

# Ruido

Ezequiel Rubinsztain

[erubinsztain@fi.uba.ar](mailto:erubinsztain@fi.uba.ar)

# Calendario

## Capítulo 1: Introducción

- Clase 1: Transistores Bipolar y MOS. Pequeña señal. Circuitos monoetapas
- Clase 2: Cadence - Introducción y Circuitos monoetapas
- Clase 3: Par diferencial. Amplificador diferencial. Implementación básica

## Capítulo 2: Respuesta en Frecuencia y Estabilización

- Clase 4: Amplificador operacional: Respuesta en frecuencia, estabilidad. Capacidades asociadas al transistor MOS
- Clase 5: Cadence - Amplificador operacional. Operación en DC, offset sistemático, ganancia
- Clase 6: Estabilización, Miller, cero asociado, compensaciones avanzadas
- Clase 7: Cadence - Amplificador operacional. Respuesta en frecuencia, estabilidad

# Calendario

## Capítulo 3: Amplificadores Avanzados

- Clase 8: Amplificadores avanzados. Current mirror opamp, cascode, folded amplifier, folded cascode.
- Clase 9: Amplificadores avanzados. Push-pull output, Diff-diff, CMFB
- Clase 10: Cadence - Amplificadores avanzados

## Capítulo 4: Ruido y Offset

- Clase 11: Offset
- Clase 12: Ruido
- Clase 13: Cadence - Diseño con offset y ruido

## Capítulo 5: Circuitos Auxiliares

- Clase 14: Circuitos auxiliares. Referencias, bandgap, osciladores
- Clases 15 y 16: Extra – Introducción al diseño físico de semiconductores (layout)

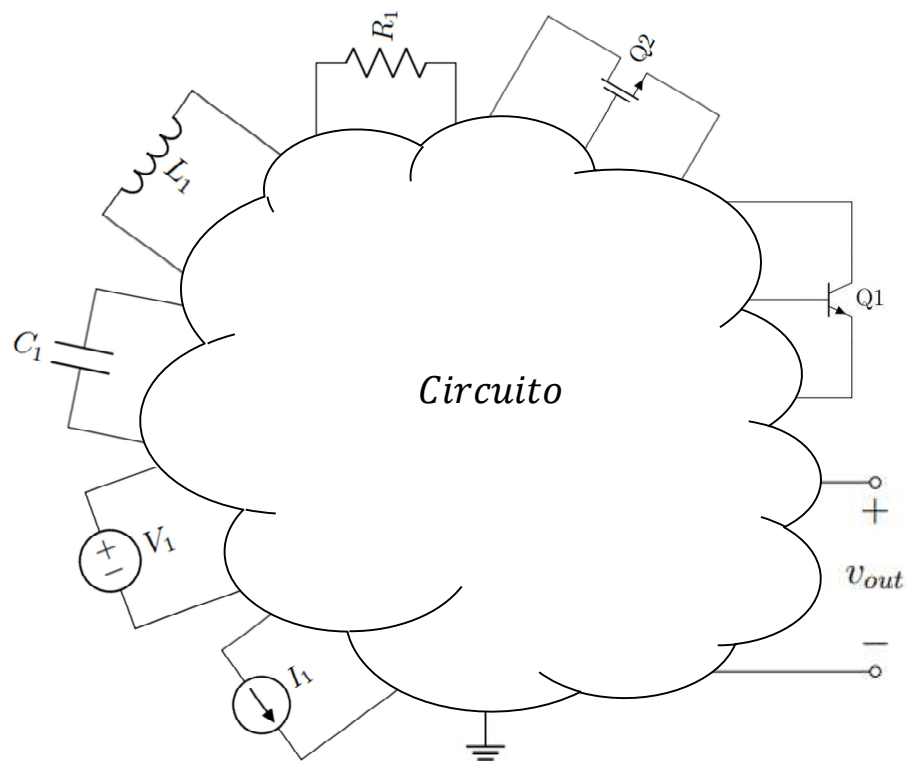
# Contenido Clase 12

- Ruido:
  - Introducción a ruido
  - Ruido en resistencias
  - Ruido en bipolares
  - Ruido en mos
  - Ruido en amplificadores
  - Técnicas de eliminación de offset y ruido flicker

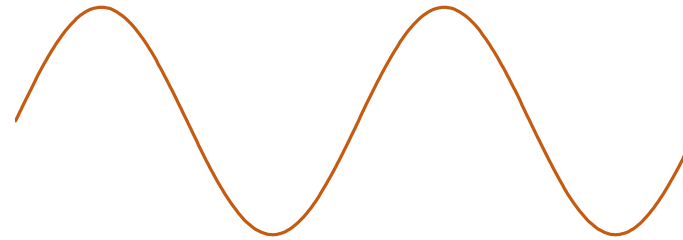
# Contenido Clase 12

- Ruido:
  - Introducción a ruido
  - Ruido en resistencias
  - Ruido en bipolares
  - Ruido en mos
  - Ruido en amplificadores
  - Técnicas de eliminación de offset y ruido flicker

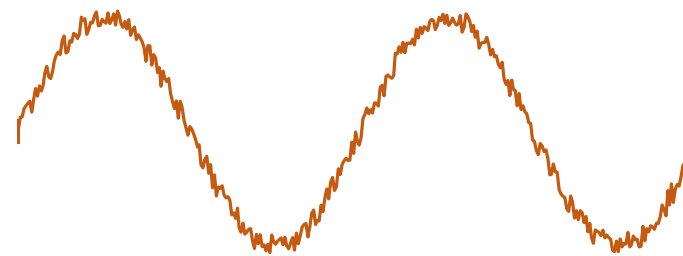
- Introducción a ruido



- Antes de medir la señal  **$V_{out}$**  del circuito esperamos:

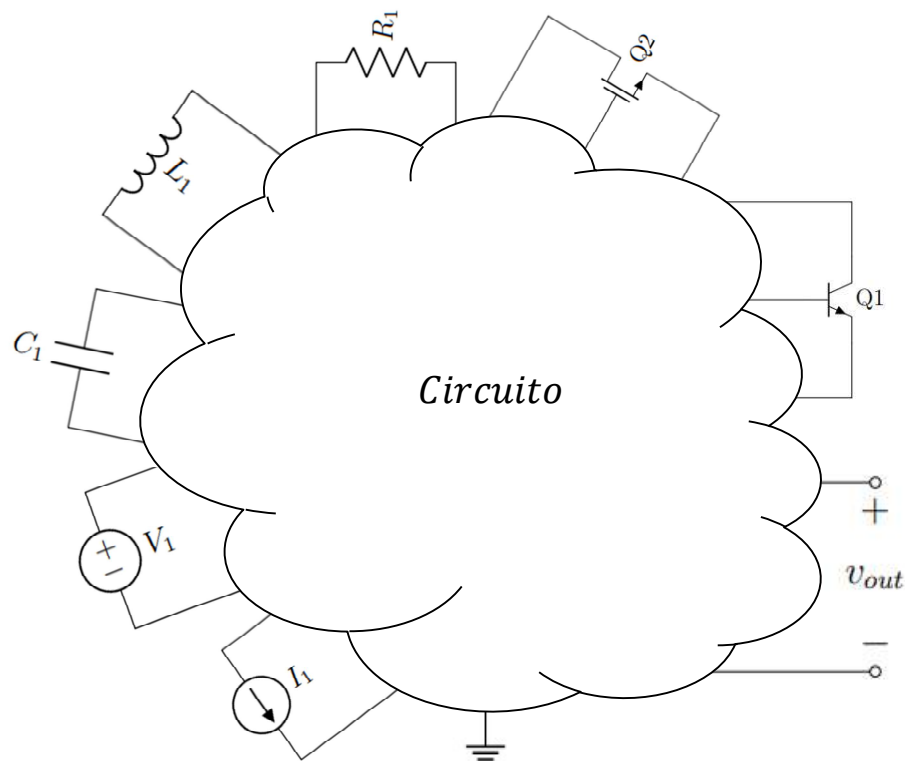


- Cuando la medimos, vemos:



- La razón: ruido

- Introducción a ruido



2C-2024

- Por lo tanto  **$v_{out}$**  será:

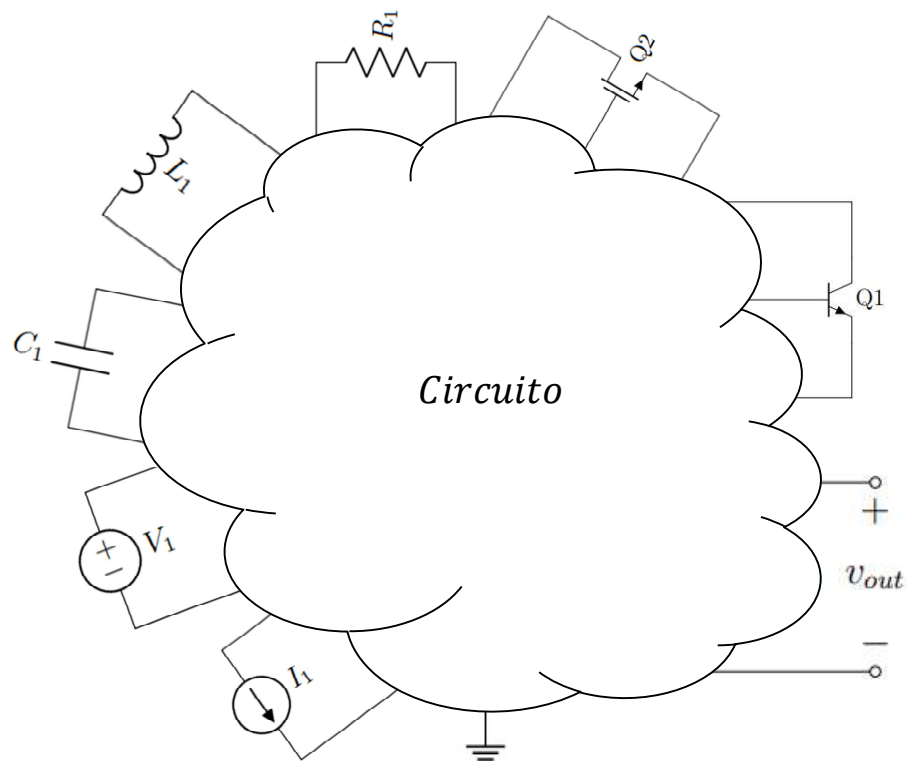
- $v_{out}(t) = \overline{v_{out}(t)} + v_{out_n}(t)$

- La señal  $v_{out_n}$  es lo que llamamos ruido y es generada por todos los elementos que componen el circuito *con excepción de capacitores e inductores*. Dependiendo del elemento, algunas de las causas del ruido son:

- Movimiento aleatorio de electrones en materiales resistivos.
- Recombinación aleatoria de huecos y electrones en semiconductores.
- Difusión aleatoria de huecos y electrones a través de una barrera de potencial

- $v_{out_n}(t)$  se modela como un proceso estocástico estacionario en sentido amplio de media cero.

- Introducción a ruido



- Por lo tanto podemos establecer la función de correlación de  $vout_n(t)$  como:

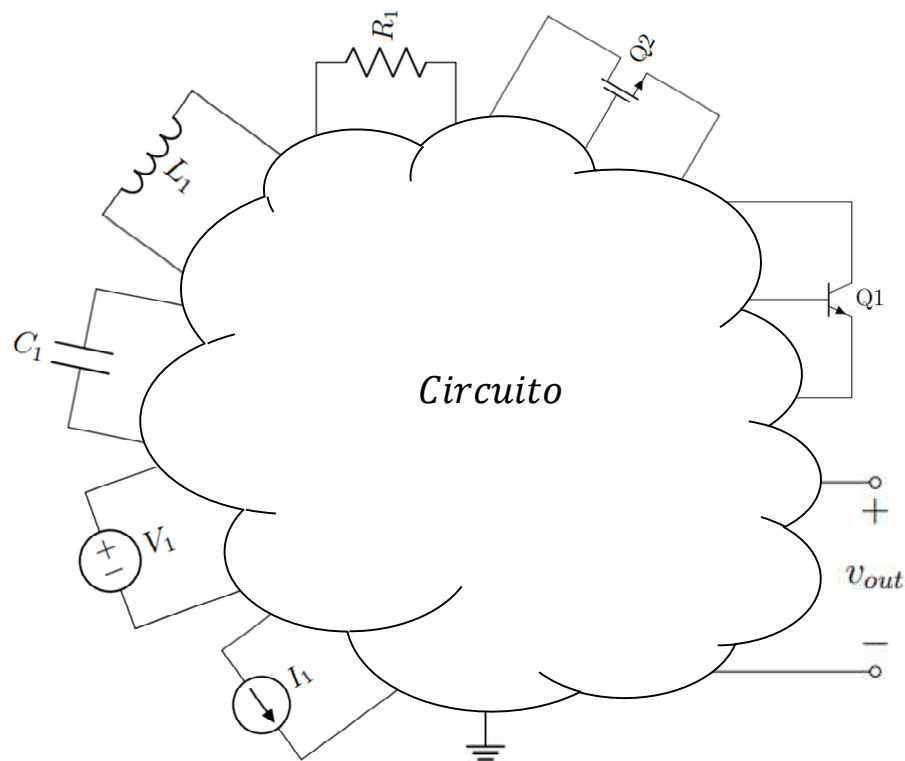
- $C_{vout_n}(\tau) = E[vout_n(t) \cdot vout_n(t - \tau)]$

- La densidad espectral de potencia (PSD) del ruido, se obtiene aplicando la transformada de Fourier a la función de correlación:

- $PSD_{vout_n}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{vout_n}(\tau) \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot \tau} \cdot 2\pi \cdot d\tau$



- Introducción a ruido



- Podemos ver que para  $\tau=0$ , la función de correlación es la varianza de  $v_{out_n}$ :

$$C_{v_{out_n}}(0) = E[v_{out_n}(t) \cdot v_{out_n}(t)] = \sigma_{v_{out_n}}^2$$

- Y se puede calcular también como:

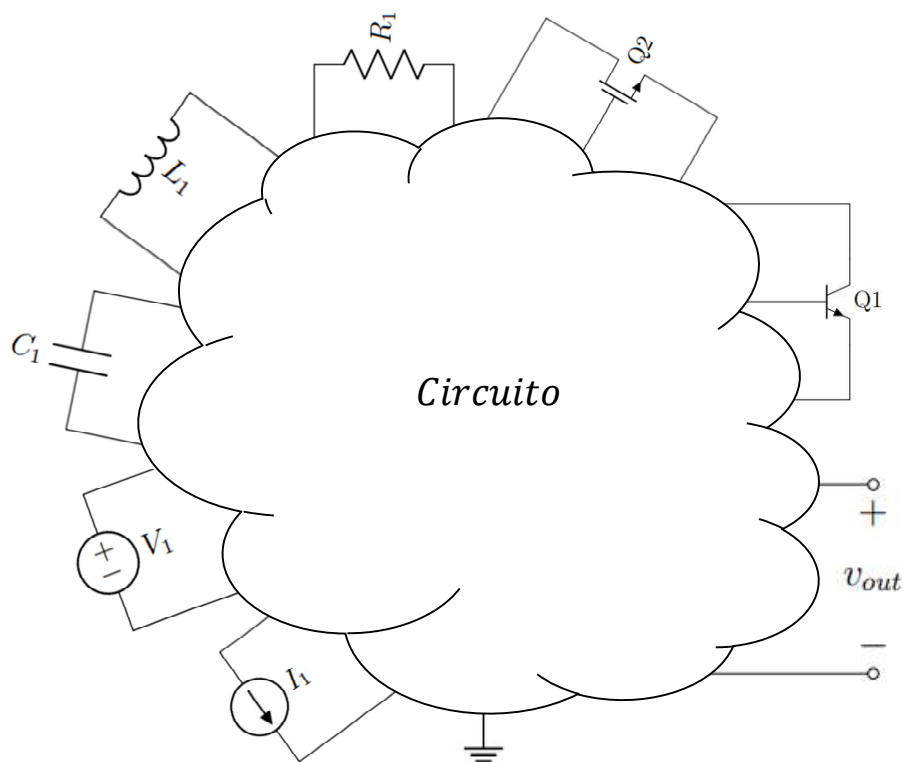
$$\sigma_{v_{out_n}}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} PSD_{v_{out_n}}(f) \cdot df$$

- Recuerden que, si pasáramos  $v_{out_n}$  a través de un filtro  $A(f)$ :

$$PSD_{filt.v_{out_n}}(f) = PSD_{v_{out_n}}(f) \cdot |A(f)|^2 \text{ y}$$

$$\sigma_{filt.v_{out_n}}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} PSD(f) \cdot |A(f)|^2 \cdot df$$

- Introducción a ruido



2C-2024

- Para obtener  $C_{vout_n}(\tau)$ , se trabaja en el espectro. Se busca obtener  $PSD_{vout_n}(f)$ . Para ello se deben sumar las contribuciones al ruido (se asumen independientes):

$$PSD_{vout_n}(f) = |T_{nR_1}(f)|^2 \cdot PSD_{nR_1}(f) + |T_{nQ_1}(f)|^2 \cdot PSD_{nQ_1}(f) + |T_{nQ_2}(f)|^2 \cdot PSD_{nQ_2}(f) + \dots$$

- Siendo  $T_{nE}(f)$  la transferencia de la fuente de ruido del elemento E a  $vout$  y  $PSD_{nE}(f)$  la densidad espectral de potencia de la fuente de ruido del elemento E.
- Nos proponemos estudiar las fuentes de ruido de los principales elementos: resistencias, transistores bipolares y mos.

- Tipos de Ruido

- Ruido Térmico:

- También llamado ruido blanco, es generado cuando energía térmica causa que electrones libres se muevan en forma aleatoria en un material resistivo. La densidad de potencia espectral es independiente de la frecuencia. Se asume una distribución Gaussiana.

- Shot Noise:

- Debido a tiempo de paso aleatorio de minoritarios atravesando una barrera de potencial. Al igual que el ruido térmico, se asume independiente a la frecuencia y con distribución gaussiana.

