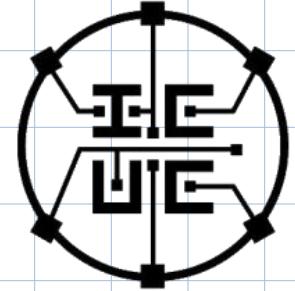




5.01



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

El transistor bipolar: otra válvula de corriente

Dependencias:

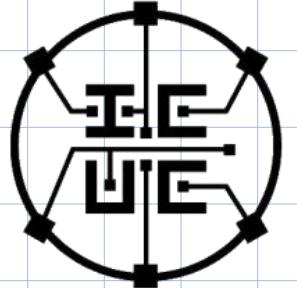
- 1.14 Curva (recta) de carga
- 1.16 Rieles de alimentación de un circuito

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

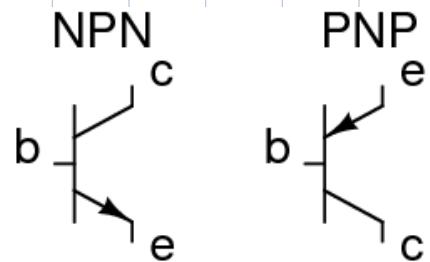
El BJT: primer transistor de uso masivo

- BJT significa **transistor bipolar de unión** y está formado por un sandwich de regiones NPN o PNP
 - También se le llama transistor bipolar
- El BJT puede operar como **fuente dependiente**, por lo que corresponde a un **elemento circuitual activo**
- El BJT también puede operar como **interruptor** controlado por voltaje
- Es posible fabricar hasta **cientos de BJTs** en un solo chip, así como también es posible integrarlos con MOSFETs en procesos llamados Bi-CMOS (por bipolar y CMOS)



Tres regiones de operación

| Región de Operación | Característica |
|---------------------|---|
| Corte | Transistor apagado, switch abierto, alta resistencia, no deja pasar corriente |
| Activa | Transistor conduce y su corriente es sensible al voltaje entre terminales (VCCS), puede ser usado como amplificador |
| Saturación* | Transistor encendido, switch cerrado, presenta baja resistencia |

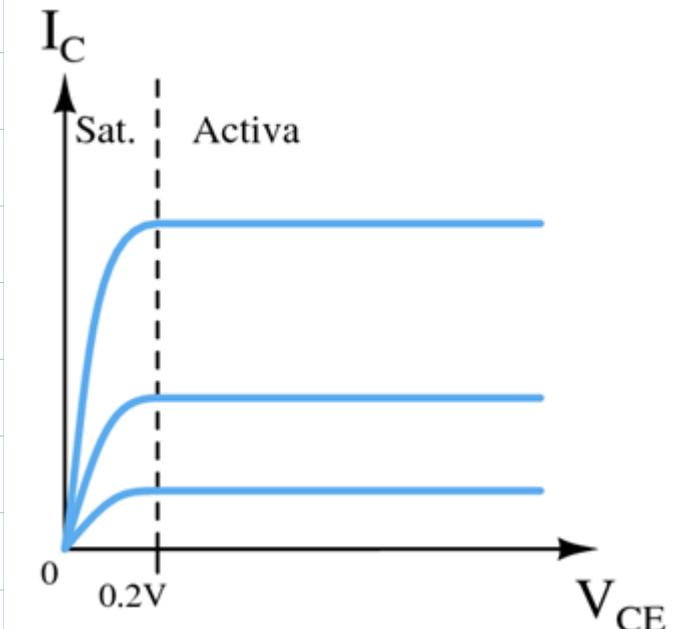


En región activa

$$I_C \approx I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$I_C = \beta I_B$$

* ¡Cuidado! Ésta corresponde a la región de triodo en el MOSFET

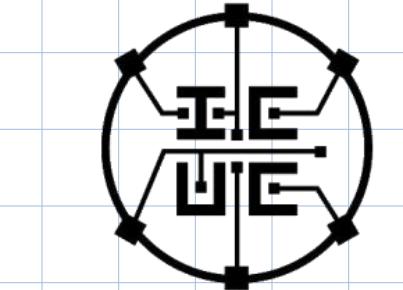


¿Para qué sirve? Veamos aplicaciones

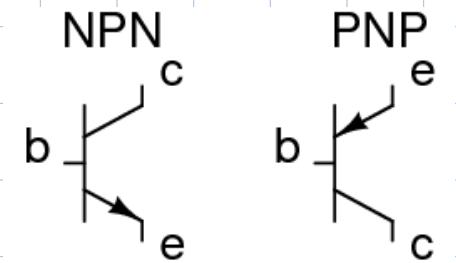
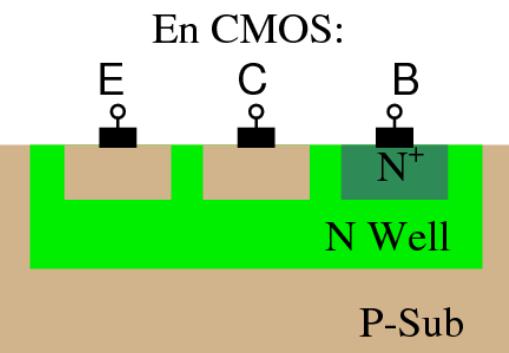
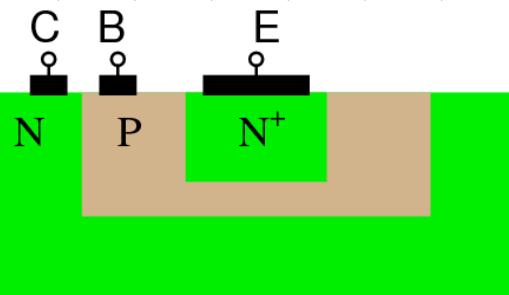
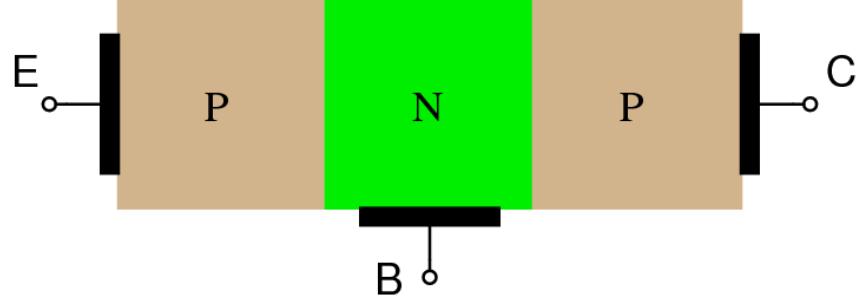
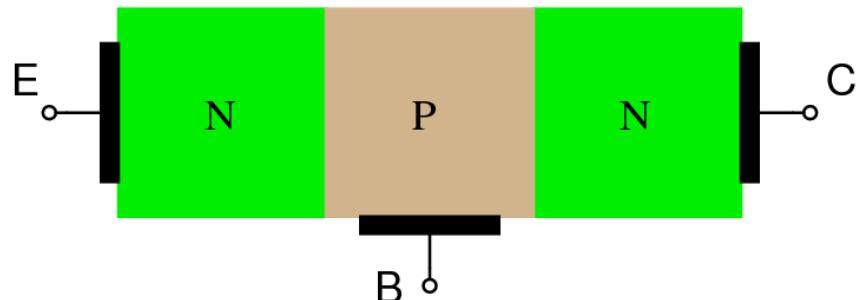
Conociendo el BJT

Tres Terminales:

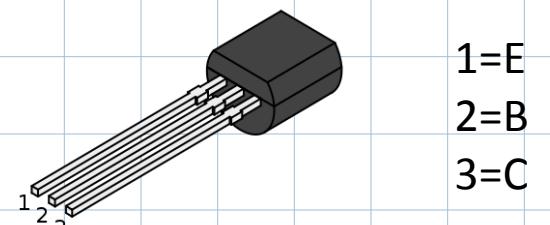
- + base, cuya corriente I_B o voltaje V_{be} controla otra corriente
- + colector, a través del cual circula corriente I_C
- + emisor, a través del cual circula corriente I_E



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



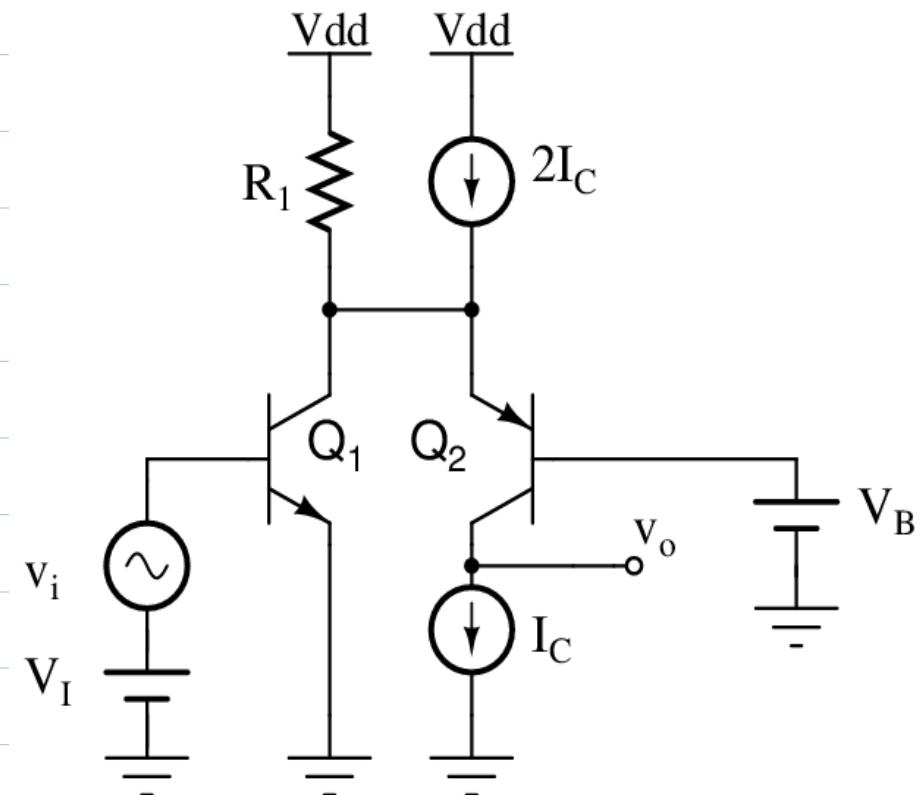
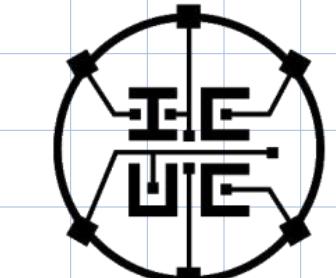
BJT discreto



[Foto: Dominio público]

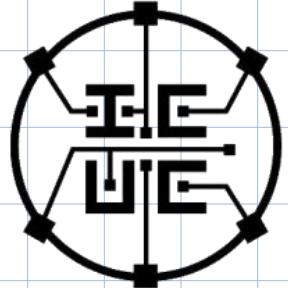
Amplificación

- Mediante BJTs, es posible construir amplificadores de diversos tipos
- Con amplificadores, es posible construir casi todos los bloques circuitales que uno se pueda imaginar



Interruptores

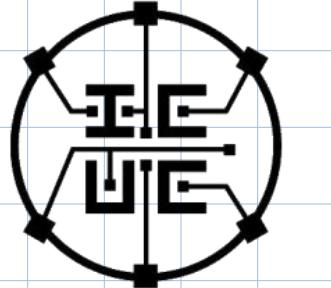
- El BJT como interruptor puede servirnos para implementar diferentes aplicaciones:
 - Compuertas lógicas (ej: TTL)
 - Encendido y apagado de cargas circuitales
 - Amplificador clase D
 - Etc.
- El BJT ha perdido protagonismo en operación como interruptor frente a las mejores características del MOSFET



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

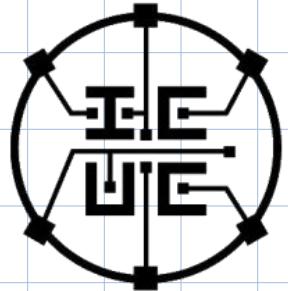
¿Qué veremos en este capítulo?

- Estructura del BJT y curvas características
- Funcionamiento del BJT en diferentes regiones de operación
- Modelos matemáticos para el BJT
 - Modelo incremental del BJT
- Polarización de un BJT
- Espejos de corriente
- Amplificadores elementales y variantes
- El BJT como interruptor
- Capacitancias de los BJTs





5.02



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

BJT vs MOSFET

Dependencias:

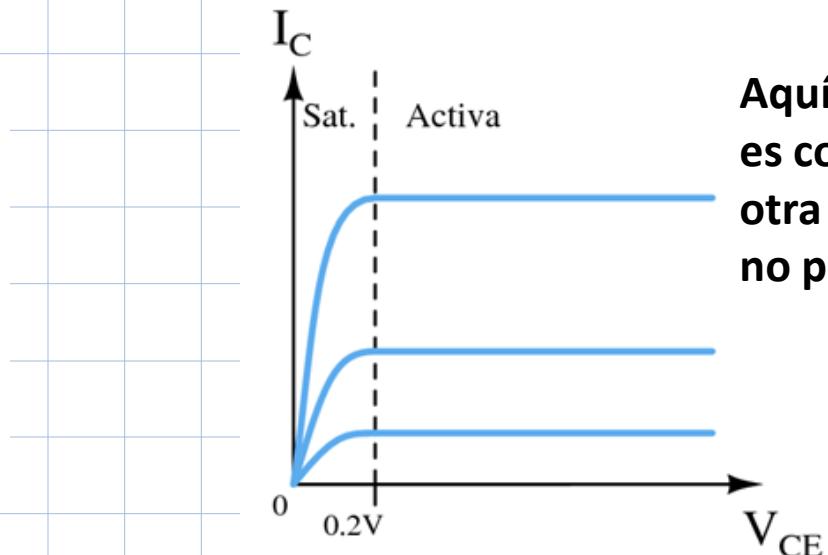
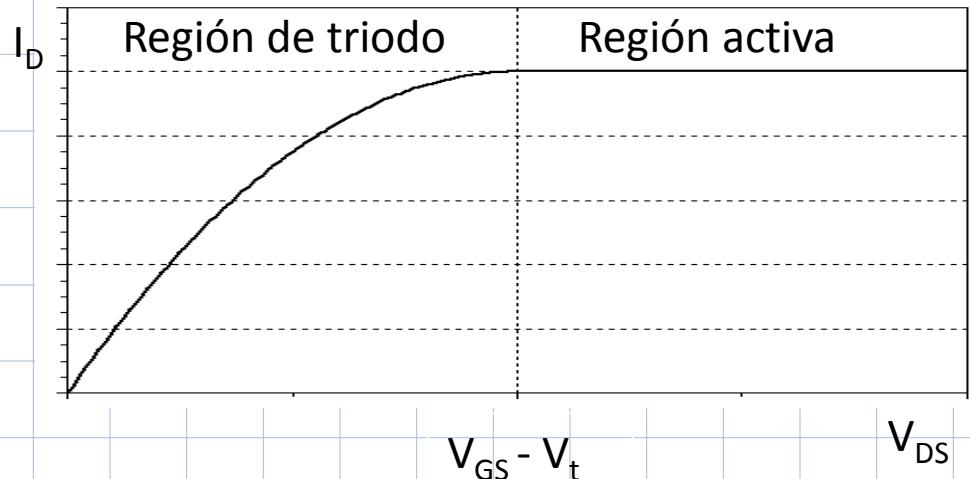
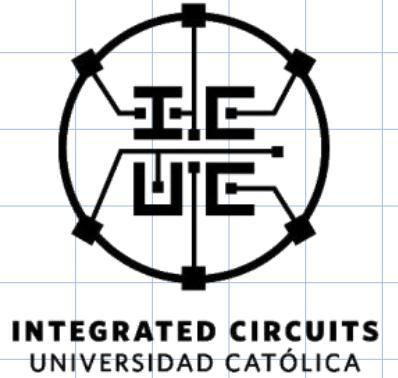
- 4.05 El MOSFET en región activa
- 5.01 El transistor bipolar: otra válvula de corriente

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

Ambos son válvulas de corriente controladas por un tercer terminal...

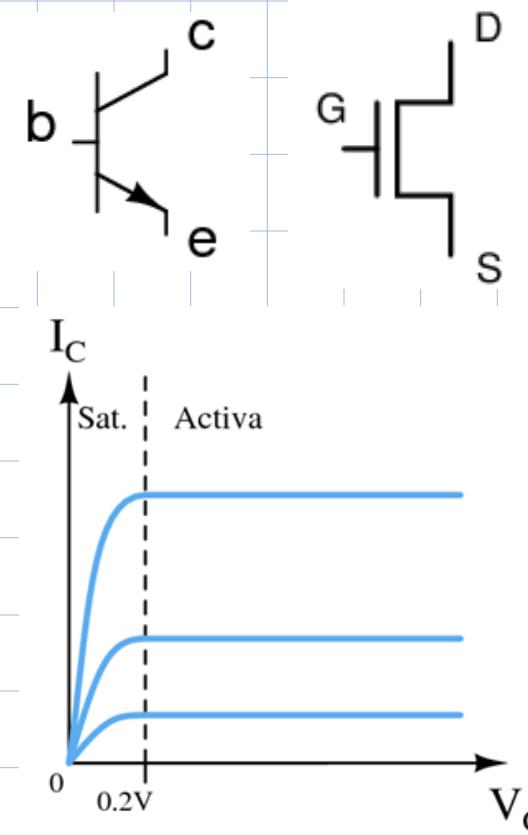
- Ambos tienen tres regiones de operación parecidas
 - Pero su funcionamiento es distinto
 - Y su costo de fabricación también
 - Y por supuesto, su desempeño también
- Ambos tienen su propio modelo no lineal y sus propios modelos de capacitancias parásitas



Aquí la corriente es controlada por otra corriente, y no por un voltaje

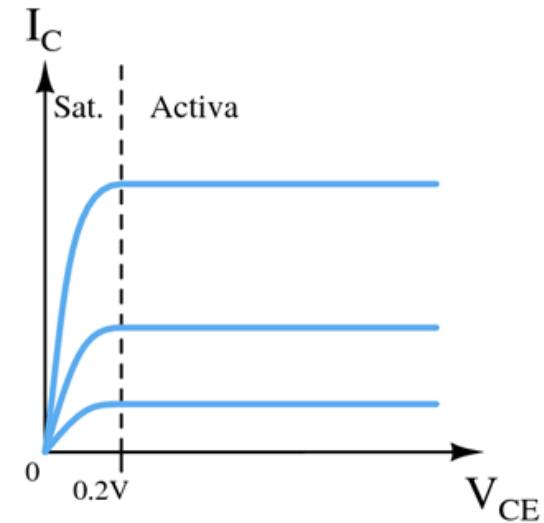
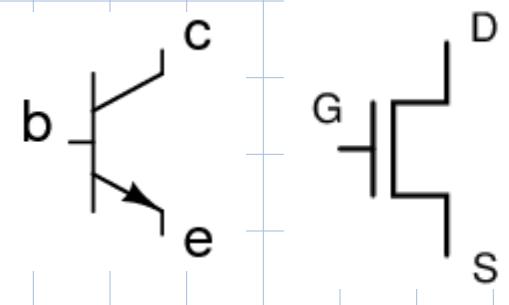
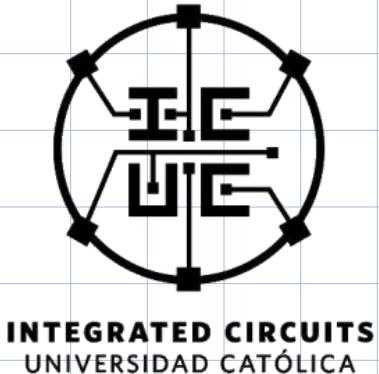
Diferencias cualitativas

- Una **diferencia cualitativa funcional** entre MOSFET y BJT está en su corriente de base
 - La corriente de base no es despreciable y afecta al circuito que fija el voltaje de base
 - **En región activa,** $I_B = I_C/\beta$
 - En cambio, el MOSFET idealmente no tiene corriente DC de compuerta y por lo tanto su polarización es más sencilla



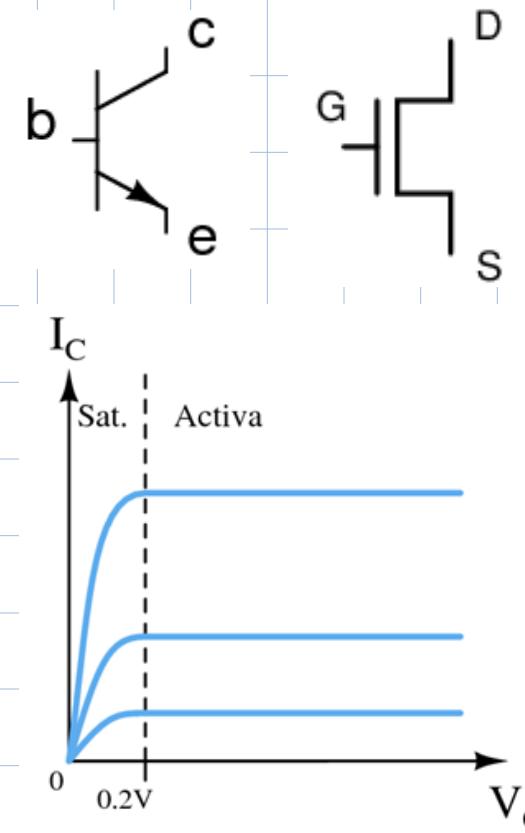
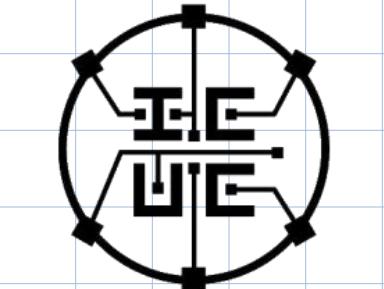
Más diferencias cualitativas

- **Otra diferencia cualitativa funcional** está en que el MOSFET es simétrico y cuando su corriente es 0 en triodo (switch cerrado), $V_{DS} = 0$
 - En cambio, el BJT operando como switch cerrado tiene caída de tensión entre colector y emisor, que depende de la corriente de base, resultando en mayor resistencia de switch cerrado
 - Esto tiene consecuencias: no es posible construir compuertas lógicas tan sencillas con BJTs (non-restoring logic)



Otra diferencia importante

- El MOSFET puede tener cualquier voltaje entre compuerta y fuente V_{GS}
 - De hecho, la diferencia $V_{GS} - V_T$ es el voltaje de overdrive V_{OV}
- En cambio, el BJT tiene un voltaje bien definido entre base y emisor, V_{BE}
 - Dado que resulta de la unión PN en base emisor, está restringida al voltaje de un diodo, 0.6-0.7 V en silicio



Eficiencia como transconductor

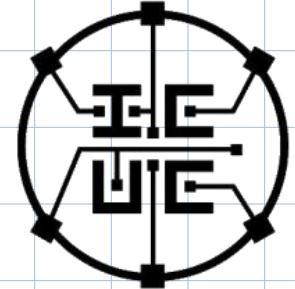
- El BJT es más eficiente que el MOSFET en cuanto a que produce mayor transconductancia por unidad de corriente
- **¿Cuánta transconductancia entrega un MOSFET por unidad de corriente?**



Aprenderemos más adelante que el BJT es mejor que el MOSFET en esta cifra de desempeño



5.03



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Estructura del BJT

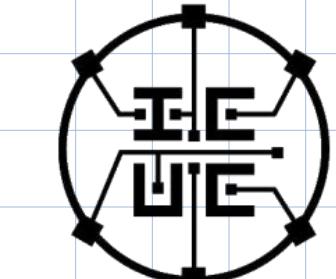
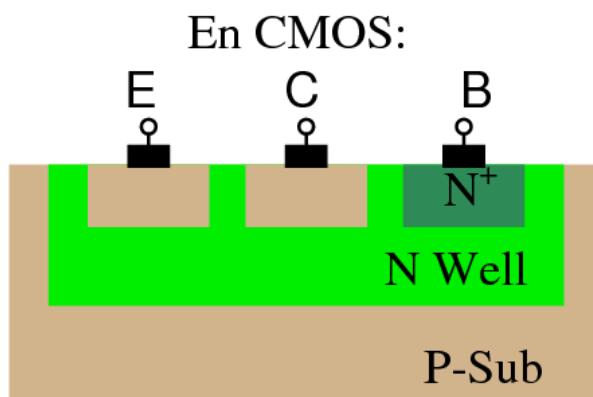
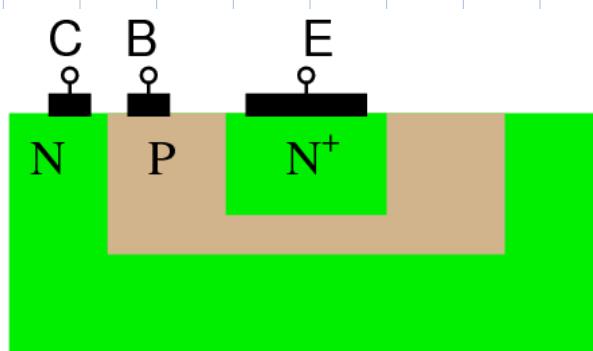
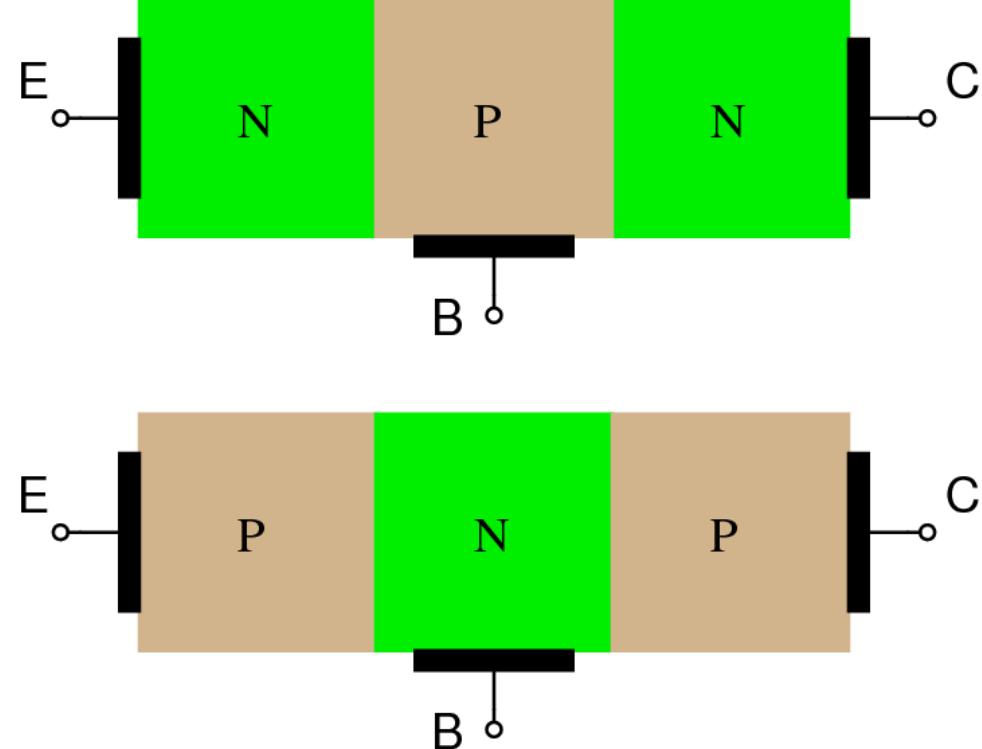
Dependencias:

- 5.01 El transistor bipolar: otra válvula de corriente

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

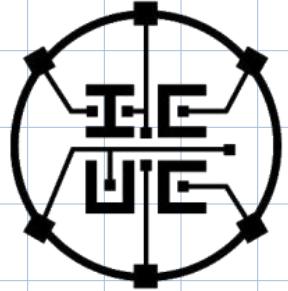
Estructura física del BJT



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

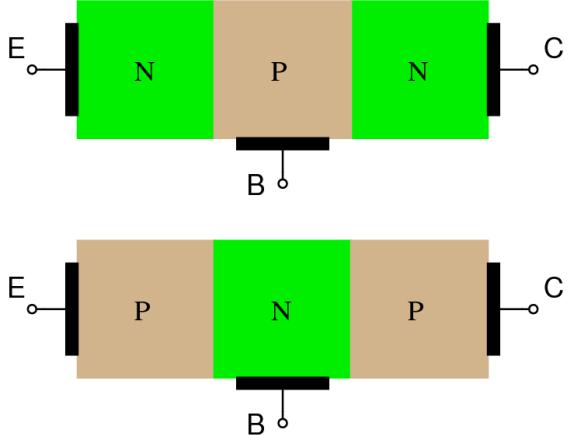
- Emisor altamente dopado
- Base muy delgada
- Gran superficie de colector

Regiones de operación y polarización de uniones



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

| Región de Operación | Unión B – E (EBJ) | Unión C – B (CBJ) |
|---------------------|-------------------|-------------------|
| Corte | Inversa | Inversa |
| Activa | Directa | Inversa |
| Saturación* | Directa | Directa |
| Inverso | Inversa | Directa |

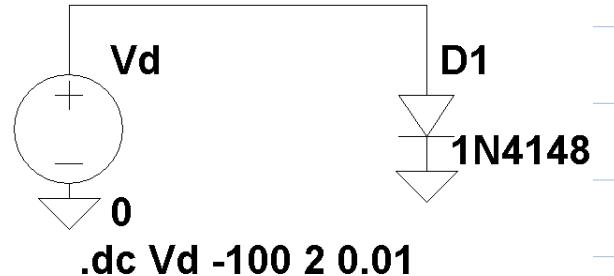
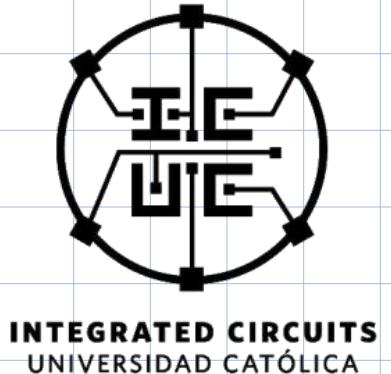
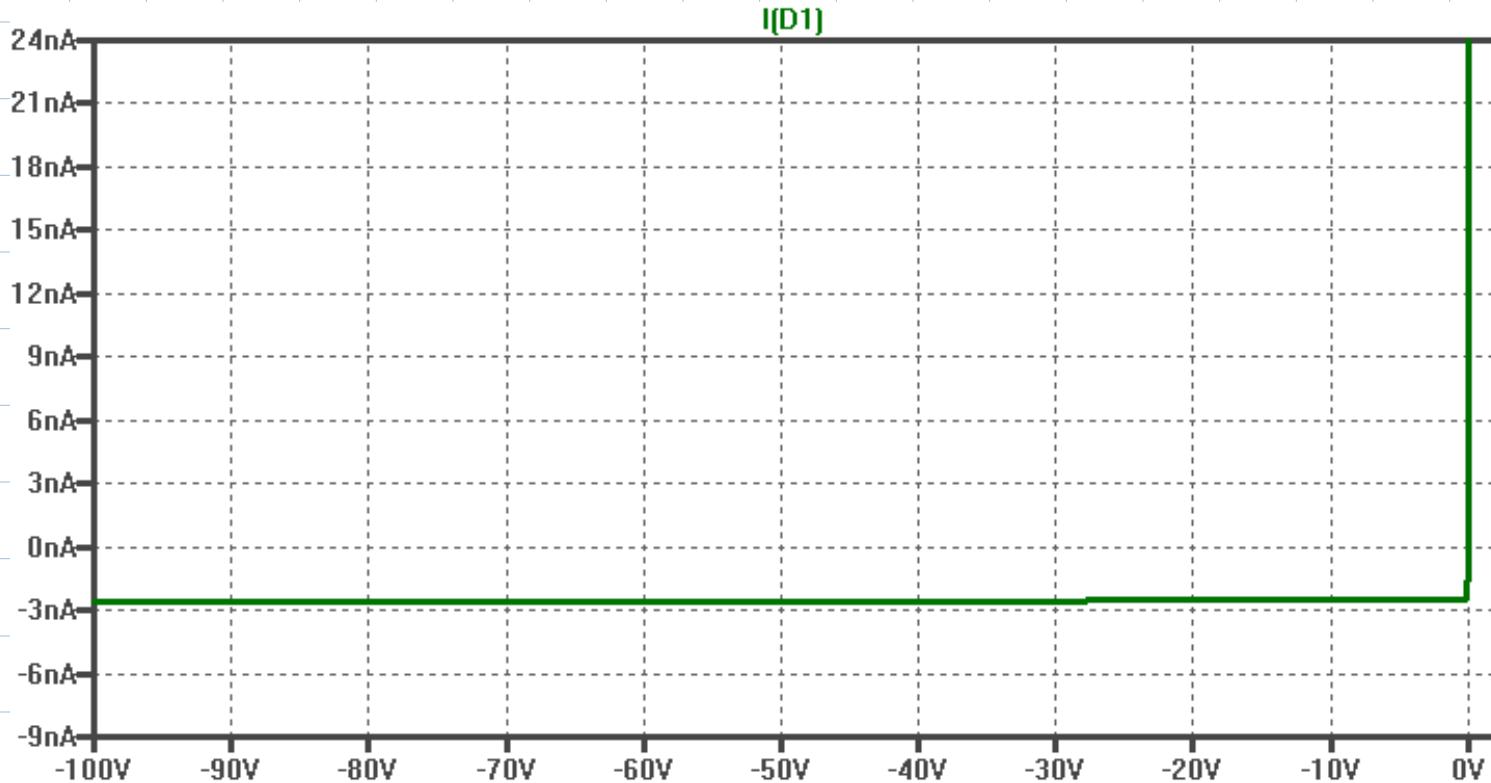


Antes de continuar con el modelo de BJT

Para amplificar, necesitamos una fuente de corriente controlada por voltaje (recuerden $G_{m\text{eff}}$). Tratemos de hacer una fuente de corriente ideal usando semiconductores. Más adelante vincularemos esto con el BJT...

