

TRABAJO PRÁCTICO

Nº2



Alumno: Oliverio de los Ríos.

Materia: Telecomunicaciones.

Curso: 5^{TO} Año.

Año: 2025.

Profesor: Juan Pablo Romero

Introducción:

La generación de formas de onda periódicas es una función elemental e indispensable en la arquitectura de sistemas electrónicos, particularmente en el dominio de las comunicaciones y el procesamiento digital de señales. Los circuitos osciladores, como sistemas autónomos o disparados, son los encargados de sintetizar estas señales, cuya estabilidad en frecuencia y amplitud es un parámetro crítico para el correcto funcionamiento de sistemas síncronos, moduladores, demoduladores y equipos de instrumentación.

El presente trabajo práctico tiene como objetivo la caracterización y el análisis riguroso de los principios fundamentales que gobiernan la operación de los circuitos osciladores. La totalidad del desarrollo teórico y conceptual se basa estrictamente en el contenido expuesto en el capítulo "Generación de señal" del texto de referencia **"Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Cuarta edición"** de Wayne

Tomasi, asegurando con ello la máxima fidelidad terminológica y la precisión técnica requeridas.

El análisis se inicia con la definición formal de oscilación y la clasificación de los osciladores. Se procede a una investigación detallada del **proceso regenerativo** en sistemas retroalimentados, un mecanismo indispensable para la autosostenibilidad de las oscilaciones. En este contexto, se enunciarán y describirán los cuatro requisitos sistémicos para la operación de un oscilador retroalimentado, a saber: la existencia de una etapa de **amplificación** con ganancia suficiente, la implementación de una red de **retroalimentación positiva**, la inclusión de componentes **selectivos en frecuencia** para determinar la frecuencia de operación (f_0), y la provisión de una **fuentes de alimentación** de corriente continua.

Posteriormente, se realizará un estudio de los osciladores más relevantes. Se analizarán los **osciladores de relajación RC**, como el de puente de Wien, detallando la función de transferencia de su red de adelanto-retraso. Se

examinarán los **osciladores sintonizados LC**, incluyendo las configuraciones **Hartley** y **Colpitts**, y se describirá su funcionamiento basado en el intercambio de energía en un circuito tanque resonante. Se abordarán con especial interés los **osciladores piezoeléctricos**, que emplean resonadores de cristal de cuarzo para alcanzar un factor de calidad (Q) y una estabilidad de frecuencia superiores en varios órdenes de magnitud a las de los circuitos LC. Finalmente, se presentarán las implementaciones modernas basadas en **circuitos integrados de alta escala (LSI)**, como los osciladores controlados por voltaje (VCO) y los generadores de funciones monolíticos.

Este informe pretende, por tanto, establecer una base de conocimiento sólida y técnicamente precisa sobre la síntesis de señales, un área de estudio esencial para el diseño y la implementación de sistemas electrónicos avanzados.

Consignas Trabajo Práctico Nº2: Generación de señales.

2-1. Defina oscilar y oscilador.

2-2. Describa los siguientes términos:
autosostenido, repetitivo, funcionamiento libre y
con disparo.

2-3. Describa el proceso regenerativo necesario
para que se produzcan las oscilaciones
autosostenidas.

2-4. Escriba y describa los cuatro requisitos para
que trabaje un oscilador con retroalimentación.

2-5. ¿Qué quieren decir los términos
retroalimentación positiva y negativa?

2-6. Defina la ganancia de lazo cerrado y de lazo
abierto.

2-7. Escriba las cuatro configuraciones más
comunes de oscilador.

2-8. Describa el funcionamiento de un oscilador
de puente de Wien.

2-9. Describa la acción de oscilador en un circuito tanque LC.

2-10. ¿Qué quiere decir oscilación amortiguada? ¿Qué la causa?

2-11. Describa el funcionamiento de un oscilador de Hartley y el de un oscilador de Colpitts.

2-16. Describa cómo funciona un oscilador de cristal de sobretonos.

2-19. ¿Qué es un cristal con coeficiente cero?

2-20. Haga un esquema del circuito eléctrico equivalente de un cristal, y describa los diversos componentes y sus contrapartes mecánicas.

2-24. ¿Cuál es la principal ventaja de los osciladores de cristal en comparación con los de circuito tanque LC?

Respuestas.

2-1. Oscilar es el acto de fluctuar, vibrar o cambiar continuamente entre dos estados o condiciones definidas. Al proceso se le llama oscilación, y un oscilador es el dispositivo que da origen a este fenómeno, generando como resultado una forma de onda que se repite.

Un oscilador es un circuito diseñado para producir oscilaciones eléctricas. Específicamente, esto significa que genera una forma de onda en la que el voltaje o la corriente cambian de manera periódica y predecible. Esta capacidad para crear señales repetitivas es fundamental en las comunicaciones electrónicas, sirviendo de base para aplicaciones tan importantes como las fuentes de portadora de alta frecuencia, las fuentes piloto, los relojes de sistemas digitales y los circuitos de sincronización.

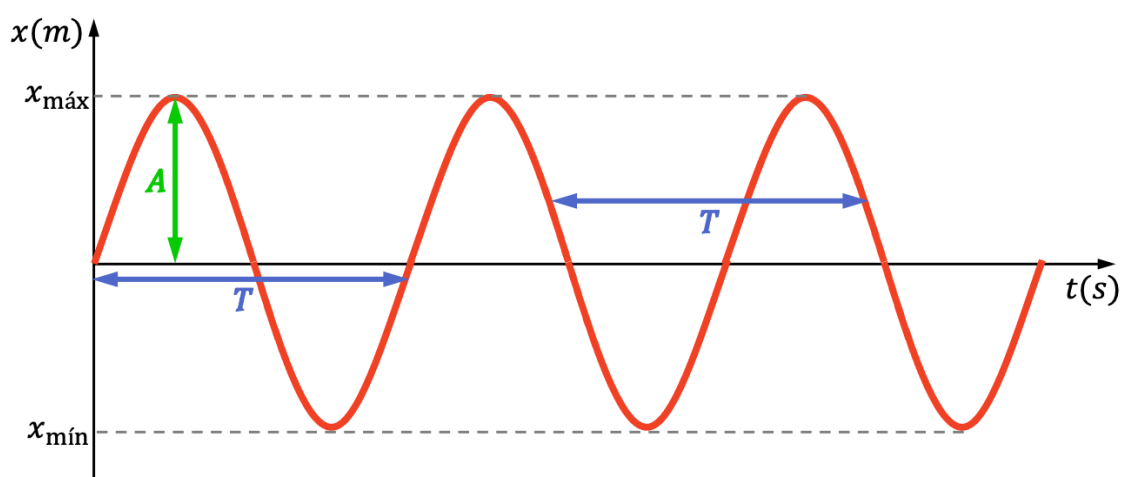


Figura 1. Ejemplo de oscilación senoidal básica, generada por un oscilador.

