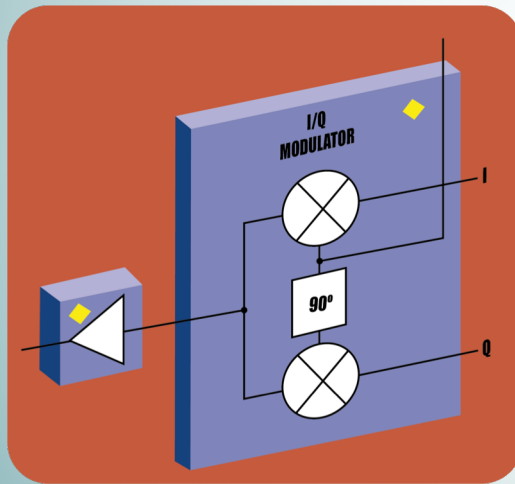


Electrónica de Radiofrecuencia

TEMA 2. OSCILADORES Y PLLS

2.1 OSCILADORES



Juan Pablo Pascual Gutiérrez

Enrique Villa Benito

Luisa María de la Fuente Rodríguez

José Ángel García García

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE COMUNICACIONES

Este material se publica bajo la siguiente licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



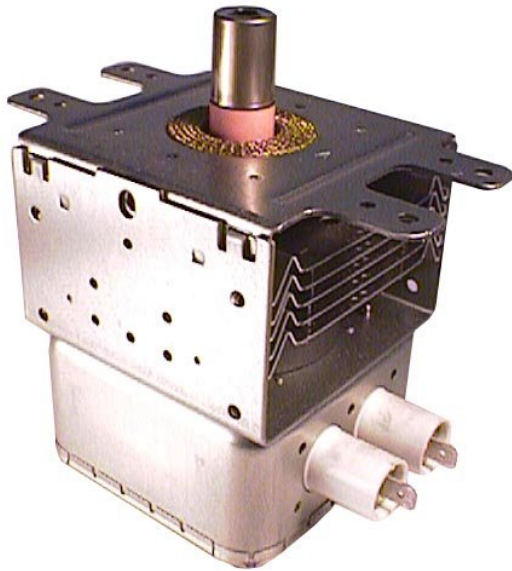
Osciladores

Contenidos:

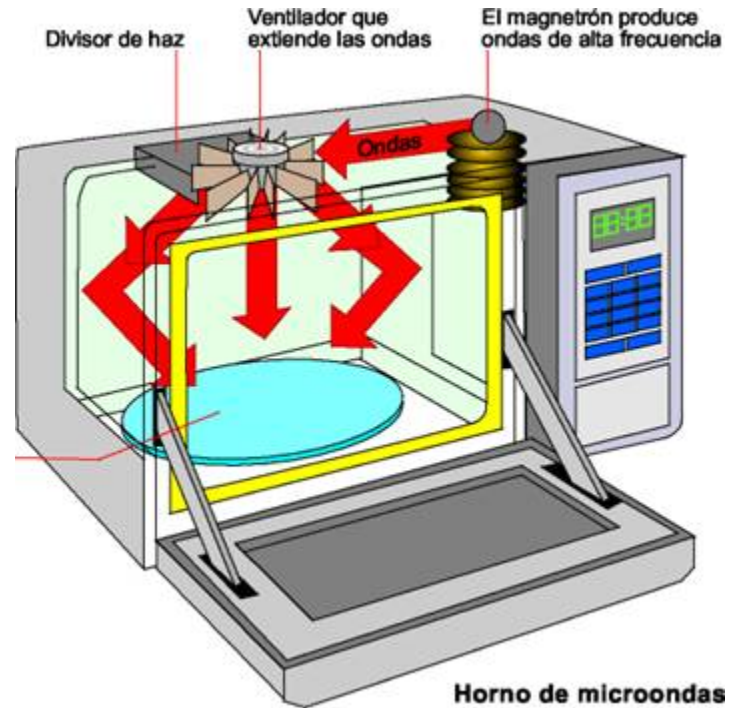
- Introducción: ejemplo, definición, tipos y condiciones matemáticas
- Ejemplo con diodos IMPATT
- Estabilidad de la oscilación
- Ejemplos con diodos GUN
- Osciladores a transistor. Criterio Barkhausen
- Resonadores → osciladores armónicos versus de relajación
- Topologías y ejemplos (inc. MMIC)
- Herramientas de simulación de osciladores
- Ejercicio propuesto
- Osciladores controlados por tensión (VCOs)
- Caracterización de osciladores. Ruido de Fase. Modelo de Lesson

Osciladores

- Magnetrón: el oscilador de microondas que nos calienta el desayuno todos los días



Magnetrón de horno microondas



Horno de microondas

Osciladores

MAGNETRÓN Para alta potencia, se utiliza un magnetrón como oscilador de microondas.

Formado por varias cavidades en un bloque sólido de cobre. Cada cavidad oscila a la misma frecuencia que las demás.

Incluye un ánodo, el cátodo, el acoplamiento de salida y también un potente imán. El bloque de la cavidad se coloca dentro de los polos del imán. Los electrones emitidos por el cátodo viajan en órbitas circulares complicadas y pueden regresar al cátodo. Las oscilaciones se establecen en las cavidades y un acoplamiento a una de las cavidades permite extraer la energía de radio a través de una alimentación coaxial conectada a una guía de ondas. Los magnetrones se utilizan como osciladores de alta potencia en los transmisores de radar y hornos microondas.

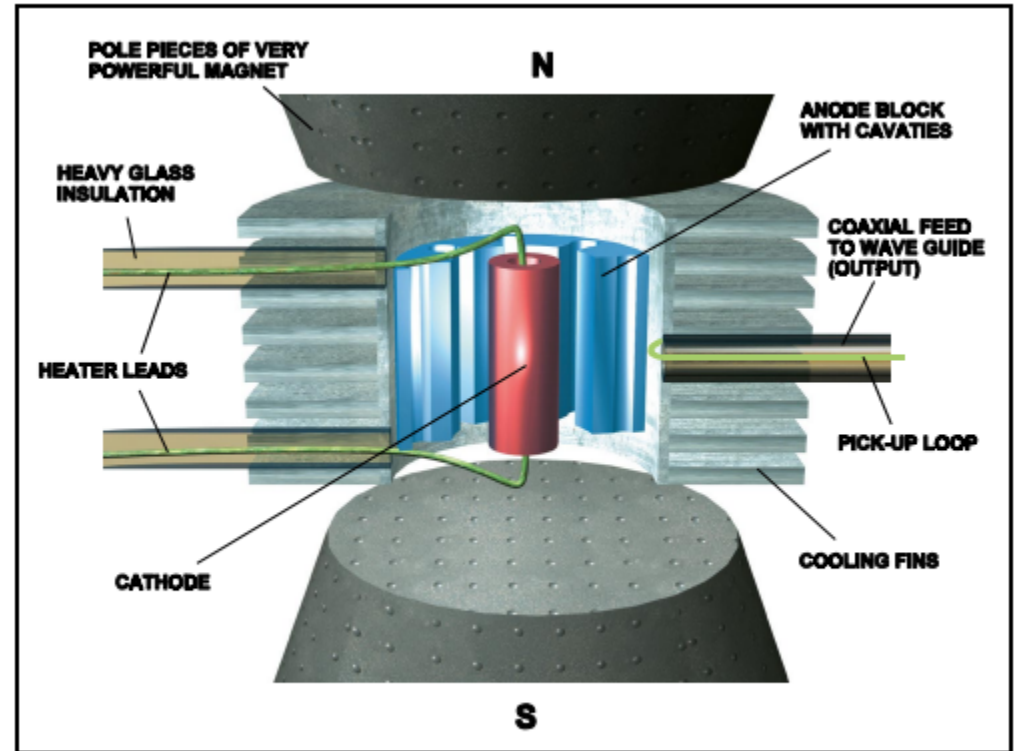


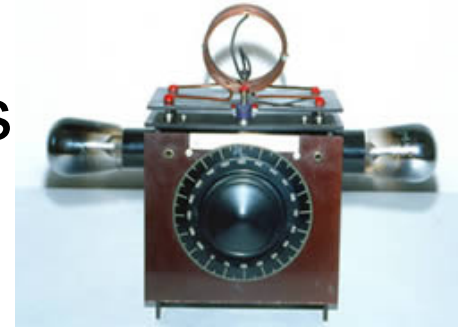
Figure 23.9 Cross-Section of a Typical Magnetron

Osciladores

- Los osciladores son las fuentes encargadas de proporcionar señal de RF y microondas a los sistemas.
- Los parámetros que los definen son:
 1. frecuencia de oscilación
 2. potencia suministrada
 3. estabilidad de frecuencia
 4. ruido de fase
 5. contenido armónico
- Para controlar la frecuencia se emplea habitualmente el control de la frecuencia por tensión (VCO) y las técnicas de síntesis mediante lazos de enganche en fase (PLL).

Osciladores

- Oscilador: elemento crítico en las cadenas de conversión de RF y Microondas
- Osciladores con magnetrones y válvulas

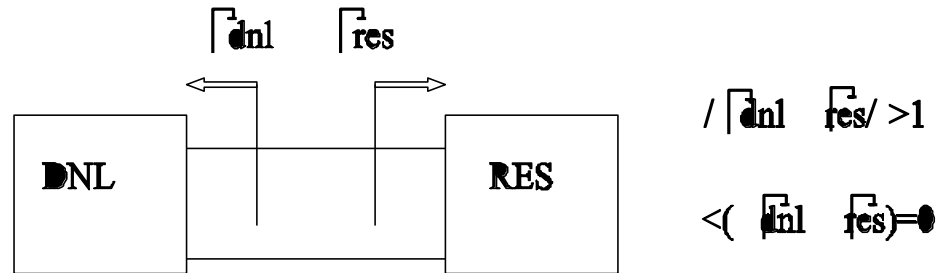


- Oscilador de estado sólido: la estructura más común de oscilador se basa en un dispositivo semiconductor (diodo ó transistor) encargado de proporcionar ganancia o resistencia <0 , insertado en un circuito pasivo que fija la frecuencia de resonancia.
- El consumo de DC del dispositivo se convierte en parte a potencia de RF ó microondas (eficiencia).

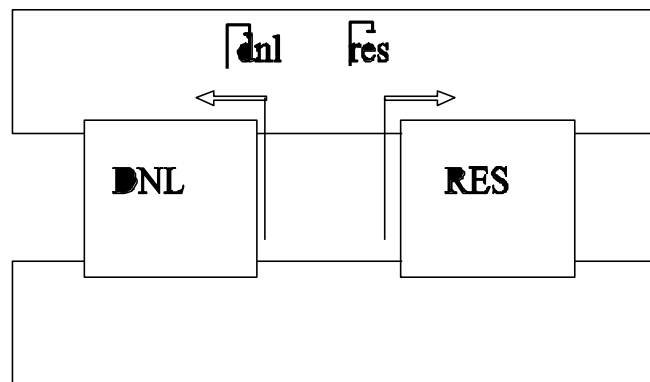
Osciladores

Dos enfoques de la oscilación:

- Resistencia negativa

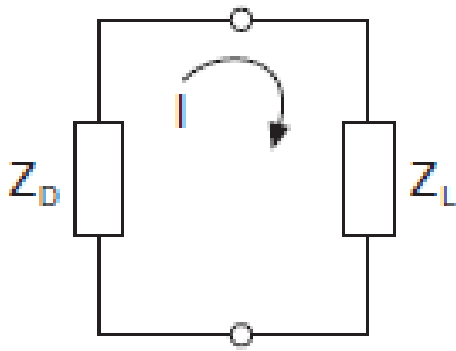
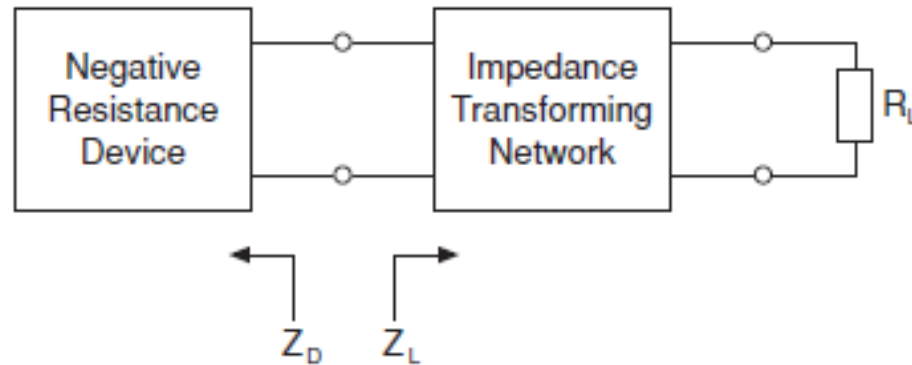


