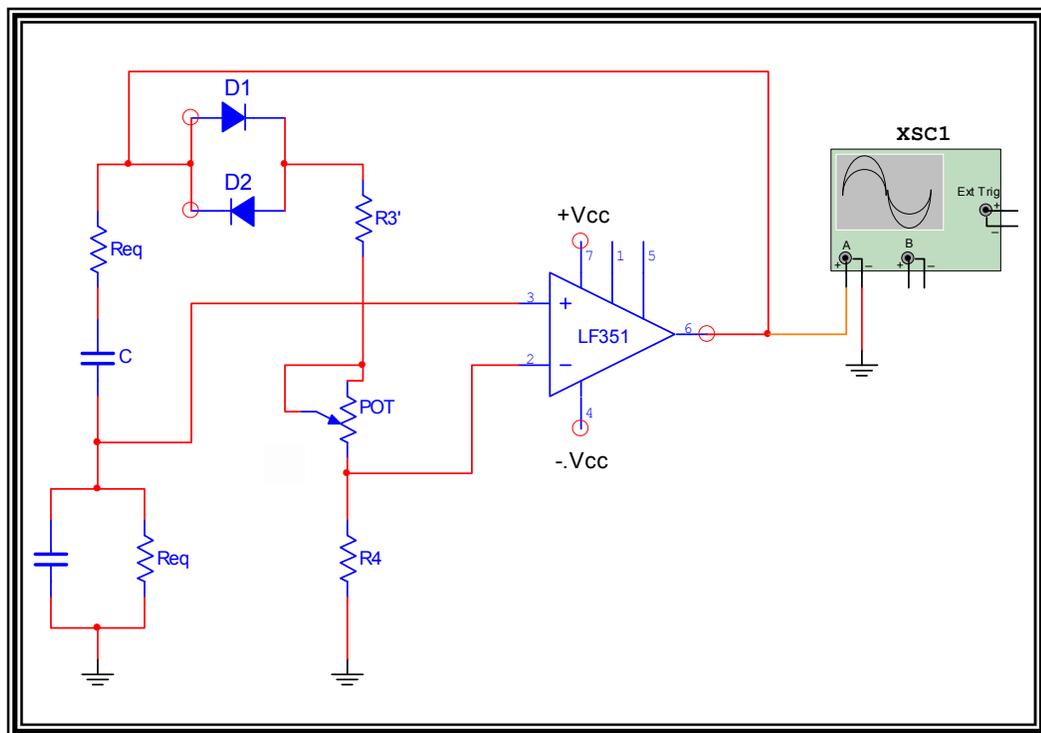


Figura No. 26. Diagrama Eléctrico, Circuito Oscilador Puente de Wien de Prueba

El circuito 1 se diseñó para generar una señal con una frecuencia de 500 [Hz], la simulación correspondiente a éste circuito y los valores utilizados para R_{eq} y C se muestran a continuación:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 \quad ; \quad \text{donde} \quad R_1 = 270 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

$$R_2 = 47 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

$$R_3 = 1.2 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

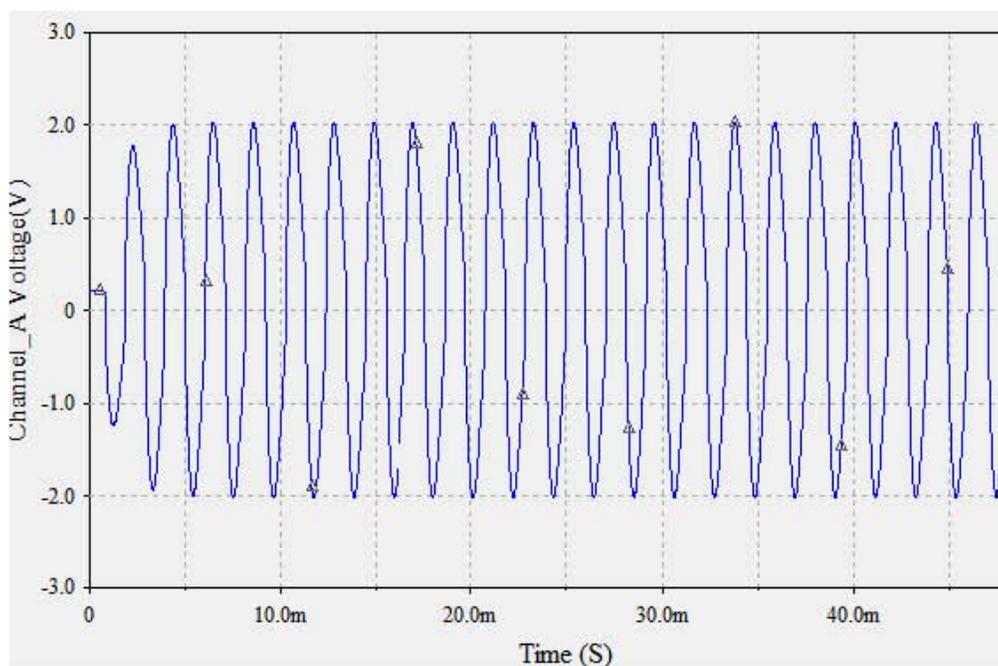
$$C = 1 \text{ [nF]}$$

$$POT = 10 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

$$R'_3 = 10 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

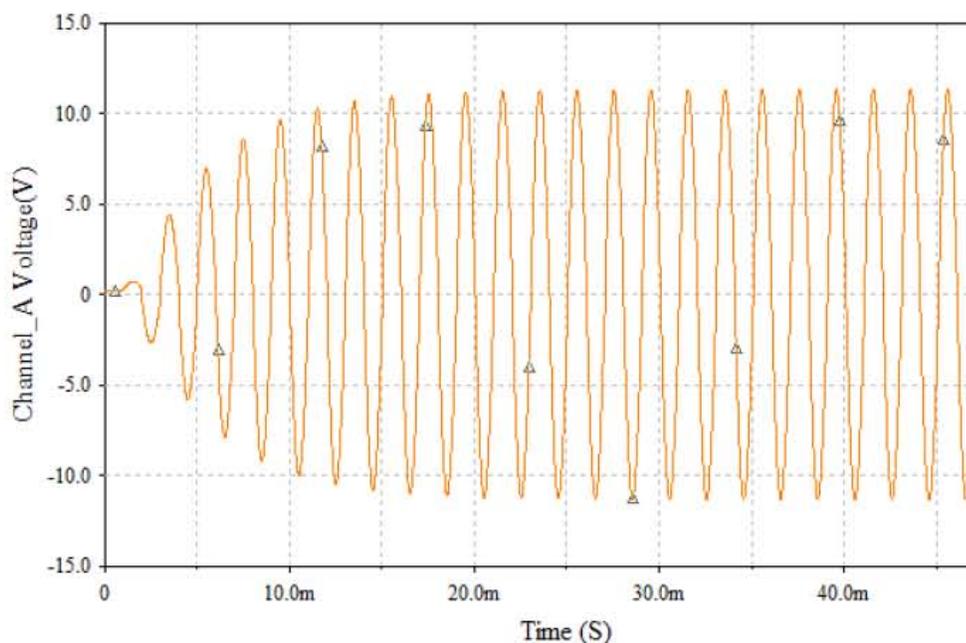
$$R_4 = 10 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

Cuando el $POT = 0\%$ se obtiene la siguiente lectura en el simulador

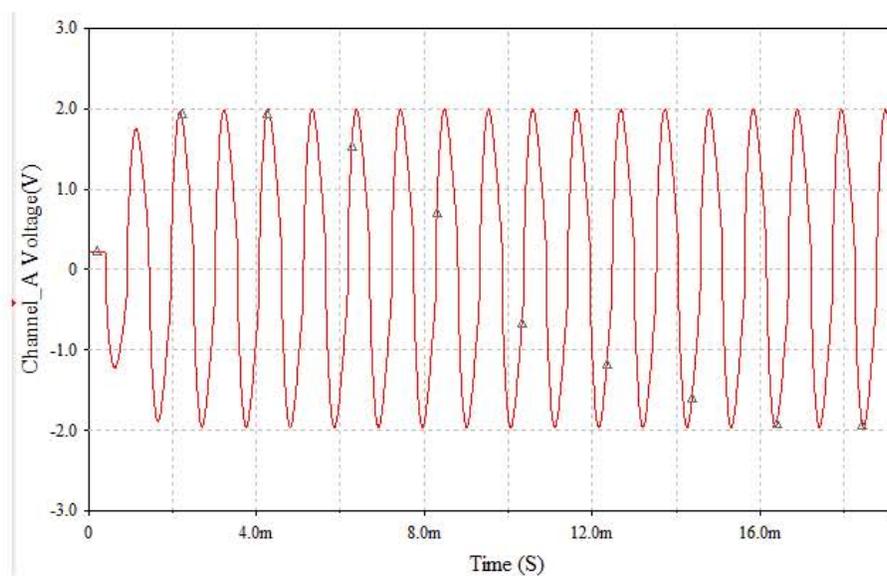


La señal de salida tiene un V_{ppMIN} de 4 [V]

Al modificar el valor del $POT = 100\%$ aumentamos la amplitud de salida de la señal, entonces se puede obtener con éste circuito un V_{PPMAX} de aproximadamente 22 [V].



