



ELECTROTECNIA Y ELECTRÓNICA

(Mecánica - Electromecánica - Computación)

TRABAJO DE APLICACIÓN Nº 10b

Preparado por: Ing. Pablo Morcelle del Valle, Ing. Augusto Cassino, Ing. Guillermo Renzi.

Actualizado por: Ing. Fabián Blasetti

AMPLIFICADORES OPERACIONALES.

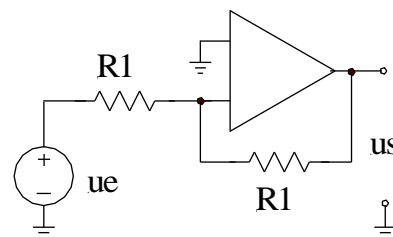
Amplificador operacional teórico. Modelo equivalente. Cortocircuito virtual. Aplicaciones: Amplificador inversor, no inversor, seguidor de tensión, sumador, convertidor corriente – tensión, integrador, derivador. Amplificador diferencial básico.

REPASAR: Circuitos en corriente continua y resolución de circuitos.

EJERCICIO Nº 01:

La figura representa un amplificador operacional (AO) en una cierta configuración.

- Dibujar los signos que correspondan en las entradas del AO, justificando su ubicación.
- Explicar en qué consiste el concepto de cortocircuito virtual y en qué condiciones se cumple en un AO.
- Obtener la tensión de salida en función de la tensión de entrada explicando los pasos seguidos aplicando el concepto de cortocircuito virtual. ¿Qué tipo de configuración de AO corresponde?



RESPUESTA: $u_s(t) = -R_2/R_1 \cdot u_e(t)$

- ¿Hay otra forma de resolver el apartado c) sin apelar al cortocircuito virtual? Si la hay, resolver; si no, justificar la respuesta.
- Calcular la tensión de salida si $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 75 \text{ k}\Omega$ y $u_e = 2 \text{ V}$.

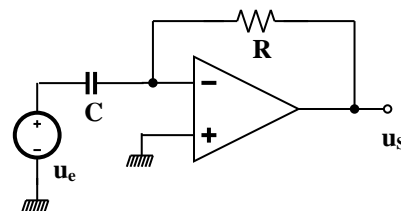
RESPUESTA: -15V.

- Si el AO está alimentado con tensiones de $\pm 12 \text{ V}$, indicar qué ocurre con la tensión de salida. Explicar.

EJERCICIO Nº 02

En el circuito de la figura: $R = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 477 \text{ nF}$.

- Explicar qué operación realiza el circuito de la figura realizando cálculos que justifiquen la respuesta.
- Determinar y graficar la tensión de salida si la tensión de entrada es senoidal de 10V de amplitud, frecuencia 50Hz y fase $+30^\circ$.

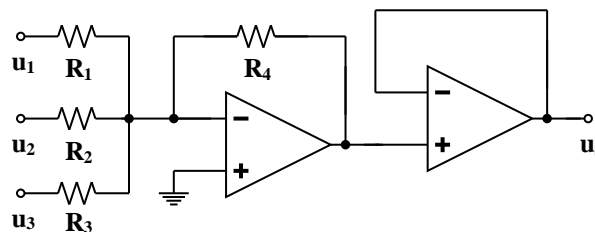


RESPUESTA: $u_s(t) = -15 \cdot \cos(314 \cdot t + 30^\circ) \text{ V}$.

EJERCICIO Nº 03

El circuito de la figura corresponde a un ecualizador de audio de tres canales. Cada entrada de tensión representa una señal de un instrumento musical.

- Explicar el funcionamiento de cada etapa en forma individual y luego del circuito completo.
- Determinar la tensión de salida en función de las tensiones de entrada.



RESPUESTA: $u_s = -\left(\frac{R_4}{R_1}u_1 + \frac{R_4}{R_2}u_2 + \frac{R_4}{R_3}u_3\right)$

- La salida se conecta con una etapa de amplificación cuya tensión de entrada óptima es 1V. Si $R_4 = 1200 \Omega$. Determinar el valor de los resistores R_1 , R_2 y R_3 para lograr que los tres canales se sumen con la misma amplitud suponiendo las siguientes señales de entrada: $u_{1\text{max}} = 50 \text{ mV}$, $u_{2\text{max}} = 12 \text{ mV}$, $u_{3\text{max}} = 2 \text{ V}$.

