

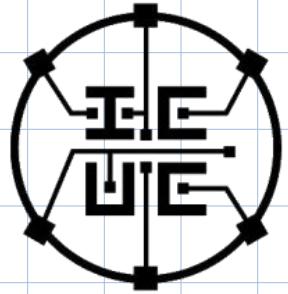


1.01

Introducción a la Electrónica

Dependencias:

- Curso de análisis de circuitos eléctricos



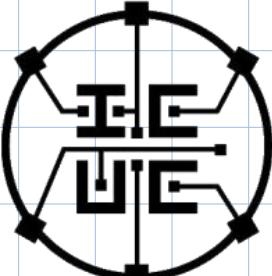
angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

Electrónica – Definición

La electrónica es el campo de la ingeniería y la física aplicada, dedicado al estudio y diseño de componentes y circuitos electrónicos, cuya operación depende de la **conducción y del control del flujo de cargas eléctricas**.

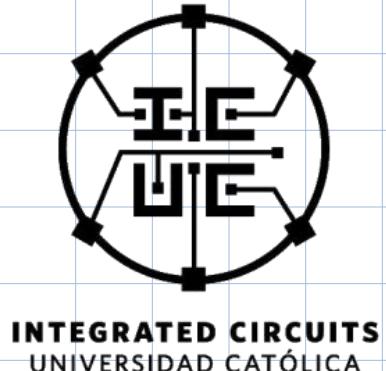
El manejo de éstos se utiliza para generar, transmitir, procesar, recibir y almacenar información.



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Ámbitos de la industria electrónica

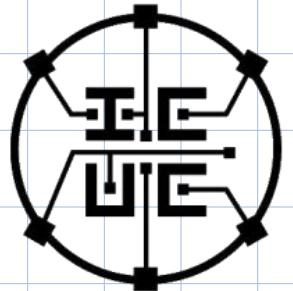
- Diseño electrónico
 - Electrónica analógica (circuitos lineales) (IEE2413, IEE2483, IEE3433)
 - Electrónica digital (IEE2713, IEE2783, IEE3753)
 - Electrónica de señales mixtas (IEE3443)
 - Electrónica de RF (IEE3453)
 - Electrónica embebida (IEE2463)
 - Electrónica de potencia (IEE2243)
- Dispositivos semiconductores
- Fabricación de circuitos electrónicos



La electrónica busca el desarrollo de sistemas electrónicos para el **procesamiento de datos y manejo de potencia eléctrica**

¿Cómo aprender electrónica?

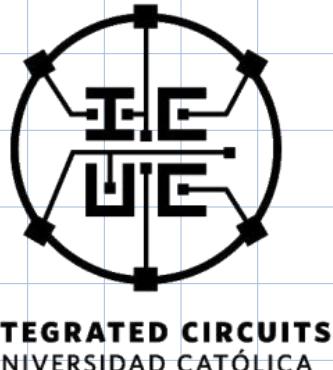
- En electrónica **no hay magia**
 - todo tiene una explicación
 - con suficiente esfuerzo, es posible entender prácticamente todo
 - si hay algo que no entiendan, ¡¡no se queden con la duda!!!
- El aprendizaje en electrónica es por capas
 - En cada capa vemos la misma materia, pero aumentamos la profundidad
- En electrónica aprendemos **topologías circuitales**
 - La rápida **identificación de topologías** facilita el análisis de circuitos
 - Yo no espero que aprendan muchas topologías de memoria, pero sí me interesa que sepan **identificarlas y analizarlas**
- Los modelos en electrónica son aproximados
 - Podemos aplicar aproximaciones **con criterio** para simplificar resultados



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Diferencia entre electrónica y circuitos eléctricos

- La electrónica emplea **elementos activos**, capaces de amplificar – en el fondo, fuentes dependientes
 - Modelos sencillos para elementos circuitales complejos
- La electrónica involucra **elementos no lineales**, que generalmente no son estudiados en cursos de circuitos
- La electrónica tiene que ver con el **control de las corrientes en un circuito**
 - Esto nos permite manejar señales y manejar potencia



Electrónica analógica vs. digital

- Este curso es de circuitos electrónicos **analógicos**
- La electrónica digital es bastante diferente
 - Trata con señales que pueden valer 0 o 1 solamente
 - La matemática detrás de la electrónica digital es muy diferente de la matemática detrás de la electrónica analógica
 - Los modelos de los elementos son diferentes
 - La forma de diseñar circuitos es completamente distinta
- Los mundos analógico y digital son complementarios
 - El universo es **analógico**
 - La mayor parte del procesamiento de señales es **digital**



Es tremadamente conveniente dominar ambos mundos

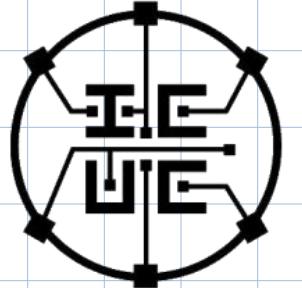
Analógica vs. digital

Analógica

- Circuitos “lineales” (que suelen ser no lineales...)
- Simulación en **SPICE**
- Diseño “a mano”
- Decenas o hasta cientos de dispositivos en un circuito
- **Señales varían de forma continua**
 - Ruido afecta señales
- Se rige según procesos digitales
- Pocos diseñadores, muy valorada
- Curva de aprendizaje lenta

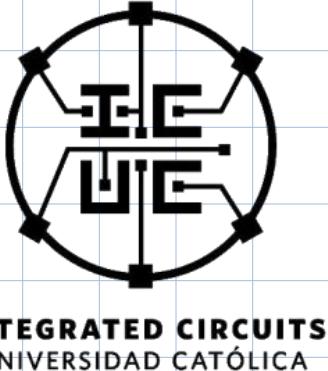
Digital

- Circuitos digitales (compuertas lógicas)
- Simulación en SPICE y **otros programas específicos**
- Diseño se escribe en código y luego se sintetiza
- **Miles de millones** de compuertas lógicas en un circuito
- **Señales tienen dos valores**
 - prácticamente insensible al ruido
 - muy sensible a la sincronización de señales
- Mueve la industria electrónica
- Curva de aprendizaje rápida



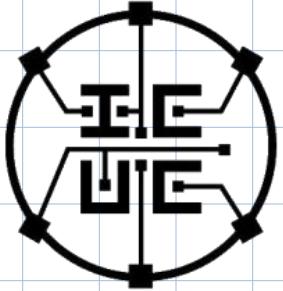
¿De qué se trata este curso?

- **Análisis y diseño de circuitos con transistores**
 - Éste es el primer curso en esta línea
 - Los ingenieros que diseñan circuitos electrónicos comienzan con cursos muy parecidos a éste
- El curso **no se enfoca** en cómo funcionan los transistores
 - Existen cursos de física de estado sólido dedicados a eso
- Pero antes de aprender transistores y otros dispositivos electrónicos, repasaremos lo que aprendimos en Circuitos
 - Énfasis en amplificadores y fuentes dependientes





1.02



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Diseño electrónico y tecnologías de fabricación

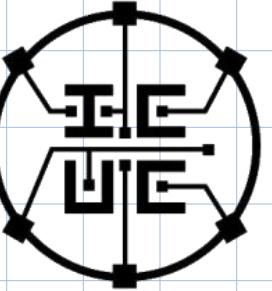
Dependencias:

- 1.01 Introducción a la electrónica

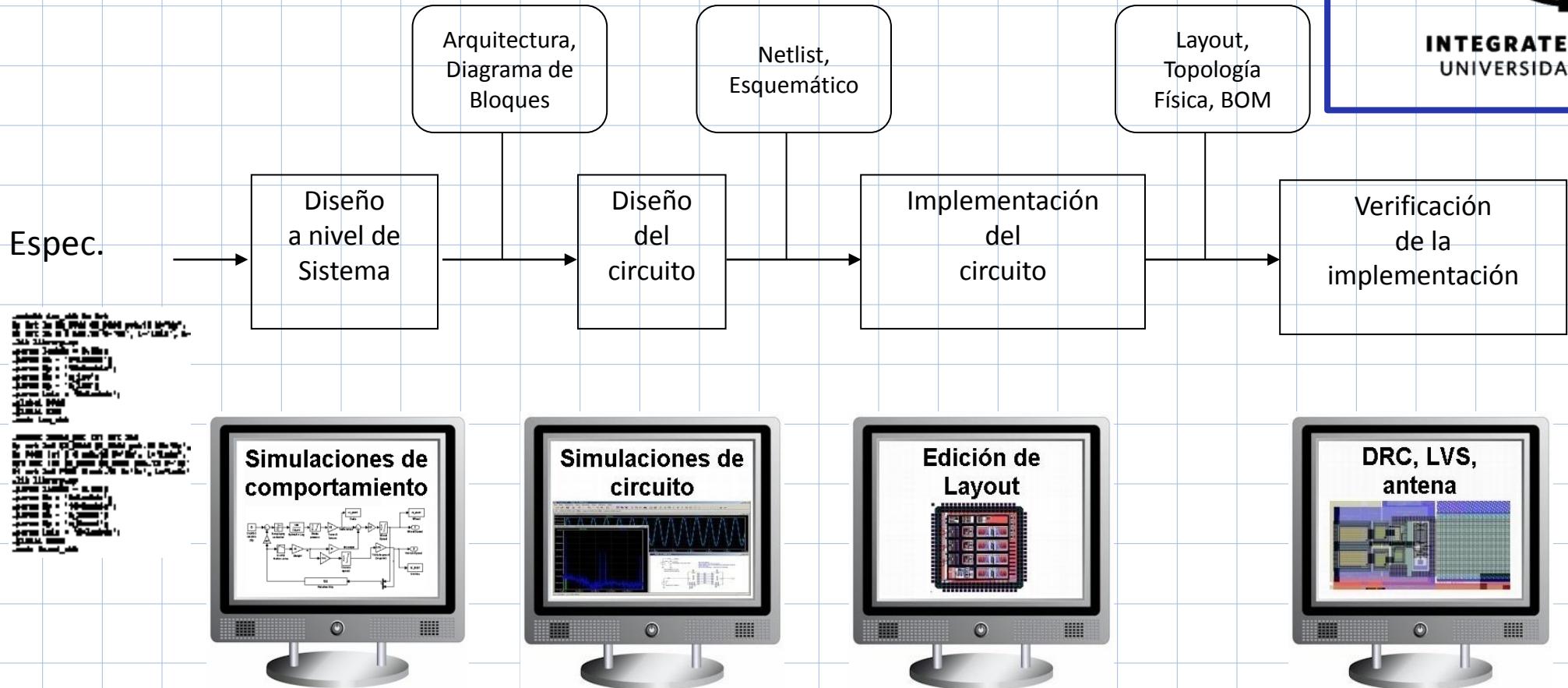
angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

Pasos del proceso de diseño electrónico

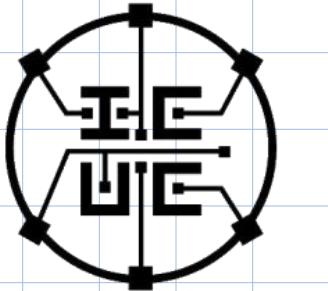


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



Diseño a nivel de sistema

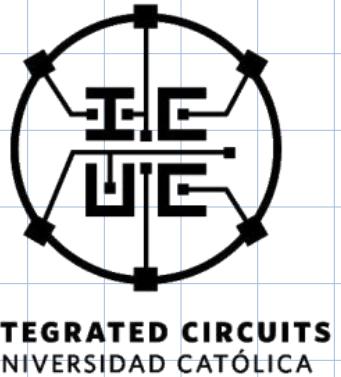
- Se estudian las especificaciones
- Se converge a una **arquitectura de circuito**
- El objetivo es producir un **diagrama de bloques**
 - Con especificaciones sobre cada uno de los bloques y sus interconexiones
 - “Dividir y conquistar”
- El diseño a nivel de sistema es validado mediante
 - Análisis “a mano” utilizando modelos simples
 - Simulaciones de comportamiento, análisis numérico
 - No todo es simulable...
- Software de computación científica suele ser necesario
 - MATLAB, SciLab, SciPy, Mathematica, MathCAD, Maple, Octave, etc.
- Es común iterar algunas veces...
- Es común incluir muchos bloques y tipos de señales



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

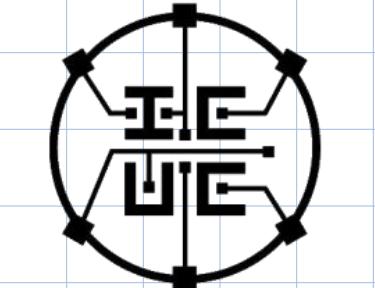
Diseño circuital

- Tratamos de producir una **topología circuital** para cada bloque
 - Existen muchas formas de implementar cada bloque
- El resultado del diseño circuital es el **esquemático del circuito**
 - El esquemático especifica en forma gráfica el listado de componentes del circuito y sus interconexiones
 - Alternativamente podemos especificar el diseño mediante un netlist
- El diseño circuital es validado mediante
 - Análisis “a mano” empleando modelos medianamente complejos
 - Simulaciones en SPICE o software similar

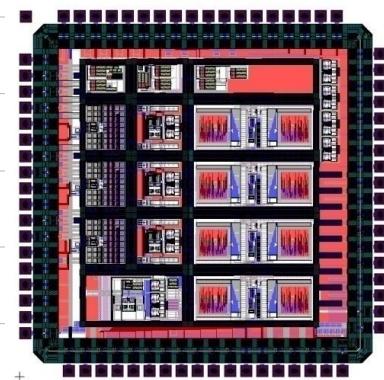
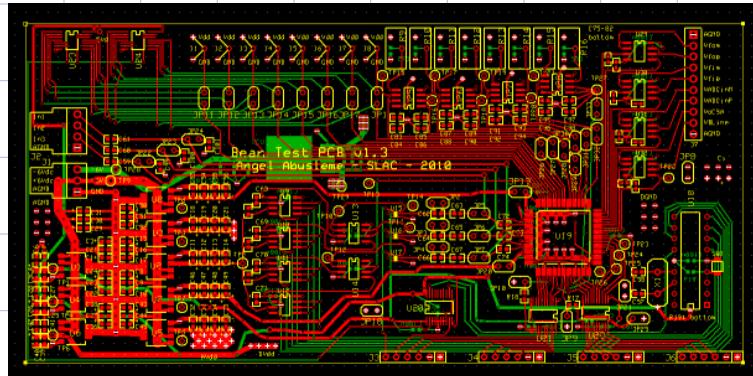


Layout o implementación física del circuito: dos opciones

- Circuitos impresos (PCB)
 - Fabricado en FR4, Pertinax, sustrato cerámico, etc.
 - Varias técnicas
 - Fotomáscaras
 - Ruteo mediante abrasión mecánica
 - Edición manual del sustrato
 - Software: Altium designer, Eagle, Circuit Maker, Kicad, etc.
 - Archivo GDSII
- Circuitos integrados (IC)
 - Fabricado en sustrato de silicio u otro semiconductor
 - Técnicas de fotolitografía
 - Software: CADENCE, Synopsys, Tanner, Magic, Electric VLSI, etc.
 - Archivo Gerber



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



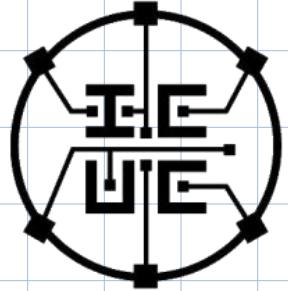
Impreso vs. integrado – comparación

PCB

- Desempeño medio a alto
- Producción artesanal o industrial
- Consumo medio o alto
- Costo en función de sus componentes
- Requiere ensamblado (soldadura)
- Puede llevar resistores, capacitores, inductores, potenciómetros, transformadores, lcs, conectores...

IC

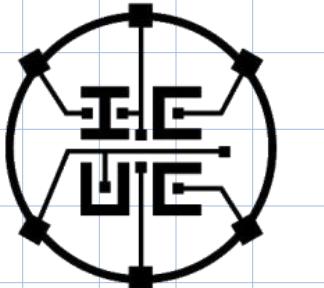
- Desempeño muy alto
- Producción industrial (costosa)
- Consumo potencialmente bajo
- Costo en función del proceso de fabricación y su área
- Lleva principalmente transistores y bloques diseñados mediante transistores (IP)



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

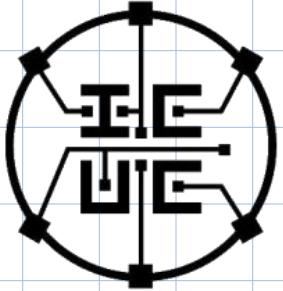
Más acerca de los ICs

- Tecnologías diversas:
 - BJT
 - CMOS
 - Bi-CMOS
 - FinFET
 - Etc.
- Procesos Very Large Scale Integration (VLSI)
 - **Millones** de transistores por chip
 - Proceso por lotes, bajo costo por transistor
 - Nodo tecnológico se relaciona con tamaño mínimo fabricable
 - Ej: 250 nm, 180 nm, 130 nm, 65 nm, 45 nm, 30 nm, 22 nm, 15 nm, 10 nm, 7 nm... Ley de Moore





1.03



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Jerarquía en electrónica

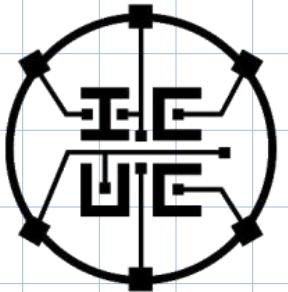
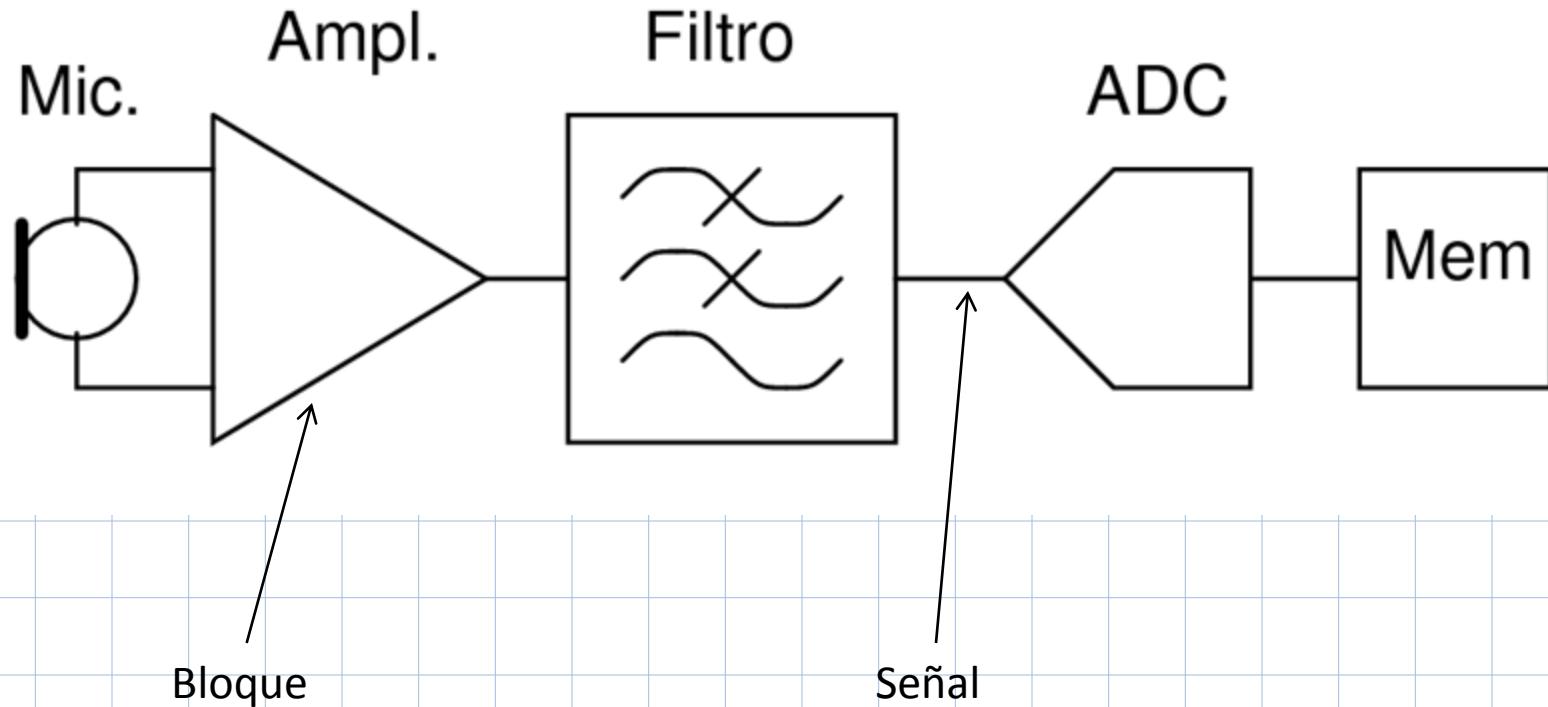
Dependencias:

- 1.02 Diseño electrónico y tecnologías de fabricación

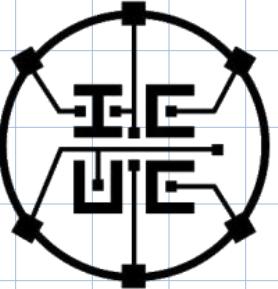
angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

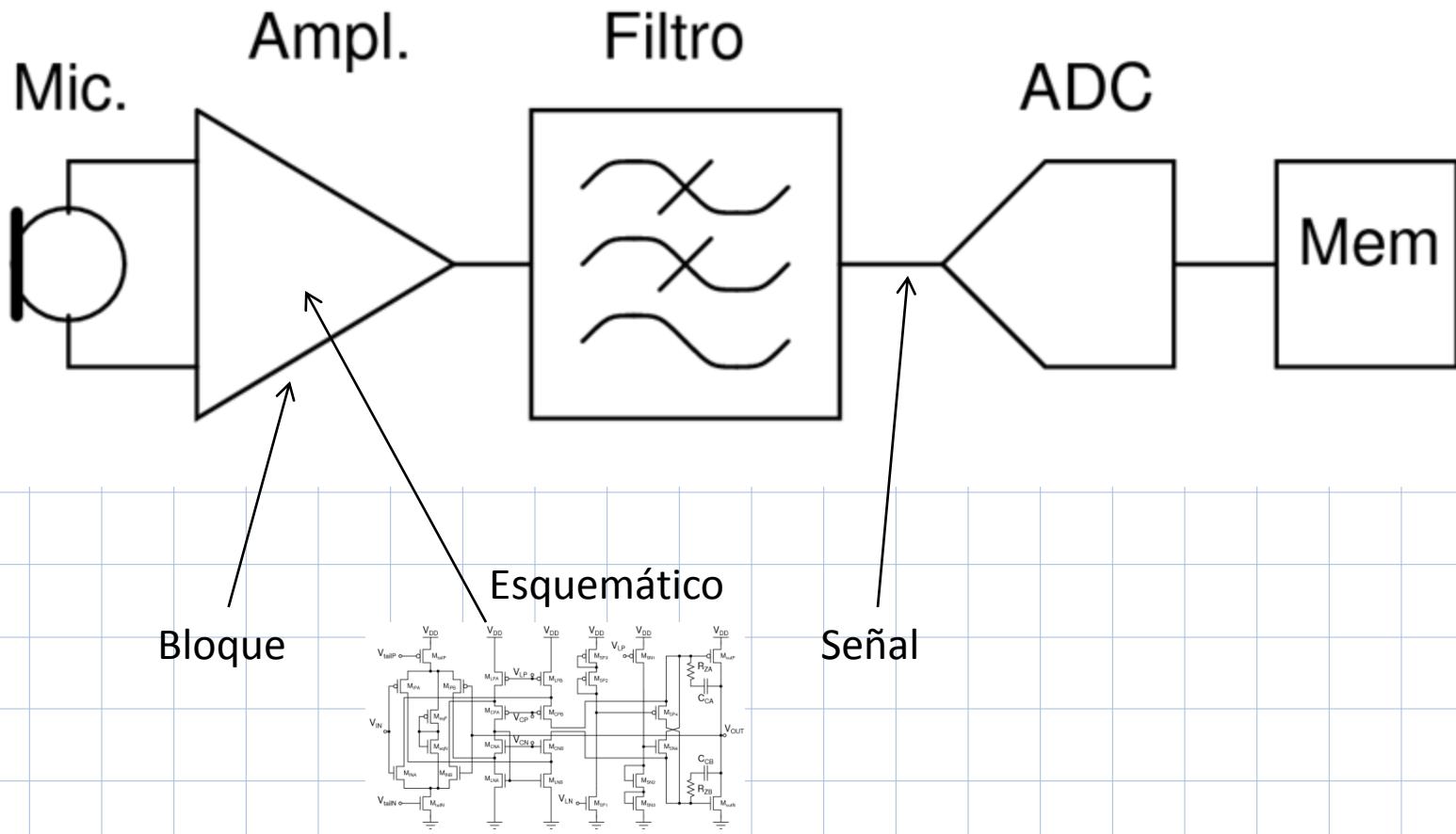
Alto nivel: diagrama de bloques



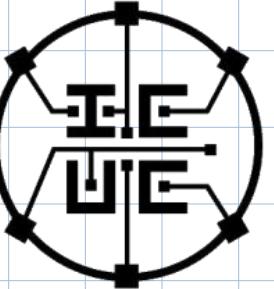
Nivel medio: esquemático



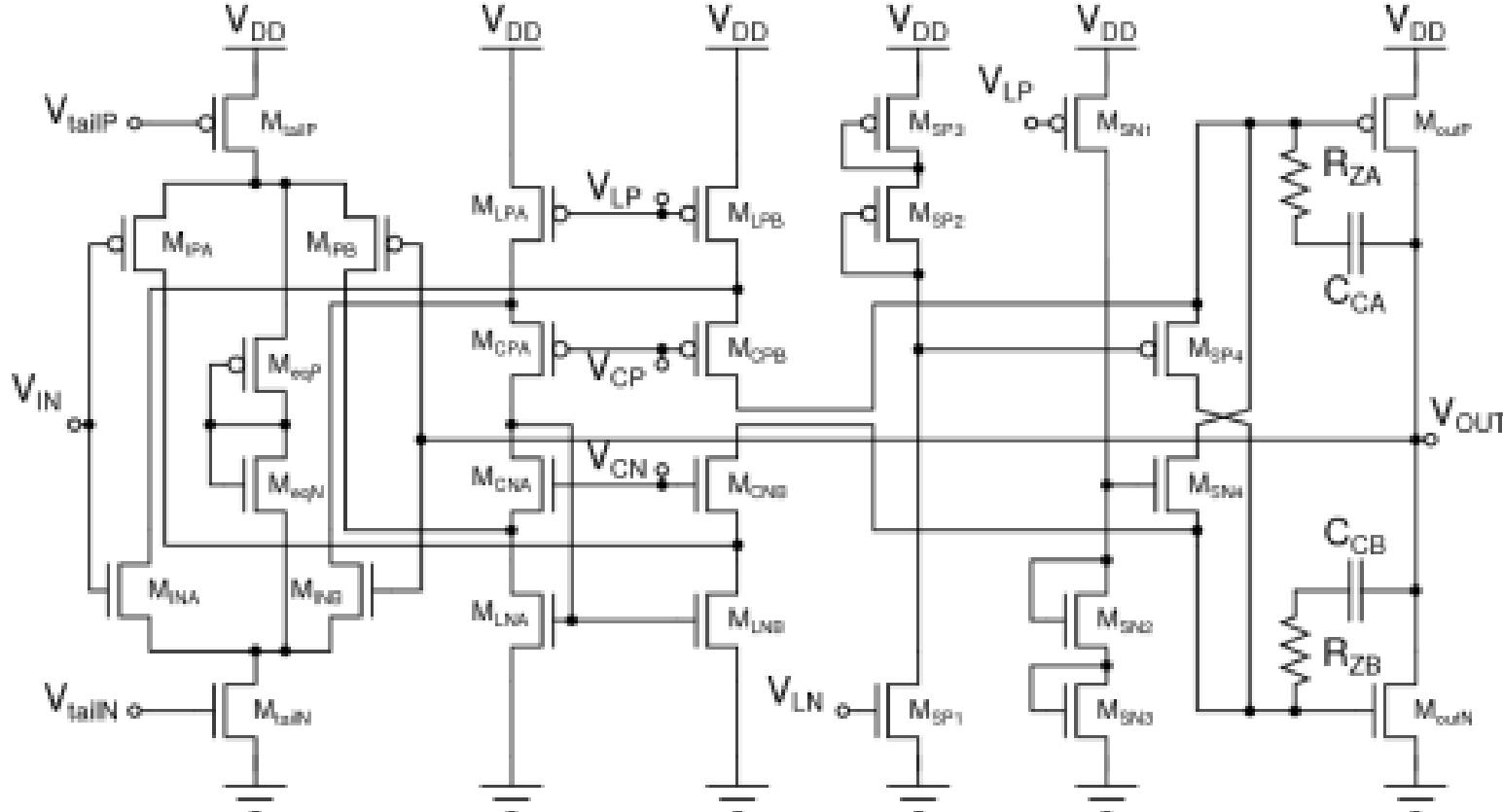
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



Esquemático



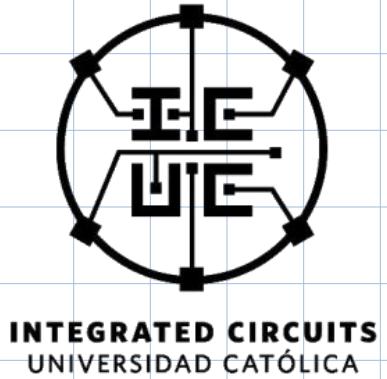
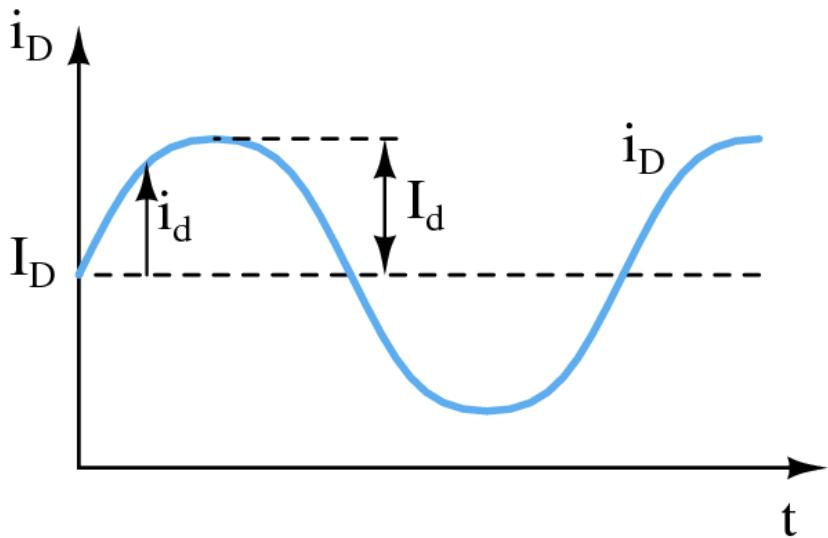
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



- Incluye otros bloques, circuitos o elementos circuitales (dispositivos)
 - BOM: Listado completo de componentes

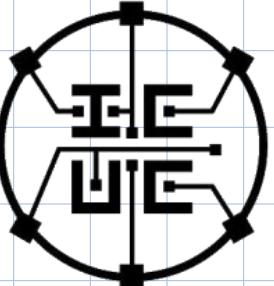
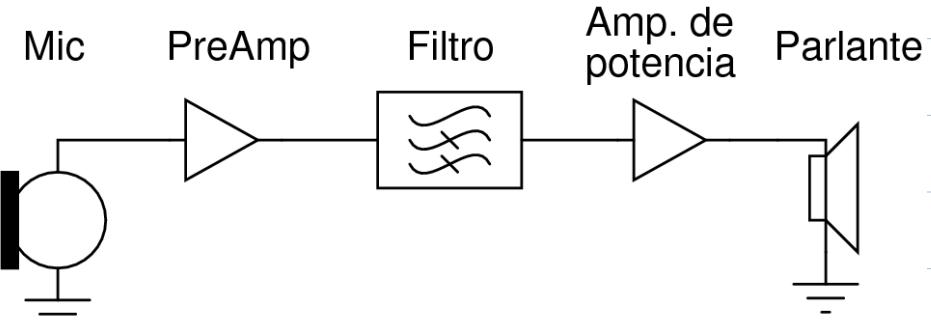
Nomenclatura de señales

- Las señales son las variables de un circuito
- Las señales transmiten información...
- **¿Necesitamos potencia para transmitir información?**



Definición	Cantidad	Subíndice	Ejemplos
Valor continuo (DC)	Mayúscula	Mayúscula	VD, IO
Valor alterno (AC)	Minúscula	Minúscula	vd, io
Valor instantáneo	Minúscula	Mayúscula	vD, iO
Fasor o RMS	Mayúscula	Minúscula	Vd, Io

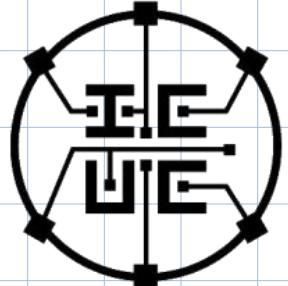
¿Señales de voltaje o corriente?



- Las señales de voltaje idealmente no llevan corriente
 - Si llevaran corriente, requerirían potencia...
- Las señales de corriente idealmente no presentan caída de voltaje
 - Si hubiera caída de voltaje, habría pérdida de potencia
- En la práctica, todas las señales llevan algo de voltaje y algo de corriente
 - Principalmente una de las dos... ¿Veamos más detalles?