Para el circuito 2, el oscilador es diseñado para que genere una frecuencia de 1[KHz]. Se obtienen los resultados siguientes con $POT = 0\%$ y sus respectivos valores de R_{eq} y C , entonces el V_{PPMIN} es de aproximadamente 4 [V].



Donde;

$$R_{eq} = R_1 + R_2 \quad ; \quad \text{donde} \quad R_1 = 27 \text{ [K}\Omega\text{]} \\ R_2 = 6.8 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

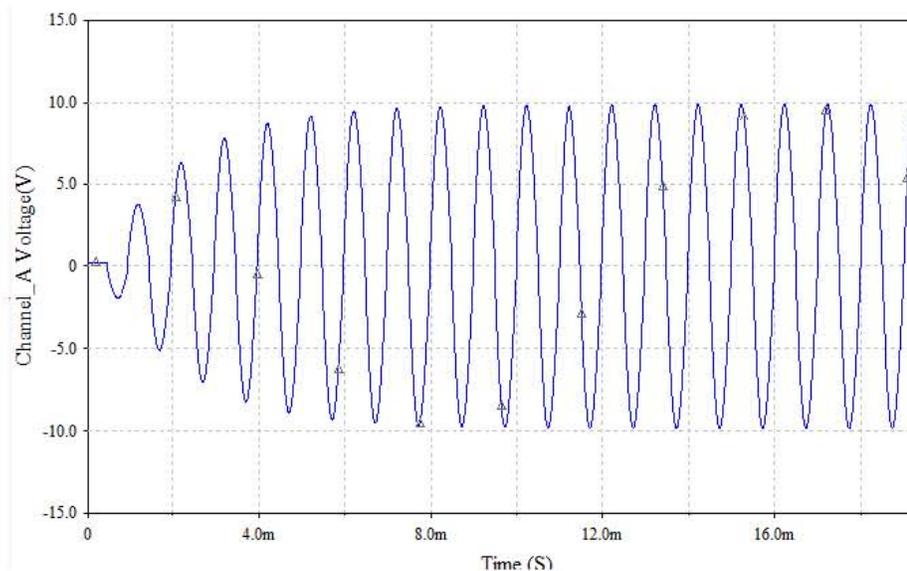
$$C = 4.7 \text{ [nF]}$$

$$POT = 10 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

$$R'_3 = 10 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

$$R_4 = 10 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

Con el $POT = 100\%$, el V_{PPMAX} es de aproximadamente 20 [V]



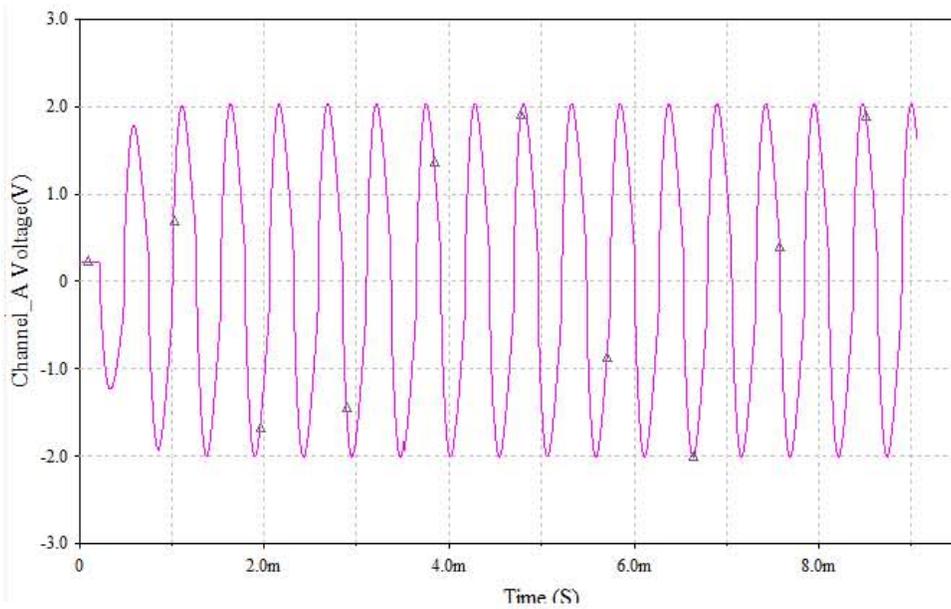
El circuito 3 deberá generar una señal de 2 [KHz] con los valores de R y C que se muestran a continuación, cuando el valor del $POT = 0\%$, el V_{PPMIN} es de aproximadamente 4.1 [V].

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 \quad ; \quad \text{donde} \quad R_1 = 68 \text{ [K}\Omega\text{]} \\ R_2 = 10 \text{ [K}\Omega\text{]} \\ R_3 = 1.5 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

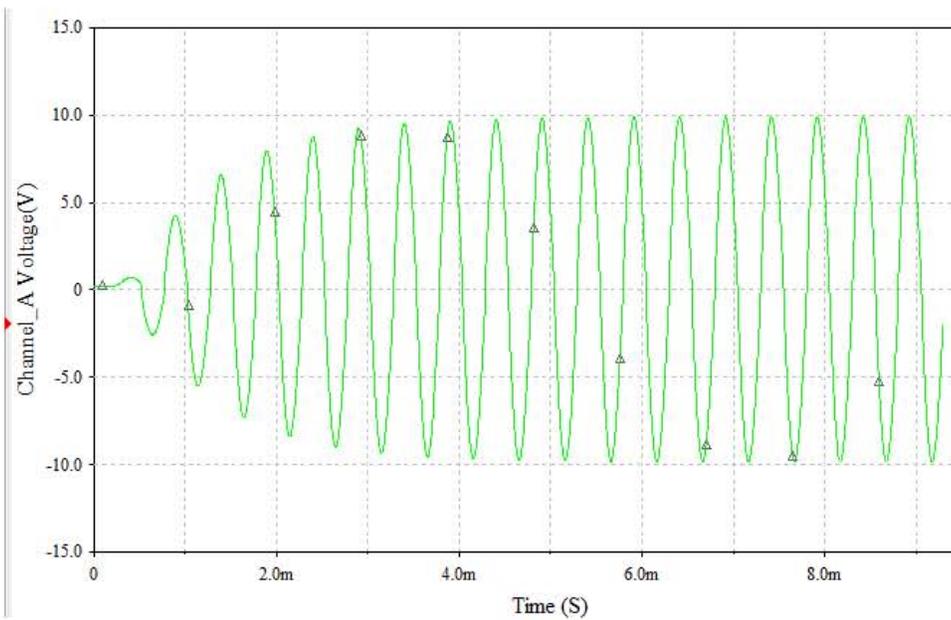
$$C = 1.0 \text{ [nF]}$$

$$POT = 10 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

$$R'_3 = 10 \text{ [K}\Omega\text{]} \quad \text{y} \quad R_4 = 10 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