- Amplificador de ruido con realimentación positiva



El 1er tipo es apropiado a osciladores con diodos y ciertas topologías con transistor y el 2º a osciladores con transistor

Osciladores



Aplicando leyes Kirchhoff:

$$Z_D I = -Z_L I$$

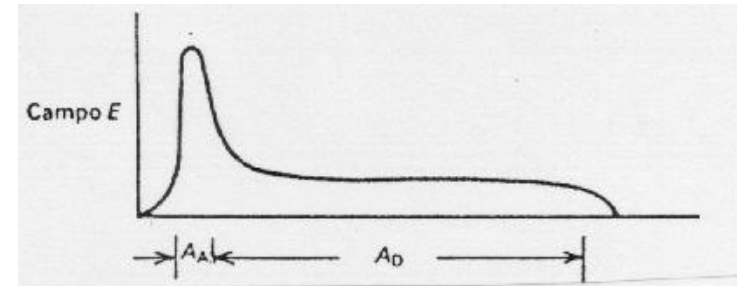
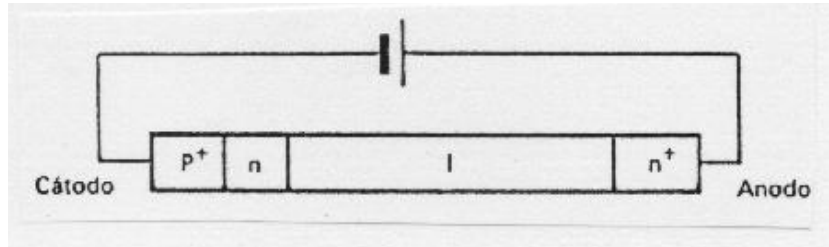
$$(Z_D + Z_L) I = 0$$

$$Z_D + Z_L = 0$$

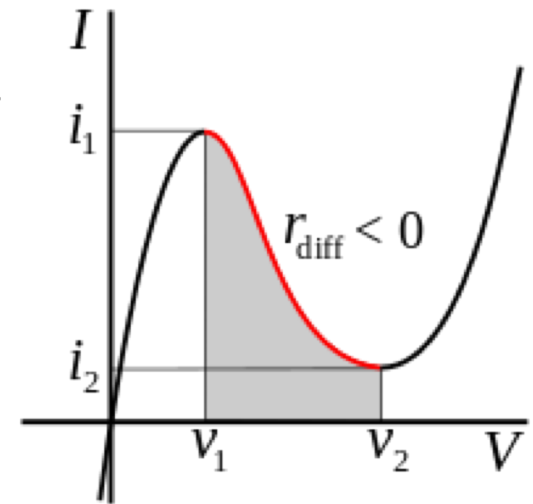
Condición necesaria de oscilación

Osciladores

Ejemplo diodo IMPATT (IMPact Avalanche and Transit Time Diode)



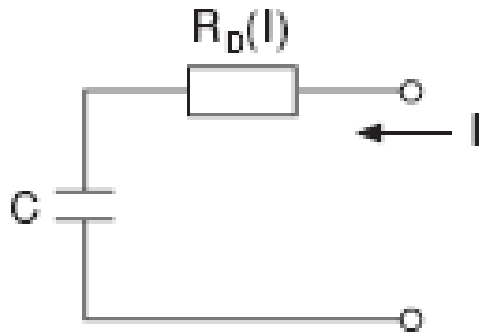
- Estructura tipo p+ n i n+ bajo fuertes campos eléctricos (105V/cm)
- Unión p-n: avalancha-ionización
- Región n-i-n+ : deriva
- Respuesta de Resistencia Negativa
- Uso en osciladores de 300 MHz-300 GHz



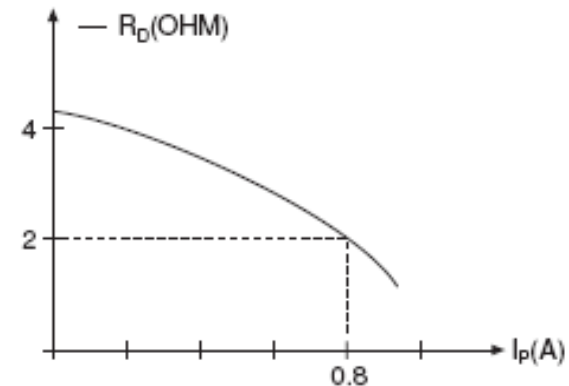
Osciladores

Ejemplo diodo IMPATT:

Circuito equivalente:



Característica $R < 0$ versus I_{RF}



$$V_{NL} = -aI + bI^3 \quad R_D(I) = -a + bI^2 \quad a = 4 \quad b = 3.1$$

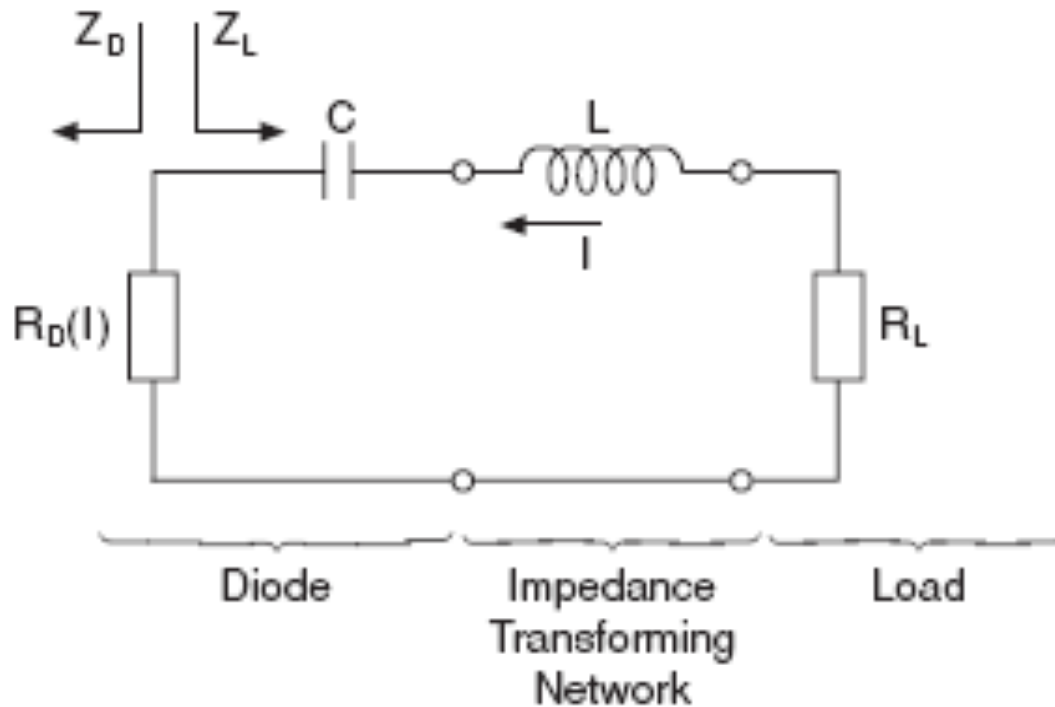
Potencia entregable a una carga $R_L = -R_D$:

$$P = \frac{1}{2} R_L I_0^2 = -\frac{1}{2} (-a + bI_0^2) I_0^2$$

Osciladores

Ejemplo diodo IMPATT:

Circuito completo diodo IMPATT + resto resonador y carga R_L :



Osciladores

Ejemplo diodo IMPATT:

Diseño del oscilador para máxima potencia:

$$\frac{\partial P}{\partial I_0} = aI_0 - 2bI_0^3 = 0 \quad I_0 = \sqrt{\frac{a}{2b}} \cong 0.8 \text{ (A)} \quad R_D(I_0) = -\frac{a}{2} = -2 \text{ (ohm)}$$

$$R_D(0) = \lim_{I \rightarrow 0} [R_D(I)] = -a \quad R_L = \frac{a}{2} = 2 \text{ (Ohm)}$$

Frecuencia de oscilación: $f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Potencia de oscilación: $P = \frac{a^2}{8b} \cong 645 \text{ mW}$

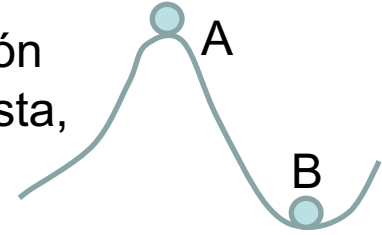
Osciladores

Estabilidad de la Oscilación:

• Para que pueda existir la oscilación se tiene que dar la condición necesaria, pero por si sola no es garantía de que realmente exista, para eso se requiere la condición suficiente.

• Condición necesaria: Suma de impedancias = 0

• Condición suficiente: criterio gráfico intersección línea de carga-línea de dispositivo

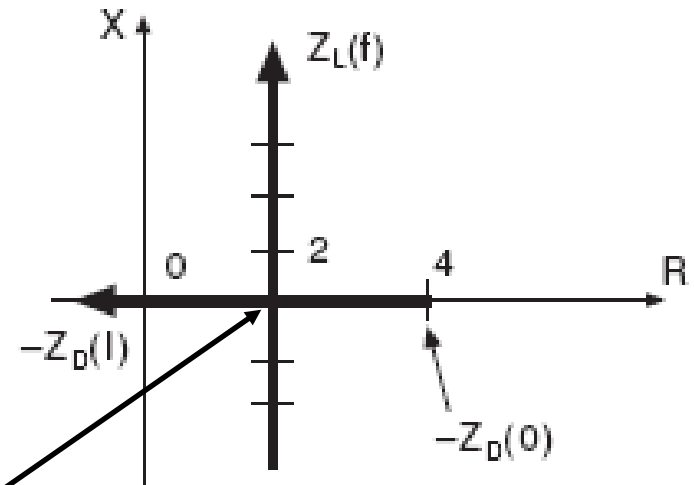


Device line $-Z_D(I, f) \equiv -Z_D(I)$
Load line $Z_L(f)$

$$-Z_D(I) = 4 - 3.1I^2$$

$$Z_L(f) = R_L(1 + j2Q\delta)$$

$$R_L = \frac{a}{2} = 2 \quad Q = \omega_0 L / R_L \quad \delta = \frac{f - f_0}{f_0}$$



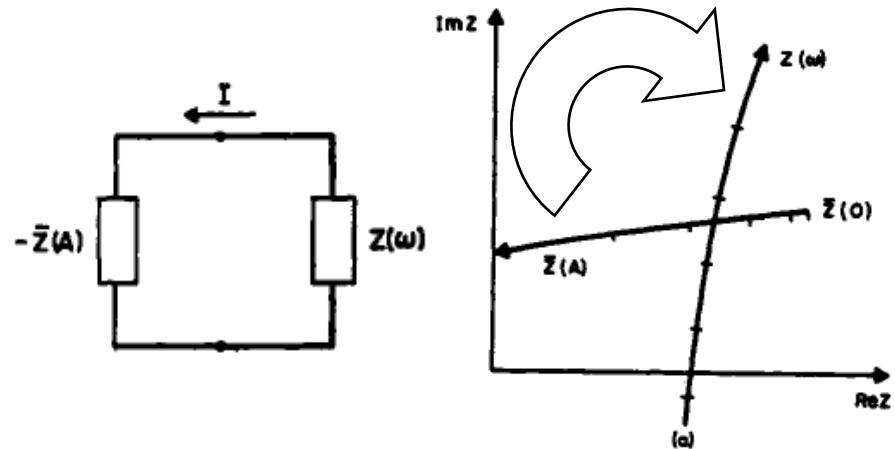
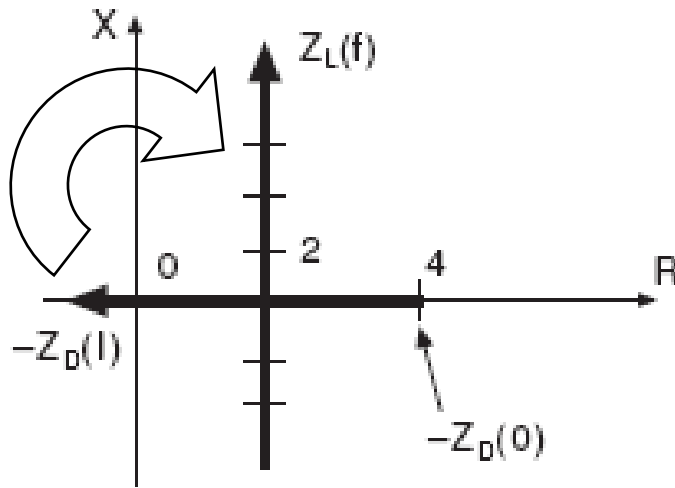
PUNTO SOLUCION: valor de I tal que $Z_L = -Z_D$

PLANO: $Z = R + jX$

Osciladores

Estabilidad de la Oscilación:

- La oscilación será estable si fluctuaciones en el valor de I tienden a corregirse automáticamente volviendo al punto solución original
- Criterio gráfico: Angulo entre la línea de dispositivo (sentido creciente de la intensidad) y la línea de carga (sentido creciente con la frecuencia) debe ser menor de 180° .