Señales de voltaje

Producidas por circuitos que pueden ser modelados como una fuente de voltaje y resistencia en serie

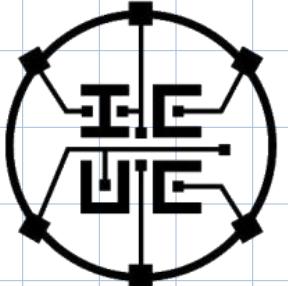


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Las señales de voltaje son medidas respecto de un nodo de referencia (tierra) o en forma diferencial

Señales de corriente

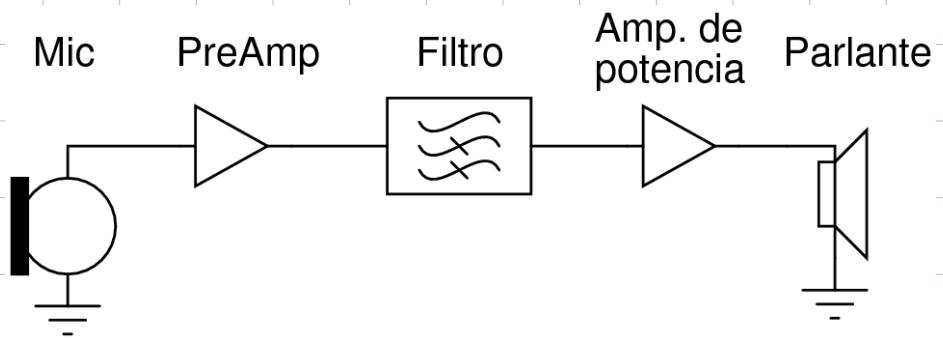
Producidas por circuitos que pueden ser modelados como una fuente de voltaje y resistencia en serie



Conexiones entre bloques

- El bloque base suele ser el **amplificador**
 - de voltaje, corriente, transconductancia, transresistencia (!)
- Cada conexión entre bloques lleva una señal
 - De voltaje, corriente o combinación
- La idea es que los diferentes bloques conectados en cascada “conversen bien”
 - Ej: que el próximo bloque **no cargue** la salida del anterior
 - Impedancias de entrada y de salida!!!
 - o que el próximo bloque sea capaz de manejar el rango de señales que le entrega el bloque anterior

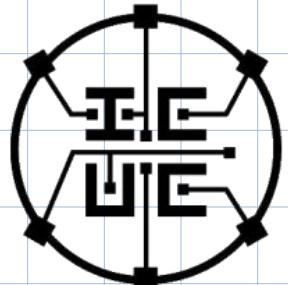
¿Qué es una carga circuital?



Bloques conectados en cascada
(iiiNO ESTÁN EN SERIE!!!)

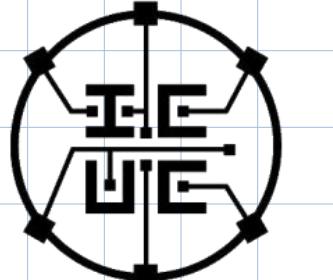
¿En serie? ¿En cascada? ¿En paralelo?
¿Conexión shunt?

Haremos un pequeño repaso de estas conexiones



Impedancia de nodo

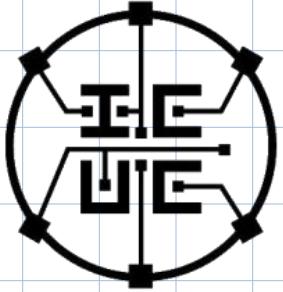
- Es la impedancia (o resistencia) equivalente que ofrece un nodo al paso de la corriente eléctrica
- Más adelante aprenderemos a modelar la impedancia de un nodo si el nodo tiene un voltaje distinto de cero



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



1.04



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Thévenin, Norton y superposición

Dependencias:

- 1.03 Jerarquía en electrónica

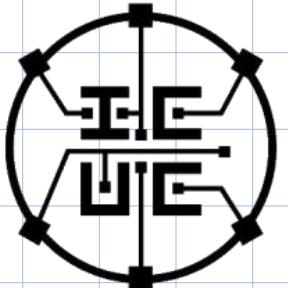
<http://tcts.fpms.ac.be/cours/1005-01/equiv.pdf>

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

Teoremas circuitales

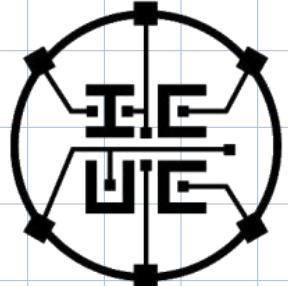
- Los teoremas de Thévenin, Norton y superposición nos ofrecen un mayor entendimiento de los circuitos electrónicos y sus interconexiones
- Estos teoremas nos ofrecen técnicas para simplificar el análisis de circuitos orientado al diseño
- Esta cápsula corresponde a un breve repaso...



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Teorema de Thévenin

Cualquier circuito lineal de dos terminales puede ser modelado por un ckt equivalente compuesto por una fuente de voltaje y una impedancia* en serie



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

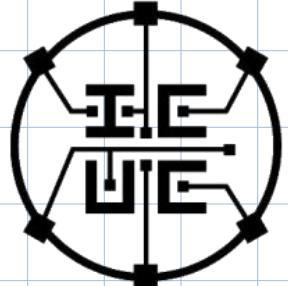
* En el caso de una única frecuencia, la impedancia equivalente es constante; en el caso de múltiples frecuencias, la impedancia equivalente es función de la frecuencia.

¿Es posible que la fuente interna del equivalente de Thévenin sea una fuente dependiente?

¿Cuánto vale la resistencia del nodo cuando la fuente de Thévenin tiene un valor de 0 V?

Teorema de Norton

Cualquier circuito lineal de dos terminales puede ser modelado por un ckt equivalente compuesto por una fuente de corriente y una impedancia* en paralelo



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

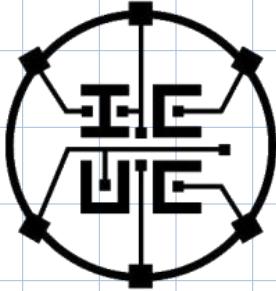
* En el caso de una única frecuencia, la impedancia equivalente es constante; en el caso de múltiples frecuencias, la impedancia equivalente es función de la frecuencia.

¿Es posible que la fuente interna del equivalente de Norton sea una fuente dependiente?

¿Cuánto vale la resistencia del nodo cuando la fuente de Norton tiene un valor de 0 V?

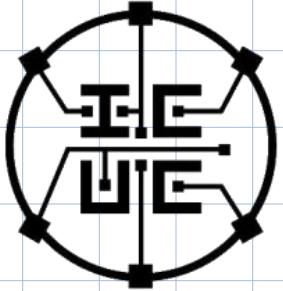
Teorema de superposición

- En un circuito **lineal**, la respuesta en un nodo o rama puede ser calculada como la suma de las contribuciones individuales de cada una de las fuentes independientes cuando las otras están apagadas
 - Corolario: la contribución de cada fuente puede ser referida a cualquier nodo o rama del circuito lineal
- Ejemplo: Divisor de voltaje múltiple





1.05



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Acoplamiento entre bloques

Dependencias:

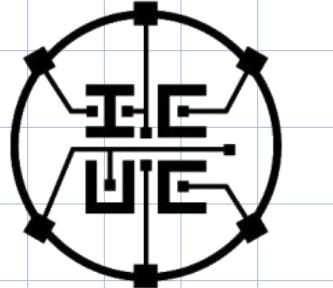
- 1.03 Jerarquía en electrónica
- 1.04 Thévenin, Norton y Superposición

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

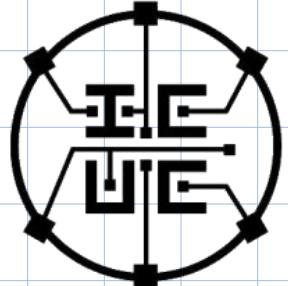
Acoplamiento entre bloques

- Las conexiones entre dos bloques pueden ser **AC** o **DC**
 - Conexión DC incluye **frecuencias desde DC en adelante**
 - En otros contextos, **DC** es **frecuencia cero**
 - Conexión AC altera o **elimina la componente DC**
- Ejemplo: conexión DC

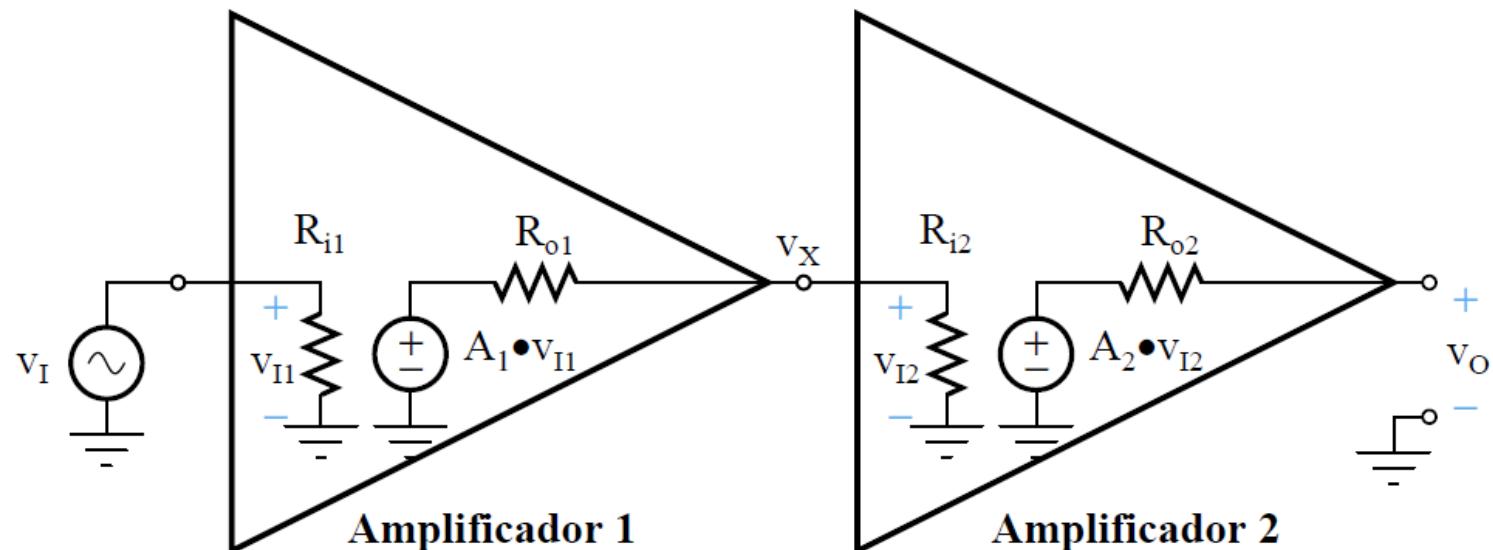


Veamos un ejemplo de acoplamiento DC: amplificadores de voltaje en cascada

¿Qué sucede entre amplificadores?



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

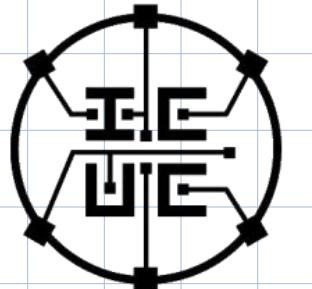


Conclusión: la conexión entre dos bloques circuitales puede producir **atenuación** de la señal
debido a que **el segundo bloque carga al primero**

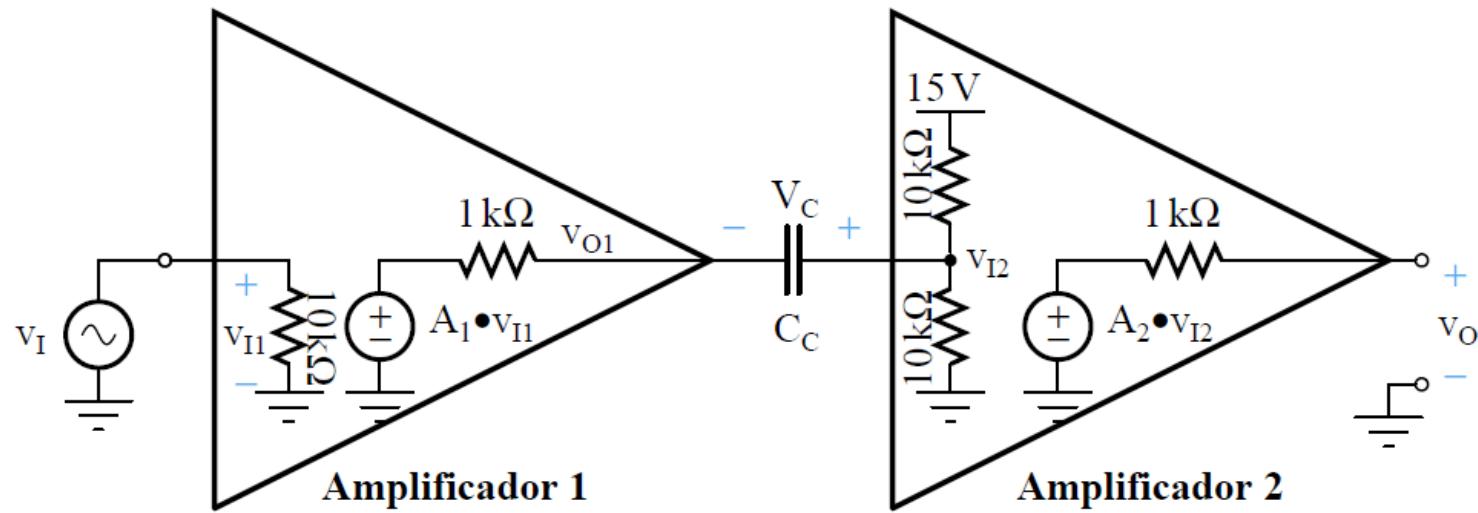
Veamos un ejemplo en AC para señales de voltaje

En acoplamiento AC, la señal va contenida en las variaciones en torno al nivel DC

- El nivel DC no contiene información
- El nivel DC es arbitrario y suele ser diferente entre bloques

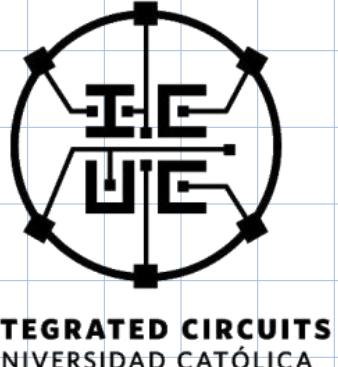


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



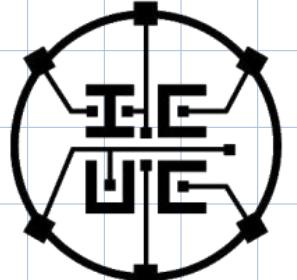
Atenuación por efecto de la carga

- Es la **atenuación** que sufre la señal cuando le conectamos una **carga circuital**
 - Un bloque en cascada representa una carga circuital
- Se produce debido a la **división de voltaje o de corriente** entre la fuente de la señal con su impedancia equivalente, y la carga circuital
- La atenuación por efecto de la carga debe ser tomada en cuenta al conectar bloques en cascada
- La atenuación por efecto de la carga puede ser minimizada eligiendo las impedancias adecuadas en la fuente y en la carga
 - A veces esto no es posible
 - Una alternativa es emplear buffers



Buffer de voltaje

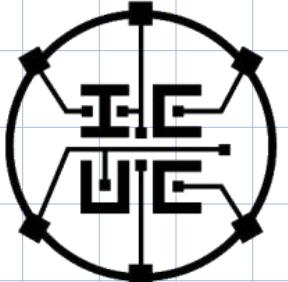
- Es un bloque circuital activo (un amplificador)
- Su objetivo es minimizar la atenuación por efecto de la carga en el caso de señales de voltaje
 - Tiene ganancia 1 V/V (no amplifica ni atenúa)
 - Tiene impedancia de entrada muy _____
 - Tiene impedancia de salida muy _____
- Ejemplo:



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

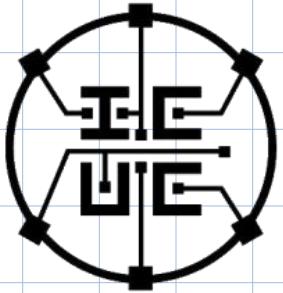
Buffer de corriente

- Es un bloque circuital activo (un amplificador)
- Su objetivo es minimizar la atenuación por efecto de la carga en el caso de señales de corriente
 - Tiene ganancia 1 A/A (no amplifica ni atenúa)
 - Tiene impedancia de entrada muy _____
 - Tiene impedancia de salida muy _____
- Ejemplo:





1.06



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Señales referidas a tierra y señales diferenciales

Dependencias:

- 1.03 Jerarquía en electrónica

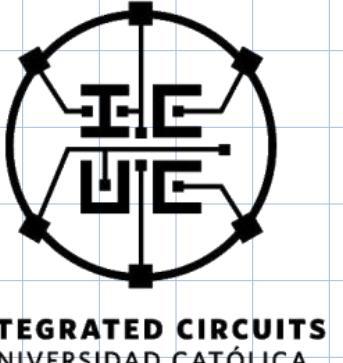
angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

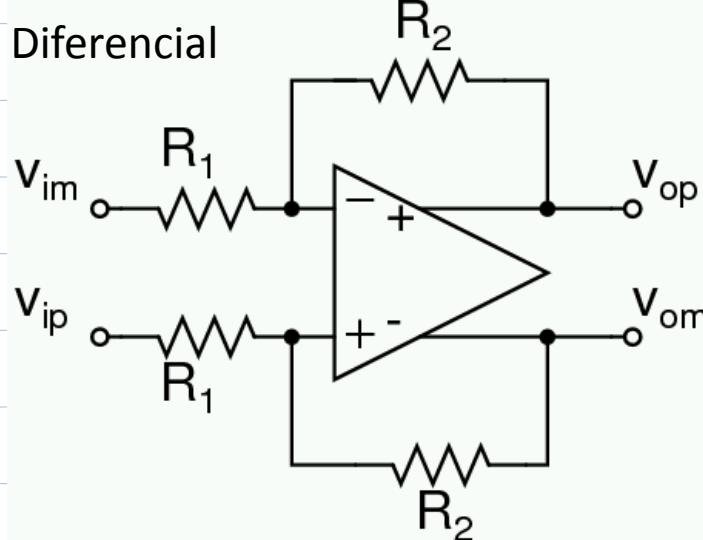
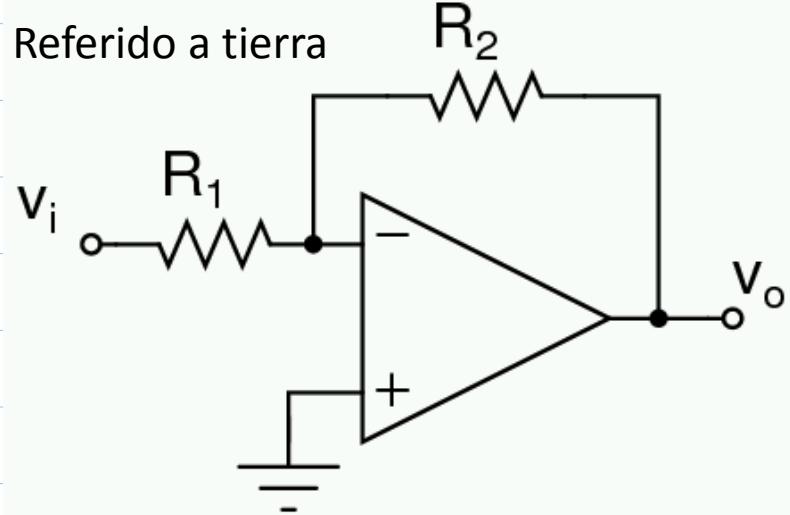
Camino de la señal: referido a tierra vs. diferencial

- Las señales siguen un camino a través del circuito, desde la entrada hasta la salida – camino referido a tierra o diferencial
- Señales referidas a tierra: señales están codificadas en una única variable, respecto de una referencia fija
 - Su operación es más sensible a variaciones de fuente de alimentación, EMI, temperatura, etc.
 - La referencia es **tierra de señal**, que puede ser tierra
- Circuitos diferenciales: señales están codificadas como una **diferencia entre dos variables**
 - Modo común (CM) está dado por su promedio
 - Modo diferencial (DM) está dado por su diferencia

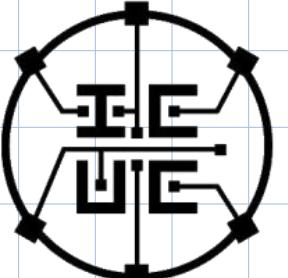
Ecuaciones:



Ejemplos



- Ambos circuitos tienen la misma ganancia de señal
- El circuito con señales referidas a tierra es más sensible a variaciones de modo común
- El circuito diferencial generalmente requiere más potencia



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

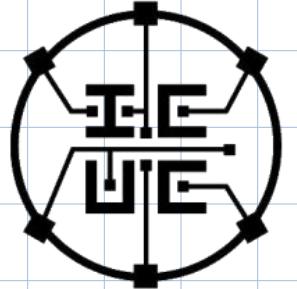
Referido a tierra vs. Diferencial

Referido a tierra

- Implementación asimétrica
- Comúnmente utilizado en electrónica discreta
- 😊 Menor complejidad y número de componentes
- 😊 Menor consumo de potencia (~1/2)
- 😊 Menor ruido electrónico (~1/2)

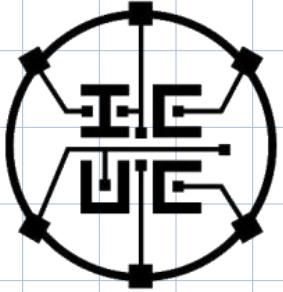
Diferencial

- Implementación simétrica
- Solución estándar en circuitos integrados
- 😊 Reducida sensibilidad a variación en fuente de alimentación, EMI
- 😊 2x excursión de salida
- 😊 Implica mejor SNR
- 😊 Mejor rango dinámico
- 😊 Fácil de analizar





1.07



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Funciones de transferencia

Dependencias:

- 1.03 Jerarquía en electrónica
- 1.04 Thévenin, Norton y superposición

angel@uc.cl

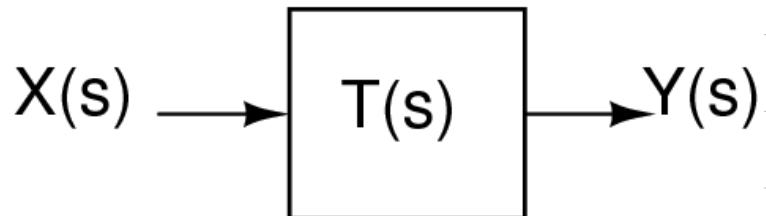
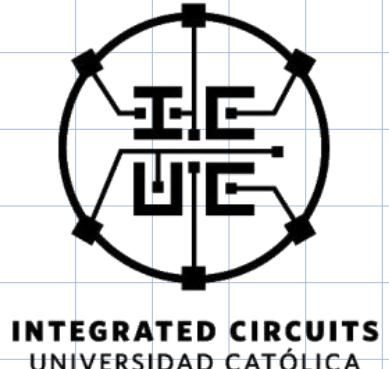
Electrónica en cápsulas

Función de transferencia

Considere un circuito (o sistema) **lineal e invariante en el tiempo** (LTI). $Y(s)$ es la transformada de Laplace de la respuesta del circuito a una excitación independiente cuya transformada de Laplace es $X(s)$. La función de transferencia del circuito puede ser definida como $T(s) = Y(s)/X(s)$

Si $T(s)$ representa a un sistema lineal sin retardo, $T(s)$ puede ser representada como el cuociente entre dos polinomios de s :

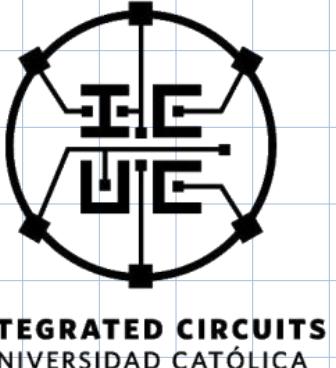
$$T(s) = \frac{N(s)}{D(s)}$$



La definición considera todas las condiciones iniciales iguales a cero

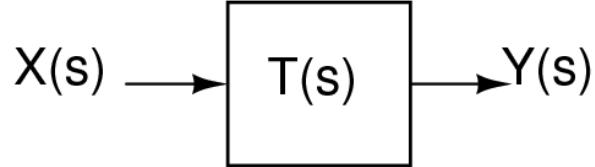
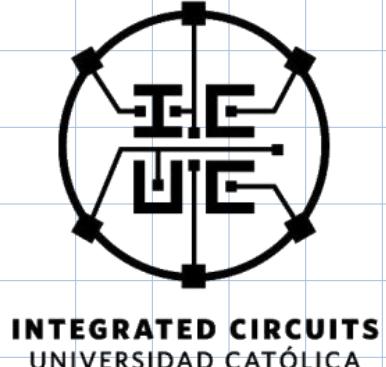
Funciones de transferencia en un circuito

- Hay diversos tipos:
 - Ganancia de voltaje $A_v(s) = V_o(s)/V_i(s)$
 - Ganancia de corriente $A_I(s) = I_o(s)/I_i(s)$
 - Transadmitancia $Y_t(s) = I_o(s)/V_i(s)$
 - Transimpedancia $Z_t(s) = V_o(s)/I_i(s)$
 - Admitancia del nodo $Y_n(s) = I_n(s)/V_n(s)$ (driving point admittance)
 - La excitación es $V_n(s)$ y la respuesta es $I_n(s)$
 - Impedancia del nodo $Z_n(s) = V_n(s)/I_n(s)$ (driving point impedance)
 - La excitación es $I_n(s)$ y la respuesta es $V_n(s)$
- **Todas las funciones de transferencia de un circuito lineal tienen el mismo $D(s)$ y, por lo tanto, los mismos polos**



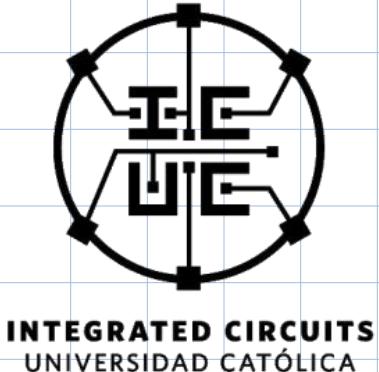
Acerca de los polos de un circuito

- Ya vimos que los **polos** de un circuito son las raíces de $D(s)$, es decir, **las soluciones al resolver $D(s) = 0$**
- $D(s)$ es la **ecuación característica** del sistema descrito por el circuito
- El **número de polos** se relaciona con el **número de condiciones iniciales** de un circuito
- Todas las funciones de transferencia que pueden ser derivadas de un mismo circuito lineal tienen el mismo $D(s)$
 - $D(s)$ **sí depende** de la topología de la red
 - $D(s)$ **no depende** de dónde está la excitación
 - $D(s)$ **no depende** de dónde medimos la respuesta

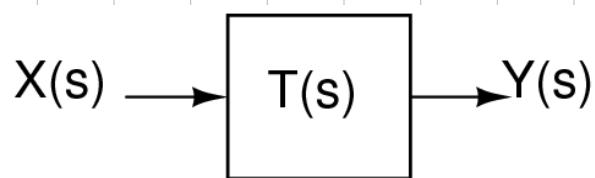


$$T(s) = \frac{N(s)}{D(s)}$$

¿Cómo determinar los polos de un ckt?



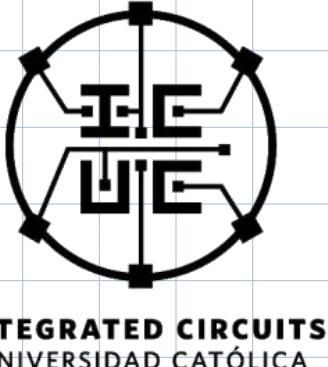
- Los polos son las raíces de $D(s)$, que es obtenido a partir de cualquier función de transferencia de la red
 - Una opción es determinar la función de transferencia entre una entrada y una salida cualquiera, y de ahí obtener $D(s)$
 - Otra opción es determinar la función de transferencia entre corriente y voltaje, o entre voltaje y corriente, en un determinado puerto, y de ahí obtenemos $D(s)$
 - En este último caso, **no da lo mismo** poner una fuente de voltaje de prueba vs. una fuente de corriente de prueba:
 - Si ponemos fuente de voltaje entre dos nodos que están desconectados, estaríamos cambiando la topología de la red
 - Si ponemos fuente de corriente en serie en una rama, estaríamos cambiando la topología de la red



$$T(s) = \frac{N(s)}{D(s)}$$

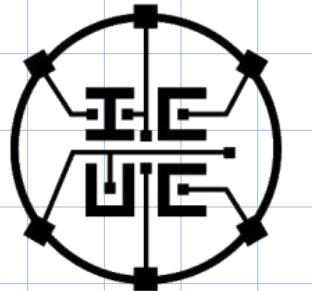
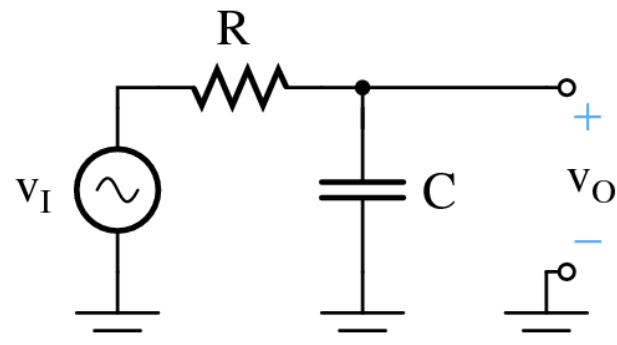
Expresiones de baja entropía

- Al expresar funciones de transferencia, conviene hacerlo en expresiones de baja entropía
- Una expresión de baja entropía contiene
 - combinaciones en serie y en paralelo:
 - razones entre impedancias, constantes de tiempo y ganancias:
 - polinomios para la variable s
- Estas expresiones son más adecuadas para diseñar:
 - aportan mucha más información útil y
 - son fáciles de aproximar a expresiones más simples



¿T(s) o T(jω)?

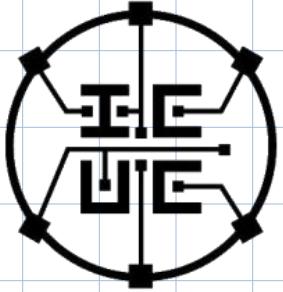
- Por el momento, cuando calculemos funciones de transferencia de circuitos o sistemas, lo haremos en función de la **variable compleja s**
- Más adelante entenderemos qué diferencia tiene con $j\omega$
- Ejemplo:



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



1.08



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Polos y constantes de tiempo

Dependencias:

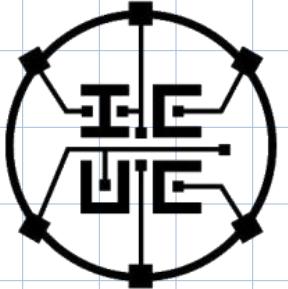
- 1.07 Funciones de transferencia

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

Ya sabemos calcular los polos, pero... ¿qué representan los polos de un ckt?

- Los polos de un circuito representan la forma en que el circuito responde ante condiciones iniciales y estímulos
- Los polos complejos conjugados tienen asociada una frecuencia ω , que es la distancia del polo al origen
- Los polos reales tienen asociada una constante de tiempo τ , que es el valor recíproco del polo
- Ejemplo: circuito RC



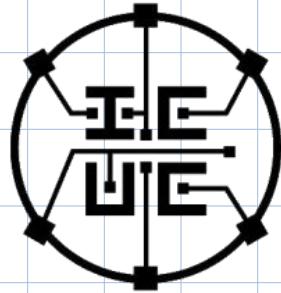
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Más acerca de τ

- Una constante de tiempo grande, de muchos segundos, significa que el circuito demora muchos segundos en establecer su salida
- Los circuitos de **un solo polo** son **fáciles de analizar**
- Un circuito puede tener muchas constantes de tiempo, una por cada polo
 - La respuesta de un circuito será “dominada” por el efecto del polo más lento, con la mayor constante de tiempo
 - Si un circuito tiene muchos polos, podemos **aproximarlo a un circuito de un solo polo** con la constante de tiempo mayor

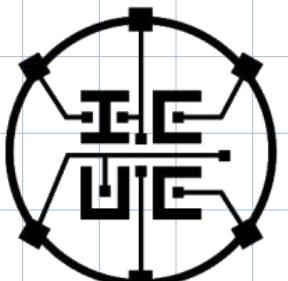
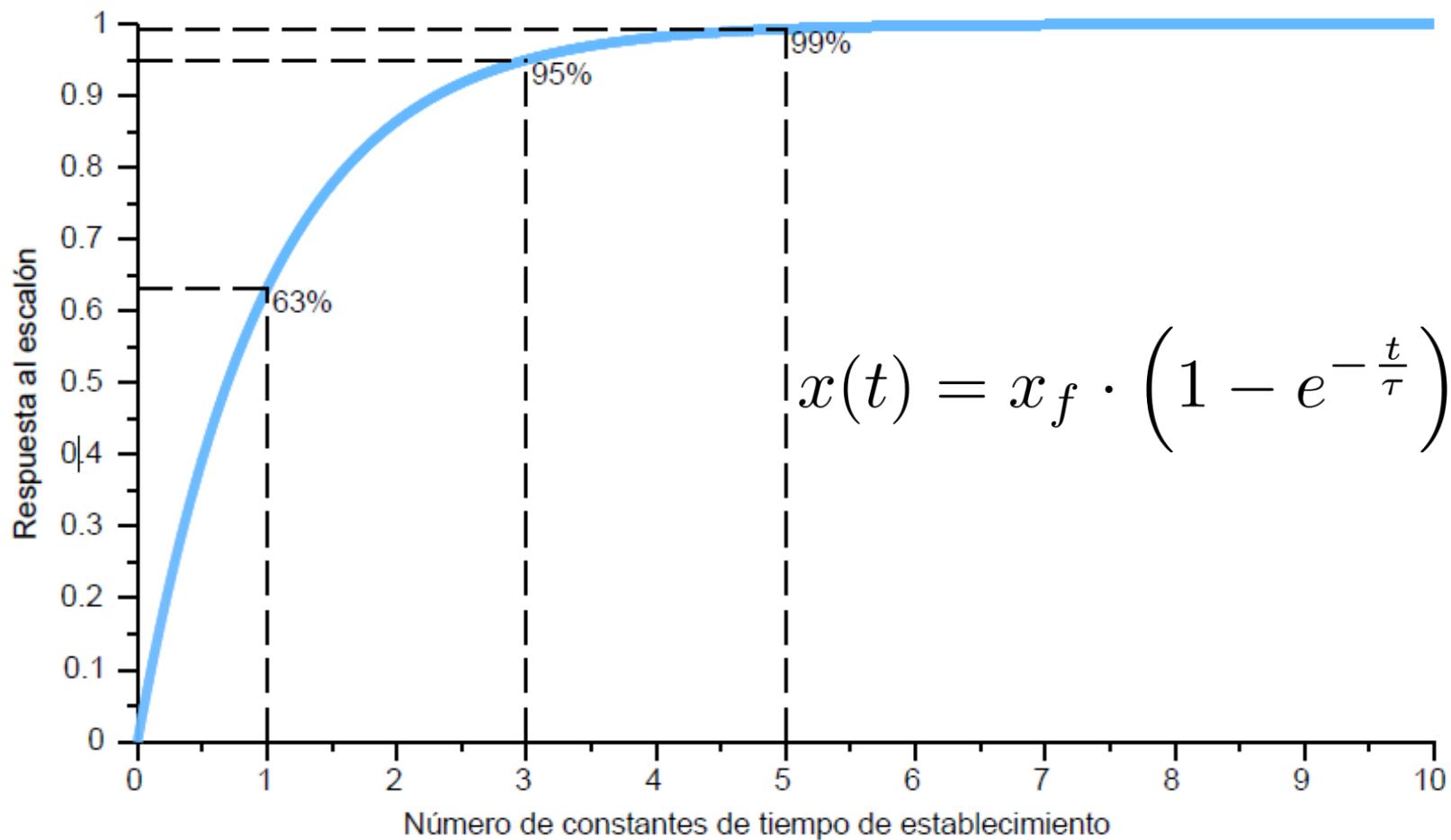
$$x(t) = x_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

- Después de τ , la exponencial vale $1/e$
- 2.2τ es lo que toma ir de 10% a 90%
- Después de 5τ , la exponencial vale <1%
- Después de 7τ , la exponencial vale <0.1%



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

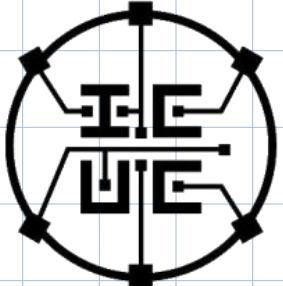
Respuesta al escalón, un solo polo



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



1.09



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Introducción a los amplificadores electrónicos

Dependencias:

- 1.03 Jerarquía en electrónica
- 1.04 Thévenin, Norton y superposición
- 1.05 Acoplamiento entre bloques

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

Motivación

El amplificador es sin duda el **circuito electrónico analógico más importante**. Es la base de prácticamente todos los bloques circuitales, incluyendo conversores de datos, filtros activos, etapas de entrada, etapas de potencia, mezcladores, procesadores analógicos, etc.