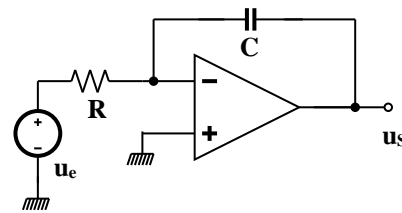
RESPUESTA: $R_1 = 60 \Omega$; $R_2 = 14,4 \Omega$; $R_3 = 2.400 \Omega$.



EJERCICIO N° 04

Para el circuito con **AO** de la figura la fuente de tensión u_e es una señal rectangular simétrica de período T y valor medio nulo con valores máximos de U_{\max} .

- Enunciar las características de un amplificador operacional teórico.
- Explicar el funcionamiento general del circuito y obtener la relación entre la tensión de salida y la tensión de entrada.



RESPUESTA: $u_s(t) = -1/RC \cdot \int u_e(t) \cdot dt$

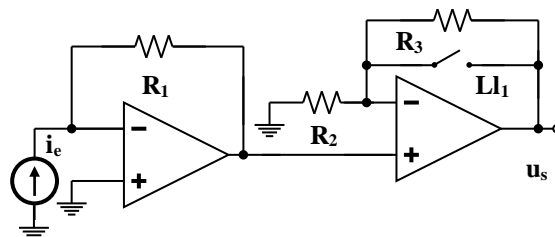
- Determinar la forma de la señal de tensión de salida (suponer que el capacitor se encuentra con condiciones iniciales nulas, es decir, descargado). ¿Cómo puede considerarse la señal obtenida?

Los valores del circuito son: $R = 0,47 \text{ M}\Omega$; $C = 213 \text{ nF}$, $U_{\max} = \pm 1 \text{ V}$ y $T = 20 \text{ ms}$

EJERCICIO N° 05:

En el circuito de la figura la llave L_1 puede estar abierta o cerrada.

- Explicar las diferencias que existen entre la conexión de lazo abierto y de lazo cerrado de un amplificador operacional.
- Explicar en qué consiste el cortocircuito virtual, en qué condiciones ocurre y cómo se utiliza para resolver circuitos.
- Analizar el circuito y explicar el funcionamiento de cada una de las dos etapas.
- Determinar las expresiones de las tensiones de salida de cada etapa con la llave abierta y cerrada.



RESPUESTA: $u_s(t) = -i_e \cdot R_1 \cdot \left(\frac{kR_3}{R_2} + 1 \right)$; $k = 0$ equivale a llave cerrada, $k = 1$ llave abierta.

Sugerencia: Plantear cada una de las etapas por separado. Encontrar u_s de la etapa 1 y con ese valor resolver la etapa 2 con la llave abierta y cerrada.

EJERCICIO N° 06

- Mostrar el circuito de un amplificador operacional real e indicar valores típicos de sus componentes.
- Resolver el ejercicio 01 considerando que el amplificador operacional es real: $R_e = 1 \text{ M}\Omega$, $R_s = 4 \Omega$, $A = 100.000$. Mostrar los pasos seguidos y explicar.

RESPUESTA: $u_s(t) = -2,4999 \cdot u_e(t) = -4,999 \text{ V}$.

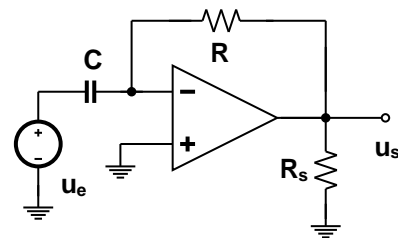
- Comparar la tensión de salida obtenida con el amplificador teórico y compararla con el real. Calcular el error relativo que se comete al utilizar la aproximación de amplificador teórico ($e_{\text{rel}} = (U_{\text{real}} - U_{\text{aprox}}) / U_{\text{real}} \cdot 100\%$).

RESPUESTA: $e_{\text{rel}} = 0,003\%$.

EJERCICIO N° 07

El circuito de la figura forma parte del control de movimiento de un servomotor. La fuente de tensión u_e es una señal triangular simétrica con valores máximos de U_{\max} y período T . $R = R_s = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 0,47 \text{ }\mu\text{F}$, $U_{\max} = \pm 0,5 \text{ V}$, $T = 1 \text{ ms}$

- Explicar el funcionamiento general del circuito.
- A partir de a) determinar la forma de la señal de tensión de salida suponiendo que no se encuentra conectado el resistor R_s (suponer que el capacitor se encuentra descargado).