Operación intuitiva en región activa

Recordemos la unión PN en polarización inversa:
es como una pequeña fuente de corriente

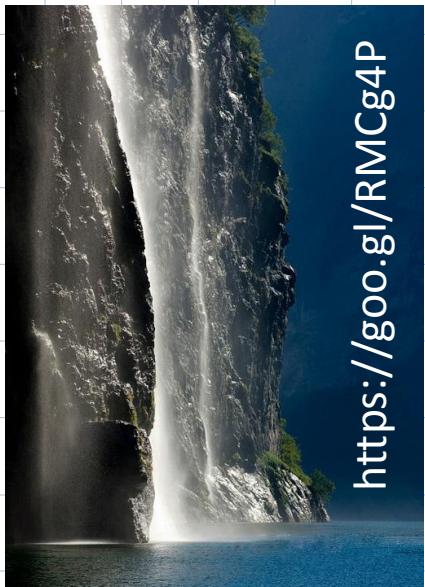


¿Y si pudiéramos
aumentar y controlar
esa corriente mediante
un tercer terminal?

Analogía

Una cascada

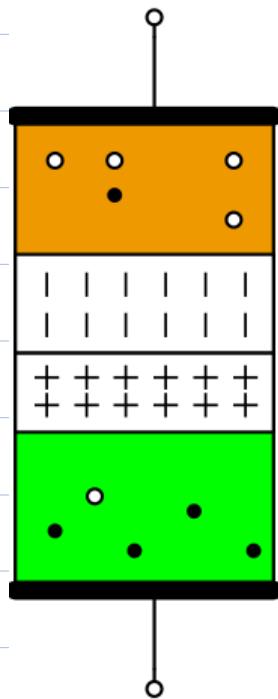
El caudal de agua de una cascada depende de la cantidad de agua que llega al borde, y no de la altura de la cascada



Una cascada es como una fuente de corriente constante

Una unión PN c/pol. inv.

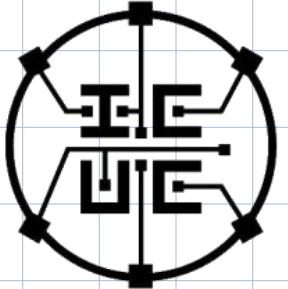
La corriente depende de portadores minoritarios que aparecen al borde de la región de agotamiento, y no de la diferencia de potencial



Concepto de
“cascada” de
portadores de
carga

Corriente en unión PN inversa

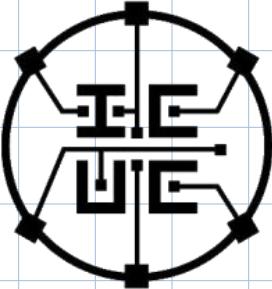
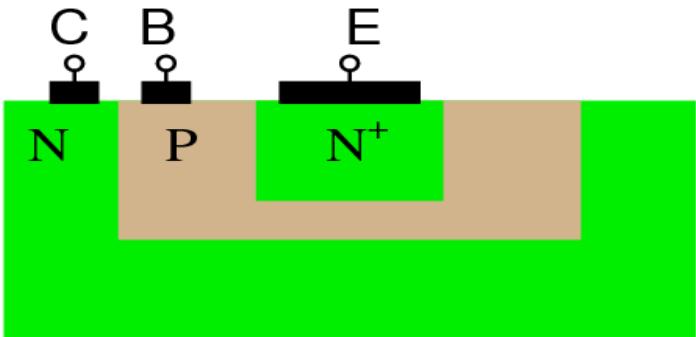
- Es corriente de fuga
- Depende del # de portadores minoritarios que aparecen al borde de la cascada
 - podemos aumentar esta corriente aplicando luz o calor, para generar más portadores minoritarios
 - Ej: Fotodiodo
 - o podemos inventar un modo de **inyectar portadores minoritarios** de manera controlada, de manera que la corriente dependa de un voltaje (VCCS)
- Una forma de inyectar una corriente de portadores minoritarios como función de un voltaje es mediante una unión PN directa
 - Entonces tenemos dos uniones PN, una directa y una inversa, compartiendo la región P



Haciendo un transistor

Para que el transistor sea funcional, queremos lo siguiente:

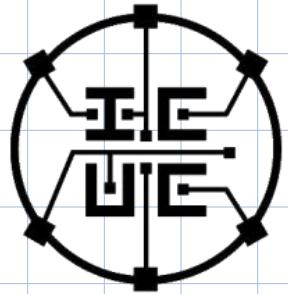
- El emisor debe estar **fueramente dopado** para que la corriente base-emisor sea principalmente de electrones
- La base debe ser **muy delgada**, para que los electrones que van hacia el colector no alcancen a recombinarse
 - por eso es que dos diodos espalda con espalda no funcionan como un BJT
- La superficie base-colector debe ser **grande** para facilitar la recolección de electrones antes de que éstos se recombinen



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



5.04



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

El BJT en región activa

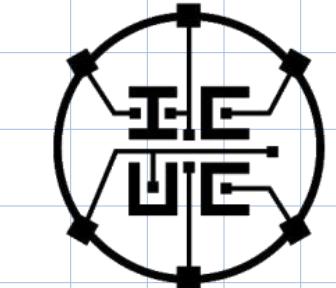
Dependencias:

- 5.03 Estructura del BJT

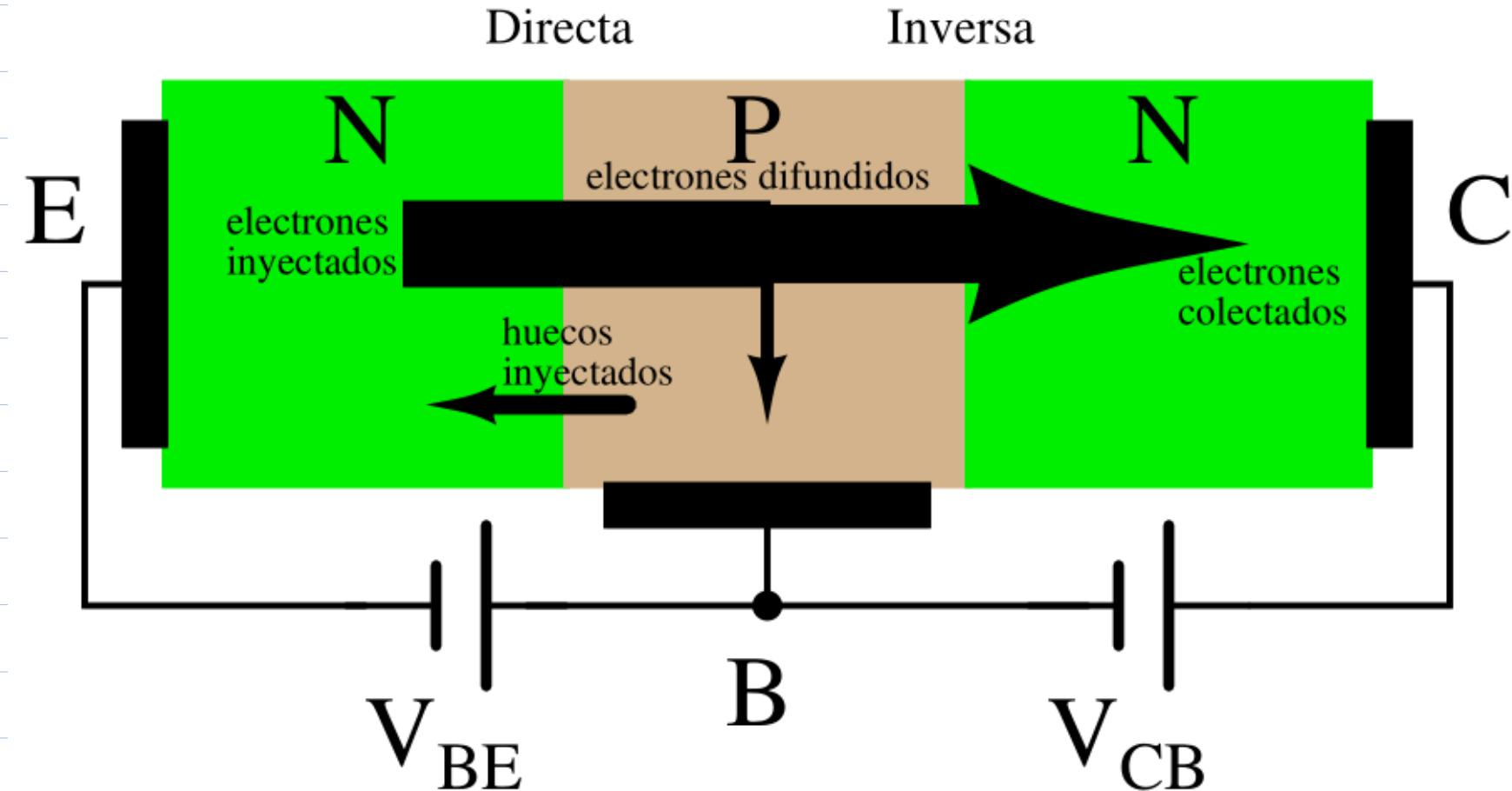
angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

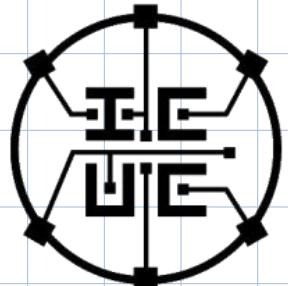
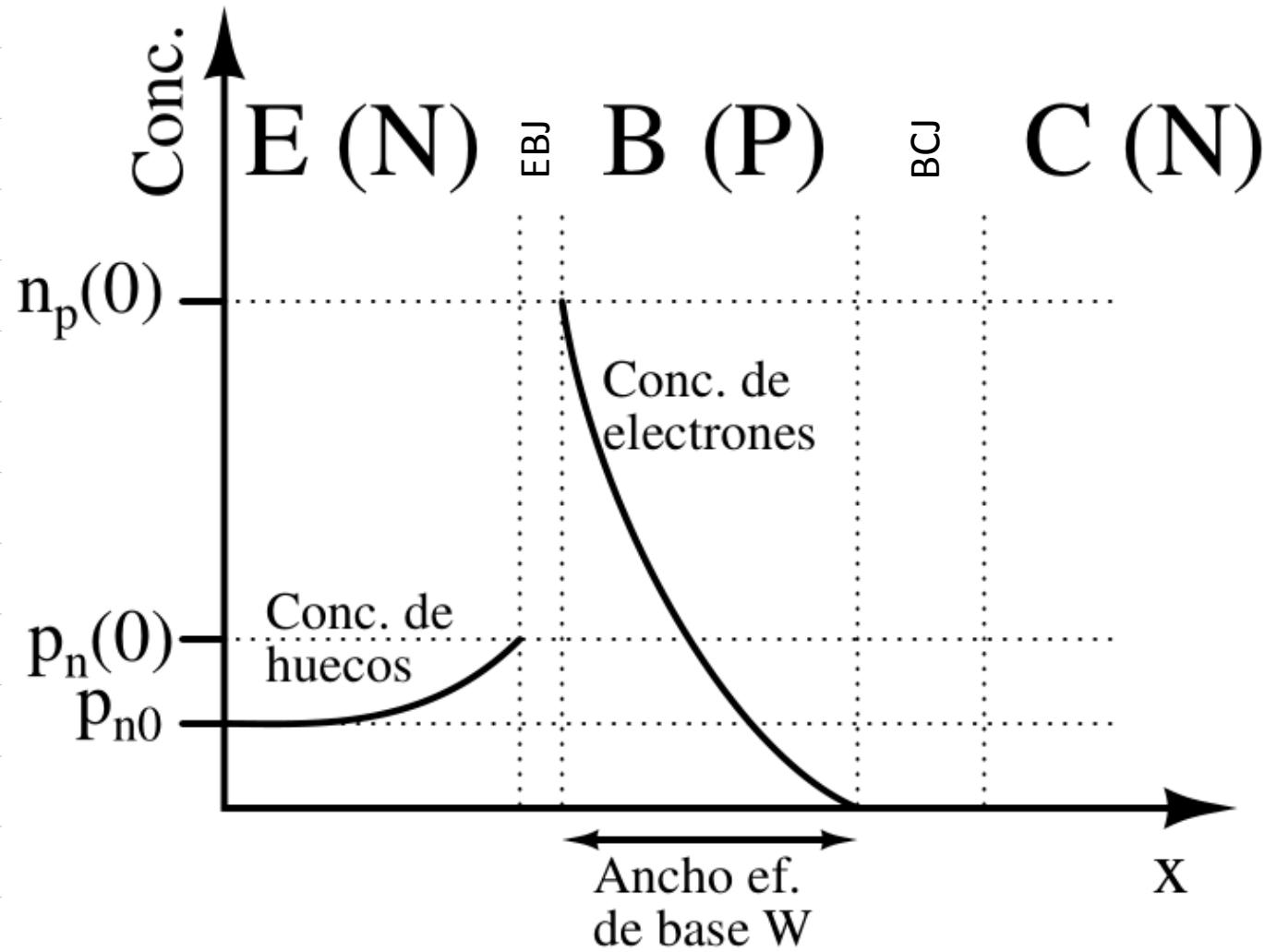
Operación intuitiva



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



Corriente del BJT en región activa



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

$$n_p(0) = n_{p0} \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$I_n = A_E \cdot q \cdot D_n \cdot \frac{\partial n_p(x)}{\partial x}$$

$$I_n = -A_E \cdot q \cdot D_n \cdot \frac{n_p(0)}{W}$$

$$I_C = A_E \cdot q \cdot D_n \cdot \frac{n_p(0)}{W} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

I_s

$$\rightarrow I_C = I_s e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

Continuación...

i_{B1} = corriente de h^+ de base a emisor

i_{B2} = corriente de colector

$$i_{B1} = \frac{A_E \cdot q \cdot D_p \cdot n_i^2}{N_D L_P} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$i_{B2} = \frac{Q_n}{\tau_b}$$

$$Q_n = A_E \cdot q \cdot \frac{1}{2} n_p(0) \cdot W$$

$$= \frac{A_E \cdot q \cdot W \cdot n_i^2}{2 N_A} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$\rightarrow i_{B2} = \frac{1}{2} \frac{A_E \cdot q \cdot W \cdot n_i^2}{\tau_b N_A} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$i_B = i_{B1} + i_{B2}$$

sea $\beta = \frac{1}{\frac{D_p}{D_n} \frac{N_A}{N_D} \frac{W}{L_p} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{D_n \tau_b}}$

$$\rightarrow i_B = \frac{i_C}{\beta}$$

$$i_E = i_B (\beta + 1) = i_C \frac{\beta + 1}{\beta}$$

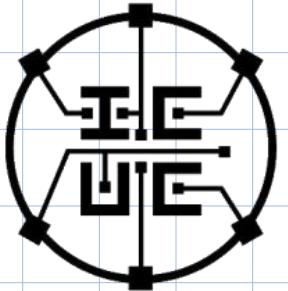
$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \Leftrightarrow \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$i_B = \frac{i_C}{\beta}$$

$$i_E = \frac{i_C}{\alpha}$$

$\beta = \beta_{dc} = h_{FE} = \beta$ para un punto de operación = I_{CQ}/I_{BQ}

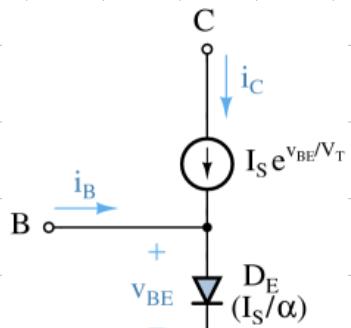
Existe también $\beta_{ac} = h_{fe} = (\Delta i_C / \Delta i_B) |_{V_{ce} = \text{cte}} = \beta$ en pequeña señal



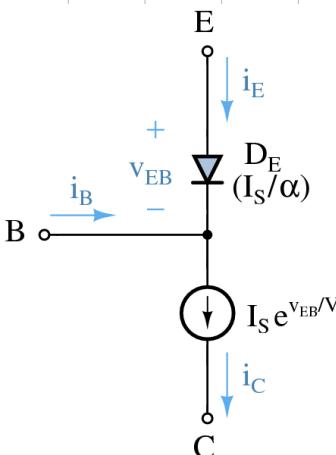
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Modelos de gran señal, región activa

NPN, modelo T



PNP, modelo T

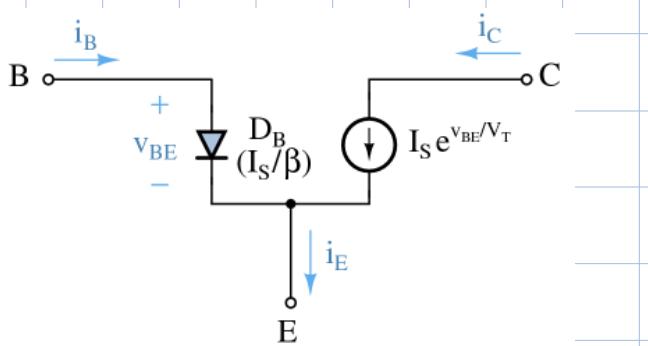


$$I_C = I_s e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

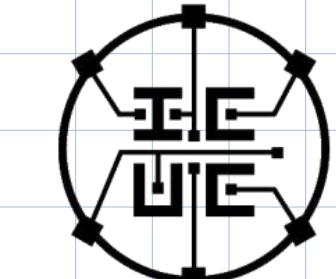
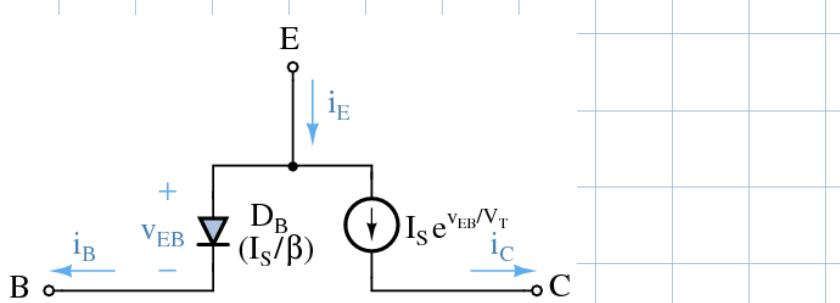
$$i_B = \frac{i_C}{\beta}$$

$$i_E = \frac{i_C}{\alpha}$$

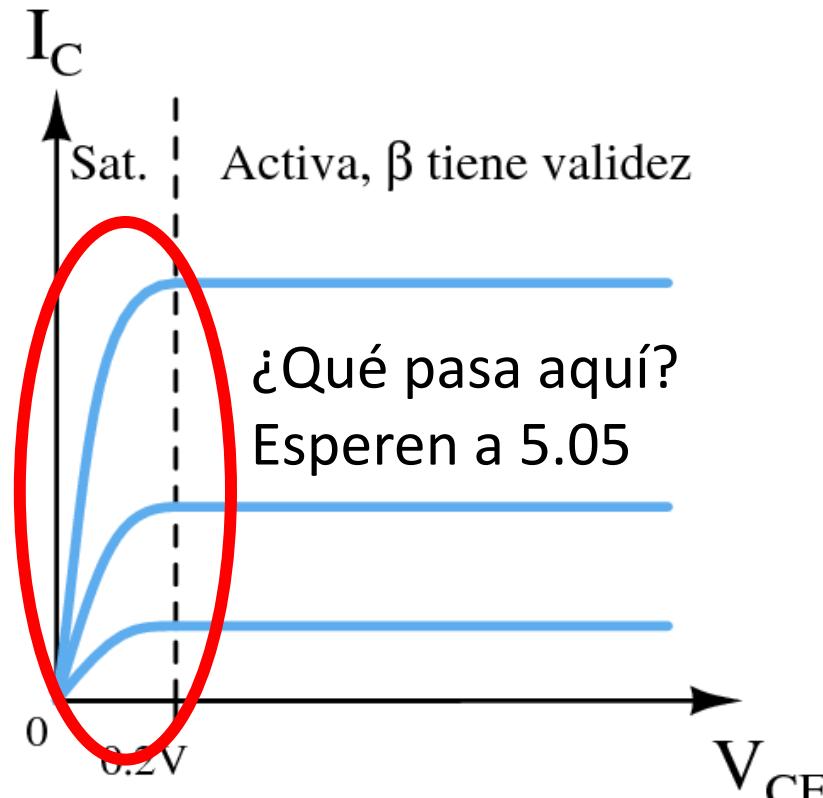
NPN, modelo π



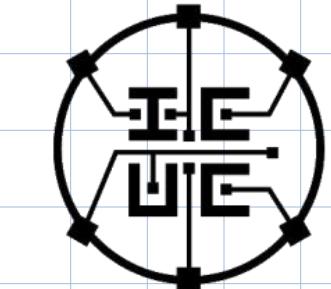
PNP, modelo π



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



Resumen BJT región activa



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

| Modo de Operación | Unión B – E (EBJ) | Unión C – B (CBJ) |
|-------------------|-------------------|-------------------|
| Activa | Directa | Inversa |

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = I_s e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} = \alpha I_E = \beta I_B$$

$$I_E = \frac{I_s}{\alpha} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

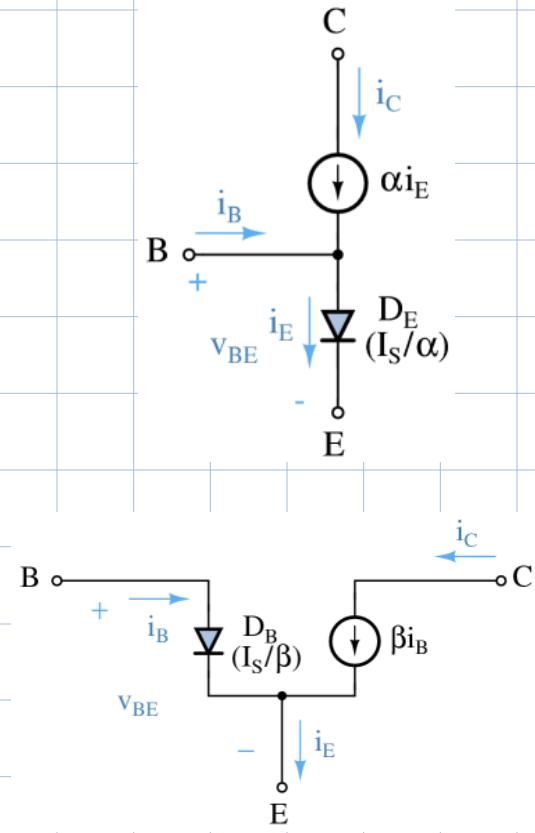
$$I_B = \frac{I_s}{\beta} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$\beta = \frac{1}{\frac{D_p}{D_n} \frac{N_A}{N_D} \frac{W}{L_p} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{D_n \tau_b}}$$

$$I_S = A_E \cdot q \cdot D_n \cdot \frac{n_i^2}{N_A W}$$

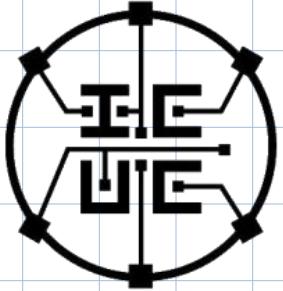
$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \Leftrightarrow \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$\beta = \beta_F = h_{FE}$ = ganancia de corriente de emisor común
 $\alpha = \alpha_F$ = ganancia de corriente de base común





5.05



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

El BJT en corte y saturación

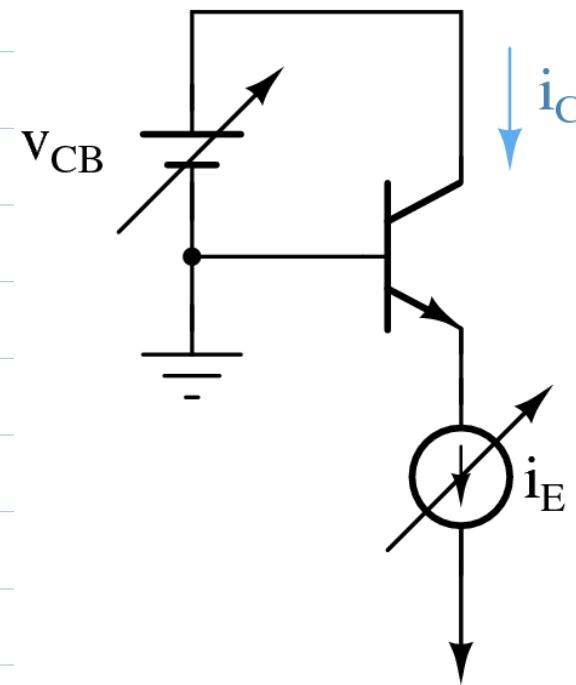
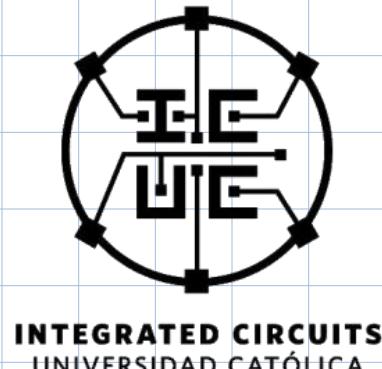
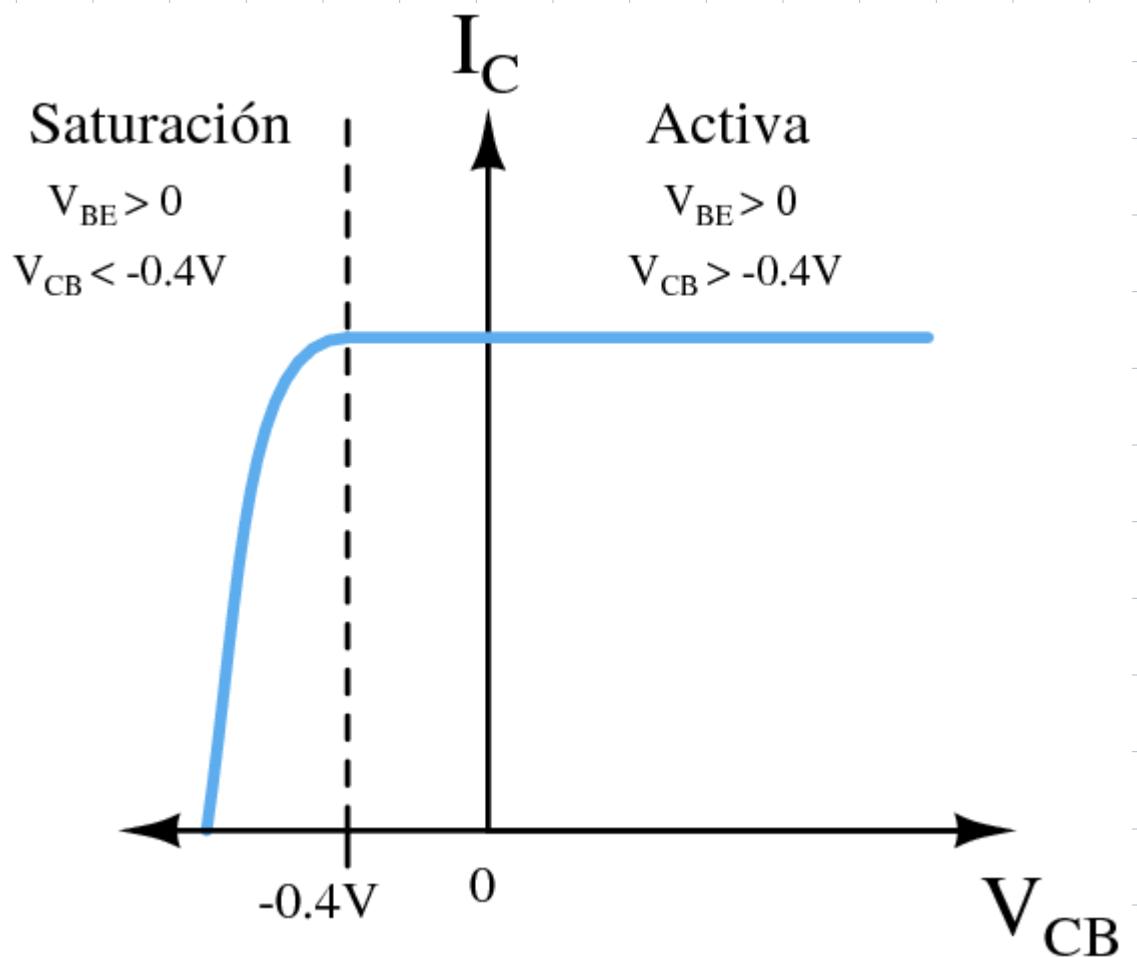
Dependencias:

- 5.03 Estructura del BJT

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

¿Qué pasa con VCB negativo?