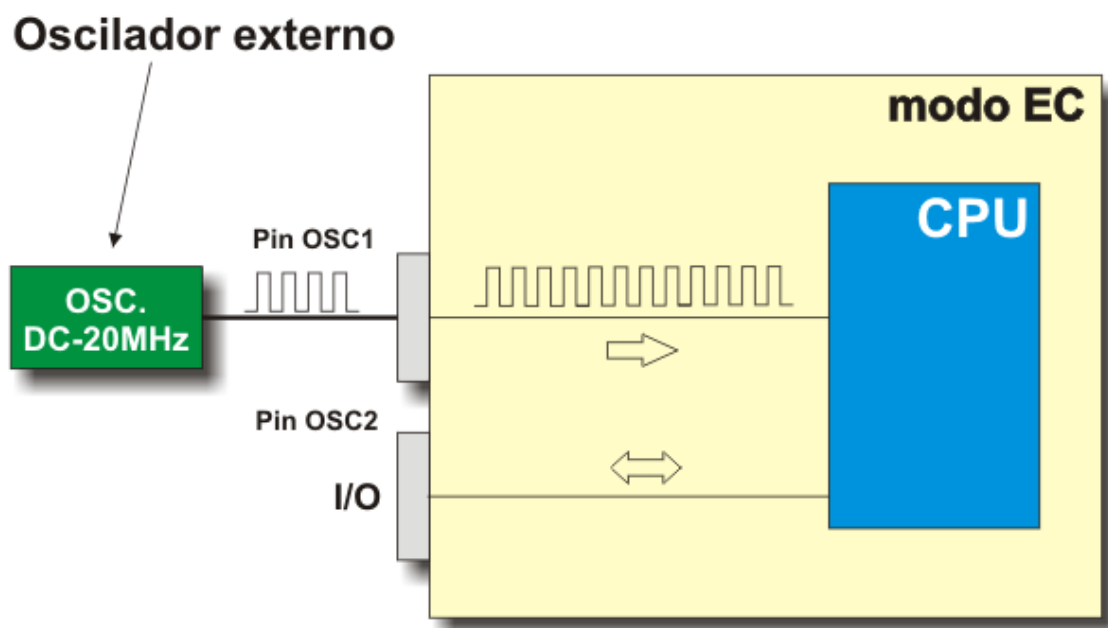


Figura 2. Ejemplo de circuito que utiliza un oscilador, para, por ejemplo, un reloj.

2-2. A continuación, los siguientes términos son descriptos:

Autosostenido: Este término se aplica a un oscilador en el cual los cambios en la forma de onda son continuos y repetitivos, sucediendo periódicamente sin necesidad de una señal de entrada externa. Es decir, una vez encendido, se mantiene a sí mismo.

Repetitivo: Es una característica fundamental de la forma de onda generada por un oscilador. Significa que la forma de onda (sea senoidal, cuadrada, etc.) se repite a intervalos periódicos.

Funcionamiento libre: “Oscilador de funcionamiento libre” es un sinónimo para un oscilador autosostenido, al igual que “oscilador autónomo”.

TRABAJO PRÁCTICO Nº2

Oliverio de los Ríos

Con disparo: Este término describe a los osciladores que no son autosostenidos. Requieren una señal externa de entrada, llamada disparador, para poder producir un cambio en la forma de onda de salida. A estos también se les denomina osciladores con disparo de inicio u osciladores monoestables.

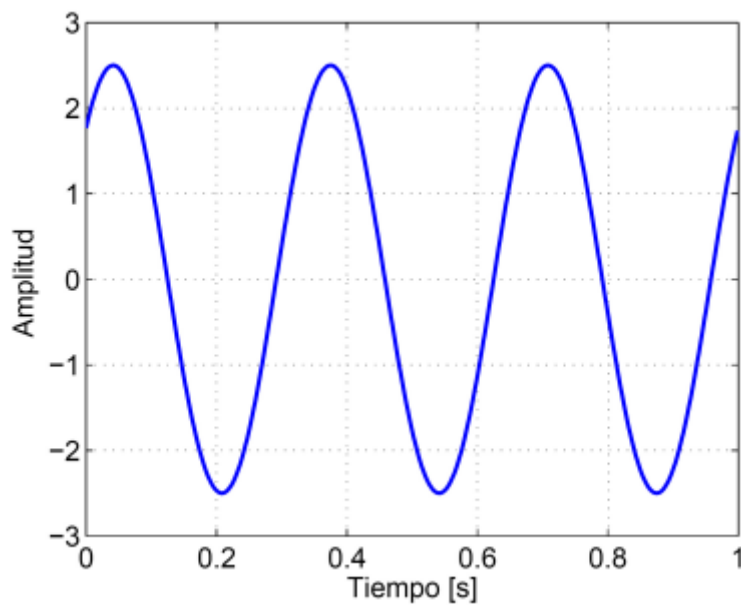


Figura 3. Oscilación resultante de un oscilador autosostenido ideal.

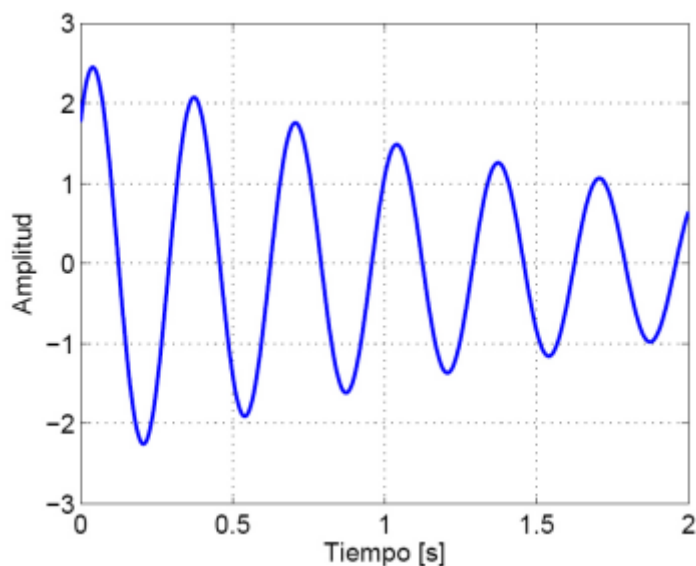


Figura 4. Oscilación amortiguada resultante de un oscilador no autosostenido.

2-3. Describa el proceso regenerativo necesario para que se produzcan las oscilaciones autosostenidas.

El proceso regenerativo es el mecanismo fundamental de un oscilador retroalimentado. Este proceso empieza una vez que el circuito se enciende, al oscilador generar una señal de salida de corriente alterna (ca). Luego, una pequeña parte de la energía de esta señal de salida se regresa a la entrada a través de un lazo de retroalimentación. Esta señal retroalimentada es amplificada por un dispositivo activo en el circuito y la señal, ahora amplificada, aparece nuevamente en la salida, reforzando la señal original.

Este ciclo se repite continuamente, produciéndose así un proceso regenerativo en el cual la salida depende de la

entrada y, a su vez, la entrada depende de la salida. Este ciclo sostenido es lo que produce las oscilaciones autosostenidas.

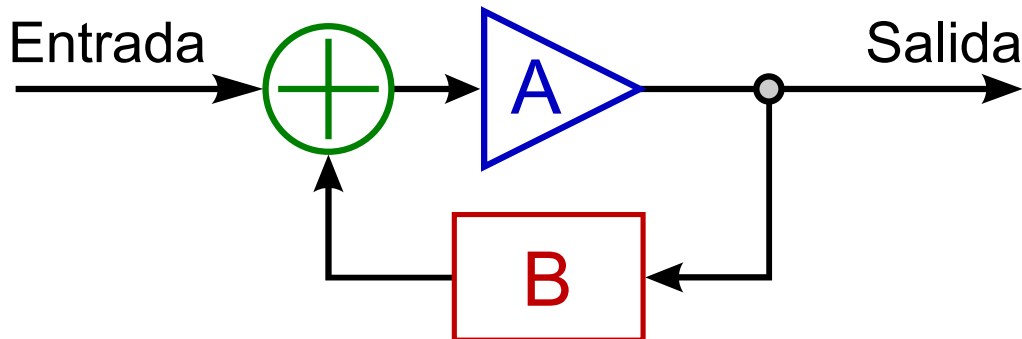


Figura 5. Circuito de ejemplo de un circuito retroalimentado con proceso regenerativo.