Kurokawa: Injection Locking of Microwave Solid-State Oscillators
Proc. IEEE, oct 1973.

Osciladores

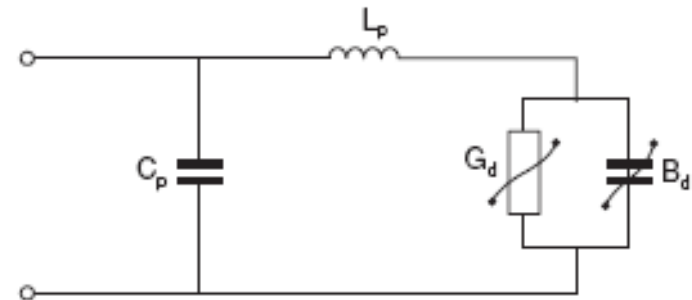
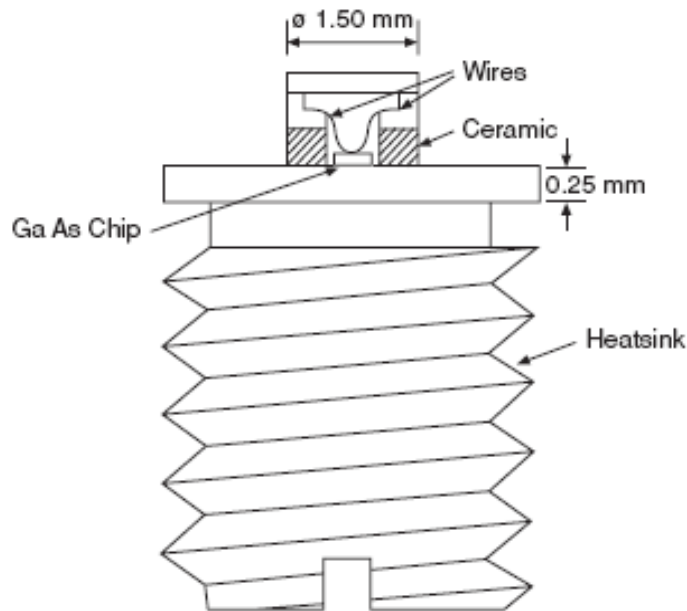
Osciladores de resistencia negativa a diodo:

- Diodos semiconductores 1960's
- Montajes en cavidades guías de onda o con resonadores coaxiales: factores de calidad altos → más estabilidad frecuencial y menor ruido de fase
- Montajes con líneas microstrip: peor ruido de fase
- Problema general: disponer de modelos precisos para hacer diseños correctos que cumplan las condiciones de oscilación
- Problema añadido: modelos de los empaquetados, hilos de “bonding”, etc.
- Baja eficiencia (potencia DC → calor disipado > Pot RF)
- Necesidad empaquetado disipación calor

Osciladores

Ejemplos de diodos:

- Diodos IMPATT (ejemplo previo)
- Diodos GUN



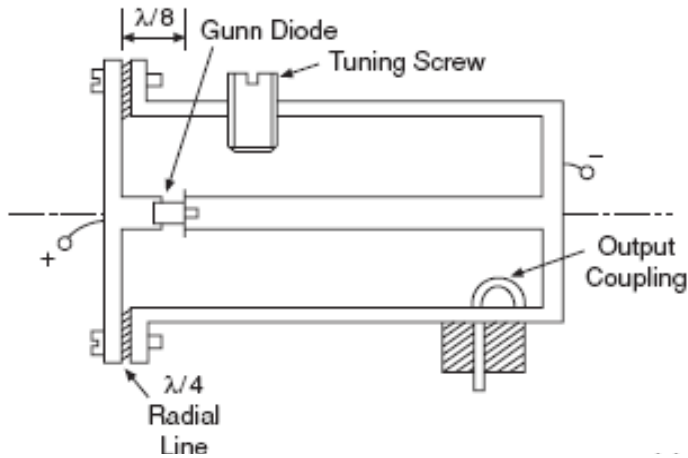
Circuito equivalente diodo Gun

$$L_p = 0.1 \text{ nH} \quad C_p = 0.2 \text{ pF}$$

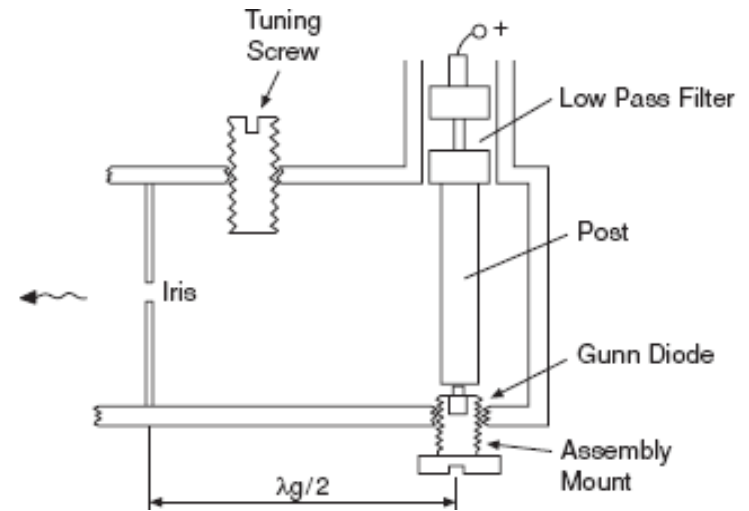
Aspecto diodo Gun con empaquetado disipador

Osciladores

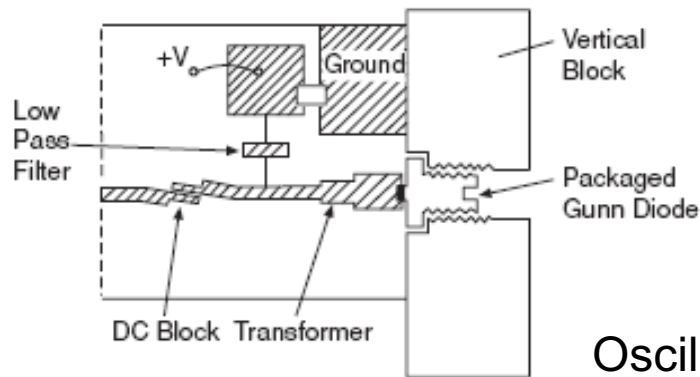
Tipos de diseños con diodo GUN:



Oscilador Gun en coaxial



Oscilador Gun en guía de onda
-tamaño → frecuencia



Oscilador Gun en microstrip

- $l \sim \lambda/2$
- $Q \sim 1000$
- Ajuste con tornillo 30%

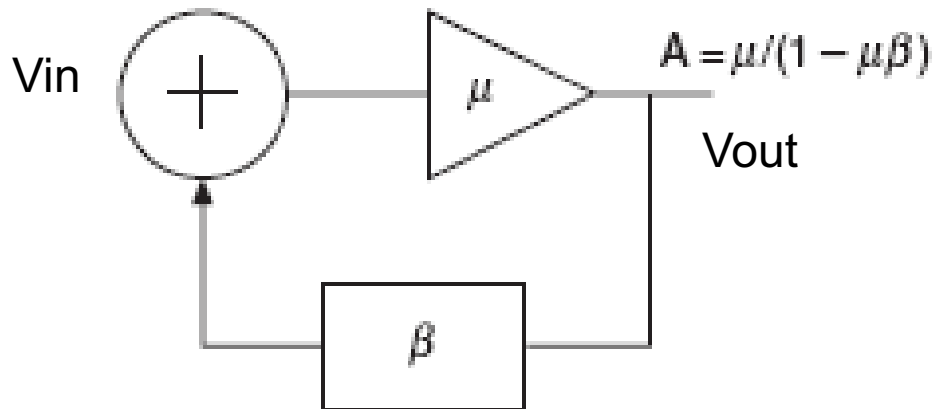
Osciladores

Osciladores a transistor:

- Principio básico oscilación sinusoidal: Resonancia
- Acoplo de energía a Circuito L-C
- Intercambio energía $L \leftrightarrow C$
- Idealmente no hay perdidas y el intercambio de energía sería “eterno”
- En la práctica SI hay pérdidas \rightarrow se precisa “ganancia”
- La ganancia la puede proporcionar un dispositivo activo: transistor (BJT, CMOS, HBT, MESFET, HEMT, etc.)
fabricado con semiconductor (Si, GaAs, InP, etc.)
- Funcionamiento, potencia, banda de frecuencias, etc. dependen mucho del tipo de transistor
- Técnica de diseño se explicará independientemente del tipo de transistor.

Osciladores

- Transistor: dispositivo 3 terminales, fuente de corriente controlada: MESFET/HEMT corriente drenador controlada por tensión de puerta; BJT/HBT corriente colector controlada por corriente de base
- Transistor polarizado: capacidad de amplificación
- REALIMENTACIÓN POSITIVA

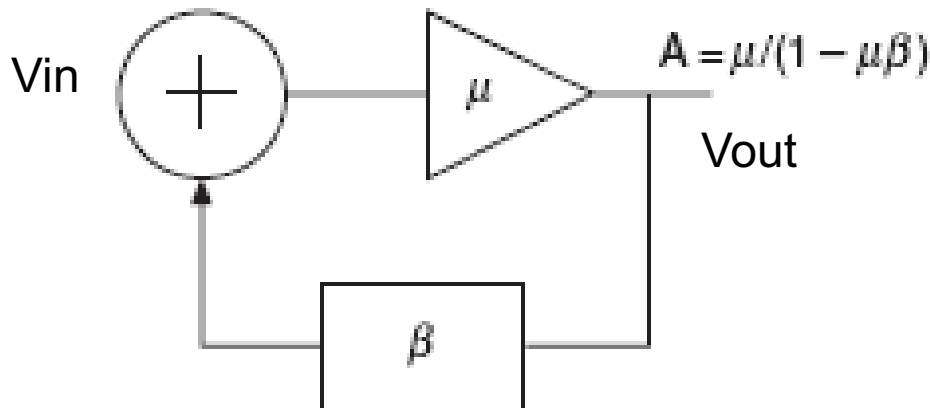


Osciladores

OSCILADOR=AMPLIFICADOR RUIDO+REALIMENTACIÓN SELECTIVA EN FRECUENCIA

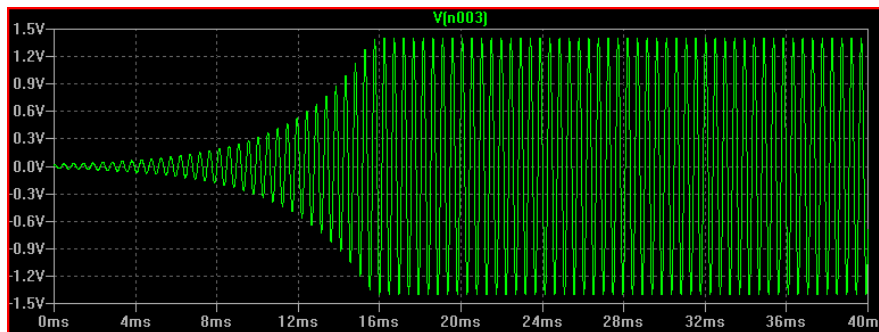
$$A = \frac{\mu}{1 - \mu\beta(f)} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