BJT en corte y saturación

- Corte:

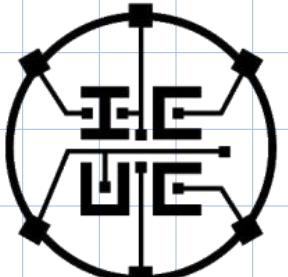
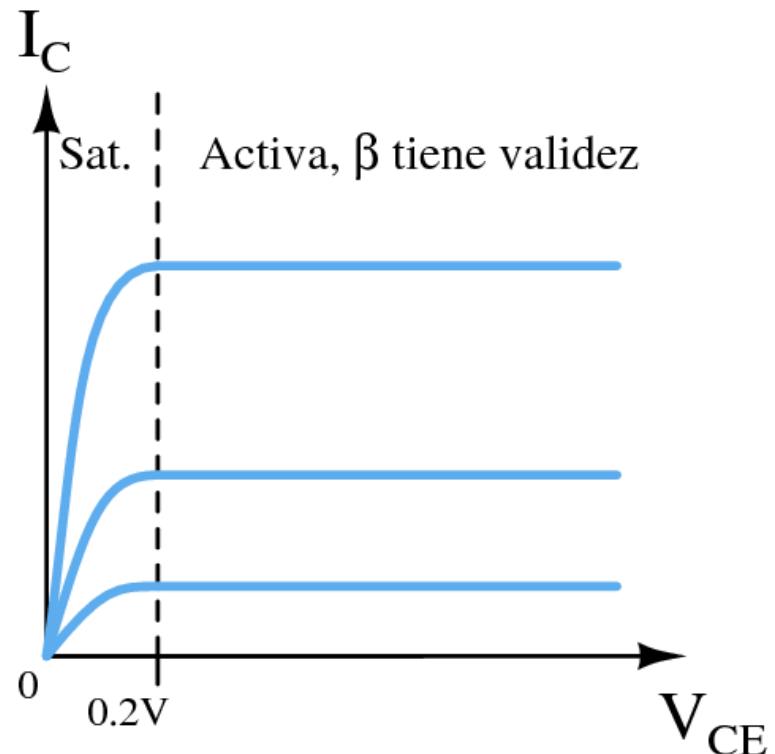
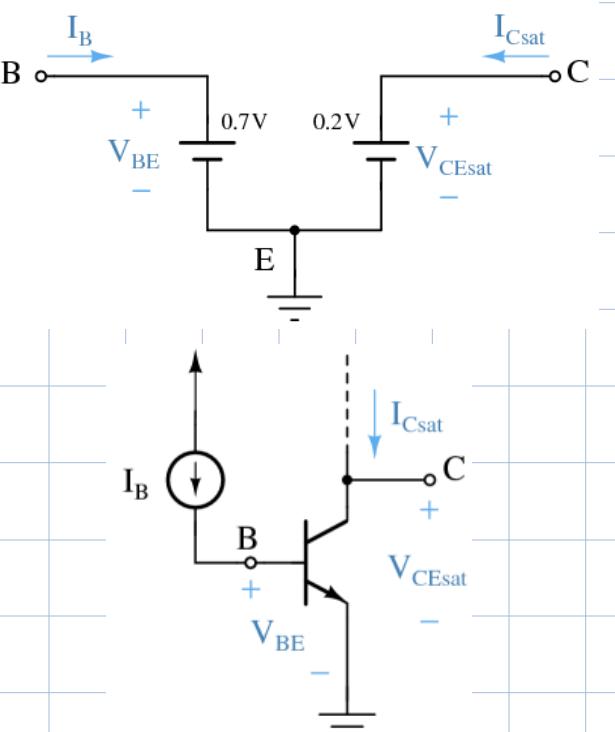
$$I_E = I_C = I_B = 0$$

- Saturación:

$$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - \left(\frac{I_S}{\alpha R} \right) e^{\frac{V_{BC}}{V_T}}$$

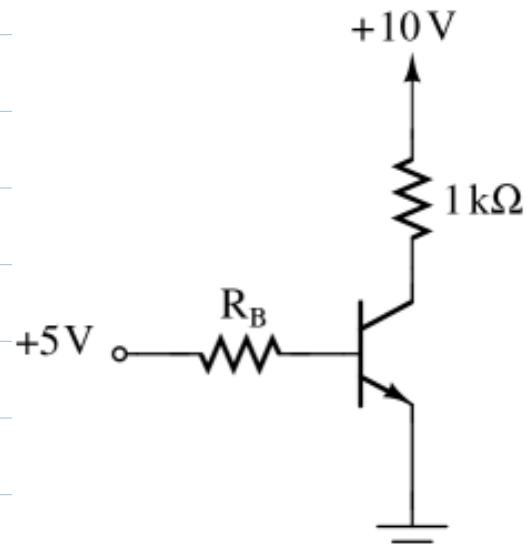
$$V_{CE} = V_{CEsat} \approx 0.2 \text{ V}$$

$$\beta_{forzada} = \frac{I_{C_{sat}}}{I_B} \leq \beta$$

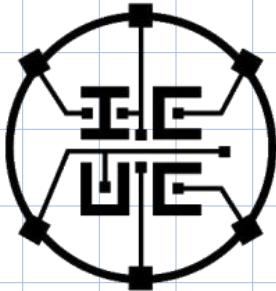
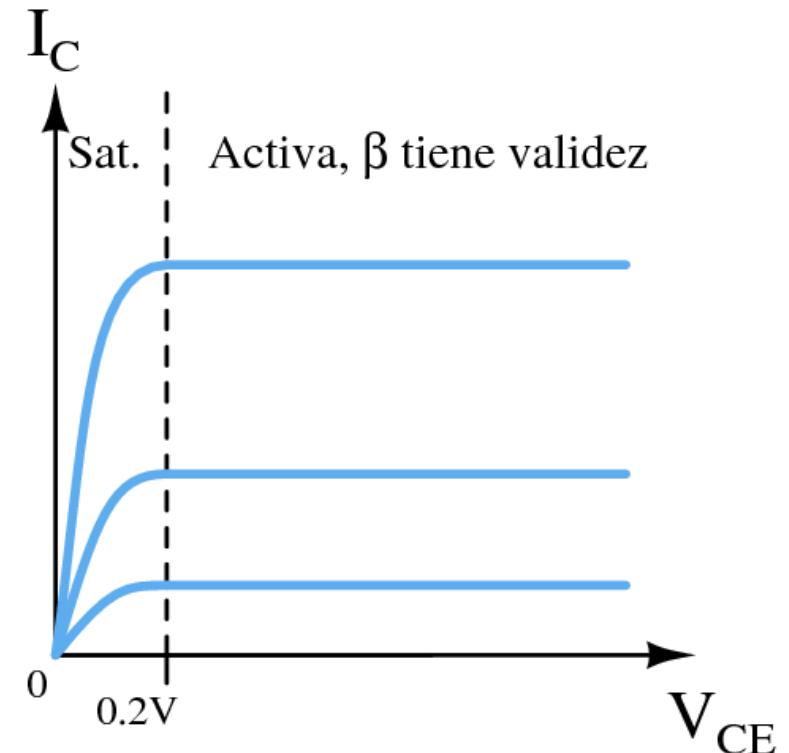


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

β forzada y factor de sobresaturación (overdrive factor, ODF)



Operando en regiones de corte y saturación,
el BJT puede actuar como interruptor

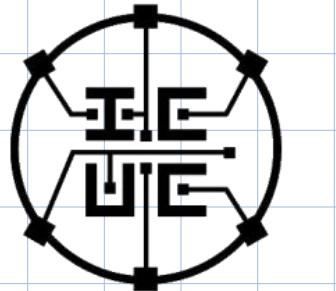


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

¿Cómo determinar si el BJT está en región activa o en saturación?

Receta de cocina: Asumir supuesto y luego confirmar

- Asumo que está en región activa
- Calculo voltajes y corrientes
- Determino si realmente está en región activa:
 - NPN: $V_{CE} > 0.2$ V, o equivalentemente, $V_{CB} > -0.4$ V?
 - PNP: $V_{CE} < -0.2$ V, o equivalentemente, $V_{CB} < 0.4$ V?
 - Sí: OK, confirmé el supuesto de región activa
 - No: Entonces el transistor está saturado
 - Calculo voltajes y corrientes
 - Determino $\beta_{forzada} = I_{C_{sat}}/I_B$ y confirmo que $\beta_{forzada} < \beta$
 - Determino la corriente de base al borde de saturación $I_{BEOS} = I_{C_{sat}}/\beta$
 - Determino el factor de sobresaturación como i_B / I_{BEOS}

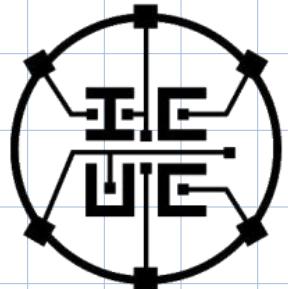
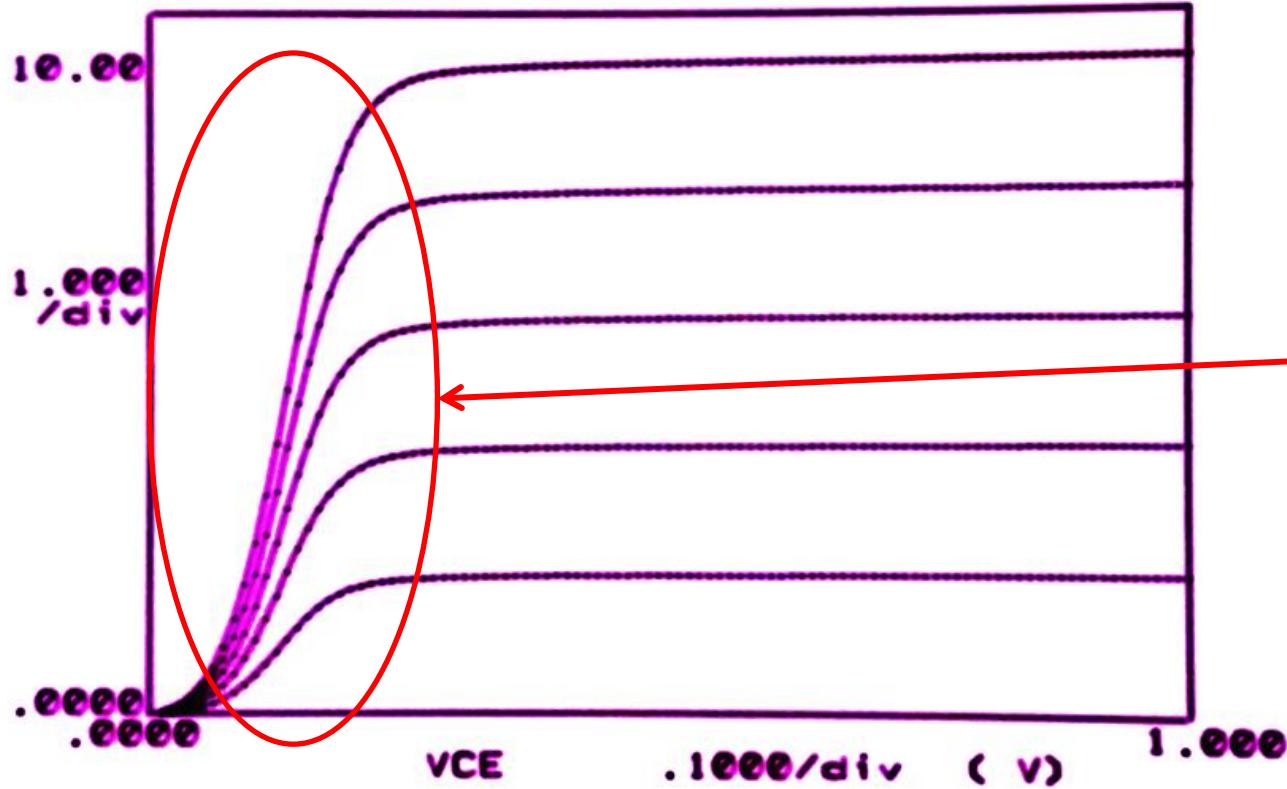


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Curvas reales de un BJT

hp ***** GRAPHICS PLOT *****

IC
(mA)

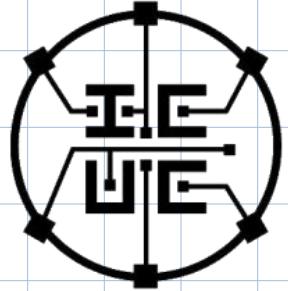


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Esta zona es difícil de modelar con nuestras ecuaciones... Por eso, simplemente decimos que en región de saturación, $V_{CE}=0.2V$



5.06



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Peculiaridades del BJT

Dependencias:

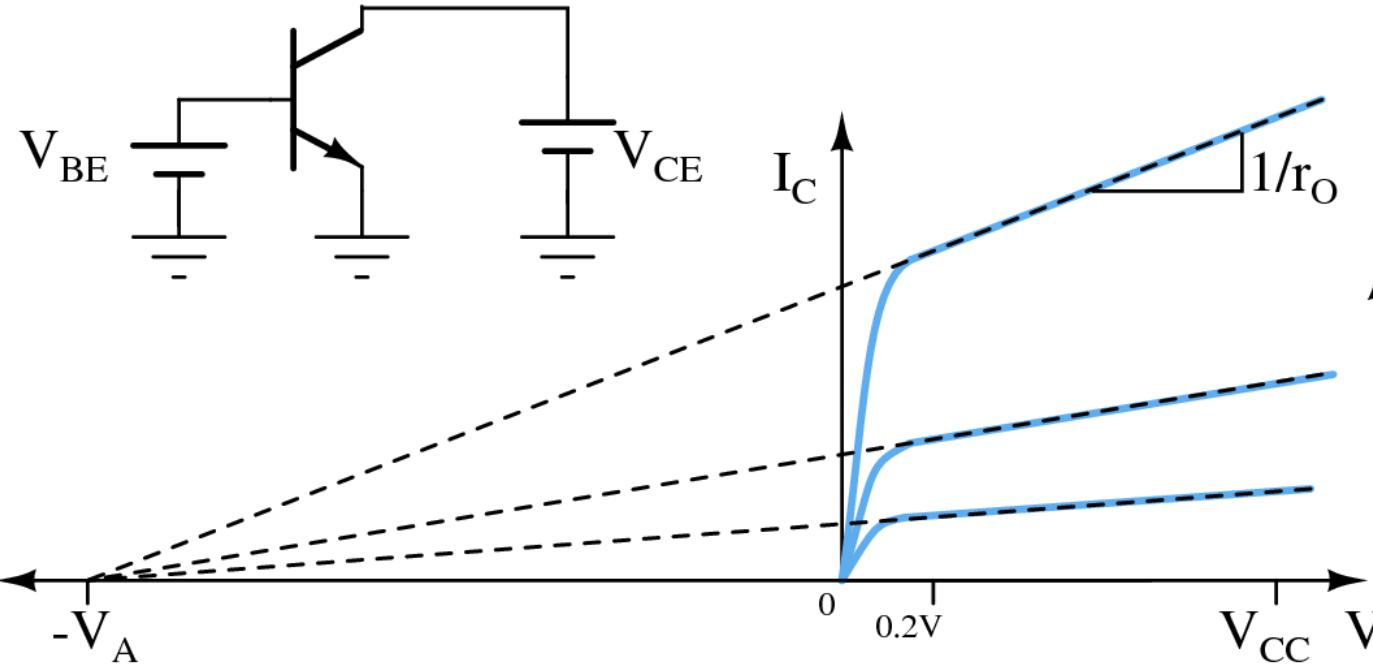
- 5.04 El BJT en región activa
- 5.05 El BJT en corte y saturación

Lecturas: <https://goo.gl/94joxa>

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

El efecto Early

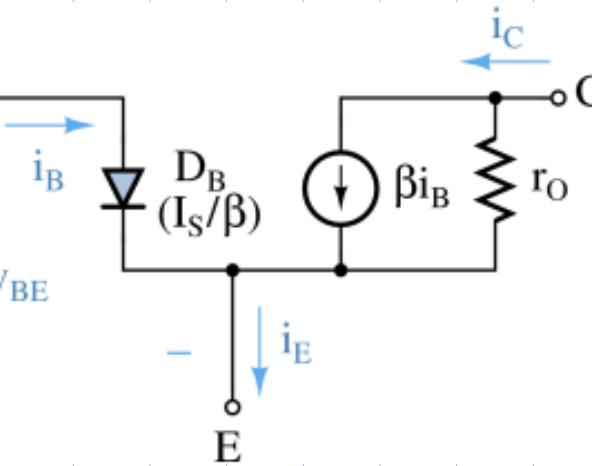


$$I_C \approx I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \left(1 + \frac{V_{CE}}{|V_A|} \right)$$

$$|V_A| = \frac{1}{\lambda}$$

$$r_o \approx \frac{|V_A|}{I_C}$$

INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

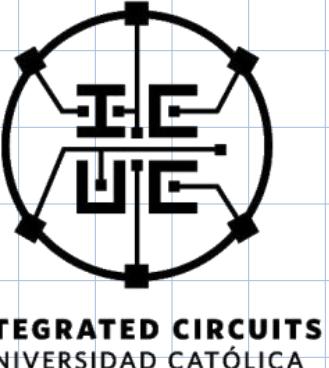


La constante β no es tan constante

- En DC, crece exponencialmente con la temperatura
- Depende de la corriente
 - Crece con la corriente para corrientes pequeñas
 - A corrientes grandes, decrece con la corriente
 - Esto implica que no es igual en DC que en AC
 - También implica una no linealidad (y distorsión) en amplificadores sin realimentación y gran excursión de salida
- Requiere realimentación para estabilizar

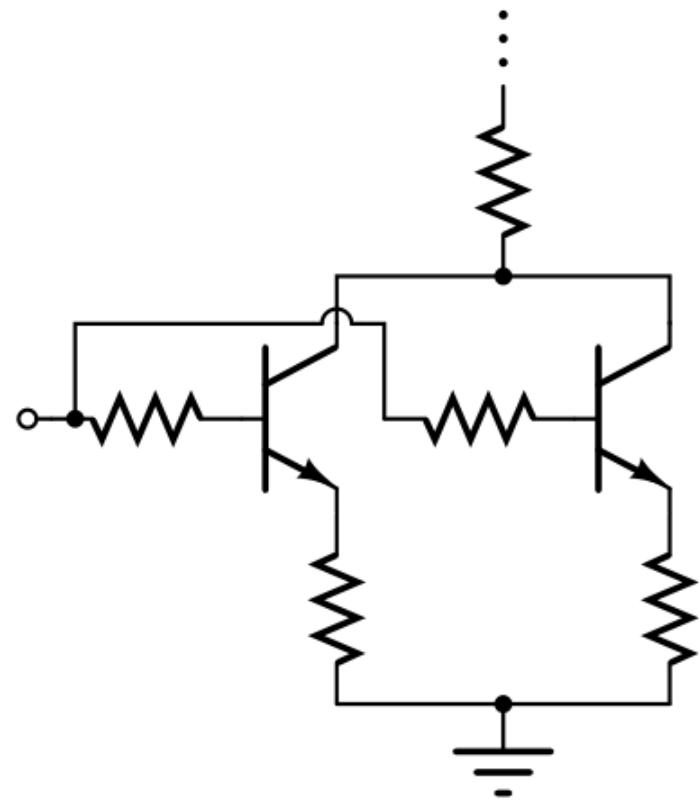
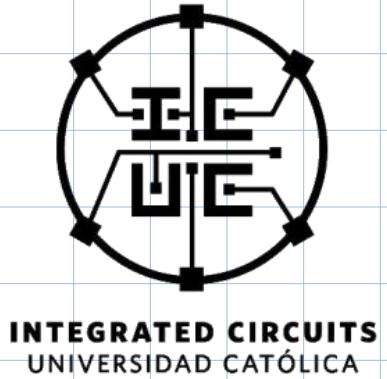
$$\beta_{dc} = h_{FE} = \beta \text{ para un punto de operación} = I_{CQ}/I_{BQ}$$

$$\beta_{ac} = h_{fe} = (\Delta i_C / \Delta i_B) |_{V_{ce} = \text{cte}} = \beta \text{ en pequeña señal}$$



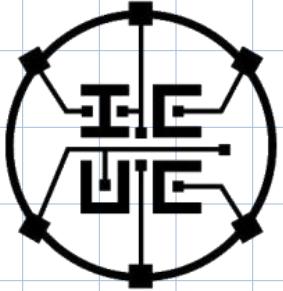
Efectos de la temperatura

- V_{BE} tiene un TC de $-2 \text{ mV}^{\circ}\text{C}$
- La corriente de fuga I_{CB0} crece a 2x cada 10°C
- Si la temperatura crece, la corriente crece
 - Y como consecuencia, la temperatura crece más... etc.
 - Realimentación positiva mata al transistor
 - Esto se llama **escape térmico** o **thermal runaway**
- Para evitar el escape térmico al conectar BJTs de potencia en paralelo, agregamos resistores de ballast $< 1\Omega$





5.07



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

El BJT como amplificador - primera aproximación

Dependencias:

- 5.04 El BJT en región activa

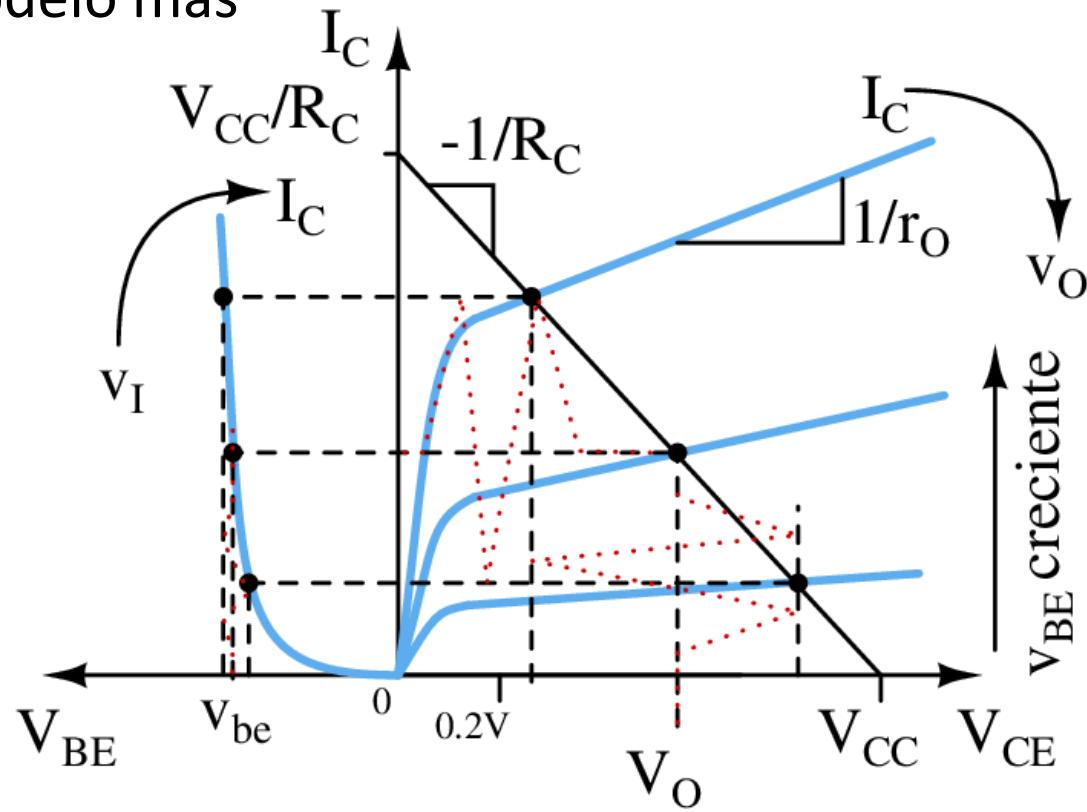
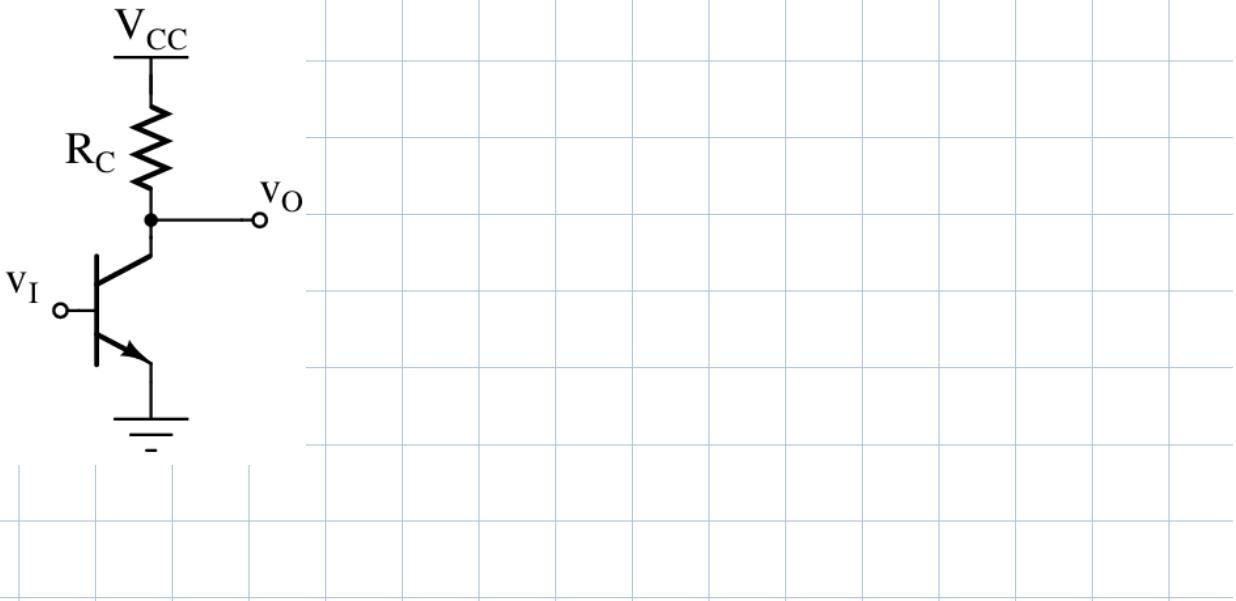
angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

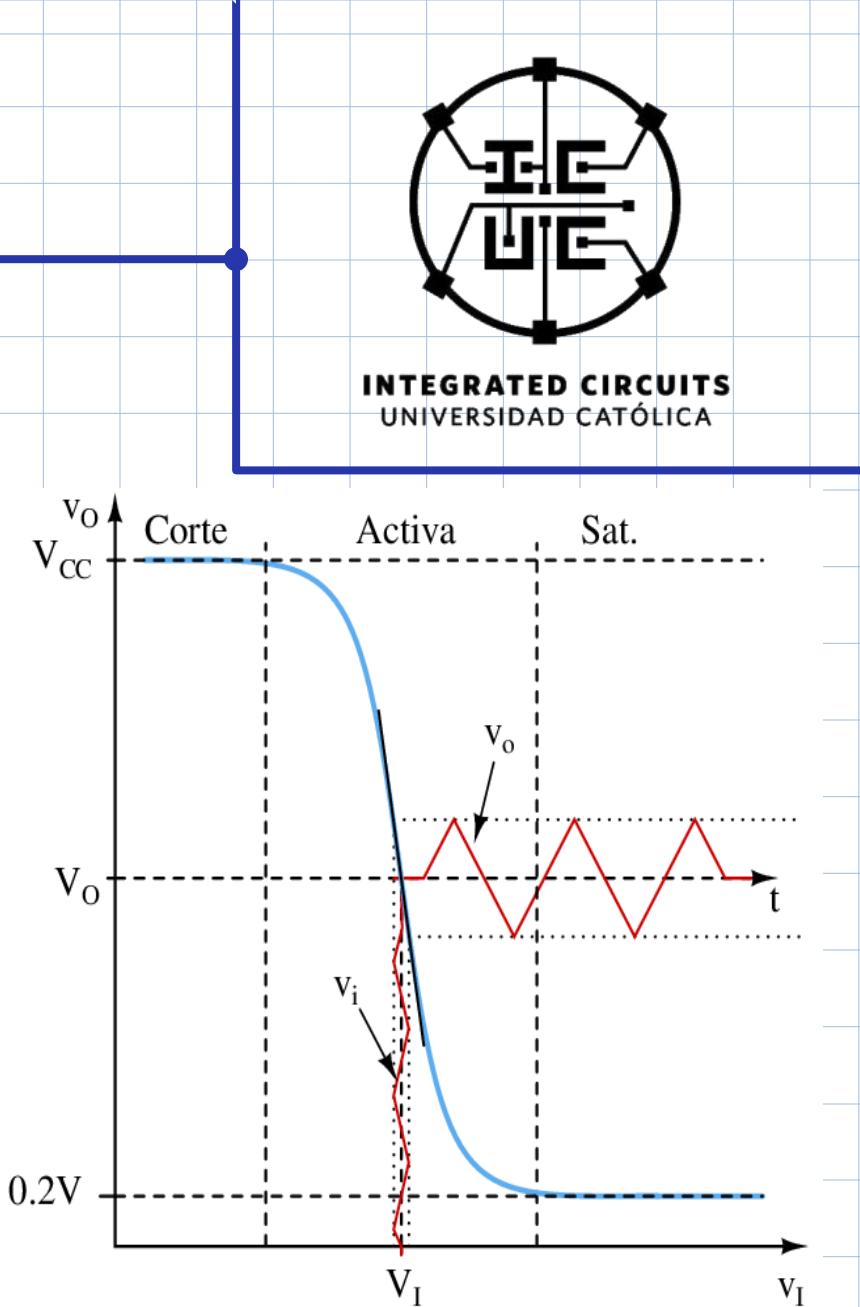
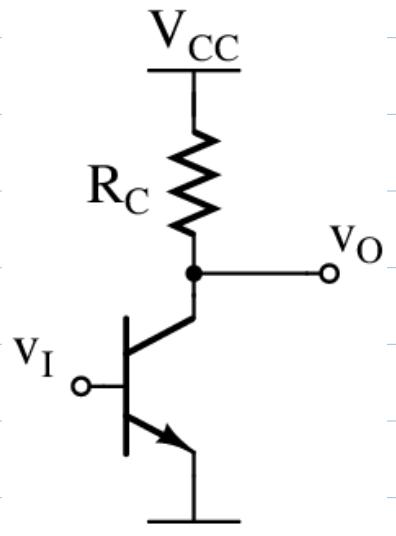
Ya conocemos las ecuaciones del BJT...