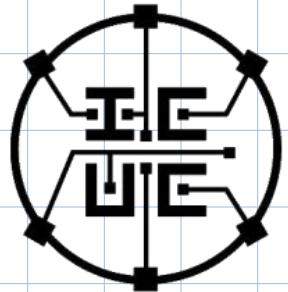
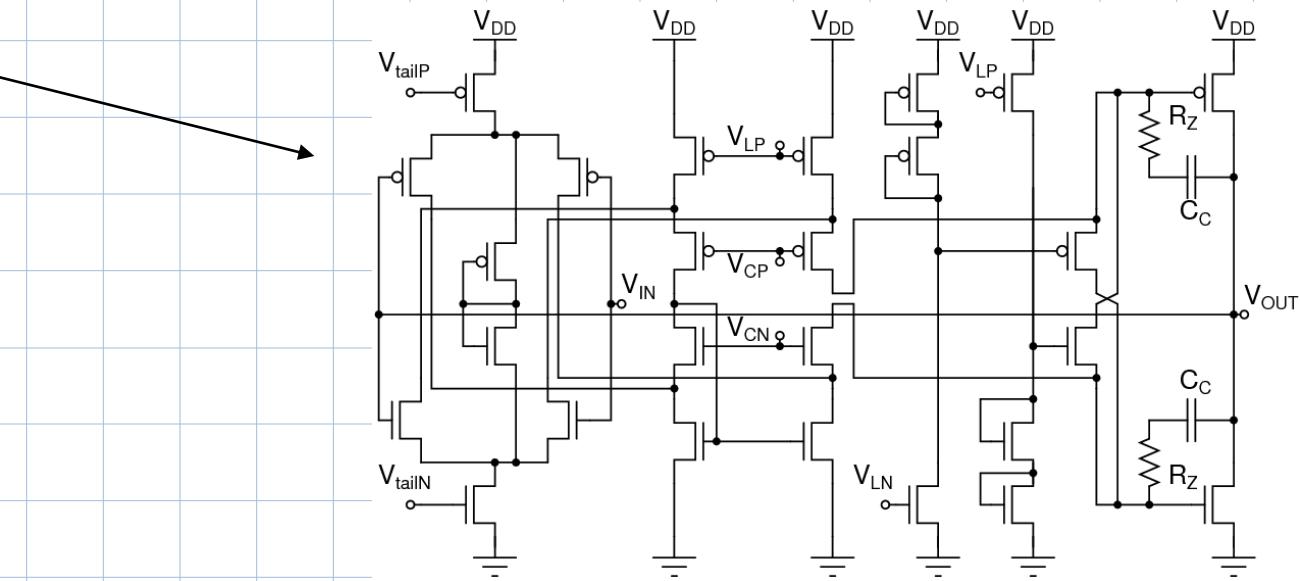
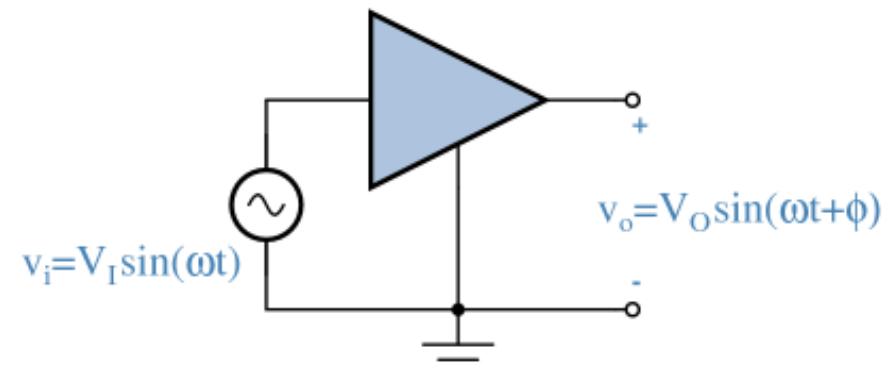
A continuación veremos una primera introducción a los amplificadores en electrónica mediante un modelo idealizado

Amplificadores electrónicos

El amplificador electrónico es un circuito electrónico, idealmente unidireccional, que **aumenta la intensidad y/o la potencia de una señal**. El amplificador toma la potencia de una fuente de alimentación y la manipula de modo que la salida sea similar a la entrada, pero en mayor amplitud.

Ejemplo de circuito

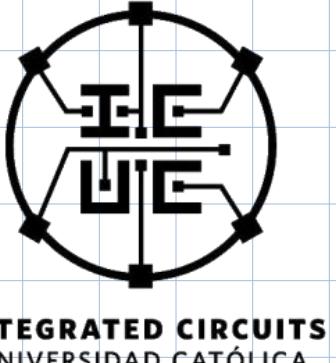
Símbolo:



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

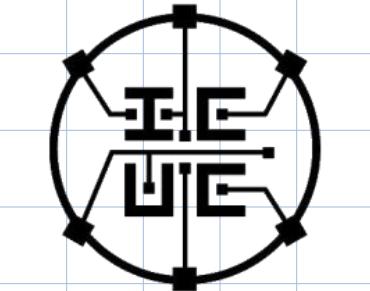
Existen muchos tipos de amplificadores según su función

- **Amplificador lineal:** no genera distorsión armónica
- **Amplificador no lineal:** genera distorsión apreciable en el tiempo y en frecuencia (aparecen armónicas que no existían en la entrada)
- **Amplificador de banda ancha:** amplifica sobre un amplio rango de frecuencias
- **Amplificador de banda angosta o sintonizado:** amplifica sólo en un pequeño rango de frecuencias, y atenúa el resto
- **Amplificador de RF:** diseñado para operar en el rango de radiofrecuencias
- **Amplificador de audio:** diseñado para operar en el rango de frecuencias de audio
- **Buffer:** tienen ganancia 1, y sus impedancias de entrada y salida permiten que la entrada no cargue la fuente de la señal, mientras que la salida puede manejar cargas; pueden ser buffers de voltaje o de corriente y en DC o AC
- **Amplificador operacional:** amplificador de propósito general, que puede ser configurado mediante realimentación negativa para realizar diversas funciones

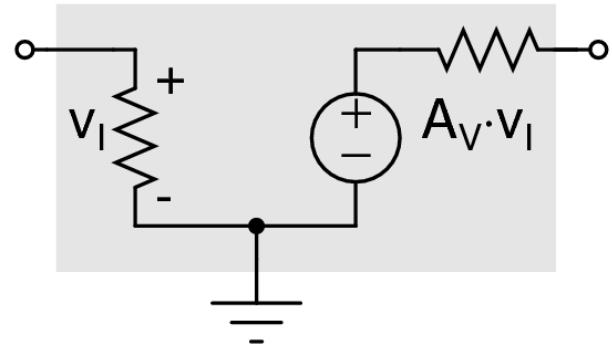


Propiedades de los amplificadores

- A una frecuencia determinada, los amplificadores tienen tres propiedades principales:
 - Ganancia (relación entre entrada y salida)
 - Impedancia de entrada
 - Impedancia de salida
- Es posible modelarlos de manera genérica usando componentes ideales
 - Ejemplo: amplificador de voltaje con ganancia A_v
 - Mide un voltaje en su entrada
 - Produce un voltaje A_v veces mayor
 - Entrega el voltaje de salida a través de impedancia de salida



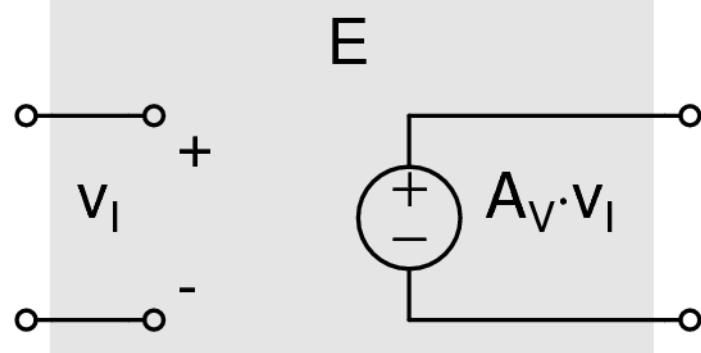
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



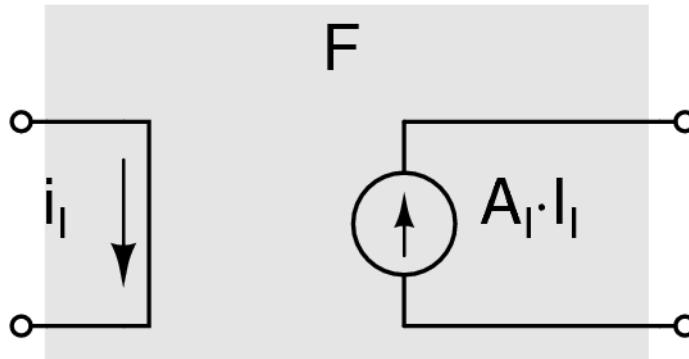
Los amplificadores son equivalentes de Thévenin controlados, o equivalentes de Norton controlados, con impedancia adicional donde miden la entrada

Existen 4 tipos de amplificadores según el tipo de señales que amplifican

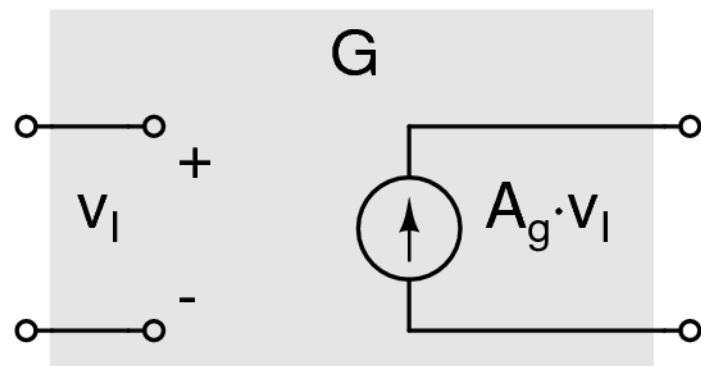
Los amplificadores **miden** la entrada y **producen** una salida proporcional



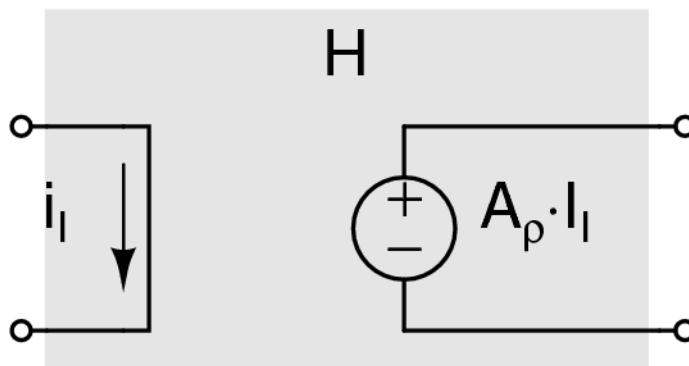
Amplificador de voltaje



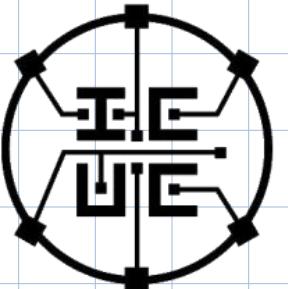
Amplificador de corriente



Amplificador de transconductancia

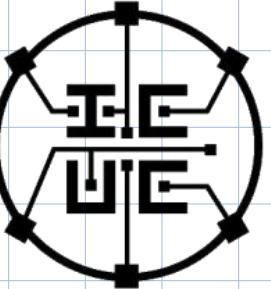


Amplificador de transresistencia



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Resumen – Tipos de amplificadores

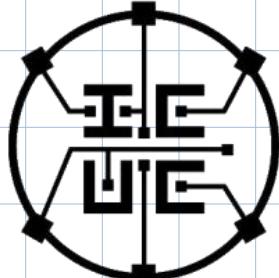


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Tipo	Fuente dependiente	en SPICE	Impedancia ideal de entrada	Impedancia ideal de salida
Voltaje	VCVS: Fuente de voltaje controlada por voltaje	E	∞	0
Corriente	CCCS: Fuente de corriente controlada por corriente	F	0	∞
Transconductancia	VCCS: Fuente de corriente controlada por voltaje	G	∞	∞
Transresistencia	CCVS: Fuente de voltaje controlada por corriente	H	0	0

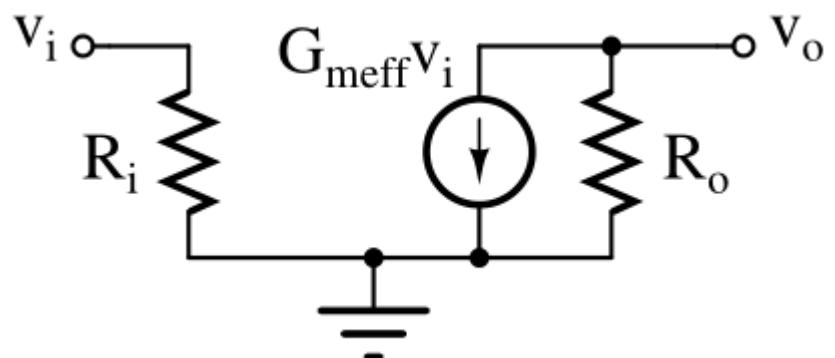
Modelo de amplificador $G_{\text{meff}} - R_{\text{out}}$

- Cualquier amplificador **lineal** puede ser representado como un eq. de Thévenin con fuente controlada, o como un eq. de Norton con fuente controlada
- Veamos más de cerca el caso de un Norton controlado:

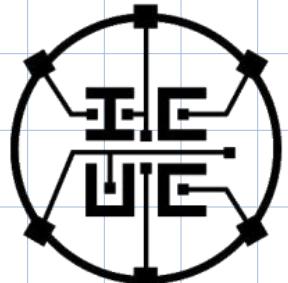


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

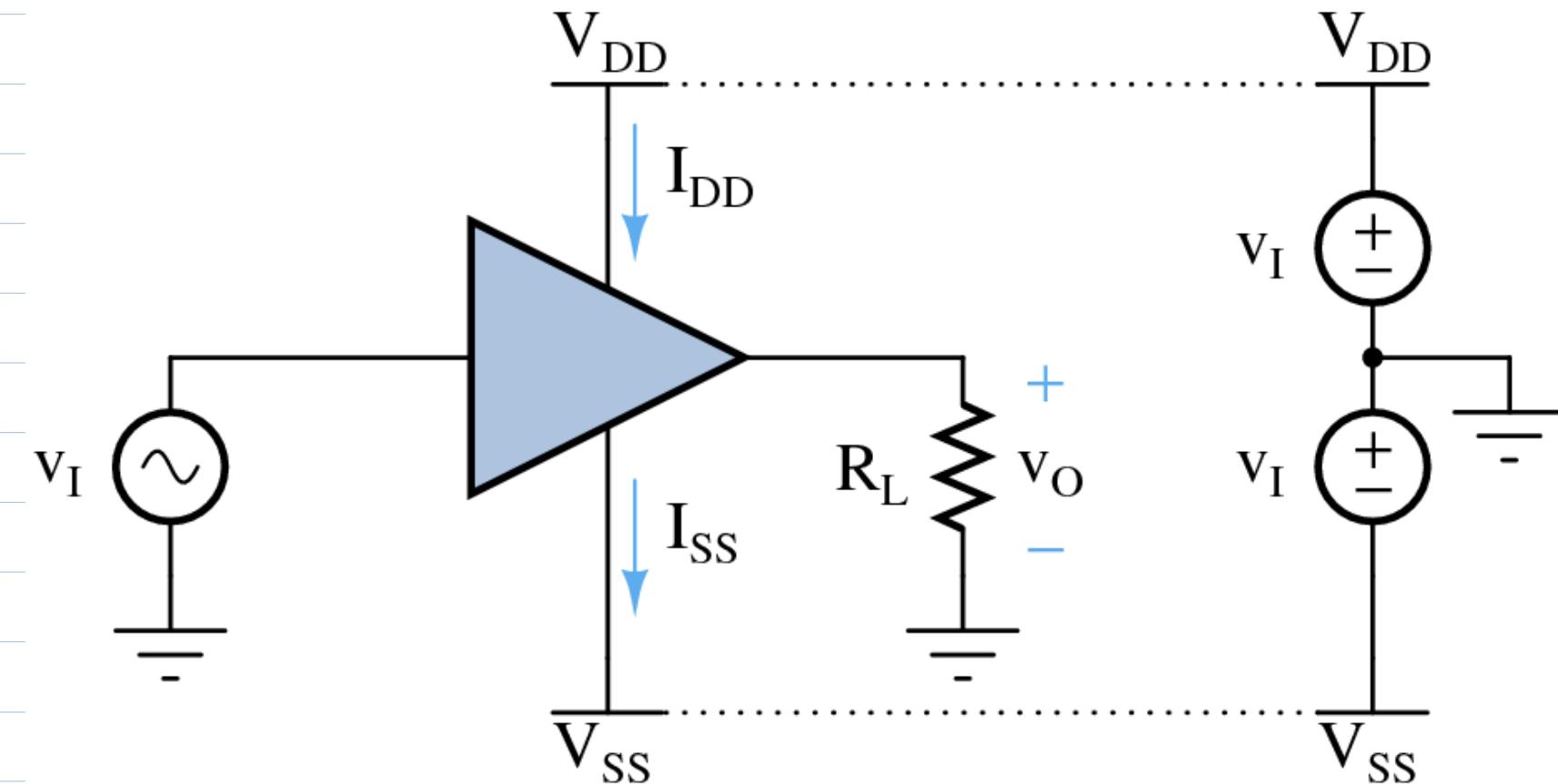
¿Cuál es la ganancia,
impedancia de entrada
e impedancia de salida?



Alimentación de un amplificador



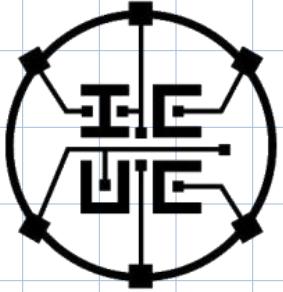
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



¿Cuánta potencia consume el amplificador de la figura?



1.10



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Cifras de desempeño de los amplificadores

Dependencias:

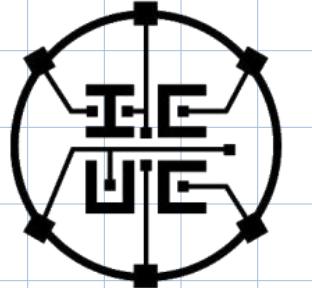
- 1.09 Introducción a los amplificadores electrónicos

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

¿Algo más que ganancia, impedancia de entrada e impedancia de salida?

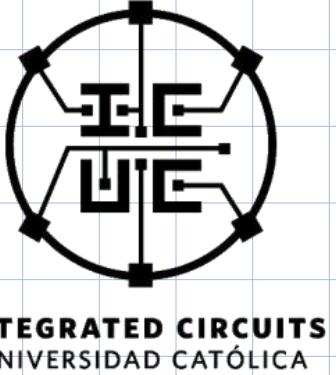
- Ya aprendimos que las principales propiedades de los amplificadores son su ganancia, su impedancia de entrada y su impedancia de salida
- Sin embargo, no todos los amplificadores presentan el mismo desempeño
- A continuación estudiaremos con mayor detalle las cifras de desempeño que caracterizan el comportamiento de los amplificadores



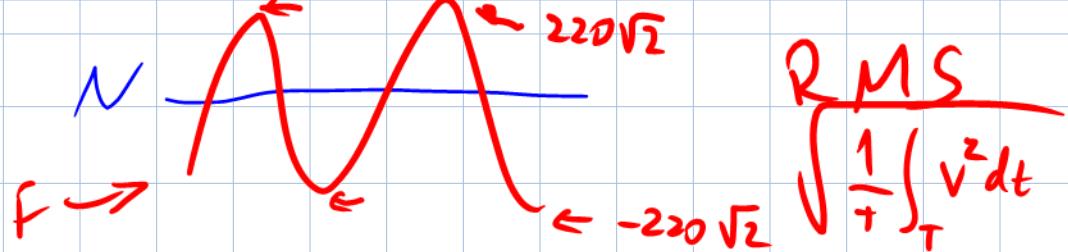
Ganancia estática o DC

- La ganancia estática es la **razón entre salida y entrada** a frecuencia 0 en torno al punto de operación
 - En otros contextos se habla de ganancia en la banda de interés; misma definición para un rango de frecuencias
- Normalmente designada con la letra A
- Puede ser V/V (A_V), A/A (A_I), V/A , A/V , W/W , etc.

¿Tiene algún sentido ganancia en W/V ?



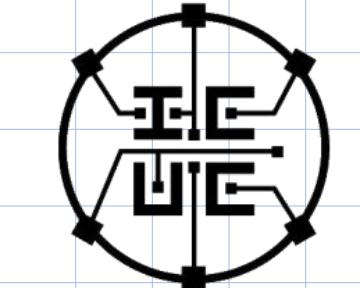
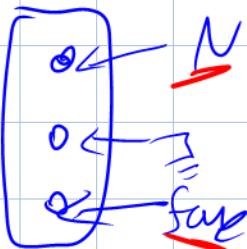
Decibel



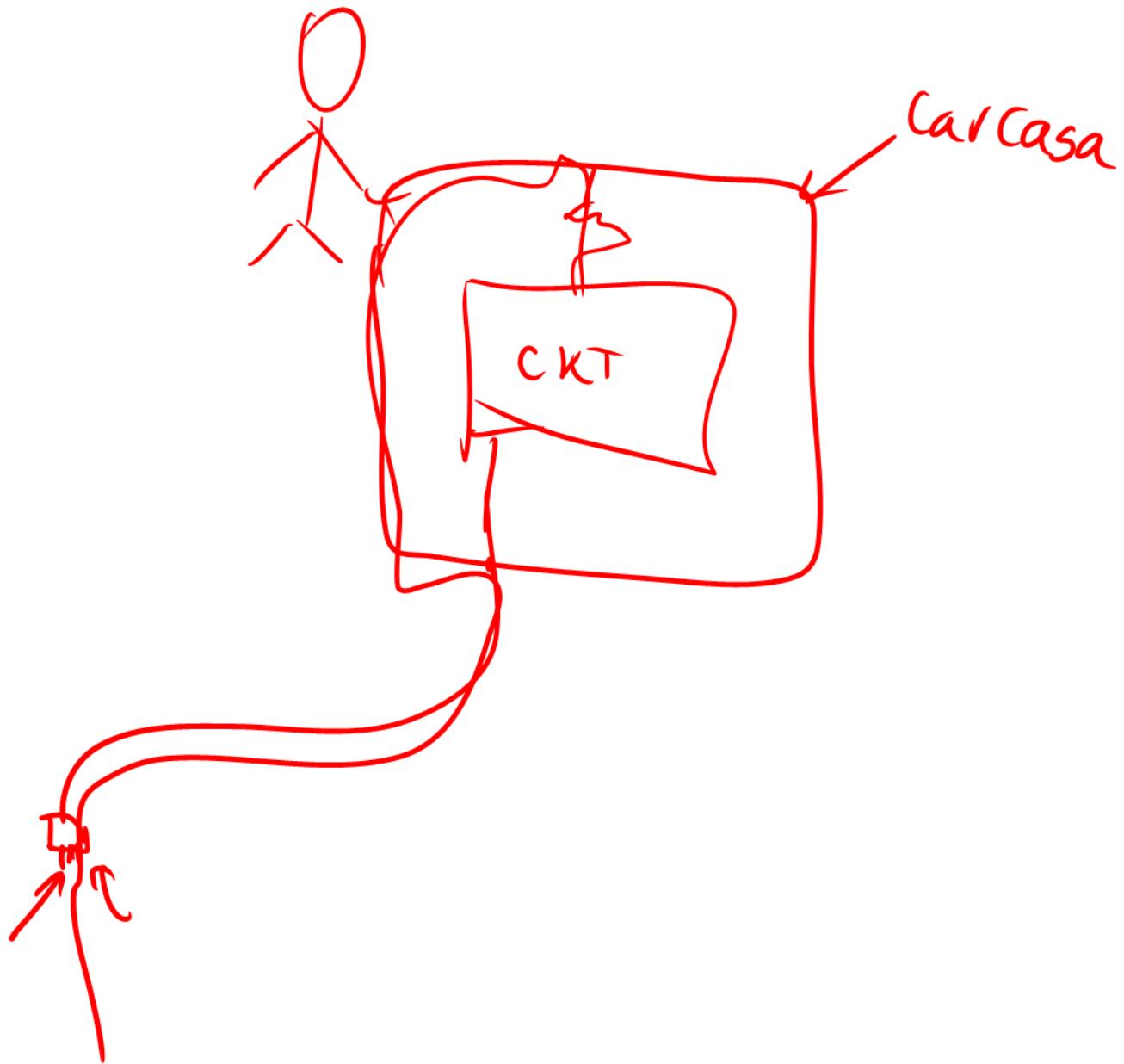
- Decibel (dB) es una unidad logarítmica que especifica la razón entre dos números
 - $1 \text{ dB} = 1/10 \text{ Bel}$ (el Bel no se usa mucho)
- Es conveniente expresar las ganancias de voltaje o de corriente en dB
 - Ambas son adimensionales

$$A_{\text{dB}} = 20 \log_{10}(A)$$

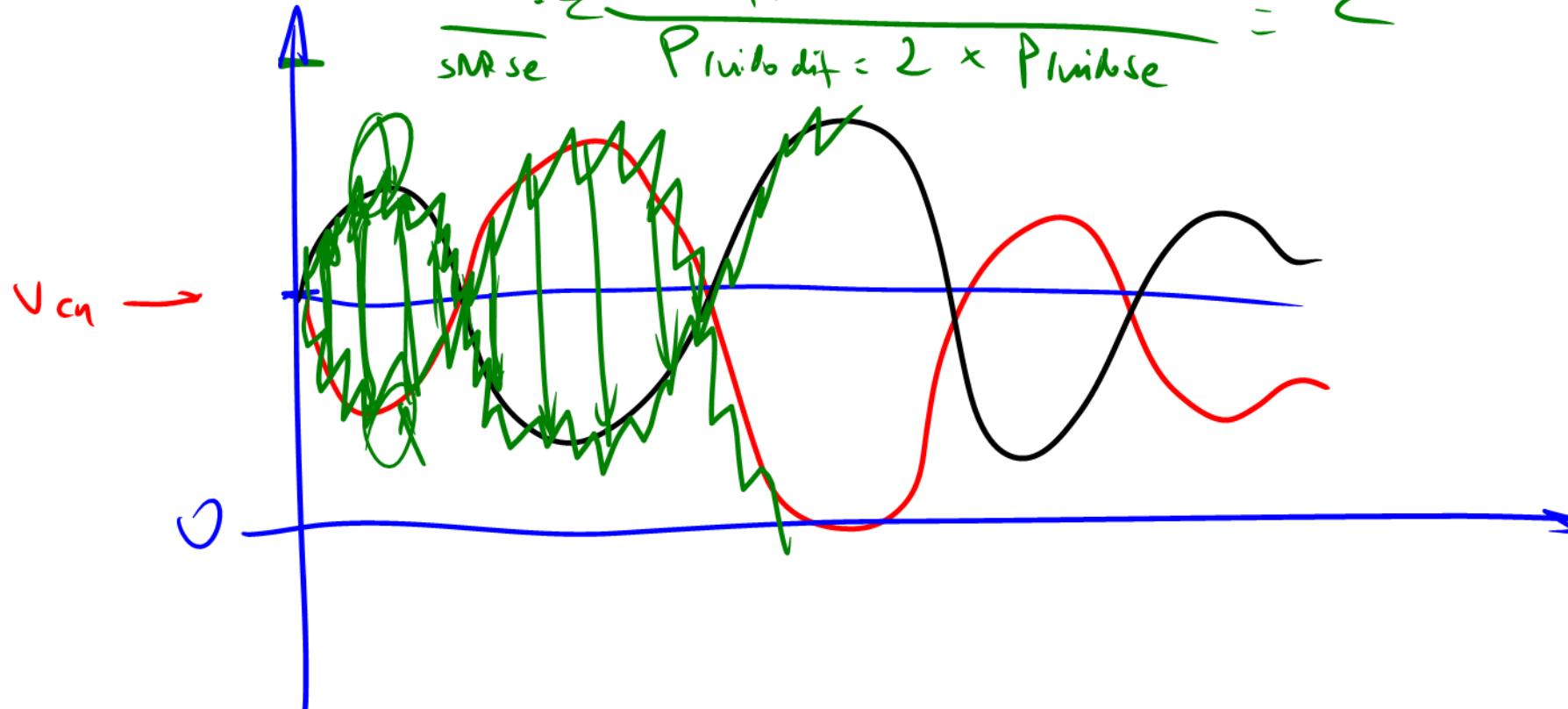
$$\begin{aligned} 10 \log \left(\frac{P_o}{P_i} \right) &= 10 \log \left(\frac{V_o^2/R}{V_i^2/R} \right) \\ &= 20 \log \left(\frac{V_o}{V_i} \right) \end{aligned}$$



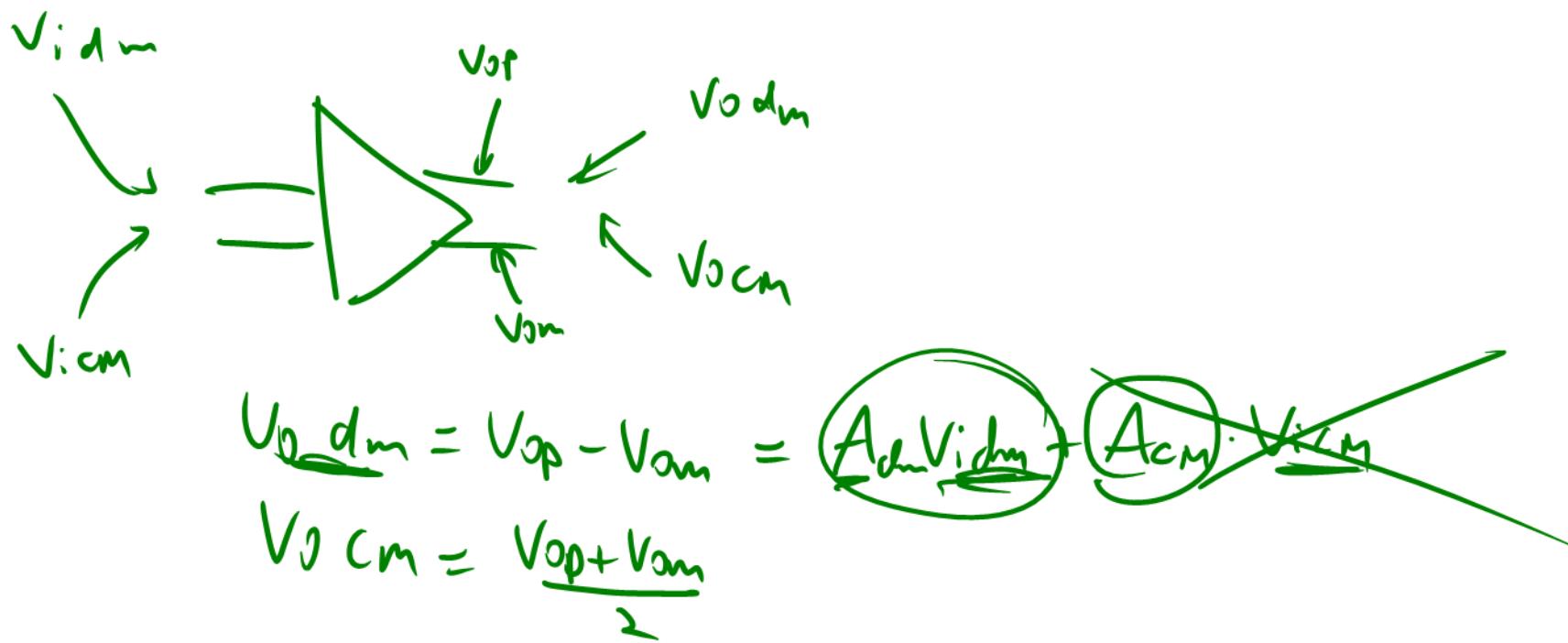
¿Cómo llevamos razones de potencias a dB?