- Ruido Flicker:

- También llamado, ruido de contacto, ruido  $1/f$  o ruido rosa, este fenómeno es debido a imperfecciones en el contacto entre materiales conductores donde las cargas quedan atrapadas o liberadas en la interface. Es fuertemente dependiente de la frecuencia teniendo una densidad de potencia espectral del orden de  $K/f$ .

Ejemplos:

- Contactos de switches, potenciómetros o relés.
      - Debido al contacto de las partículas del material resistivo. Por ejemplo son mejores las de metal film versus las de carbón.
      - Transistores Bipolares y Mos presentan este tipo de ruido.

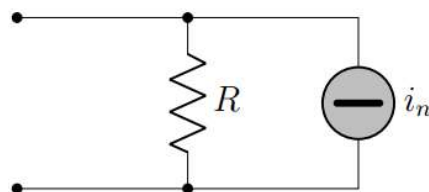
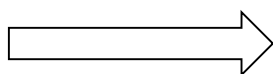
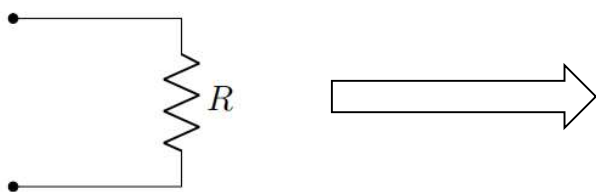
- Burst Noise:

- También conocido como popcorn noise, es causado por impurezas metálicas en junturas P-N. Puede ser minimizado mejorando el proceso de fabricación, es visto como pulsos de amplitud fija y ancho y repetición aleatorias.

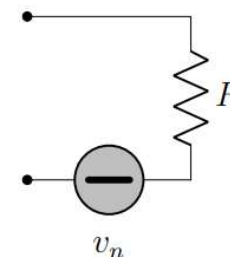
# Contenido Clase 12

- Ruido:
  - Introducción a ruido
  - Ruido en resistencias
  - Ruido en bipolares
  - Ruido en mos
  - Ruido en amplificadores
  - Técnicas de eliminación de offset y ruido flicker

- Ruido en resistencias



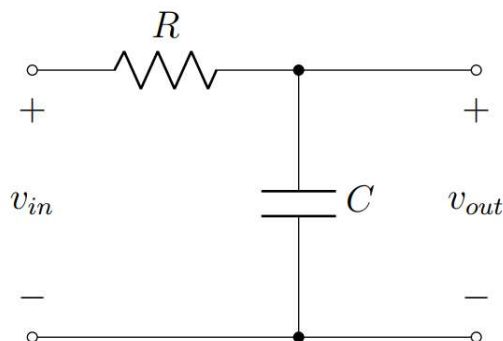
$$PSD_{i_n}(f) = \frac{4KT}{R}$$



$$PSD_{v_n}(f) = 4KTR$$

- Ruido en resistencias:
  - Generado únicamente por ruido térmico.
- La fuente de ruido se puede modelar indistintamente como una fuente de corriente o tensión con:
  - K: constante de Boltzman. Ej.  $1,380649 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ .
  - T: temperatura en grados Kelvin. Ej.  $T=300^\circ\text{K}$  ( $27^\circ\text{C}$ ).
  - R: resistencia del material. Ej.  $R = 1\text{K}\Omega$ .
  - Tomando los ejemplos:  $PSD_{v_n} \text{ at } 27^\circ\text{C} \approx 16.56 \frac{\text{nV}^2}{\text{Hz}}$  o  $4.07 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$  or  $PSD_{i_n} \text{ at } 27^\circ\text{C} \approx 16.56 \frac{\text{pA}^2}{\text{Hz}}$  o  $4.07 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$

- Ruido en resistencias

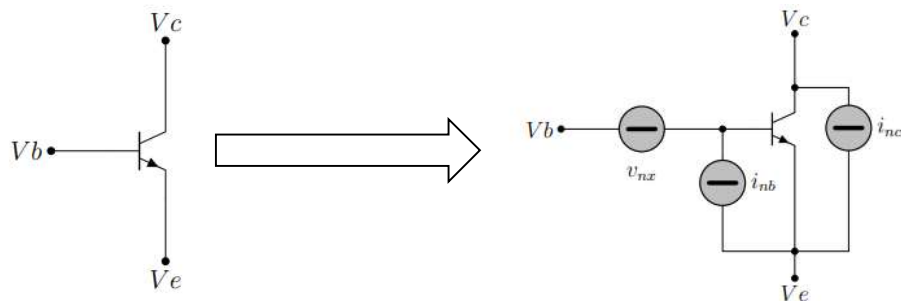


- Ejemplo:
  - Calcular el PSD y el sigma de ruido que introduce el filtro en  $v_{out}$ .
- Solución:
  - La única fuente de ruido es la resistencia R. Que introduce una fuente serie con:
    - $PSD_{v_n}(f) = 4KTR$
  - Luego, se debe calcular la transferencia de la fuente de ruido a la salida que es:
    - $\left| \frac{v_{out}}{v_n}(f) \right|^2 = \frac{1}{(1+(2\pi fR)^2)}$
  - Entonces:
    - $PSD_{v_{out}}(f) = \frac{4KTR}{(1+(2\pi fRC)^2)}$
  - Para encontrar la varianza debemos integrar:
    - $\sigma_{v_{out}}^2 = \int_0^\infty PSD_{v_{out}}(f) \cdot df = \frac{KT}{C}$

# Contenido Clase 12

- Ruido:
  - Introducción a ruido
  - Ruido en resistencias
  - Ruido en bipolares
  - Ruido en mos
  - Ruido en amplificadores
  - Técnicas de eliminación de offset y ruido flicker

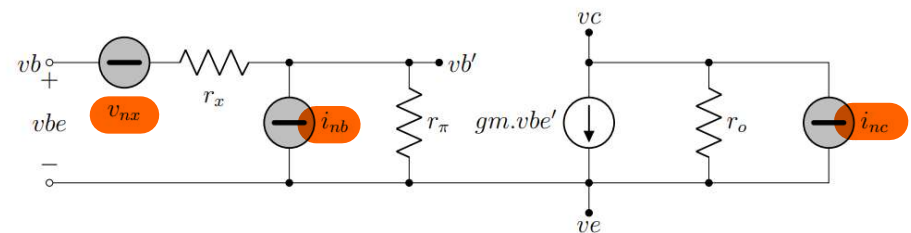
## • Ruido en bipolares



$$PSD_{v_{nx}}(f) = 4KTR_x$$

$$PSD_{i_{nb}}(f) = 2qI_B + K_1 \frac{I_B^a}{f} + K_2 \frac{I_B^c}{1 + (\frac{f}{f_c})^2} \approx 2KT \frac{g_m}{\beta}$$

$$PSD_{i_{nc}}(f) = 2qI_C = 2KT g_m$$

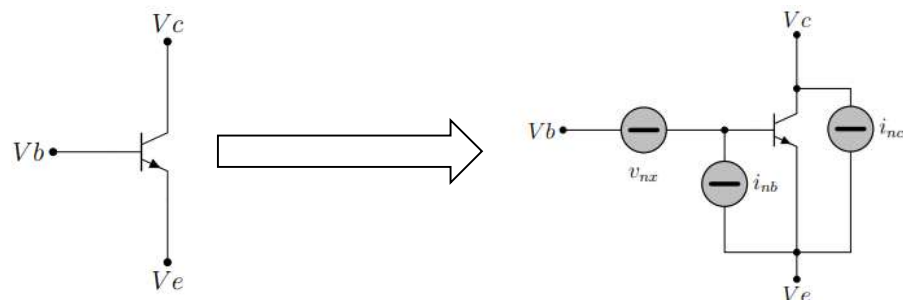


• El ruido del transistor bipolar proviene de varias fuentes:

- Ruido térmico que se produce en la resistencia física de base  $r_x$ . Se representa como  $v_{nx}$ .
- Shot noise de corriente de colector: debido a tiempo de paso aleatorio de minoritarios atravesando la juntura colector base. Se modelan con la corriente  $i_{nc}$ .
- Shot noise de corriente de base, junto con efectos experimentales como flicker y burst se agrupan en  $i_{nb}$ . Generalmente se desprecian los efectos flicker y burst.