RESPUESTA: $u_s(t) = -RC \cdot \frac{du_e}{dt}$

- Explicar cómo influye en el circuito la inclusión de R_s . Calcular y graficar.

Sugerencia: Realizar el gráfico de la señal y establecer la configuración del amplificador



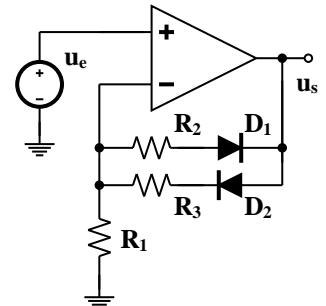
EJERCICIOS ADICIONALES

Sugerencia: Resolver todos los ejercicios siguiendo las pautas establecidas para los ejercicios anteriores: No dar por hechos u obvios suposiciones o afirmaciones, nada debe darse por implícito. Plantear, explicar, justificar, respetar la nomenclatura y simbología. En este caso, el hábito hace al monje.

EJERCICIO N° 08:

En el circuito de la figura el AO está alimentado con $U_{cc} = \pm 12 \text{ V}$. Suponer diodos ideales.
 $R_1 = 25 \Omega$, $R_2 = 50 \Omega$, $R_3 = 25 \Omega$, $f = 1 \text{ kHz}$, $u_m = 5 \text{ V}$.

- Mostrar el modelo real del amplificador operacional y los valores ideales de cada componente. Asociar dichos valores ideales con valores reales típicos.
- Representar u_s en función de u_e si la tensión de entrada es una señal senoidal de frecuencia f y amplitud u_m suponiendo modelos de diodo ideal. Graficar la tensión de entrada y la tensión de salida.



$$\text{RESPUESTA: } u_s(t) = \begin{cases} u_e \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) & 0 \leq t \leq T/2 \\ u_e \cdot \left(\frac{R_3}{R_1} + 1 \right) & T/2 < t < T \end{cases}$$

- El circuito presenta fallas desconocidas que producen $u_s = u_e$. Las fallas son elementos desconectados y/o en cortocircuito. Enumerar las fallas posibles que producen esta situación justificando la respuesta.

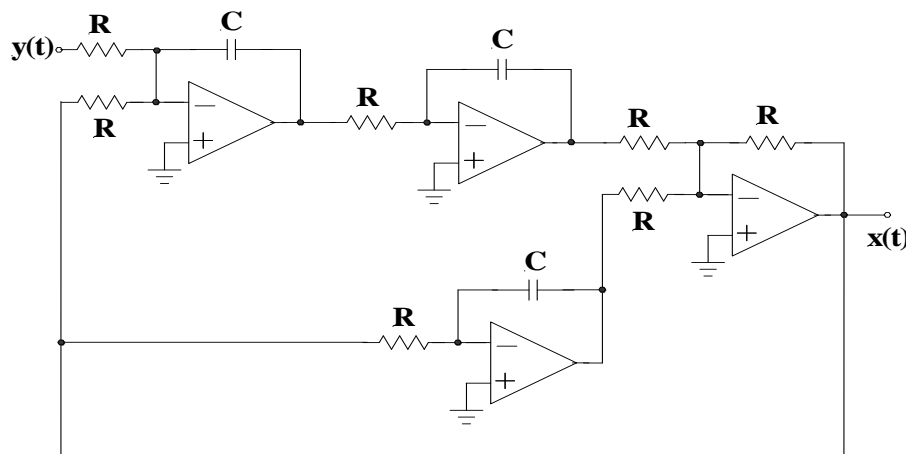
RESPUESTA: Posibles fallas R_2 o R_3 en cortocircuito o R_1 en circuito abierto

EJERCICIO N° 09

El circuito de la figura se encuentra realimentado (la salida se conecta con la entrada). Los resistores del circuito son todos iguales en valor al igual que los capacitores.

- Obtener la expresión de la ecuación diferencial $y(t) = f(x(t))$ representada por el circuito con amplificadores operacionales de la figura.