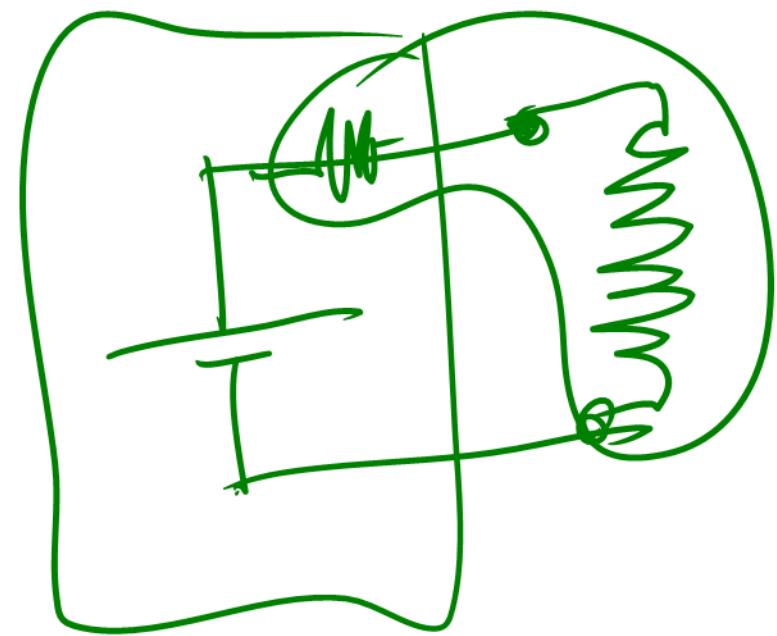
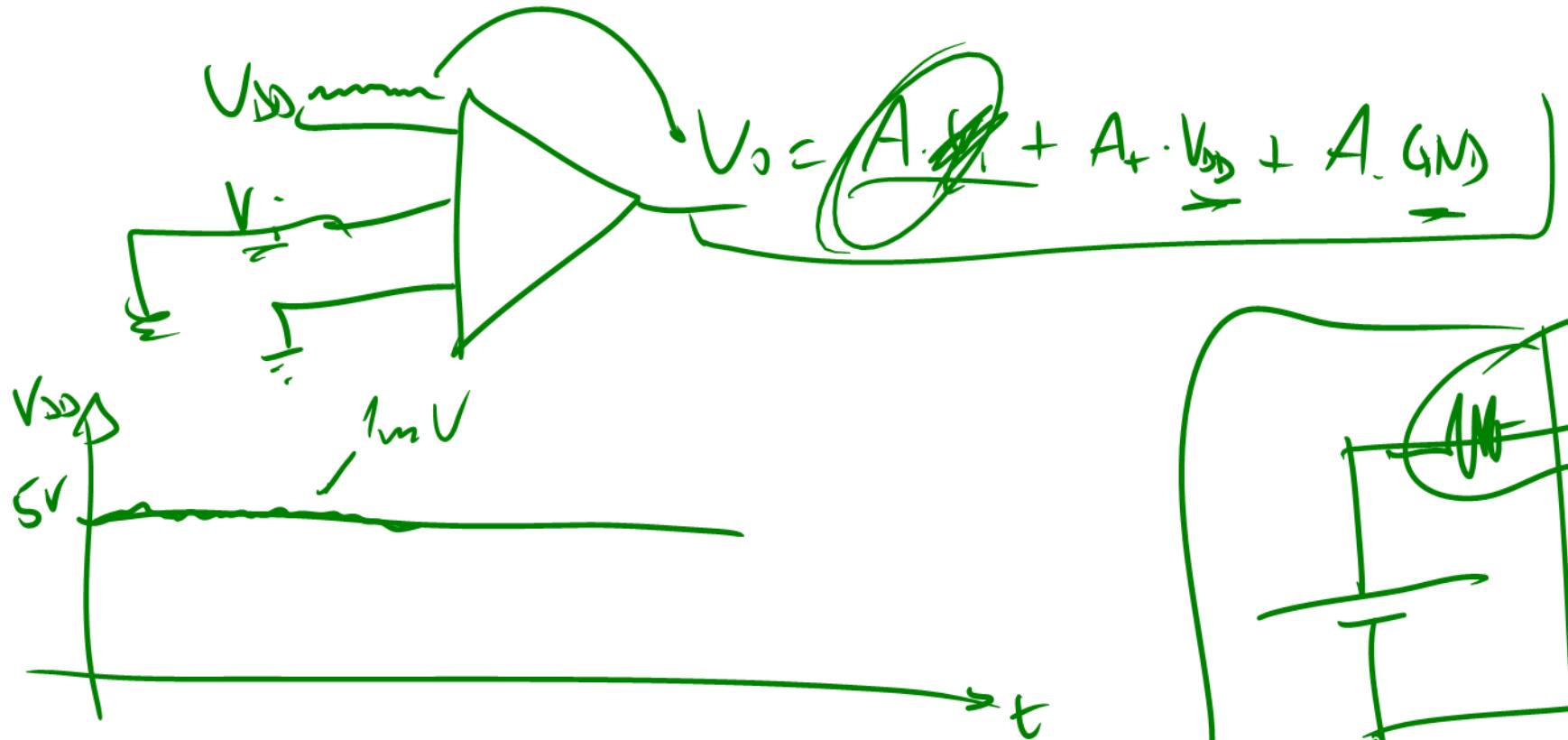


$$\frac{SNR_{diff}}{SNR_{se}} = \frac{P_{diff} = 4 \times P_{se}}{P_{initial\ diff} = 2 \times P_{initial\ se}} = 2$$



$$\underline{\text{CMRR}} = \frac{A_{dm}}{A_{cm}}$$





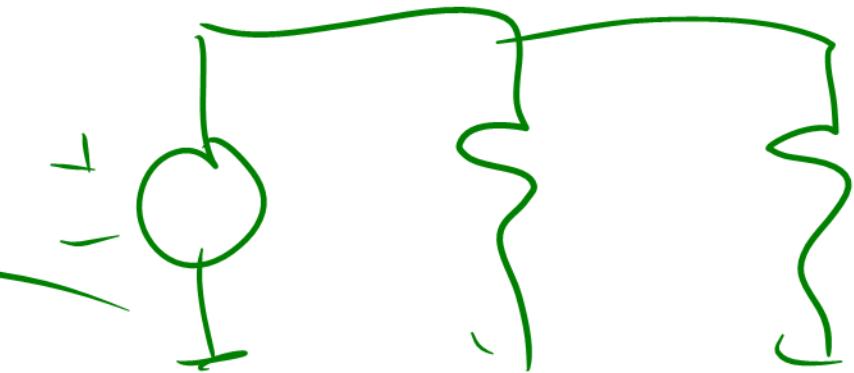
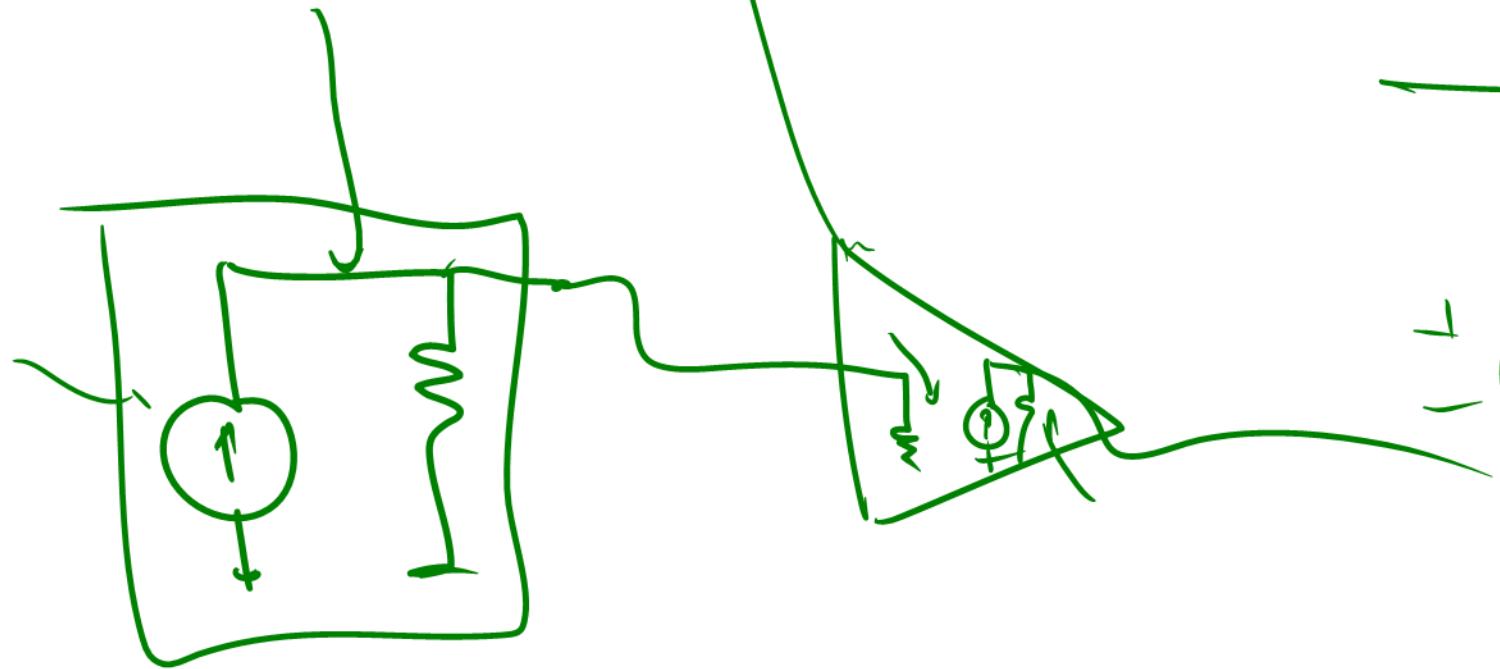
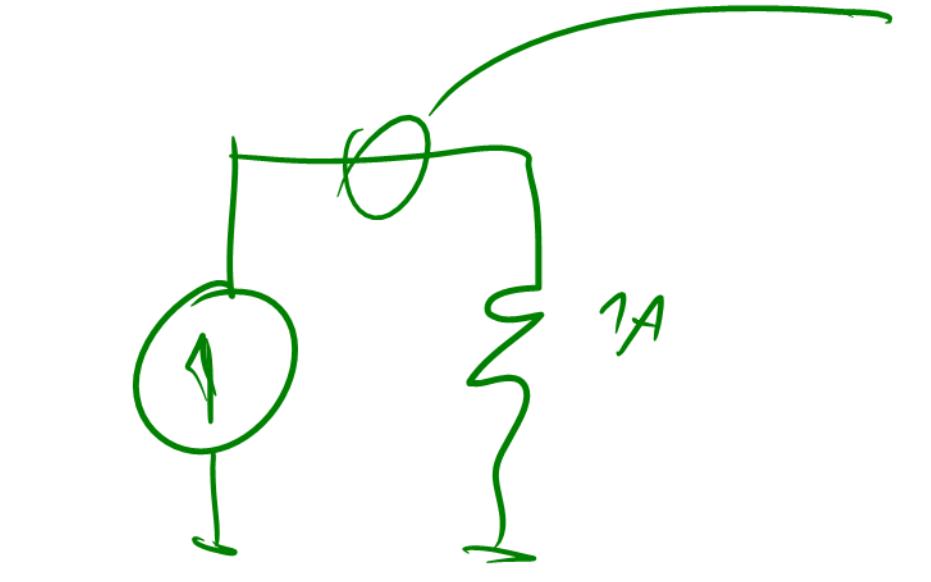
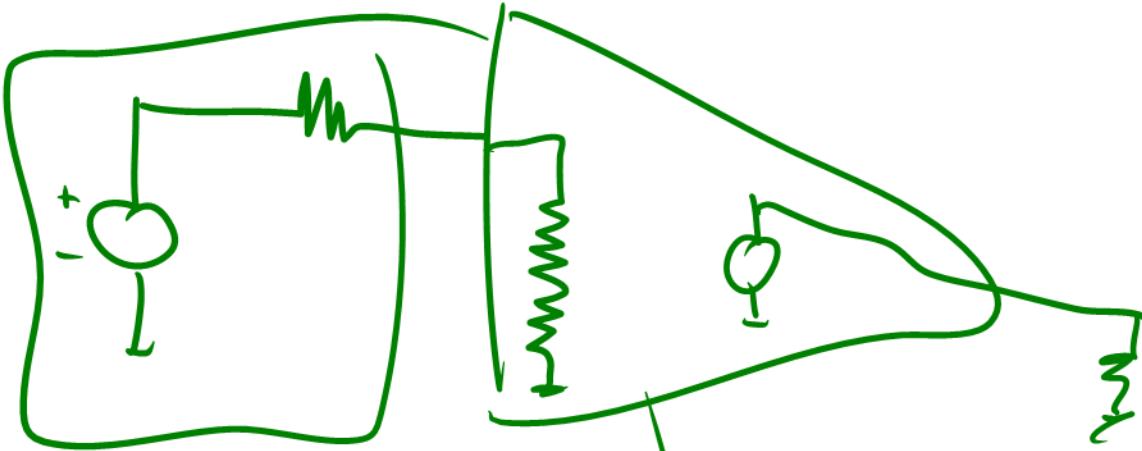
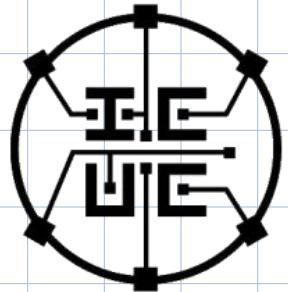


Tabla de decibeles

dB	x
0dB	1x
20dB	10x
40dB	
60dB	
6dB	
12dB	
26dB	
32dB	
38dB	
-20dB	
-43dB	



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

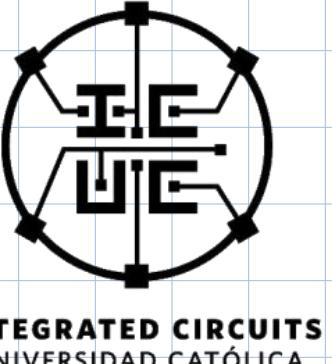
Otras cifras de desempeño también son expresadas en dB – Ej: rango dinámico

El rango dinámico de una variable es la razón entre el máximo valor que puede tomar la variable, y el menor valor detectable de dicha variable

$$DR = \frac{X_{\max}}{X_{\min}}$$

$$DR_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \left(\frac{X_{\max}}{X_{\min}} \right) \text{ (para intensidades)}$$

$$DR_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{X_{\max}}{X_{\min}} \right) \text{ (para potencias)}$$



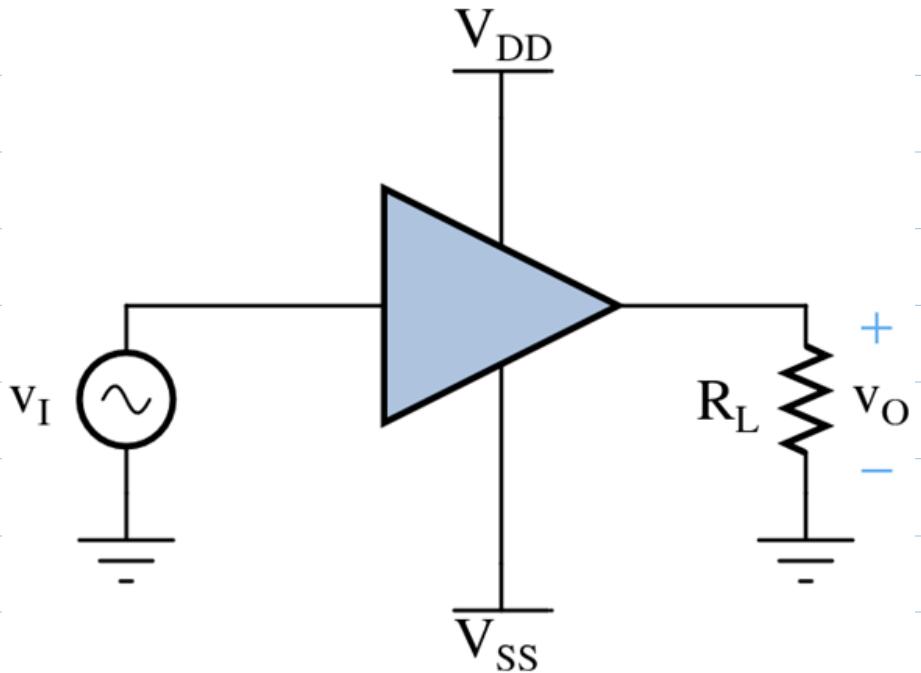
Factores de rechazo de fuente de alimentación (PSRR)

- Todos los amplificadores tienen una ganancia A desde la entrada a la salida
- También tienen una ganancia parásita A_+ desde la alimentación positiva a la salida
- Y otra ganancia parásita A_- desde la alimentación negativa a la salida

$$\text{PSR}_+ = \frac{A}{A_+}$$

$$\text{PSR}_- = \frac{A}{A_-}$$

Ambas pueden ser expresadas en dB

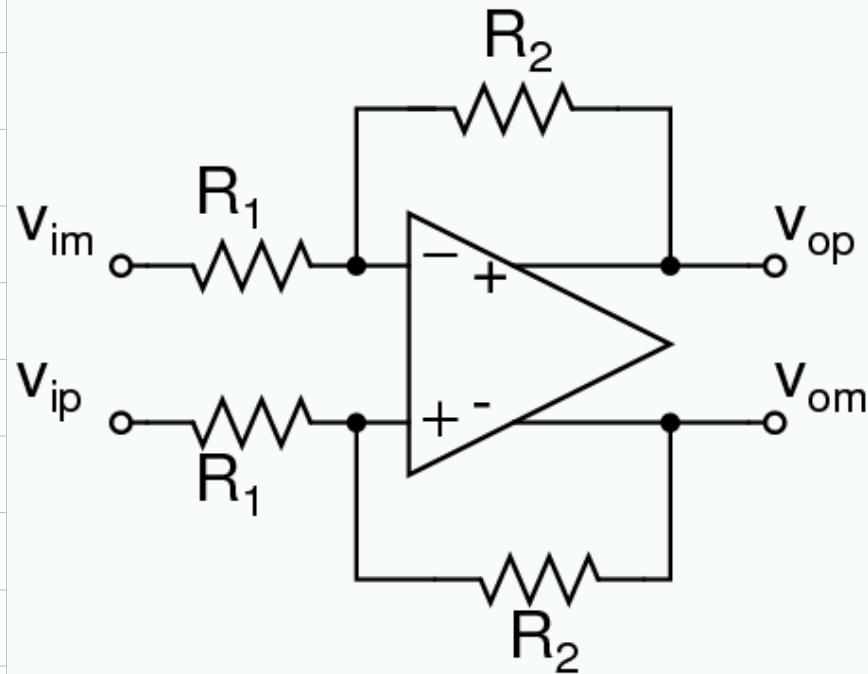
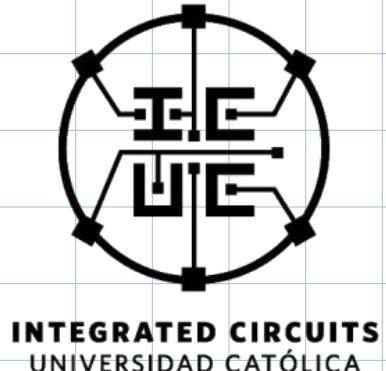


Factor de rechazo de modo común (CMRR)

- Los amplificadores diferenciales no deberían amplificar las variaciones de modo común (CM)
 - Pero lo hacen con ganancia parásita A_{CM} ...
- Una cifra de desempeño que caracteriza la selectividad del amplificador a las señales diferenciales por sobre las de modo común, se llama CMRR

$$CMRR = \frac{A_{DM}}{A_{CM}}$$

También puede ser expresada en dB

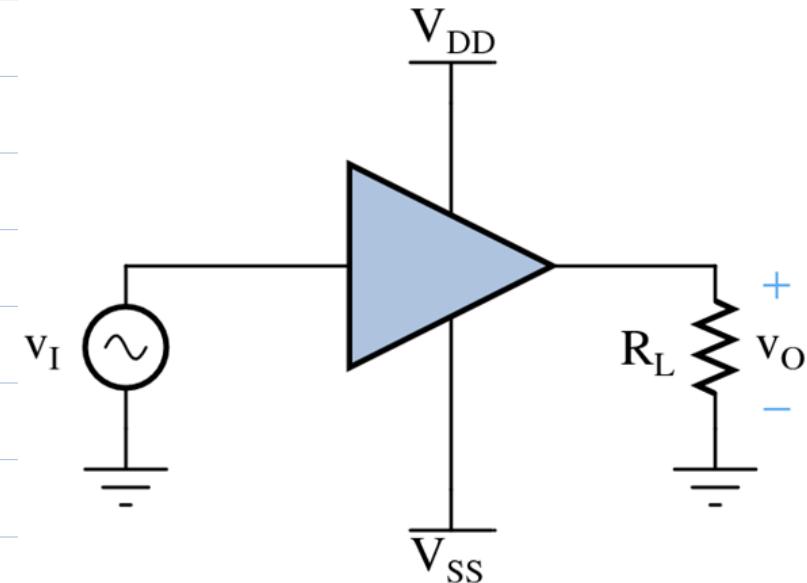
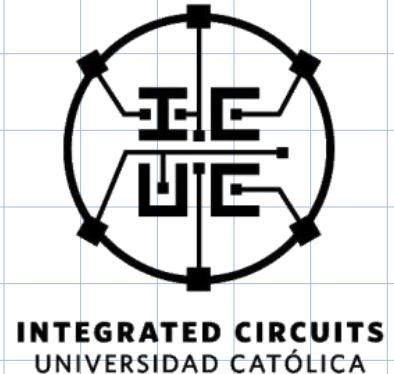


Ruido y SNR

- Ruido es cualquier fluctuación aleatoria – y normalmente no deseada – en una señal eléctrica
- El ruido se superpone a la señal de interés, aumentando la incertidumbre en la medición
- Dos tipos de ruido:
 - Hecho por el ser humano (EMI)
 - Electrónico o fundamental, debido a diversos procesos fundamentales
- Los amplificadores tienen ruido en su salida incluso cuando su entrada es nula
- Razón señal a ruido SNR

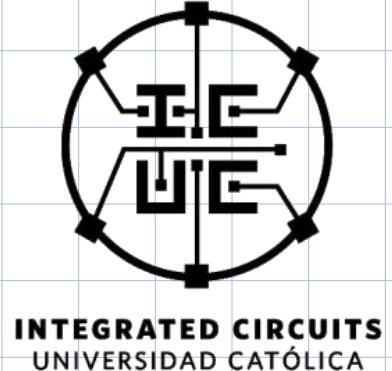
$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{Sig}}}{P_N}$$

También puede ser expresada en dB

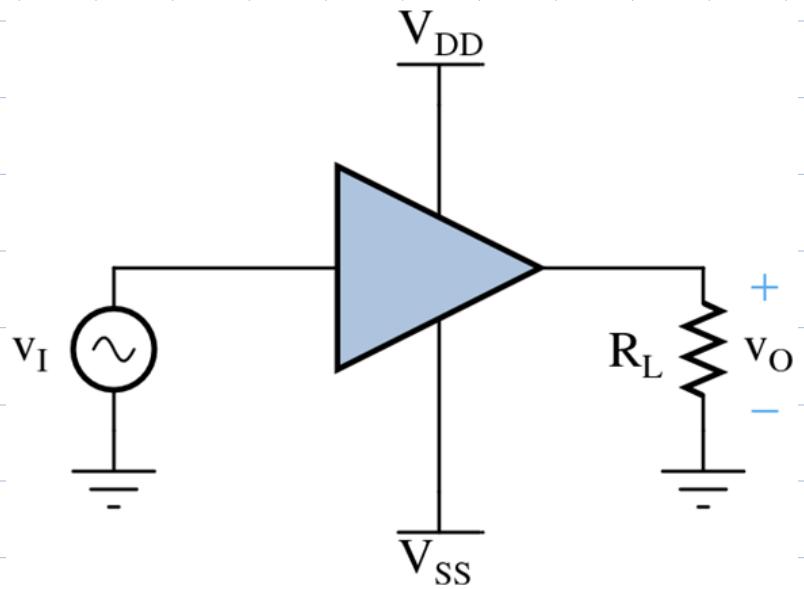


Acerca del ruido electrónico

- Presenta una densidad de espectral de potencia (psd)
 - ruido blanco, ruido de baja frecuencia, ruido coloreado
- Hay dispositivos ruidosos
 - Resistores, transistores
 - Cada dispositivo tiene su ruido que puede ser referido a cualquier nodo de un circuito y sumado mediante el teorema de superposición
- Los ruidos debido a diferentes procesos no están correlacionados
 - Por lo tanto, se suman **en cuadratura** (potencias)

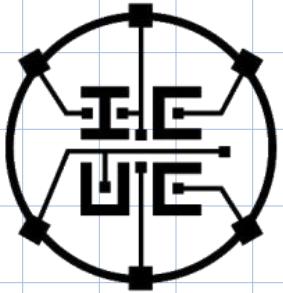


Ejemplo: ruido referido a la entrada





1.11



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Teorema de Miller

Dependencias:

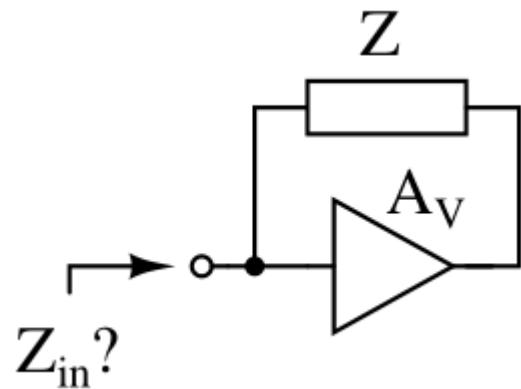
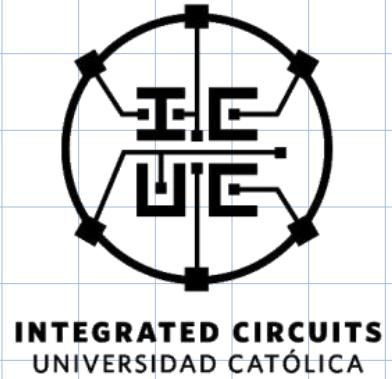
- 1.09 Introducción a los amplificadores electrónicos

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

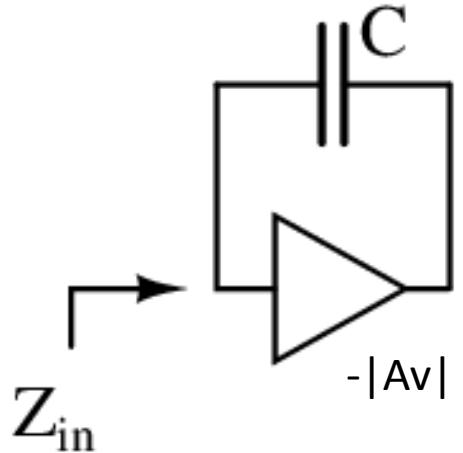
¿Cómo cambia una impedancia cuando hay realimentación?

- Consideremos un amplificador de voltaje
 - Alta impedancia de entrada
 - Baja impedancia de salida
- ¿Cuál es la impedancia de entrada en presencia de realimentación?

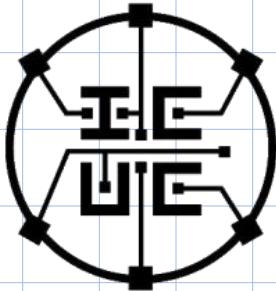


Esto es lo que se conoce comúnmente como “Teorema de Miller para voltajes”

Caso de una capacitancia y ganancia negativa



Cálculos:

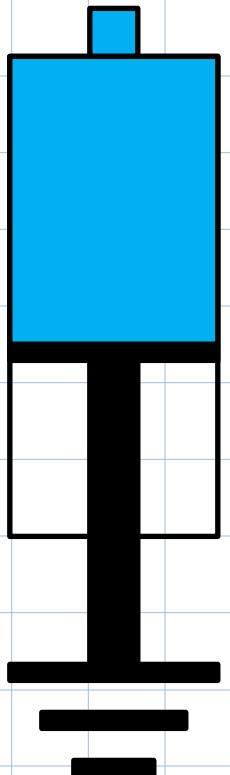


Conclusión: La impedancia Z_{in} equivale a _____

¿Alguna consecuencia de esta conclusión? ¿Ejemplos?

Tratemos de entenderlo mejor...

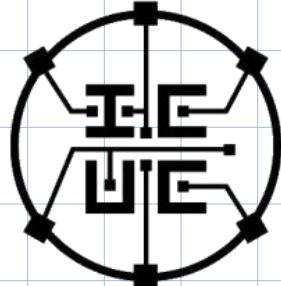
¿Analogía de un capacitor a tierra?



Una capacitancia a tierra es parecida
a una jeringa...