V_{out} puede existir con $V_{in}=0$ si denominador $=0 \rightarrow$
Ganancia de lazo $\mu\beta$ unitaria y desfase 360° $V_{in}-V_{out}$
(criterio BARKHAUSEN)

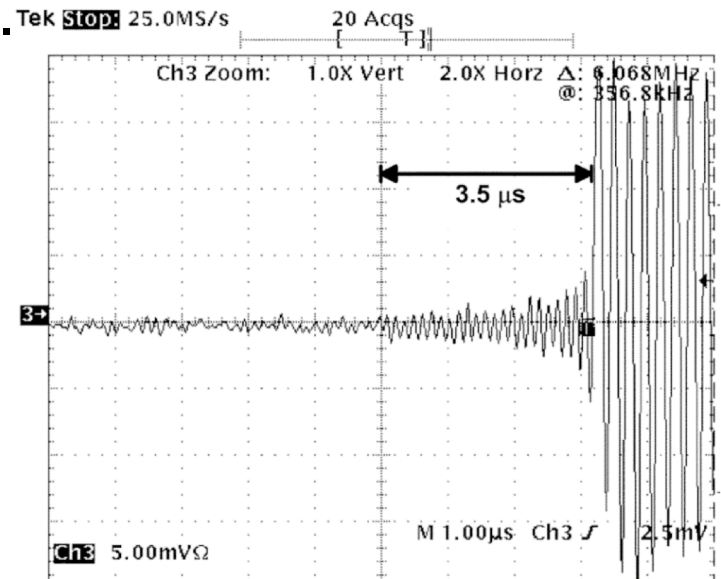


Osciladores

- Inicio de la oscilación (arranque): Amplificación del ruido blanco $\mu\beta > 1$ (resistencia total < 0)
- Estabilización de la oscilación (estado estacionario): $\mu\beta = 1$ (resistencia total $= 0$)
- La compresión no lineal de la ganancia en lazo abierto limita el crecimiento de la oscilación ($R < 0 \rightarrow R = 0$ en estado estacionario).



Capturas de arranque de osciladores



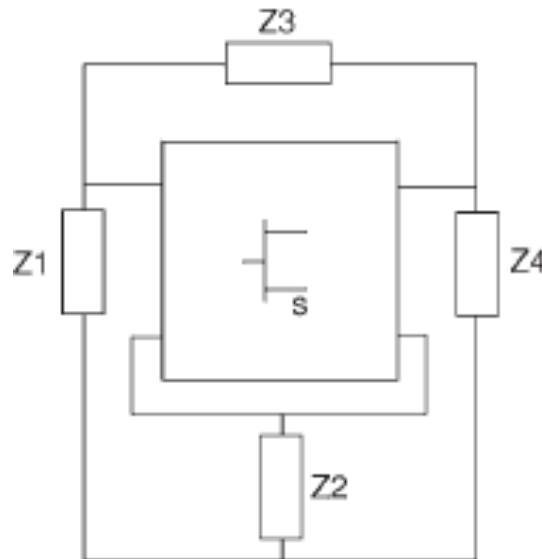
Osciladores

Resistencia negativa necesaria para el arranque

¿Cómo conseguirla?

Realimentación transistor:

- Serie: Z_2 con Z_3 infinito
- Paralelo Z_3 con $Z_2 = 0$
- Serie-Paralelo $Z_2 \neq 0$ $Z_3 \neq 0$

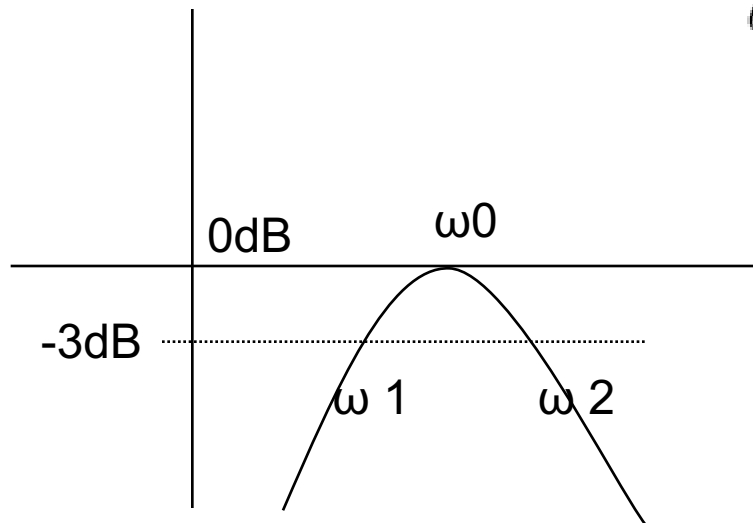


Osciladores

Parte Resonante:

- Idealmente respuesta frecuencial paso banda
- Las pérdidas cambian la forma y el ancho de banda
- Factor de calidad Q

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1}$$



- Q ideal infinito \rightarrow máxima selectividad en frecuencia

Osciladores

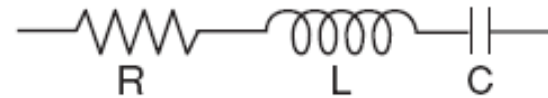
Circuitos Resonantes:

a) Serie:

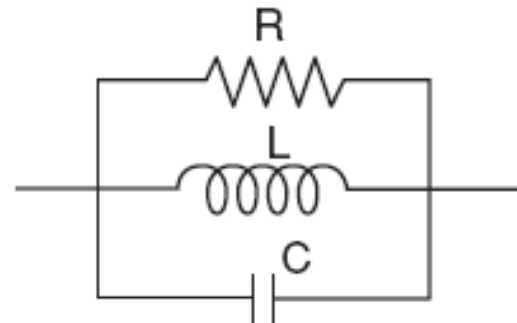
$$Q_s = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{RC\omega_0}$$

b) Paralelo:

$$Q_p = \frac{R}{\omega_0 L} = RC\omega_0$$



a/series



b/parallel

Siendo la frecuencia de resonancia: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Osciladores

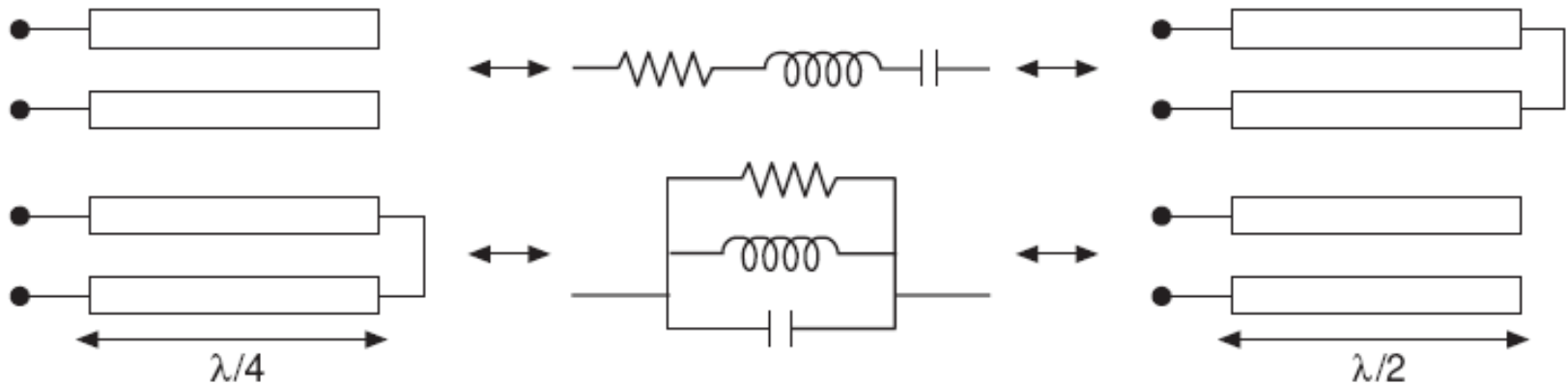
Cuando al resonador se le añade una impedancia de carga el nuevo factor de calidad Q_L puede cambiar respecto al Q del resonador aislado:

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q} + \frac{1}{Q_{EXT}}$$

Osciladores

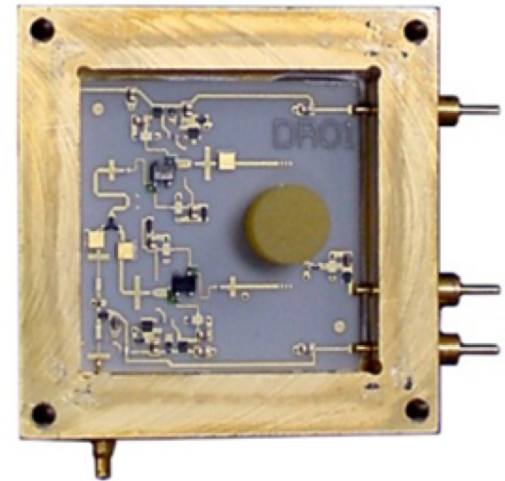
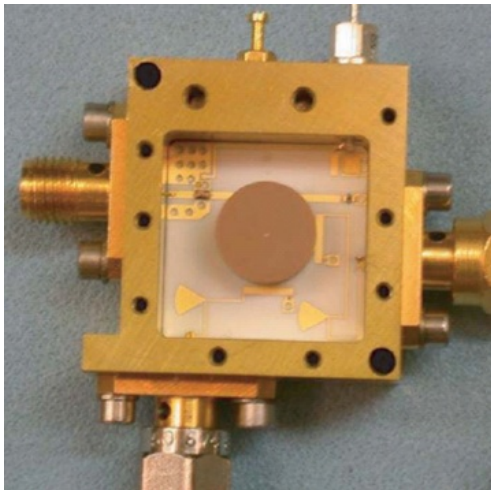
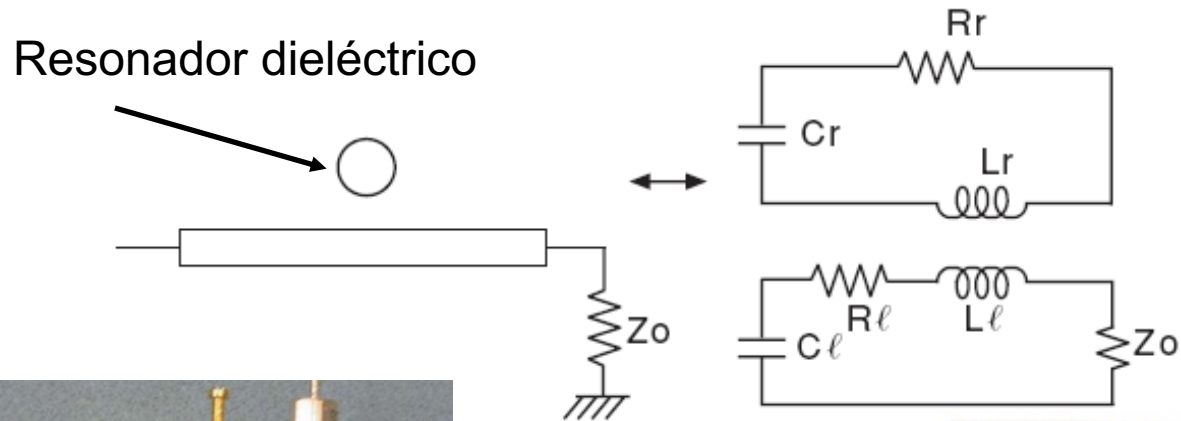
Implementación de resonadores:

- Con elementos localizados: LC (en frecuencias “bajas” de RF y MW).
- Con líneas de transmisión (en frecuencias altas de MW en las que los resonadores LC presentan muchos parásitos). Se pueden usar líneas coaxiales terminadas en corto o en abierto, o líneas microstrip.