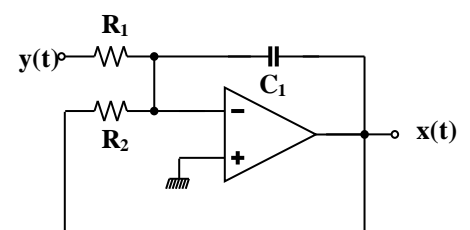
Sugerencia: Escribir las expresiones de las tensiones de cada etapa del circuito.



$$\text{RESPUESTA: } y(t) = -x(t) + RC \cdot \frac{dx}{dt} - (RC)^2 \cdot \frac{d^2x}{dt^2}$$

- Diseñar un circuito con amplificadores operacionales que represente la ecuación diferencial indicada, dando los valores de a y b en función de las R y C utilizados: $y(t) = a \cdot x(t) + b \cdot \frac{dx}{dt}$

$$\text{RESPUESTA: } y(t) = -\frac{R_1}{R_2} \cdot x(t) - R_1 C \cdot \frac{dx}{dt}$$



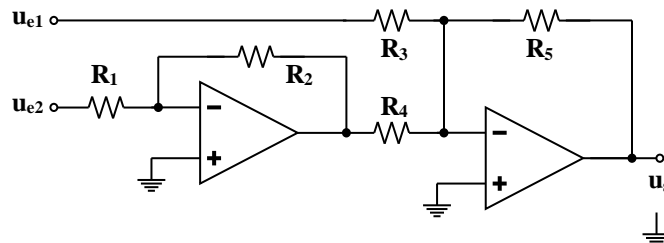


EJERCICIOS RESUELTOS

Aclaración: Debe observarse que en la resolución de estos ejercicios se efectúan planteos, explicaciones, justificaciones, y nada se da por sobreentendido.

EJERCICIO N° 10

El circuito de la figura representa la etapa de amplificación de un equipo medidor de temperatura. $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 3 \text{ k}\Omega$; $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_4 = 2 \text{ k}\Omega$ y $R_5 = 2 \text{ k}\Omega$. Los amplificadores se alimentan con fuentes de $\pm 15 \text{ V}$.

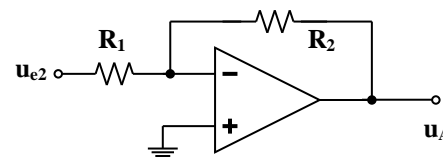


- Explicar qué tipos de configuraciones de AO están presentes en el circuito e identificarlas explicando su funcionamiento.
- Determinar u_s en función de u_{e1} y u_{e2} . Calcular este valor.
- Si la tensión de entrada 2 es nula. ¿Cuál es el valor máximo que puede tener la entrada 1 para evitar que alguno de los amplificadores operacionales sature? Repetir si le ocurre lo mismo a la fuente 1.
- Calcular la tensión de salida si la tensión de entrada 1 vale 10V y la tensión de entrada 2 es nula. Determinar las tensiones entre las entradas de los operacionales. ¿Se cumple el cortocircuito virtual? Explicar.

- La primera etapa del circuito corresponde a un amplificador inversor:

La tensión de entrada queda aplicada a R_1 y la corriente en este resistor se establece en R_1 y R_2 debido al cortocircuito virtual.

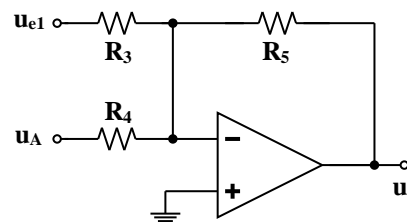
El resultado es una inversión y amplificación o atenuación en función de la relación de resistencias de los resistores: $u_A = -R_2/R_1 \cdot u_{e2}$



La segunda etapa del circuito corresponde a un amplificador sumador:

En este circuito ocurre lo mismo que en el circuito anterior con la característica que el nodo de la entrada inversora colecta la suma de corrientes que se establecen en los resistores de entrada:

$$u_s = -\left(\frac{R_5}{R_3} \cdot u_{e1} + \frac{R_5}{R_4} \cdot u_A\right)$$



- Asociando el resultado anterior con el primero se obtiene la relación entre la tensión de salida y las tensiones de

entrada: $u_s = -\left(\frac{R_5}{R_3} \cdot u_{e1} - \frac{R_5}{R_4} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot u_{e2}\right) = \frac{R_5 \cdot R_2}{R_4 \cdot R_1} \cdot u_{e2} - \frac{R_5}{R_3} \cdot u_{e1}$. El valor resulta: $u_s = 3 \cdot u_{e2} - 2 \cdot u_{e1}$

- Se observa que la tensión 1 se amplifica una vez. El amplificador inversor (etapa 1) no presenta tensión a la salida debido a que la fuente 2 es nula. A medida que la tensión 1 aumenta en valor también lo hace la salida de la segunda etapa de amplificación.