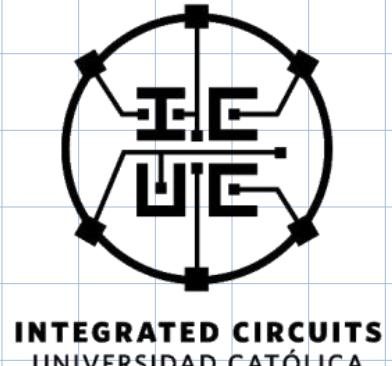
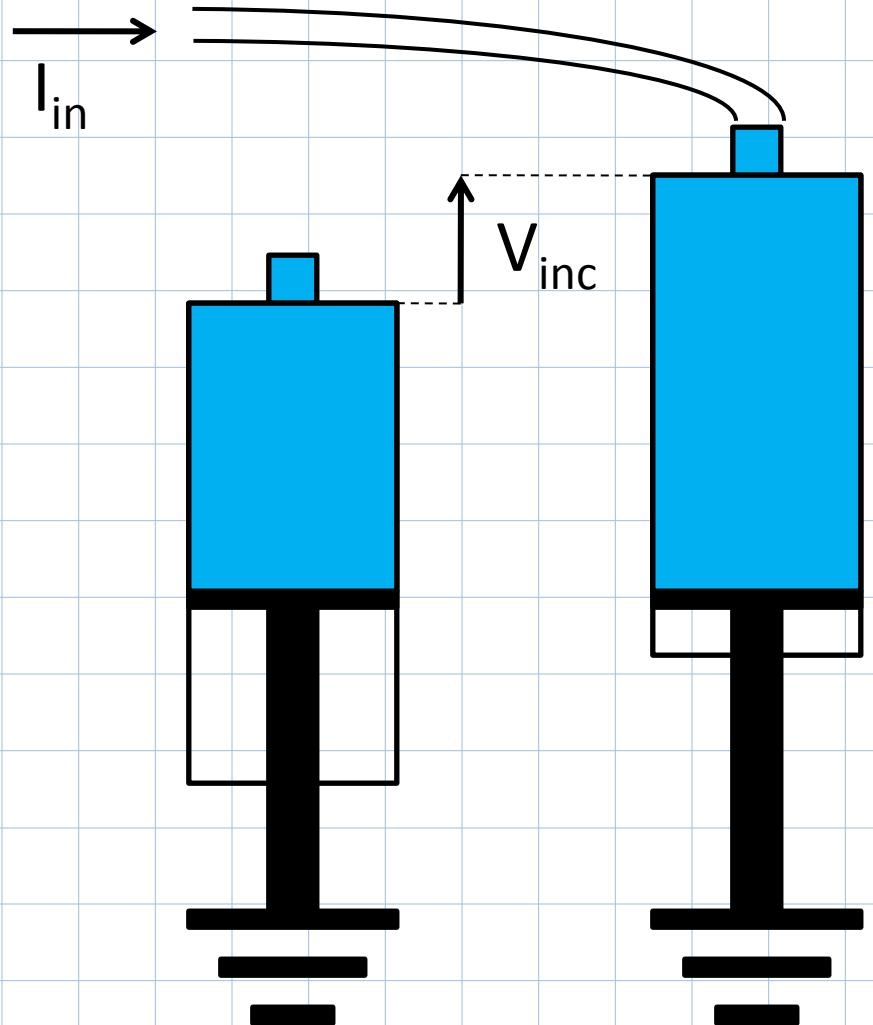
¿Podemos interpretar esta ecuación?

$$Q = CV$$

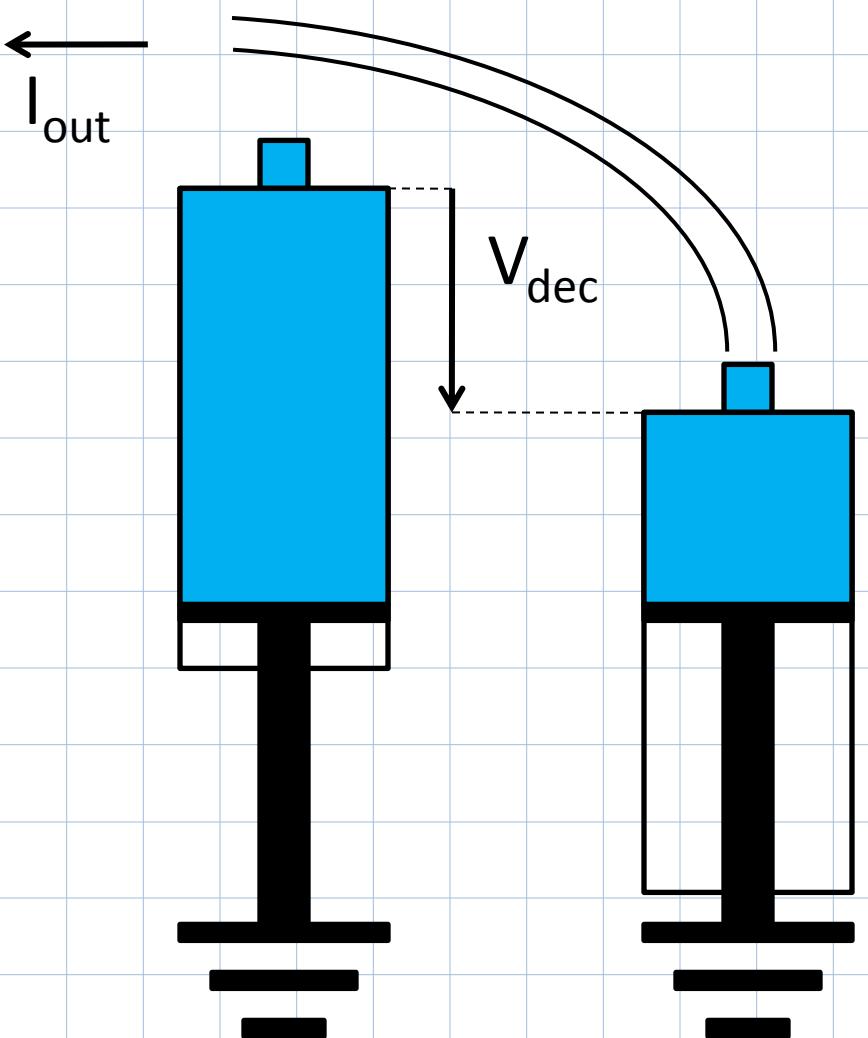


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

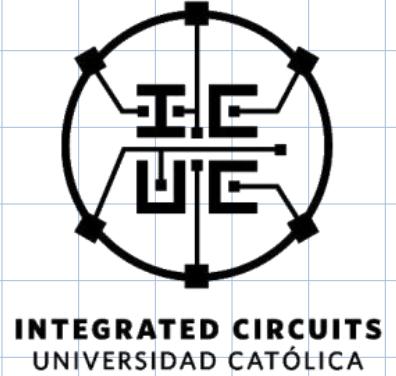
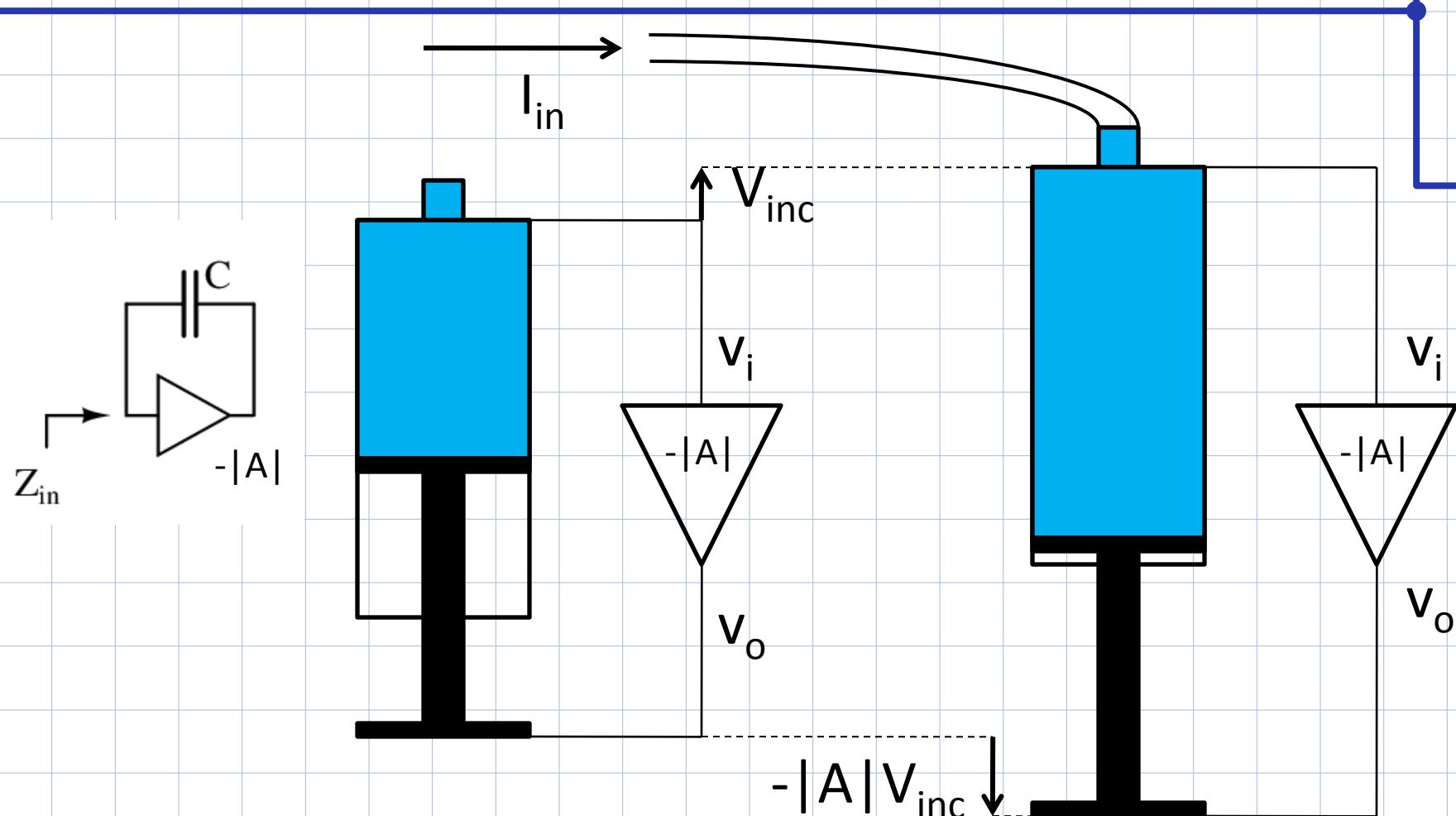
Aumentemos el voltaje (o altura)



Bajemos el voltaje (o altura)

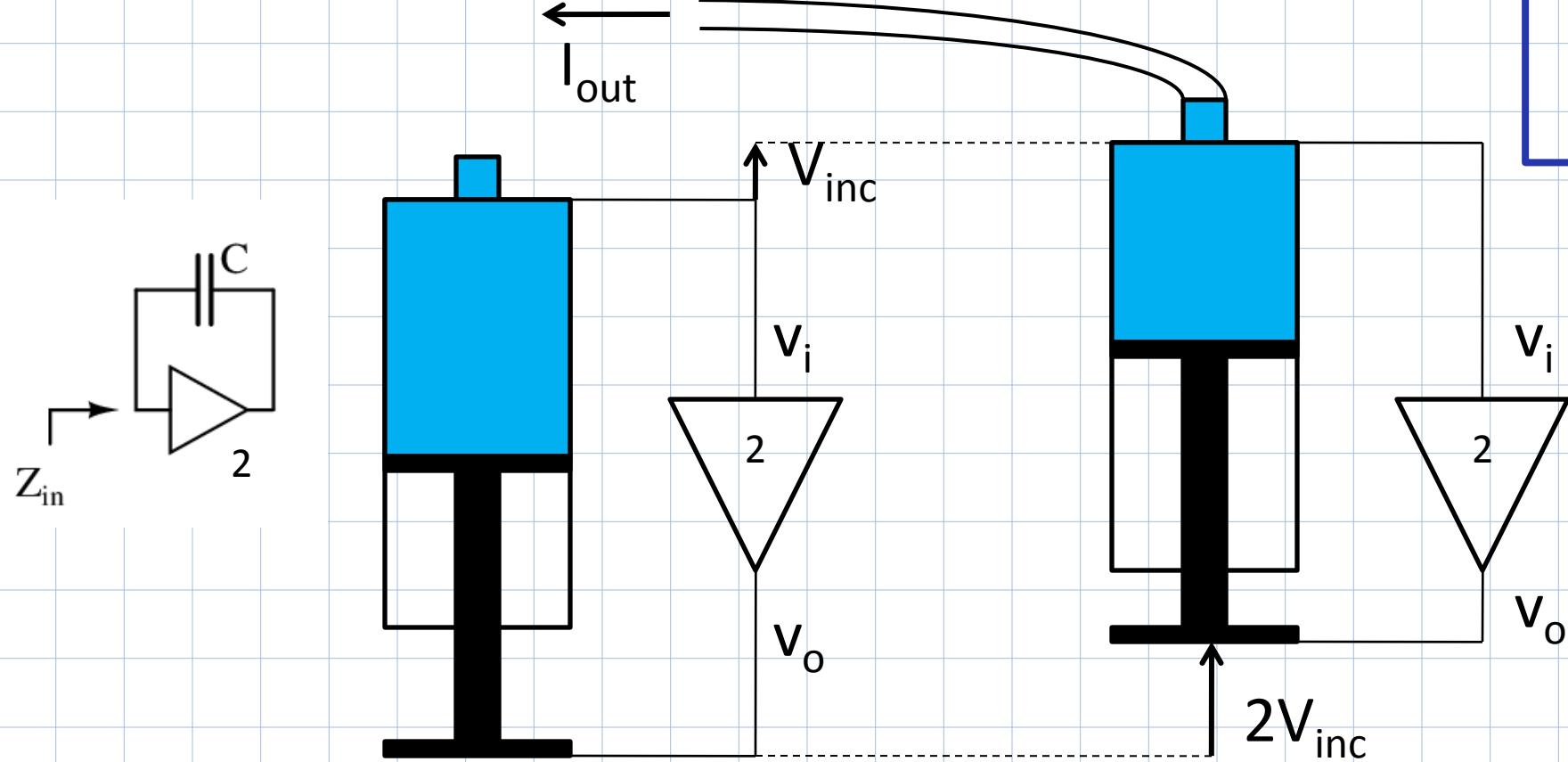
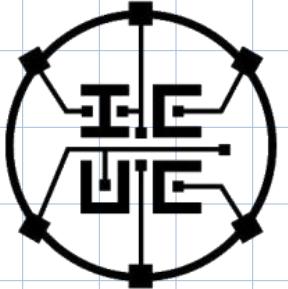


Tratemos de visualizar el efecto Miller



Desde afuera “se siente” como una capacitancia más grande

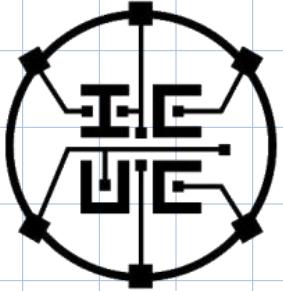
Creando capacitancias negativas



Desde afuera “se siente” como una capacitancia negativa (!)



1.12



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Curvas de transferencia estáticas

Dependencias:

- 1.09 Introducción a los amplificadores electrónicos

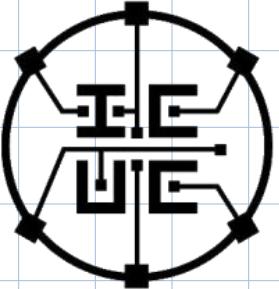
angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

¿Qué son las curvas de transferencia estáticas?

- Describen una relación **estática** entre dos variables
- Ej:
 - V_{out} vs. V_{in}
 - V_{in} vs. I_{in}
 - I_{out} vs. V_{in}
 - V_{in} vs. rpm de un motor
 - Fuerza vs. desplazamiento en un resorte
 - Etc.

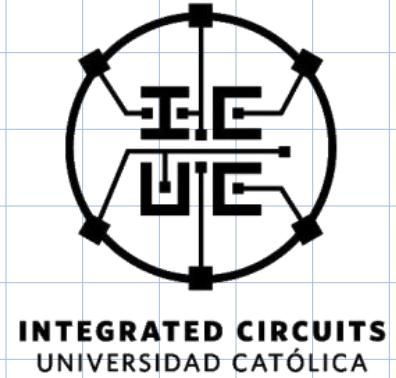
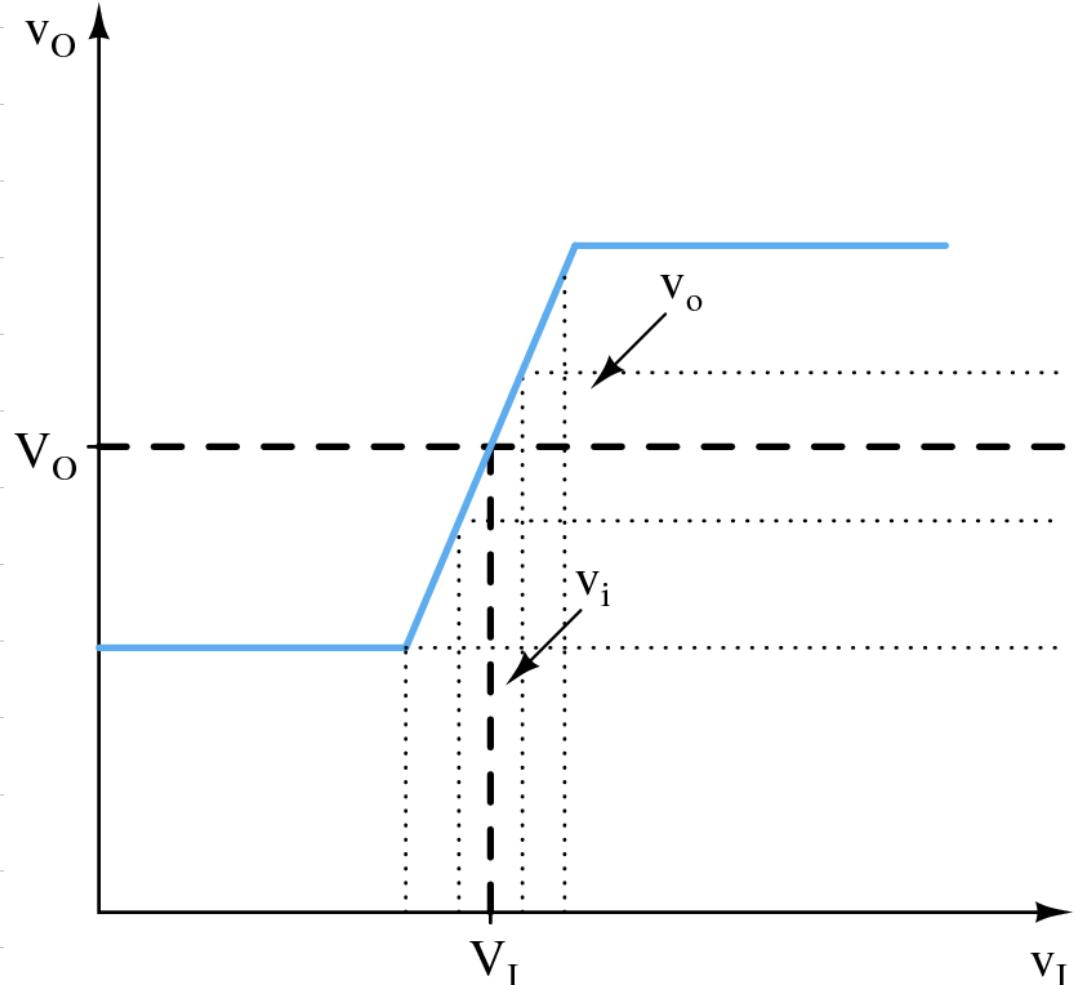
¿Qué significa eso?
¿Será importante?



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

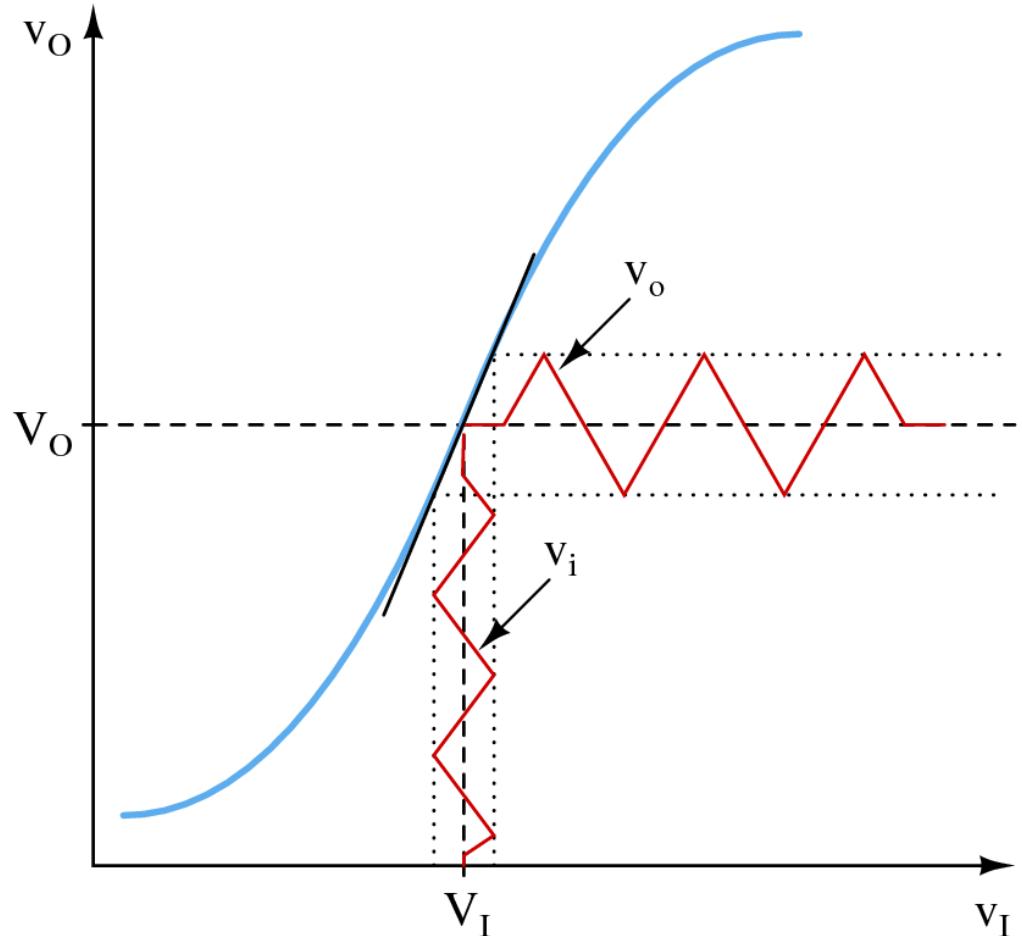
Las curvas de transferencia estática pueden ser no lineales

Ejemplo de curva no lineal: saturación de un amplificador

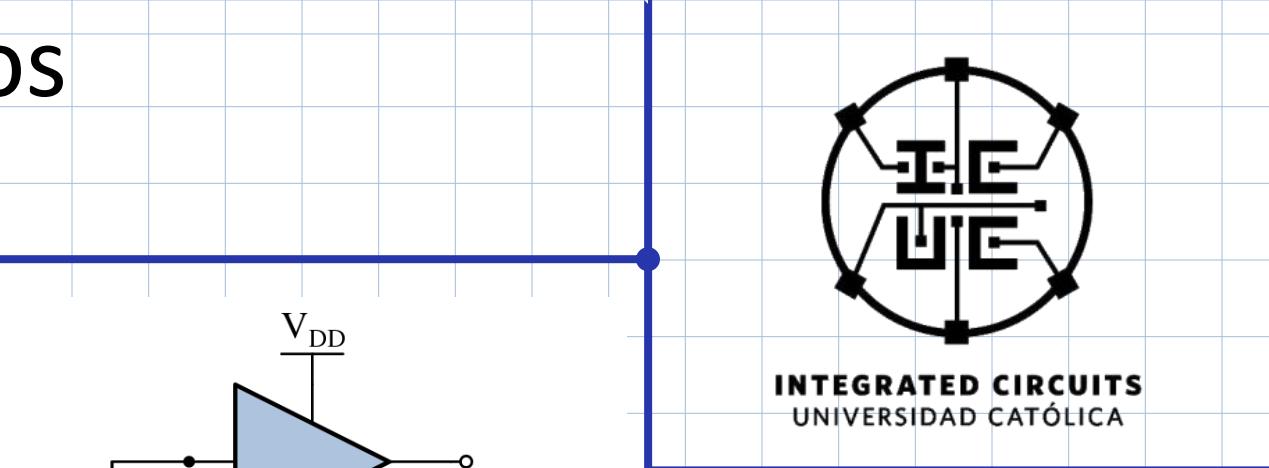


- La salida de los amplificadores de voltaje satura en cierto nivel
- La curva entrada/salida es no lineal
- En la curva, definimos
 - Ganancia A_v
 - Punto de operación Q
 - Excusión de voltaje V_{swing}

Linealización y parámetros incrementales

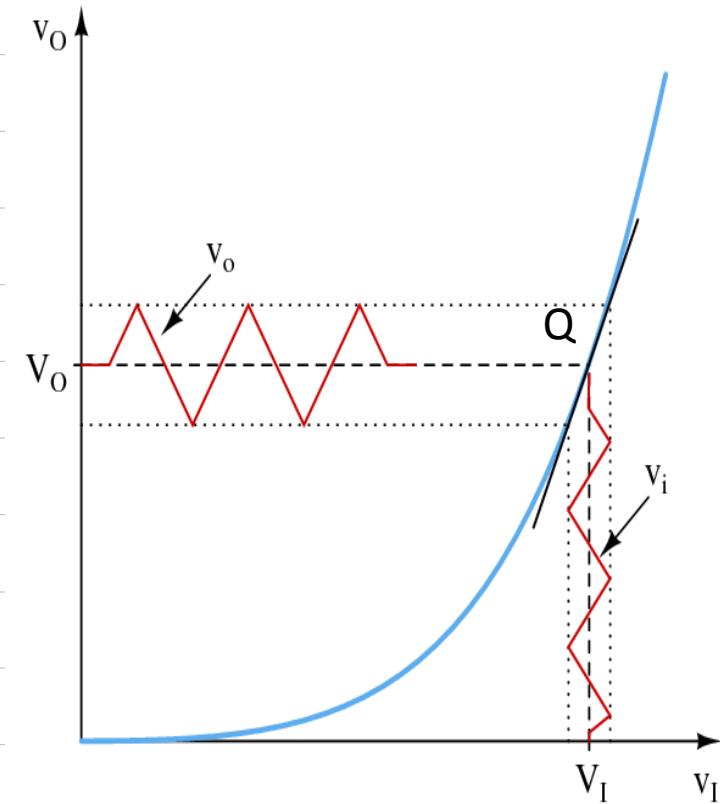
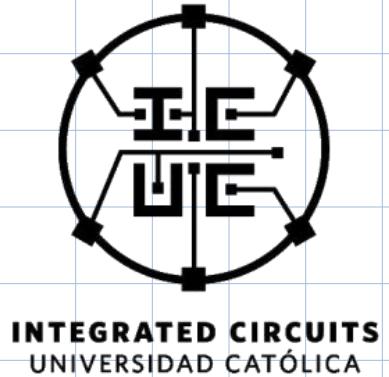


¿Cómo se ve la curva de transferencia estática de un amplificador con ganancia negativa?



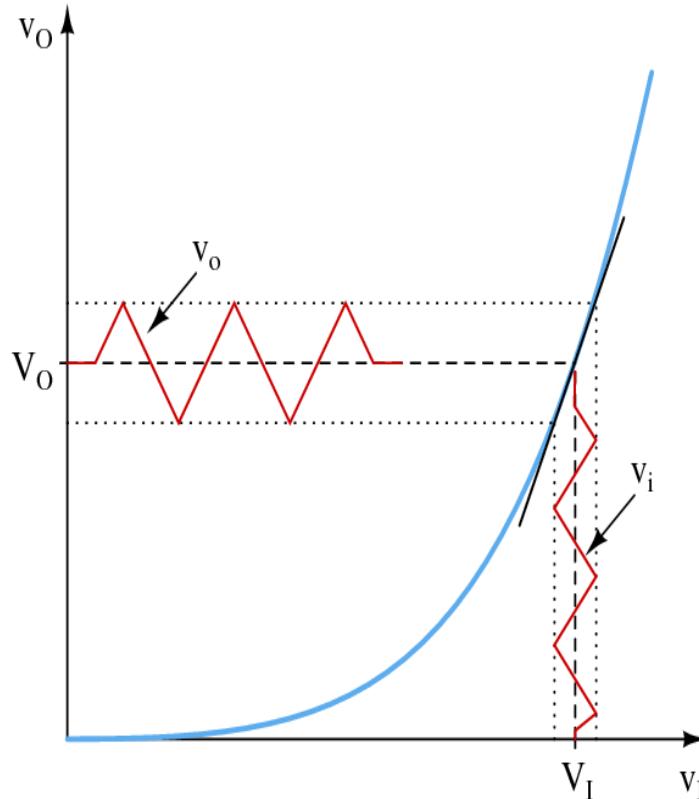
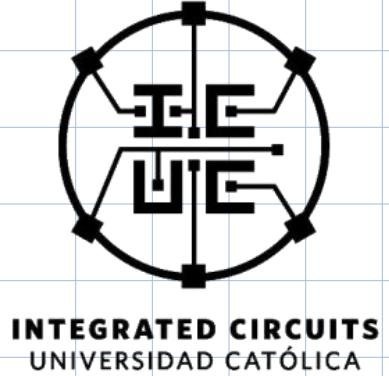
Modelos para análisis en pequeña señal

- Permiten analizar circuitos en torno a un punto de operación Q
 - Se asume linealidad en torno a ese punto
 - El modelo es válido mientras nos mantengamos en la vecindad de Q, es decir, señales pequeñas
- Circuito es representado mediante redes lineales
 - Circuitos no lineales pasan a ser lineales
- Voltajes y corrientes son referidos a valores en el punto de operación Q
 - Se trabaja con variaciones pequeñas en torno a Q
- Modelos de pequeña señal de elementos circuitales son obtenidos mediante **linealización**



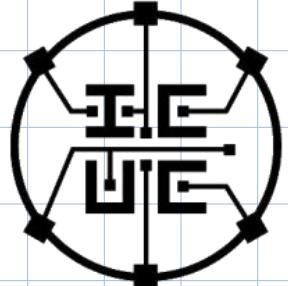
Más acerca de Q y la polarización (bias) de un circuito

- Q es el **punto de operación DC** del circuito
 - Caracterizado por todos los **voltajes DC** y **corrientes DC** del circuito
- **Polarizar** un circuito significa establecer los voltajes DC y corrientes DC para lograr la operación en el punto Q
- Diferentes valores DC resultan en diferentes puntos Q, con diferentes comportamientos
- Para las señales, el **punto de operación Q representa el origen**; las señales se mueven en torno a Q



Linealización de una curva

- Aproximación lineal de una función no lineal en torno a un punto Q
- Modelo es obtenido mediante serie de Taylor truncada al primer término

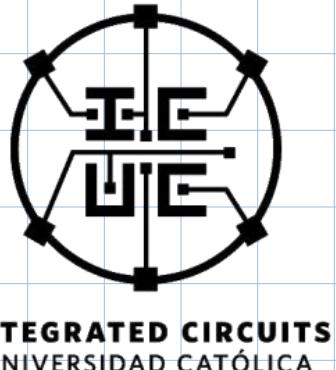


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

$$f(x) = f(Q) + \frac{f'(Q)}{1!}(x - Q) + \frac{f''(Q)}{2!}(x - Q)^2 + \dots$$

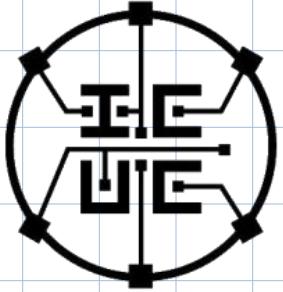
Análisis de circuitos no lineales en régimen lineal (incremental, pequeña señal)

1. Determinar voltajes de nodo y corrientes de rama en Q, el punto de operación DC del circuito
2. Encontrar **modelos de pequeña señal** linealizados 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 por modelos de pequeña señal linealizados
 - 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





1.13



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Resistencia de elementos pasivos no lineales

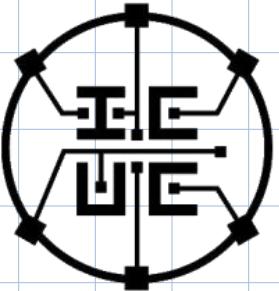
Dependencias:

- 1.03 Jerarquía en electrónica
- 1.12 Curvas de transferencia estática

angel@uc.cl

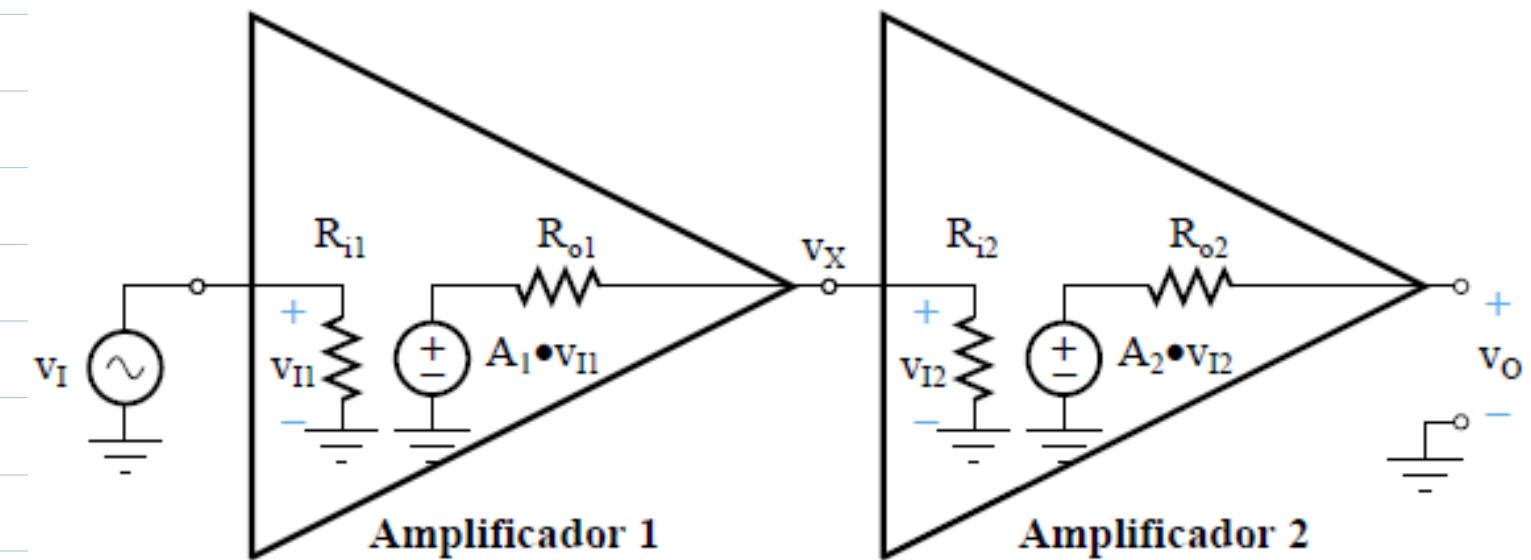
Electrónica en cápsulas

Ya aprendimos (1.03) que las impedancias de nodo son relevantes al conectar bloques en cascada



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

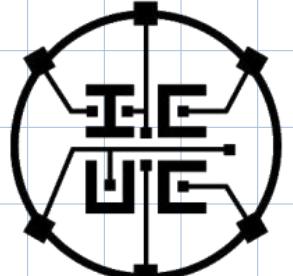
- Resistencia de entrada de un bloque carga salida de bloque anterior y cambia la ganancia efectiva
- Ejemplo: amplificadores de voltaje en cascada



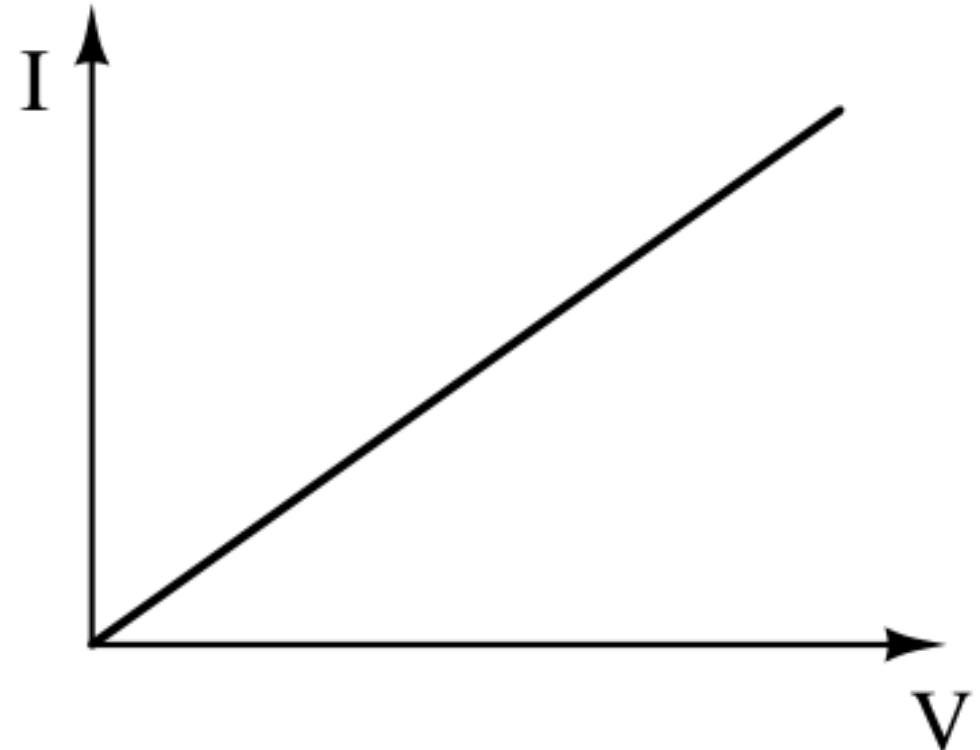
Impedancias de nodo son importantes en DC (polarización) y en AC (señales)

Representación gráfica de la resistencia de elementos pasivos lineales

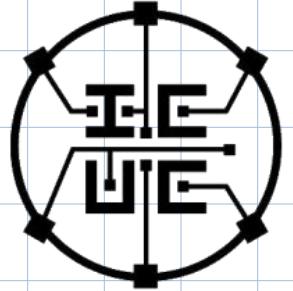
- Una resistencia lineal R tiene una relación lineal I vs V
- Podemos graficarla como una recta I vs V
 - ¿Pasa exactamente por el origen?
 - ¿Cuánto vale la resistencia R ?