2-4. Requisitos para el funcionamiento de un oscilador con retroalimentación.

Para que un circuito oscilador con retroalimentación pueda operar y producir oscilaciones eléctricas autosostenidas, debe cumplir con cuatro requisitos fundamentales:

1. **Amplificación:** El circuito debe incorporar al menos un dispositivo activo capaz de proporcionar amplificación de voltaje. Esta ganancia es necesaria para compensar las pérdidas de energía que ocurren dentro del circuito y en el lazo de retroalimentación.
2. **Retroalimentación Positiva:** Debe existir una trayectoria completa que permita que una parte de la señal de salida regrese a la entrada. Esta señal de retroalimentación debe ser regenerativa, lo que significa

TRABAJO PRÁCTICO Nº2

Oliverio de los Ríos

que debe tener la fase y la amplitud correctas para ayudar al proceso de oscilación. Si la fase es incorrecta o la amplitud es insuficiente, las oscilaciones cesarán.

3. **Componentes que determinan la frecuencia:** El circuito debe incluir componentes cuya función sea establecer la frecuencia de operación. Estos elementos pueden ser resistores, capacitores, inductores o cristales.
4. **Fuente de poder:** El oscilador requiere una fuente de energía eléctrica, que por lo general es una fuente de voltaje de corriente continua (cd).



Figura 6. Oscilador de cuarzo de 18,432MHz.

2-5. Definición de retroalimentación positiva y negativa.

Los términos retroalimentación positiva y negativa se refieren a la naturaleza de la señal que se reintroduce desde la salida hacia la entrada de un circuito.

- **Retroalimentación positiva (regenerativa):** Es una señal de retroalimentación cuya fase ayuda al proceso de oscilación. Al ser regenerativa, esta señal compensa las pérdidas del circuito y permite que la oscilación se mantenga de forma continua. Es uno de los requisitos para el funcionamiento de un oscilador retroalimentado.
- **Retroalimentación negativa (degenerativa):** Es una señal de retroalimentación que inhibe la producción de oscilaciones. Su fase se opone a la señal original del circuito.

Si bien se denominan retroalimentaciones “negativa” y “positiva”, esto simplemente indica si son beneficiosas para la fase en el proceso de oscilación, y de ninguna manera se relacionan con la polaridad positiva (+) o negativa (-).

2-6. Definición de ganancia de lazo cerrado y de lazo abierto.

En el análisis de circuitos con retroalimentación, como los osciladores, se distinguen dos tipos de ganancia:

Ganancia de Voltaje de Lazo Abierto (A_{OL}): Es la ganancia de voltaje propia del amplificador del circuito, medida cuando la trayectoria de retroalimentación se encuentra abierta. En otras palabras, representa la capacidad de amplificación del componente activo antes de que se aplique la retroalimentación.

Ganancia de Voltaje de Lazo Cerrado (A_{CL}): Es la ganancia general de voltaje que exhibe el circuito total, medida con el lazo de retroalimentación cerrado y en pleno funcionamiento. Esta ganancia representa el rendimiento del sistema completo, y su valor es siempre menor que el de la ganancia de lazo abierto.

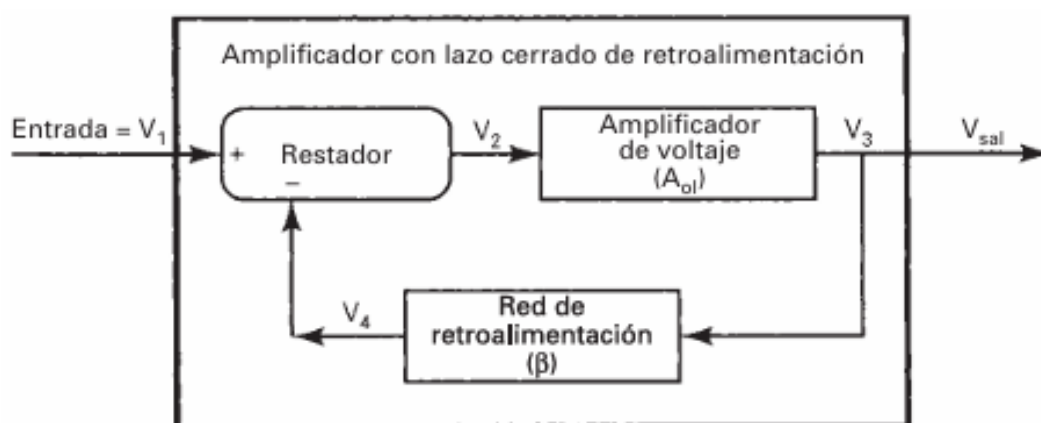


Figura 7. Circuito a modo de ejemplo de un amplificador retroalimentado.

2-7. Configuraciones Comunes de Oscilador

A continuación, se describen las cuatro configuraciones de oscilador más comunes identificadas en el material de estudio:

1. Redes RC de Desplazamiento de Fase:

Estos osciladores utilizan una red compuesta por resistores (R) y capacitores (C) para producir el desplazamiento de fase necesario para la retroalimentación regenerativa. La red está diseñada para que, a una frecuencia específica, la señal retroalimentada tenga un desfase total de 360° (o 0°), cumpliendo así una de las condiciones para la oscilación sostenida. Un ejemplo notable de este tipo es el oscilador de puente de Wien.

2. Circuitos Tanque LC:

Esta configuración emplea un circuito resonante, comúnmente conocido como "circuito tanque", compuesto por un inductor (L) y un capacitor (C). La frecuencia de oscilación es determinada por la frecuencia de resonancia de este circuito tanque, donde la energía se intercambia continuamente entre el campo magnético del inductor y el campo eléctrico del capacitor. Los osciladores Hartley y Colpitts son dos implementaciones clásicas de esta configuración.

3. Cristales de Cuarzo:

En esta configuración, un cristal de cuarzo, que funciona como un resonador piezoeléctrico de muy alta precisión, se utiliza como el componente que determina la frecuencia. El cristal reemplaza funcionalmente al

circuito tanque LC, pero ofrece una estabilidad de frecuencia muy superior debido a su altísimo factor de calidad (Q). Esta característica los hace indispensables en aplicaciones que requieren una frecuencia exacta y estable.

4. Chips de Circuito Integrado:

Estos osciladores representan soluciones modernas donde la mayor parte o la totalidad de los componentes del circuito están fabricados en un único chip de silicio (integración a gran escala o LSI). Estas configuraciones ofrecen una excelente estabilidad de frecuencia, un amplio margen de sintonía y una gran facilidad de uso. Incluyen generadores de funciones, osciladores controlados por voltaje (VCO) y otros circuitos monolíticos especializados.

2-8. Describa el funcionamiento de un oscilador de puente de Wien.

El oscilador de puente de Wien es un circuito oscilador RC no sintonizado que se caracteriza por su notable estabilidad, su facilidad de sintonización y su aplicación en la generación de señales de baja frecuencia, típicamente en el rango de 5 Hz a 1 MHz. Su principio de funcionamiento se basa en el uso de retroalimentación tanto positiva como negativa para establecer y mantener una oscilación a una frecuencia específica.

TRABAJO PRÁCTICO Nº2

Oliverio de los Ríos

El circuito, como se muestra en la Figura 8, está compuesto por dos secciones principales que forman un puente de Wien:

1. Red de Adelanto-Retraso (Retroalimentación

Positiva): Esta red, ilustrada en la Figura 9, es el elemento selectivo en frecuencia del oscilador. A una frecuencia de oscilación específica, f_0 , donde la reactancia capacitiva es igual a la resistencia ($X_C = R$), la red presenta dos propiedades fundamentales:

- Introduce un desplazamiento de fase total de exactamente 0° .
- Atenúa la señal de entrada, de modo que el voltaje de salida es un tercio del voltaje de entrada. Es decir, su función de transferencia (β) es $1/3$.
Esta red proporciona la retroalimentación positiva o regenerativa al circuito.