Si $u_{e2} = 0$ entonces $u_s = -2 \cdot u_{e1}$. El amplificador operacional sumador (segunda etapa) satura cuando la salida llega al valor de la tensión de alimentación (en amplificadores reales esto sucede a valores un poco menores debido a características constructivas). En este caso sucederá cuando se aproxime a los 15V en valor absoluto, entonces:

$$\pm 15V = -2 \cdot u_{e1} \Rightarrow u_{e1} = \pm 7,5V$$

Es decir, si en valor absoluto la fuente de la entrada 1 supera los 7,5V la segunda etapa de amplificación va a saturar y a partir de ese momento la tensión de salida no será válida ya que alcanza la saturación.

Para el caso de la fuente 2 se observa que su señal pasa por la etapa 1 y la etapa 2 de amplificación operacional. Para analizar la saturación se debe analizar qué operación realiza cada etapa por separado.

En el caso particular de este circuito, se observa que la tensión de la fuente 2 se amplifica 3 veces (etapa 1) y luego se suma invertida con amplificación unitaria (etapa 2). Por lo tanto, en este caso conviene analizar en qué caso satura la etapa 1 porque la etapa 2 no altera la amplitud de la fuente de tensión 2:

Si $u_{e1} = 0$ entonces $u_s = 3 \cdot u_{e2}$. Por lo tanto: $\pm 15V = 3 \cdot u_{e2} \Rightarrow u_{e2} = \pm 5V$.

En este caso no hay que superar en valor absoluto los 5V.

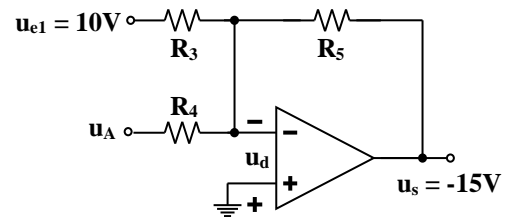
- Si la fuente 1 toma el valor de 10V y la 2 es nula, va a lograr que la etapa 2 sature (ya que la salida intentará establecer -20V de acuerdo a la expresión obtenida), entonces la salida quedará fija en este caso en -15V.



Se observa que la expresión $u_s = 3 \cdot u_{e2} - 2 \cdot u_{e1}$ ya no es válida porque no se cumple el cortocircuito virtual.

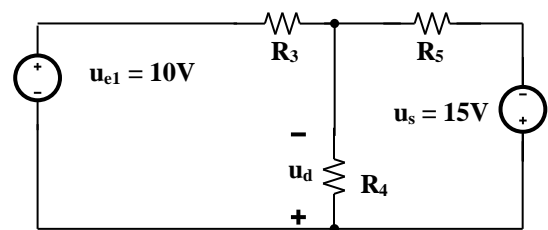
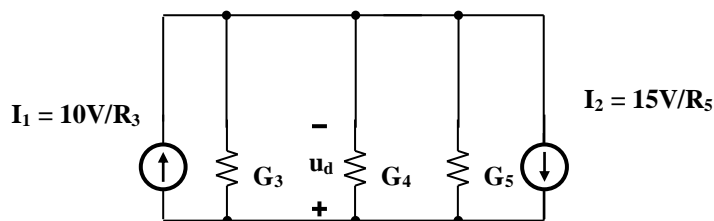
Para calcular las tensiones del circuito se observa que el mismo presenta la siguiente situación:

u_A es nula, con lo cual es equivalente a plantear que el resistor R_4 se conecta a masa, además, como la tensión de salida satura a $-15V$ y queda constante en ese valor, en este caso se puede representar por una fuente de tensión.