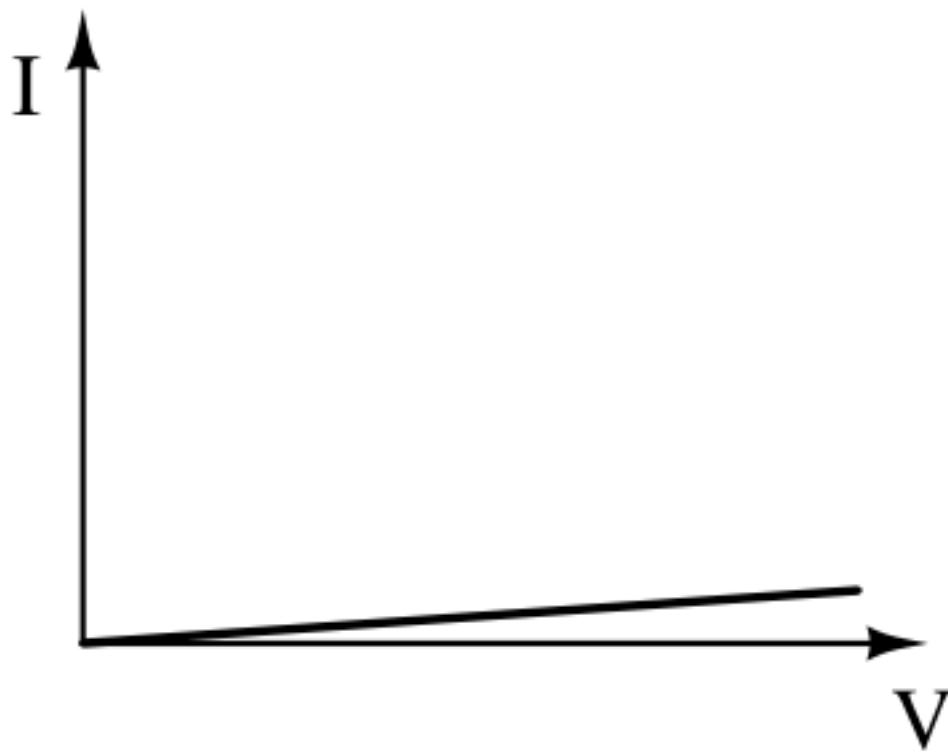
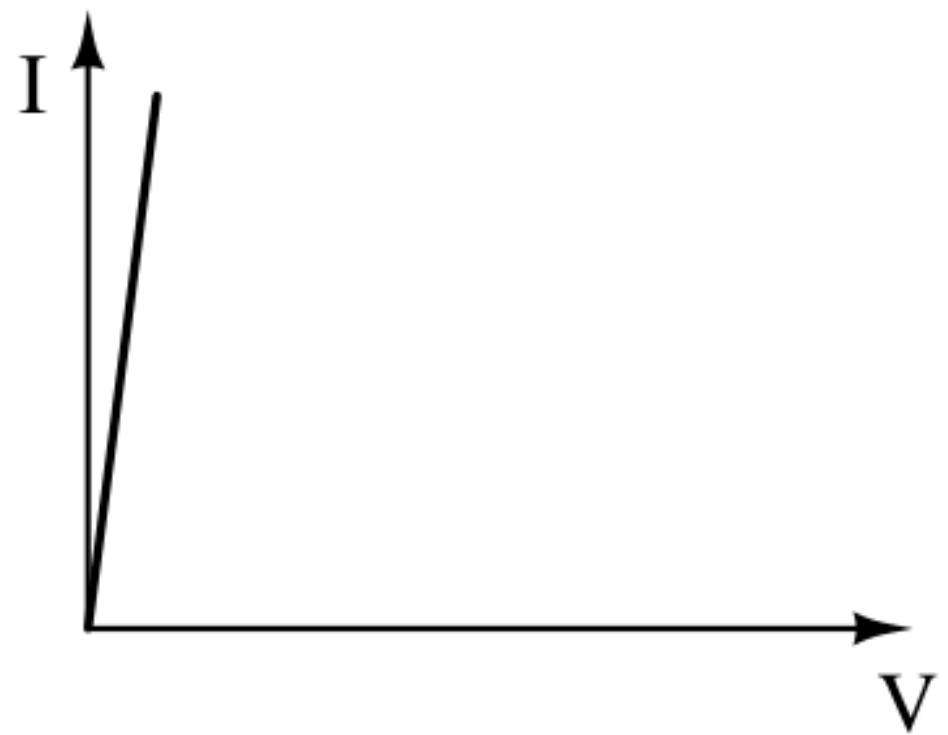
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



La resistencia puede ser baja o alta...

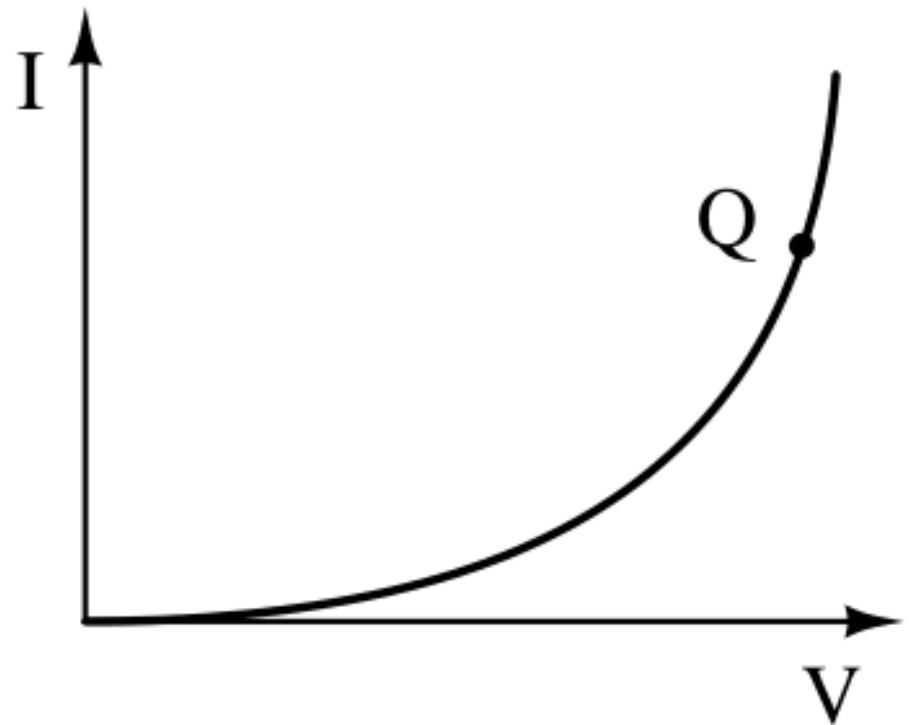
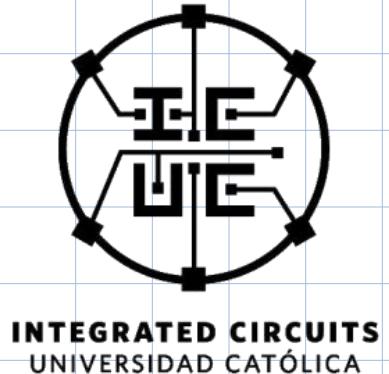


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



¿Cómo es la resistencia elementos pasivos no lineales?

- Necesitamos una herramienta matemática que nos permita calcular el efecto de una impedancia no lineal...
- Ya aprendimos linealización (1.12)
 - ¿Quizás podemos aplicar lo mismo en curvas I/V?
- Consideraremos entonces un elemento resistivo no lineal
 - **¿Cuál es la resistencia que nos importa al operar en el punto Q?**

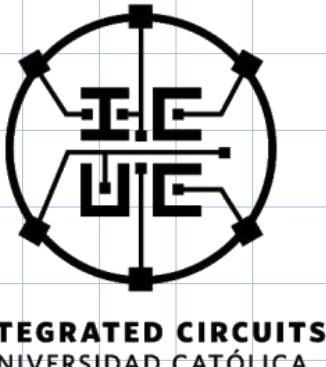
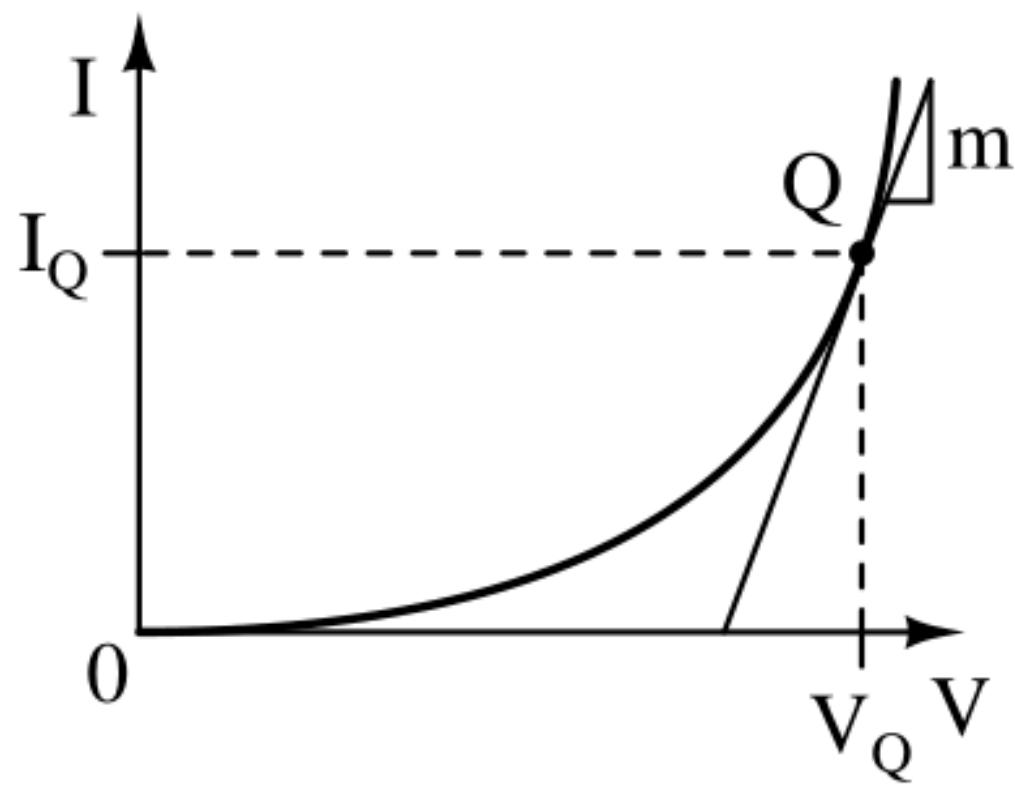


Concepto de resistencia incremental

- Supongamos que el circuito opera en torno a Q, el punto de operación
- Pequeños **incrementos** de voltaje en torno a Q, ΔV , producen pequeños **incrementos** de corriente ΔI según la relación

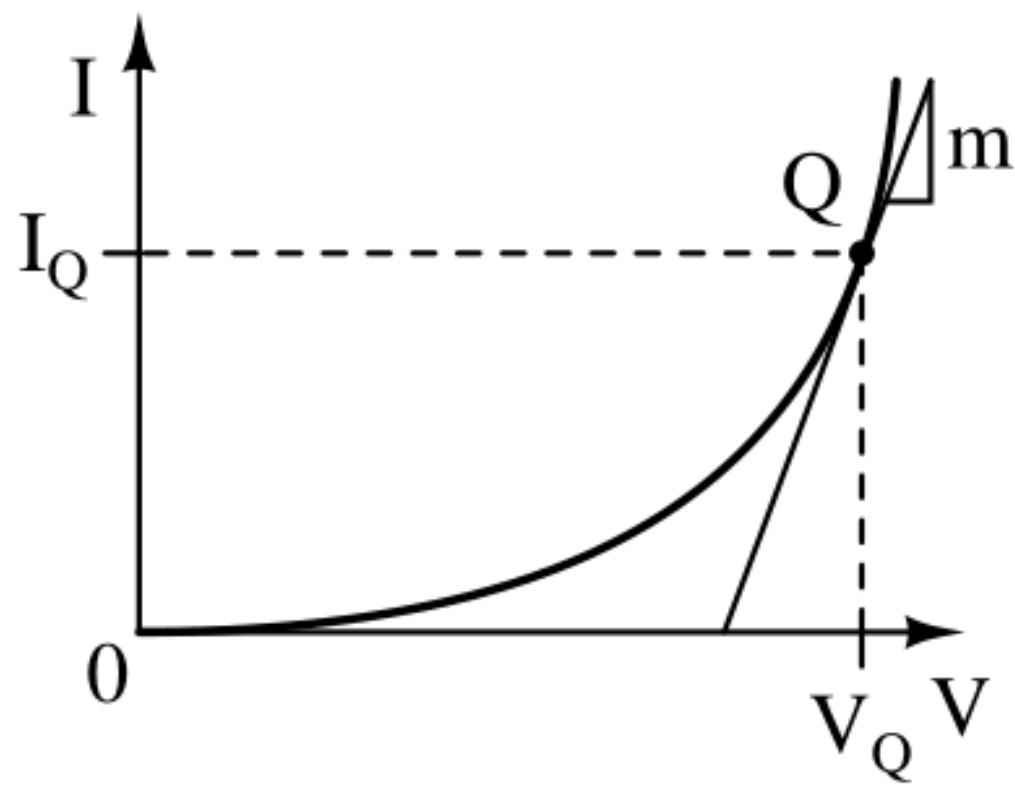
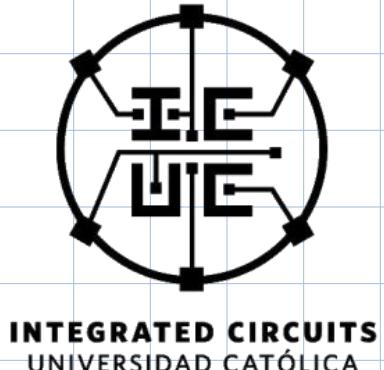
$$\Delta I = m \cdot \Delta V$$

- Los cambios en torno a Q pueden ser de cualquier signo (ac) y corresponden a las señales
 - Aun cuando los valores absolutos de V_Q e I_Q tienen un solo signo (DC)



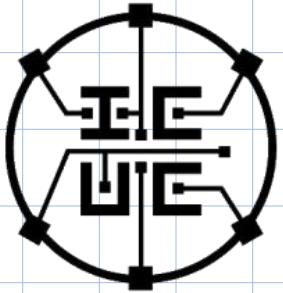
Resistencia absoluta vs. resistencia incremental

- La resistencia **absoluta** relaciona cuánta corriente circula por un elemento cuando se ve sometido a un voltaje determinado
- La resistencia **incremental** relaciona cuánta **diferencia de corriente** circula por un elemento cuando se ve sometido a una **diferencia de voltaje** determinado
 - La resistencia incremental es medida en un **punto de operación Q** y depende de él
- La resistencia incremental es el **inverso de la derivada de la curva I/V** que caracteriza al elemento circuitual
- La resistencia incremental es útil para **analizar circuitos en torno a un punto de operación Q**





1.14



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Curva (recta) de carga

Dependencias:

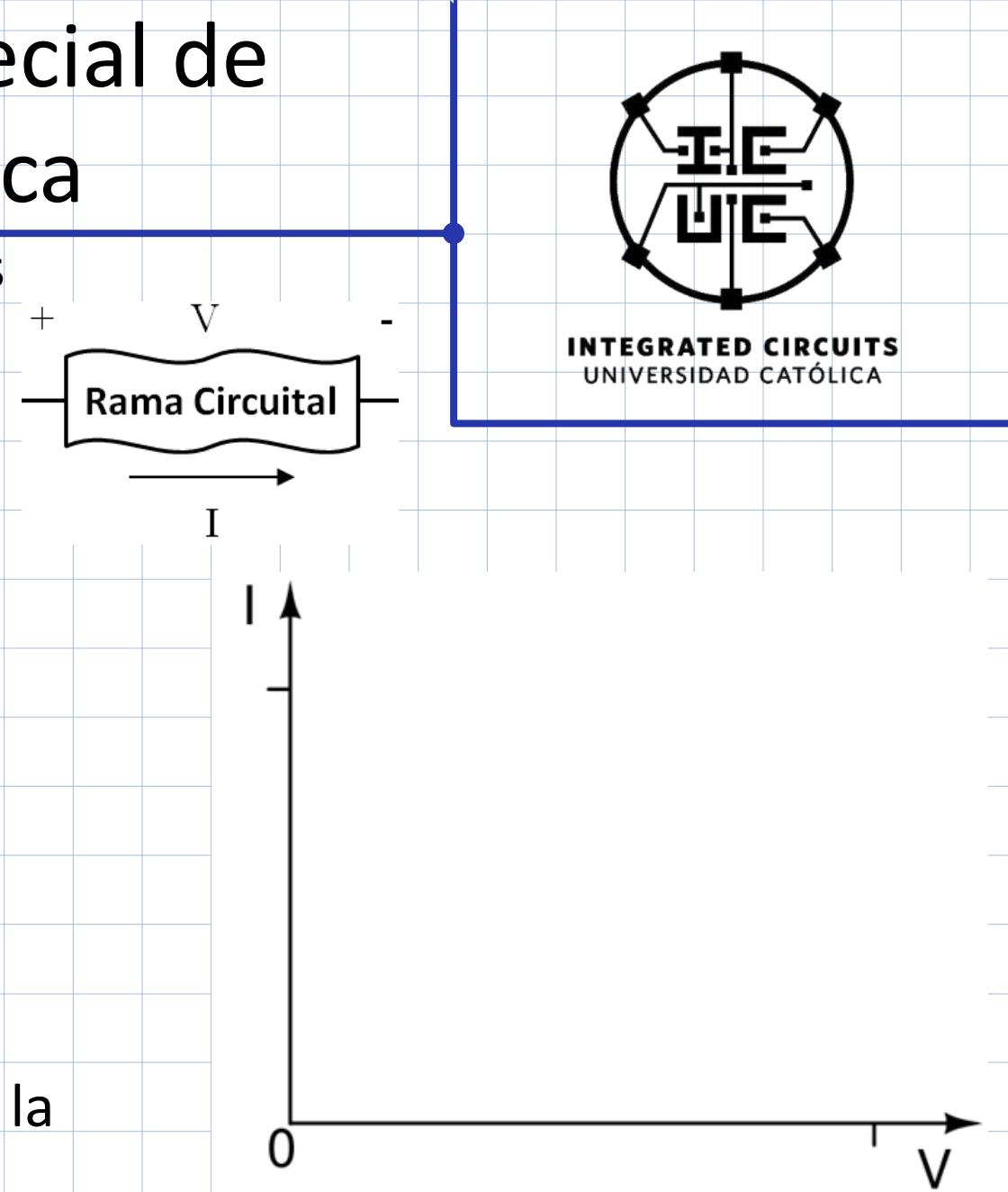
- 1.12 Curvas de transferencia estática
- 1.13 Resistencia de elementos pasivos no lineales

angel@uc.cl

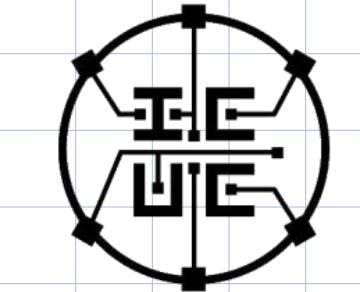
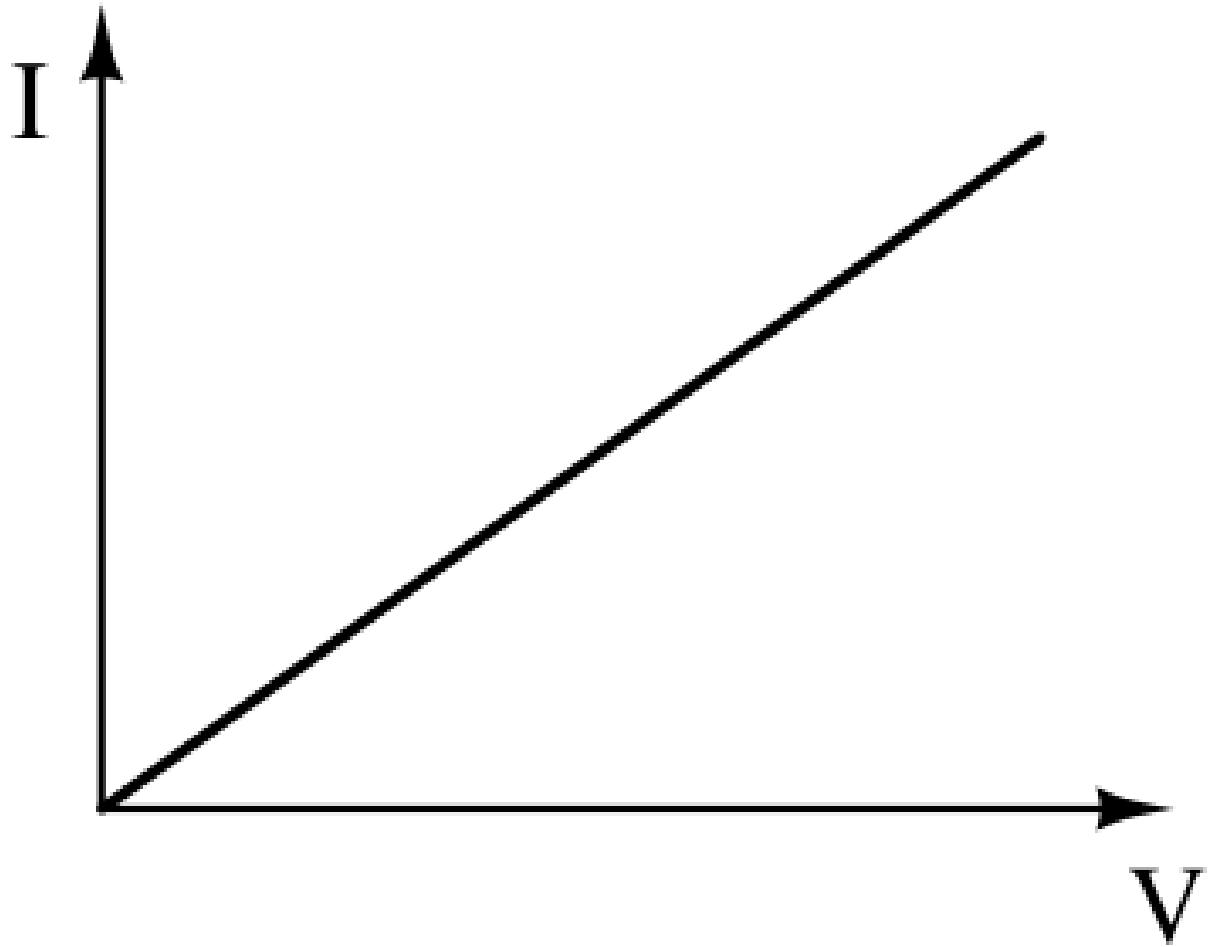
Electrónica en cápsulas

Curva de carga: un caso especial de curva de transferencia estática

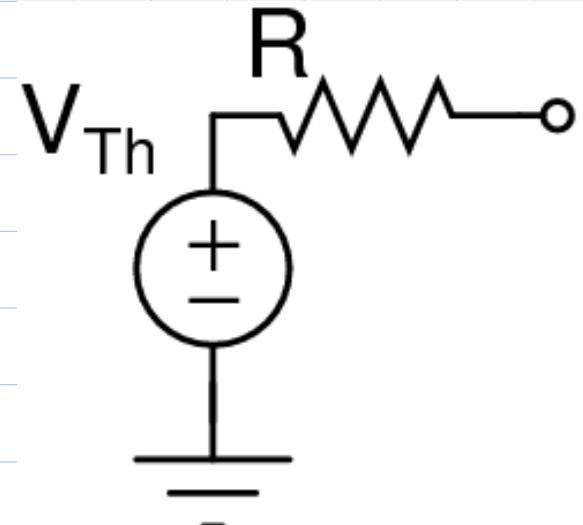
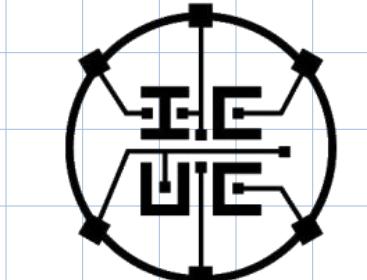
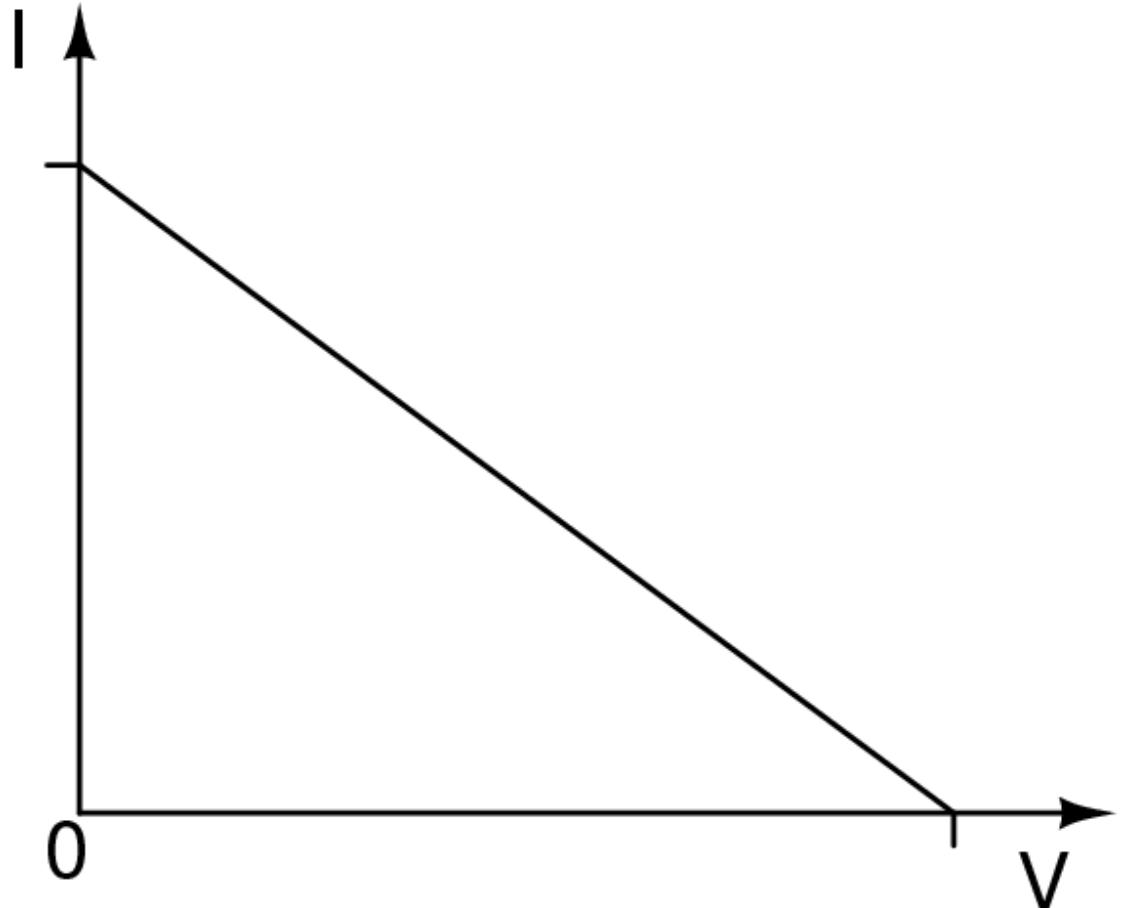
- Concepto tremadamente útil en análisis de circuitos no lineales
- **Definición:** Es el lugar geométrico de todas las combinaciones posibles de **voltaje y corriente** de una rama (2 terminales) de un circuito
- Voltaje en eje X, corriente en eje Y – muestra gráficamente impedancias incrementales
- Permite representar en un mismo gráfico elementos que consumen potencia (corriente entra) y que entregan potencia (corriente sale)
- Intersección entre curvas de carga marca la solución del circuito



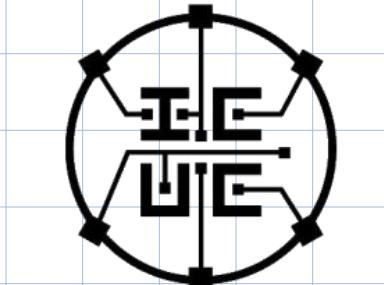
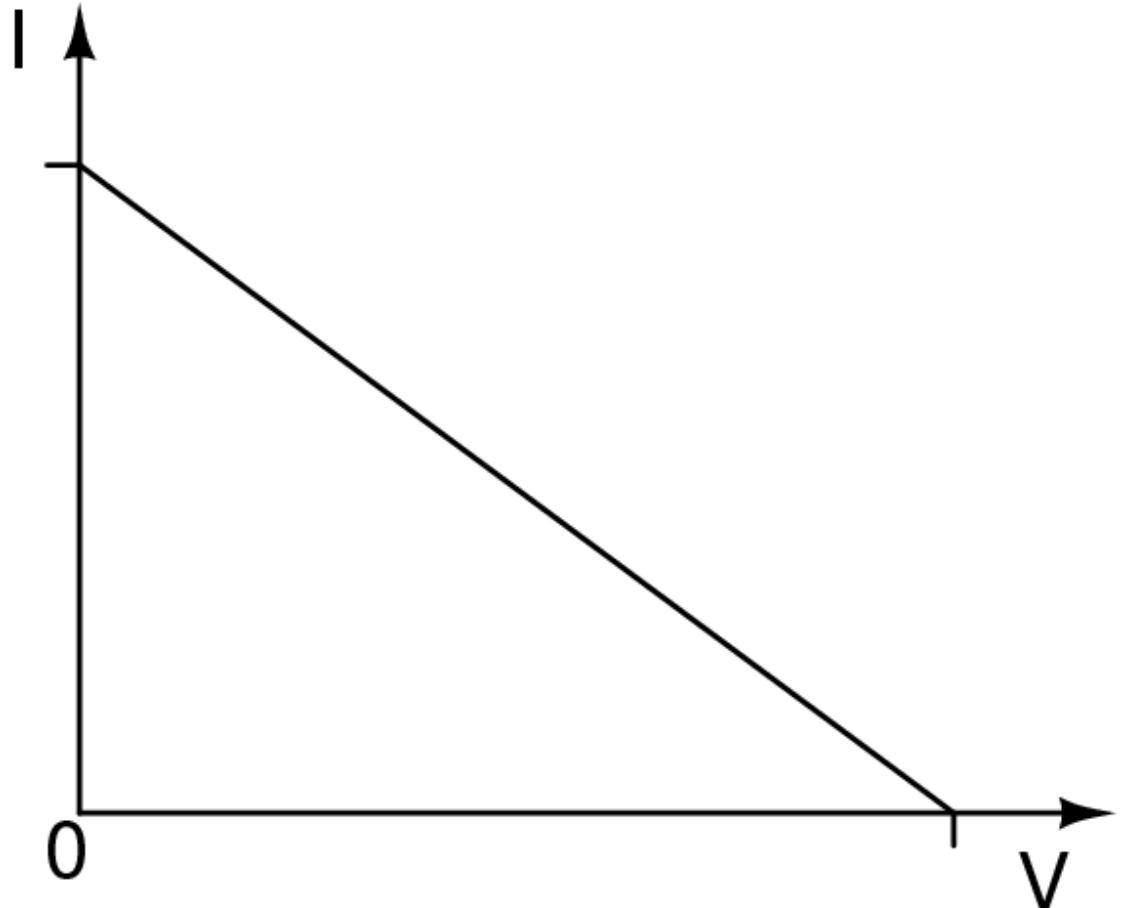
Ejemplo conocido (1.13): resistor (elemento que consume potencia)



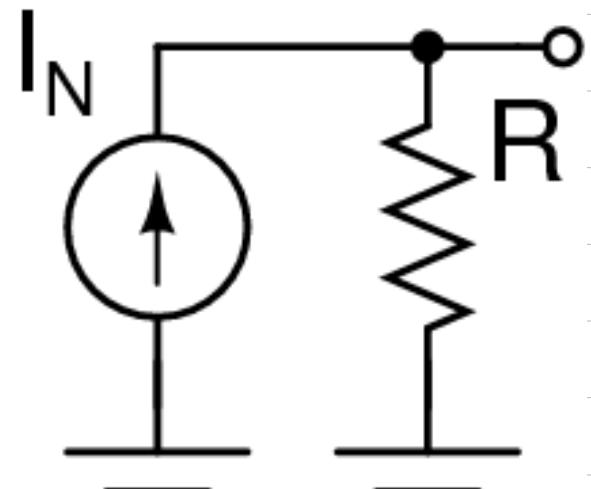
Veamos un elemento que entrega potencia:
equivalente de Thévenin



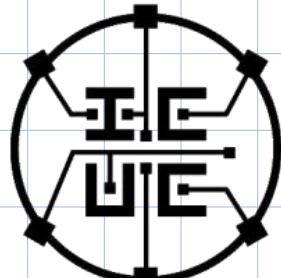
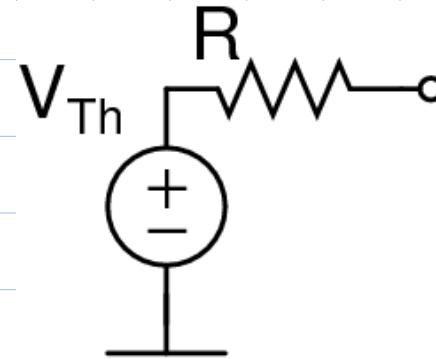
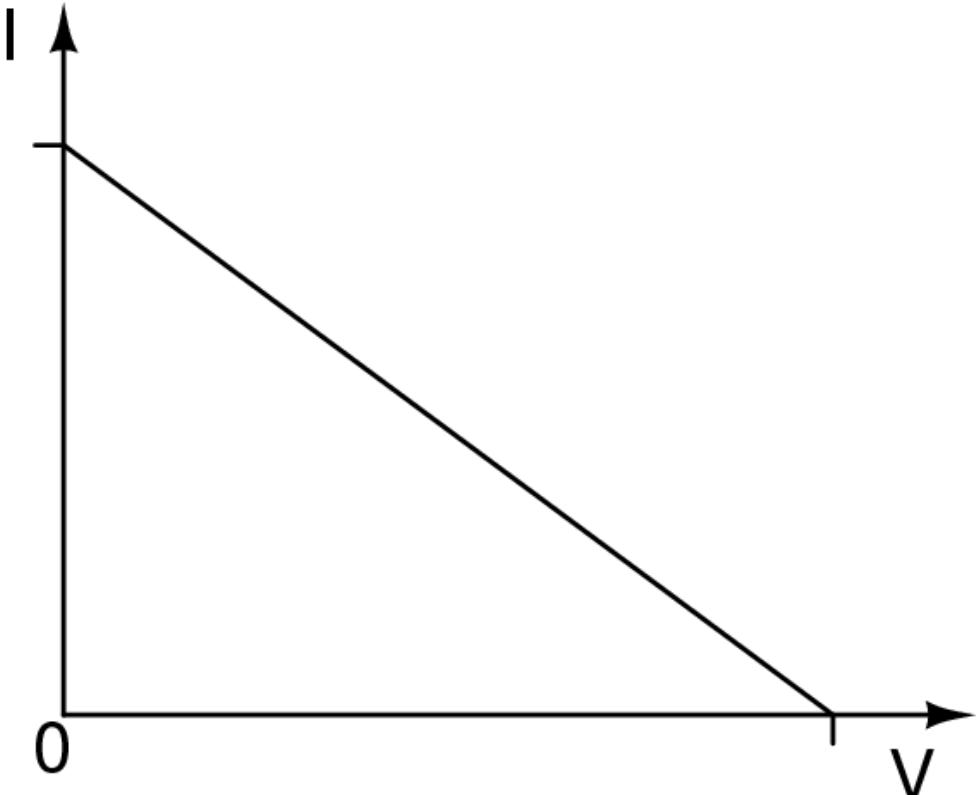
Veamos otro elemento que entrega potencia:
equivalente de Norton



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



¿Qué es eso de apagar las fuentes independientes para calcular impedancias equivalentes?