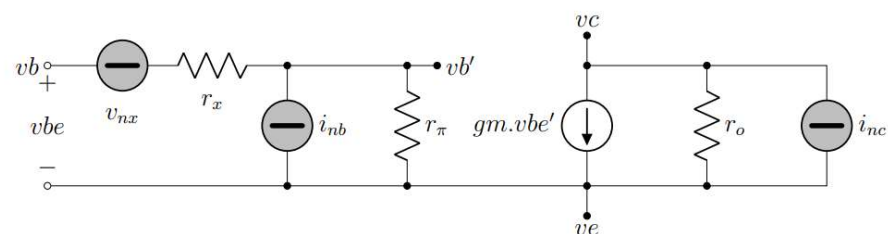
- Ruido en bipolares



$$PSD_{v_{nx}}(f) = 4KTR_x$$

$$PSD_{i_{nb}}(f) = 2qI_B + K_1 \frac{I_B^a}{f} + K_2 \frac{I_B^c}{1 + (\frac{f}{f_c})^2} \approx 2KT \frac{g_m}{\beta}$$

$$PSD_{i_{nc}}(f) = 2qI_C = 2KT g_m$$



- Los principales parámetros:

- K: constante de Boltzman:  $1,380649 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ .
- q: carga del electrón:  $1,602176565 \times 10^{-19} \text{ C}$ .
- T: temperatura en grados Kelvin. Ej.  $T=300^\circ\text{K}$  ( $27^\circ\text{C}$ ).
- Rx: resistencia de la difusión de la base. Ej.  $R = 25\Omega$ .
- Ib, Ic: corriente de base y de colector. Ej.  $I_b=100\text{nA}$  y  $I_c=10\mu\text{A}$ .
- gm: transconductancia. Ej.  $g_m=387 \mu\text{A/V}$  ( $27^\circ\text{C}$  and  $I_c 10\mu\text{A}$ ).
- $\beta$ : ganancia de Corriente  $I_c/I_b$ . Ej. 100 veces.
- f: frecuencia. Ej. 10Hz.
- Constantes del proceso  $K_2$ ,  $I_b^a$  y  $I_b^c$ .

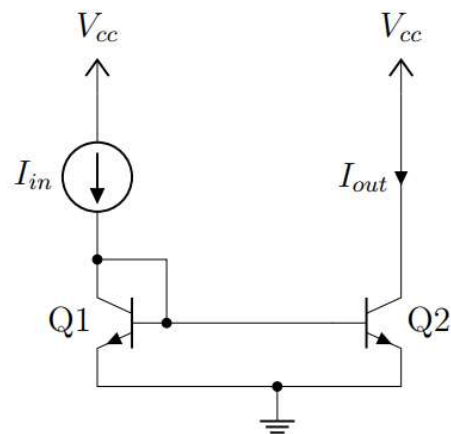
- Se puede calcular, tomando los ejemplos de los parámetros (despreciando flicker y burst):

- $PSD_{v_{nx}} \approx 0.41 \frac{\text{nV}^2}{\text{Hz}} \text{ o } 0.64 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$

- $PSD_{i_{nc}} \approx 3.2 \frac{\text{pA}^2}{\text{Hz}} \text{ o } 1.79 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$

- $PSD_{i_{nb}} \approx 0.03 \frac{\text{pA}^2}{\text{Hz}} \text{ o } 0.18 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$

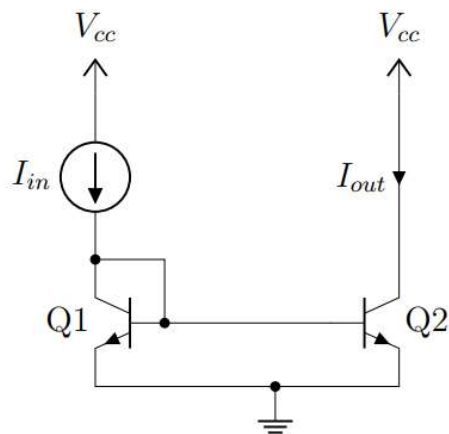
- Ruido en bipolares



$$Q_1 = Q_2$$

- Ejemplo:
  - Calcular el densidad espectral de ruido de  $I_{out}$  para frecuencias bajas y a  $27^\circ\text{C}$ , asumiendo  $I_{in} = 10\mu\text{A}$  y  $r_x = 25\Omega$ . ¿Se puede despreciar el ruido  $i_{nb}$ ? Despreciar corriente de flicker y burst.
- Solución:
  - Calculamos en pequeña señal para las fuentes de ruido de los elementos Q1 y Q2 para formar:
    - $PSD_{I_{out}}(f) = PSD_{I_{out}}^{i_{nc1}}(f) + PSD_{I_{out}}^{i_{nc2}}(f) + PSD_{I_{out}}^{i_{nb1}}(f) + PSD_{I_{out}}^{i_{nb2}}(f) + PSD_{I_{out}}^{v_{rx1}}(f) + PSD_{I_{out}}^{v_{rx2}}(f)$
  - Calculamos primer  $PSD_{I_{out}}^{i_{nc1}}(f)$  y  $PSD_{I_{out}}^{i_{nc2}}(f)$ 
    - $i_{out}^{i_{nc1}} = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} i_{nc1} = i_{nc1} \rightarrow PSD_{I_{out}}^{i_{nc1}}(f) = 2KTg_{m1} = 2KTg_m$
    - $i_{out}^{i_{nc2}} = i_{nc2} \rightarrow PSD_{I_{out}}^{i_{nc2}}(f) = 2KTg_{m2} = 2KTg_m$

- Ruido en bipolares



$$Q_1 = Q_2$$

- Solución (cont. slide anterior):

- Calculamos primer  $PSD_{i_{out}}^{i_{nb1}}(f)$  y  $PSD_{i_{out}}^{i_{nb}}(f)$

- $i_{out}^{i_{nb1}} = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} i_{nb1} = i_{nb1} \rightarrow PSD_{i_{out}}^{i_{nb1}}(f) = 2KT \frac{g_{m1}}{\beta}$

- $i_{out}^{i_{nb}} = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} i_{nb2} = i_{nb2} \rightarrow PSD_{i_{out}}^{i_{nb2}}(f) = 2KT \frac{g_{m2}}{\beta}$

- Como vemos son  $\beta$  veces menores que el ruido de la corriente de colector. Por lo tanto, podemos despreciar esta fuente de ruido.

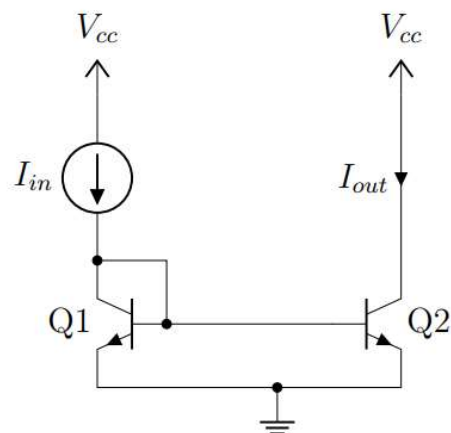
- Calculamos primer  $PSD_{i_{out}}^{v_{rx1}}(f)$  y  $PSD_{i_{out}}^{v_{rx2}}(f)$

- Despreciando  $r_x$  en el análisis de pequeña señal se obtiene:

- $i_{out}^{v_{rx1}} \approx g_{m2} v_{rx1} \rightarrow PSD_{i_{out}}^{v_{rx1}}(f) \approx 4KT r_x \cdot g_{m2}^2 = 4KT r_x \cdot g_m^2$

- $i_{out}^{v_{rx2}} \approx g_{m2} v_{rx2} \rightarrow PSD_{i_{out}}^{v_{rx2}}(f) \approx 4KT r_x \cdot g_{m2}^2 = 4KT r_x \cdot g_m^2$

- Ruido en bipolares



$$Q_1 = Q_2$$

- Solución (cont. slide anterior):

- Juntando todos los resultados:

- $PSD_{i_{out}}(f) = PSD_{i_{out}}^{i_{nc1}}(f) + PSD_{i_{out}}^{i_{nc2}}(f) + PSD_{i_{out}}^{v_{r_{x1}}}(f) + PSD_{i_{out}}^{v_{r_{x2}}}(f)$
- $PSD_{i_{out}}(f) = 2 * 4KT(g_m/2 + r_x \cdot g_m^2) = 4KTg_m(1 + 2 \cdot r_x \cdot g_m)$

- Calculamos  $g_m$  para 10uA: 400uA/V

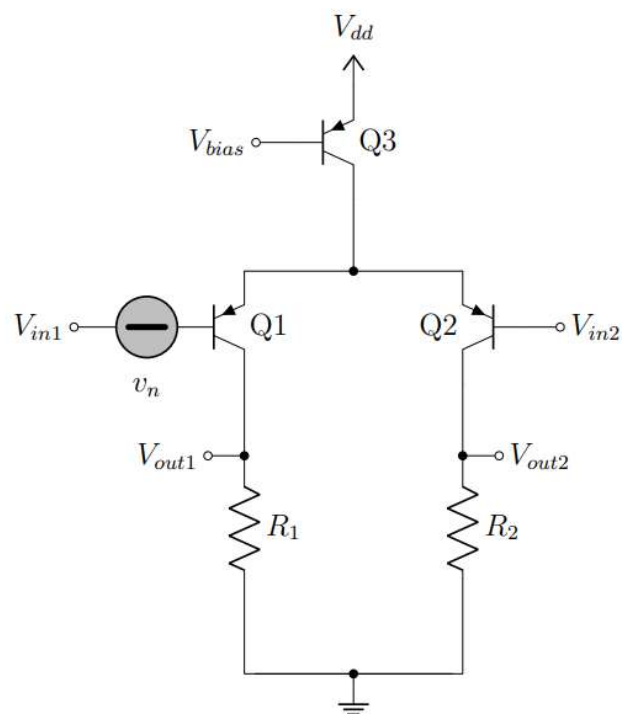
- Vemos que  $2 \cdot r_x \cdot g_m$  es  $\ll 1$

- $PSD_{i_{out}}(f) \approx 4KTg_m = 6.62 \frac{pA^2}{Hz}$  o  $2.57 \frac{pA}{\sqrt{Hz}}$

- Podemos pensar una resistencia equivalente de ruido:

- $\frac{4KT}{R_{eq}} = 4KTg_m$  obteniendo:  $R_{eq} = \frac{1}{g_m} = 2.5K\Omega$

- Ruido en bipolares



$$I_{c3} = I_{bias} = 2I_c; Q_1 = Q_2 \\ R_1 = R_2 = R$$

- Ejemplo:

- Calcular la densidad espectral de potencia a bajas frecuencias y a 27°C referida a la entrada  $v_n$ . Asumir  $I_{bias} = 20\mu A$ ,  $R = 48K\Omega$ ,  $r_x = 25\Omega$  y despreciar las corrientes de ruido flicker y burst.