Con estas aclaraciones se plantea el siguiente circuito equivalente:

Para resolver de forma más rápida y sencilla se utiliza la equivalencia de fuentes de tensión y corrientes reales para obtener el siguiente circuito:



$$u_d = -\frac{(I_1 - I_2)}{(G_3 + G_4 + G_5)} \Rightarrow u_d = -\left(\frac{10V}{1k\Omega} - \frac{15V}{2k\Omega}\right)\left(\frac{1}{1k\Omega} + \frac{1}{2k\Omega} + \frac{1}{2k\Omega}\right)^{-1} = -2,5mA \cdot 500\Omega = -1,25V$$

Como se observa, u_d ya no es nula y esto se debe a que el amplificador operacional está saturado y no puede realimentar la corriente necesaria para que se cumpla el cortocircuito virtual.

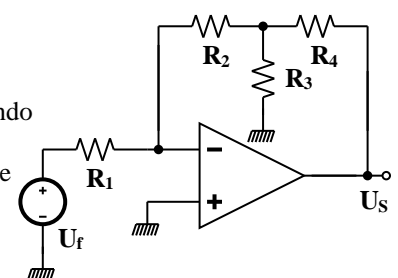
Se deja como ejercicio al lector la resolución de la tensión u_d del circuito anteúltimo (el que tiene las fuentes de tensión). Observar que también es válido plantear que esa tensión es el producto de la corriente I_4 (con dirección hacia arriba) con el valor de resistencia de R_4 .

EJERCICIO N° 11

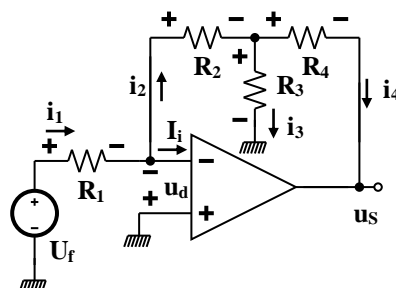
Para el circuito de la figura.

- Determinar la relación entre la tensión de salida y la tensión de la fuente explicando los pasos seguidos. Calcular el valor de la relación en función de los datos.
- Suponiendo que la señal aplicada al circuito es continua, calcular la resistencia de entrada que ve la fuente de alimentación.

Los valores del circuito son $R_1 = 4,8 k\Omega$, $R_2 = R_4 = 30 k\Omega$ y $R_3 = 1 k\Omega$.



Se plantean todas las corrientes y tensiones del circuito:



Al aplicar el concepto de cortocircuito virtual se puede suponer que: $u_d \cong 0$ y $i_i \cong 0$

Aplicando la 1LK se obtiene: $i_1 = i_2 = i_3 + i_4$



$$U_f = i_1 \cdot R_1$$

Aplicando la 2LK: $0 = i_2 \cdot R_2 + i_3 \cdot R_3$

$$u_s = -i_4 \cdot R_4 + i_3 \cdot R_3$$

Entonces: $0 = i_1 \cdot R_2 + i_3 \cdot R_3 \Rightarrow i_3 = -i_1 \cdot \frac{R_2}{R_3}$

$$u_s = (i_3 - i_1) \cdot R_4 + i_3 \cdot R_3 \Rightarrow u_s = i_3 \cdot (R_3 + R_4) - i_1 \cdot R_4$$

Reemplazando: $u_s = -i_1 \cdot \frac{R_2}{R_3} \cdot (R_3 + R_4) - i_1 \cdot R_4 = -i_1 \cdot \left(R_2 + R_4 + \frac{R_2}{R_3} \cdot R_4 \right) = -\frac{U_f}{R_1} \cdot \left(R_2 + R_4 + \frac{R_2}{R_3} \cdot R_4 \right)$

Agrupando: $\frac{u_s}{U_f} = -\left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_1} + \frac{R_2 \cdot R_4}{R_3 \cdot R_1} \right)$. Reemplazando por los valores: $\frac{u_s}{U_f} = -200$

a) La resistencia de entrada que ve la fuente se determina mediante la ley de Ohm: $R_e = \frac{U_f}{i_1} = R_1$.

Este resultado se obtiene aplicando el concepto de cortocircuito virtual.

COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES

En el desarrollo de este **TAP** han resultado importantes los siguientes aspectos:

1. Introducción al **Amplificador Operacional**, sus características teóricas y reales.
2. Definición del **cortocircuito virtual**, a partir de la condición de realimentación negativa impuesta por las conexiones externas.
3. Análisis de circuitos con **AO** en base a sus características.
4. Aplicaciones diversas del **AO**.
5. Estudio de la transferencia de diversas configuraciones.
6. Realización de funciones matemáticas aplicando el **AO**.
7. Funcionamiento de etapas en cascada.