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Apagar las fuentes independientes no significa apagar la alimentación del circuito, sino más bien desplazar las curvas de carga para que pasen por el origen, manteniendo las pendientes

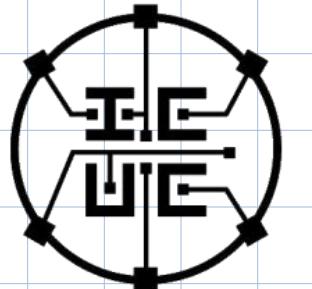
¿Alguna vez tengo que apagar fuentes dependientes?

- Respondamos con otra pregunta:

¿Alguna vez tenemos que forzar $R = 0$ en un circuito?

- Una resistencia es un caso especial de fuente dependiente

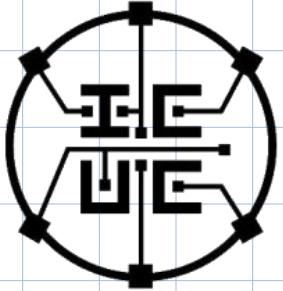
- Si apago una fuente dependiente (o si cambio el valor de una resistencia), cambio la pendiente de la curva de carga
- Por lo tanto, en general **no debo apagar fuentes dependientes**



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



1.15



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Impedancia de nodo

Dependencias:

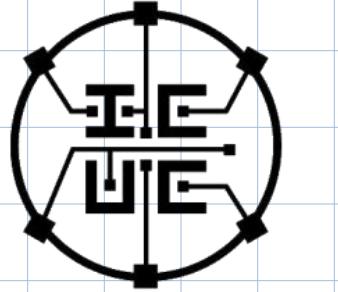
- 1.05 Acoplamiento entre bloques
- 1.13 Resistencia de elementos pasivos no lineales
- 1.14 Curva (recta) de carga

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

Concepto de impedancia de nodo en electrónica analógica

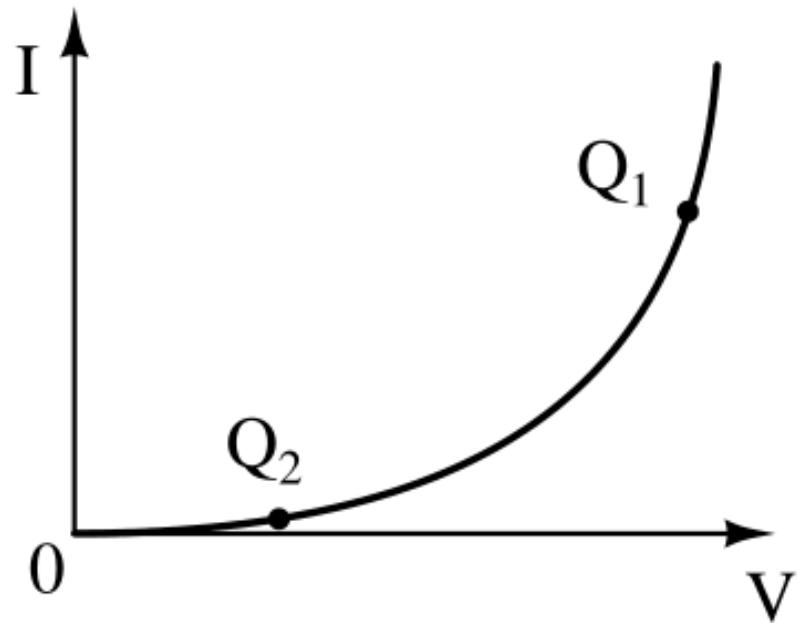
- La impedancia de un nodo es la **resistencia incremental equivalente** que ofrece el nodo
 - Es la resistencia equivalente entre el nodo y **tierra de señal**
 - Es decir, es una impedancia shunt
 - Como nos interesa la **resistencia incremental** (cambios), la **impedancia de nodo es calculada en AC** (apagando DC)
- En general la **tierra de señal** corresponde a cualquier voltaje constante de el circuito
 - La razón es que cualquier voltaje constante se convierte en tierra (0V) al apagar las fuentes DC
- La tierra de señal **coincide con la tierra del circuito** en el caso de acoplamiento DC (1.05)
- Es muy relevante cuando tenemos que calcular la atenuación por efecto de la carga (1.05)



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

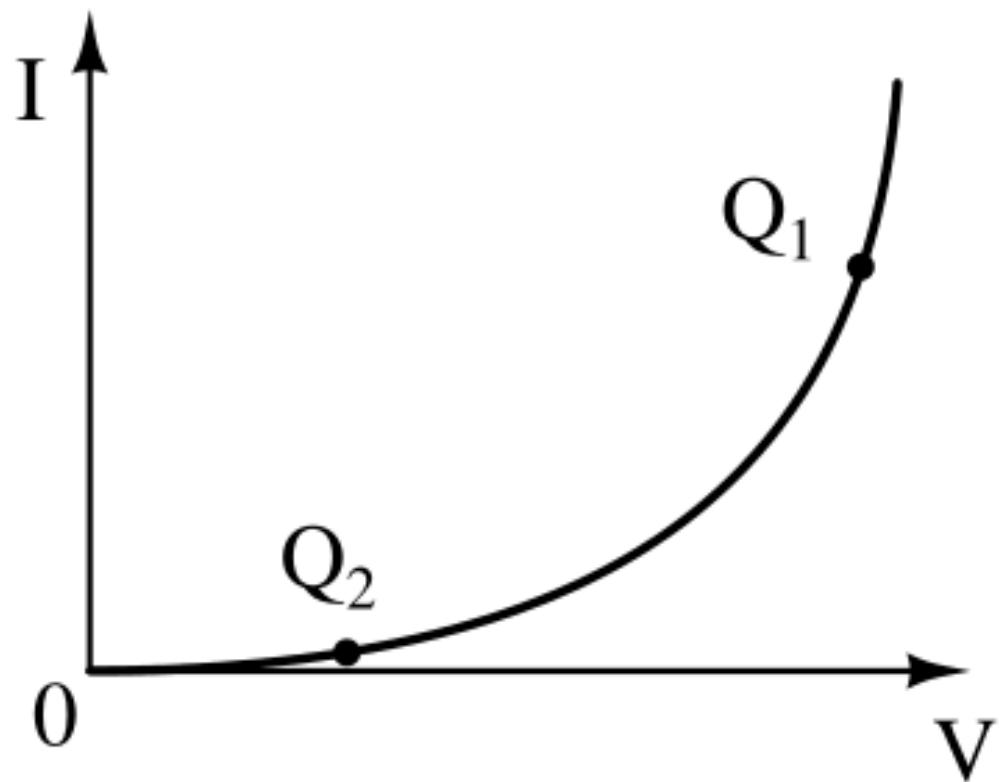
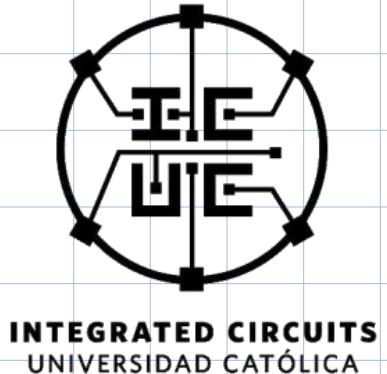
La impedancia incremental de nodo puede ser baja (Q_1)

- Ejemplos: el terminal de una batería, una línea de transmisión, una antena o un parlante
- En general puede ser modelada como un Thévenin con R pequeño
 - tiene un voltaje “porfiado”, bien definido por su fuente equivalente interna
- Representa una **carga exigente para un Thévenin, y fácil para un Norton**
- Una inyección de corriente en un nodo de baja impedancia produce variaciones muy pequeñas en su voltaje



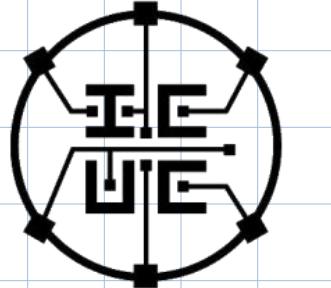
La impedancia incremental de nodo también puede ser alta (Q_2)

- Ejemplos: una fuente de corriente ideal conectada a tierra o un micrófono o un sensor capacitivo
- En general puede ser modelada como un Norton con R grande
 - Su voltaje es voluble, fácilmente cambiante
- Representa una **carga fácil para un Thévenin, y exigente para un Norton**
- Una inyección de pequeña corriente en un nodo de alta impedancia produce grandes variaciones de voltaje
 - Esta característica es clave al diseñar amplificadores de voltaje de alta ganancia



Cálculo de impedancia incremental de un nodo – receta

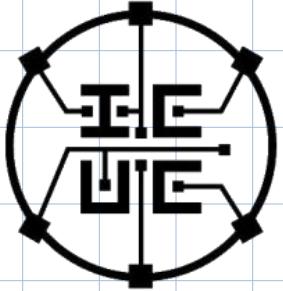
- Apagar fuentes DC independientes
 - Recordar que la impedancia de nodo está definida en AC
 - No debo apagar fuentes dependientes, ya que **las fuentes dependientes incorporan información acerca de las impedancias equivalentes**
 - Al apagar fuentes DC independientes, **movemos el origen** al punto de operación Q
- Aplicar en el nodo una fuente de prueba de valor pequeño
 - Puede ser de voltaje o de corriente
- Determinar la relación entre incrementos de voltaje e incrementos de corriente en el nodo



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



1.16



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Rieles de alimentación

Dependencias:

- 1.03 Jerarquía en electrónica

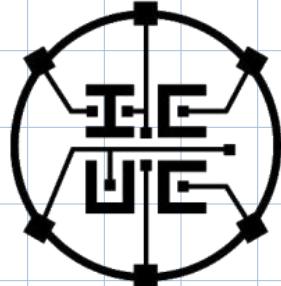
angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

¿Rieles? ¿Como los del tren?

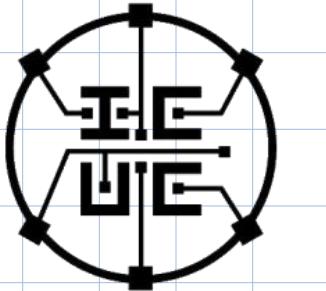
- Los rieles de alimentación de un circuito son el **conjunto de voltajes DC** empleados en la alimentación del circuito
- Los rieles son nodos de baja impedancia e idealmente no llevan componente AC
- La tierra de un circuito es un caso especial de un riel de alimentación

Rieles de alimentación



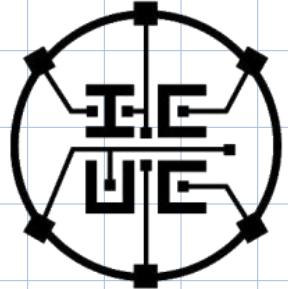
¿Cómo implementar los rieles de un circuito?

- La energía eléctrica puede provenir de:
 - Red eléctrica AC
 - Fuentes DC (baterías, generadores DC, celdas fotovoltaicas, eliminadores de pilas)
- En ambos casos suele ser necesario adoptar medidas para **asegurar la calidad de la alimentación**
 - En el caso de la red AC, debemos rectificar, regular y filtrar el voltaje
 - En el caso de las fuentes DC, podemos convertir, regular y filtrar el voltaje
- El diseñador de un circuito electrónico debe tener en consideración la forma en que su circuito será alimentado

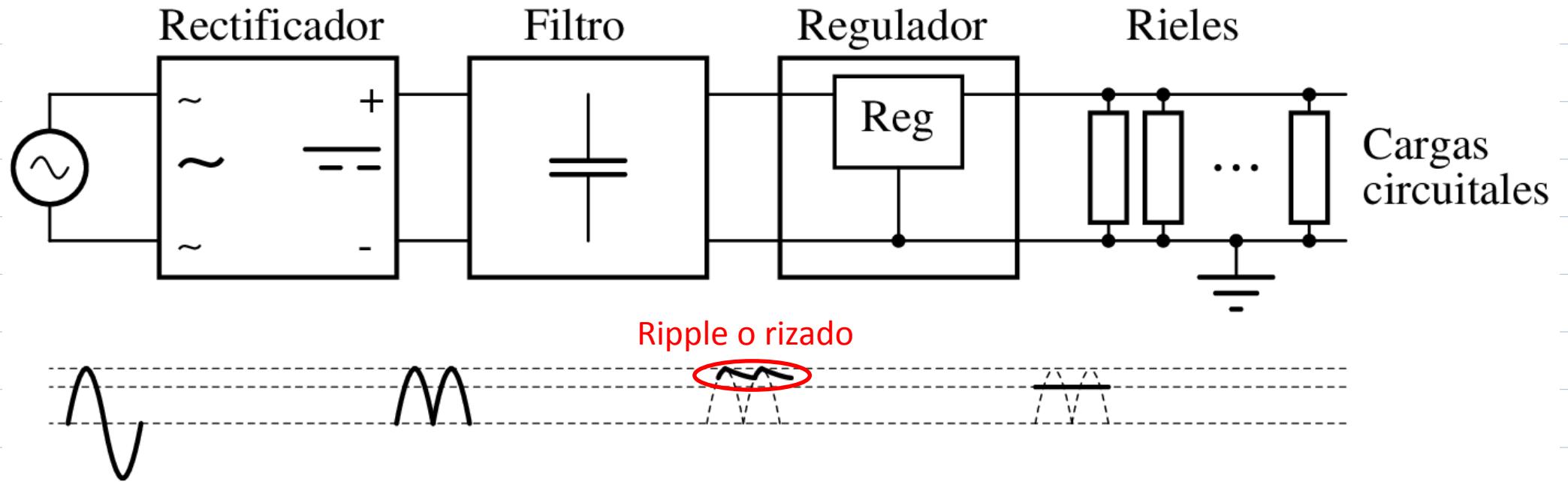


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Diagrama de bloques de una fuente regulada típica*



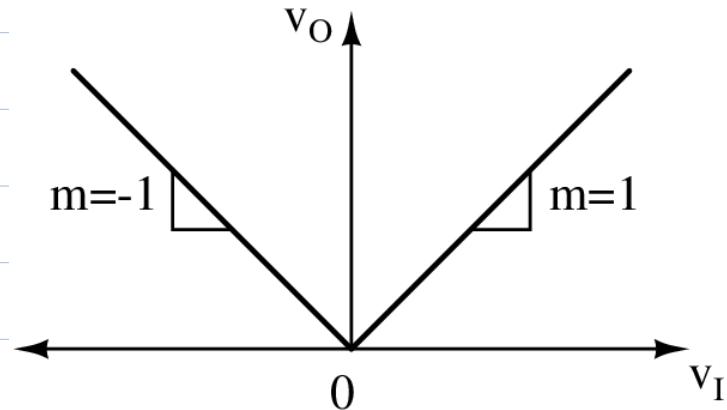
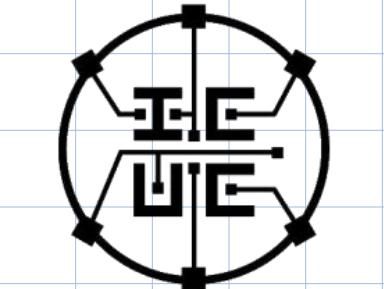
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



* No es la única forma de hacer una fuente regulada

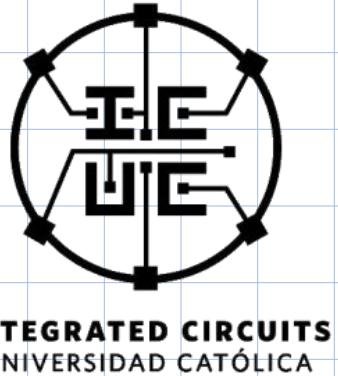
Rectificación: conversión AC-DC

- Consiste en obtener una forma de onda con componente DC, a partir de una entrada puramente AC
- Dos tipos: de media onda o de onda completa
- Media onda: sólo deja pasar los semiciclos positivos
- Onda completa: obtiene el valor absoluto de la forma de onda de entrada
 - Se utiliza un “puente rectificador”
 - Más adelante (cap. 3) aprenderemos su funcionamiento
- **¿La rectificación es una operación lineal o no lineal?**



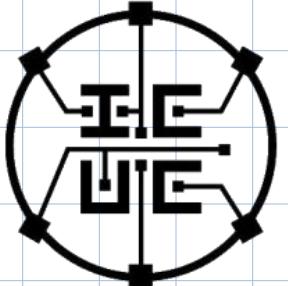
Regulador lineal

- Toma un voltaje con fluctuaciones y entrega un voltaje **regulado**
 - Voltaje fijo en LM78XX, LM79XX y otros; variable en LM317
- Corriente máxima típica de ~1 A
- El voltaje de entrada debe ser mayor en valor absoluto que el de salida
 - Ej: al menos 2.5 V dropout para el caso de serie LM78XX
<https://goo.gl/25rG7h>
 - 1 V dropout en LDOs <https://goo.gl/azrUFG>
- La corriente de entrada y de salida son similares
 - La potencia disipada por el regulador es el producto entre la caída de voltaje en el regulador y su corriente
- Muy bajo ripple en la salida

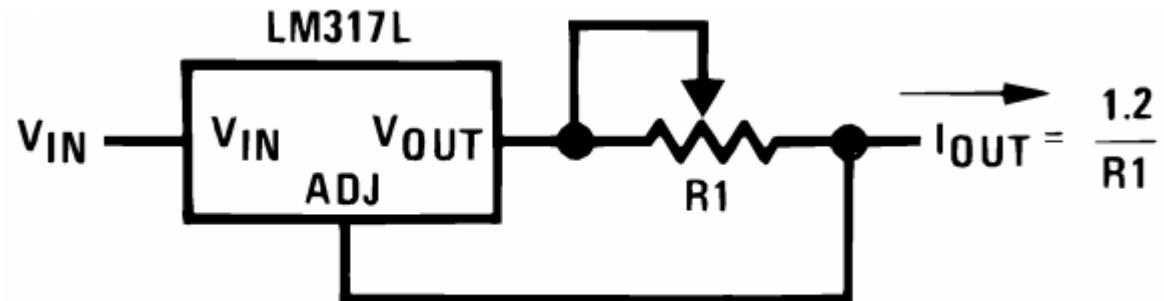


Limitación de corriente mediante regulador lineal

Un regulador lineal también puede servir como limitador de corriente



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

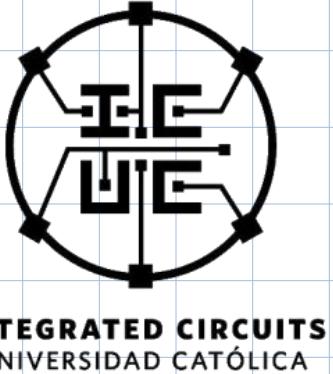


<https://goo.gl/NHcnp9>

$$12 \leq R_1 \leq 240$$

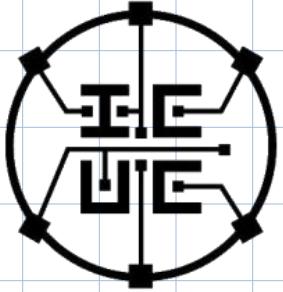
Regulador conmutado

- Aplicación de electrónica de potencia
 - Utilizan switches de estado sólido controlados electrónicamente
- Funcionan mediante la commutación de inductores y capacitores, internos o externos
- Pueden entregar voltajes mayores, iguales o menores que el voltaje de entrada
 - ¿Cómo es la corriente promedio de entrada en relación a la corriente promedio de salida?
- Tienen más ripple que los lineales
- Ejemplos: <https://goo.gl/CezuQz>





1.17



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Respuesta en frecuencia: polos y ceros

Dependencias:

- 1.07 Funciones de transferencia
- 1.08 Polos y constantes de tiempo

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

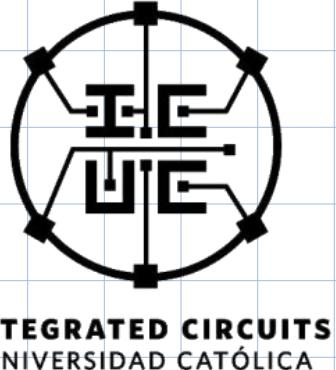
Intro

La respuesta en frecuencia de un sistema describe la forma en que el sistema responde ante estímulos de diferentes frecuencias.

Puede ser **representada de forma gráfica**. Esto es muy usado en el análisis de amplificadores, filtros y estabilidad de circuitos realimentados.

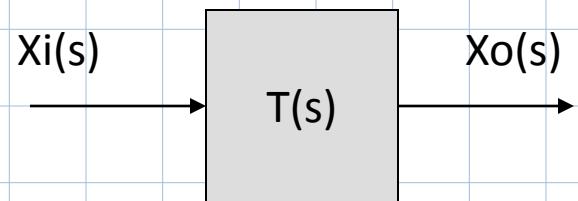
Existen **diversas representaciones gráficas** de la respuesta en frecuencia: diagrama de **Bode** (fasor en función de la frecuencia), de Nichols, de Nyquist.

En general, la respuesta en frecuencia asume que el **circuito es lineal** y que se mantiene en **estado estacionario**. SPICE realiza análisis en frecuencia mediante el comando **.ac** y produce diagramas de Bode.



Recordemos: función de transferencia

Representación matemática, en dominio de Laplace, de la relación entre entrada y salida de un sistema LTI



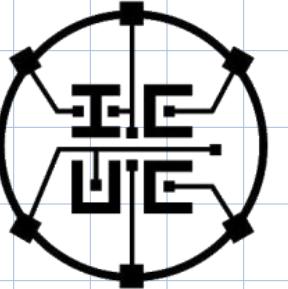
$$T(s) = \frac{X_o(s)}{X_i(s)}$$

$$T(s)|_{s=j\omega} = T(j\omega) = R(\omega) + jX(\omega) = |T(j\omega)|\angle\phi(\omega)$$

$$|T(j\omega)| = \sqrt{R^2(\omega) + X^2(\omega)}$$

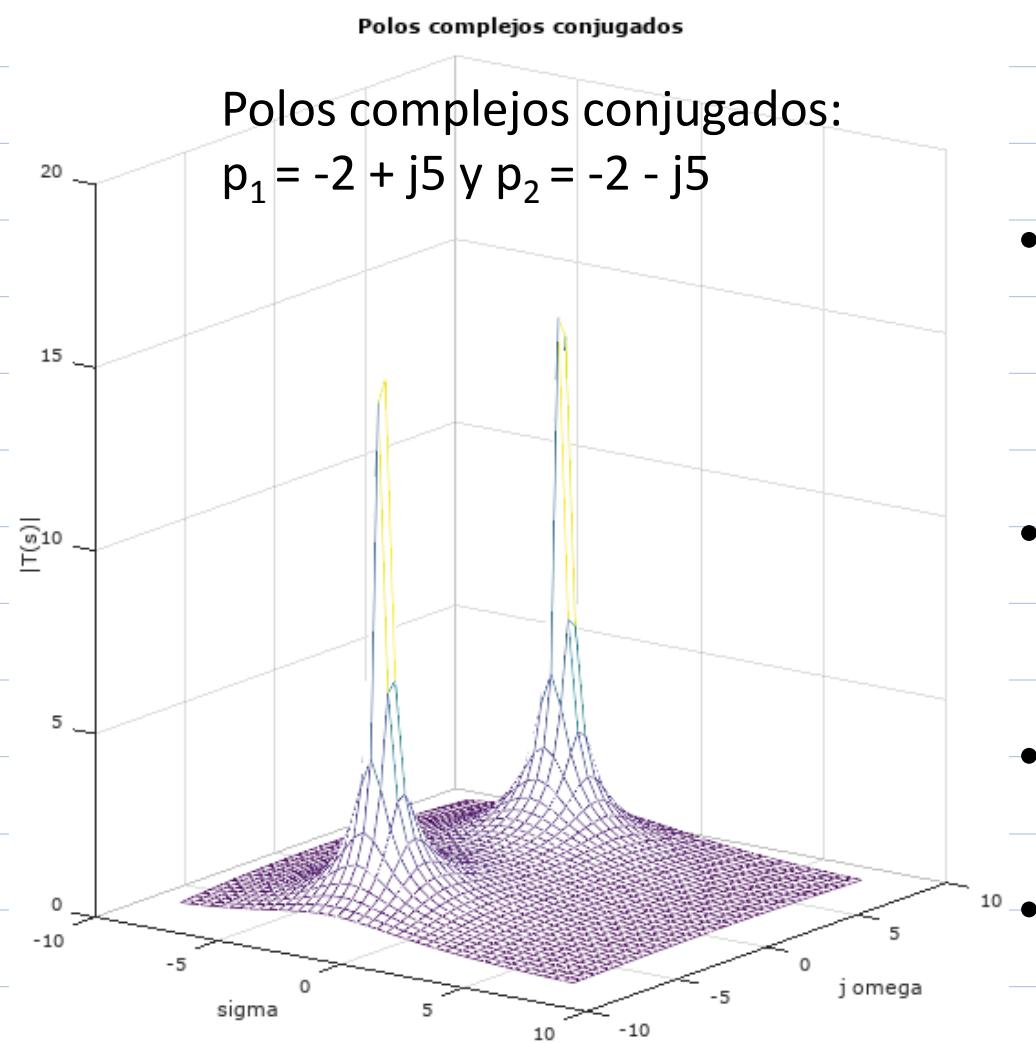
$$\phi(\omega) = \arctan \frac{X(\omega)}{R(\omega)}$$

Sabemos que $s = \sigma + j\omega$.
¿Qué significa evaluar $s = j\omega$?



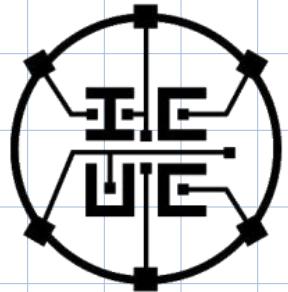
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Recordemos: polos de un sistema

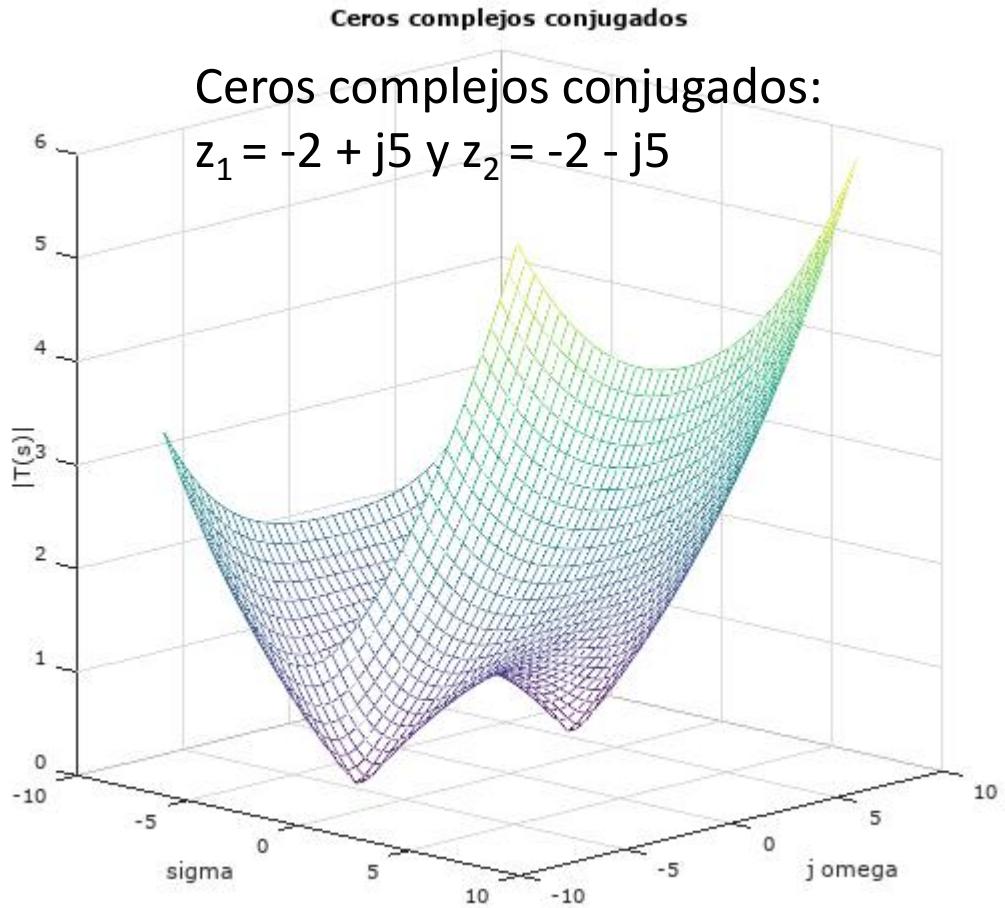


$$T(s) = \frac{1}{\left(1 - \frac{s}{p_1}\right)\left(1 - \frac{s}{p_2}\right)}$$

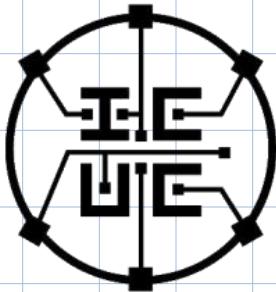
- **Polo de un sistema:** Frecuencia **compleja** para la cual la respuesta del sistema para variable compleja s tiende a infinito
 - ya que los polos son raíces del denominador de $T(s)$
- **Consecuencia de un polo en la respuesta en frecuencia:** la pendiente de la magnitud cambia en la vecindad de los polos
- **Número de polos** de un circuito va asociado al **número de condiciones iniciales independientes**
- **Todas las funciones de transferencia de un circuito comparten los mismos polos;** no así los mismos ceros



Recordemos: ceros de un sistema



$$T(s) = (1 - z_1)(1 - z_2)$$



Cero de un sistema: Frecuencia **compleja** para la cual la respuesta del sistema para variable compleja s tiende a cero

– Los ceros son raíces del numerador de $T(s)$

Consecuencia de un cero en la respuesta en frecuencia: la pendiente de la magnitud cambia en la vecindad de los ceros

FT: producto de contribuciones

- La FT es el producto de las contribuciones de los polos y los ceros de un circuito

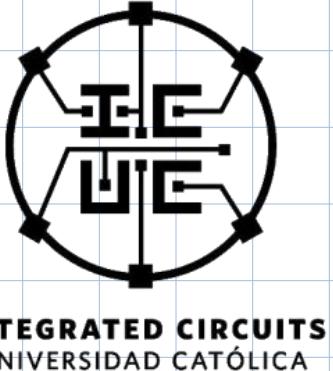
- Un cero en z_i aporta el siguiente factor a la FT: $\left(1 - \frac{s}{z_i}\right)$

- Un polo en p_i aporta el siguiente factor a la FT:

$$\frac{1}{\left(1 - \frac{s}{p_i}\right)}$$

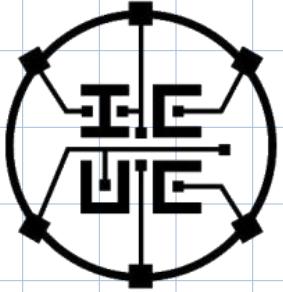
- Existen ceros reales, polos reales, ceros complejos conjugados y polos complejos conjugados, o combinaciones de los casos anteriores

- Polos con parte real positiva producen **inestabilidad**
 - Polos con parte real negativa producen **decaimiento**
 - La frecuencia del polo o cero es su distancia euclíadiana al origen
- Adicionalmente en la FT puede haber ganancia escalar K y desfase $e^{j\phi}$





1.18



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Diagramas de Bode: introducción

Dependencias:

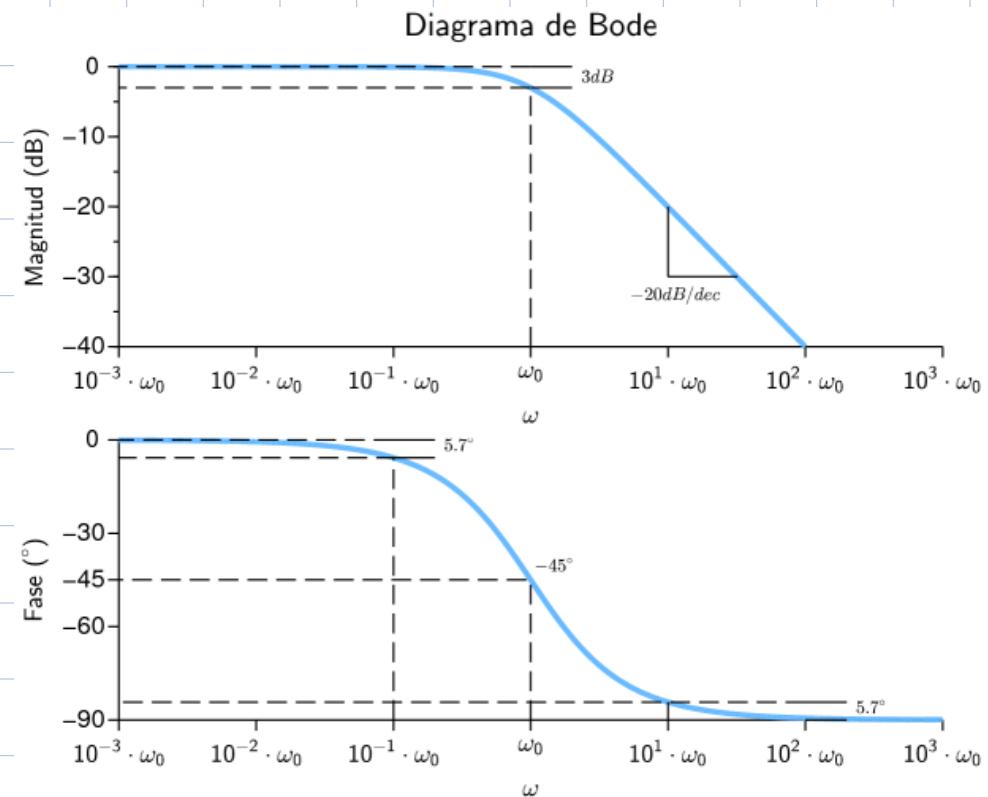
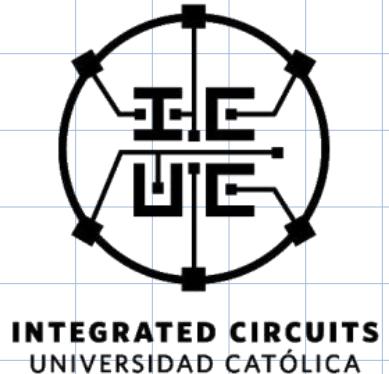
- 1.17 Respuesta en frecuencia: polos y ceros

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

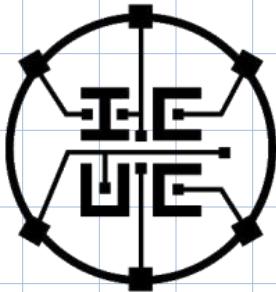
Diagrama de Bode

- El Diagrama de Bode (Bode plot) es un gráfico de la función de transferencia de un sistema, que representa magnitud y fase (como un fasor) en función de la frecuencia
 - Magnitud expresada en dB (recordar 1.10: Cifras de desempeño de amplificadores)
 - Fase expresada en grados sexagesimales (base 60)
 - Frecuencia va en escala logarítmica
- En efecto, es un gráfico en escala log-log
 - **¿Qué sabemos de los gráficos log log?**



Gráficos en escala log-log

- Útil para desplegar información con gran rango dinámico
 - donde se representan muchos órdenes de magnitud y todos son importantes
- El producto de dos cantidades se convierte en la suma de sus respectivos logaritmos
- La suma de dos cantidades logarítmicas da como resultado la mayor de las cantidades
- Las funciones exponenciales tipo $y=x^n$ aparecen como líneas rectas, con la pendiente dada por el exponente



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Receta diagrama de Bode: confección en base a asíntotas

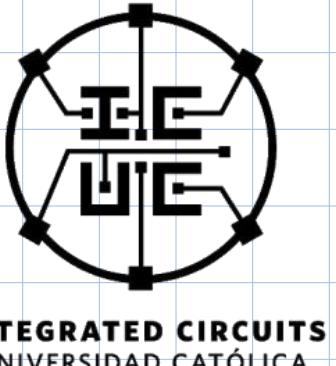
1. Factorizar función de transferencia $G(s)$

$$T(s) = K \frac{s^v \left(1 - \frac{s}{z_1}\right) \left(1 - \frac{s}{z_2}\right) \cdots \left(1 - \frac{s}{z_M}\right)}{s^w \left(1 - \frac{s}{p_1}\right) \left(1 - \frac{s}{p_2}\right) \cdots \left(1 - \frac{s}{p_N}\right)}$$

2. Agrupar factores en cuatro tipos y obtener **contribuciones individuales** de cada uno al diagrama de Bode:

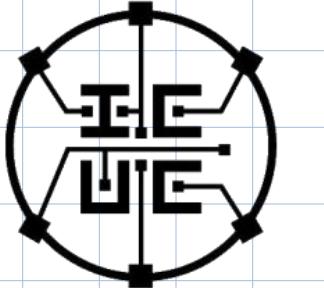
- Ganancia estática
- Polos o ceros en el origen
- Polos o ceros reales
- Polos o ceros complejos conjugados

3. Sumar las contribuciones individuales
 - Convenientemente, productos se convierten en sumas... **¿por qué?**



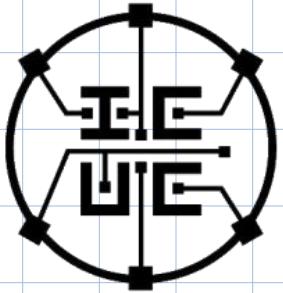
¿Por qué son útiles los diagramas de Bode?

- Recordemos que cualquier señal puede ser descompuesta en una suma ponderada de señales de diferentes frecuencias
- El diagrama de Bode permite calcular fácilmente la forma en que un circuito afecta cada una de las frecuencias que componen una señal
- Por ejemplo, si el diagrama de Bode resulta en una respuesta pasabajos, sabemos que la señal verá atenuadas sus frecuencias más altas





1.19



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Diagramas de Bode: Orden 0

Dependencias:

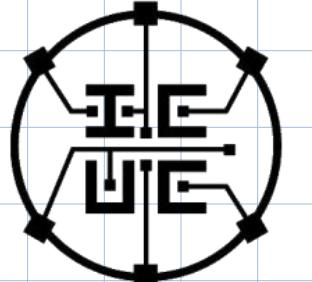
- 1.18 Diagramas de Bode: Introducción

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

¿Por qué veremos únicamente los casos a continuación?

- Orden 0 o 1 corresponden a los casos más simples
- Orden 2 (polos complejos conjugados) es un caso un poco más complicado y que requiere más trabajo (1.20)
- Orden 3 o más corresponde a una combinación de los anteriores
 - Basta con conocer orden 0, 1 o 2 y ya conocemos todos los casos fundamentales
- Recordemos: ¿Cuáles son los casos que veremos en esta cápsula?
 - Ganancia estática (orden 0)
 - Polo o cero en el origen (orden 1)
 - Polo o cero real (orden 1)



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Ganancia estática

- La función de transferencia para una ganancia estática es:

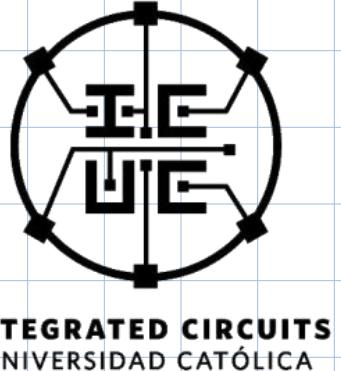
$$T(s) = K$$

- La magnitud para el diagrama de Bode es simplemente

$$\text{Mag}(T(s)) = 20 \log_{10}(|K|)$$

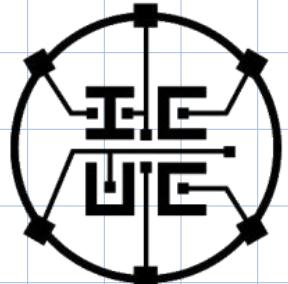
- K podría tener signo positivo o negativo; **si es negativo, agrega desfase:**

$$\angle(-|K|) = \pm 180^\circ$$

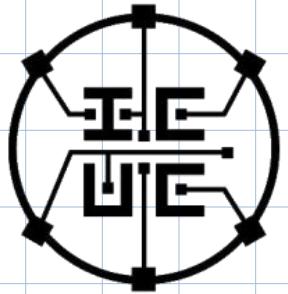


¿Cómo queda el diagrama de Bode?

Vamos a graficarlo a mano para aprender...



¿Cómo sería si tuviéramos varios amplificadores en cascada?



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

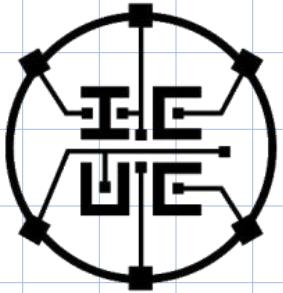


1.20

Diagramas de Bode: Orden 1

Dependencias:

- 1.18 Diagramas de Bode: Introducción



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

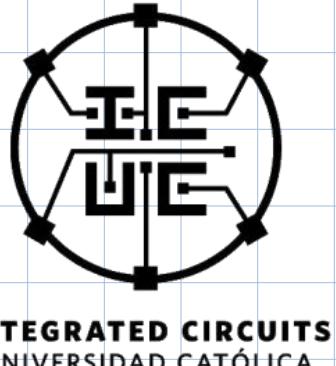
Polo en el origen – magnitud

- La función de transferencia para un polo en el origen es:

$$T(s) = \frac{1}{s}$$

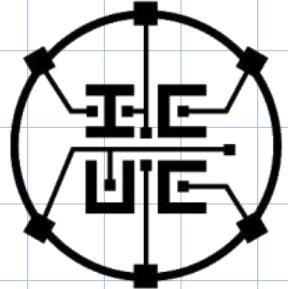
- Calculemos la magnitud:

La magnitud para el diagrama de Bode pasa exactamente por 0 dB en $\omega = 1 \text{ rad/s}$ y presenta una pendiente de -20 dB/dec

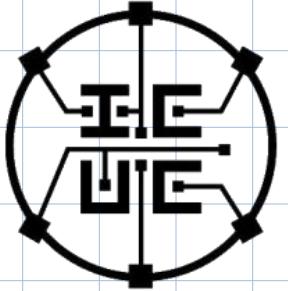


Polo en el origen – fase

- Calculemos el desfase:
- El desfase es constante y vale -90°



Polo en el origen – diagrama de Bode



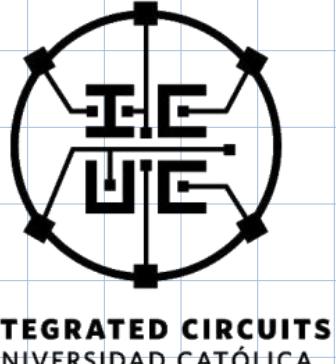
Cero en el origen – magnitud

- La función de transferencia para un cero en el origen es:

$$T(s) = s$$

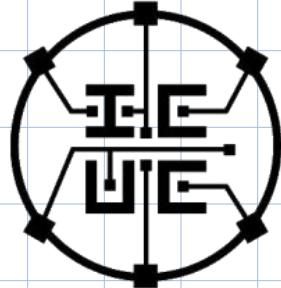
- Calculemos la magnitud:

La magnitud para el diagrama de Bode pasa exactamente por 0 dB en $\omega = 1 \text{ rad/s}$ y presenta una pendiente de +20 dB/dec

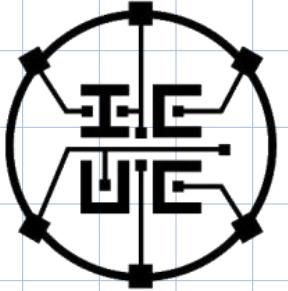


Cero en el origen – fase

- Calculemos el desfase:
- El desfase es constante y vale $+90^\circ$



Cero en el origen – diagrama de Bode



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Polo real – magnitud

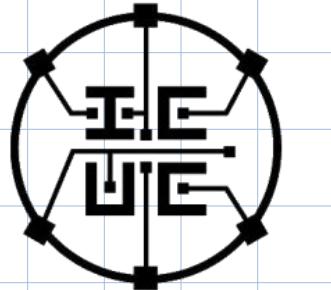
- La función de transferencia para un polo real es:

$$T(s) = \frac{1}{1 + s\tau}$$

- τ es una **constante de tiempo** dependiente del circuito
- **Recordar:** dejar expresado de modo que valga 1 cuando $s \rightarrow 0$

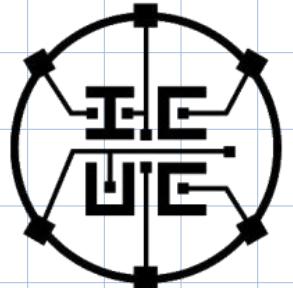
- **¿Cuál es la ubicación del polo?**
- Calculemos la magnitud del diagrama de Bode:

Esto puede ser graficado fácilmente en base a asíntotas

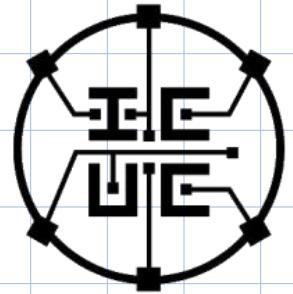


Polo real – fase

- Calculemos el desfase:
- ¿Hay asíntotas para el desfase?



Polo real – diagrama de Bode



Cero real – magnitud

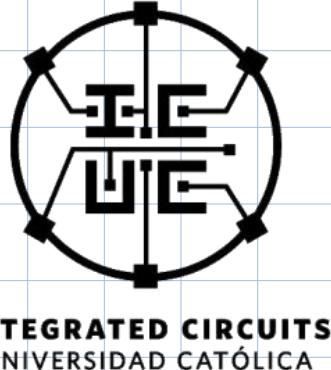
- La función de transferencia para un cero real es:

$$T(s) = 1 + s\tau$$

- τ es una **constante de tiempo** dependiente del circuito
- **Recordar:** dejar expresado de modo que valga 1 cuando $s \rightarrow 0$

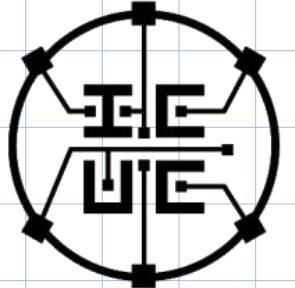
- **¿Cuál es la ubicación del cero?**
- Calculemos la magnitud del diagrama de Bode:

Esto puede ser graficado fácilmente en base a asíntotas

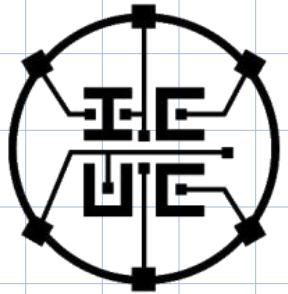


Cero real – fase

- Calculemos el desfase:
- ¿Hay asíntotas para el desfase?



Cero real – diagrama de Bode



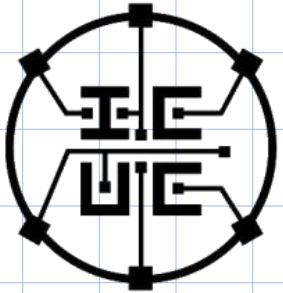


1.21

Diagramas de Bode: Orden 2

Dependencias:

- 1.18 Diagramas de Bode: Introducción



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

Polos complejos conjugados

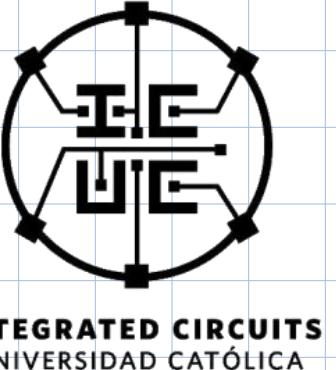
- La función de transferencia para un par de polos complejos conjugados puede ser generalizada a la siguiente forma:

$$T(j\omega) = \frac{1}{\left[1 + 2 \left(\frac{\zeta}{\omega_n} \right) + \left(\frac{j\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]}$$

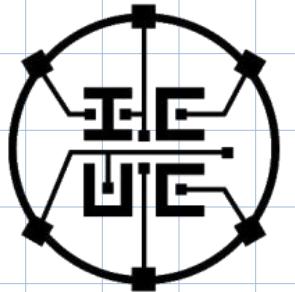
- Sea $u = \omega/\omega_n$ (variable auxiliar); entonces,

$$T(j\omega) = \frac{1}{1 + 2j\zeta u - u^2}$$

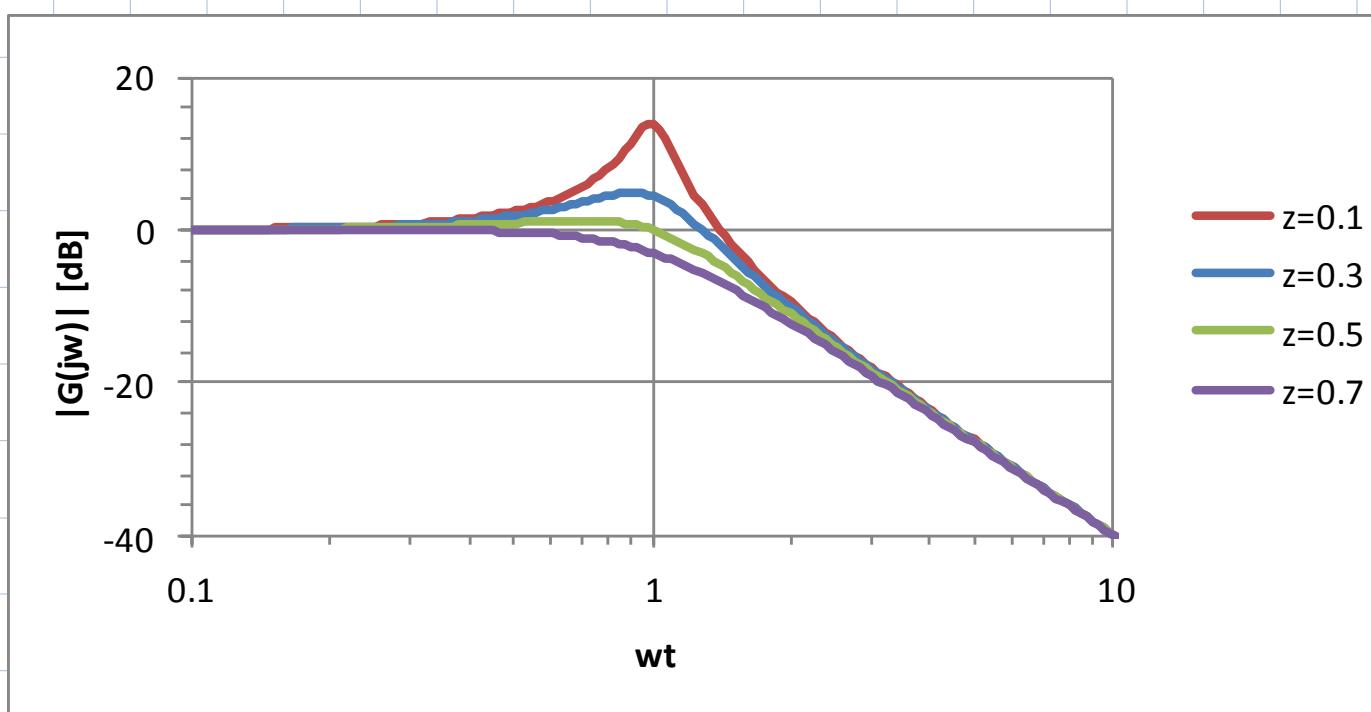
ω_n es la frecuencia a la que oscilaría si no hubiera amortiguamiento



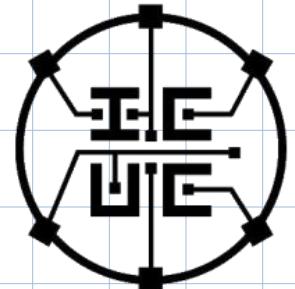
Polos complejos conjugados – magnitud



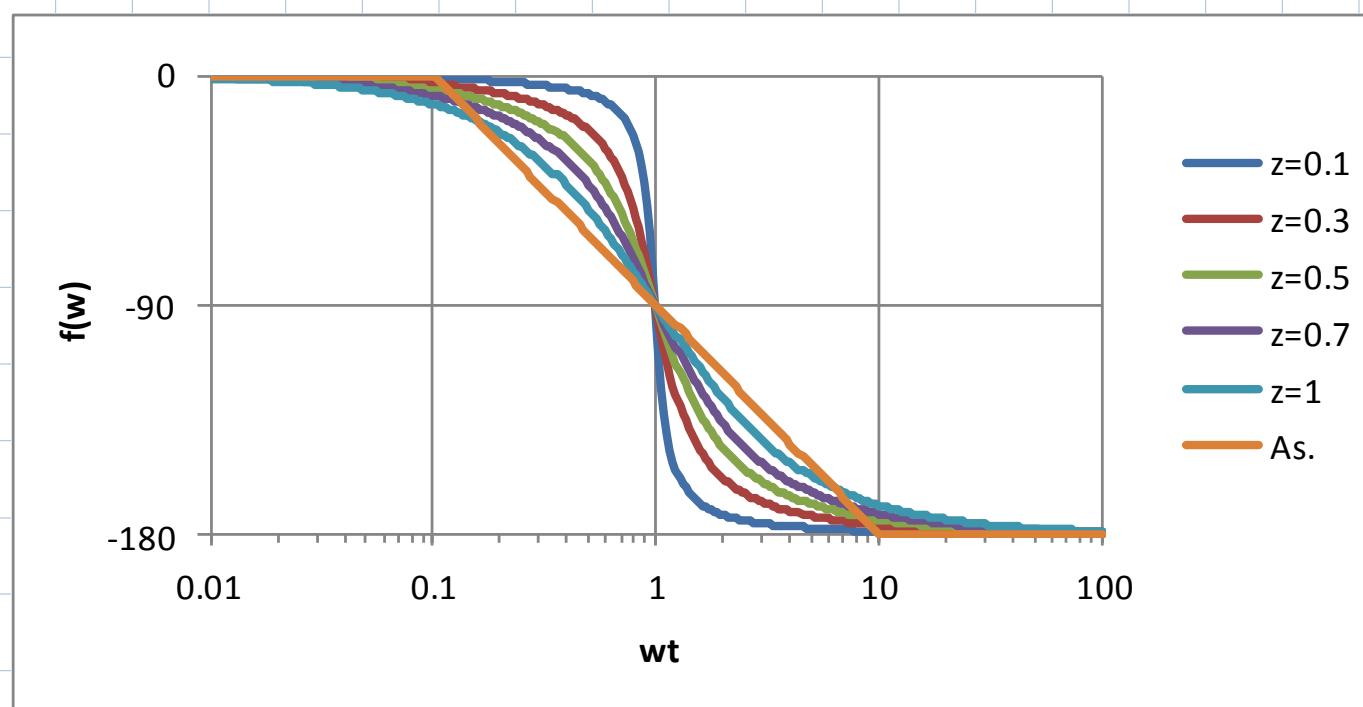
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



Polos complejos conjugados - fase



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



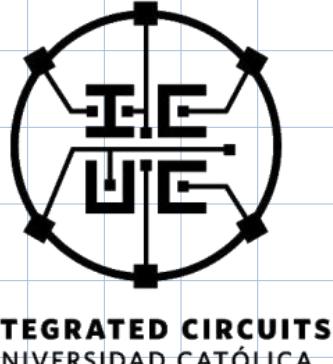
Ceros complejos conjugados

- La función de transferencia para un par de ceros complejos conjugados puede ser generalizada a la siguiente forma:

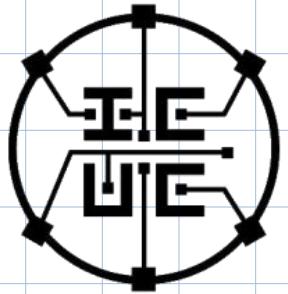
$$T(j\omega) = \left[1 + 2 \left(\frac{\zeta}{\omega_n} \right) + \left(\frac{j\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]$$

- Sea $u = \omega/\omega_n$ (variable auxiliar); entonces,

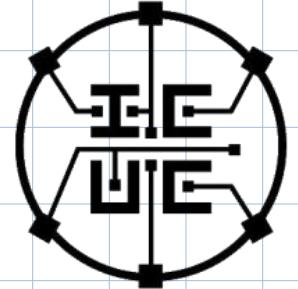
$$T(j\omega) = 1 + 2j\zeta u - u^2$$



Ceros complejos conjugados – magnitud



Ceros complejos conjugados - fase



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Factor de amortiguamiento ζ

- Cantidad adimensional que describe decaimiento de respuesta transiente de un sistema de segundo orden
- Relacionado con factor de calidad $Q=1/(2\zeta)$
- Casos de interés:
 - $\zeta = 1$: raíces reales e iguales (amortiguamiento crítico)
 - $\zeta > 1$: sistema sobreamortiguado, dos sistemas de primer orden
 - $\zeta < 1$: sistema subamortiguado, polos complejos conjugados
 - $\zeta < 0.707$: *peak* en frecuencia, frecuencia de resonancia ω_r

Frecuencia de resonancia

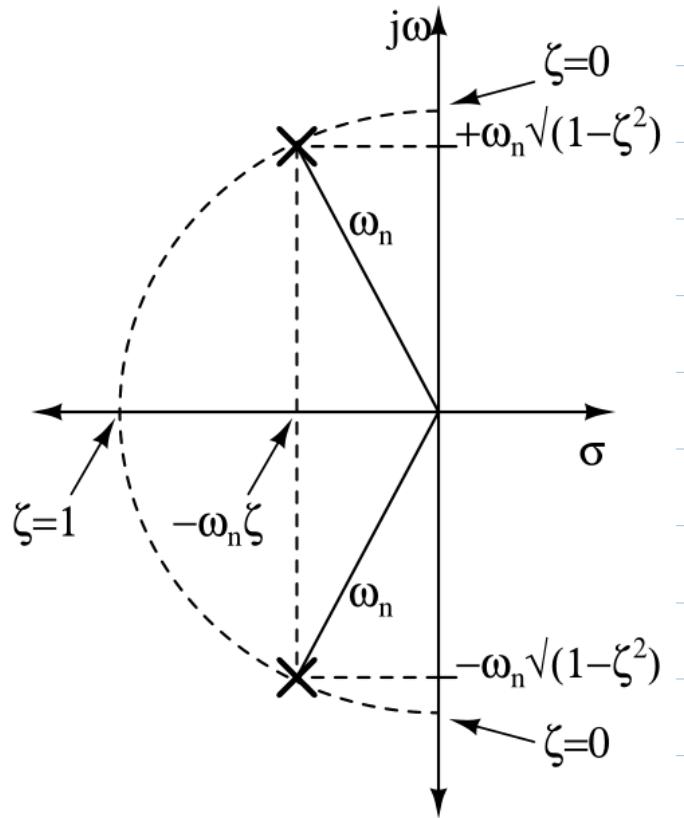
$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$$

Magnitud pico

$$\frac{1}{2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2}}$$

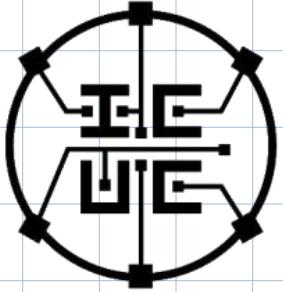
Frecuencia natural amortiguada

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$





1.22



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Sistemas de un solo polo

Dependencias:

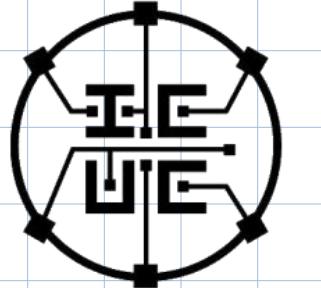
- 1.08 Polos y constantes de tiempo
- 1.20 Bode: Orden 1

angel@uc.cl

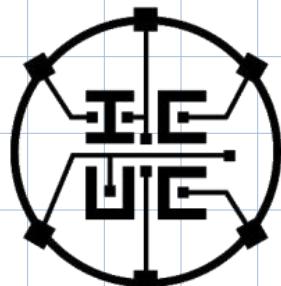
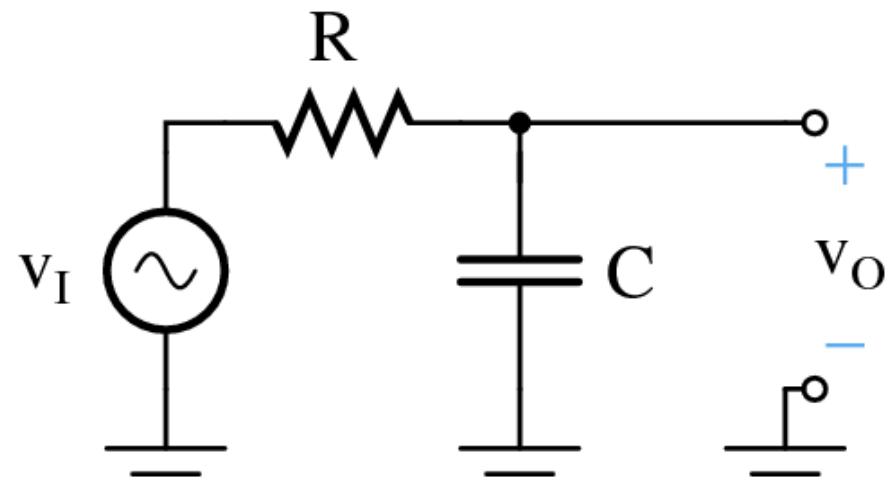
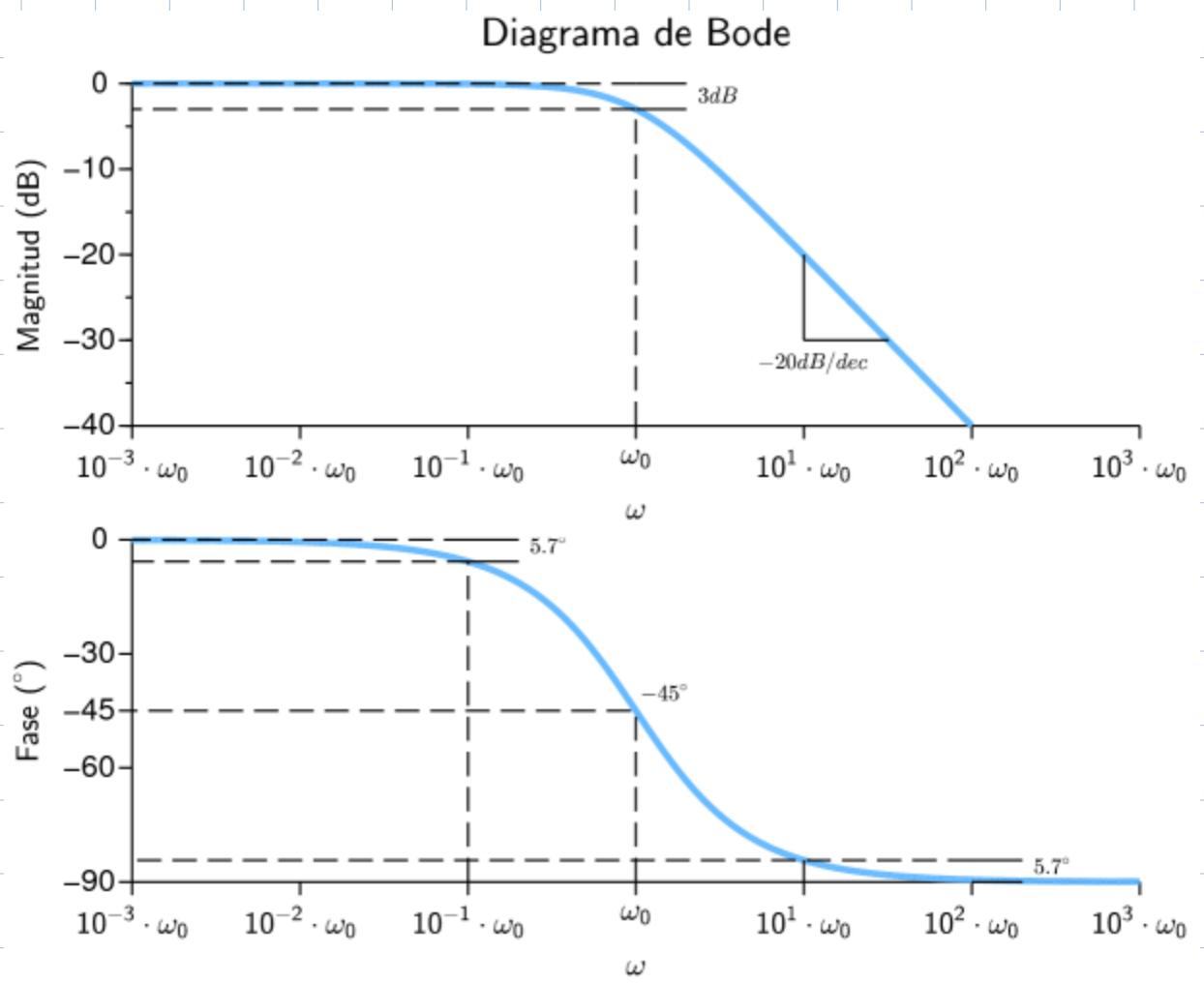
Electrónica en cápsulas

¿Por qué son importantes los sistemas de un solo polo?

- Ningún circuito práctico tiene un solo polo
 - Efectos de componentes parásitos agregan mucho polos
- Sin embargo, un amplio rango de circuitos se parecen a circuitos ideales de un solo polo
 - Los efectos parásitos muchas veces pueden ser despreciados
- Por eso volveremos a mirar estos casos especiales en que hay un polo dominante
 - Recordar 1.08
- Como hablamos de un solo polo, también podemos referirnos al recíproco – una constante de tiempo dominante τ

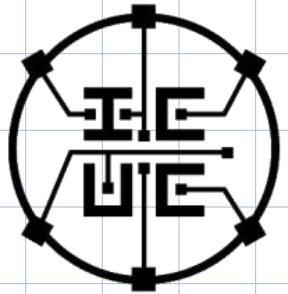


Ejemplo: filtro pasabajos para voltajes



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

¿Cómo sería un filtro pasabajas para corrientes?



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Ejemplo: filtro pasaaltos para voltajes