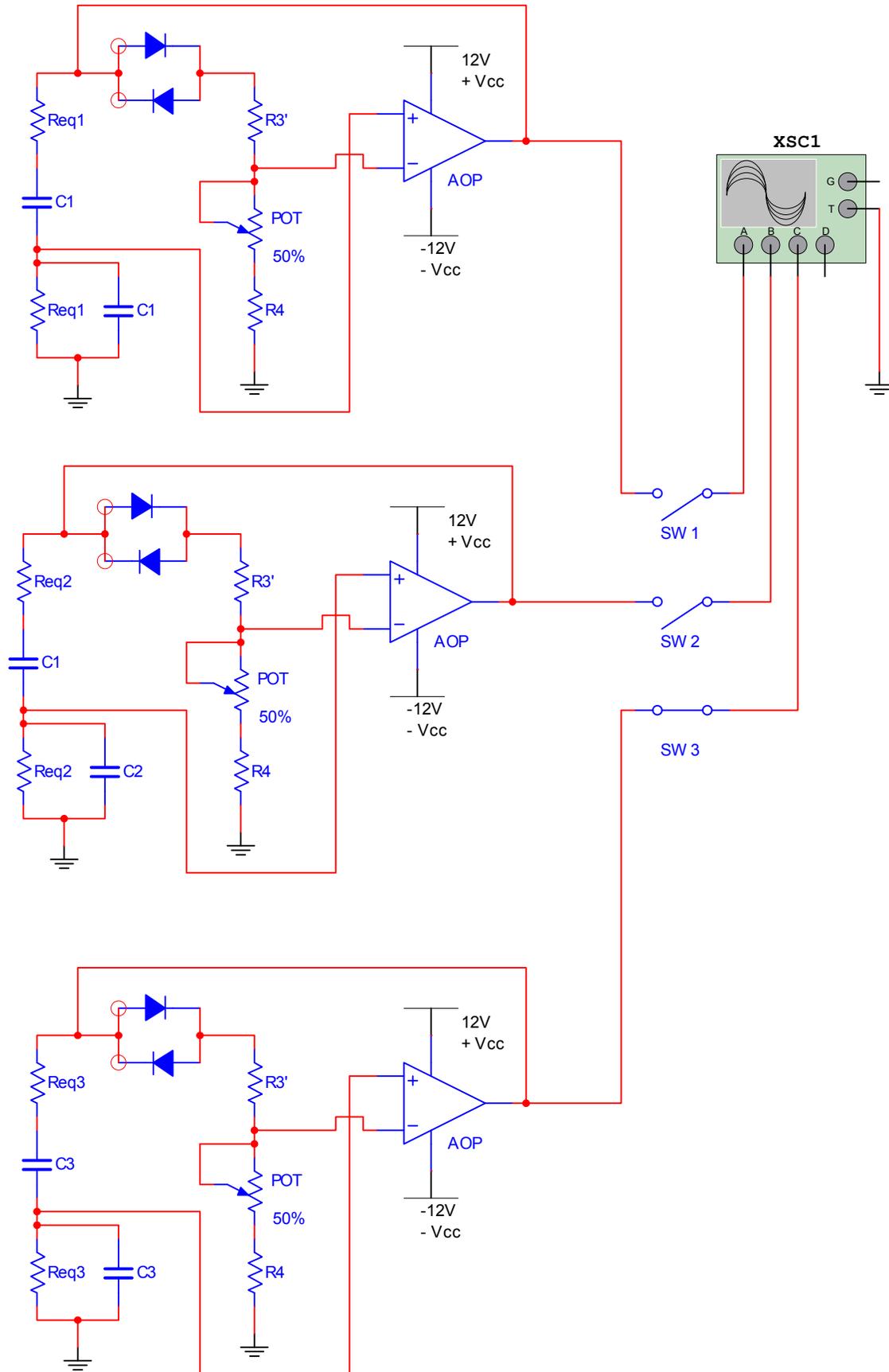


Y para el $POT = 100\%$, el V_{ppMAX} es de aproximadamente 20 [V]



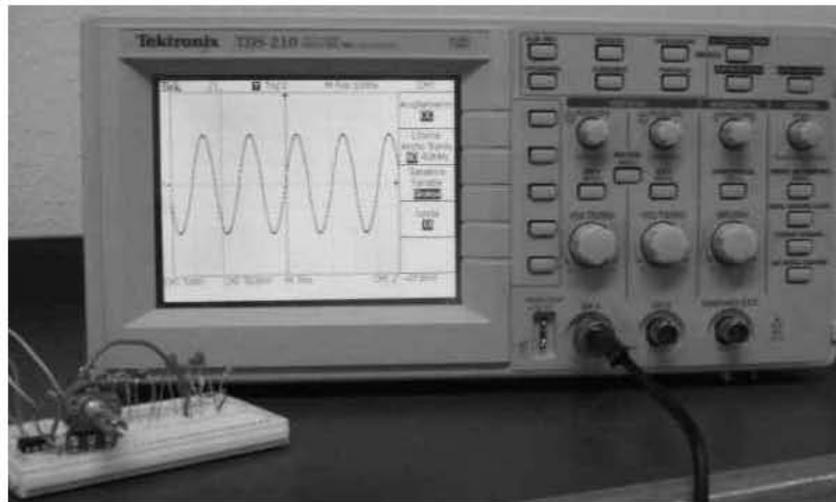
5.2. Construcción

Una vez que se han simulado los circuitos se procedió a la construcción del prototipo de acuerdo al diagrama eléctrico mostrado a continuación.

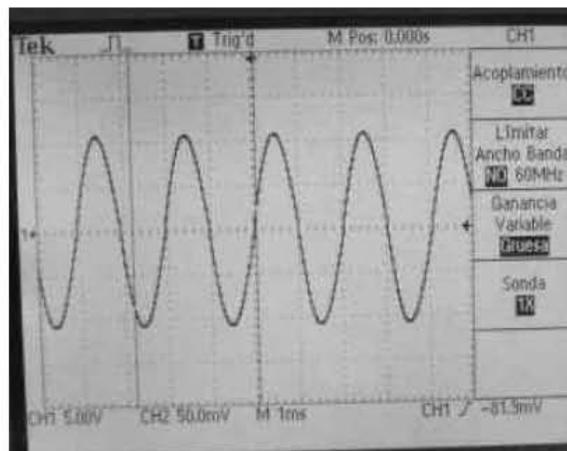


Se llevaron a cabo pruebas de cada módulo por separado para poder comparar los resultados de la simulación y después se integraron al circuito.

En la siguiente fotografía se puede apreciar el circuito 1 ($f_0=500$ [Hz.]) que da una señal de salida sinusoidal.

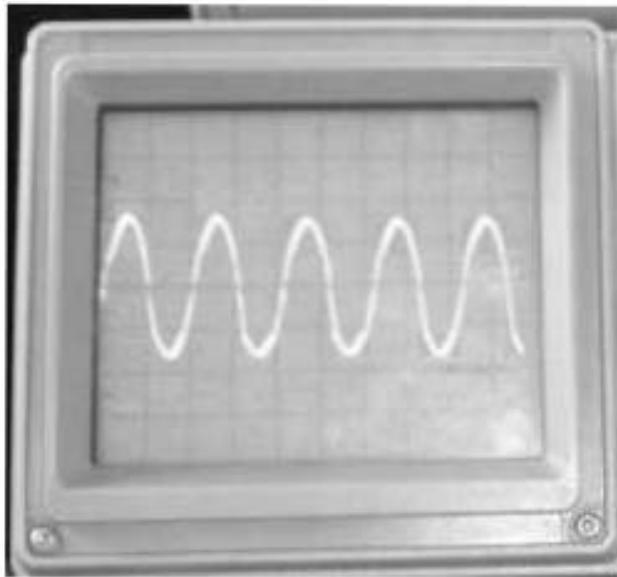


Al variar el potenciómetro a su máximo se obtiene un V_{PPMAX} de 22 [Vpp] como se puede observar en este acercamiento, en donde cada cuadro del osciloscopio representa 5 [V].

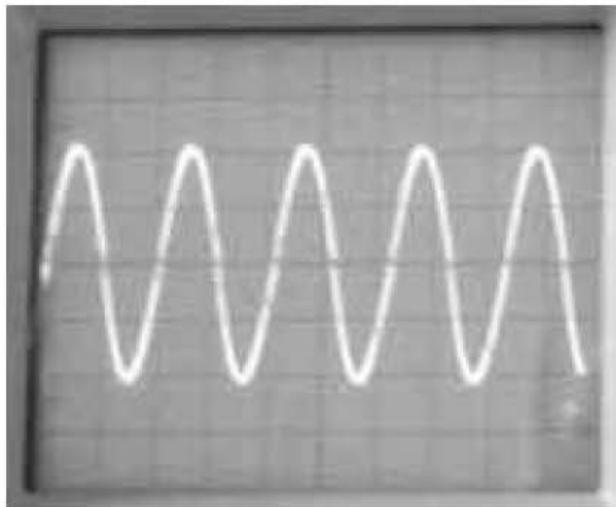


En cuanto a la frecuencia, la señal ocupa dos cuadros en recorrer un solo periodo como se muestra en la foto anterior, en el osciloscopio cada uno de los cuadros corresponde a 1ms y el periodo de la señal ocupa 2 cuadros, lo que nos da como resultado una frecuencia igual a 500 [Hz].