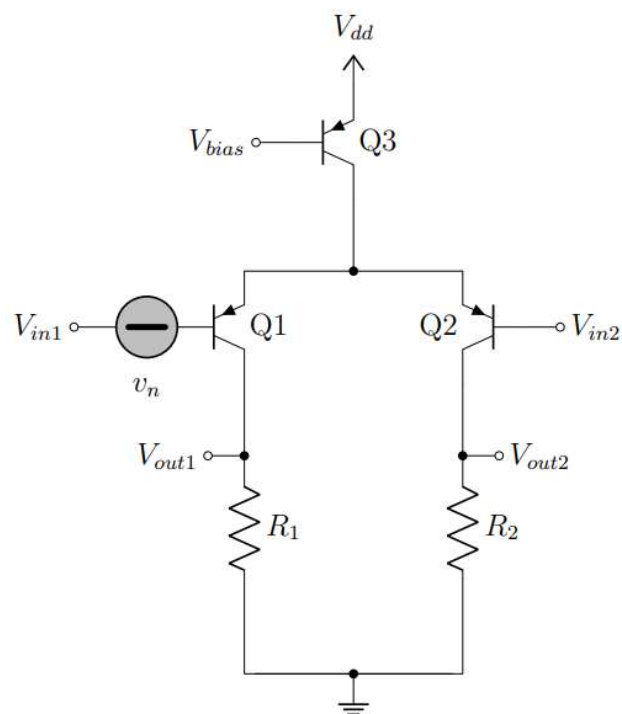
- Solución:

- La ganancia diferencial del circuito es:

$$\frac{v_{out2} - v_{out1}}{v_{diff}} = \frac{v_{out}}{v_{diff}} = g_{m_{diff}} R$$

- Los elementos que aportan al ruido son  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $R_1$  y  $R_2$ .
- $Q_3$  se puede despreciar dado que su aporte es de modo común.
- Dada la simetría del circuito podemos asumir que  $Q_1$  y  $Q_2$  aportan lo mismo, al igual que  $R_1$  y  $R_2$ .

- Ruido en bipolares



$$I_{c3} = I_{bias} = 2I_c; Q_1 = Q_2 \\ R_1 = R_2 = R$$

- Solución (cont. slide anterior):

- Para las resistencias tenemos que cada una aporta:

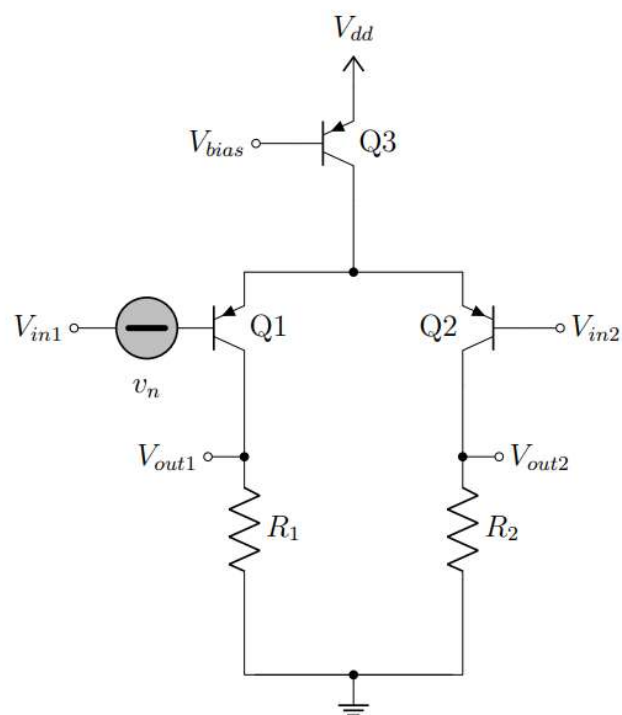
$$PSD_{v_n}^R(f) = \frac{4KTR}{(gm_{diff}R)^2} = \frac{4KT}{gm_{diff}(gm_{diff}R)}$$

- Para los bipolares:

- Dado que conectamos a tierra la entrada cuando calculamos la contribución a  $v_{out}$ , podemos decir que el aporte de ruido de las corrientes de base a la salida diferencial va a ser cero (quedan en corto-circuito con la tierra virtual en los emisores).
- Por otro lado el aporte de ruido de las resistencias de base queda directamente sumando a la entrada  $v_n$ .
- Por ultimo, para las corrientes de colector calculamos la transferencia a  $v_{out}$  y luego dividimos por la ganancia diferencial al cuadrado:

$$PSD_{v_n}^Q(f) = 4KTr_x + \frac{2KTgm_{diff}R^2}{(gm_{diff}R)^2} = 4KT\left(r_x + \frac{1}{2g_{diff}}\right)$$

- Ruido en bipolares



$$I_{c3} = I_{bias} = 2I_c; Q_1 = Q_2$$

$$R_1 = R_2 = R$$

- Solución (cont. slide anterior):

- De lo encontrado

- $$PSD_{v_n}^R(f) = \frac{4KTR}{(gm_{diff}R)^2} = \frac{4KT}{gm_{diff}(gm_{diff}R)}$$

- $$PSD_{v_n}^Q(f) = 4KT r_x + \frac{2KT gm_{diff} R^2}{(gm_{diff}R)^2} = 4KT \left( r_x + \frac{1}{2 gm_{diff} R} \right)$$

- Podemos obtener:

- $$PSD_{v_n}(f) = 2 \cdot (PSD_{v_n}^R(f) + PSD_{v_n}^Q(f))$$

- $$PSD_{v_n}(f) = 2 \cdot 4KT \left( r_x + \frac{1}{gm_{diff} R} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{gm_{diff} R} \right) \right)$$

- Calculamos:

- $$gm_{diff} \approx \frac{10 \mu A}{25 mV} = 400 \frac{\mu A}{V} \rightarrow \frac{1}{400 \frac{\mu A}{V}} = 2.5 K\Omega \gg 2 \cdot r_x$$

- $$\frac{v_{out}}{v_{diff}} = gm_{diff} R = 19.2 \gg 2$$

- $$PSD_{v_n}(f) \approx \left( \frac{4KT}{gm_{diff}} \right) = 41.1 \frac{nV^2}{Hz} \text{ or } 6.43 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$$

- $$R_{eq} = \frac{1}{gm_{diff}} = 2.5 K\Omega$$

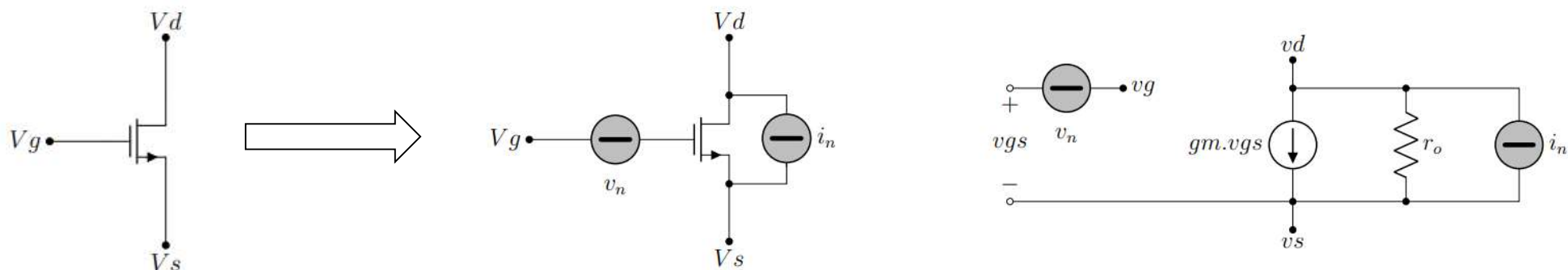
# Contenido Clase 12

- Ruido:
  - Introducción a ruido
  - Ruido en resistencias
  - Ruido en bipolares
  - Ruido en mos
  - Ruido en amplificadores
  - Técnicas de eliminación de offset y ruido flicker



- Ruido en mos

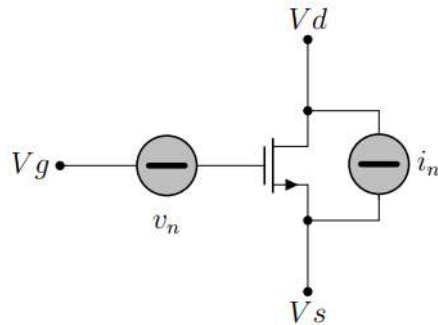
$$PSD_{i_n}(f) = 4KT \frac{2}{3} g_m ; PSD_{v_n}(f) = \frac{K_f}{w \cdot l \cdot c_{ox} \cdot f}$$



- Ruido en mos en saturación compuesto por dos efectos:
  - Ruido térmico  $PSD_{i_n}(f)$
  - Ruido flicker  $PSD_{v_n}(f)$
- Para el caso de que el mos esta en la zona óhmica, el ruido se modela como a un resistor.