2. Divisor Resistivo de Voltaje (Retroalimentación

Negativa): Esta sección proporciona una retroalimentación negativa o degenerativa que compensa la retroalimentación positiva. La relación de los resistores en este divisor se establece en 2:1, lo que fija la ganancia de voltaje del amplificador no inversor (A_1) en 3.

Principio de Funcionamiento:

El funcionamiento del oscilador se basa en el cumplimiento del criterio de Barkhausen a una única frecuencia, f_0 .

- La señal a la salida del amplificador (A_1) pasa a través de la red de adelanto-retraso. A la frecuencia f_0 , esta red

TRABAJO PRÁCTICO Nº2

Oliverio de los Ríos

introduce un desfase de 0° y reduce la amplitud de la señal en un factor de 3 ($\beta = 1/3$).

- Esta señal atenuada se aplica a la entrada no inversora del amplificador, el cual está configurado para tener una ganancia de voltaje de 3.
- Por consiguiente, la ganancia de voltaje total en el lazo de retroalimentación a la frecuencia f_0 es el producto de la ganancia del amplificador y la atenuación de la red: $3 \times (1/3) = 1$.

Con una ganancia de lazo de 1 y un desplazamiento de fase de 0° , se cumplen las condiciones para producir y sostener oscilaciones.

Proceso de Oscilación:

1. **Encendido Inicial:** Al encender el circuito, el ruido eléctrico (que contiene un amplio espectro de frecuencias) presente en la salida (V_{SAL}) se retroalimenta a través de la red de adelanto-retraso.
2. **Selección de Frecuencia:** La red de adelanto-retraso actúa como un filtro, permitiendo que solo la componente del ruido correspondiente a la frecuencia f_0 pase con un desplazamiento de fase de 0° y con la relación de transferencia de $1/3$. Todas las demás frecuencias son atenuadas en mayor medida y con diferentes desfases.
3. **Sostenimiento:** En consecuencia, solo la frecuencia f_0 se retroalimenta en fase al amplificador. Al ser amplificada por un factor de 3, sufre una ganancia

TRABAJO PRÁCTICO Nº2

Oliverio de los Ríos

de lazo neta de 1. Esto permite que la señal se regenere en cada ciclo, produciendo oscilaciones autosostenidas a la frecuencia f_0 .

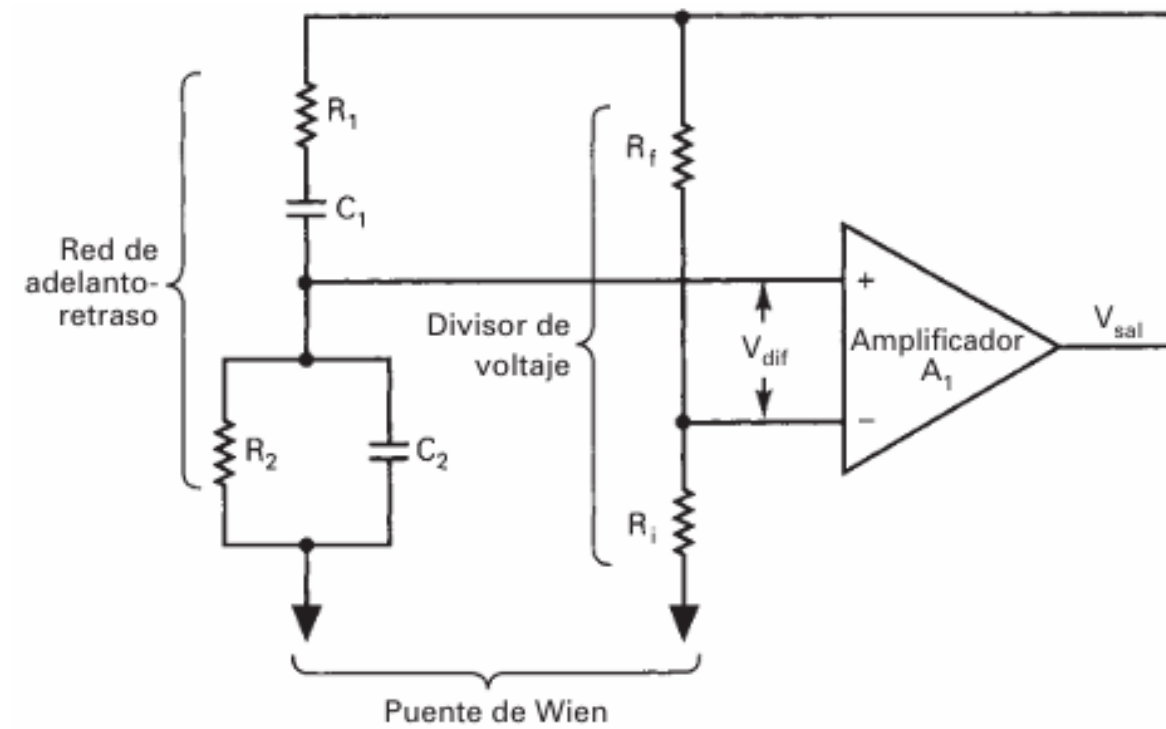


Figura 8. Oscilador de puente de Wien.

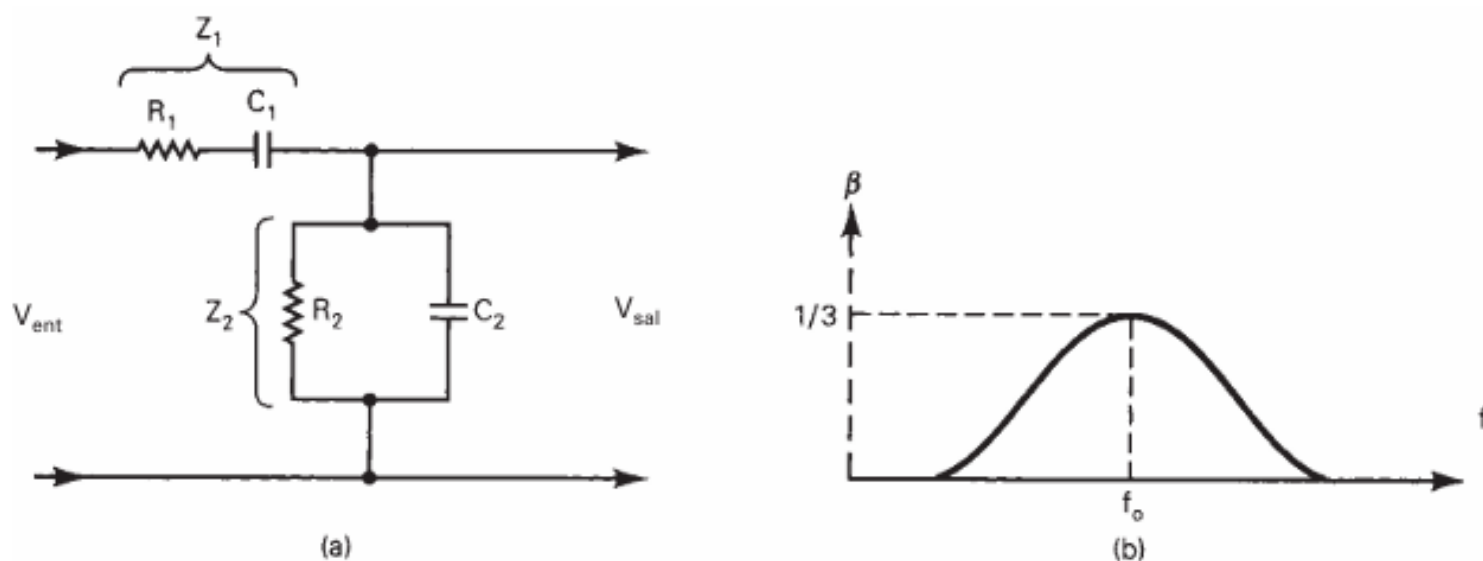


Figura 9. Red de adelanto-retraso. Circuito (a) y curva de transferencia (b).