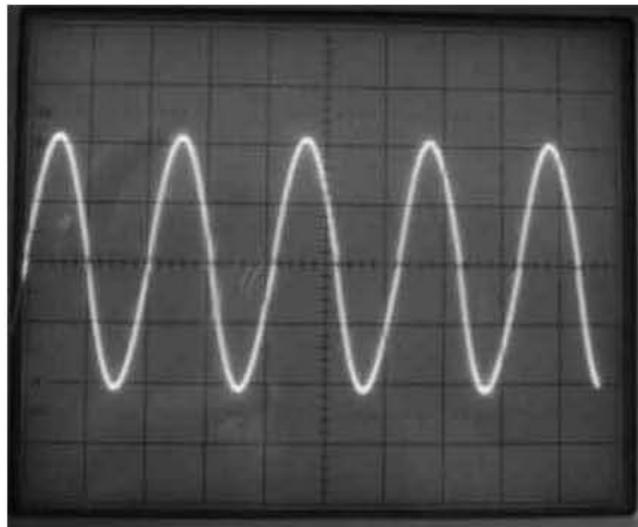
Cuando ponemos el potenciómetro al mínimo, la señal sinusoidal disminuye hasta llegar a los 3.6 [Vpp], como se observa a continuación, cada cuadro del osciloscopio corresponde a 500 [mV].



El circuito 2 genera una señal sinusoidal de 1.0 [KHz] de frecuencia, en el osciloscopio se puede ver que cuando el potenciómetro esta en el mínimo la amplitud de la señal es de 4 [Vpp].



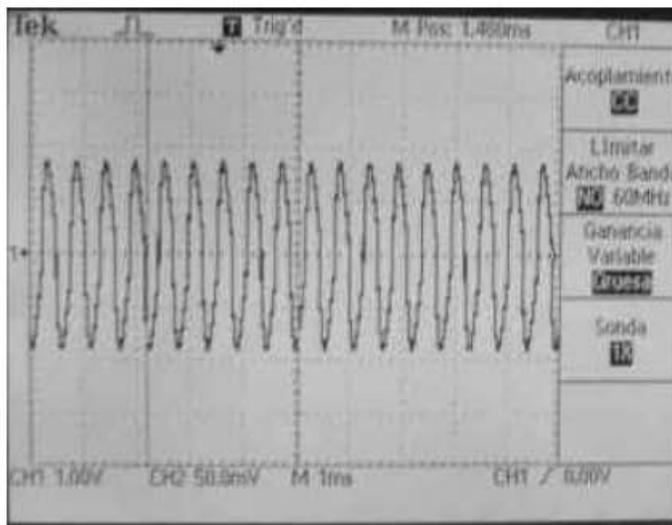
Y cuando el potenciómetro se encuentra en el máximo se obtiene una señal de 20 [Vpp] de la siguiente fotografía.



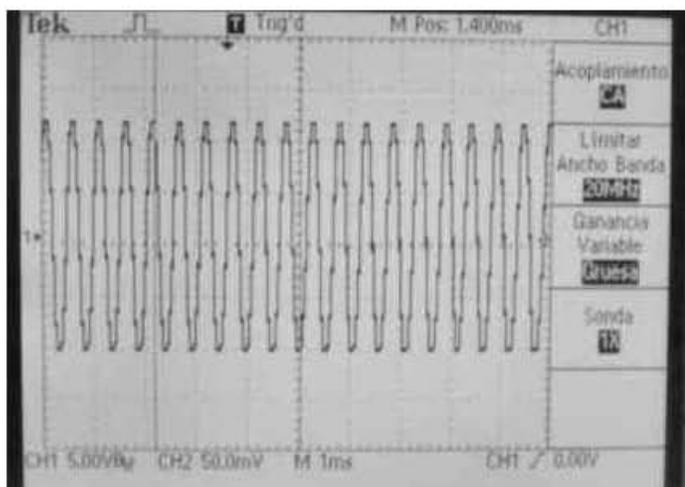
La frecuencia es el inverso del periodo y para ésta señal es igual a 2 cuadros, entonces si cada cuadro es igual a 0.5 ms, el periodo de esta señal es de 1ms y su inverso nos da una frecuencia de 1 [KHz].

Por último realizamos la prueba del circuito 3 que genera una señal sinusoidal de 2 [KHz], los resultado se muestran en las siguientes

fotografías. Si ponemos el potenciómetro en su valor mínimo, la amplitud de la señal es de 1.8 [Vpp].



Y cuando éste se encuentra en su máximo, el valor de la amplitud de la señal es de 22 [Vpp].



La frecuencia es el inverso de 0.5ms que es lo que tarda la señal en recorrer un periodo, por lo tanto la frecuencia es de 2 [KHz].

5.3. Resultados

Se obtuvieron los resultados mostrados en la siguiente tabla:

	Amplitud Mínima [Vpp]		Amplitud Máxima [Vpp]	
	Teórico	Práctico	Teórico	Práctico
Circuito 1	4	3.6	22	22
Circuito 2	4	4	20	20
Circuito 3	4.1	1.8	20	22

Evidentemente existen diferencias entre los valores teóricos (simulados) y los valores obtenidos en la práctica, esto obedece a diversas razones entre las cuales están: el simulador toma valores ideales de cada uno de los elementos que componen el circuito, pero en la realidad, los elementos no proporcionan valores exactos, por ejemplo las resistencias indican una tolerancia de +/- el 5 % y los capacitores es muy difícil saber que porcentaje exacto se tiene de tolerancia, además están las pérdidas que tenemos en las conexiones y los demás elementos, sin embargo la diferencia entre los valores teóricos y los prácticos fueron menores por lo que podemos concluir que el dispositivo funciona correctamente y puede ser utilizado de acuerdo a lo planeado y correspondiendo a la propuesta inicial de este trabajo.

Conclusiones

El objetivo de este trabajo es diseñar y construir un circuito sinusoidal que permite la optimización del generador de funciones en el laboratorio de Sistemas de Comunicaciones y Radio Frecuencia, que utilizan los alumnos de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, para que pudiera ser utilizada la salida del circuito diseñado como señal modulante en el desarrollo de las prácticas de Técnicas de Modulación Analógica, objetivo que de acuerdo al plan de trabajo propuesto para esta tesis, se cumplió satisfactoriamente.

Dentro del desarrollo de esta tesis, me pareció importante proponer un tema que apoyara la integración de la enseñanza teórica con la práctica, cuya justificación se expuso en el primer capítulo de este trabajo, así que dirigí mis esfuerzos para brindar una alternativa de bajo costo, que permita a los alumnos, durante sus prácticas, participar activamente y tener un mejor aprovechamiento de los equipos en los laboratorios así como experimentar sin el miedo de echar a perder un equipo muy costoso. Con el circuito propuesto, se pueden evitar reparaciones del equipo existente en el laboratorio, ya que es un circuito sencillo, muy económico y fácil de construir.

Partiendo de la teoría de los circuitos osciladores, este trabajo se enfoca fundamentalmente a un caso de aplicación, es por ello que trata de forma general las características y condiciones de oscilación, pero no se prueban para cada oscilador mencionado, debido a que se da por sentado que son circuitos ya probados y solo es necesario realizar cálculos relativamente sencillos para obtener los resultados esperados. La mayor dificultad de esta propuesta, era encontrar un circuito de la mayor simplicidad posible, al más bajo costo y de fácil construcción.

Se podría haber optado por múltiples opciones de configuración y diseño de circuitos osciladores ya que muchos de ellos, son capaces de oscilar a frecuencias bajas o altas dependiendo de cómo se realice el diseño en particular. Las limitaciones existentes se refieren a disponer de los elementos de diseño teórico tales como inductancias y cristales de los valores comerciales requeridos, Por lo que en este caso, se optó por el diseño de un oscilador “Puente de Wien” cuyos elementos pueden calcularse a partir de los valores comerciales existentes en el mercado, de las capacitancias.