¿Ahora qué?

- Vamos a analizar nuestro primer amplificador usando el modelo cuadrático
- Más adelante aprenderemos a usar un modelo más sencillo para realizar el mismo análisis



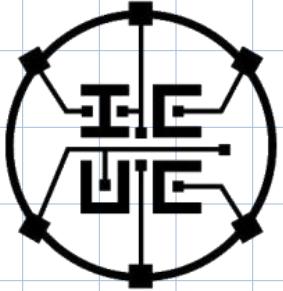
Curva de transferencia estática del amplificador



En la próxima cápsula aprenderemos una técnica para realizar estos cálculos en forma sistemática



5.08



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

El BJT en pequeña señal

Dependencias:

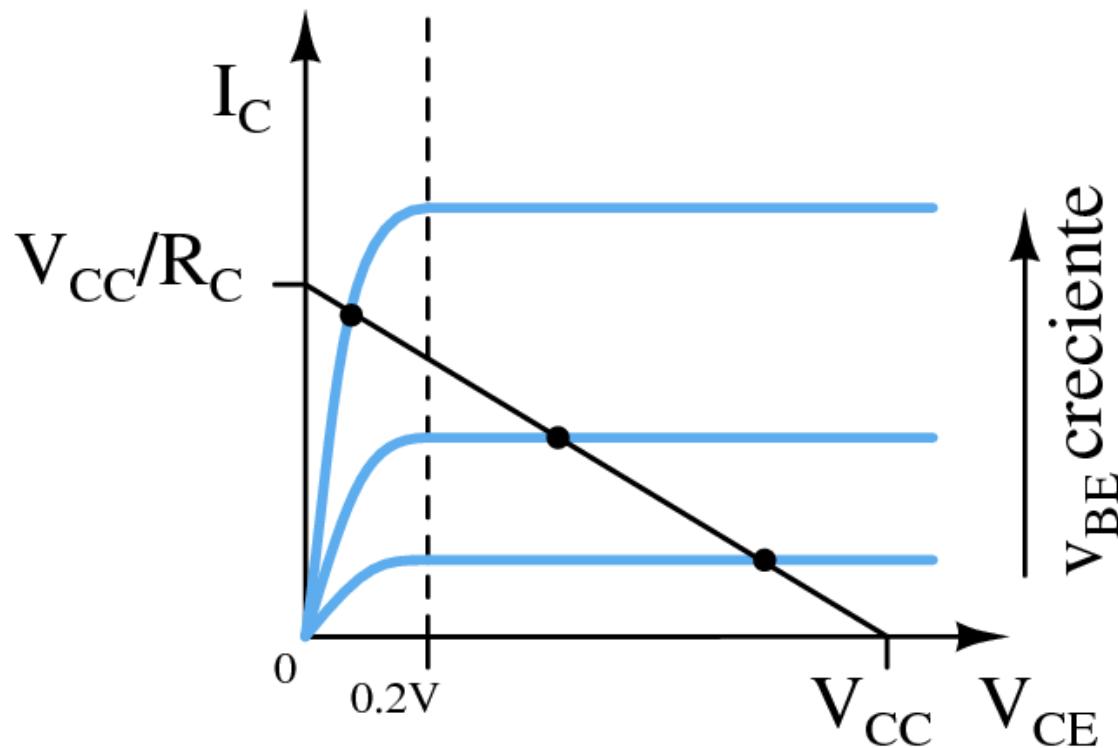
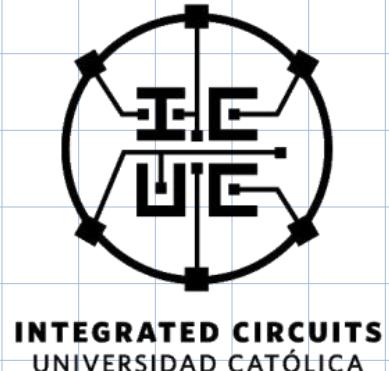
- 1.12 Curvas de transferencia estática
- 5.06 Peculiaridades del BJT
- 5.07 El BJT como amplificador - primera aproximación

angel@uc.cl

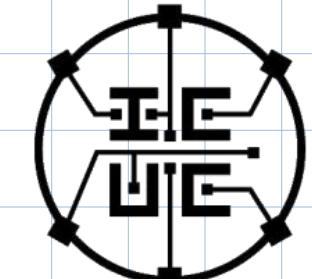
Electrónica en cápsulas

Introducción

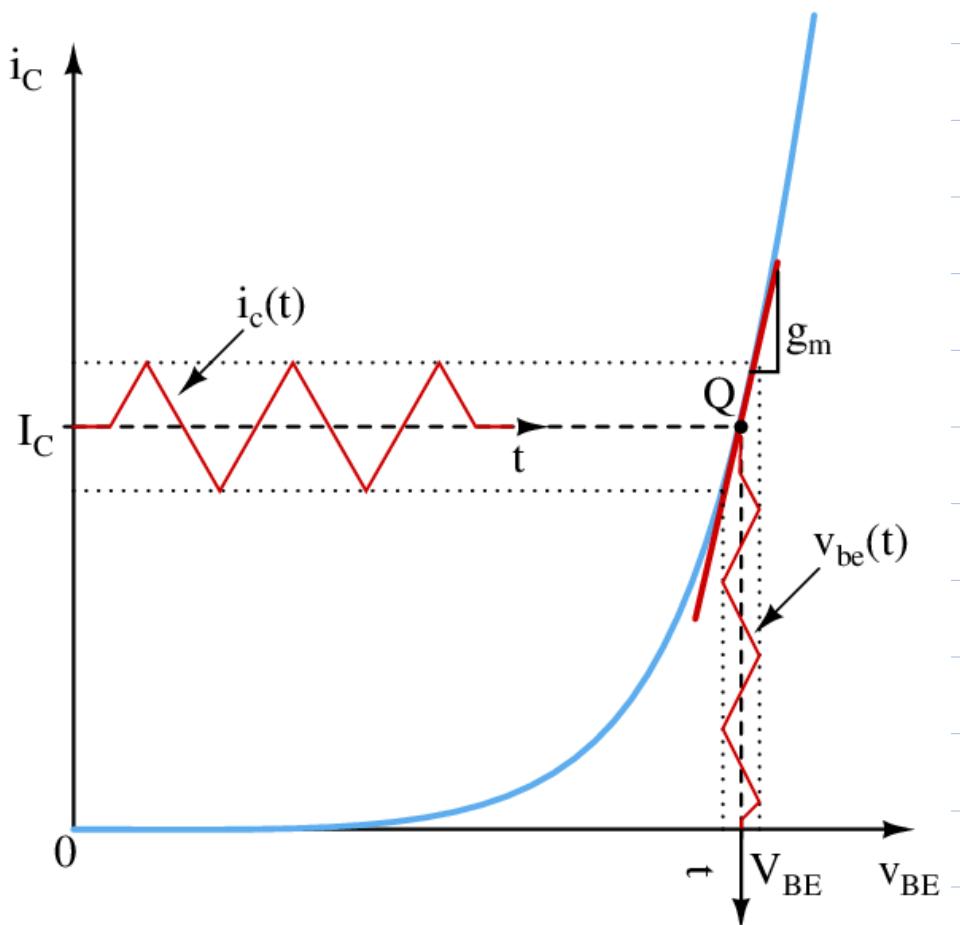
- En 5.07 hemos analizado el funcionamiento de un amplificador con BJT y hemos determinado su ganancia
 - El amplificador tenía sólo un transistor
 - Para analizar el circuito fue necesario determinar la función de transferencia estática no lineal del amplificador...
 - Esta técnica no es muy práctica para circuitos formados por múltiples elementos no lineales...
- Hoy volveremos a usar el análisis para pequeña señal, o análisis incremental de un circuito
- Comenzaremos estudiando otra curva del BJT... **¿Cómo es la curva I_C vs V_{BE} ?**



Modelo del BJT para pequeñas señales: $v_{in} \rightarrow i_{out}$



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



¿Cuándo es válido este modelo?

$$i_C = I_S \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$$

$$\text{pero } v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$$

$$\rightarrow i_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE} + v_{be}}{V_T}} = \underbrace{I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}}_{I_C} \cdot e^{\frac{v_{be}}{V_T}}$$

Hagamos exp.
Taylor truncada

$$i_C = I_C + i_c \approx I_C \cdot \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T} \right)$$

$$\rightarrow i_c = \frac{I_C}{V_T} v_{be}$$

$$g_m \triangleq \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} = \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{I_C}{V_T}$$

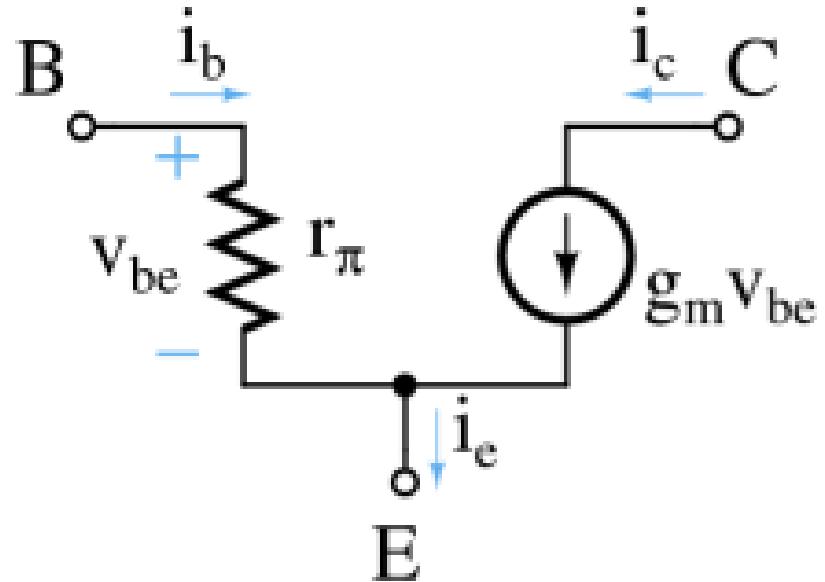
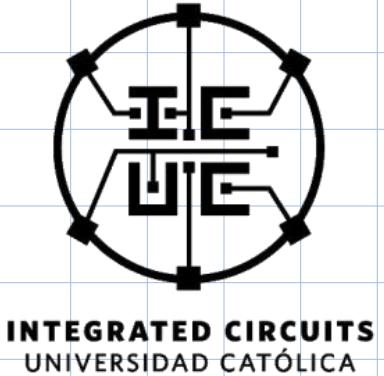
Momento... ¿Cómo se ve la resistencia de base en pequeña señal?

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_C}{\beta} + \frac{i_c}{\beta} = \underbrace{\frac{I_C}{\beta}}_{I_B} + \underbrace{\frac{1}{\beta} \cdot \frac{I_C}{V_T} v_{be}}_{i_b}$$

$$\rightarrow i_b = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{I_C}{V_T} \cdot v_{be} = \frac{g_m}{\beta} \cdot v_{be}$$

$$\text{sea } r_\pi \triangleq \frac{v_{be}}{i_b} \Rightarrow r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{V_T}{I_B}$$

$$\Rightarrow v_{be} = i_b \cdot r_\pi$$



¿y cómo se ve la resistencia de emisor en pequeña señal?

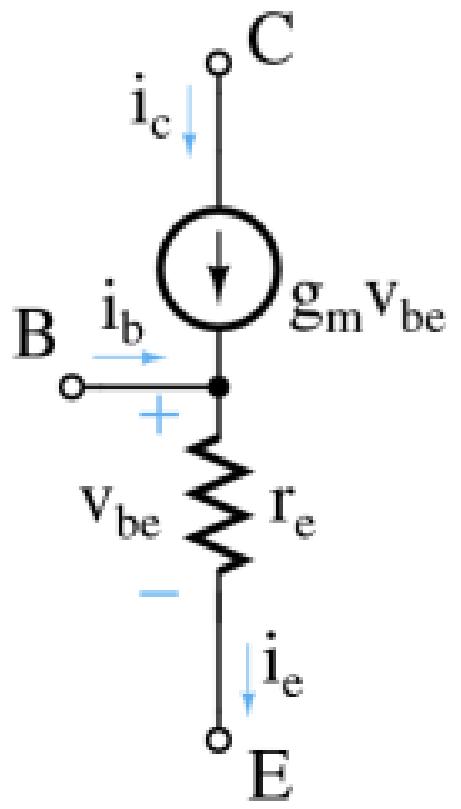
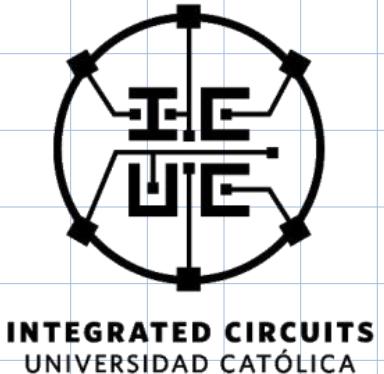
$$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \frac{I_C}{\alpha} + \frac{i_c}{\alpha} = \underbrace{\frac{I_C}{\alpha}}_{I_E} + \underbrace{\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{I_C}{V_T} v_{be}}_{i_e}$$

$$\rightarrow i_e = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{I_C}{V_T} \cdot v_{be} = \frac{g_m}{\alpha} \cdot v_{be}$$

$$\text{sea } r_e \triangleq \frac{v_{be}}{i_e} \Rightarrow r_e = \frac{\alpha}{g_m} = \frac{V_T}{I_E} \approx \frac{1}{g_m}$$

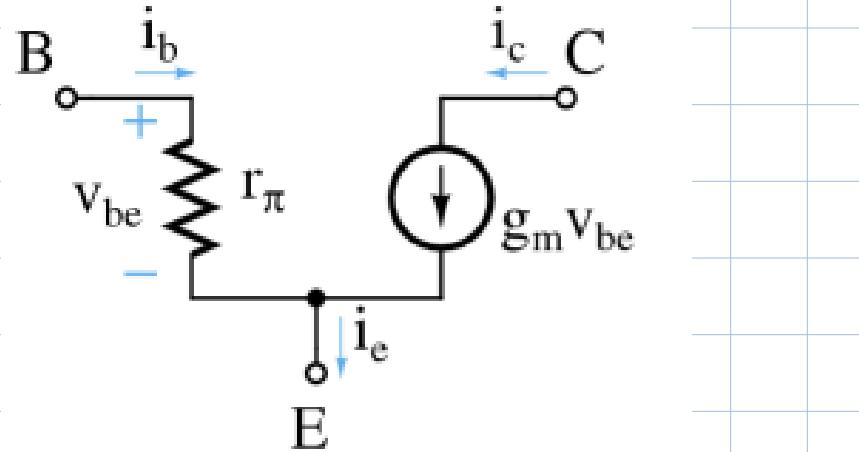
$$\Rightarrow v_{be} = i_e \cdot r_e$$

$$r_\pi = \frac{i_e}{i_b} r_e \rightarrow r_\pi = (\beta + 1) r_e$$

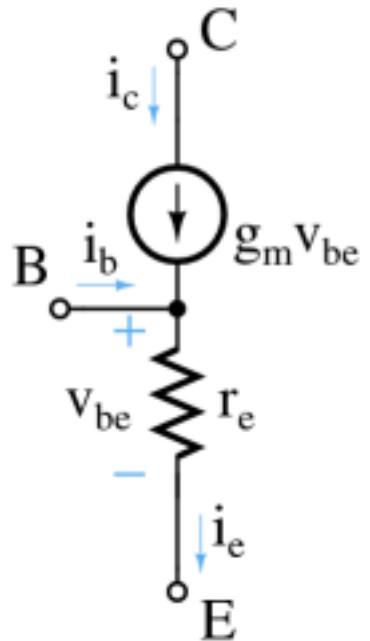


Circuito equivalente en pequeña señal

Modelo π



Modelo T

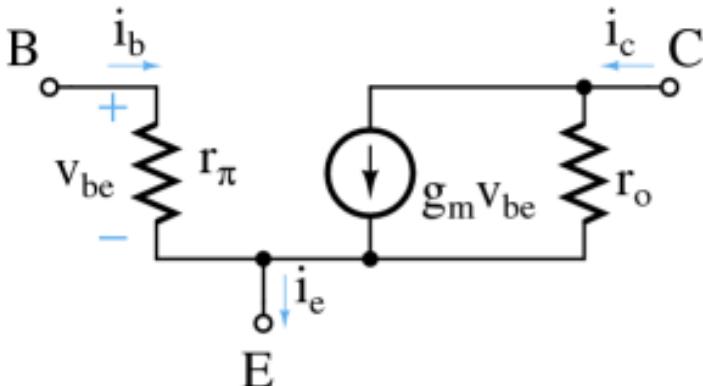
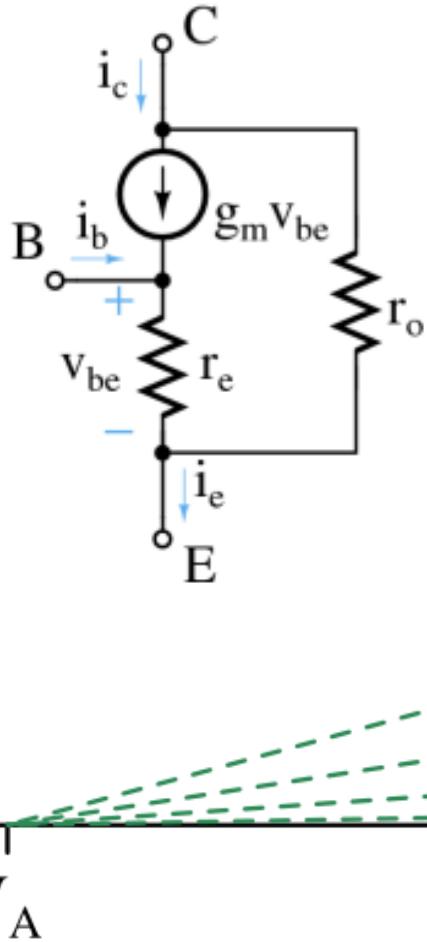


Las relaciones para las corrientes en función de α y β siguen siendo válidas en pequeña señal

¿Y cómo son los transistores PNP en pequeña señal?

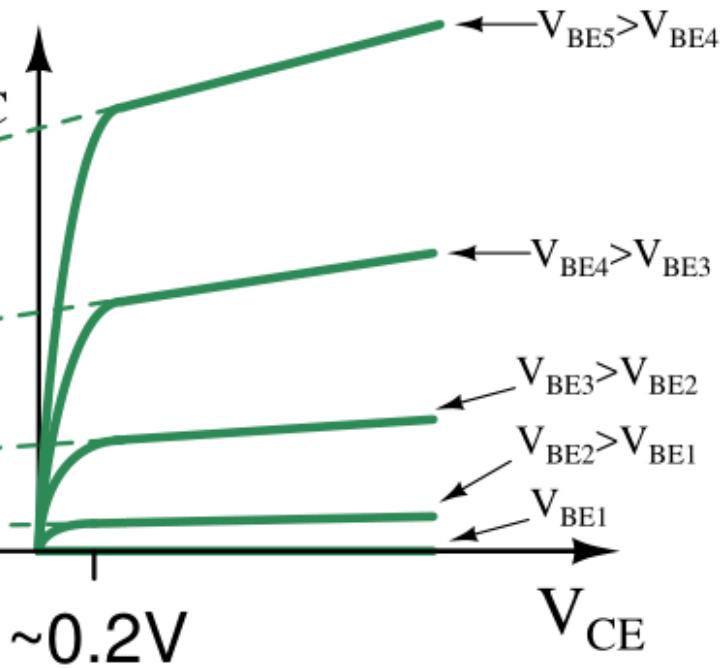
Resistencia de salida finita y consecuencia en pequeña señal

La resistencia de salida aparece en el modelo para pequeña señal



$$r_o = \frac{|V_A|}{I_C} = \frac{1}{\lambda I_C}$$

INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



Resumen ecuaciones BJT en región activa y pequeña señal

$$i_E = i_C + i_B$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{\alpha}{r_e} = \frac{\beta}{r_\pi} = \left(\frac{1}{r_e} - \frac{1}{r_\pi} \right)$$

$$i_C = I_S \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$$

$$r_e \triangleq \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{\alpha}{g_m} = \frac{V_T}{I_E} \approx \frac{1}{g_m}$$

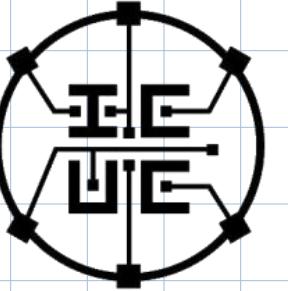
$$i_C = \beta i_B = \alpha i_E$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$r_\pi \triangleq \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{V_T}{I_B}$$

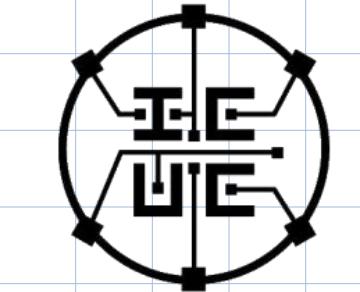
$$r_o = \frac{|V_A|}{I_C}$$



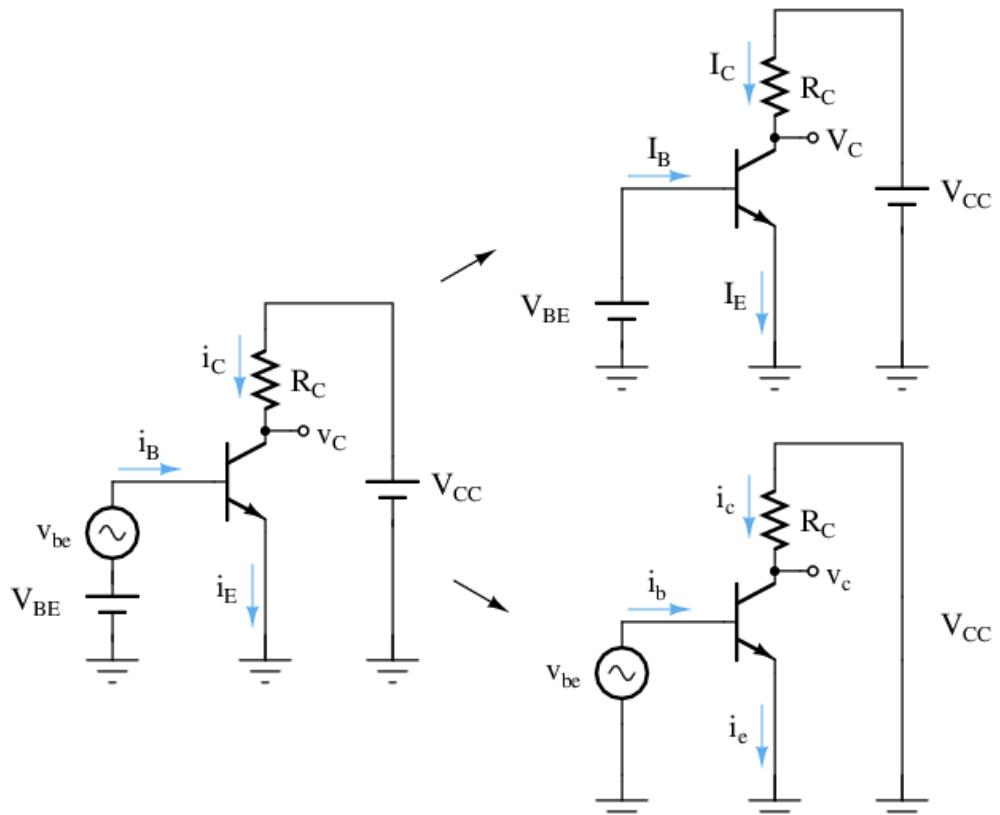
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Otra vez, receta para el análisis en pequeña señal

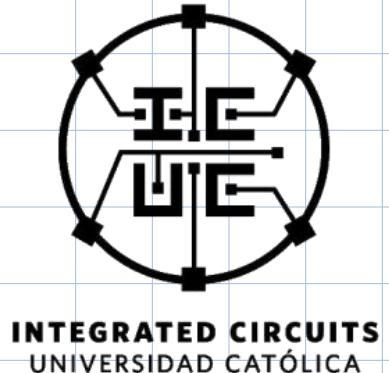
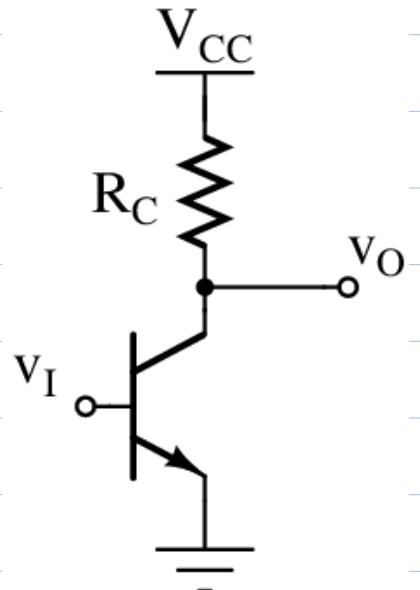
1. Determinar voltajes de nodo y **corrientes de rama** en Q, el punto de operación DC
2. Encontrar **modelos de pequeña señal en torno a Q** para todos los dispositivos del circuito
3. **Apagar fuentes independientes DC**, sustituyendo fuentes independientes de voltaje DC por cortocircuitos, y fuentes de corriente independientes DC por circuitos abiertos
4. **Reemplazar dispositivos no lineales** (e.g., transistores) por modelos de pequeña señal
 - Modelo captura variaciones en torno a punto de operación Q
 - Es posible eliminar componentes pasivos que no afectan las señales de interés (e.g., capacitancias de acoplamiento)
5. **Analizar el circuito como si fuera lineal**



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

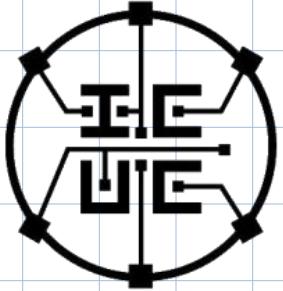


Finalicemos esta cápsula con un análisis similar al de 5.07





5.09



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

El BJT conectado como diodo

Dependencias:

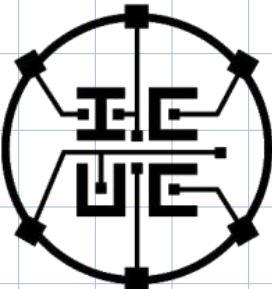
- 5.04 El BJT en región activa
- 5.08 El BJT en pequeña señal

angel@uc.cl

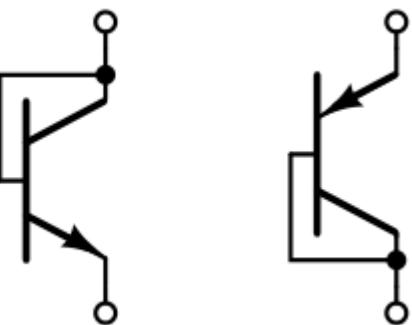
Electrónica en cápsulas

Electrónica es acerca de dispositivos y topologías...

- Hace un tiempo dijimos que para aprender electrónica es importante aprender a reconocer topologías circuitales
- Hoy veremos una que se usa mucho en electrónica: la del BJT conectado como diodo

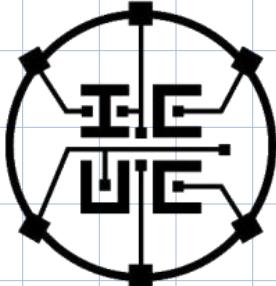


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

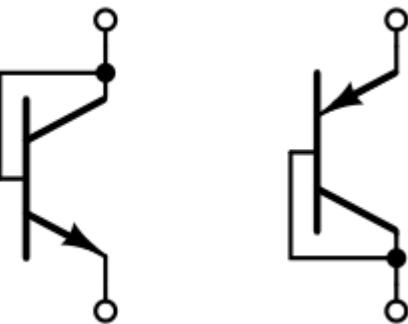


Un BJT conectado como diodo es, en efecto, igual que un diodo

- Si V_{BE} tiene el signo, entonces el BJT conectado como diodo conduce
 - De otro modo, no hay conducción
- El BJT, por lo tanto, se comporta como una válvula de corriente de dos terminales



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

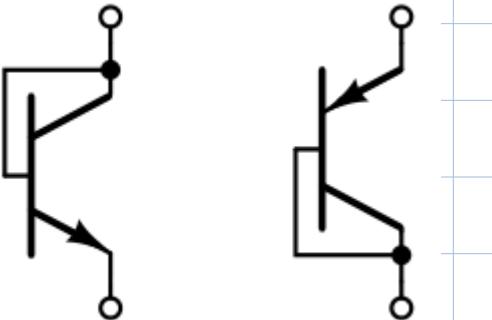


Si el BJT conectado como diodo conduce, ¿en qué región de operación se encuentra?