- El ruido se puede agrupar en  $v_n$  dividiendo  $i_n$  por  $g_m$ . Teniendo en ese caso:
  - $PSD_{v_n}(f) = PSD_{v_n}(f) + \frac{1}{g_m^2} PSD_{i_n}(f)$
- Del mismo modo, el ruido se puede agrupar en  $i_n$  multiplicando  $v_n$  por  $g_m$ . Teniendo en ese caso:
  - $PSD_{v_n}(f) = g_m^2 \cdot PSD_{v_n}(f) + PSD_{i_n}(f)$

- Ruido en mos



$$PSD_{i_n}(f) = 4KT \frac{2}{3} g_m ; PSD_{v_n}(f) = \frac{K_f}{w \cdot l \cdot c_{ox} \cdot f}$$

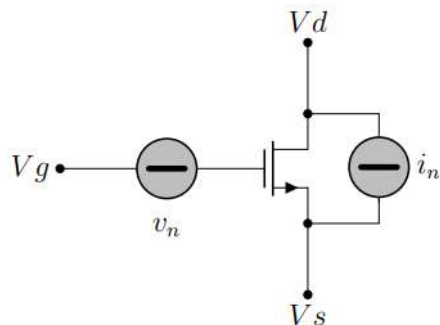
- Para  $PSD_{i_n}$  tenemos:

- K: constante de Boltzman. Ej.  $1,380649 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ .
- T: temperatura en grados Kelvin. Ej.  $300^\circ\text{K}$  ( $27^\circ\text{C}$ ).
- $g_m$ : Transconductancia. Ej.  $200 \text{ uA/V}$ .
- Tomando los ejemplos:  $PSD_{i_n} \text{ at } 27^\circ\text{C} \approx 2.2 \frac{\text{pA}^2}{\text{Hz}}$  or  $1.48 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$

- Para  $PSD_{v_n}$  tenemos:

- $K_f$ : Constante dependiente del proceso . Ej.  $10^{-25} \text{ V}^2\text{F}$
- $c_{ox}$ : capacidad por unidad de área del mos. Ej.  $4 \text{ fF/um}^2$ .
- w: ancho del canal. Ej.  $10 \text{ um}$ .
- l: largo del canal. Ej.  $10 \text{ um}$ .
- F: frecuencia. Ej.  $10 \text{ Hz}$ .
- Tomando los ejemplos:  $PSD_{v_n} \text{ at } 10 \text{ Hz} \approx 0.025 \frac{\text{uV}^2}{\text{Hz}}$  o  $0.158 \frac{\text{uV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
- Referido en corriente(asumiendo  $g_m=200 \text{ uA/V}$ ):
  - $PSD_{i_n}^{fl} \text{ at } 10 \text{ Hz} = g_m^2 PSD_{v_n} \approx 1000 \frac{\text{pA}^2}{\text{Hz}}$  o  $31.6 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$

- Ruido en mos



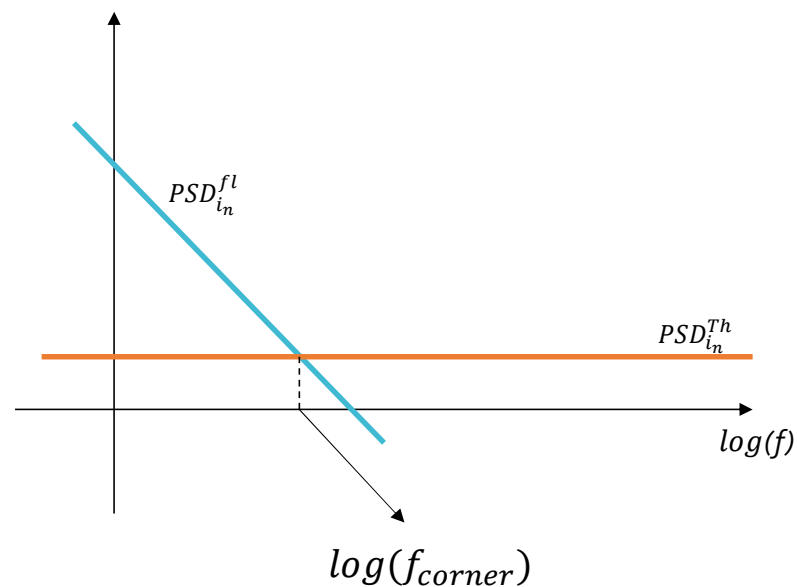
$$PSD_{i_n}(f) = 4KT \frac{2}{3} g_m ; PSD_{v_n}(f) = \frac{K_f}{w \cdot l \cdot c_{ox} \cdot f}$$

- Se define **corner frequency** a la frecuencia en la que se encuentran:

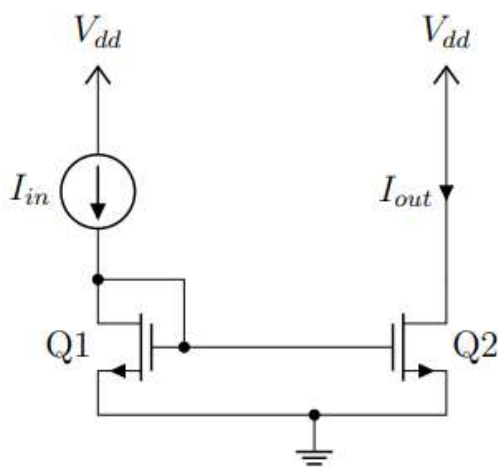
- $PSD_{i_n}^{Th}(f_{corner}) = PSD_{i_n}^{fl}(f_{corner})$
- $KT \frac{2}{3} g_m = g_m^2 \frac{K_f}{w \cdot l \cdot c_{ox} \cdot f_{corner}} \xrightarrow{\text{despejando}} f_{corner} = \frac{3g_m \cdot K_f}{2KT \cdot w \cdot l \cdot c_{ox}}$

- Del ejemplo anterior encontramos:

- $PSD_{i_n}^{fl}(f_{corner}) = \frac{10000 \frac{pA^2}{Hz}}{f_{corner}} = PSD_{i_n}^{Th}(f_{corner}) = 2.2 \frac{pA^2}{Hz}$
- $f_{corner} \approx 4.5Khz$



- Ruido en mos



$$Q_1 = Q_2$$

- Ejemplo:

- Calcular el densidad espectral de ruido de  $I_{out}$  para frecuencias bajas y a  $27^\circ\text{C}$ , asumiendo  $I_{in} = 10\mu\text{A}$ ,  $K = 120\mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $V_t = 0.7\text{V}$ ,  $w = l = 10\mu\text{m}$  y despreciar ruido flicker.

- Solución:

- Calculamos en pequeña señal para las fuentes de ruido de los elementos  $Q_1$  y  $Q_2$  para formar:

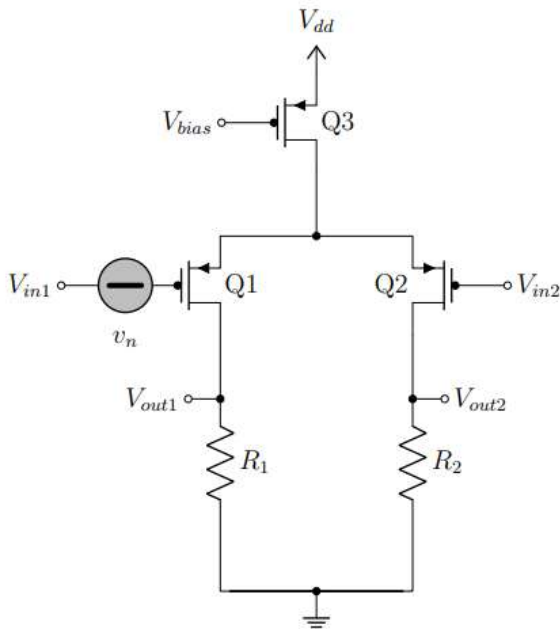
- $PSD_{i_{out}}(f) = PSD_{i_{out}}^{i_{n1}}(f) + PSD_{i_{out}}^{i_{n2}}(f)$
- Calculamos primer  $PSD_{i_{out}}^{i_{n1}}(f)$  y  $PSD_{i_{out}}^{i_{n2}}(f)$
- $i_{out}^{i_{n1}} = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} i_{n1} = i_{n1} \rightarrow PSD_{i_{out}}^{i_{n1}}(f) = \frac{8}{3} KT g_{m1} = \frac{8}{3} KT g_m$
- $i_{out}^{i_{n2}} = i_{n2} \rightarrow PSD_{i_{out}}^{i_{n2}}(f) = \frac{8}{3} KT g_{m2} = \frac{8}{3} KT g_m$
- $PSD_{i_{out}}(f) = \frac{16}{3} KT g_m = g_m = 34\mu\text{A}/\text{V} = 0.75 \frac{\text{pA}^2}{\text{Hz}} \text{ o } 0.86 \frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$

- Podemos pensar una resistencia equivalente de ruido:

- $\frac{4KT}{R_{eq}} = \frac{16}{3} KT g_m$  obteniendo:  $R_{eq} = \frac{3}{4g_m} = 22\text{K}\Omega$

- Consideren que para la misma corriente con bipolar:  $R_{eq} = 2.5\text{K}\Omega$

- Ruido en mos



$$I_{d3} = I_{bias}; Q_1 = Q_2$$

$$R_1 = R_2 = R$$

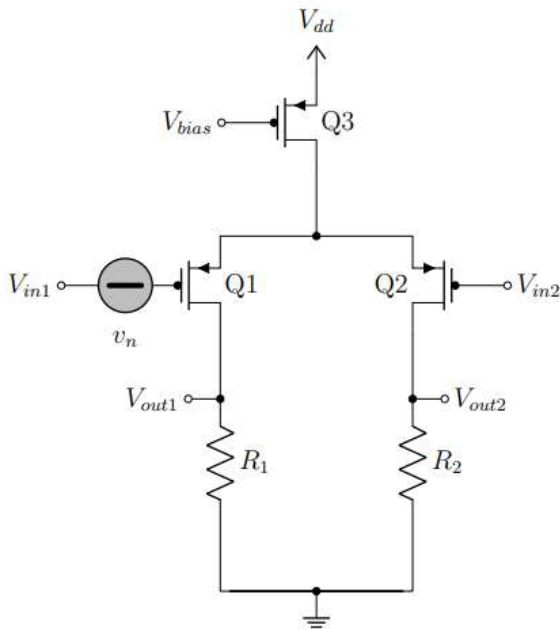
- Ejemplo:

- Calcular la densidad espectral de potencia a bajas frecuencias y a 27°C referida a la entrada  $v_n$ . Asumir  $I_{bias} = 20\mu A$ ,  $R = 48K\Omega$ ,  $K = 40\mu A/V^2$ ,  $V_t = 0.7V$ ,  $w = 40\mu m$ ,  $l = 2.5\mu m$  y despreciar ruido flicker.

- Solución:

- La ganancia diferencial del circuito es:
  - $\frac{V_{out2} - V_{out1}}{V_{diff}} = \frac{\Delta V_{out}}{V_{diff}} = g_{m_{diff}} R$
- Los elementos que aportan al ruido son  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $R_1$  y  $R_2$ .
- $Q_3$  se puede despreciar dado que su aporte es de modo común.
- Dada la simetría del circuito podemos asumir que  $Q_1$  y  $Q_2$  aportan lo mismo, al igual que  $R_1$  y  $R_2$ .

- Ruido en mos



$$I_{d3} = I_{bias}; Q_1 = Q_2$$

$$R_1 = R_2 = R$$

- Solución (cont. slide anterior):

- Para las resistencias tenemos que cada una aporta:

$$PSD_{v_n}^R(f) = \frac{4KTR}{(gm_{diff}R)^2} = \frac{4KT}{gm_{diff}(gm_{diff}R)}$$

- Para Q1 y Q2:

- Calculamos la transferencia a  $v_{out}$  y luego dividimos por la ganancia diferencial al cuadrado:

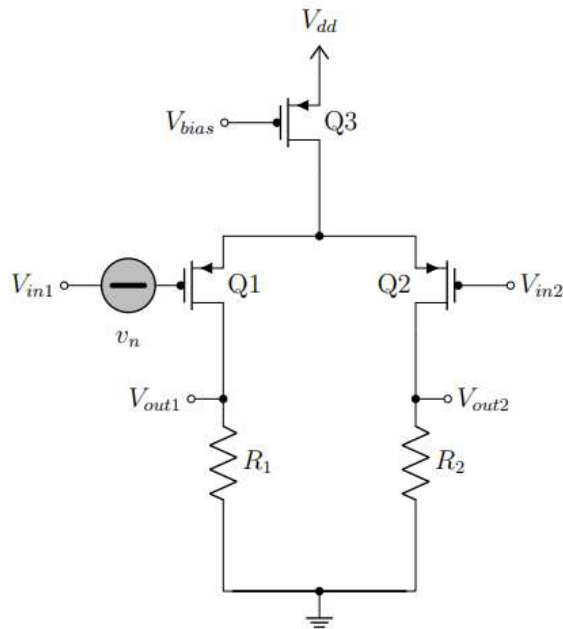
$$PSD_{v_n}^Q(f) = \frac{8/3 \cdot KT g_{diff} R^2}{(gm_{diff}R)^2} = 4KT \left( \frac{2}{3gm_{diff}} \right)$$

- Podemos obtener:

$$PSD_{v_n}(f) = 2 \cdot \left( PSD_{v_n}^R(f) + PSD_{v_n}^Q(f) \right)$$

$$PSD_{v_n}(f) = 2 \cdot 4KT \left( \frac{1}{gm_{diff}} \left( \frac{2}{3} + \frac{1}{gm_{diff}R} \right) \right)$$

- Ruido en mos



$$I_{d3} = I_{bias}; Q_1 = Q_2$$

$$R_1 = R_2 = R$$

- Solución (cont. slide anterior):

- Podemos obtener:

- $PSD_{v_n}(f) = 2 \cdot \left( PSD_{v_n}^R(f) + PSD_{v_n}^Q(f) \right)$
- $PSD_{v_n}(f) = 2 \cdot 4KT \left( \frac{1}{gm_{diff}} \left( \frac{2}{3} + \frac{1}{gm_{diff}R} \right) \right)$

- Calculamos:

- $gm_{diff} = \sqrt{\frac{I_{bias}}{2} \cdot \frac{2K_p W}{l}} = 80 \mu A/V$
- $\frac{v_{out}}{v_{diff}} = gm_{diff}R \approx 3.8$
- $PSD_{v_n}(f) \approx 4KT \cdot \left( \frac{1.85}{gm_{diff}} \right) \approx 382.9 \frac{nV^2}{Hz} \text{ or } 19.5 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
- $R_{eq} = \frac{1.85}{gm_{diff}} = 23.12 K\Omega$

- Comparando con bipolar:  $R_{eq} = 2.5 K\Omega$

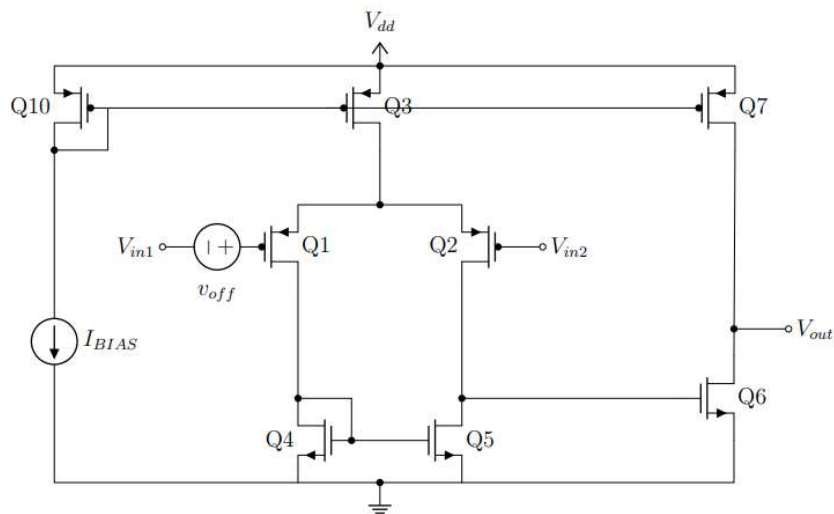
# Contenido Clase 12

- Ruido:
  - Introducción a ruido
  - Ruido en resistencias
  - Ruido en bipolares
  - Ruido en mos
  - Ruido en amplificadores
  - Técnicas de eliminación de offset y ruido flicker



- Offset de amplificadores

- $w_{10} = w_3 = w_8 = 10 \mu m; w_7 = \frac{w_3}{2}$
- $w_4 = w_5 = w_6 = 10 \mu m$
- $w_1 = w_2 = 80 \mu m$
- all  $l = 4 \mu m$



- Ejemplo:

- Calcular el sigma de  $v_n$  del amplificador. Asumiendo:  $\sigma_{V_t}^P = 25 \text{ mV} \cdot \mu m$ ,  $K_n = 120 \mu A/V^2$ ,  $K_p = 40 \mu A/V^2$ ,  $V_t = 0.7V$ ,  $\lambda = 0.08 \mu m/V$  y  $I_{bias} = 10 \mu A$ . No considerar el ruido flicker.

- Solución:

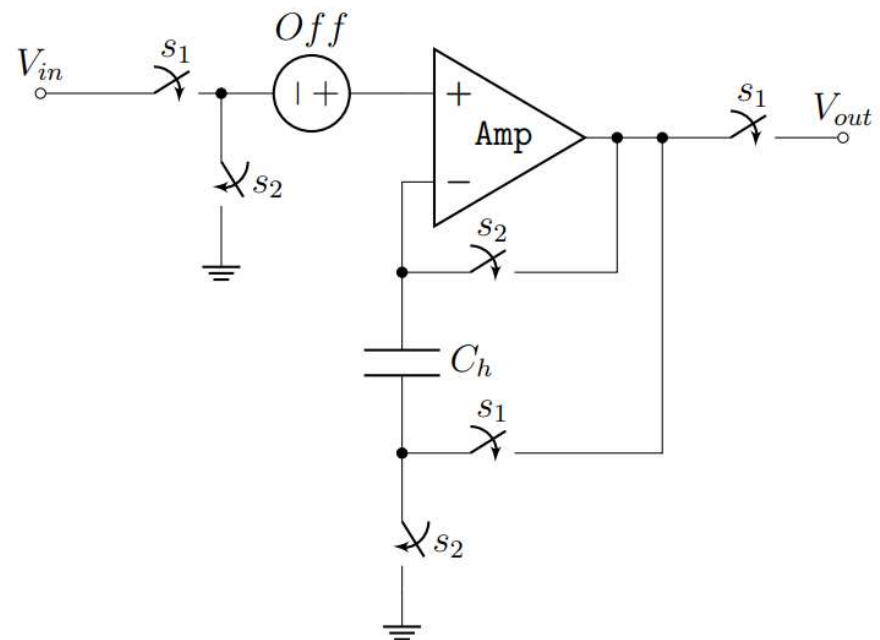
# Contenido Clase 12

- Ruido:
  - Introducción a ruido
  - Ruido en resistencias
  - Ruido en bipolares
  - Ruido en mos
  - Ruido en amplificadores
  - Técnicas de eliminación de offset y ruido flicker

- Técnicas de eliminación de offset y ruido flicker

- Técnica de Autozero:

- El objetivo es muestrear el offset y el ruido de bajas frecuencias (esencialmente el flicker).
- Requiere dos fases:
  - Fase A: se muestrea el offset en el capacitor  $C_h$  cerrando los switches  $S_2$
  - Fase B: Se conecta la entrada a la salida y el offset se substraee.
- Dado que la  $V_{out}$  no esta presente en forma continua, normalmente se samplea la salida.
- Dado que se muestrea el amplificador una vez previo a presentar la salida, el sigma del ruido térmico puede ser hasta raíz de 2 veces mayor de lo que seria sin eliminar el offset y samplear la salida.



- Técnicas de eliminación de offset y ruido flicker

- Técnica de Autozero: Ejemplo1

- En la fase A, se cierran los switches S2 y el sistema fuerza la salida a cero absorbiendo la corriente generada por la fuente voff, guardando el estado en el capacitor Ch:

- $$(v_{off}g_{m1} - (v_o \cdot A \cdot g_{m2}) \cdot r_o) = v_o$$

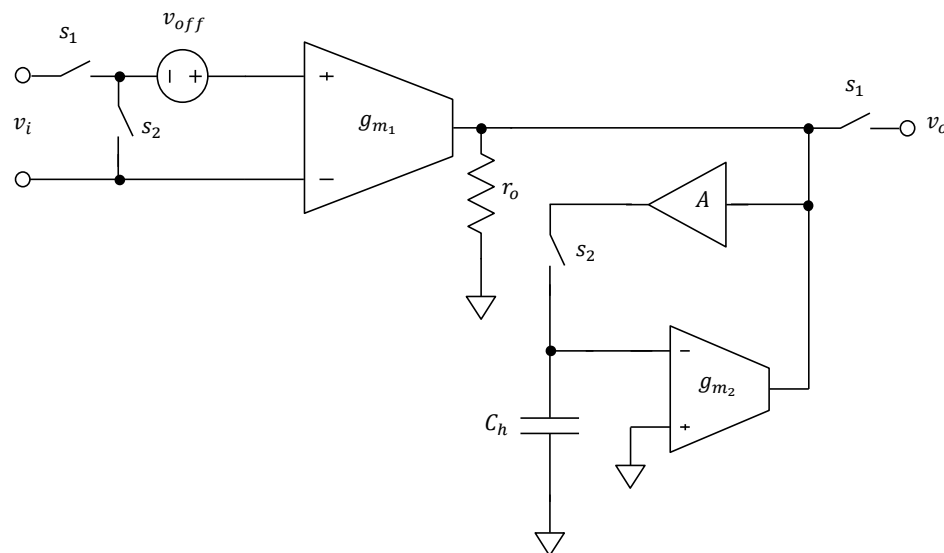
$$v_o = \frac{r_o g_{m1}}{1 + A \cdot g_{m2} r_o} \cdot v_{off} \approx \frac{g_{m1}}{A \cdot g_{m2}} \cdot v_{off}$$

- Sin aplicar esta técnica:

- $$v_o = g_{m1} r_o \cdot v_{off}$$

- Mejora:

- $$\frac{v_{off}}{v_{off}} = \frac{v_{out}}{v_{out}} = \frac{g_{m1} r_o \cdot v_{off}}{\frac{g_{m1}}{A \cdot g_{m2}} \cdot v_{off}} = A \cdot g_{m2} \cdot r_o$$



- Técnicas de eliminación de offset y ruido flicker

- Técnica de Autozero: Implementación Ejemplo1

- En la fase A, se cierran los switches S2 y el sistema fuerza la salida a Vdd/2:

- $$(v_{off}gm_1 - (v_o + v'_{off}) \cdot gm'_1) \cdot r_o = v_o \text{ and } r_o = r_{o6} \parallel r_{o7}$$

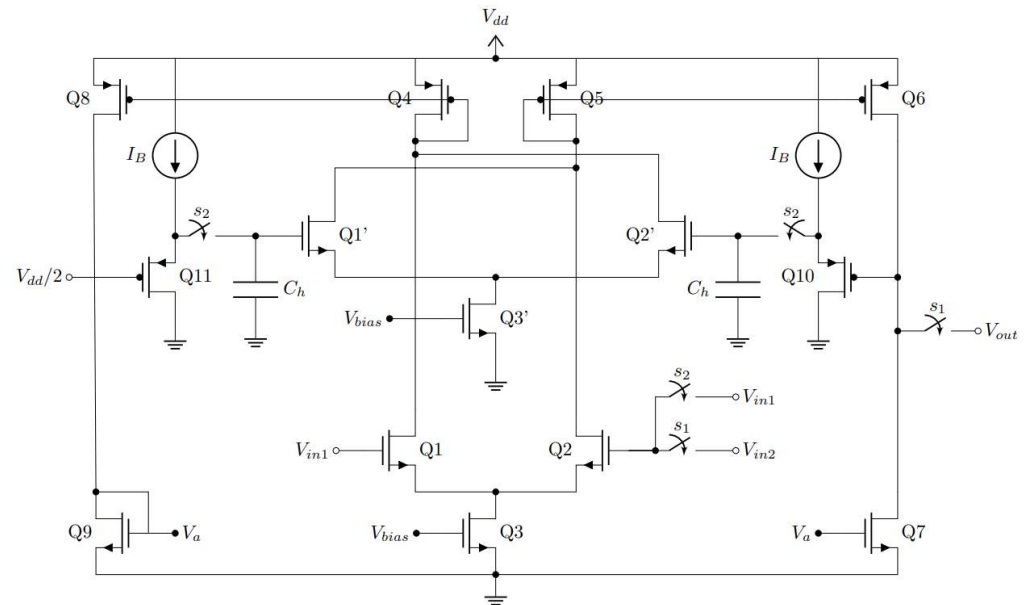
- $$v_o = \frac{r_o \cdot (gm_1 v_{off} + gm'_1 v'_{off})}{1 + gm'_1 r_o} \approx \frac{gm_1}{gm'_1} v_{off} + v'_{off}$$

- Sin aplicar esta técnica:

- $$v_o = gm_1 r_o \cdot v_{off}$$

- Mejora:

- $$\frac{v_{off}}{v_{off}^{comp}} = \frac{v_{out}}{v_{out}^{comp}} = \frac{gm_1 r_o \cdot v_{off}}{gm'_1 v_{off} + v'_{off}} = gm_1 = gm'_1 \frac{gm_1 r_o}{2}$$



- $Q_8 = Q_4 = Q_5 = Q_6$
- $Q_9 = Q_7; Q_{11} = Q_{10}$
- $Q_1 = Q_2; Q'_1 = Q'_2$
- $Id'_3 = I'_{bias}$
- $Id_3 = I_{bias}$
- $v_{off}$ : offset referido a la entrada del amplificador
- $v'_{off}$ : offset referido a la entrada del circuito auxiliar ( $Q'_1, Q'_2, Q_{11}, Q_{10}$  y Bias)

- Técnicas de eliminación de offset y ruido flicker

- Técnica de Chopper:

- La idea es modular la entrada a la frecuencia  $f_{ch}$  para separarla de  $v_{off}$  y del ruido de baja frecuencia.
- Luego se amplifica la señal junto con el ruido, se demodula pasando de vuelta la señal a banda base y corriendo  $v_{off}$  a  $f_{ch}$ .
- Finalmente, se filtra para remover  $v_{off}$ .
- Esta técnica permite tener la señal de forma continua a la salida.