El motivo más importante que me impulsó a realizar este trabajo, es dejar un dispositivo práctico que pueda ser utilizado ampliamente en el laboratorio de Sistemas de Comunicaciones y Radiofrecuencia, así como en otras prácticas, apoyando con ello las actividades de enseñanza-aprendizaje de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones. Plantear así una sencilla aportación de utilidad puramente práctica, y fácilmente aplicable, en vez de una disertación teórica que no pueda beneficiar a nadie en particular.

Este propósito responde al afecto que he tenido desde mi ingreso a esta Facultad de Ingeniería, así como a la Universidad Nacional Autónoma de México, de las cuales me siento muy orgullosa de ser egresada y a las cuales deseo reintegrar aunque sea con esta incipiente aportación, algo de lo mucho que he recibido.

Apéndice A. Materiales Utilizados

Descripción	Valor	Circuito 1	Circuito 2	Circuito 3	Unidades	Costo
Resistencias	270.0 [KΩ]	2			2	2.53
	68.0 [KΩ]			2	2	2.53
	47.0 [KΩ]	2			2	2.53
	27.0 [KΩ]		2		2	2.53
	10.0 [KΩ]	2	2	4	8	2.53
	6.8 [KΩ]		2		2	2.53
	1.5 [KΩ]			2	2	2.53
	1.2 [KΩ]	2			2	2.53
Capacitores	1.0 [nF]	2		2	4	2.00
	4.7 [nF]		2		2	2.00
Potenciometros	10.0 [KΩ]	1	1	1	3	24.00
Diodos	1N4148	2	2	2	6	6.00
Circuitos Integrados	LF351	1	1	1	3	15.00
Selector	2 p 5 T				1	10.00
Perrillas					4	24.00
Caja					1	140.00
Tarjeta Fenólica	-				1	58.99
						302.23

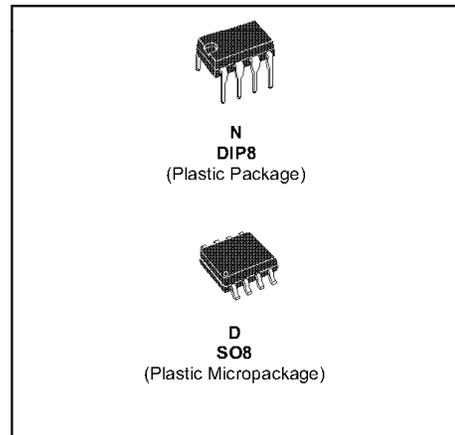
Apéndice B. Circuito Integrado LF351



LF151
LF251 - LF351

WIDE BANDWIDTH SINGLE J-FET OPERATIONAL AMPLIFIER

- INTERNALLY ADJUSTABLE INPUT OFFSET VOLTAGE
- LOW POWER CONSUMPTION
- WIDE COMMON-MODE (UP TO V_{CC}^+) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE : 16V/ μ s (typ)

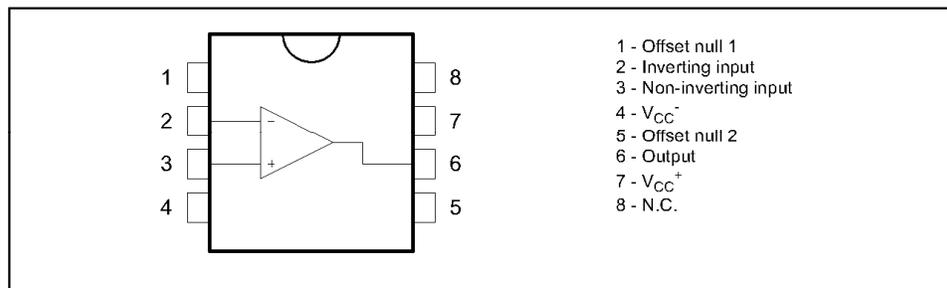


DESCRIPTION

These circuits are high speed J-FET input single-operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient.

PIN CONNECTIONS (top view)

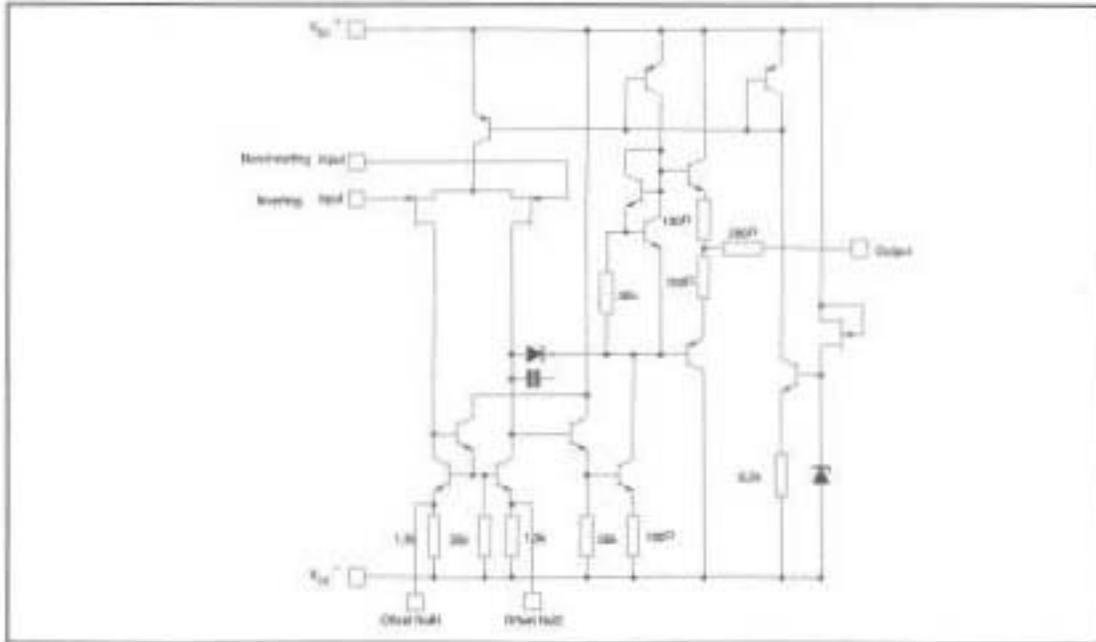


ORDER CODE

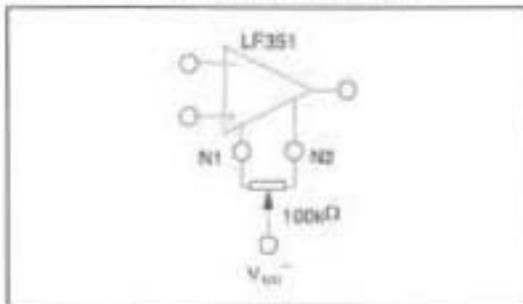
Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
LF351	0°C, +70°C	•	•
LF251	-40°C, +105°C	•	•
LF151	-55°C, +125°C	•	•

N = Dual in Line Package (DIP)
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)

SCHEMATIC DIAGRAM



INPUT OFFSET VOLTAGE NULL CIRCUIT

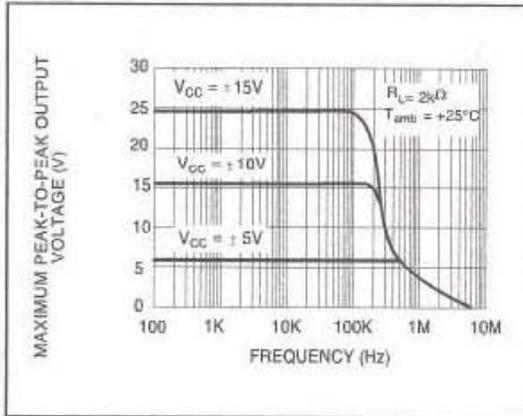


ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

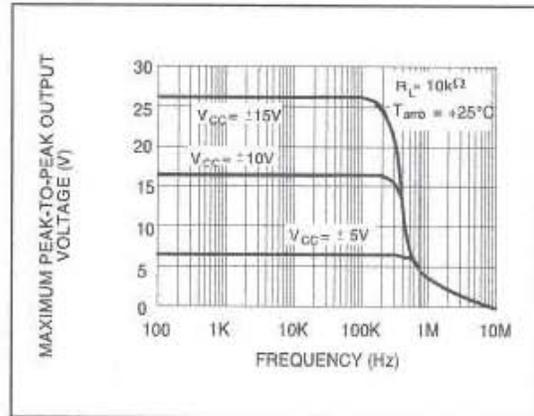
Symbol	Parameter	LF151	LF251	LF351	Unit
V_{CC}	Supply voltage - note ¹⁾		±15		V
V_i	Input Voltage - note ²⁾		±15		V
V_{id}	Differential Input Voltage - note ³⁾		±30		V
P_{tot}	Power Dissipation		680		mW
	Output Short-circuit Duration - note ⁴⁾		Infinite		
T_{oper}	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	°C
T_{stg}	Storage Temperature Range		-65 to +150		°C

1. All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages where the zero reference level is the midpoint between V_{CC+} and V_{CC-} .
2. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
3. Differential voltages are the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
4. The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.