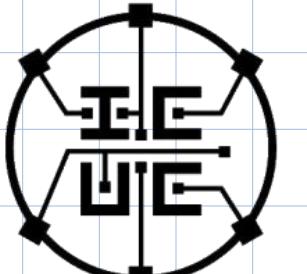
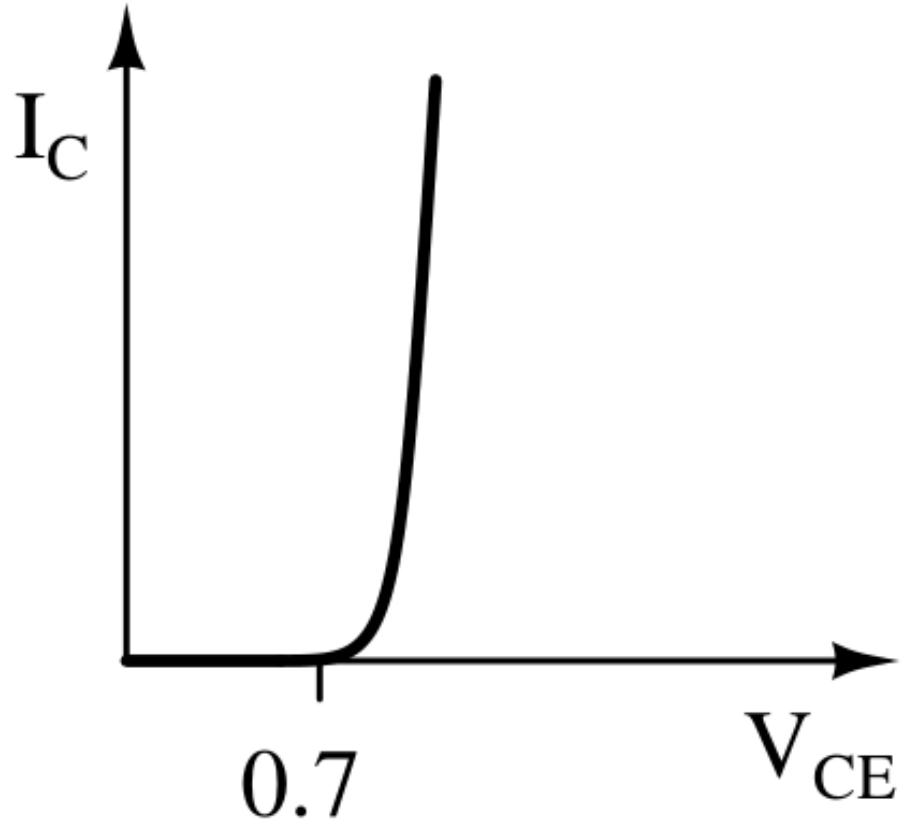
Un BJT conectado como diodo tiene una relación voltaje-corriente exponencial

- Dado que $V_C = V_B$:

$$I_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{CE}}{V_T}}$$



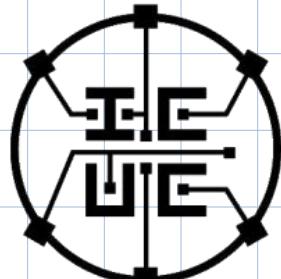
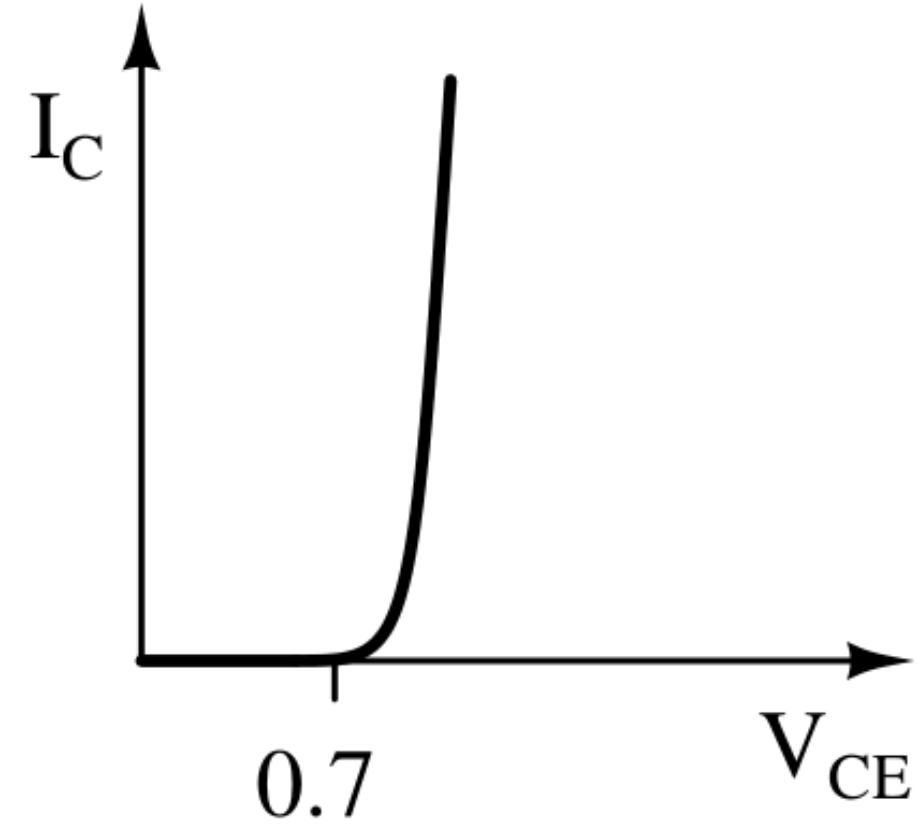
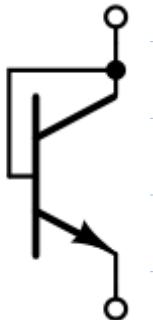
- Esta curva es válida si aplicamos voltaje al BJT o si le aplicamos corriente
 - Si aplicamos corriente I_C , el BJT producirá el voltaje necesario V_{BE} para conducir precisamente esa corriente



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Un BJT conectado como diodo tiene un comportamiento incremental resistivo

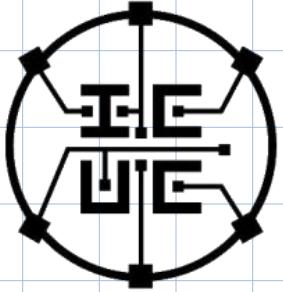
Calculemos el modelo del BJT conectado como diodo para señales pequeñas:



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



5.10



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Análisis de un amplificador en pequeña señal

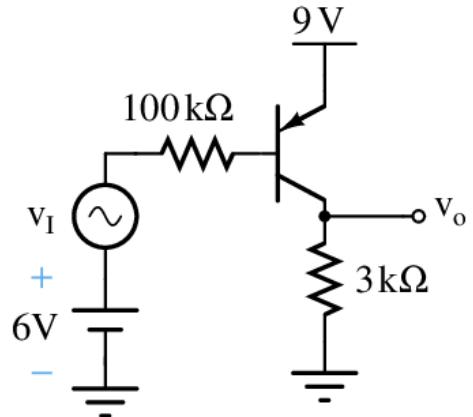
Dependencias:

- 5.08 El BJT en pequeña señal

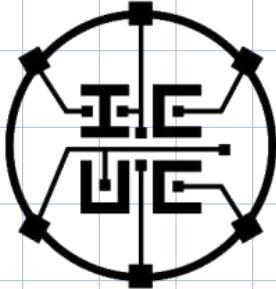
angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

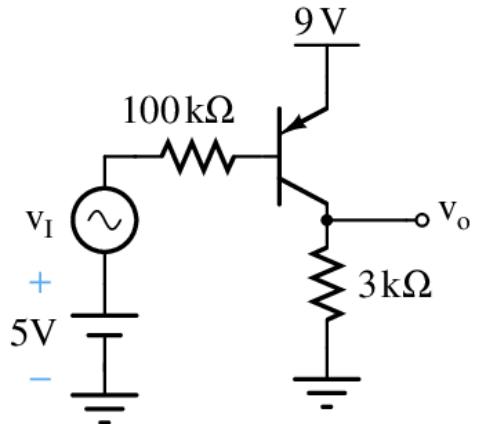
Apliquemos lo aprendido en 5.08 y calculemos la ganancia del amplificador



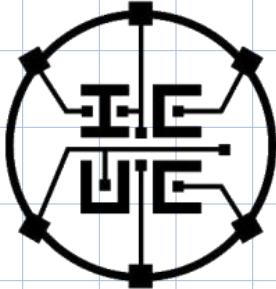
Considere PNP de silicio con $\beta=100$.
Encuentre la ganancia del amplificador.



Ahora cambiemos el voltaje de base DC y veamos qué sucede con la ganancia



Considere PNP de silicio con $\beta=100$.
Encuentre la ganancia del amplificador.

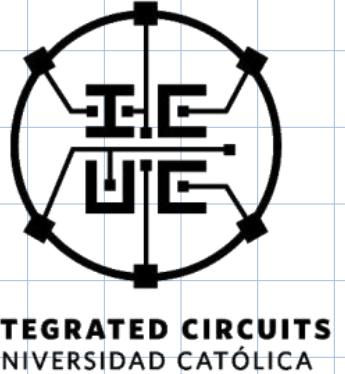


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Conclusiones

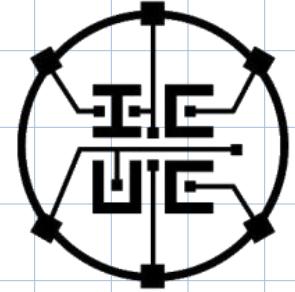
- Parece que es importante tener bien definido el punto de operación
 - Si el nivel DC del voltaje de entrada cambia, también cambia el nivel DC de salida y la corriente del transistor
 - Si la corriente cambia, también cambia la ganancia
 - Si el voltaje DC de salida cambia mucho, podría ocurrir que el transistor salga de la región activa y la ganancia del amplificador colapse

Al igual que en el caso de los MOSFETs, debemos buscar estrategias de polarización adecuadas





5.11



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Polarización por voltaje

Dependencias:

- 5.10 Análisis de un amplificador en pequeña señal

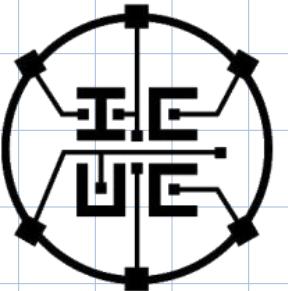
Lecturas: <https://goo.gl/zFFL4e>

angel@uc.cl

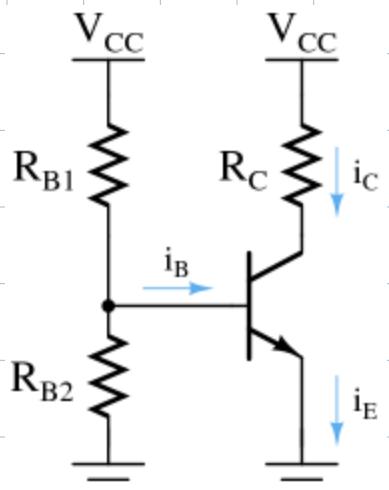
Electrónica en cápsulas

Recordemos: polarización

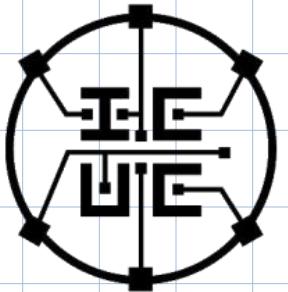
- Al igual que en circuitos con MOSFETs, la polarización (*bias*) define el punto de operación Q de un circuito, que implica:
 - Corrientes DC en transistores
 - Voltajes DC de nodos
 - Modelos para pequeña señal (g_m , r_o)
- En general, se busca que la polarización sea estable, bien definida, y que mantenga a los transistores operando en región activa, insensible a variaciones de β y T
 - por ejemplo, V_{BE} constante no conviene...
 - I_B constante hará que I_C dependa de β ...
- Durante esta cápsula y las siguientes veremos algunas opciones...



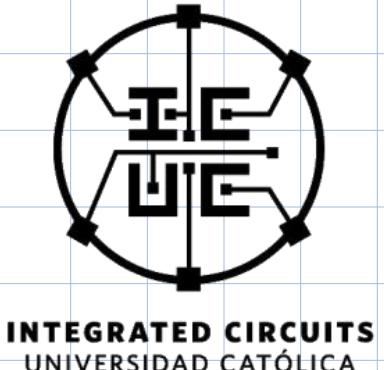
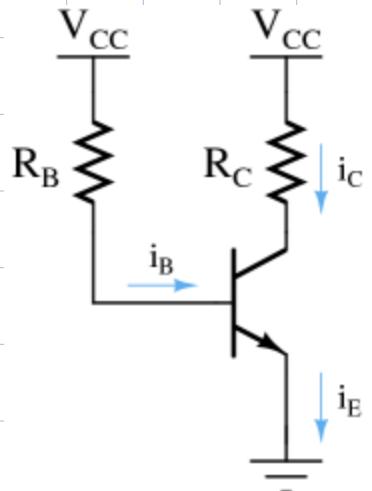
Polarización mediante V_{BE}



- Polarización más sencilla
- Muy sensible a variaciones PVT
- NO USARLA!!!
- Calculemos corriente de polarización:

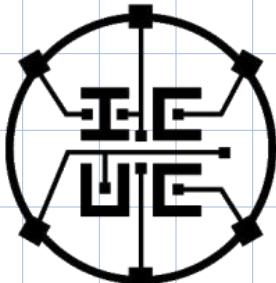
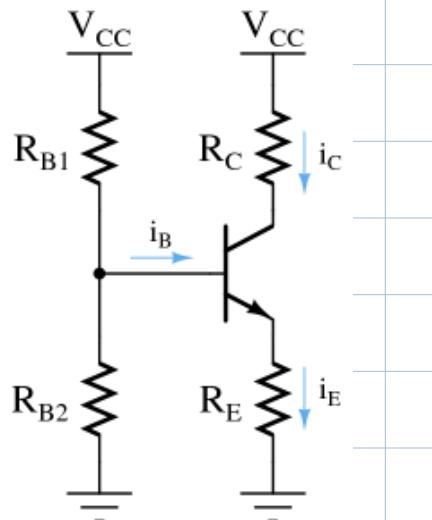


Polarización con I_B constante



- I_C depende de β , que varía de transistor a transistor
- Esta configuración no es práctica a menos que se conozca β con exactitud
 - El desempeño de un buen circuito no debiera depender de β
- EVITARLA A TODA COSTA

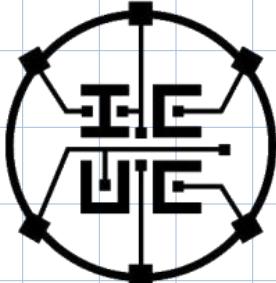
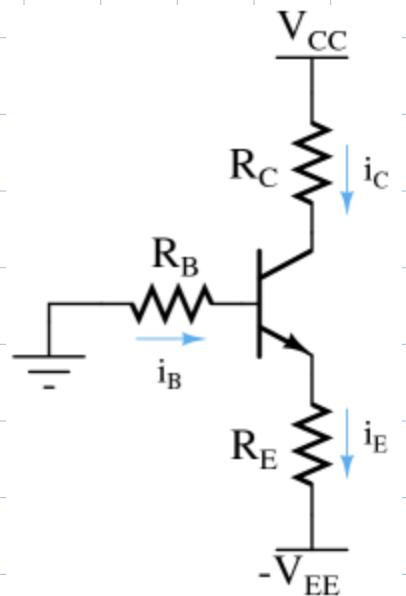
Polarización clásica en circuitos discretos: resistencia de degeneración de emisor



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

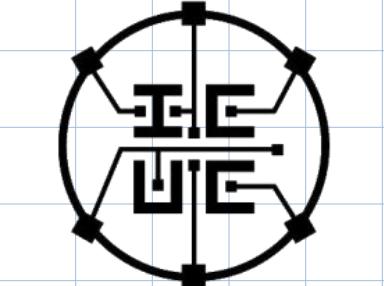
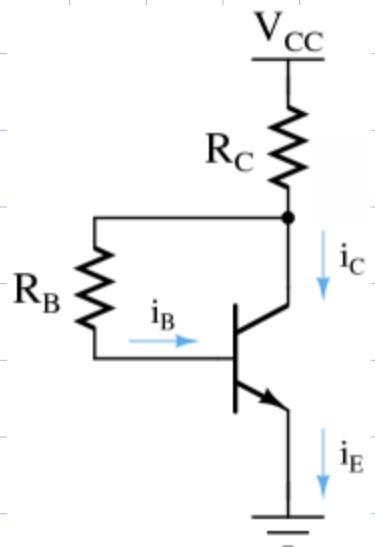
- Resistencia de degeneración de emisor estabiliza polarización mediante realimentación
- **¿ R_E afecta la ganancia?**
- Buenas prácticas de diseño:
 - $V_{BB} \approx V_{CE} \approx I_C \cdot R_C \approx V_{CC}/3$
 - $I_{\text{divisor}} \approx 0.1 \cdot I_E \rightarrow I_E$

Polarización clásica con fuente simétrica



- Esencialmente, mismo caso que en lámina anterior

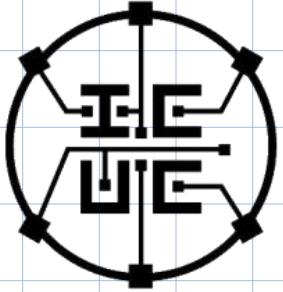
Autopolarización



- Misma ecuación que en lámina anterior, diferentes valores
- Ojo con compromiso entre estabilidad de I_E y excursión de salida



5.12



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Polarización por corriente

Dependencias:

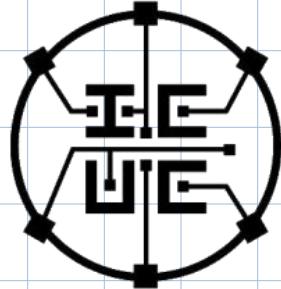
- 5.10 Análisis de un amplificador en pequeña señal
- 5.11 Polarización por voltaje

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

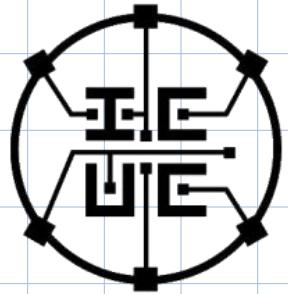
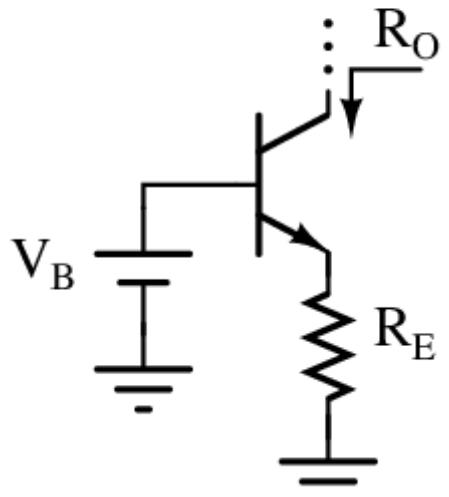
¿Cuál es la idea?

- La idea central de polarizar un transistor mediante una fuente de corriente es **forzar una corriente determinada a través del transistor**
- Para ello es necesario usar una fuente de corriente
 - **¿Qué impedancia debe tener la fuente de corriente?**
- La fuente de corriente fuerza esa corriente en el transistor
 - **¿El transistor debe tener alta o baja impedancia en el nodo donde conecto esa fuente de corriente?**



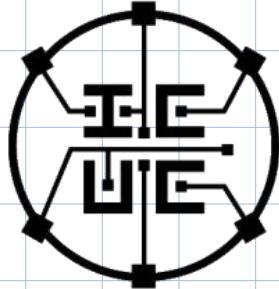
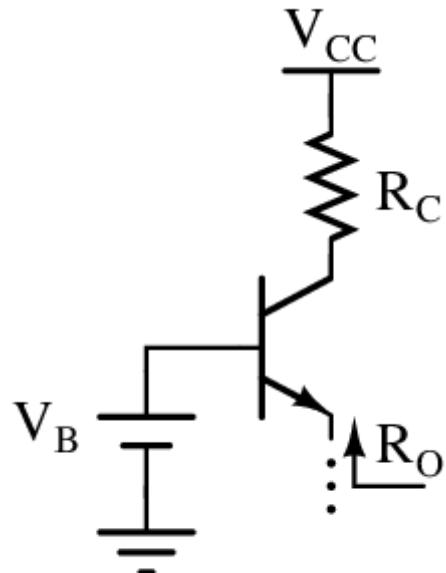
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Impedancia del colector de un transistor con base a tierra de señal



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

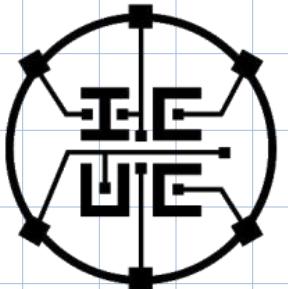
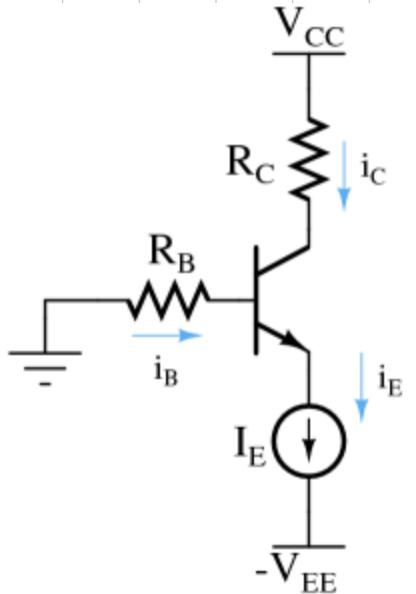
Impedancia del emisor de un transistor con compuerta a tierra de señal



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Conclusión: ¿por dónde me conviene inyectar la corriente del transistor?

Polarización mediante fuente de corriente constante

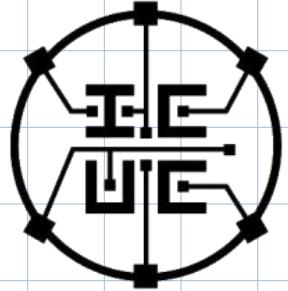


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

- La fuente de corriente va conectada al **nodo de baja impedancia** (ver lámina anterior)
- I_E no depende de β o R_B
- I_E fija corriente en transistor
 - necesitamos camino alternativo para pequeñas señales
- En 5.13 aprenderemos a implementar la fuente de corriente



5.13



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Espejos de corriente

Dependencias:

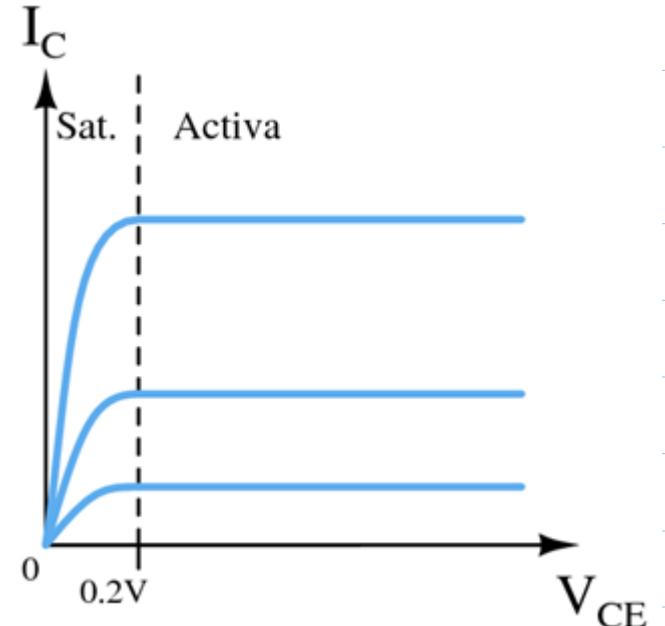
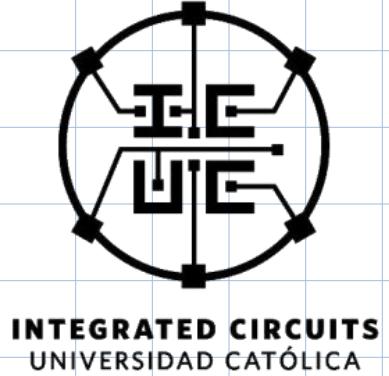
- 5.09 El BJT conectado como diodo
- 5.12 Polarización por corriente

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

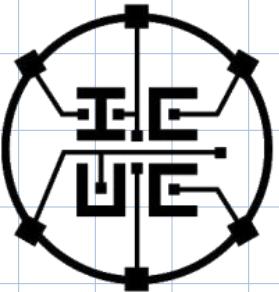
Espejos de corriente con BJT

- Un espejo de corriente **copia la corriente** de una rama, en otra rama
- Los espejos de corriente son muy útiles para generar las fuentes de corriente empleadas en 5.12
- El espejo de corriente basa su operación en la polarización de un BJT en región activa, como fuente de corriente ideal
- Esta cápsula muestra en forma **descriptiva** diferentes opciones para espejos de corriente

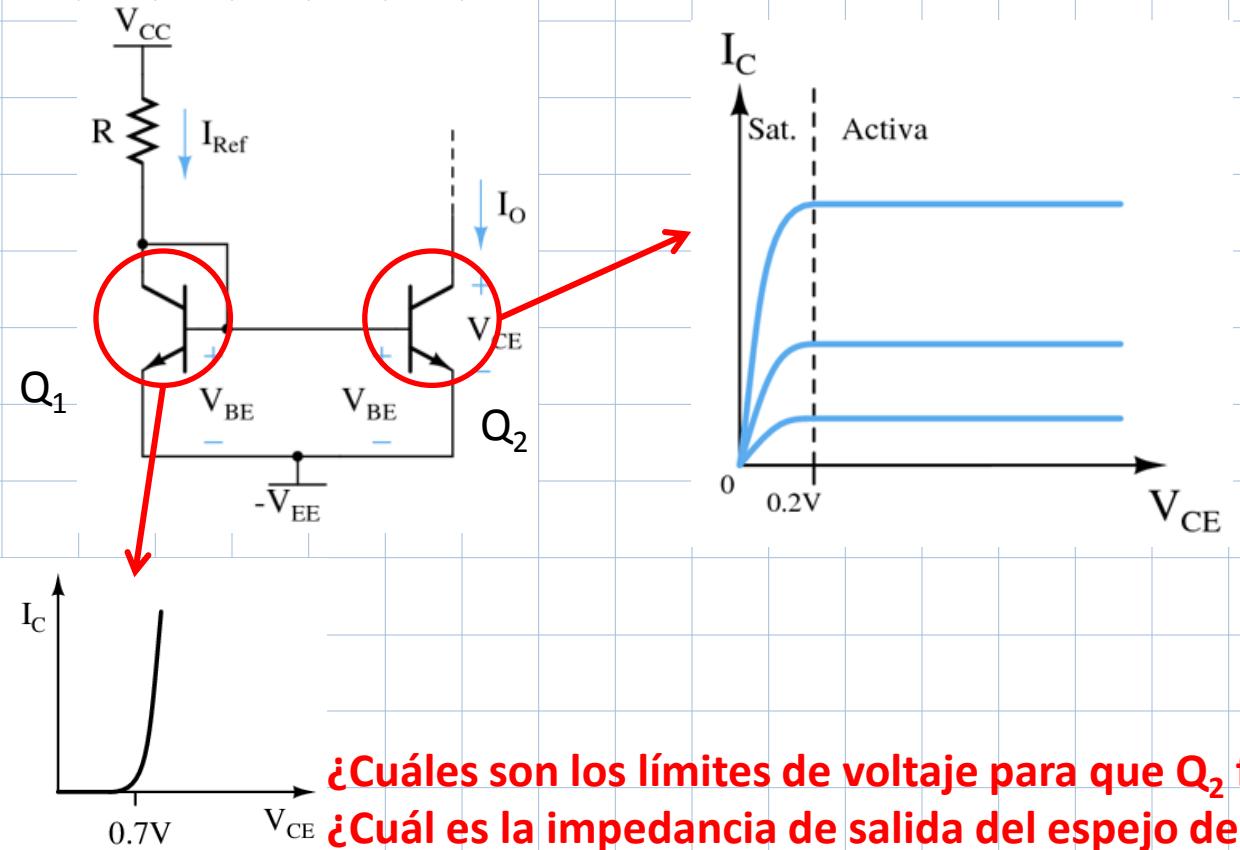


Recordemos que un espejo de corriente tiene dos partes

- Una parte que toma una corriente de referencia y genera un voltaje (recordar 5.09)
- Otra parte que usa ese voltaje como entrada y produce una corriente de salida



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



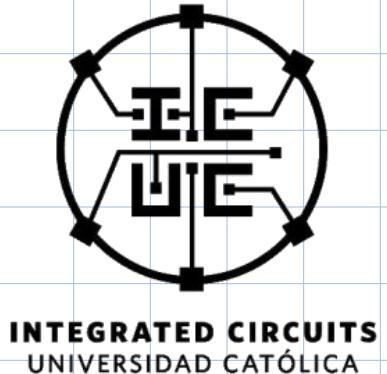
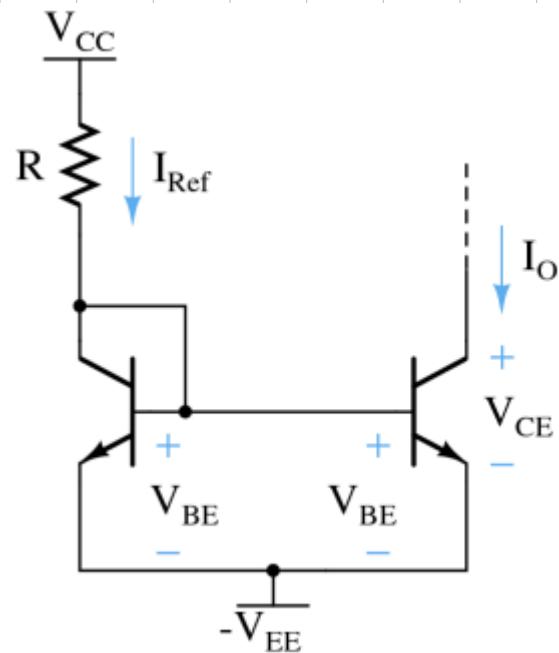
Considere $Q_2 = Q_1$

Encuentre I_{C2} , V_c

Repita para $A_{Q2} = 2A_{Q1}$

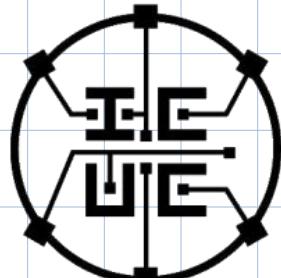
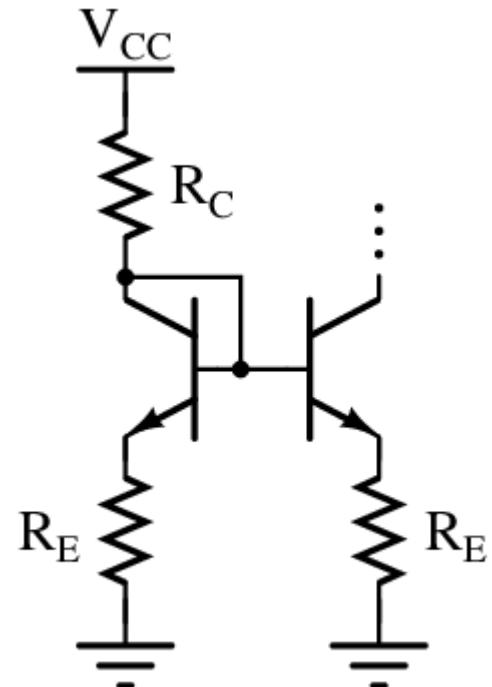
¿Cuáles son los límites de voltaje para que Q₂ funcione bien?
¿Cuál es la impedancia de salida del espejo de corriente?