Osciladores

Implementación de resonadores combinando líneas microstrip y resonadores dieléctricos, para osciladores de bajo ruido de fase a frecuencia fija.



Osciladores

En electrónica en general hay dos tipos de osciladores:

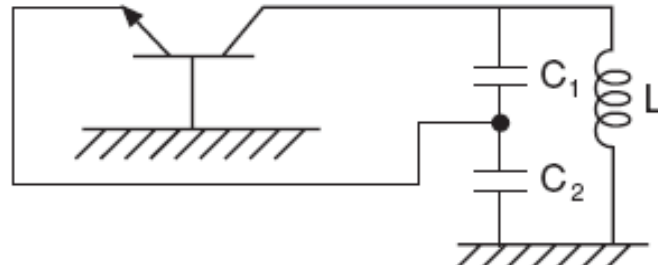
- Armónicos (basados en resonancias LC)
- De relajación (basados en procesos de carga-descarga de capacidades a través de resistencias R)

En RF y MW nos centramos en los armónicos porque funcionan en más alta frecuencia y no incluyen pérdidas por resistencias

Osciladores

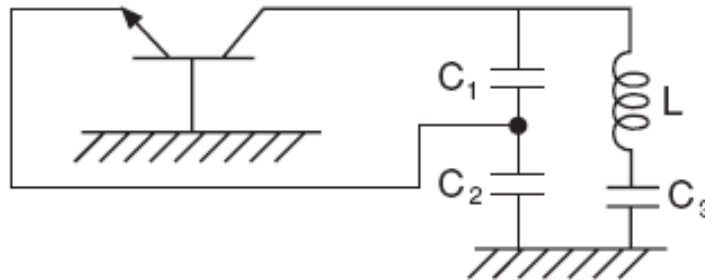
Topologías típicas:

•Colpitts

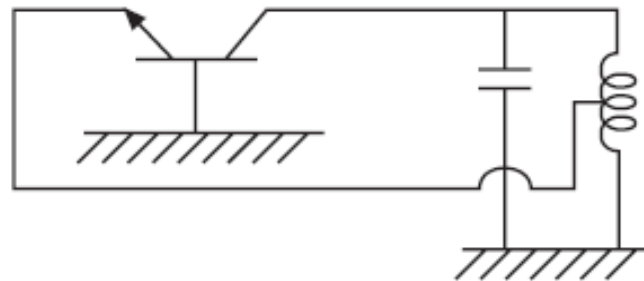


$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$$

•Clapp

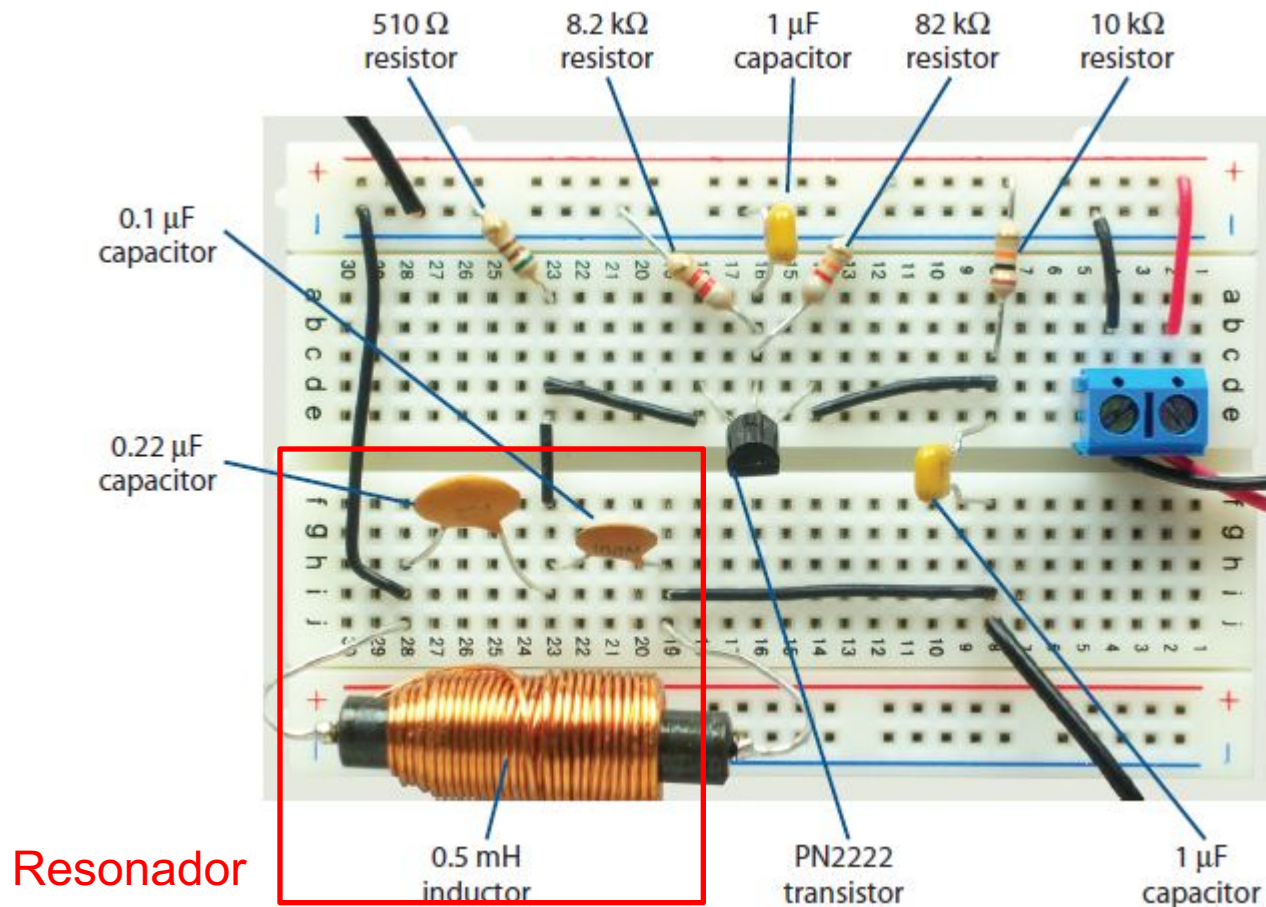


•Hartley



Osciladores

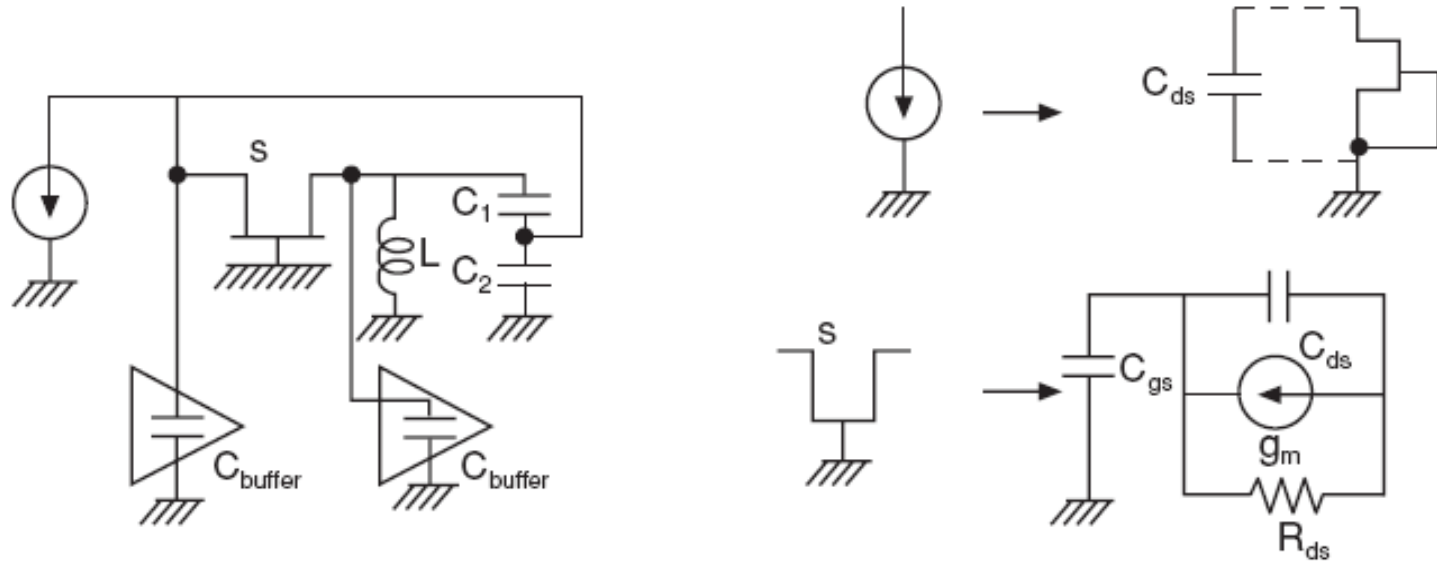
- Oscilador Colpitts de baja frecuencia implementado en una regleta



F aprox. 27 KHz

Osciladores

Ejemplo detallado oscilador Colpitts con MESFET:

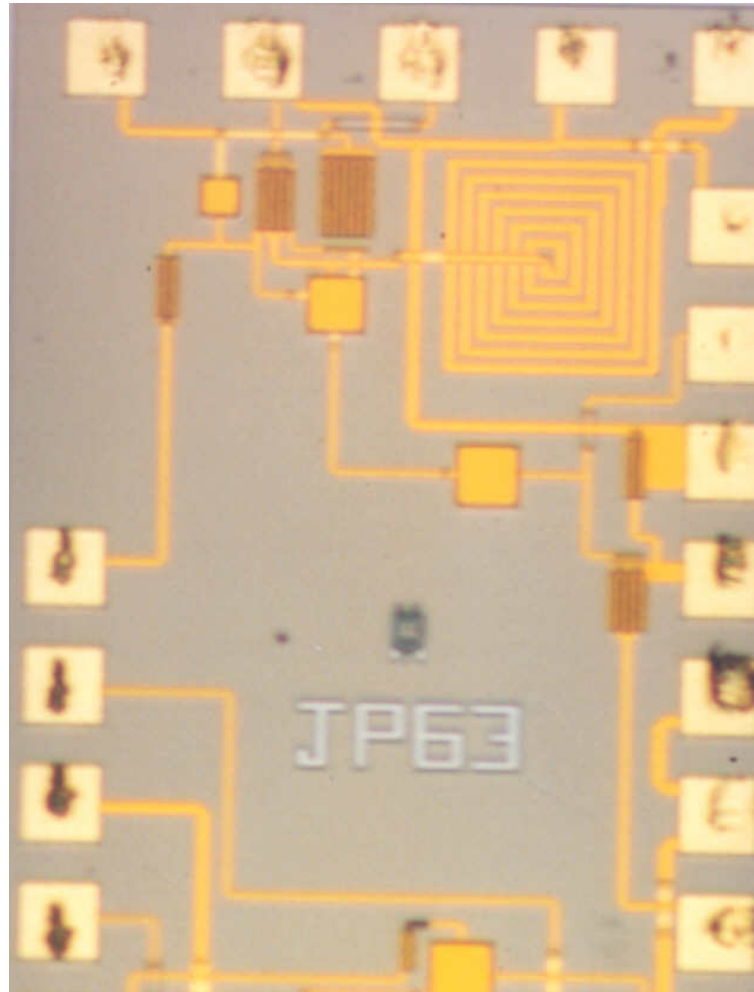


$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C_{ds} + C_1 + C'_2}{L[(C_{buffer} + C'_2) + (C_{ds} + C_1) + (C_{buffer} C'_2)]}}$$

$$\frac{1 + g_m R_{ds}}{(\omega^2 L)(g_m R_{ds} C_{buffer} + C_{buffer} + C'_2)} = 1$$