2-9. Describa la acción de oscilador en un circuito tanque LC.

La acción de un oscilador en un circuito tanque LC es el proceso fundamental que genera oscilaciones eléctricas a una frecuencia determinada. Dicho proceso se basa en el intercambio de energía entre un inductor (L) y un capacitor (C), componentes que conforman el circuito tanque.

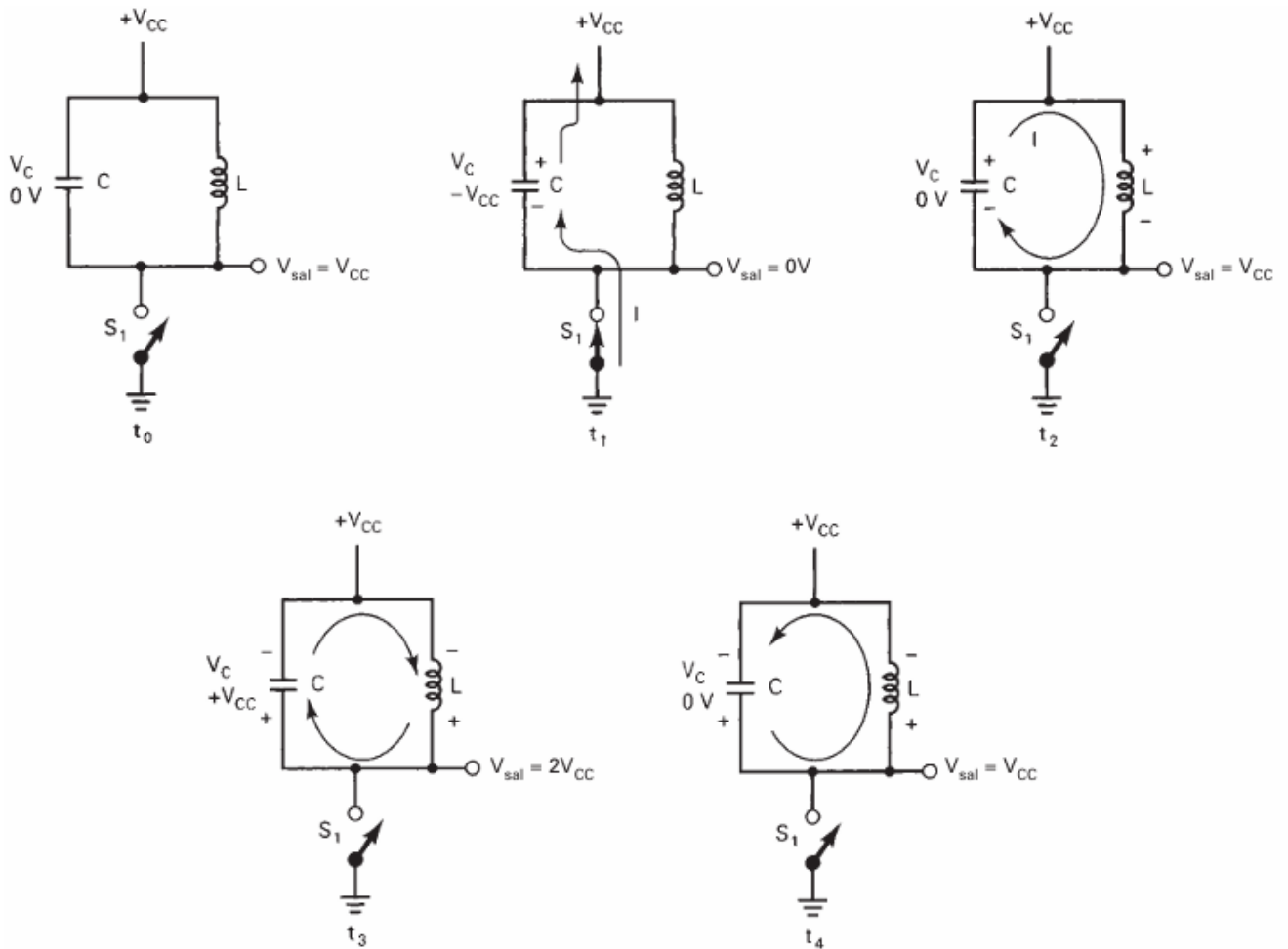
El funcionamiento de esta acción se describe de la siguiente manera:

1. **Inicio del Proceso:** La acción comienza cuando se inyecta una corriente en el circuito (t_1), lo cual puede ser provocado por el ruido eléctrico inicial presente al momento de energizar el sistema. Esta energía inicial carga el capacitor del circuito tanque.

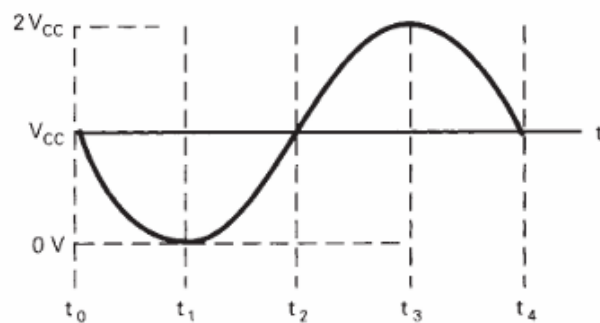
2. **Intercambio de Energía (Efecto de Volante):** Una vez que el capacitor posee una carga, se inicia un intercambio de energía entre este y el inductor. La energía almacenada en el campo eléctrico del capacitor se transfiere al inductor, que la almacena en su campo magnético. Posteriormente, el campo magnético del inductor colapsa y devuelve la energía al capacitor, cargándolo con la polaridad opuesta. Este intercambio de energía de ida y vuelta es continuo y se conoce como **efecto de volante**.
3. **Generación de la Onda de Salida:** Como resultado directo de este intercambio cíclico de energía, se produce un voltaje de salida oscilatorio y repetitivo, tal como se ilustra en la Figura 10.
4. **Frecuencia de Resonancia:** El circuito tanque solo oscila de manera eficiente a su frecuencia de resonancia natural. Esta frecuencia está determinada por los valores específicos de la inductancia (L) y la capacitancia (C) del circuito, y es esta la que establece la frecuencia de operación del oscilador.

TRABAJO PRÁCTICO Nº2

Oliverio de los Ríos



(a)



(b)

Figura 10. Circuito tanque LC, oscilación y efecto de volante (a), forma de onda de salida (b).

2-10. ¿Qué quiere decir oscilación amortiguada? ¿Qué la causa?

En el contexto de un oscilador retroalimentado, una oscilación amortiguada se refiere al fenómeno en el cual las oscilaciones generadas por el circuito no logran sostenerse en el tiempo. Es el resultado de un proceso regenerativo fallido, donde la amplitud de la forma de onda decae progresivamente hasta extinguirse.

La **causa** de una oscilación amortiguada, según se describe en el funcionamiento del oscilador de Hartley, es una cantidad de **energía de retroalimentación insuficiente**. Para que una oscilación sea autosostenida, la energía que se regresa desde la salida hacia la entrada del circuito debe ser la exacta para compensar las pérdidas del mismo. En resumidas cuentas, si la energía que se retroalimenta es menor a la requerida, las oscilaciones se amortiguan.