Efectos de β finito y voltaje Early



Espejo de corriente con degeneración de emisor

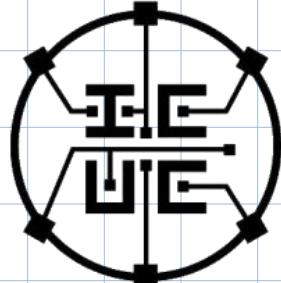
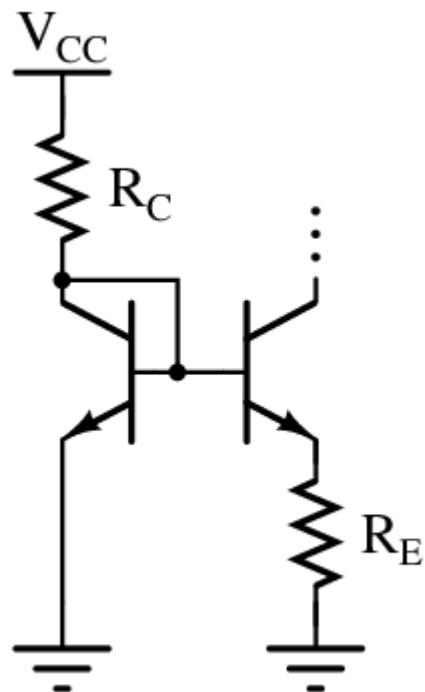
Es más preciso y tiene mayor impedancia de salida



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

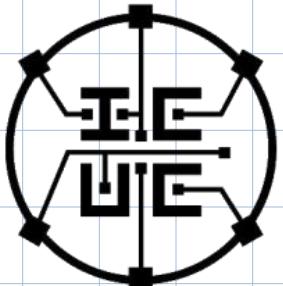
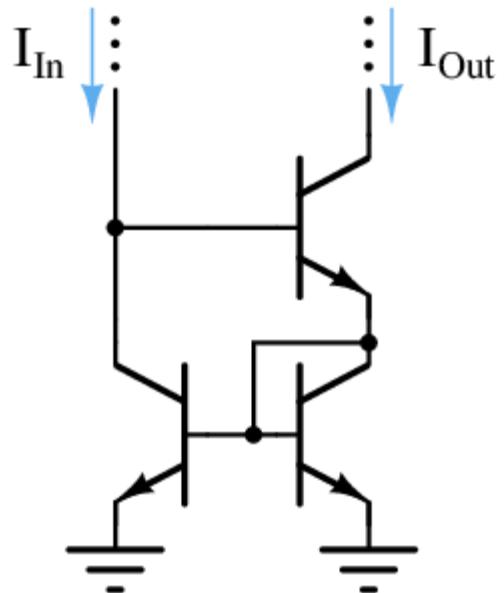
Fuente de corriente de Widlar

Usa degeneración de emisor para generar corrientes pequeñas usando resistores de valor moderado



Espejo de corriente de Wilson

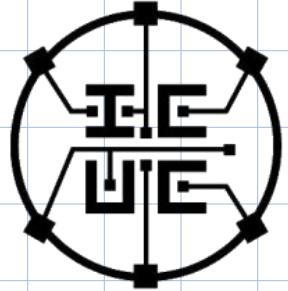
Aumenta impedancia de salida mediante realimentación



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



5.14



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Amplificadores con BJT

Dependencias:

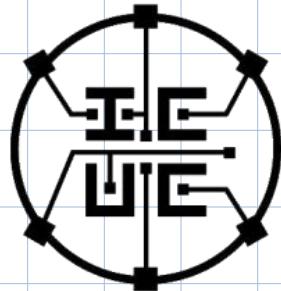
- 1.09 Introducción a los amplificadores electrónicos
- 5.08 El BJT en pequeña señal

angel@uc.cl

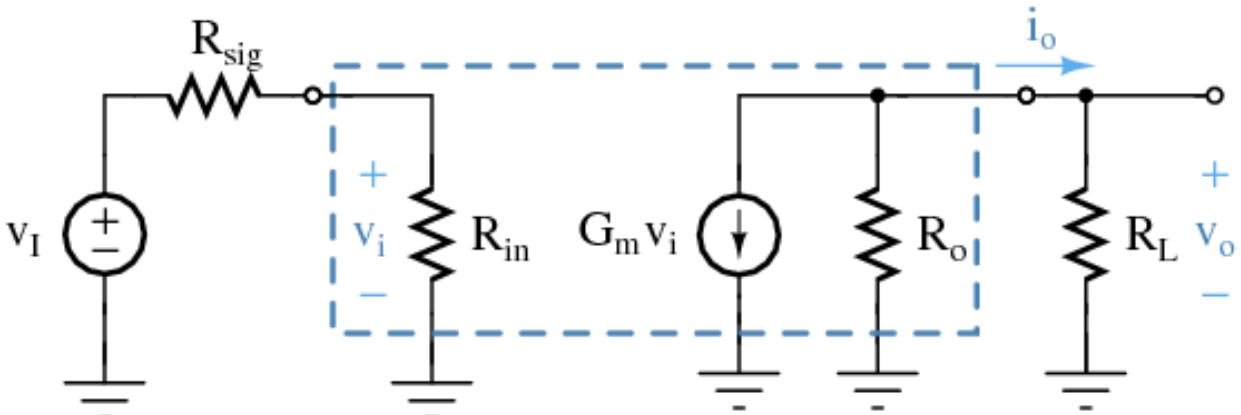
Electrónica en cápsulas

Amplificadores con BJT

- Lo más común: amplificador de voltaje
 - La entrada y la salida son señales de voltajes
 - Como vimos en 1.09, hay otros tipos de amplificadores, pero ningún amplificador es realmente un Thévenin perfecto o un Norton perfecto
- Internamente el BJT es parecido a una fuente de **corriente controlada por voltaje**, o transductor...
 - Solución: convertir $V \rightarrow I \rightarrow V$

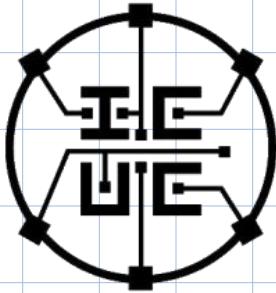


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

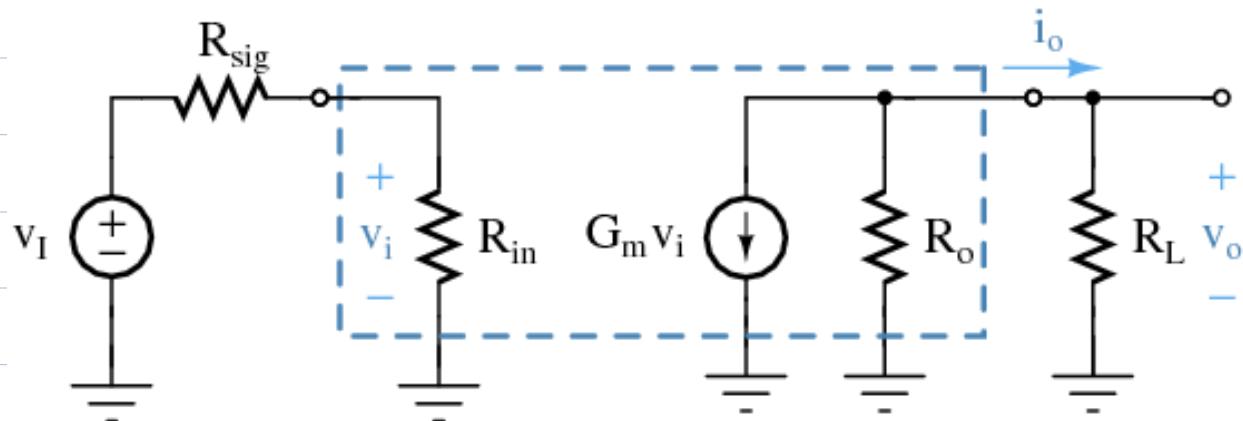


Recordemos g_{meff} , r_{in} y r_{out}

- Cualquier amplificador lineal puede ser representado como un Thévenin con fuente controlada, o como un Norton controlado
- Entonces es posible modelar casi cualquier amplificador con MOSFETs, arbitrariamente complejo*, usando sólo tres parámetros incrementales: r_{in} , g_{meff} y r_{out}
- Corolario: para lograr mayor ganancia de voltaje, hay que aumentar g_{meff} y r_{out}
- g_{meff} , r_{in} y r_{out} son parámetros incrementales y pueden estar implementados mediante una combinación de componentes circuitales
 - Ej: r_{out} podría ser implementado con un diodo o con otro BJT o MOSFET (!)



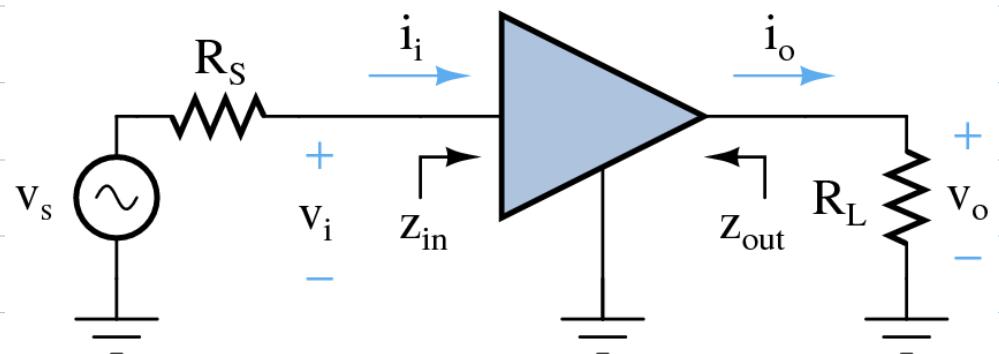
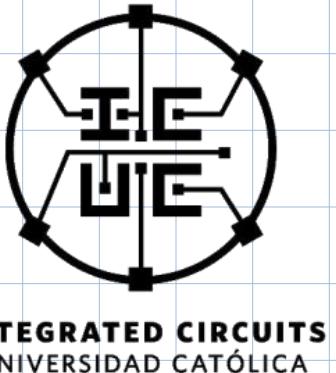
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



* Aquí despreciamos no linealidades y respuesta en frecuencia

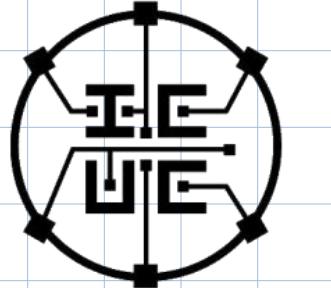
Recordemos: cálculo de los parámetros incrementales g_{meff} , r_{in} y r_{out}

- Para calcular r_{in} , simplemente aplicamos una fuente incremental en la entrada y medimos la relación entre voltaje y corriente
 - Dependiendo de la configuración, puede haber diferencias en la impedancia de entrada si tenemos la carga conectada o desconectada
- Para calcular g_{meff} , coraplicamos entrada v_i , cortocircuitamos la salida, medimos la corriente de cortocircuito i_{cc} y luego calculamos cuociente
- Para calcular r_{out} , aplicamos una fuente incremental en la salida y medimos la relación entre voltaje y corriente
 - Dependiendo de la configuración, puede haber diferencias en la impedancia de salida si tenemos la fuente de entrada conectada o desconectada



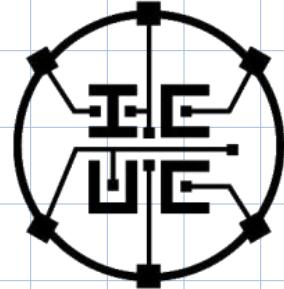
¿Cómo hacer amplificadores con BJTs?

- Existen **tres configuraciones elementales** de amplificadores con BJTs (NPN o PNP):
 - Amplificador de **emisor común** (CE)
 - Caso general: amplificador de CE con resistencia en el emisor
 - Amplificador de **base común** (CB)
 - Amplificador de **colector común** (CC)
- Todos requieren polarización
- Todos requieren una carga circuital, activa o pasiva
- En la práctica, es posible diseñar diversos amplificadores basados en combinaciones de estas tres topologías
- Dominar bien sus ganancias e impedancias de puerto facilita el análisis orientado al diseño
- Comenzaremos con el CE en la próxima cápsula...



Síntesis - amplificadores BJT sin carga

* precaución cuando hay carga... evitar el mal uso
de este resumen a toda costa

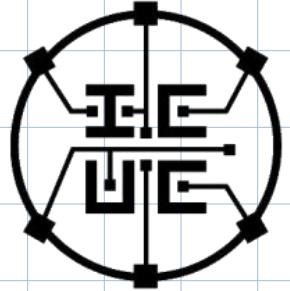


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

| Config. | Ganancia de voltaje** | Ganancia de corriente | Resistencia de entrada | Resistencia de salida | Uso principal |
|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------|
| CE | Alta $(-g_m \cdot r_o)$ | Alta (β) | relativamente alta (r_π) | Alta (r_o) | Amplificador de voltaje |
| CE con degeneración de emisor | $(\sim R_{Ctot}/R_{Etot})^*$ | Alta (β) | Alta $(\sim r_\pi \cdot (1+g_m \cdot R_E))$ | R_C^* | Amplificador de voltaje |
| CB | Alta* $(g_m \cdot R_C)$ | ≈ 1 (α) | Baja $(r_e \sim 1/g_m)$ | R_C^* | Buffer de corriente |
| CC | ≈ 1 | Alta ($\beta+1$) | Alta* $\sim (\beta+1) \cdot R_L$ | Baja $(r_e + R_{sig})/(\beta+1)$ | Buffer de voltaje |



5.15



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Amplificador de CE

Dependencias:

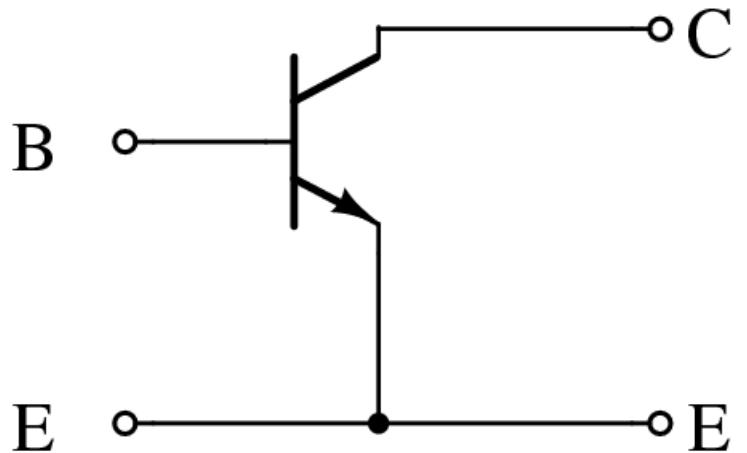
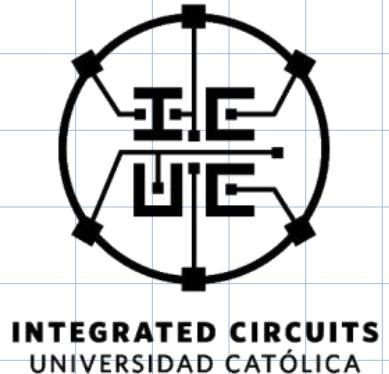
- 5.14 Amplificadores con BJT

angel@uc.cl

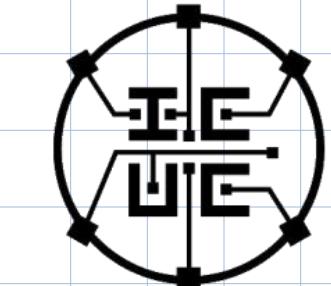
Electrónica en cápsulas

Amplificador de emisor común (CE)

- Por lejos el más utilizado, ya sea de forma individual o en combinación con otras etapas
- Terminales
 - Entrada: base
 - Salida: colector
 - Común: emisor
- Características: buen transductor
 - Alta ganancia de voltaje
 - Alta impedancia de entrada
 - Alta impedancia de salida (podría no importarnos)

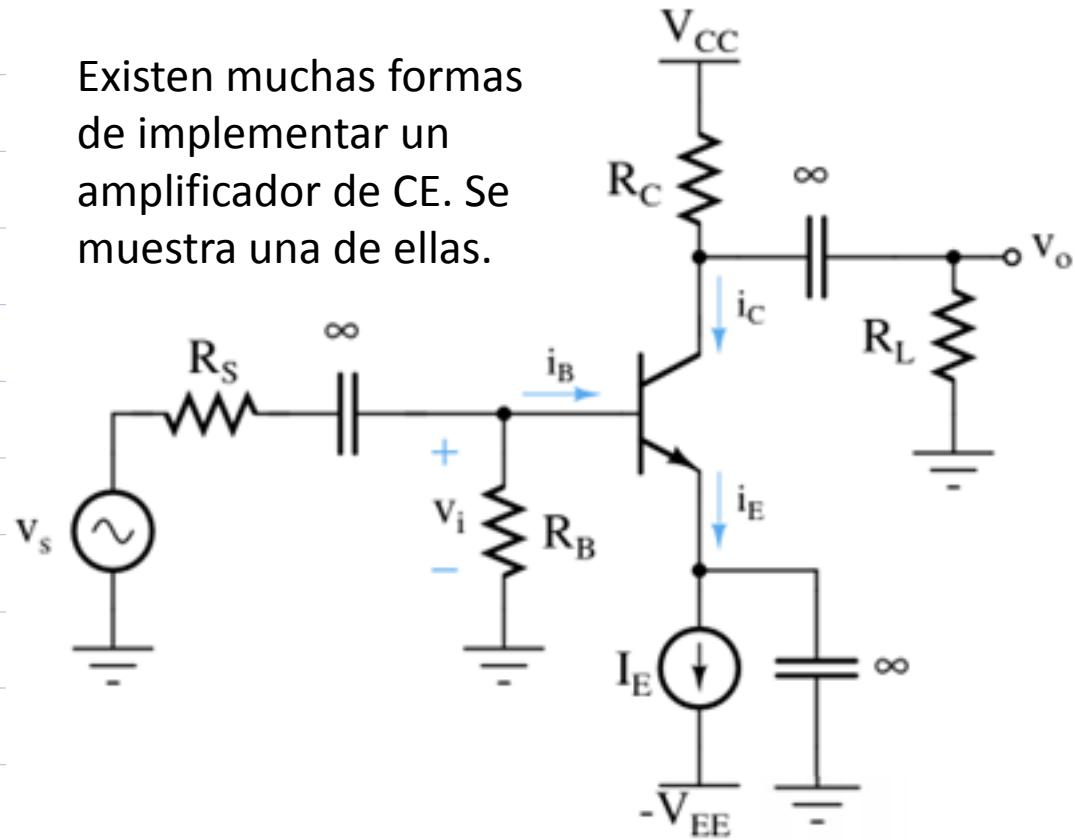


Análisis del amplificador de CE



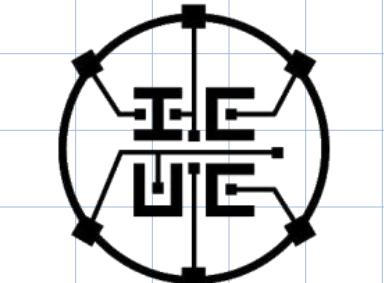
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Existen muchas formas
de implementar un
amplificador de CE. Se
muestra una de ellas.

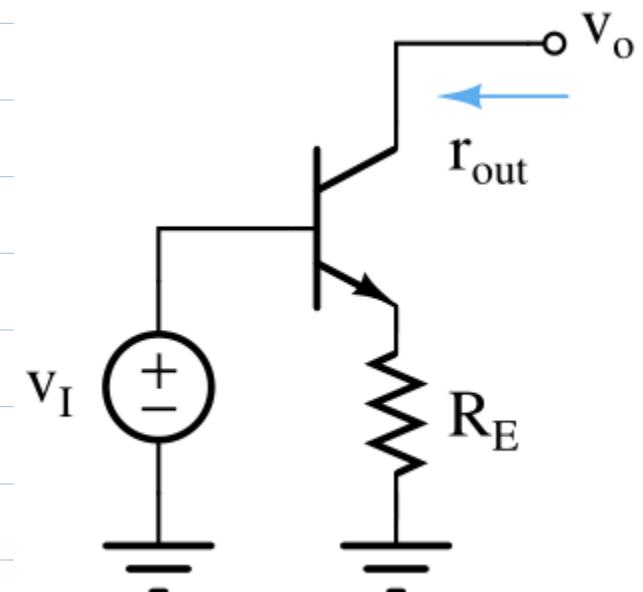


Variante: amplificador de CE con degeneración de emisor

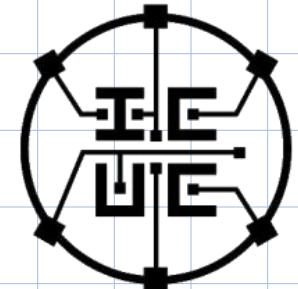
- Generalización del CE, éste incluye una resistencia de degeneración de emisor entre el emisor y tierra de señal
 - Esta resistencia mejora la **estabilidad de polarización DC** gracias a la **realimentación**
 - También aumenta la resistencia de salida...
 - Y aumenta R_{in} en $(1+g_m \cdot R_E)$
 - Y disminuye la transconductancia efectiva en $(1+g_m \cdot R_E)$
 - Puede mejorar respuesta a alta frecuencia
 - Puede ser implementada mediante un resistor o cualquier componente resistivo



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

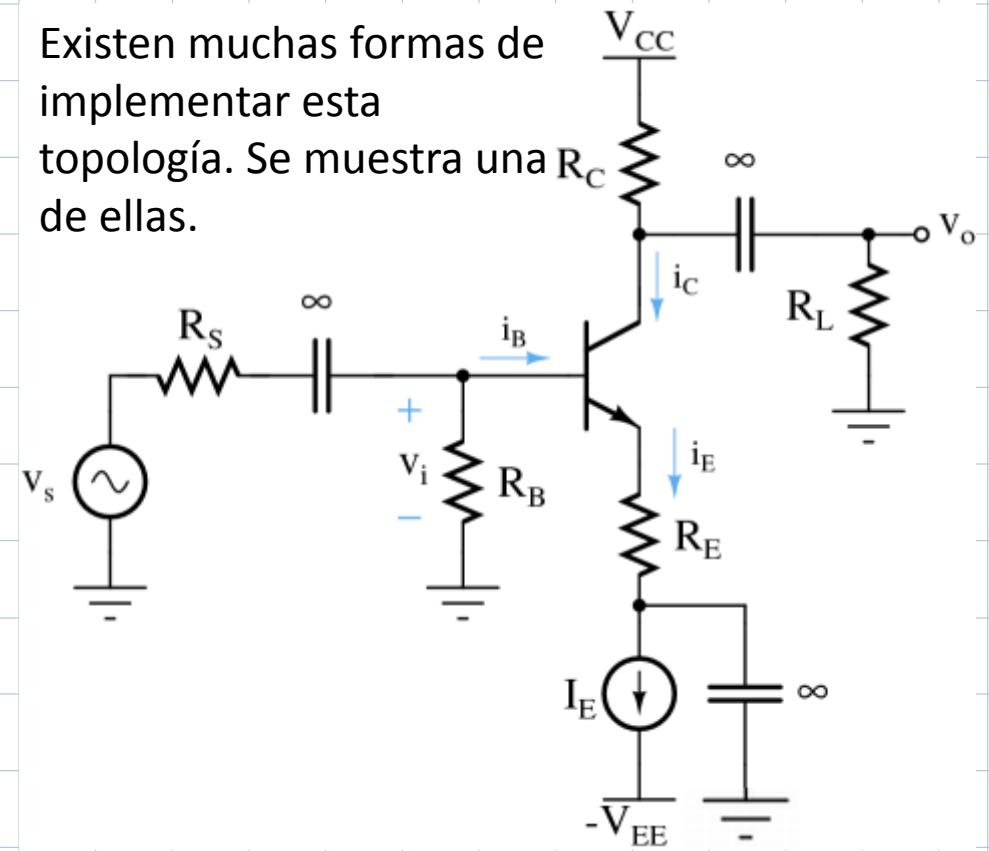


Análisis del amplificador de CE con degeneración de emisor



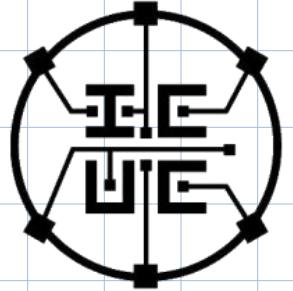
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Existen muchas formas de implementar esta topología. Se muestra una de ellas.





5.16



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Amplificador de CB

Dependencias:

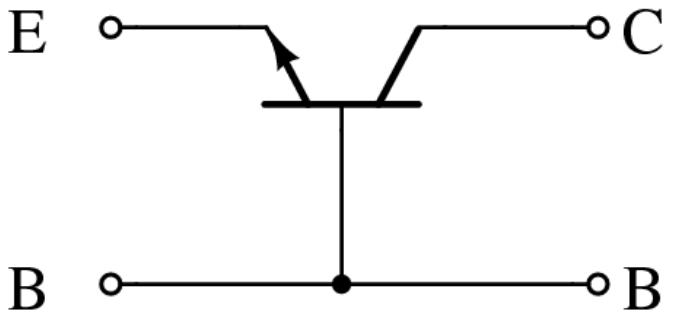
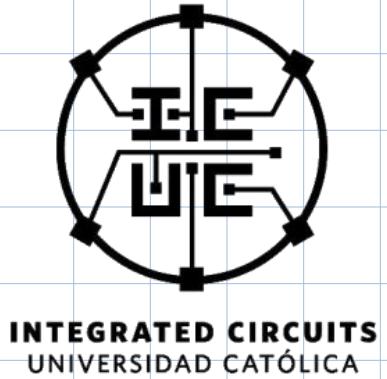
- 5.14 Amplificadores con BJT

angel@uc.cl

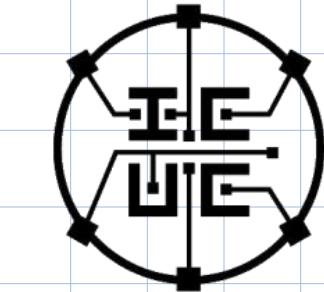
Electrónica en cápsulas

Amplificador de base común (CB)

- Muy utilizado como **buffer de corriente**, usualmente como complemento de la etapa CS
- Terminales
 - Entrada: fuente
 - Salida: dren
 - Común: compuerta
- Características: buen buffer de corriente
 - Baja impedancia de entrada
 - Alta impedancia de salida
 - Ganancia de corriente prácticamente unitaria



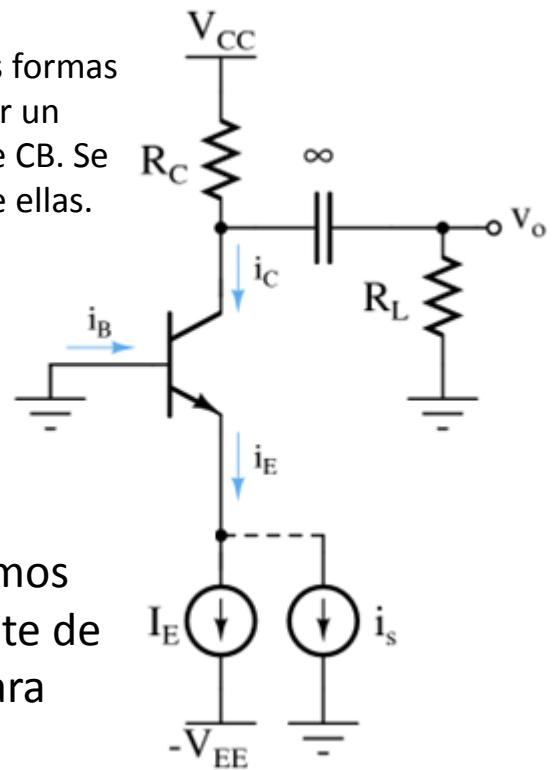
Análisis de un amplificador de CB



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

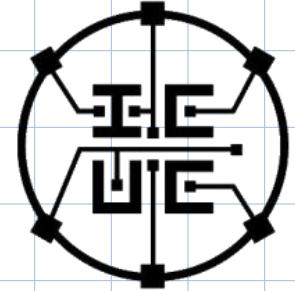
Existen muchas formas de implementar un amplificador de CB. Se muestra una de ellas.

Aquí decidimos utilizar fuente de corriente para las señales.