Osciladores

Fotografía oscilador Colpitts MMIC (VCO)

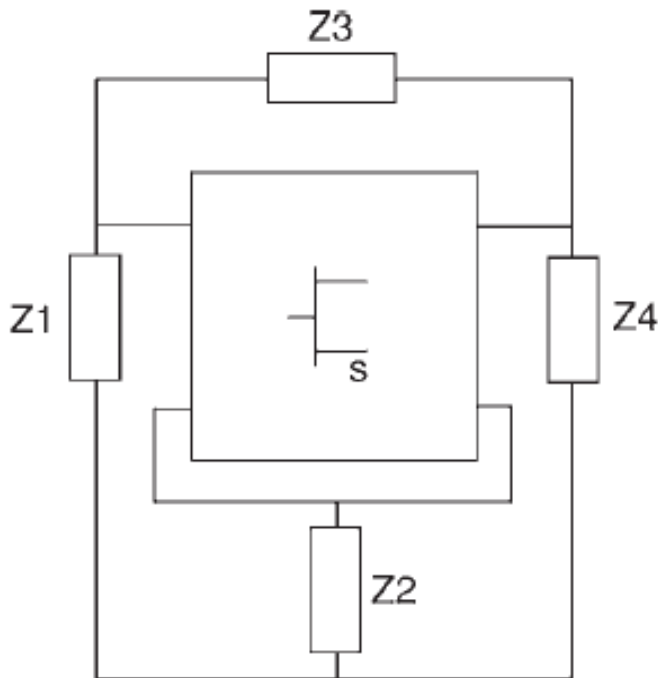


Osciladores

Ejemplo para ver resistencia negativa desde la salida de un transistor:

$Z2 \rightarrow C2$, $Z1 \rightarrow L1$, $Z3 = \infty$, Desde $Z4$: $R0$

Se fija $Z4 = -R0$

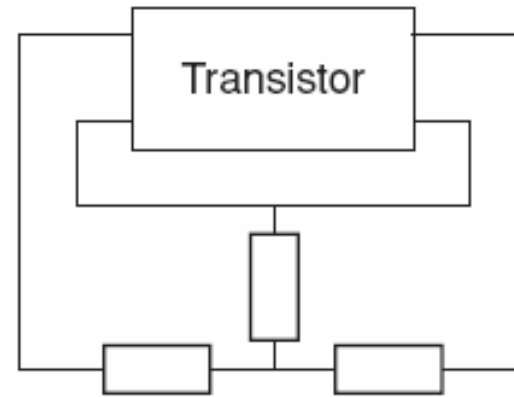
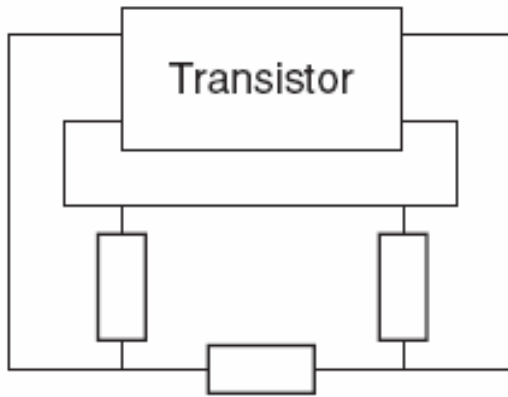


$$R_o = \frac{-g_m}{C_{ds}\omega^2(C_{gs} + C_2 - L_1C_2C_{gs}\omega^2)}$$

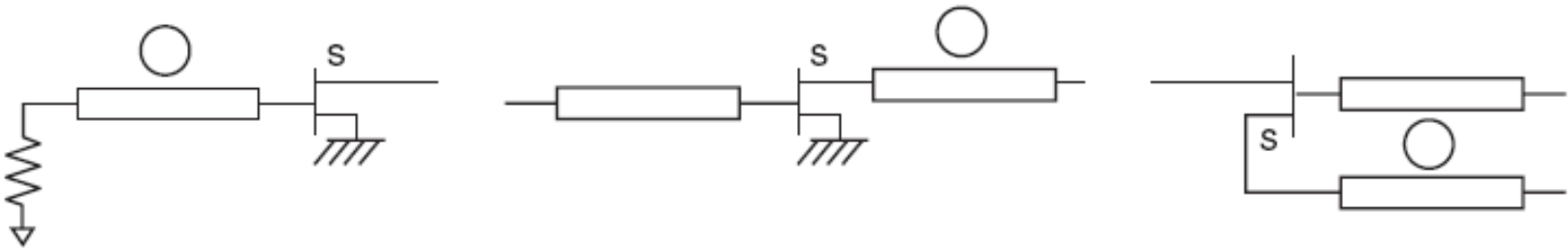
$$\omega_o = \frac{C_{ds} + C_{gs} + C_2}{L_1C_{gs}(C_2 + C_{ds})}$$

Osciladores

Osciladores de microondas a transistor con elementos distribuidos:



π and T topologies using transmission lines



Osciladores

CAD para Osciladores

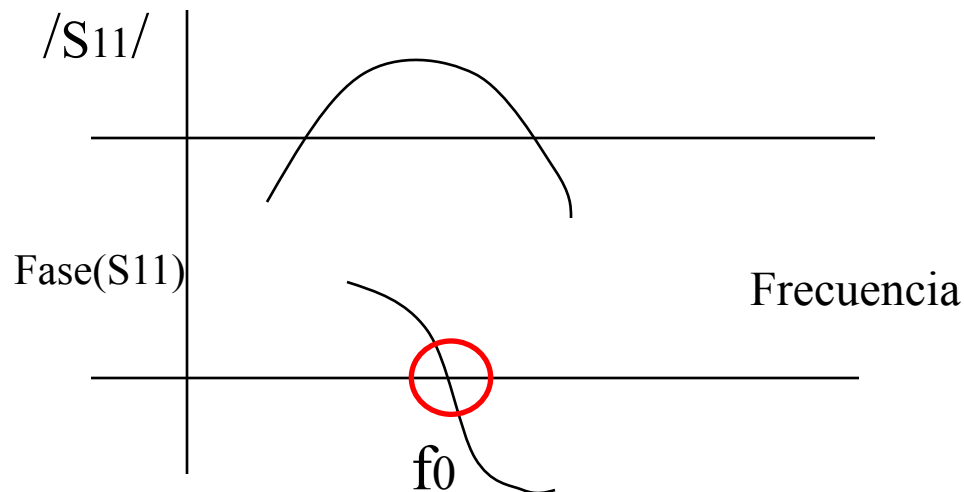
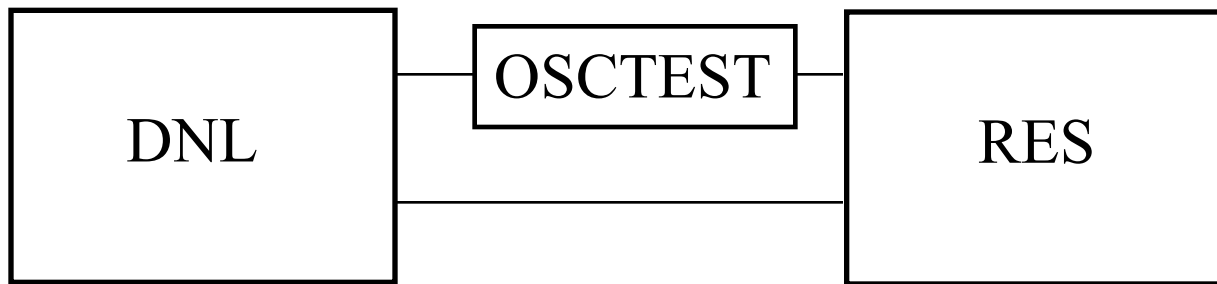
Para estimar la potencia que puede dar un oscilador con transistor, conocida la ganancia del transistor como amplificador y su potencia de saturación:

$$P_{MAX} = P_{SAT} \left(1 - \frac{1}{G_0} - \frac{\ln(G_0)}{G_0} \right)$$

(Formula de Johnson)

Osciladores

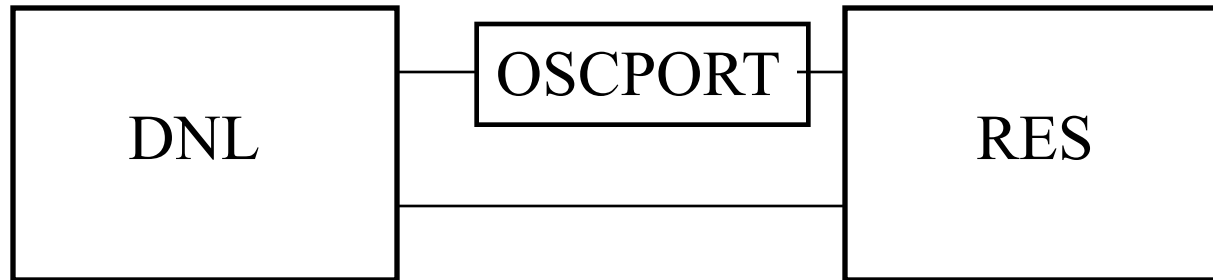
Simulación en ADS: test pequeña señal



Estabilidad de la oscilación: pendiente negativa fase-frecuencia en el paso por 0

Osciladores

Simulación en ADS: sonda gran señal



- Balance armónico (base de frecuencias predefinida $N \times f_0$)
- Fuente “virtual” para excitar el circuito
- Solución final: existencia de señal de RF con fuente a 0
- Información de frecuencia y potencia a todos los armónicos

Osciladores

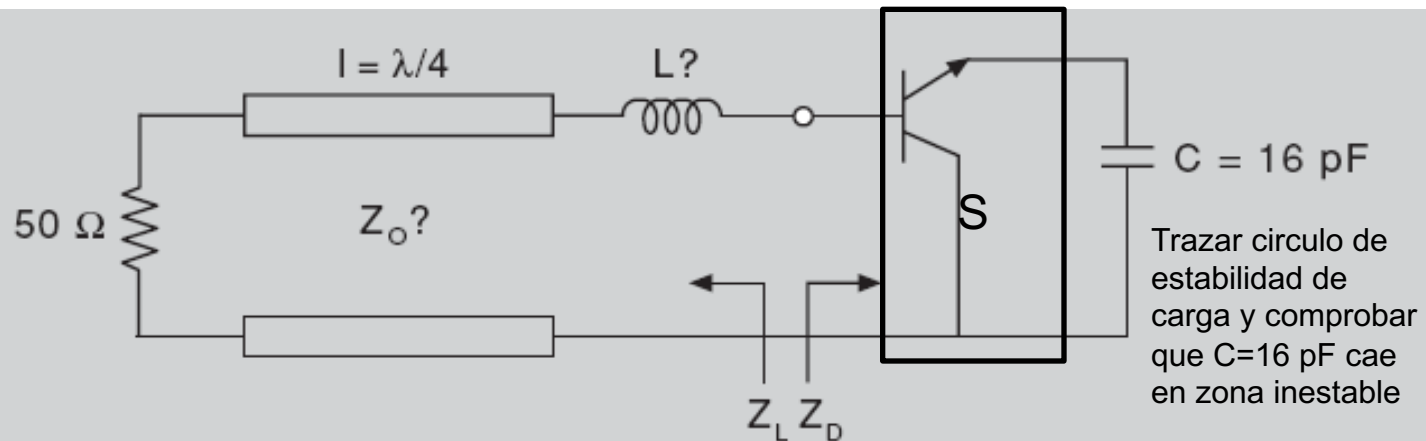
EJERCICIOS:

Self-assessment Problems

- 7.1 Evaluate the oscillation frequency in a Clapp oscillator, as a function of the values of the passive components in the circuit.
- 7.2 Evaluate the oscillation frequency in a Hartley oscillator, as a function of the values of the passive components in the circuit.
- 7.3 A bipolar transistor is employed in the design of an oscillator, working at 1 GHz, whose schematic is in the Figure Q3. The scattering parameters for such transistor, corresponding to the working bias point and frequency are:

$$S_{11}: (0.9, -100^\circ), S_{12}: (0.5, 31^\circ), S_{21}: (1.1, -50^\circ), S_{22}: (0.6, 150^\circ)$$

Calculate the device impedance $Z_D = R_D + jX_D$ seen at the transistor base and the values of L and Z_O , corresponding to the load impedance Z_L , in order to obtain an oscillating signal at 1 GHz, considering that $\text{Re}(Z_L) = R_D/3$ is the optimum value for obtaining the desired oscillation power using the given transistor.