2-11. Funcionamiento de un oscilador de Hartley y de un oscilador de Colpitts.

Oscilador de Hartley

El oscilador de Hartley (esquema en la figura 11) es un circuito oscilador sintonizado que utiliza un circuito tanque LC para establecer su frecuencia de operación. Su funcionamiento se basa en un amplificador transistorizado (Q_1) que proporciona la ganancia necesaria y una red de retroalimentación regenerativa conformada por un inductor con derivación.

Principio de Funcionamiento:

- 1. Inicio de la oscilación:** Al momento del encendido, el ruido eléctrico presente en el circuito, que contiene una multitud de frecuencias, aparece en el colector del transistor Q_1 . Este ruido se acopla al circuito tanque a través del capacitor C_2 , proporcionando la energía inicial necesaria para cargar el capacitor del tanque, C_1 .
- 2. Acción del circuito tanque:** Una vez que C_1 adquiere una carga parcial, comienza el proceso de intercambio de energía entre el capacitor y el inductor del tanque (L_1). El circuito tanque solo oscila de manera eficiente a su frecuencia de resonancia.
- 3. Retroalimentación y amplificación:** Una porción del voltaje oscilatorio del circuito tanque, específicamente la caída de voltaje a través de la sección del inductor L_{1b} , se retroalimenta a la base del transistor Q_1 , donde es amplificada.

TRABAJO PRÁCTICO Nº2

Oliverio de los Ríos

4. **Desplazamiento de fase:** Para que la retroalimentación sea regenerativa, se requiere un desplazamiento de fase total de 360° en el lazo. El transistor Q_1 , en su configuración, proporciona un desfase de 180° entre la señal de base y la señal de colector. El inductor con derivación (L_1) actúa como un autotransformador, introduciendo un segundo desplazamiento de fase de 180° . La suma de ambos desfases ($180^\circ + 180^\circ$) resulta en los 360° necesarios.
5. **Oscilación sostenida:** Al cumplirse la condición de fase, la señal que regresa a la base del transistor está amplificada y en fase con la señal original, creando un proceso regenerativo que sostiene las oscilaciones de manera continua sin necesidad de una señal de entrada externa.

La cantidad de energía retroalimentada se determina por la relación de la inductancia L_{1b} con respecto a la inductancia total ($L_{1a} + L_{1b}$). Esta relación debe ser ajustada para que la ganancia de voltaje del lazo sea unitaria; si la energía es insuficiente, las oscilaciones se amortiguan, y si es excesiva, el transistor se satura.

Oscilador de Colpitts

El oscilador de Colpitts es funcionalmente muy parecido al oscilador de Hartley, siendo también un circuito sintonizado LC. La diferencia fundamental reside en la implementación de la red de retroalimentación: en lugar de utilizar una bobina con derivación, emplea un divisor de voltaje capacitivo.

Principio de Funcionamiento:

1. **Inicio de la oscilación:** De manera similar al Hartley, en el encendido inicial aparece ruido en el colector del transistor Q_1 . Este ruido suministra la energía inicial al circuito tanque, haciendo que comience a oscilar.
2. **Acción del circuito tanque y retroalimentación:** El circuito tanque está formado por un inductor L_1 y un divisor de voltaje capacitivo compuesto por C_{1a} y C_{1b} . Estos dos capacitores determinan la frecuencia de resonancia. La caída de voltaje a través del capacitor C_{1b} es la señal que se retroalimenta a la base del transistor Q_1 a través del capacitor de acoplamiento C_c .
3. **Desplazamiento de fase:** El transistor Q_1 proporciona un desfase de 180° entre su base y su colector. El divisor de voltaje capacitivo, por su configuración, es el responsable de introducir el segundo desplazamiento de fase de 180° .
4. **Oscilación sostenida:** El desplazamiento de fase total en el lazo es de 360° , lo que hace que la señal de retroalimentación sea regenerativa. Este proceso sostenido asegura que el circuito continúe oscilando a su frecuencia de resonancia.

La amplitud de la señal retroalimentada es determinada por la relación de las capacitancias de C_{1a} y C_{1b} . Esta relación se ajusta para proveer la energía exacta que garantice una oscilación estable y continua.

TRABAJO PRÁCTICO Nº2

Oliverio de los Ríos

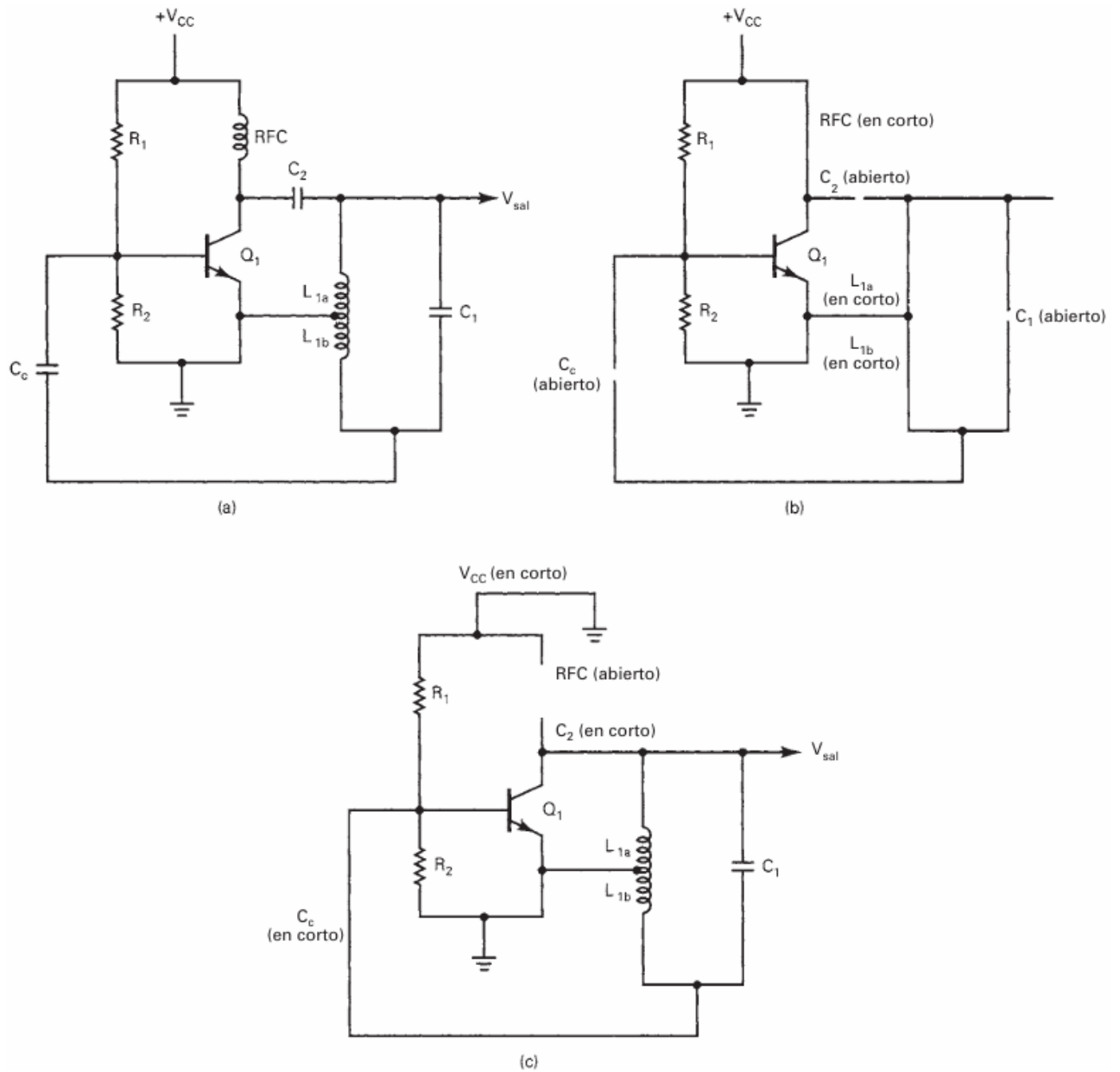


Figura 11. Oscilador de Hartley, circuito (a), circuito de corriente continua (b), circuito de corriente alterna (c).