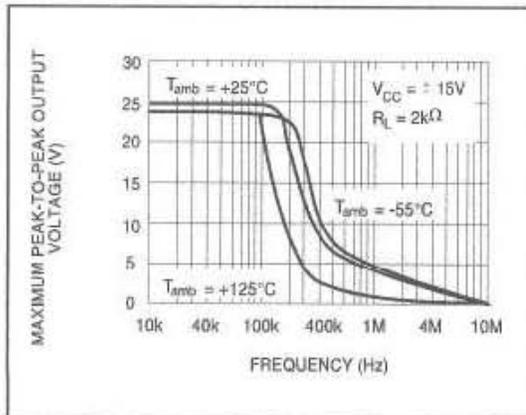
VOLTAGE versus FREQUENCY



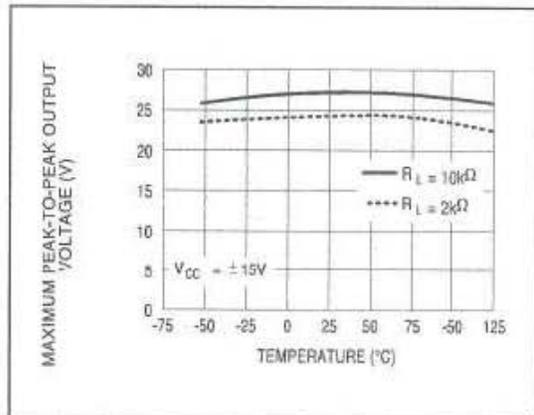
VOLTAGE versus FREQUENCY



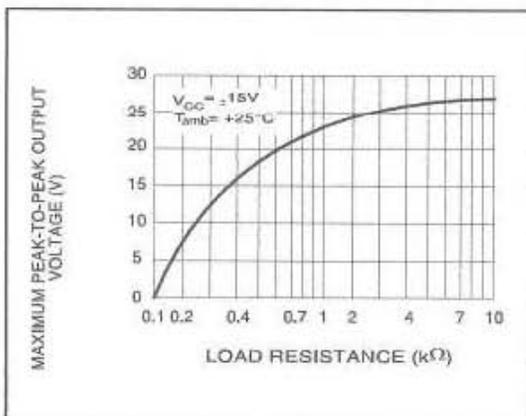
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus FREQUENCY



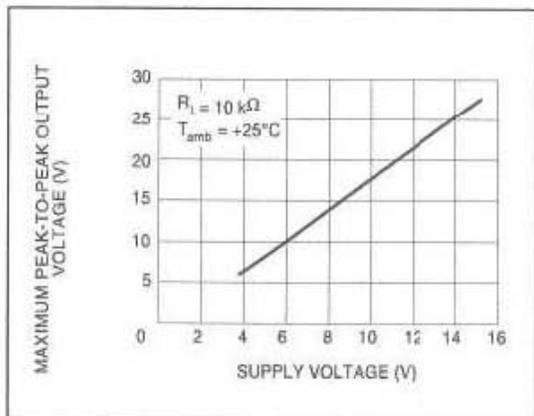
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus FREE AIR TEMP.



MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus LOAD RESISTANCE



MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus SUPPLY VOLTAGE

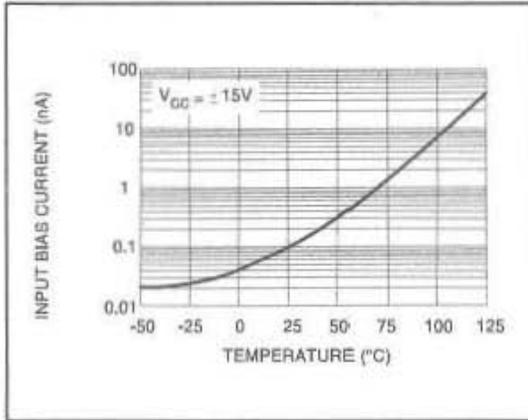


MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT

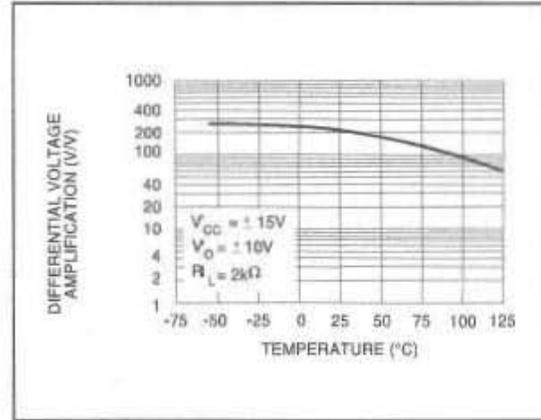
INPUT BIAS CURRENT versus FREE AIR



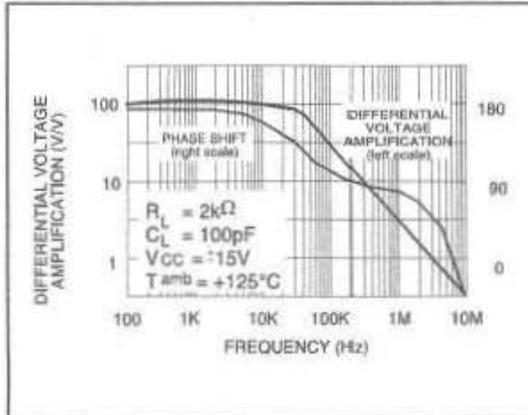
TEMPERATURE



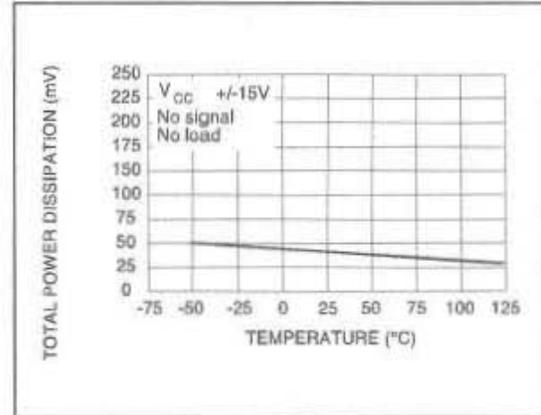
AMPLIFICATION versus FREE AIR TEMP.