Osciladores

OSCILADORES CONTROLADOS POR TENSIÓN (VCOs):

- Necesidad de osciladores a frecuencia fija (ruido de fase, resonadores dieléctricos)
- Necesidad de osciladores de frecuencia variable. Mecanismos de control: mecánico (tamaño cavidad, capacidad “trimmer”, eléctrico (servomecanismos, PLOs, PLL)



Para una sintonía eléctrica (tuning) de la frecuencia:

- YIG: resonadores de alta Q ferromagnéticos. Dependen de tamaño, material y campo eléctrico (polarización) aplicados. Voluminosos y caros.
- VARACTORES: condensadores controlados por tensión. Peor Q, baratos y flexibles. Diodos polarizados en inversa $C(v)$ (de Si, AsGa, tipo Schottky). Interesa C_{max}/C_{min} alta \rightarrow diodos hiperabruptos

Osciladores

VCOs con varactores:

- En un oscilador armónico (LC) la frecuencia depende de los valores de L y C. Si hacemos C variable con un voltaje de control (tuning) podremos controlar la frecuencia.
- Diodos polarizados en inversa C(v)

$$C = \frac{C_{j0}}{\left(1 - \frac{V_a}{\phi_B}\right)^\gamma}$$

C_{j0} : tamaño diodo

ϕ_B : barrera de potencial

γ : perfil de dopado del diodo



Suponiendo una frecuencia de resonancia típica podemos relacionarla con el voltaje aplicado:

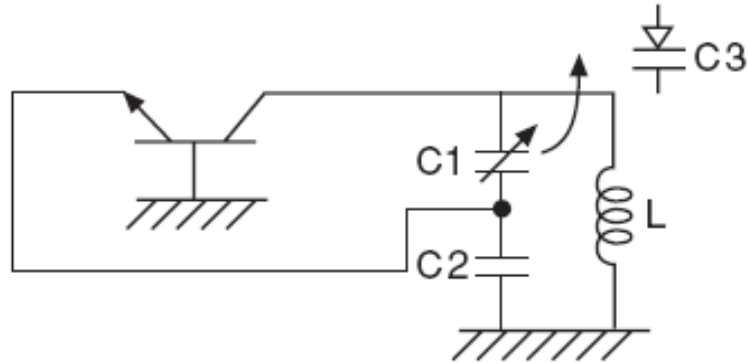
$$\omega_R = 2\pi f_R = \frac{1}{\sqrt{LC(V_a)}}$$

$$f_R = \frac{\left(1 - \frac{V_a}{\phi}\right)^{\gamma/2}}{2\pi \sqrt{LC_{j0}}}$$

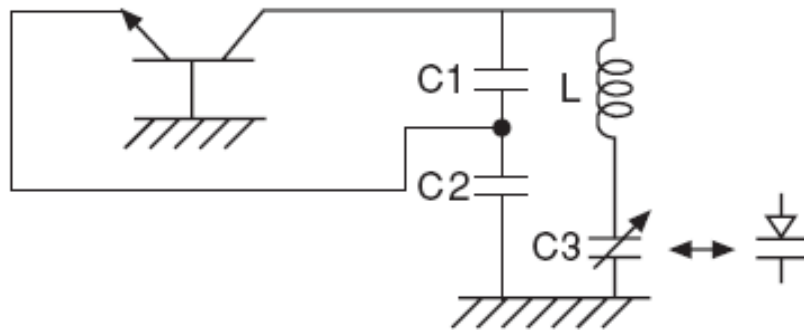
Osciladores

Topologías de VCOs con varactores:

•Colpitts



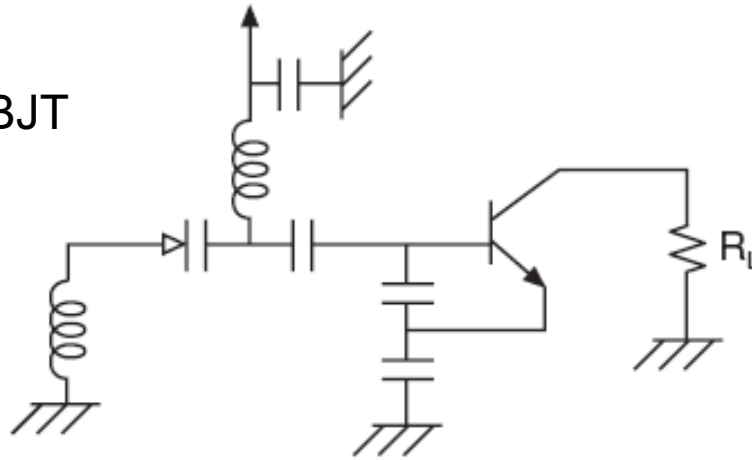
•Clapp



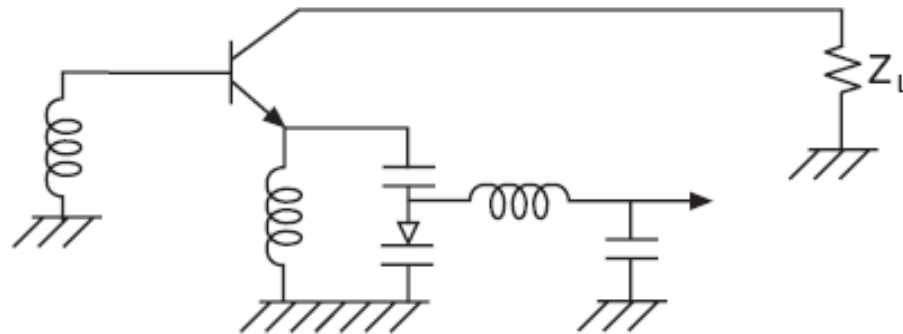
Osciladores

Topologías de VCOs con varactores:

- Varactor en la base del BJT



- Varactor en el emisor del BJT



Osciladores

EJERCICIOS:

- 7.4 Calculate the tuning bandwidth of a Colpitts-based voltage-controlled oscillator, considering that C_{\max}/C_{\min} is 10 for the given varactor.
- 7.5 Calculate the tuning bandwidth of a Clapp-based voltage-controlled oscillator, considering that C_{\max}/C_{\min} is 10 for the given varactor.

Osciladores

Caracterización y test de osciladores:

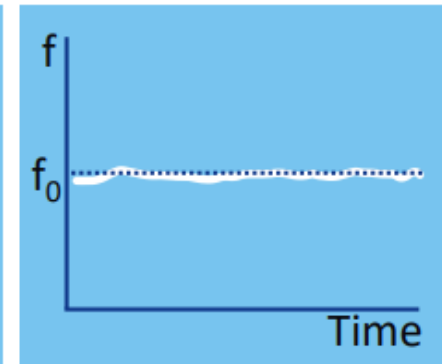
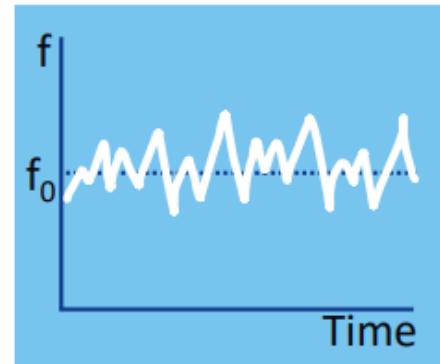
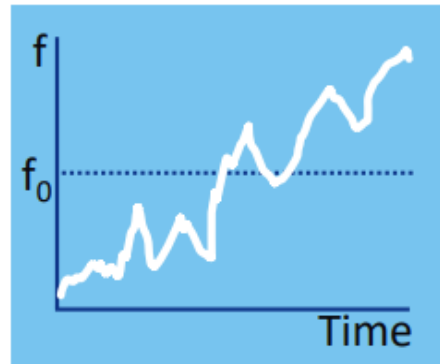
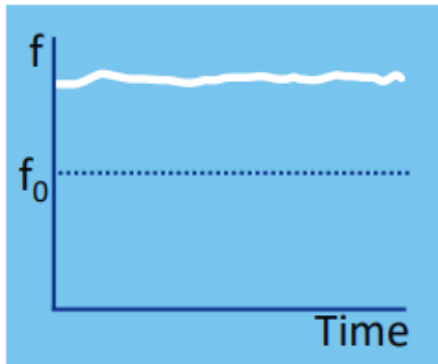
Potencia DC → OSCILADOR → Potencia RF @ frecuencia

(sinusoidal)

- Frecuencia: se determina por comparación con una frecuencia de referencia estandar (analizador de espectro, frecuencímetro). Errores ~Hzs
- Potencia: En osciladores sinusoidales estará concentrada mayoritariamente en la frecuencia “portadora”. Analizador de espectro: distribución de la potencia con la frecuencia. Errores de ~ dB (medida en $\text{dBm} = 10 \log_{10}(P_{\text{mW}})$)
- Estabilidad: fluctuación de la señal en frecuencia y en potencia: distinguir a corto plazo y a largo plazo. A largo plazo: envejecimiento, cambio presión y temperatura.

Osciladores

Stability versus accuracy



Stable



Not stable



Not Stable



Stable



Not Accurate



Not Accurate



Accurate



Accurate



- f_0 : nominal frequency

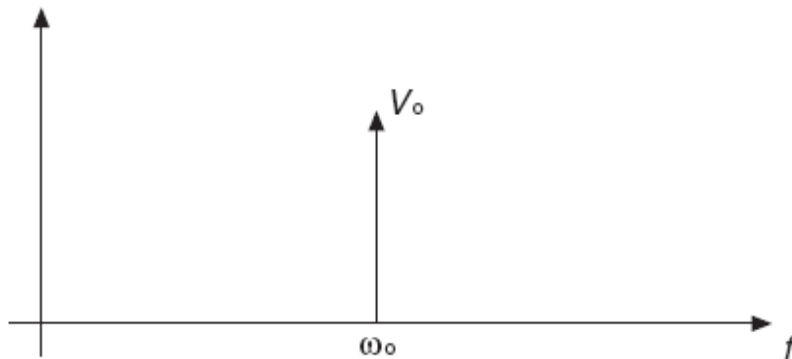
- **Stability is a measure of the fluctuations, with respect to the mean**

- Typically quantified with Standard Deviation, σ

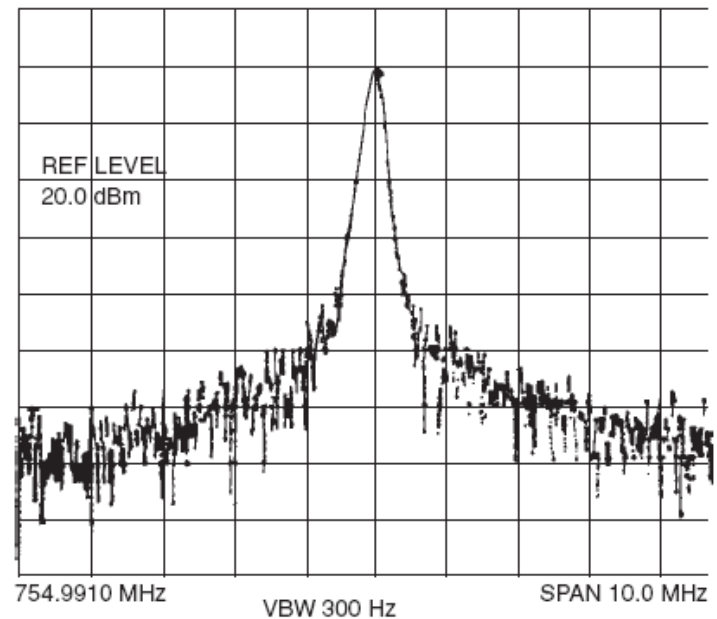
Osciladores

Estabilidad a corto plazo: fluctuaciones de la frecuencia respecto a la nominal <1seg.