TRABAJO PRÁCTICO Nº2

Oliverio de los Ríos

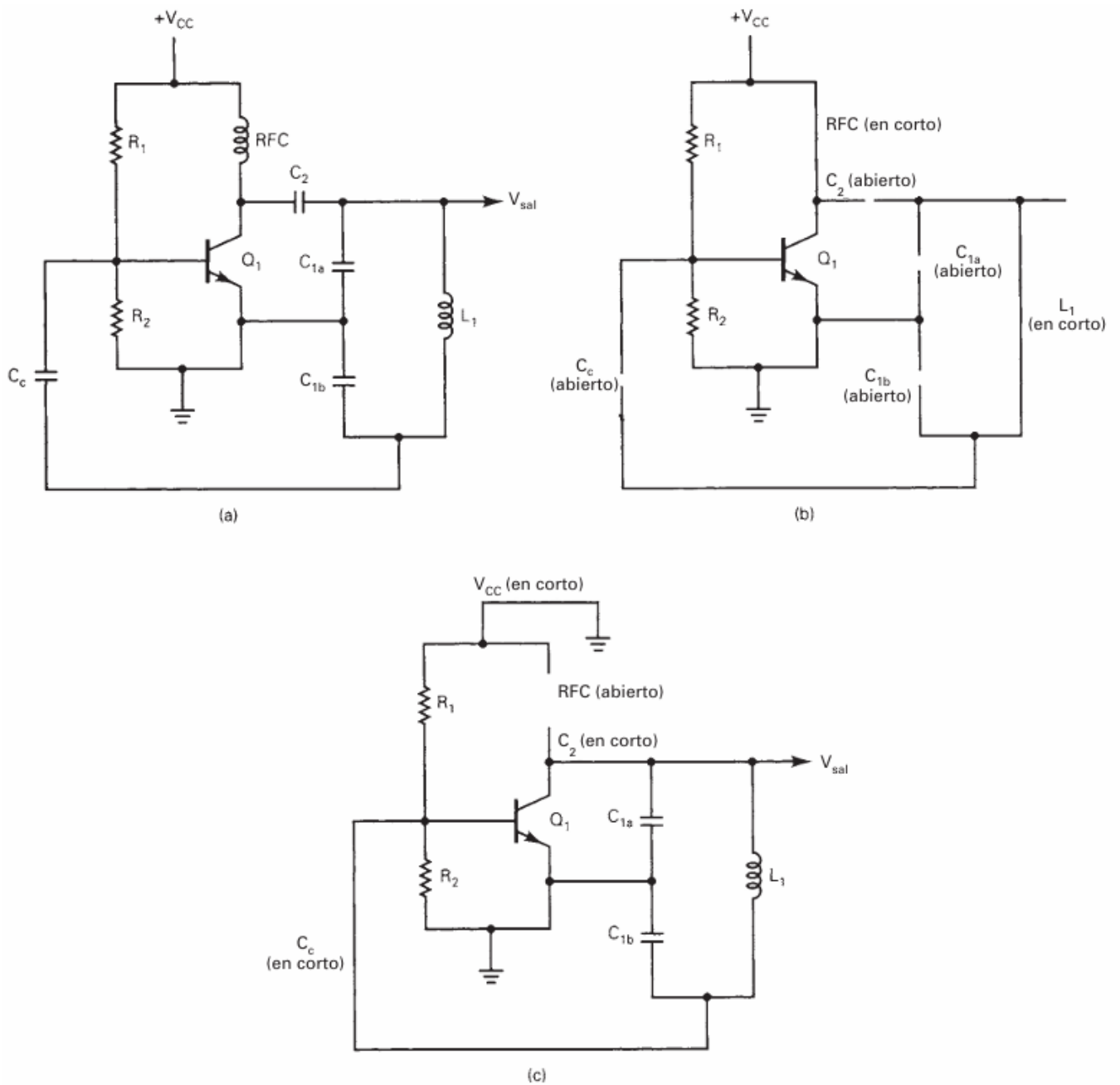


Figura 12. Oscilador de Colpitts, circuito (a), circuito en corriente continua (b), circuito en corriente alterna (c).

2-16. Funcionamiento de un oscilador de cristal de sobretonos.

Un oscilador de cristal en modo de sobretonos funciona como una solución para superar las limitaciones físicas de los osciladores de cristal que operan en modo fundamental. Para aumentar la frecuencia de vibración de un cristal, su oblea de cuarzo debe hacerse progresivamente más delgada. Esto presenta un límite físico práctico, ya que una oblea muy delgada se vuelve excepcionalmente frágil y difícil de manufacturar, estableciendo un límite de frecuencia de aproximadamente 30 MHz para el modo fundamental.

Para alcanzar frecuencias más altas, es posible hacer trabajar el cristal en modo de sobretonos o armónicas. En esta configuración, el circuito oscilador no se sintoniza a la frecuencia fundamental del cristal, sino que se sintoniza para operar en una de sus vibraciones armónicamente relacionadas, específicamente la tercera, quinta, séptima o hasta la novena armónica de la frecuencia fundamental.

Es importante señalar que estas armónicas se denominan **sobretonos**, ya que no son consideradas verdaderas armónicas en este contexto. Los fabricantes tienen la capacidad de procesar los cristales para que un sobretono específico se refuerce por encima de los demás.

El resultado de emplear el modo de sobretono es un aumento significativo del límite de frecuencia útil para los osciladores de cristal, extendiéndolo hasta aproximadamente 200 MHz.

2-19. Concepto de cristal con coeficiente cero.

Un cristal con coeficiente cero, también conocido como cristal cortado GT, es un tipo de cristal cuyo coeficiente de temperatura se encuentra en el rango de -1 a $+1$ Hz/MHz/°C.

Este componente es considerado casi perfecto en términos de su estabilidad frente a la temperatura, ya que mantiene su coeficiente cero en un amplio rango térmico que abarca desde la congelación hasta la ebullición. No obstante, su aplicación práctica tiene una limitación significativa: solo es útil en circuitos que operan a frecuencias menores que algunos cientos de kilohertz.

2-20. Esquema del circuito eléctrico equivalente de un cristal, sus diversos componentes y contrapartes mecánicas.

El circuito eléctrico que modela el comportamiento de un cristal, ilustrado en la Figura 8, se compone de dos ramas conectadas en paralelo:

- **Rama en Serie:** Una rama contiene tres componentes conectados en serie: un inductor (L), un capacitor (C_1) y un resistor (R).
- **Rama en Paralelo:** La segunda rama, conectada en paralelo a la rama serie, contiene un único capacitor (C_2).