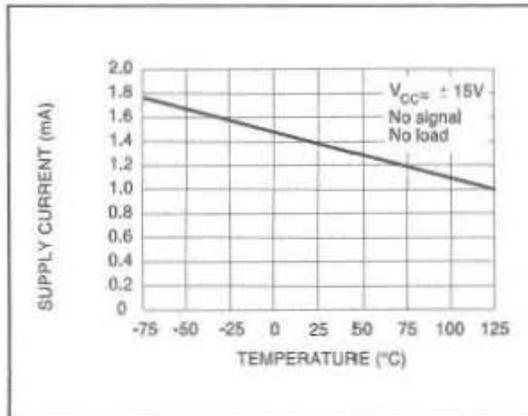
LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION AND PHASE SHIFT versus FREQUENCY



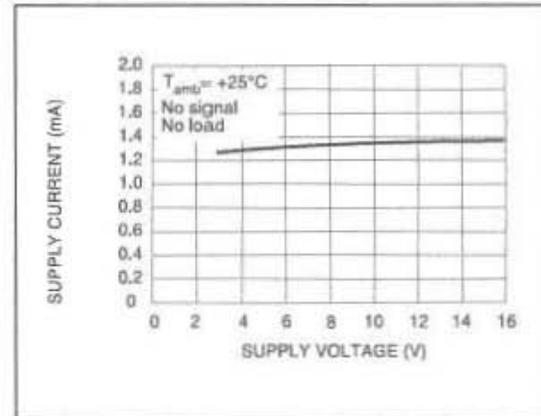
TOTAL POWER DISSIPATION versus FREE AIR TEMPERATURE



SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER versus FREE AIR TEMPERATURE



SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER versus SUPPLY VOLTAGE

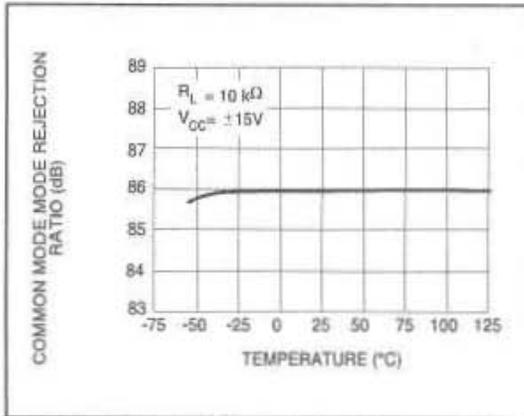


LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE

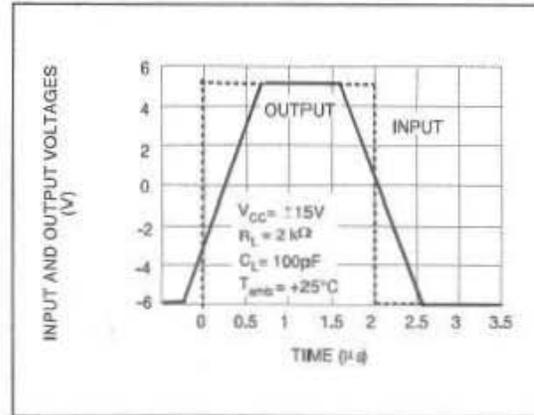


COMMON MODE REJECTION RATIO versus

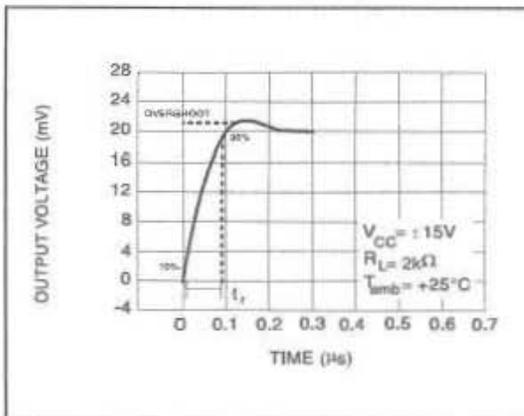
FREE AIR TEMPERATURE



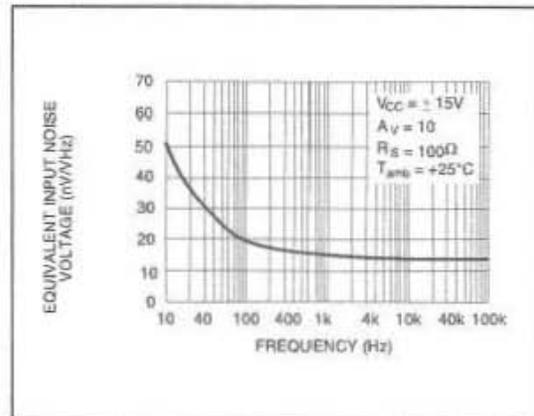
VOLTAGE FOLLOWER LARGE SIGNAL PULSE RESPONSE



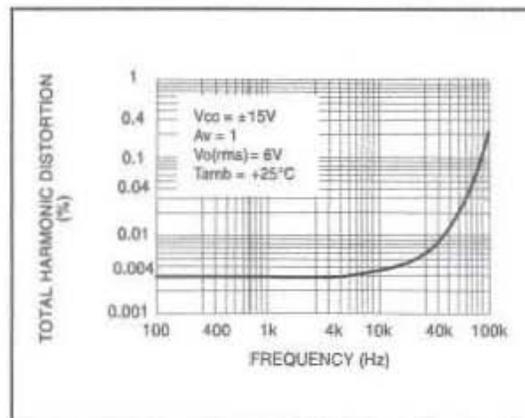
OUTPUT VOLTAGE versus ELAPSED TIME



EQUIVALENT INPUT NOISE VOLTAGE versus FREQUENCY



TOTAL HARMONIC DISTORTION versus FREQUENCY



PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

Figure 1 : Voltage Follower

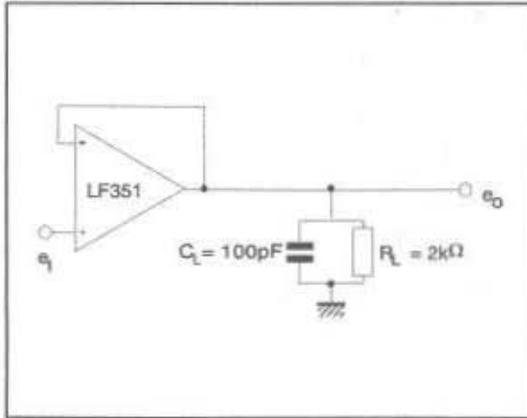
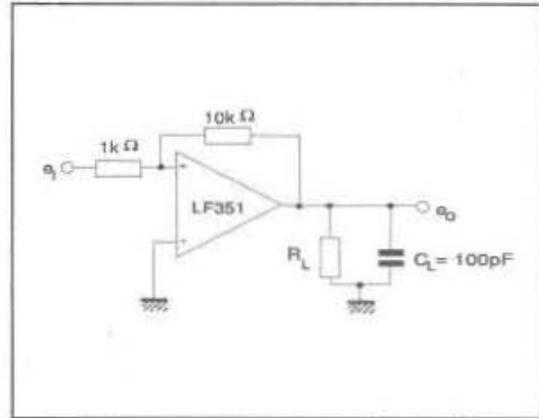
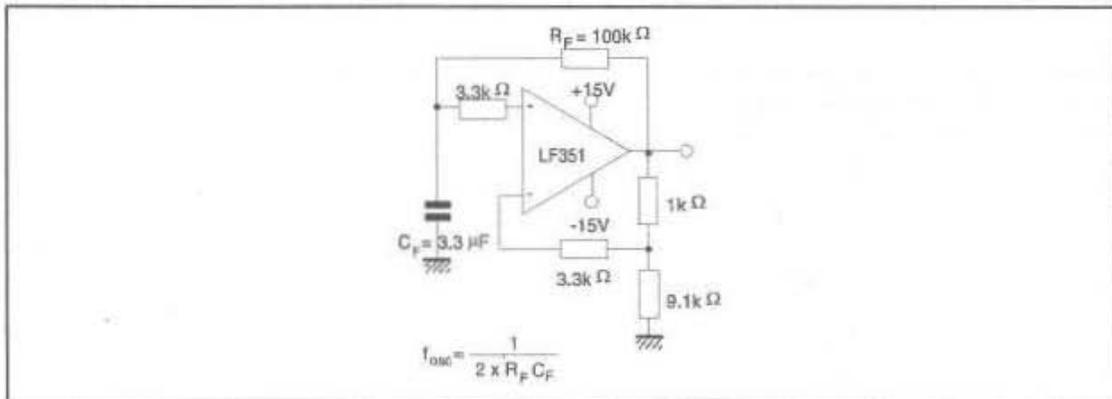


Figure 2 : Gain-of-10 inverting amplifier

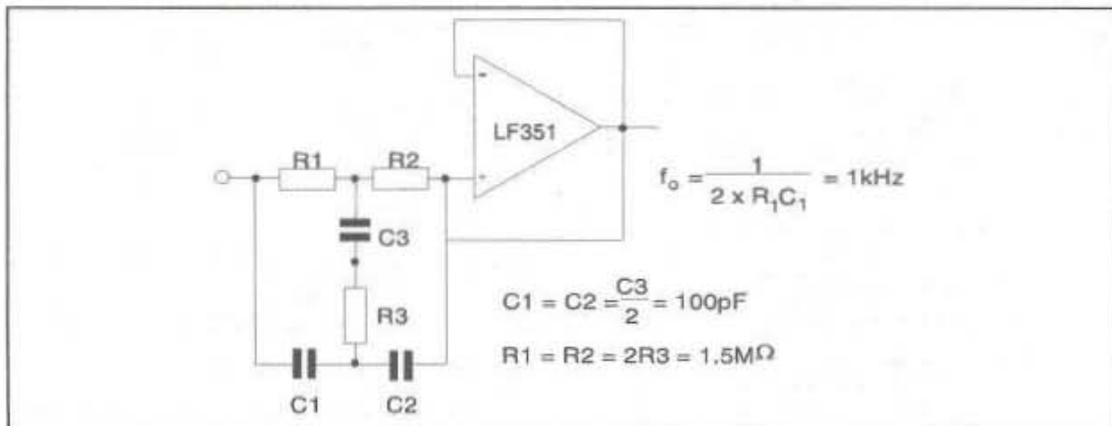


TYPICAL APPLICATION

(0.5Hz) SQUARE WAVE OSCILLATOR

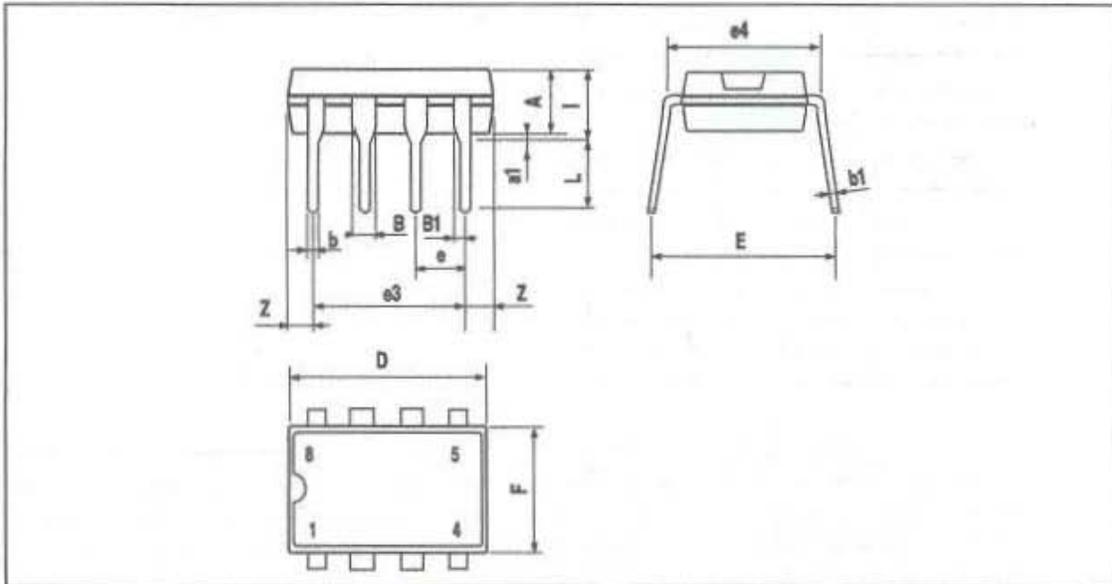


HIGH Q NOTCH FILTER



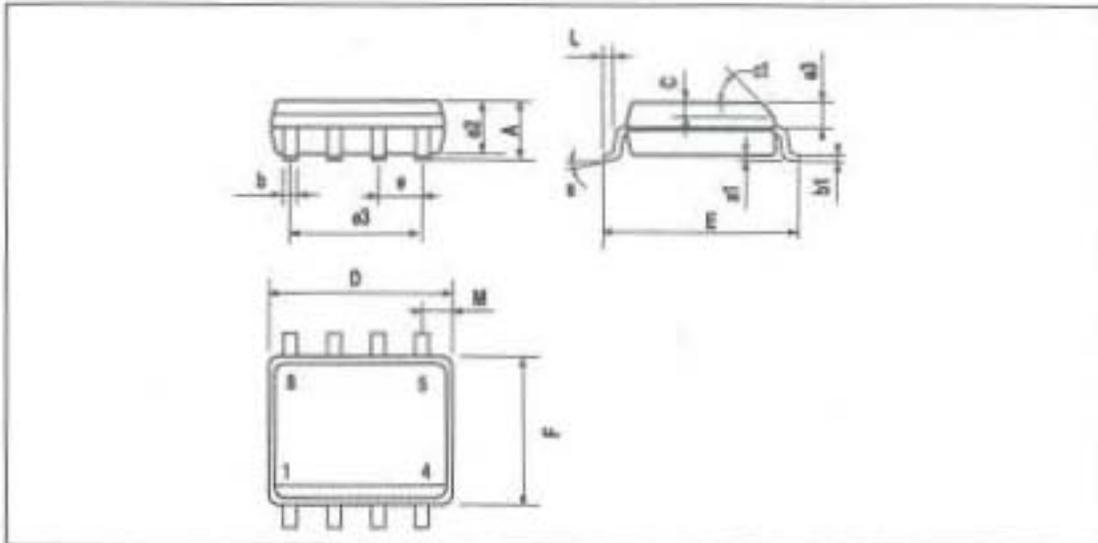
LF151 - LF251 - LF351

PACKAGE MECHANICAL DATA
8 PINS - PLASTIC DIP



Dim.	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A		3.32			0.131	
a1	0.51			0.020		
B	1.15		1.65	0.045		0.065
b	0.356		0.55	0.014		0.022
b1	0.204		0.304	0.008		0.012
D			10.92			0.430
E	7.95		9.75	0.313		0.384
e		2.54			0.100	
e3		7.62			0.300	
e4		7.62			0.300	
F			6.6			0.260
i			5.08			0.200
L	3.18		3.81	0.125		0.150
Z			1.52			0.060

PACKAGE MECHANICAL DATA
8 PINS - PLASTIC MICROPACKAGE (SO)



Dim.	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.75			0.069
a1	0.1		0.25	0.004		0.010
a2			1.65			0.065
a3	0.65		0.85	0.026		0.033
b	0.35		0.48	0.014		0.019
b1	0.19		0.25	0.007		0.010
C	0.25		0.5	0.010		0.020
c1	45° (typ.)					
D	4.8		5.0	0.189		0.197
E	5.8		6.2	0.228		0.244
e		1.27			0.050	
a3		3.81			0.150	
F	3.8		4.0	0.150		0.157
L	0.4		1.27	0.016		0.050
M			0.8			0.024
S	8° (max.)					

Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

© The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics

© 2001 STMicroelectronics - Printed in Italy - All Rights Reserved

STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Italy - Japan - Malaysia - Malta - Morocco

Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom

© <http://www.st.com>



Bibliografía

Electrónica Teoría de Circuitos

Boylestad R., Nashelsky
Ed. Prentice Hall Hispanoamericana,
México 1986

Sistemas Electrónicos de Comunicaciones

Frenzel, Louis E.
Ed. Alfaomega
México 2003

Sistemas de Comunicaciones Digitales y Analógicos, 5ª ed.

Couch II, Leon W.
Ed. Prentice Hall
México 1998

Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, 4ª ed.

Tomasi W.
Ed. Prentice Hall
México 2003

Microelectronic Circuits

Rashid, Muhammed H.
Ed. International Thomson
USA 1999

Microelectronic Circuits, 1ª ed.

Sedra, Adel S. & Smith, Kenneth C.
USA 2003

Referencias Electrónicas

Apuntes de Electrónica Aplicada III

Oscar M. Santa Cruz

U.T.N. Facultad Regional Córdoba 2006

<http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/de-scargas.htm>

Electrónica III, 2ª ed.

Miyara, Federico

Universidad Nacional de Rosario 2004

<http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/oscilad.pdf>

Electrónica Básica para Ingenieros

Ruiz Robredo, Gustavo A.

Universidad de Cantabria 2001

<http://grupos.unican.es/dyvci/ruizrg/html.files/LibroWeb.html>

Sistemas de Radiocomunicación

Ángel de la Torre Vega

Universidad de Granada, 2004

http://www.ugr.es/~atv/SRD/transparencias_SRD.pdf

<http://es.wikipedia.org/>

<http://www.comeniusfoundation.org/comenius.htm>

<http://www.eduteka.org/>

<http://www.ilustrados.com/>

<http://www.ingenieria.unam.mx/>

<http://www.piaget.org/>