Se pueden modelar como modulación en amplitud (AM) y en frecuencia (FM) de una señal portadora ideal.



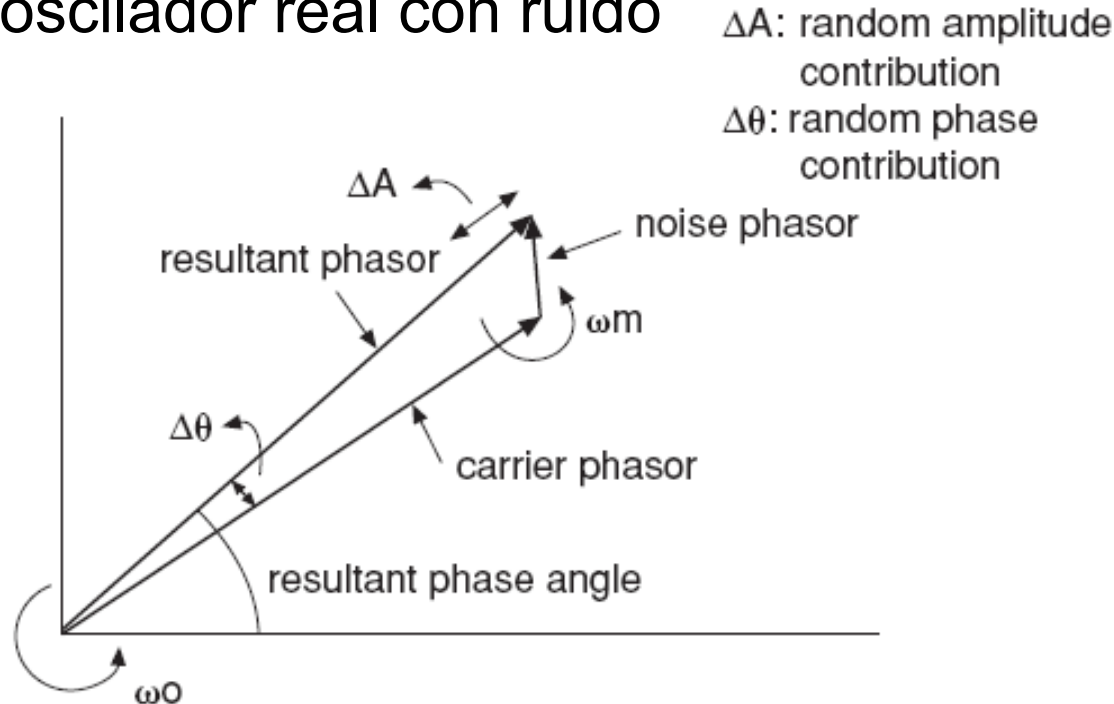
Señal portadora ideal



Espectro de un oscilador (potencia vs. frecuencia) medido en un analizador de espectros.

Osciladores

Representación fasorial de la señal de un oscilador ideal y la de un oscilador real con ruido



SEÑAL RUIDOSA= SEÑAL IDEAL + RUIDO PM + RUIDO AM*

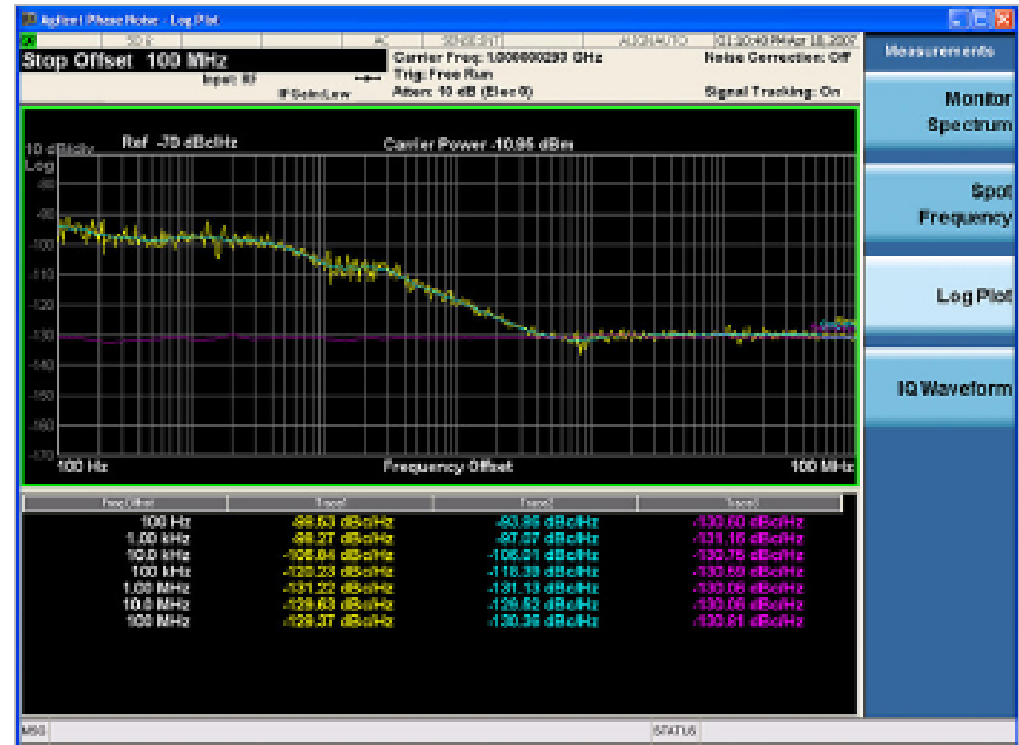
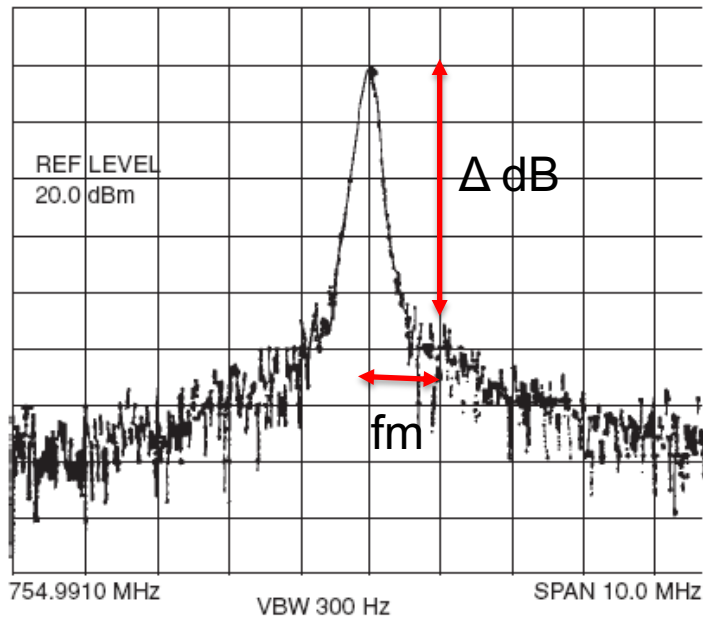
$$v(t)_{ideal} = Ae^{j(\omega_0 t)}$$

$$v(t)_{real} = (A + \Delta A)e^{j(\omega_0 t + \Delta\theta)}$$

*Usualmente Ruido AM \ll Ruido PM

Osciladores

RUIDO DE FASE: Aparece como un espectro continuo (no discreto) alrededor de la frecuencia portadora, que decrece con frecuencias de offset crecientes. Se expresa en dBc/Hz: densidad espectral (/Hz) relativa a la portadora (carrier)



$$L(fm) = \Delta \text{ dB} + 10 \log_{10}(\text{RBW Hz})$$

Es una fuente de error en sistemas transmisores y receptores, radares Doppler y limita la separación entre canales adyacentes.

Osciladores

Estimación Ruido de fase @ fm de la portadora

- N: Potencia de ruido en una ventana de 1 Hz (/Hz)
- C: Potencia portadora

Distancia en dB de la banda lateral @fm a la portadora:L(fm)

$$L(fm) = \frac{N}{C}$$

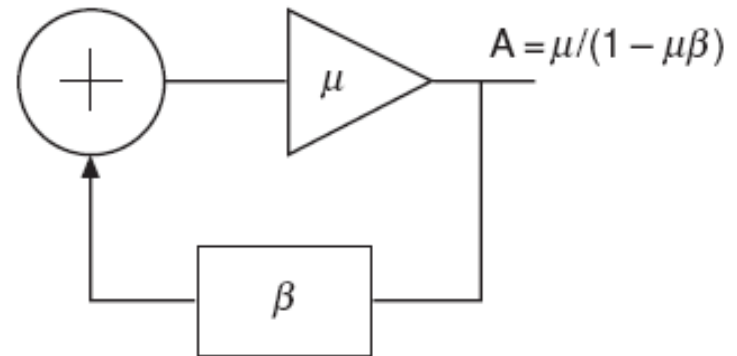
Considerando la banda lateral de ruido como una banda lateral por modulación en fase (PM) con índice de modulación pequeño:

$$L(fm) = \left[\frac{\theta_{peak}}{2} \right]^2 = \left[\frac{1.4\theta_{RMS}}{2} \right]^2 = \frac{S_{\theta}(fm)}{2}$$

Osciladores

Considerando el oscilador como un amplificador realimentado, el ruido V_{noise} producirá una fluctuación de fase en la portadora V_c :

$$\Delta\theta_{peak} = \frac{RMS(V_{noise})}{RMS(V_{carrier})}$$



Osciladores

Considerando la figura de ruido del amplificador F y siendo $P_{carrier}$ la potencia de la portadora, k cte. de Boltzmann y T temperatura en K

$$\Delta\theta_{peak} = \sqrt{\frac{FkT}{P_{carrier}}}$$

Densidad espectral a la entrada del amplificador:

$$S_{\theta IN}(fm) = \Delta\theta_{peak}^2 = \frac{FkT}{P_{carrier}}$$

Corregimos considerando que el ruido de fase presenta una densidad espectral $1/fm$ cerca de la portadora:

$$S_{\theta IN}(fm) = \frac{FkT}{P_{carrier}} \left(1 + \frac{f_{carrier}}{f_m} \right)$$

Osciladores

Considerando la respuesta paso banda del resonador, la salida del lazo cerrado será:

$$S_{\theta OUT}(fm) = S_{\theta IN}(fm) \left(1 + \frac{1}{f_m^2} \left(\frac{f_{carrier}}{2Q_L} \right)^2 \right)$$

Notar la influencia del factor de calidad Q en el ruido del oscilador.

Sustituimos $S_{\Phi in}$ en $S_{\Phi out}$ y $S_{\Phi out}$ en L para obtener un modelo de la variación del ruido de fase con la frecuencia de offset.

Osciladores

$$L(fm) = \left(1 + \frac{1}{f_m^2} \left(\frac{f_{carrier}}{2Q_L} \right)^2 \right) \frac{FkT}{2P_{carrier}} \left(1 + \frac{f_{carrier}}{f_m} \right)$$

En esta expresión se aprecia la dependencia del ruido con el valor de f_m dependiendo del ruido del amplificador, de la potencia de la portadora y del factor de calidad.

Como se trata de la expresión de una densidad espectral es preciso integrar en la banda de interés (frecuencias + y -: $\times 2$) para conocer la fluctuación neta de la fase.

$$\Delta\theta = \sqrt{2 \int_{fl}^{fh} L(fm) dfm}$$

Osciladores

- PULLING de un oscilador: cambio de la frecuencia de oscilación por sensibilidad a la variación de la impedancia de carga del oscilador. Se expresa en función de las perdidas de retorno (desadaptación).

- PUSHING de un oscilador: cambio de la frecuencia de oscilación por sensibilidad a la variación de la polarización. Se expresa en Hz/Volt.

Material Adicional

- Video tutorial sobre diseño de osciladores de RF en general:
 - <https://youtu.be/oJQONLdFC20?si=jJql7flJmgehkJK8>
- Video corto sobre diseño de oscilador VCO en ADS:
 - https://youtube.com/shorts/lHyK6laowog?si=F3mPJdxLcDpV2_5F