Descripción de Componentes y sus Contrapartes Mecánicas:

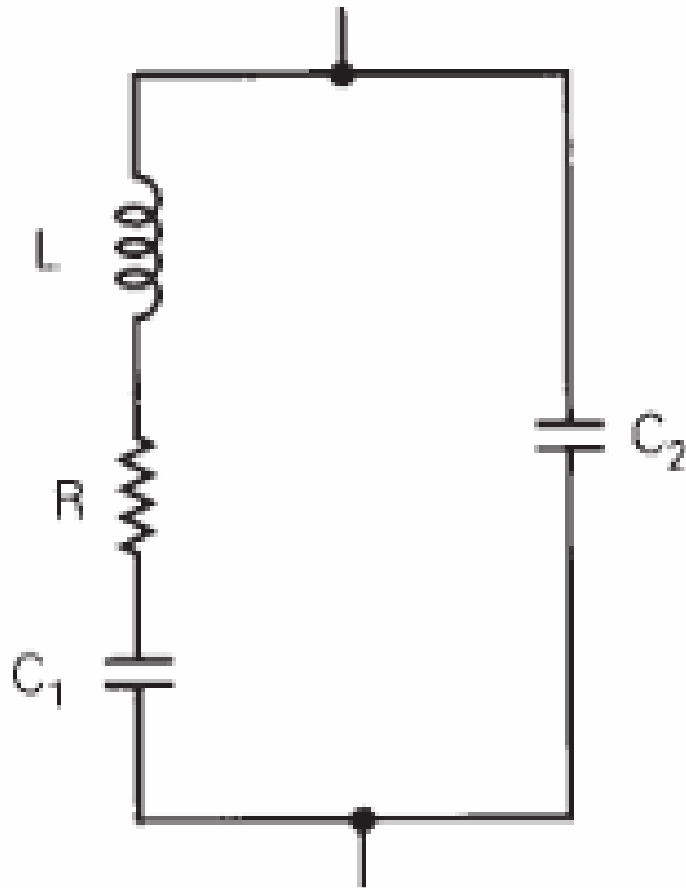
TRABAJO PRÁCTICO Nº2

Oliverio de los Ríos

Cada componente eléctrico en el circuito equivalente representa una propiedad mecánica específica del cristal físico. A continuación, se detalla esta correspondencia:

- **L (Inductor):** Este componente equivale a la **masa del cristal en vibración**.
- **C₁ (Capacitor en serie):** Este capacitor equivale a la **docilidad mecánica del cristal**, propiedad también llamada resiliencia o elasticidad.
- **R (Resistor):** Este resistor representa la **pérdida por fricción mecánica** del cristal.
- **C₂ (Capacitor en paralelo):** Este componente es la **capacitancia real** formada entre los electrodos metálicos aplicados al cristal, donde el propio cristal funciona como el material dieléctrico.

Figura 13. Circuito eléctrico equivalente del cristal.



2-24. Principal ventaja de los osciladores de cristal en comparación con los de circuito tanque LC.

La principal ventaja de los osciladores de cristal en comparación con los osciladores de circuito tanque LC es su **gran estabilidad de frecuencia**.

Esta superioridad en la estabilidad se debe fundamentalmente al factor de calidad (Q) del cristal, que es intrínsecamente muy superior al de un circuito LC convencional. Mientras que los circuitos tanque LC, que

TRABAJO PRÁCTICO Nº2

Oliverio de los Ríos

utilizan inductores discretos, presentan factores Q en el rango de 100 a 1000, los cristales exhiben factores Q considerablemente más altos, con valores característicos que van desde 10,000 hasta 100,000 o incluso más.

Es este factor Q tan elevado el que proporciona la gran estabilidad que distingue a los osciladores de cristal, haciéndolos la opción preferida para aplicaciones que requieren una frecuencia precisa y constante.

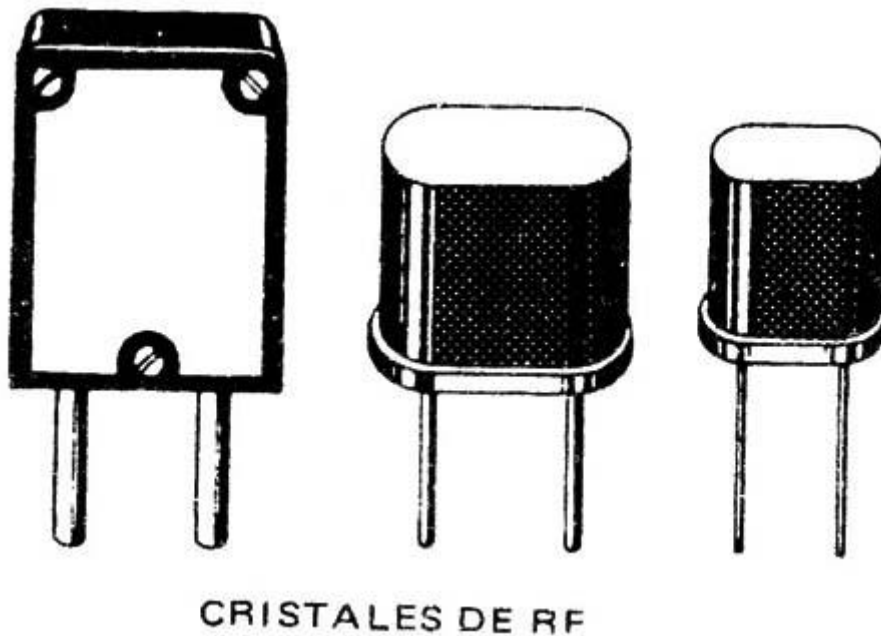


Figura 14. Ilustración de osciladores de cristal.

Conclusión:

A través del análisis sistemático y la descripción técnica de los conceptos presentados en el texto de referencia "**Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Cuarta edición**" de Wayne Tomasi, se ha logrado una comprensión integral de los principios fundamentales que rigen la generación de señales en circuitos electrónicos.

Se ha establecido que la **oscilación autosostenida** en sistemas retroalimentados es el resultado de un proceso regenerativo condicionado por el cumplimiento riguroso del criterio de Barkhausen. Este criterio exige una ganancia de lazo unitaria y un desplazamiento de fase neto de 360° (o un múltiplo entero), condiciones que solo pueden ser satisfechas mediante la correcta interconexión de una etapa de amplificación, una red de retroalimentación positiva y componentes selectivos en frecuencia.

El estudio de los diversos osciladores ha revelado una clara correlación entre la arquitectura del circuito y sus parámetros de rendimiento, como la estabilidad de frecuencia,

el rango de operación y la pureza espectral. Se ha verificado que los **osciladores RC**, como el de puente de Wien, son soluciones eficaces para aplicaciones de baja frecuencia donde la simplicidad y la sintonización son prioritarias.

Por su parte, los **osciladores LC** (Hartley y Colpitts) demuestran la viabilidad de los circuitos tanque resonantes para operar a frecuencias más elevadas, aunque su estabilidad está intrínsecamente limitada por el factor de calidad (Q) de sus componentes discretos.

La investigación ha destacado de manera concluyente la superioridad de los **osciladores de cristal de cuarzo** en aplicaciones que demandan una alta estabilidad y precisión frecuencial. Su factor de calidad, superior en varios órdenes de magnitud al de los circuitos LC, los posiciona como la tecnología de referencia indispensable en sistemas de comunicaciones, sincronización y metrología. Finalmente, se ha constatado que la **integración a gran escala (LSI)** ha revolucionado el campo, permitiendo la implementación de osciladores complejos y de

alto rendimiento en soluciones monolíticas compactas, fiables y de bajo costo.

En síntesis, este trabajo práctico ha permitido consolidar el conocimiento teórico sobre el diseño y funcionamiento de los circuitos osciladores, desde sus principios más básicos hasta sus implementaciones más avanzadas. Dicha comprensión es esencial para el ingeniero electrónico, ya que constituye la base para el desarrollo y la optimización de cualquier sistema que dependa de una referencia de tiempo o frecuencia precisa y estable.