5.17



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Amplificador de CC

Dependencias:

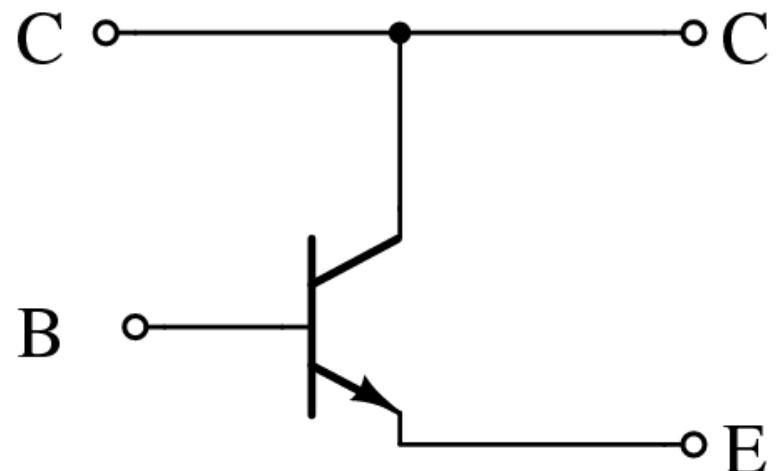
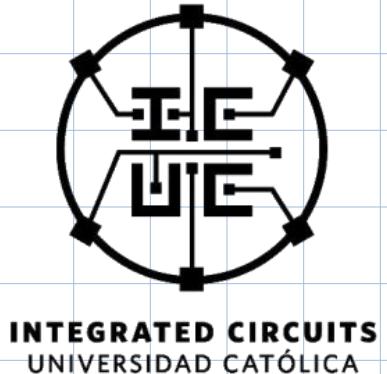
- 5.14 Amplificadores con BJT

angel@uc.cl

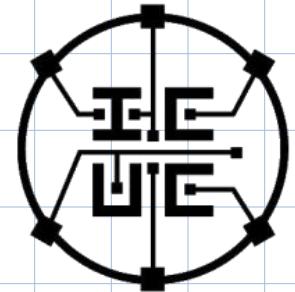
Electrónica en cápsulas

Amplificador de dren común (CC), también llamado “seguidor de emisor”

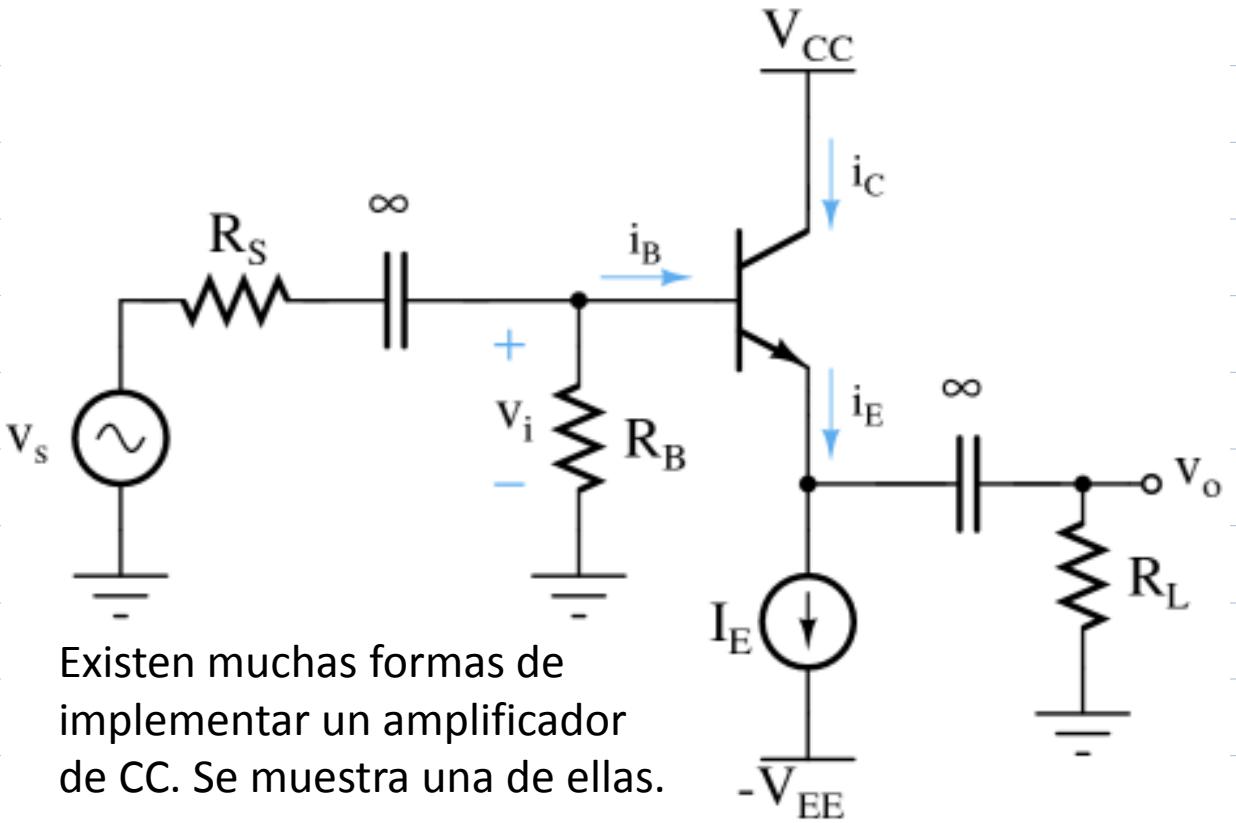
- Muy utilizado como **buffer de voltaje**
- Terminales
 - Entrada: base
 - Salida: emisor
 - Común (tierra de señal): colector
- Características: buen buffer de voltaje
 - Alta impedancia de entrada
 - Baja impedancia de salida
 - Ganancia de voltaje prácticamente unitaria



Análisis del amplificador de CC

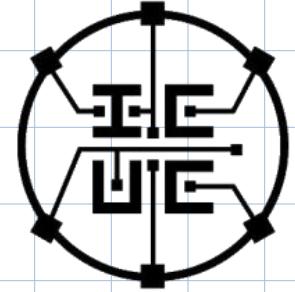


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA





5.18



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Cargas circuitales no lineales

Dependencias:

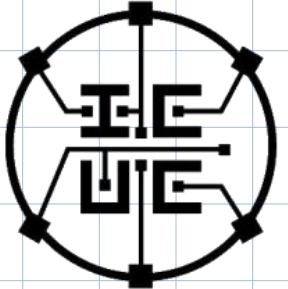
- 5.09 El BJT conectado como diodo
- 5.13 Espejos de corriente
- 5.14 Amplificadores con BJT

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

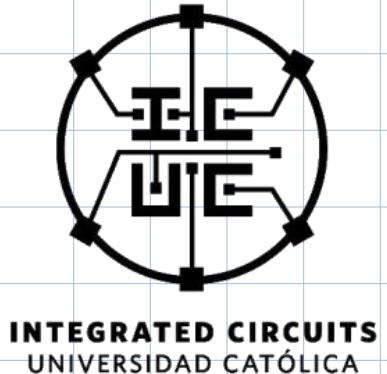
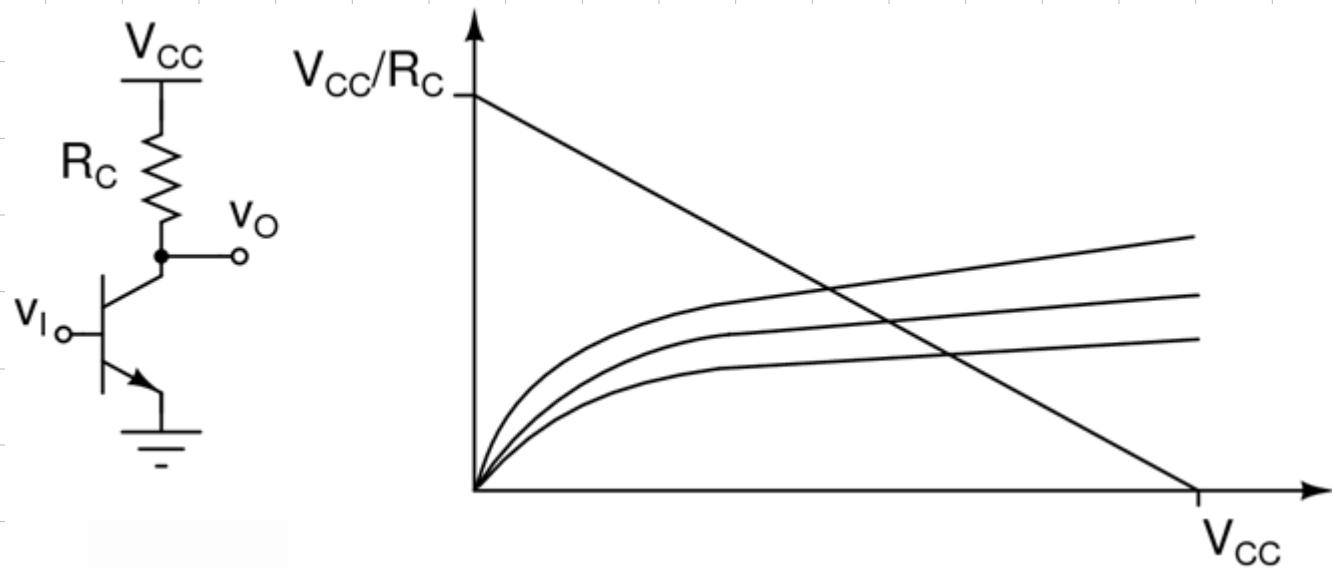
No todas las cargas son resistores

- En las cápsulas anteriores aprendimos las tres configuraciones elementales de amplificadores con BJTs (CE, CB, CC)...
 - ... y que normalmente se utilizan en combinaciones para lograr diferentes especificaciones
- En esta cápsula profundizaremos en dos ideas importantes en el diseño de amplificadores:
 - Carga activa
 - Carga como diodo
- Existen muchas más configuraciones de dos o más transistores, algunas de las cuales son materia de otros cursos

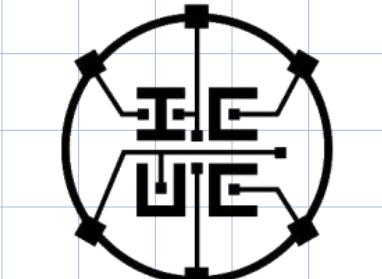
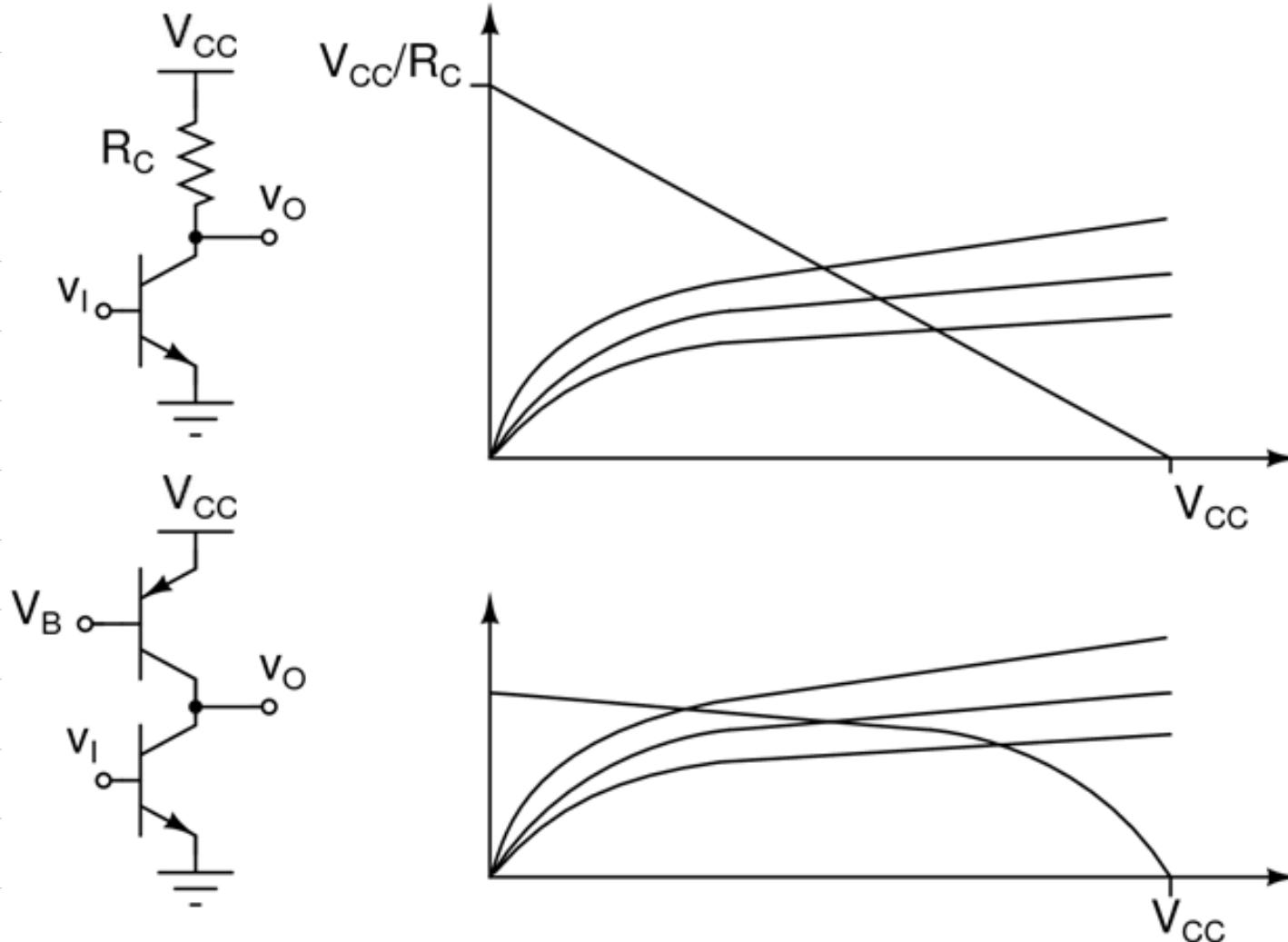


Carga activa: motivación

- Alta ganancia es muy útil en circuitos con realimentación. ¿Cómo lograrla?
 - ¿Muchas etapas? mala idea... **¿Por qué?**
- ¿Cómo obtener la mayor ganancia en una sola etapa?
- ¿Cómo aprovechar al máximo el “bien raíz” del silicio?
- Sabemos que $|A_v| = g_m R_C$ y $g_m = I_C/V_T$



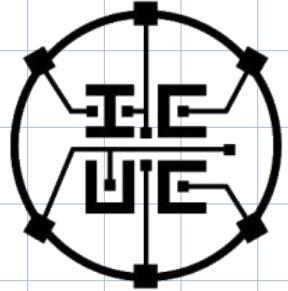
Idea genial: PNP como carga del NPN (al revés también funciona)



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

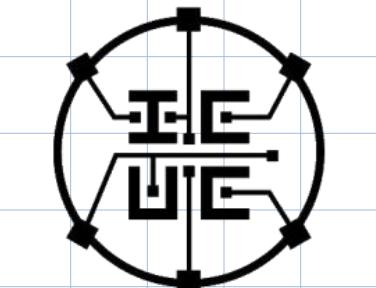
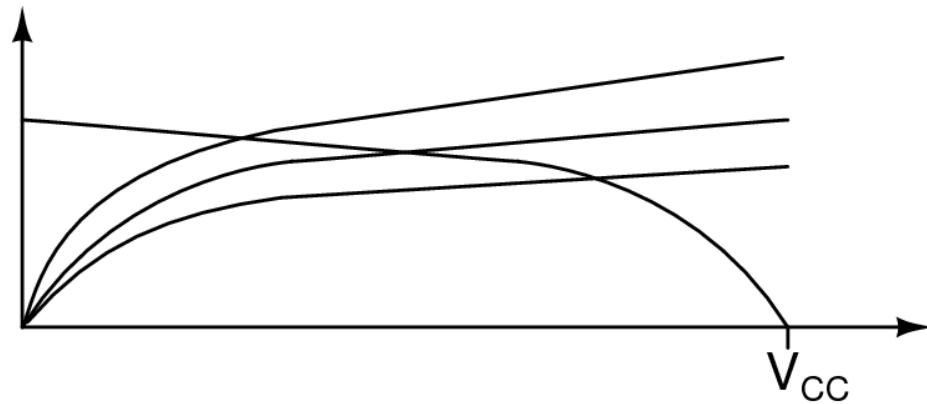
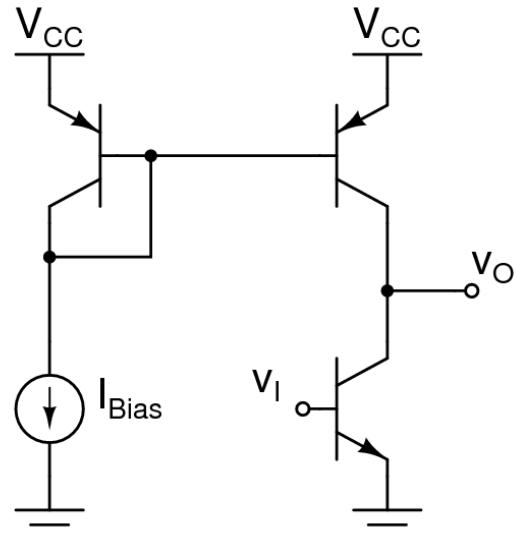
- En lugar de R_C , usamos el PNP con $v_{BE} = \text{cte}$
 - ¡se convierte en r_o !!
- El PNP va conectado al nodo de alta impedancia del CS
 - No es polarización, sino carga
- El PNP ocupa mucho menos espacio que un R_C grande
 - ¡y requiere menor alimentación!!

A propósito, ¿recordemos cómo es la pelea entre dos fuentes de corriente?



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

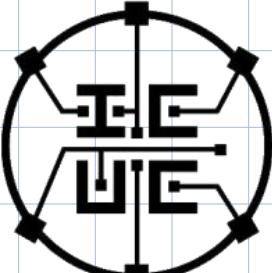
Análisis de un amplificador con carga activa



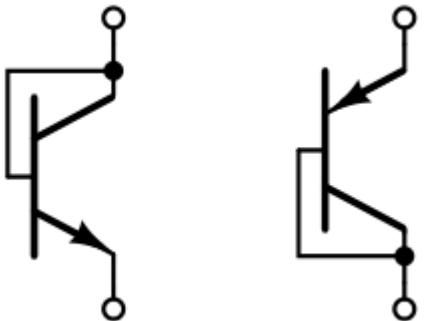
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

¿Qué tal otra carga circuital no lineal?

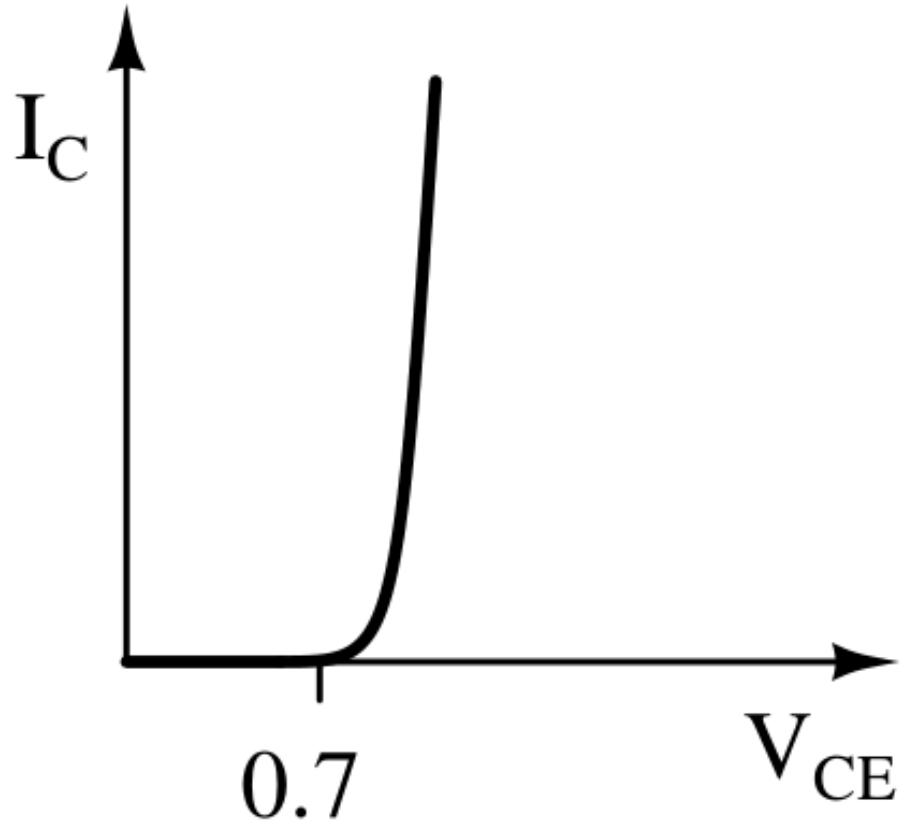
- Recordemos de 5.09: un BJT conectado como diodo tiene impedancia incremental $\sim 1/g_m$



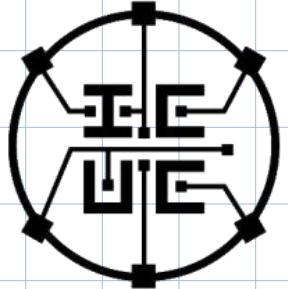
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



- Tal vez podemos usar esa característica como carga de un amplificador con BJT



Ejemplo: amplificador de CE con carga de BJT conectado como diodo



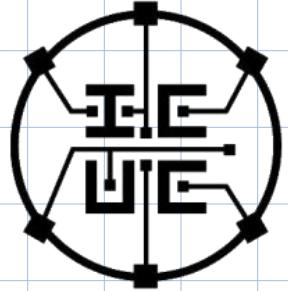
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

La ganancia es ratiométrica

La carga puede alimentar un espejo de corriente y aumentar ganancia



5.19



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Configuración cascodo

Dependencias:

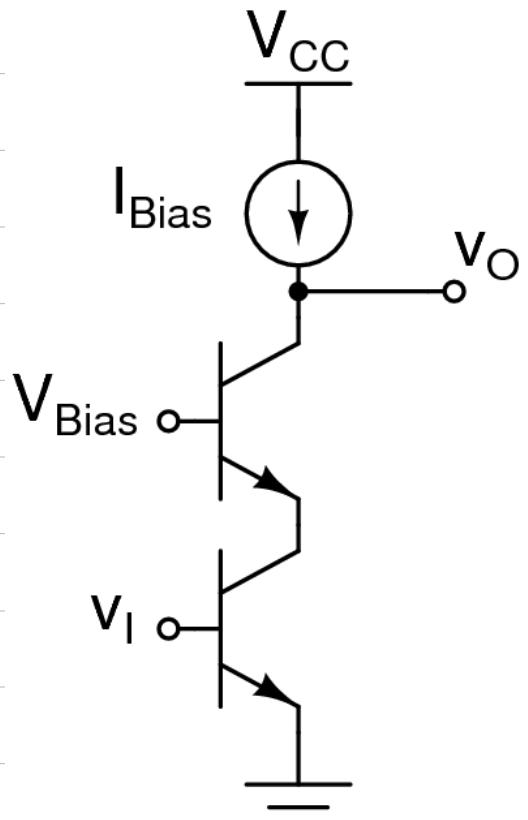
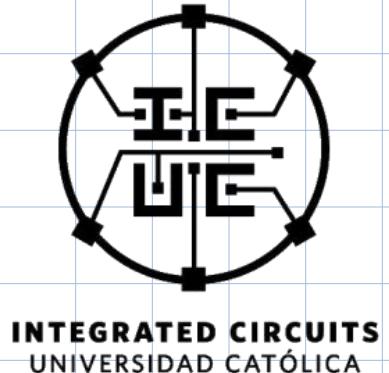
- 5.15 Amplificador de CE
- 5.16 Amplificador de CB

angel@uc.cl

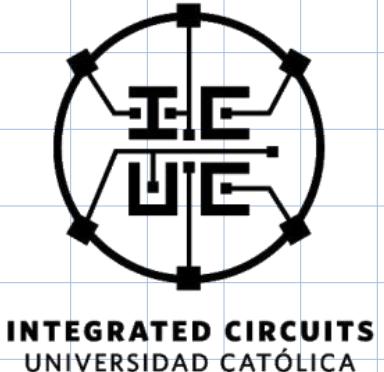
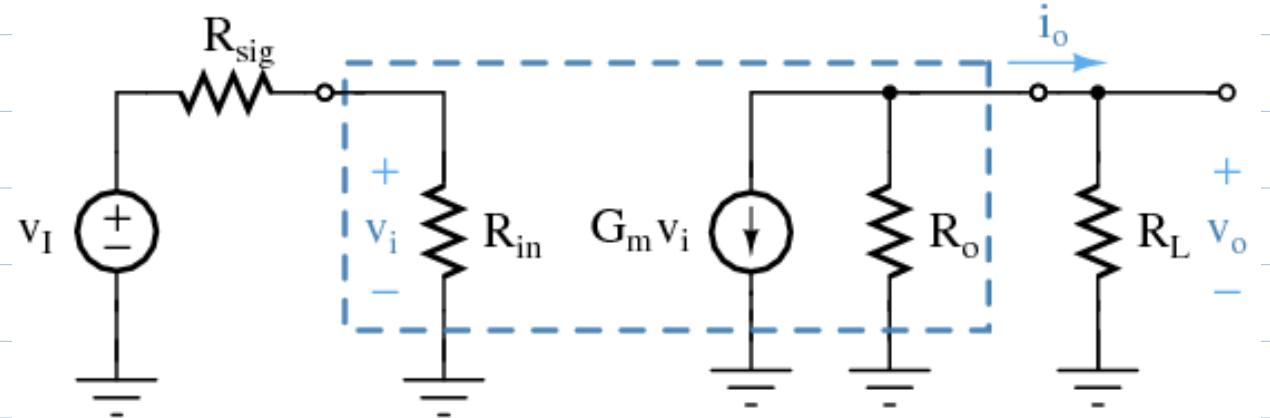
Electrónica en cápsulas

Motivación

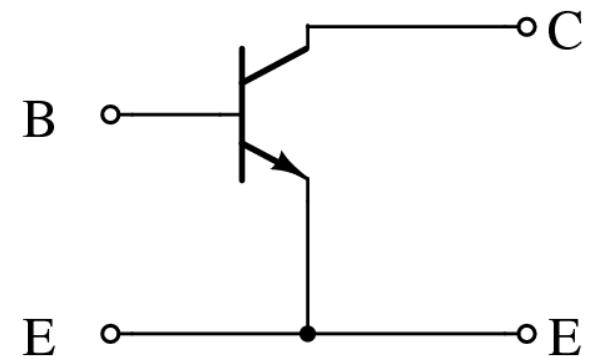
- Etapa CE es una buena fuente de corriente
- Etapa CB es un buen buffer de corriente
 - Se lleva la mayor parte de la corriente de la fuente controlada de la etapa CE ($1/g_m$ vs. r_o)
 - Aumenta la impedancia de salida
 - Hace que V_{CE} sea más estable
 - mitiga efecto Miller en C_{BC}
- El cascodo es la **conexión CE-CB en cascada**
 - Ambos BJTs son del mismo sabor
 - **La corriente del CB entra por su nodo de baja impedancia**



Recordemos g_{meff} y r_{out}

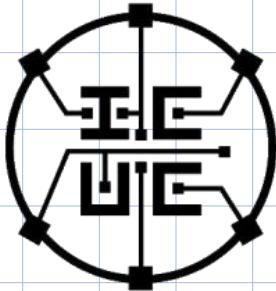


- Para lograr alta ganancia necesitamos un g_{meff} alto y un r_{out} alto
- Sabemos que la etapa CE es un buen transductor, pero su impedancia de salida no es tan alta como nos gustaría

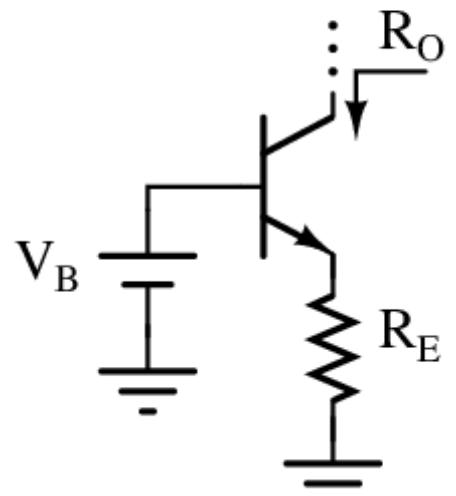
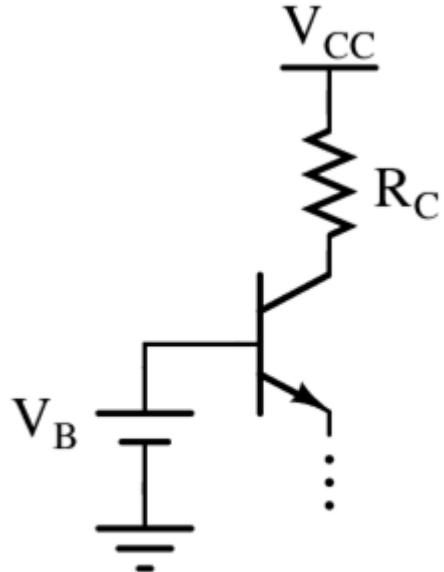


La etapa de CE tiene buen g_m

Recordemos las impedancias de la etapa CB

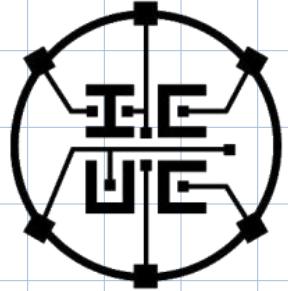


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

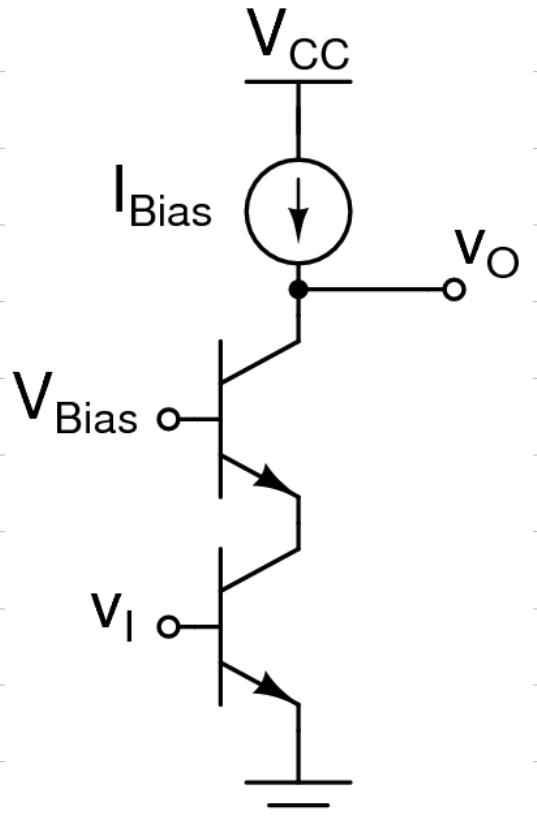


Una etapa CB toma una corriente a través de su baja impedancia de nodo E, y entrega en su salida la misma corriente de la entrada, pero con **mayor impedancia**

Cascodo: aprovechamos el g_m de la etapa
CE, y el aumento de r_{out} de la etapa CB

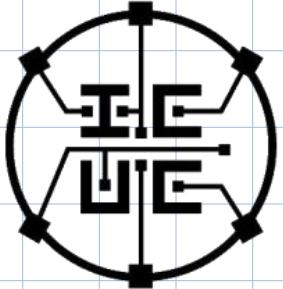


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA





5.20



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Cascodos plegados, cascodos telescopicos y espejos de corriente cascodeados

Dependencias:

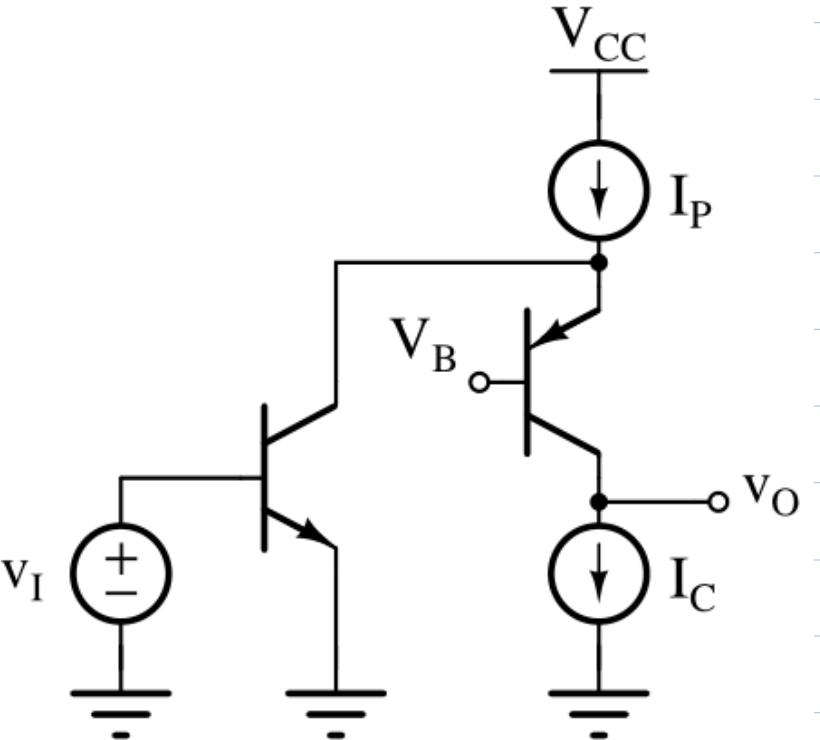
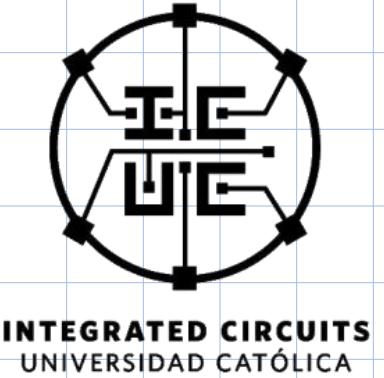
- 5.19 Configuración cascodo

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

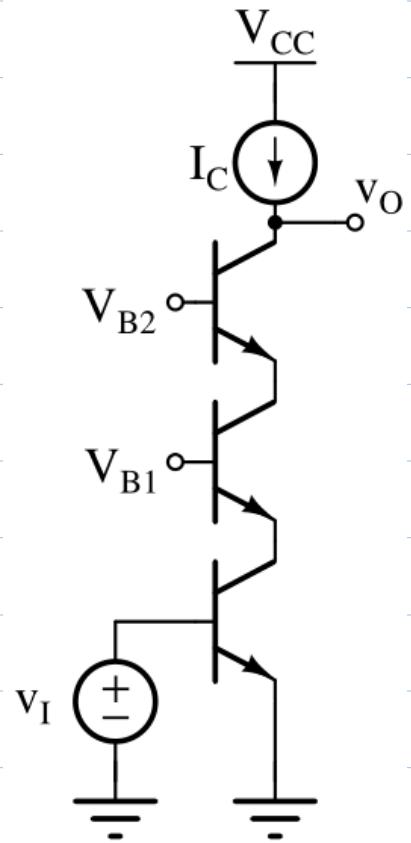
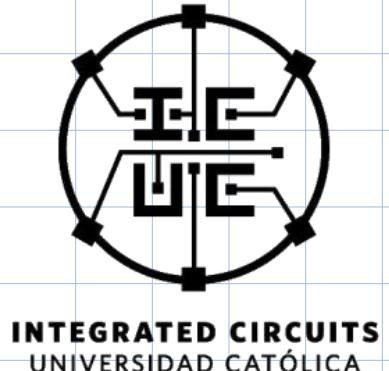
Cascodo plegado: igual al cascodo en pequeño señal, pero diferente en DC

- La corriente del CG entra por su nodo de baja impedancia, igual que en el cascodo convencional
 - Pero en el cascodo plegado, los transistores de CE y CB son de distinto sabor
 - La fuente de corriente adicional “pliega” el camino de la señal
- **¿Cuál es la ventaja del cascodo plegado por sobre el cascodo convencional?**



Cascodo telescopico: cascodeando un cascodo (!)

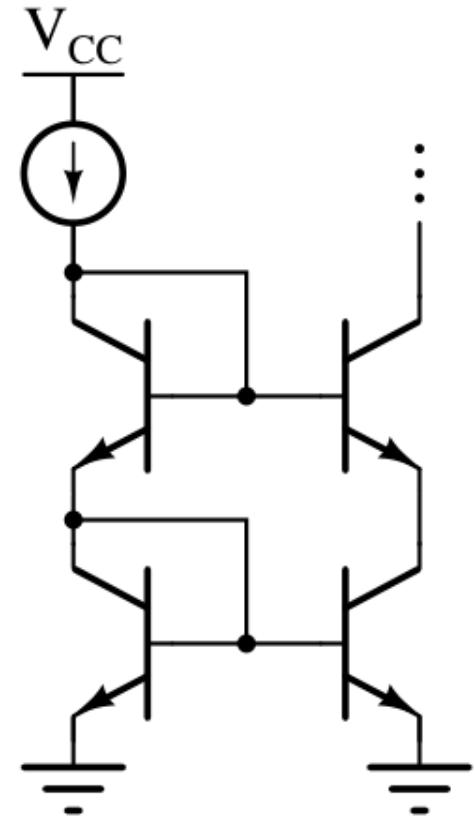
- Ya aprendimos que una etapa CB aumenta la impedancia de una etapa de CE...
- **¿Una etapa de CB podrá aumentar la impedancia de salida de una etapa de CE que ya está cascodeada?**



¿Cuál es la desventaja de un cascodo telescopico?

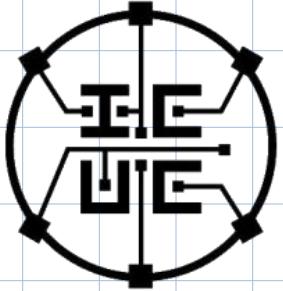
Espejos de corriente cascodeados

- Tienen mayor impedancia de salida, son fuentes de corriente “más ideales”
- **¿Cómo generamos el voltaje de compuerta de los dispositivos en CB? Una opción es usando BJTs conectados como diodos**





5.21



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Seguidor de fuente mejorado

Dependencias:

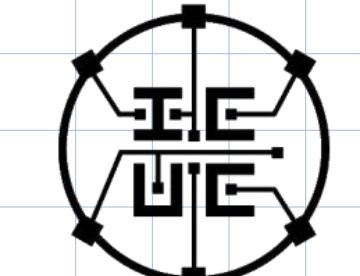
- 5.17 Amplificador de CC
- 5.19 Configuración cascodo

angel@uc.cl

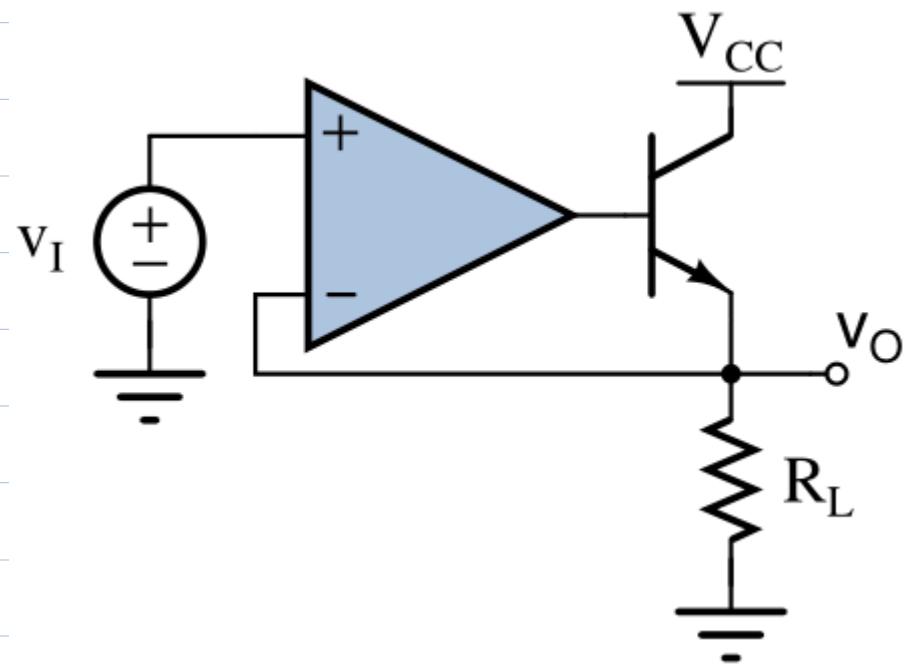
Electrónica en cápsulas

CC con realimentación

- Mayor impedancia de entrada
- Menor impedancia de salida



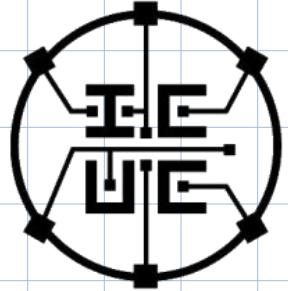
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



Puede ser usado para regular voltaje



5.22



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

BJTs compuestos

Dependencias:

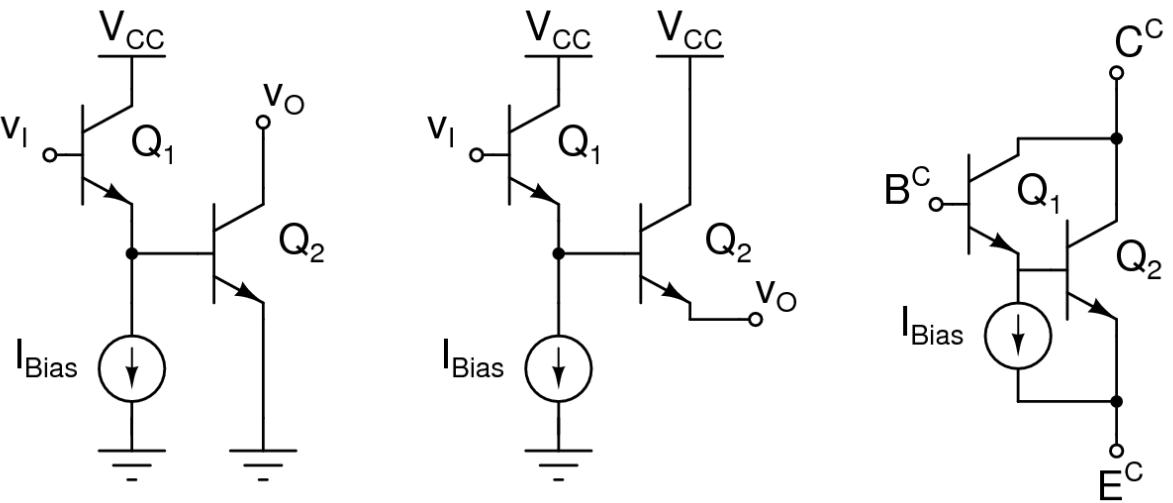
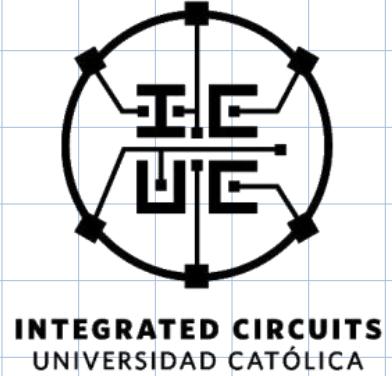
- 5.05 El BJT en corte y saturación

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

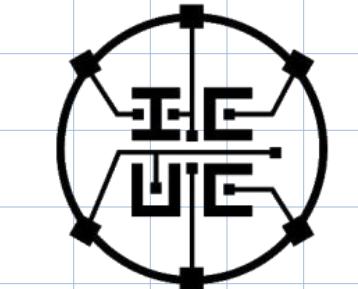
CC-CE, CC-CC, Darlington

- Son configuraciones compuestas muy parecidas
- Usan un transistor adicional para aumentar β y la resistencia de entrada del transistor bipolar individual
- Suelen ser lentos y especialmente al ser apagados, ya que la corriente de base del segundo transistor demora en drenar la carga acumulada en la salida del primer transistor
 - Esto se resuelve con una fuente de corriente o con un resistor pequeño ($<1k$) entre base y emisor del segundo transistor

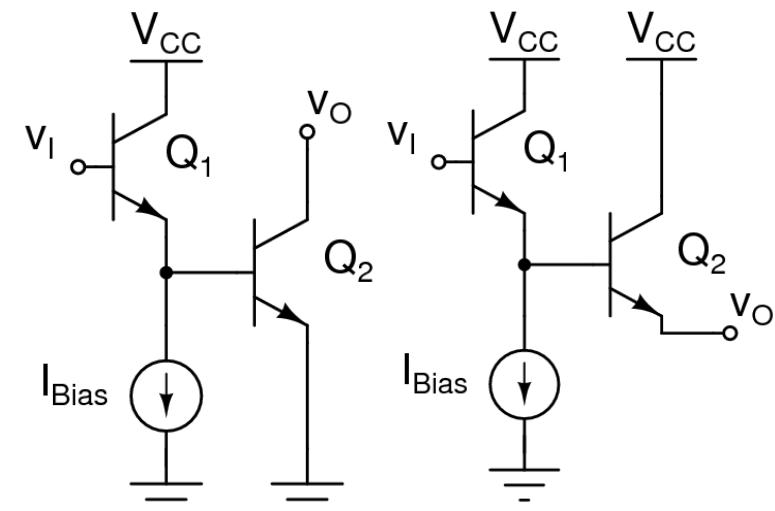


CC-CE y CC-CC

- I_{Bias} establece la corriente DC en Q_1
 - I_{Bias} puede estar ausente o ser reemplazada por un resistor en algunos casos
- Q_1 aumenta ganancia de corriente y resistencia de entrada

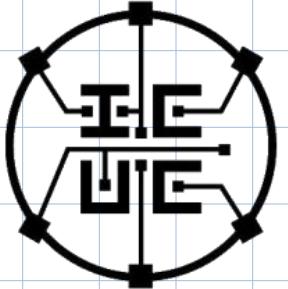


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

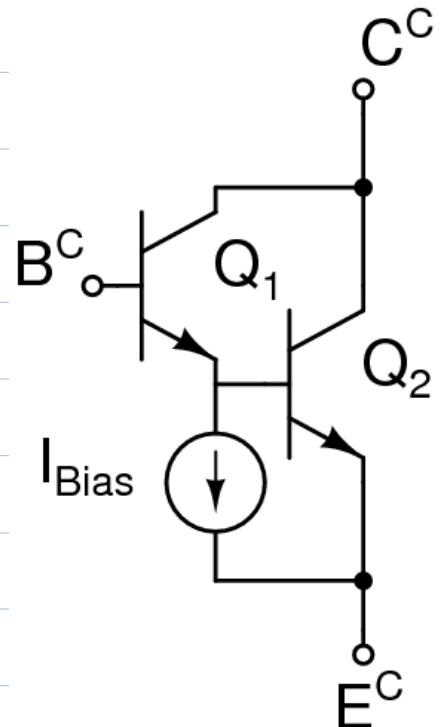


Etapa Darlington

- Los colectores van unidos; el emisor de Q_1 va a la base de Q_2
- I_{Bias} establece la corriente DC en Q_1
 - I_{Bias} puede estar ausente o ser reemplazada por un resistor en algunos casos
- Conectado como CC, es idéntico al CC-CC
- Conectado como CE, se parece al CC-CE, pero con colector de Q_1 a salida; esto tiene algunas desventajas:
 - reducción de r_o
 - aumento de la capacitancia parásita en la entrada
- Hay otras más: Darlington complementario (Sziklai), Darlington en BiCMOS...

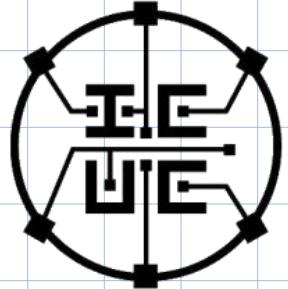


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA





5.23



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

BJTs reales

Dependencias:

- 5.03 Estructura del BJT

angel@uc.cl

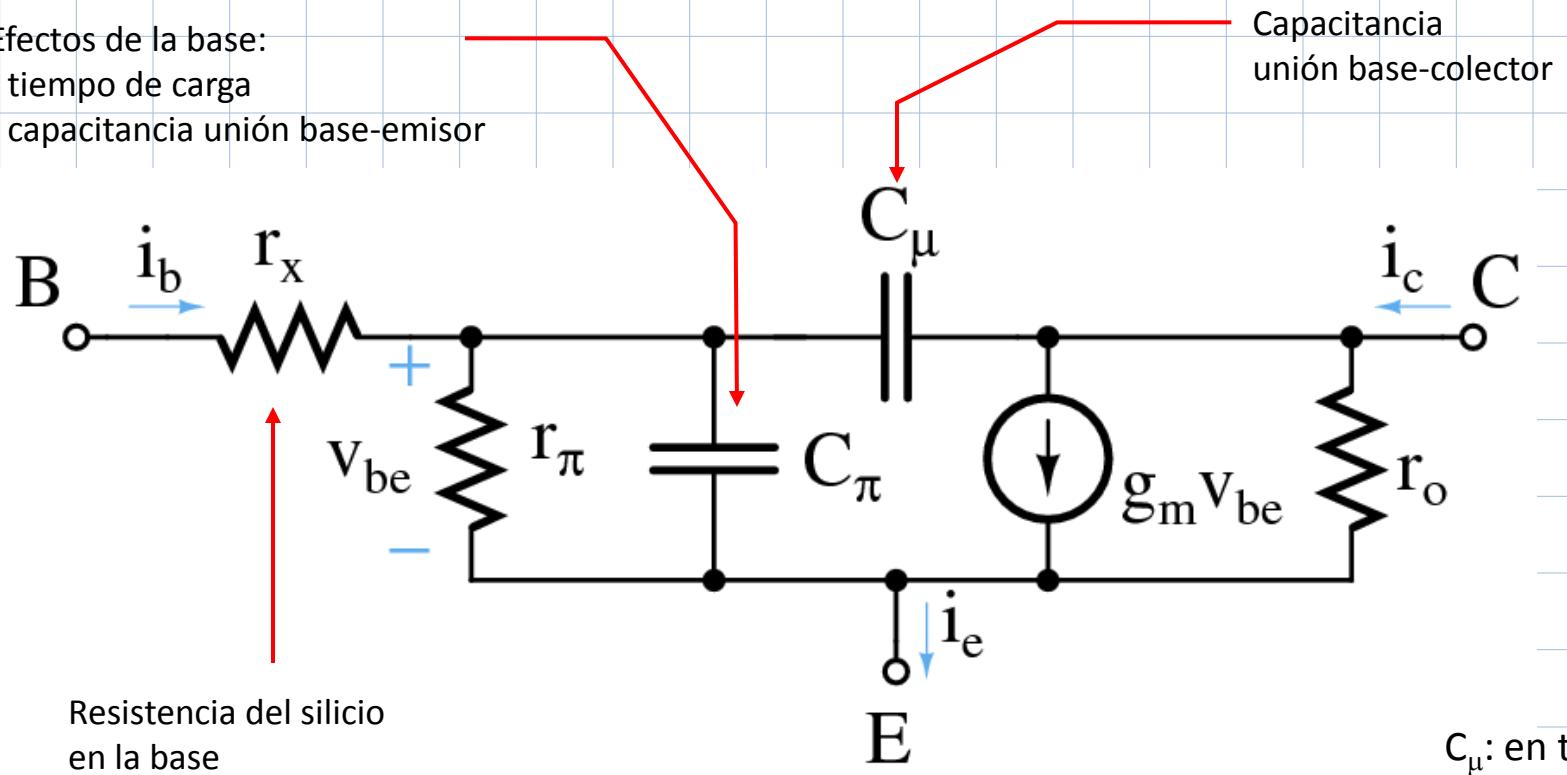
Electrónica en cápsulas

Capacitancias de los BJTs: Modelo híbrido π

La operación del BJT se ve limitada a alta frecuencia debido a sus capacitancias y resistencias parásitas

Efectos de la base:

- tiempo de carga
- capacitancia unión base-emisor



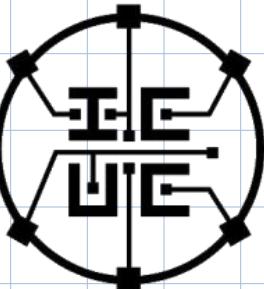
Resistencia del silicio
en la base

Capacitancia
unión base-colector

C_μ : en torno a 1pF

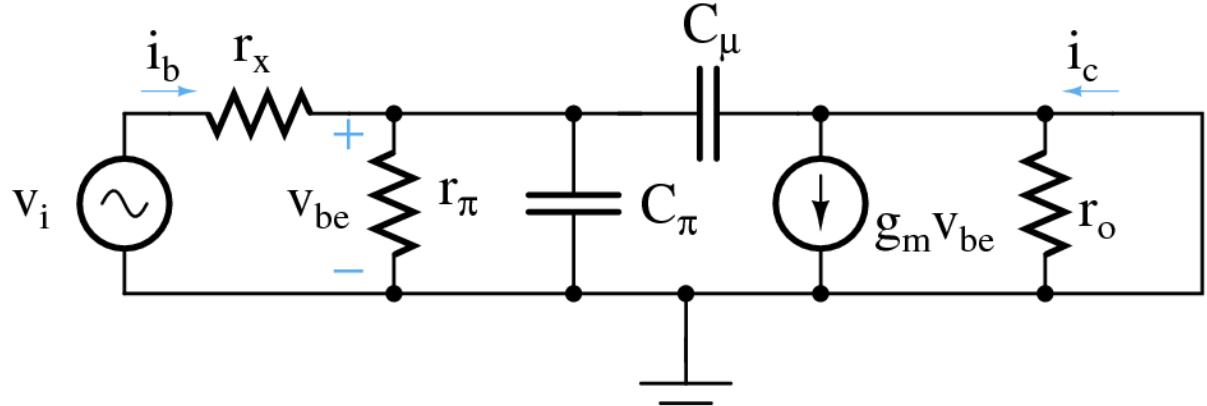
C_π : pocas decenas de pF

r_x : decenas de Ω

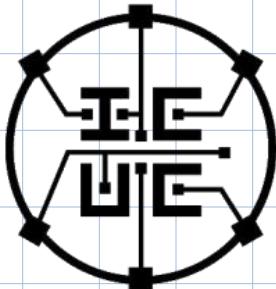


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

h_{fe} en función de la frecuencia

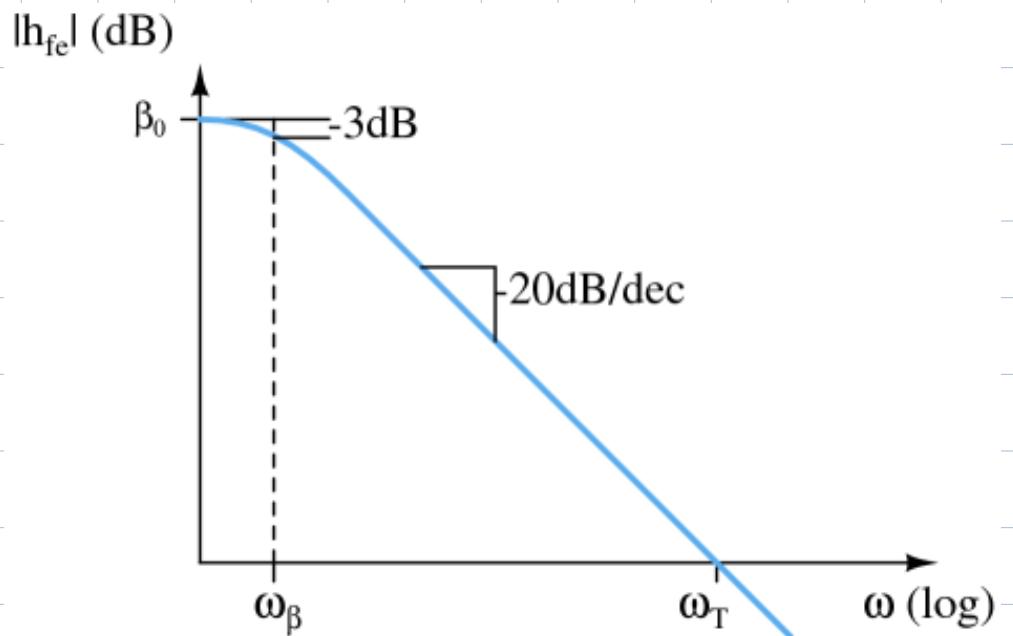


$$h_{fe} = \frac{\beta_0}{1 + s(C_\pi + C_\mu) r_\pi}$$



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Bode para h_{fe} (corriente constante)

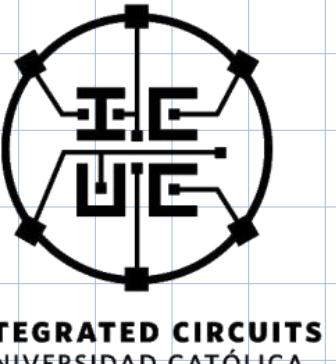


$$\omega_\beta = \frac{1}{(C_\pi + C_\mu) r_\pi}$$

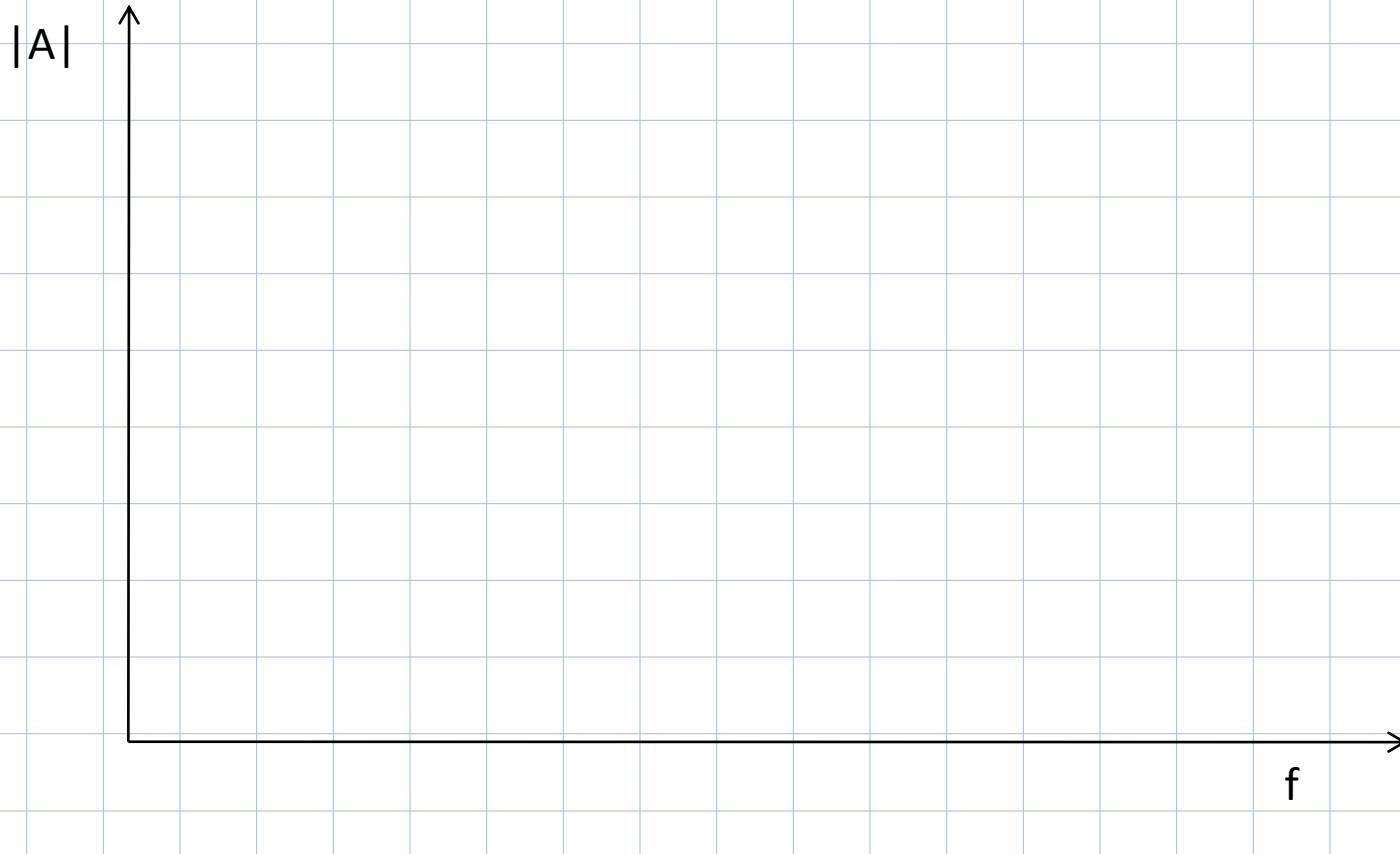
Frecuencia de Corte

$$\omega_T = \beta_0 \cdot \omega_\beta = \frac{g_m}{C_\pi + C_\mu}$$

Ancho de banda de ganancia unitaria,
depende de la corriente
(ej: 250MHz para un 2N2222)

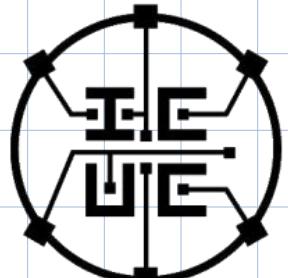


Respuesta en frecuencia amplificador CE

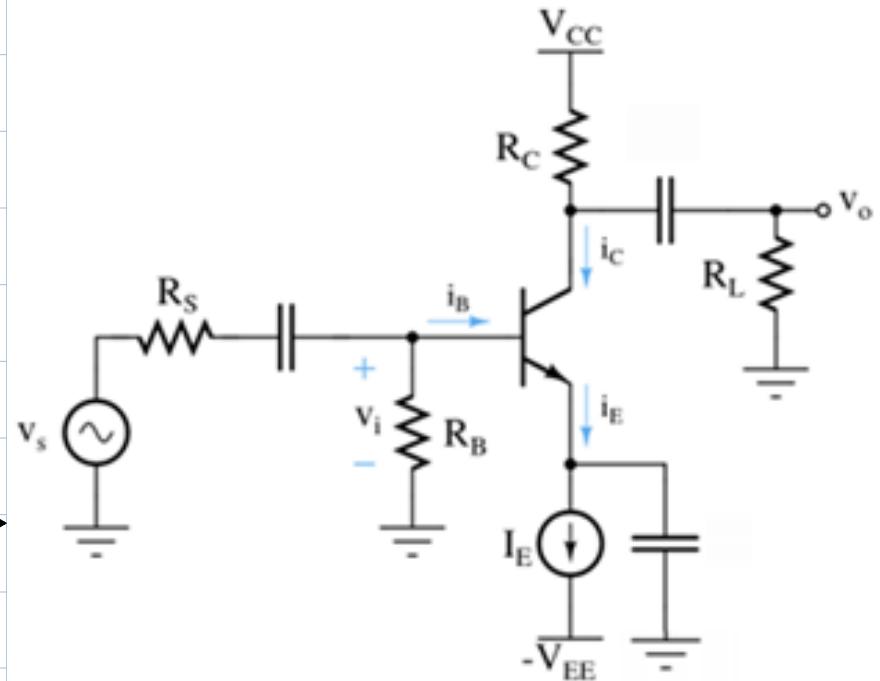


¿Qué elementos limitan la respuesta a alta frecuencia?

¿Qué elementos limitan la respuesta a baja frecuencia?

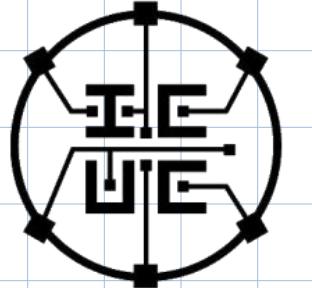


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



Algunos BJTs discretos...

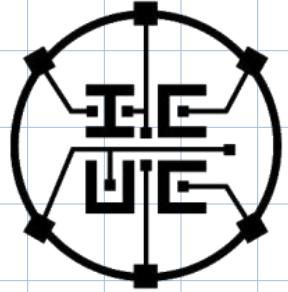
- Típicos para señal:
 - 2N2222 (NPN) – 2N2907 (PNP)
 - 2N3904 (NPN) – 2N3906 (PNP)
- Para aplicaciones de potencia:
 - TIP31/TIP32
 - TIP120(121,122)/TIP125(126,127) (Darlington)
 - TIP140(141,142)/TIP145(146,147) (Darlington)





5.23

BJTs reales



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Gracias por su atención

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas