

Cuestionario Laboratorio 66.02

I. Primer Clase.

1) **¿La ley de Ohm se cumple siempre sin ningún tipo de restricción?**

En electrónica con frecuencia se usan componentes que no tienen una relación lineal de corriente-voltaje; a estos dispositivos se les conoce como no óhmicos, pues no cumplen con la Ley de Ohm. Por lo tanto, la Ley de Ohm se cumple para componentes cuya relación corriente-voltaje es lineal.

2) **¿Puede enumerar algún caso en el que no se cumpla alguna de las leyes de Kirchhoff?**

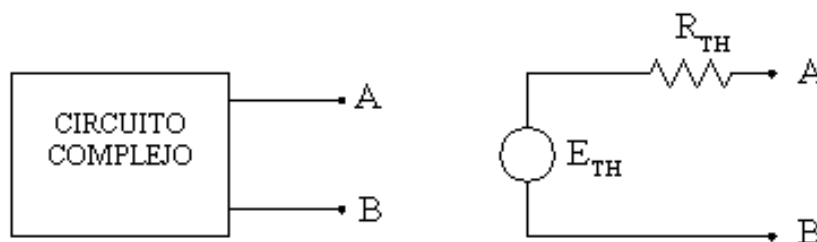
No, las leyes de Kirchhoff se basan en la ley de conservación de la carga y la ley de conservación de la energía.

3) **¿Puede indicar a qué tipo de circuitos puede aplicarse el principio de superposición?**

Principio de Superposición: *Si en un circuito lineal hay más de un generador independiente*, la solución general del circuito se puede obtener sumando los resultados parciales obtenidos considerando cada generador de manera independiente, como si los otros generadores no estuvieran presentes.

4) **Indique en qué partes divide un circuito para aplicar el Teorema de Thévenin y qué condiciones debe cumplir cada una.**

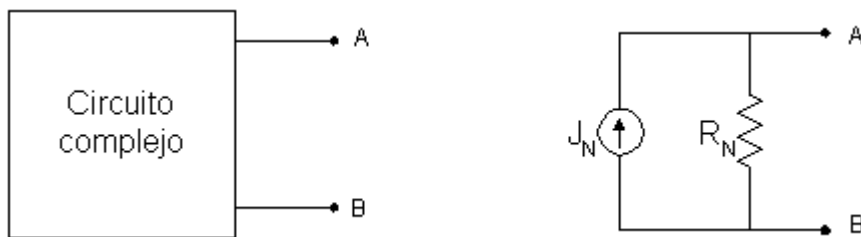
Cualquier red bilateral lineal puede reducirse a un circuito simplificado de dos terminales que se compone de una sola fuente de voltaje en serie con un solo resistor. Una red lineal está integrada por componentes que tienen una relación lineal (línea recta) entre el voltaje y la corriente. Una red bilateral opera de la misma manera sin importar la dirección de la corriente en la red.



5) **¿Qué entiende por tensión de Thévenin y resistencia de Thévenin?**

- Tensión de Thévenin E_{Th} : en el circuito original, la diferencia de potencial entre los puntos A y B, cuando entre ellos hay un circuito abierto.
- Resistencia de Thévenin R_{Th} : en el circuito original, la resistencia equivalente entre los puntos A y B habiendo anulado todos los generadores. Para ello, debemos recordar lo indicado en el principio de superposición: los generadores de tensión se sustituyen por cortocircuitos y los generadores de corriente, por circuitos abiertos.

6) **¿Qué entiende por corriente de Norton?**



En el circuito equivalente Norton, J_N es la corriente equivalente de Norton y R_N la resistencia equivalente de Norton.

- J_N : corriente que circula del punto A al punto B en el circuito original, habiendo entre ambos puntos un cortocircuito.
- R_N : en el circuito original, la resistencia equivalente entre los puntos A y B habiendo anulado todos los generadores. Para ello, debemos recordar que los generadores de tensión se sustituyen por cortocircuitos y los generadores de corriente, por circuitos abiertos.

7) **¿Existe alguna relación entre los equivalentes de Thévenin y de Norton?**

- Resistencia equivalente de Norton.

$$R_N = R_{TH}$$

- Corriente equivalente de Norton.

$$I_N = \frac{E_{Th}}{R_{Th}}$$

8) **¿Qué entiende por generadores ideales de tensión y de corriente?**

- Un generador de tensión ideal, es aquel elemento del circuito que proporciona energía eléctrica con una determinada tensión que es independiente de la corriente que pasa por él.
- Un generador de corriente ideal, es aquel elemento activo que proporciona energía con una determinada corriente que es independiente de la tensión en bornes.

9) **¿Qué entiende por generadores reales de tensión y de corriente?**

- Un generador de tensión real es aquel elemento activo del circuito que proporciona energía eléctrica con una determinada tensión que depende de la corriente que pasa por él. La relación Tensión-Corriente en estos generadores es una línea recta, de pendiente negativa, esto es debido a que el generador real de tensión presenta en general una cierta impedancia en la que se produce una caída de tensión.
- Un generador de corriente real es un elemento activo que proporciona energía eléctrica que depende de la tensión en bornes. La relación Tensión-Corriente en estos generadores es una línea recta de pendiente negativa, esto es debido a que el generador real de corriente presenta en general una admitancia en paralelo, en la que se produce una derivación de corriente.

10) **¿Puede convertirse un generador ideal de corriente en uno de tensión?**

Es imposible sustituir un generador ideal de tensión en uno de corriente. (Ver demostración *Circuitos Eléctricos. Jesús Fraile Mora. Pág. 46*)

II. Segunda clase.

- 1) **Describe el proceso de carga de un capacitor en un circuito R-C, desde el instante en que se cierra la llave.**

Primero se supone que el capacitor está descargado y que el interruptor está abierto. Ahora se mueve el interruptor a la posición de carga, en el instante en que el interruptor se cierra la corriente salta a E/R amperes y luego disminuye a cero, mientras el voltaje, que es cero en el instante en que el interruptor está cerrado, aumenta de manera gradual a E volts.

Para cambiar el voltaje en el capacitor, los electrones deben moverse de una placa a la otra. Aun para un capacitor relativamente pequeño, deben moverse miles de millones de electrones y esto toma su tiempo. En consecuencia, el voltaje del capacitor no puede cambiar instantáneamente, es decir, no puede saltar en forma abrupta de un valor a otro. En cambio, sube gradual y suavemente. De otra manera, el voltaje del capacitor debe ser continuo en todo momento.

Ahora considere la corriente. El movimiento de los electrones mencionado es una corriente. La corriente salta en forma abrupta de 0 a E/R amperes, es decir, la corriente es discontinua. Ya que el voltaje del capacitor no puede cambiar instantáneamente, su valor después de que el interruptor se cierra será el mismo que tenía justo antes de que el interruptor se cerrara, esto es 0 V. Ya que el voltaje en el capacitor después de que se cierra el interruptor es cero (aunque hay corriente a través de él), aparece momentáneamente como un cortocircuito.

Ya que el dieléctrico entre las placas del capacitor es un aislante, la corriente no puede pasar a través de él. Esto significa que la corriente en el circuito, la cual se debe por completo al movimiento de electrones de una placa a la otra a través de la batería, debe disminuir a cero conforme el capacitor se carga.

- 2) **Escriba la ecuación diferencial a partir de la ley de mallas para el circuito R-C en régimen transitorio de carga.**

Se desarrollan las ecuaciones para los voltajes y la corriente durante la carga. Con la ecuación de voltajes se obtiene

$$v_R + v_C = E$$

Pero $v_R = Ri_C$ e $i_C = C \frac{dv_C}{dt}$. Entonces, $v_R = RC \frac{dv_C}{dt}$. Al sustituir esto en la ecuación anterior se obtiene

$$RC \frac{dv_C}{dt} + v_C = E$$

Mediante cálculo básico

$$v_C = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$
$$i_C = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

- 3) **Explique conceptualmente porqué la corriente durante la carga de un capacitor en un circuito R-C disminuye a medida que la tensión aumenta.**

Dado que el voltaje en las placas se encuentra directamente relacionado con la carga existente en éstas mediante $v_C = \frac{q}{C}$, la rápida velocidad con la que la carga

inicialmente se deposita sobre las placas ocasionará un rápido incremento en v_C . Obviamente, a medida que la velocidad del flujo de carga (I) disminuye, la velocidad de carga en el voltaje actuará de la misma forma. Eventualmente, el flujo de carga se detendrá, la corriente I será igual a cero, y el voltaje cesará de cambiar en magnitud —la fase de carga habrá concluido—. En este punto el capacitor asumirá las características de un circuito abierto: una caída de voltaje en las placas sin un flujo de carga “entre” las placas.

4) Describa el proceso de descarga de un capacitor en un circuito R-C desde el instante en que se cierra la llave.

Primero, se supone que el capacitor se carga a E volts y que el interruptor está abierto. Ahora se cierra el interruptor; ya que el capacitor tiene E volts justo antes que el interruptor se cierre, y ya que el voltaje no puede cambiar de manera instantánea, aún tendrá E volts justo después que se cierre el interruptor. Por tanto, el capacitor parece momentáneamente una fuente de voltaje, y entonces la corriente salta inmediatamente a $-E/R$ amperes. (Observe que la corriente es negativa porque es opuesta en dirección a la referencia.) El voltaje y la corriente entonces disminuyen a cero.

5) Escriba la ecuación diferencial a partir de la ley de mallas para el circuito RC en régimen transitorio de descarga.

Ecuación de comportamiento de la resistencia

$$v_R(t) = Ri(t)$$

Ecuación de comportamiento del condensador

$$i(t) = C \cdot \frac{dv_C(t)}{dt}$$

Por ley de Kirchhoff

$$0 = v_R(t) + v_C(t)$$

De las dos primeras ecuaciones se deduce que

$$v_R(t) = RC \cdot \frac{dv_C(t)}{dt}$$

Y sustituyendo esta última expresión en la tercera ecuación

$$0 = RC \frac{dv_C(t)}{dt} + v_C(t)$$

La solución general de dicha ecuación es de la forma

$$v_C(t) = K_1 e^{-\frac{t}{RC}} + K_2$$

Para obtener la solución particular correspondiente a este circuito, debemos calcular los valores de K_1 y K_2 , como sigue:

1. Régimen permanente inicial (es decir, en el instante $t = 0$). Sabemos que el condensador estaba cargado; por tanto:

$$v_C(0) = E \text{ voltios}$$

2. Régimen permanente final (es decir, en el instante $t = \infty$)

$$v_C(\infty) = 0 \text{ voltios}$$

Sustituyendo ambos valores en la solución general de la ecuación que refleja el comportamiento del circuito en cualquier instante de tiempo, obtendremos la

solución particular correspondiente a ese circuito concreto según los estados inicial y final:

$$v_C(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

Partiendo de dicha fórmula, podemos calcular la corriente que circula por el circuito

$$i(t) = C \cdot \frac{dv_C(t)}{dt}$$

$$i(t) = -\frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

- 6) Defina lo que entiende por tiempo de crecimiento o transición. Explique qué información le permite obtener de un tren de pulsos.

En la práctica las formas de onda no son ideales, esto es, no cambian de bajo a alto o de alto a bajo de manera instantánea. En cambio, tienen tiempos de subida y bajada que se denotan como t_r y t_f y se miden entre los puntos de 10 y 90%. La diferencia entre una forma de onda real y una ideal es con frecuencia ligera. Por ejemplo, los tiempos de subida y bajada de los pulsos reales pueden ser de sólo unos nanosegundos y cuando se les ve en un osciloscopio parecer ser ideales.

- 7) Defina lo que se entiende por ciclo de trabajo de un tren de pulsos. Explique qué información le permite obtener.

Un pulso es un voltaje o corriente que cambia de un nivel a otro y regresa al nivel inicial. Un tren de pulsos es un flujo repetitivo de pulsos.

El período T del tren de pulsos se define como la diferencia de tiempo entre dos puntos similares cualesquiera sobre el tren de pulsos. La frecuencia de repetición de pulso (frp) está definida por

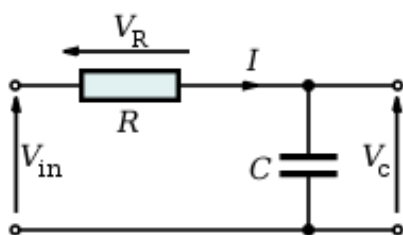
$$frp = \frac{1}{T}$$

La frecuencia de repetición de pulso está determinada solamente por el periodo del pulso repetido. El factor que revelará cuánto del periodo está abarcado por el pulso se llama ciclo de trabajo, y se define como sigue:

$$\text{Ciclo de trabajo} = \frac{\text{ancho de pulso}}{\text{periodo}} \cdot 100\%$$

Los resultados anteriores revelan claramente que el ciclo de trabajo proporciona una indicación porcentual de la parte del periodo total comprendida por la forma de onda de pulso.

- 8) Dibuje un circuito integrador. Indique las condiciones que deberá cumplir. Explique su funcionamiento y dibuje la forma de onda de la señal de salida, frente a una excitación cuadrada unipolar.



A alta frecuencia, es decir cuando $\omega \gg \frac{1}{RC}$ el condensador no tiene tiempo suficiente para cargarse y la tensión en los bornes permanece pequeña. Así:

$$V_R \cong V_{in}$$

Y la intensidad en el circuito vale por tanto:

$$I = \frac{V_{in}}{R}$$

Como

$$V_C = \frac{1}{C} \int_0^t I dt$$

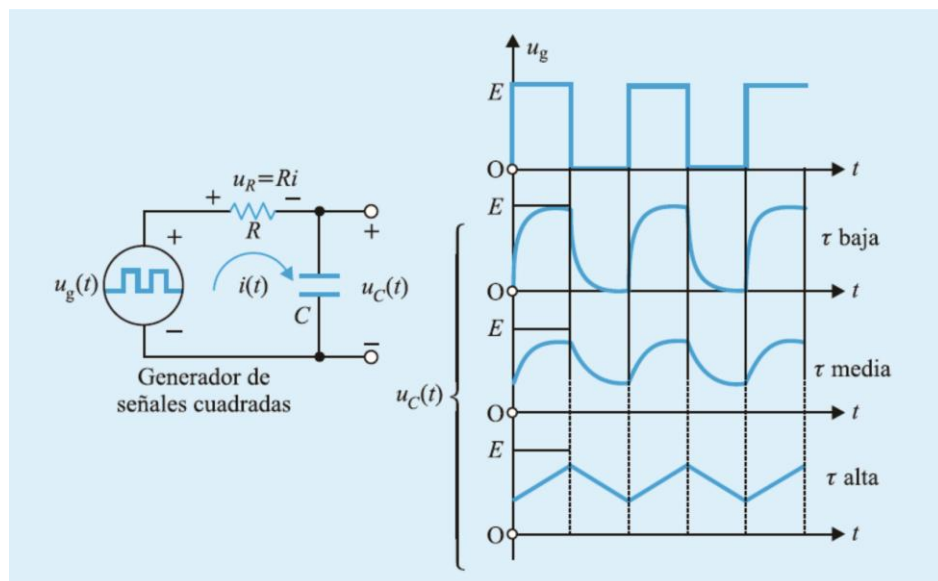
Se obtiene

$$V_C \cong \frac{1}{RC} \int_0^t V_{in} dt$$

La tensión en los bornes del condensador integrado se comporta como un filtro de paso bajo.

La red RC constituye un integrador, y la forma de onda que se obtiene en el condensador depende del valor de la constante de tiempo del circuito RC, respecto del valor del periodo de la onda cuadrada del generador de señales. En la figura se muestran tres tipos de ondas resultantes, según que la constante de tiempo de la red RC sea baja, media o alta.

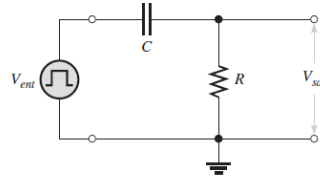
Se dice que la constante de tiempo es baja cuando es inferior a 1/10 del periodo de la onda cuadrada de entrada. La constante de tiempo es media cuando está comprendida entre 1/10 y 10 veces el periodo de la onda cuadrada y es alta cuando la constante de tiempo es superior a 10 veces el periodo de la señal de entrada.



Obsérvese en la figura que cuando la constante de tiempo es alta, se obtiene a la salida del condensador una onda triangular, es decir la red RC transforma la onda cuadrada en triangular, es por ello un circuito integrador.

- 9) Dibuje un circuito derivador. Indique las condiciones que deberá cumplir. Explique su funcionamiento y dibuje la forma de onda de la señal de salida, frente a una excitación cuadrada unipolar periódica.

Consideremos el circuito de la figura, pero suponiendo que $V_{ent}(t)$ no es constante.



Puesto que

$$V_{ent}(t) = V_R(t) + V_C(t)$$

Entonces

$$V_C(t) = V_{ent}(t) - V_R(t)$$

Se cumple también que

$$V_R(t) = I(t)R$$

$$V_R(t) = \frac{dQ(t)}{dt}R$$

$$V_R(t) = RC \frac{dV_C(t)}{dt}$$

$$V_R(t) = RC \frac{d(V_{ent}(t) - V_R(t))}{dt}$$

$$V_R(t) = RC \frac{dV_{ent}(t)}{dt} - RC \frac{dV_R(t)}{dt}$$

Si $V_{ent}(t)$ varía lentamente (con un periodo $T \gg RC$), el condensador tiene tiempo de sobra para cargarse y compensar el potencial de la fuente, por lo que

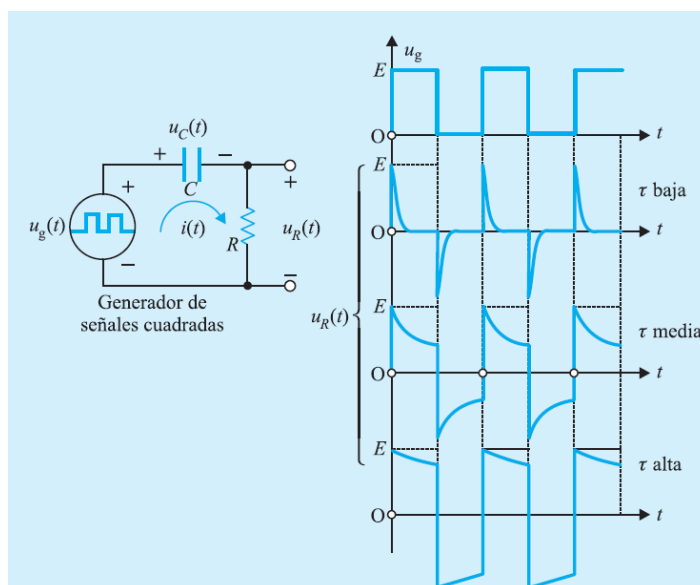
$$V_C(t) \cong V_{ent}(t) \gg V_R(t)$$

Y entonces

$$V_R(t) \cong RC \frac{dV_{ent}(t)}{dt}$$

Es decir, la diferencia de potencial en la resistencia es proporcional a la derivada de la señal aplicada.

En la figura se muestran tres tipos de ondas resultantes, según que la constante de tiempo de la red RC sea baja, media o alta.



Obsérvese que cuando la constante de tiempo es baja respecto del periodo de la señal, se obtienen a la salida de la resistencia señales tipo impulso, lo que significa que la red RC deriva la señal de entrada y es por ello un circuito derivador.

10) Explique el concepto de impedancia a partir de la idea de fasor.

La oposición que un elemento de circuito presenta a la corriente en el dominio de los fasores se define como su impedancia.

Las relaciones fasoriales $U = f(I)$ de los elementos pasivos simples son de la forma:

- Resistencia: $U = RI$
- Inductancia: $U = j\omega LI$
- Capacidad: $U = \frac{1}{j\omega C} I$

Las ecuaciones anteriores indican que el fasor tensión puede expresarse como el producto de una cierta expresión compleja, que en el caso de una resistencia se reduce a una constante por el fasor corriente. La expresión compleja cociente entre el fasor tensión y el fasor corriente se denomina impedancia compleja $Z(j\omega)$.

Para la resistencia, la impedancia es un número real; para la inductancia, es un número imaginario puro con argumento $\frac{\pi}{2}$ y para la capacidad, es un número imaginario puro con argumento $-\frac{\pi}{2}$. Como ocurre con cualquier número complejo, la impedancia se puede expresar en forma binómica o rectangular del siguiente modo:

$$Z = R + jX$$

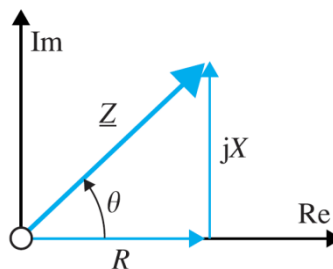
La parte real de Z es la componente resistiva o simplemente resistencia, la parte imaginaria es la componente reactiva o simplemente reactancia. El módulo y argumento de la impedancia son respectivamente

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\theta = \arctg \frac{X}{R}$$

Y por consiguiente se cumple en el triángulo de impedancias las relaciones siguientes

$$R = Z \cos(\theta); X = Z \sin(\theta)$$



11) Describa el comportamiento de un circuito RLC en régimen estacionario en corriente alterna.

Supongamos que la fuente suministra una corriente i . Como los elementos del circuito están conectados en serie, la corriente en cualquier instante es la misma en cada punto del circuito. Así, un solo fasor I , con longitud proporcional a la amplitud de la corriente, representa la corriente en todos los elementos de circuito.

La diferencia de potencial entre las terminales de un resistor está en fase con la corriente en el resistor y su valor máximo V_R está dado por la ecuación

$$V_R = I \cdot R$$

El fasor V_R en fase con el fasor de corriente I , representa el voltaje a través del resistor. Su proyección en el eje horizontal en cualquier instante da la diferencia de potencial instantánea v_R .

El voltaje a través de un inductor se adelanta 90° a la corriente. Su amplitud de voltaje está dada por

$$V_L = I X_L$$

El fasor V_L representa el voltaje a través del inductor, y su proyección sobre el eje horizontal en cualquier instante es igual a v_L .

El voltaje a través de un capacitor se retrasa 90° con respecto a la corriente. Su amplitud de voltaje está dada por la ecuación

$$V_C = I X_C$$

El fasor V_C representa el voltaje a través del capacitor y su proyección en el eje horizontal en cualquier instante es igual a v_C .

La diferencia de potencial instantánea v entre las terminales de la fuente es igual en todo instante a la suma algebraica de las diferencias de potencial v_R , v_L y v_C . Es decir, es igual a la suma de las proyecciones de los fasores V_R , V_L y V_C . Pero la suma de las proyecciones de estos fasores es igual a la proyección de su suma vectorial. Por lo tanto, la suma de vectores V debe ser el fasor que represente el voltaje de fuente v y el voltaje total instantáneo a través de los elementos.

12) Es posible obtener un valor de tensión más elevado que el de la fuente en un circuito RLC? Si su respuesta es afirmativa, explique conceptualmente cómo sucede.

La corriente en un circuito resonante serie, está determinada única y exclusivamente por la tensión aplicada y el valor de la resistencia.

La propiedad de producir una tensión mayor que la tensión aplicada es una de las más notables características de un circuito resonante serie. Esto es posible a causa de la facultad de la bobina y del condensador de almacenar energía. La inductancia almacena energía en su campo magnético y el condensador en su dieléctrico en forma de campo electrostático.

Este almacenamiento ocurre a resonancia cada vez que el valor de R es menor que el de X_C o X_L . Cuanto más pequeño es el valor de la resistencia comparado con el de la reactancia, mayor será la tensión desarrollada a través de la reactancia. Si toda la resistencia en serie pudiera ser eliminada enteramente, la corriente en el circuito aumentaría teóricamente hasta un valor infinito. El voltaje a través de la bobina y del condensador podrían también ser infinitamente altos.

III. Tercera clase.

1) Qué se entiende por **mensurando** o **mesurando**?

El mensurando es el objeto, sustancia o fenómeno sobre el que se determina una característica específica. La especificación del mensurando puede requerir indicaciones acerca de magnitudes tales como tiempo, temperatura, etc., que ayudan a definir sin ambigüedad el mismo.

2) Qué entiende por **error**?

Es una desviación del valor medido de una magnitud física respecto al valor real de dicha magnitud.

3) Qué entiende por **incertidumbre**?

La incertidumbre de medida es un parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que razonablemente podrían ser atribuidos al mensurando.

Cuanto menor sea la incertidumbre de la medida, mejor ésta. El valor de la incertidumbre es el primer índice de la calidad de una medida, que es tanto mayor cuanto menor es aquella.

4) Cómo debe expresarse en forma correcta el valor de un **mensurando**?

El resultado completo de la medición consiste en el estimado y del mensurando y la incertidumbre expandida asociada U , debe expresarse en la forma $y \pm U$.

5) Qué criterio aplica para definir el número de cifras significativas en la expresión de un **mensurando**?

Reglas para operar con cifras significativas

- Al sumar o restar dos cantidades. Se suman los números normalmente y el resultado se escribe con el número de cifras decimales del sumando que tenga el menor número de cifras decimales.
- Al multiplicar o dividir dos cantidades. Se multiplican los números normalmente y el número de cifras significativas del resultado es el del dato del menor número de cifras significativas.
 - Nota 1: si la multiplicación involucra un entero, éste adopta el número de cifras significativas del factor que tenga menos.
 - Nota 2: si la multiplicación es con un irracional, se aplica la regla de enteros.

Se acostumbra escribir la lectura directa seguida de la precisión del aparato de medida. Ejemplo: se mide la longitud de un lápiz con una regla y nos dio $16,7\text{ cm}$, la precisión de la regla o sea la menor división de su escala es $1\text{ mm} = 0,1\text{ cm}$; el resultado se escribe como $16,7\text{ cm} \pm 0,1\text{ cm}$, y el valor real de la longitud del lápiz se encuentra en el intervalo de valores $[16,6\text{ cm}, 16,8\text{ cm}]$.

En trabajos de gran precisión, los errores se establecen a veces con dos cifras significativas, pero para nuestros propósitos podemos establecer la siguiente regla: los errores experimentales deben ser redondeados en la mayor parte de los casos a una sola cifra significativa. Esta regla tiene sólo una excepción significativa. Si el primer

dígito en la incertidumbre es un 1, entonces puede ser mejor mantener dos cifras significativas en la incertidumbre.

6) Cómo especifica el fabricante de un instrumento analógico la incertidumbre instrumental?

Para expresar el error límite absoluto y también el relativo de un instrumento analógico, es necesario conocer ciertas definiciones según la norma IEC 60051 – 1:

- Error intrínseco (E_x): Error propio del aparato que comete cuando se encuentra en condiciones normales de uso.
- Valor fiduciario (X_f): Es un valor convencional al cual se refieren los errores de un instrumento con el fin de especificar su exactitud. Esta puede ser:
 - El límite superior del campo de medida en: aparatos con '0' en un extremo no fuera de escala (excepto óhmetros).
 - La suma absoluta de los valores extremos de la escala, en aparatos con '0' dentro de la escala.
 - 90° eléctricos para cosfímetros, y fasímetros.
 - La longitud total de la escala para aparatos con escala no lineal contraída (por ejemplo óhmetros). El análisis del error relativo en un óhmetro serie, será tratado más adelante.

Clase (c): Se define como clase de exactitud a:

$$c = \frac{E_x}{X_f} \cdot 100$$

Lectura en un instrumento analógico:

En general se observa la deflexión de una aguja dentro de una escala graduada, obteniéndose,

$$k_x: \text{constante de lectura: } \frac{[\text{unidad de } X]}{[\text{división}]}$$
$$\delta_m: \text{divisiones medidas: } [\text{división}]$$

Luego el valor medido será:

$$X_m = k_x \cdot \delta_m$$

Y finalmente el resultado de la medición será como la expresión

$$X = X_m \pm E_x$$

Donde E_x se obtiene con la clase del instrumento utilizado.

7) Cómo especifica el fabricante de un instrumento digital la incertidumbre instrumental?

Para determinar el error límite o de garantía de un instrumento digital, existen varias expresiones, pero la más difundida por la mayoría de los fabricantes es la que sigue la norma IEC 485:

$$E_x = \pm(p\% \cdot X_m + m. \text{dígitos})$$

Donde p es un porcentaje de valor medido, y m es la cantidad de dígitos de los menos significativos para la escala seleccionada.

Ejemplo: Se mide un voltaje de 17.80Vcc en un multímetro digital en la escala de 19.99Vcc. La hoja de datos provista por el fabricante indica:

$$E_u = \pm(0.1\% \cdot U_m + 1. \text{dígitos})$$

Entonces, $E_u = \pm(0.1\% \times 17.80V_{cc} + 1 \times 0.01V_{cc}) = \pm 0.0278V_{cc}$

Y el resultado de la medición será

$$V = (17.80 \pm 0.03)V_{cc}$$

8) Qué métodos conoce para determinar la incertidumbre en una medición indirecta?

Cuando se realiza una medición indirecta, esto es, la variable a determinar depende de más de una medición, surge la necesidad de evaluar como pesan cada uno de los errores en el error del resultado final.

Sea una variable $X = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, entonces desarrollando por serie de Taylor, y considerando que los errores son tan pequeños tal que se pueden despreciar los términos de orden superior:

$$\begin{aligned} dX &= \left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right) \cdot dX_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2}\right) dX_2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n}\right) dX_n \\ \rightarrow \Delta X &\cong \left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right) \cdot \Delta X_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2}\right) \Delta X_2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n}\right) \Delta X_n \\ \rightarrow E_x &= \pm \left(\left| \left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right) \right| \cdot E_{X1} + \left| \left(\frac{\partial f}{\partial X_2}\right) \right| E_{X2} + \dots + \left| \left(\frac{\partial f}{\partial X_n}\right) \right| E_{Xn} \right) \end{aligned}$$

La cual se denomina ley de propagación de errores límites.

Método alternativo.

$$\begin{aligned} Z_{m\acute{a}x} &= Z + \Delta Z \\ Z_{m\acute{i}n} &= Z - \Delta Z \\ \hline \rightarrow Z_{m\acute{a}x} - Z_{m\acute{i}n} &= 2\Delta Z \\ \Delta Z &= \frac{Z_{max} - Z_{min}}{2} \end{aligned}$$

9) En un instrumento analógico, en qué parte de la escala conviene leer el valor medido?

Puesto que el error de clase E_c está dado por

$$E_c = \frac{\Delta clase}{alcance}$$

Y al mismo tiempo el error en la medición E debido a la clase es

$$E = \frac{\Delta clase}{medición}$$

Despejando $\Delta clase$ de la segunda ecuación y reemplazando en la primera

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{E \cdot medición}{alcance} \\ E &= \frac{E_c \cdot alcance}{medición} \end{aligned}$$

Luego, en un gráfico de Error con respecto a la medición se observa que cuanto mayor es la medición, menor es el error cometido. Por convención se toma como referencia el 1/3 final de la escala.

10) Conviene realizar mediciones indirectas que sean diferencia entre otras dos? Explique convenientemente la respuesta.

Sean A y B dos mediciones realizadas con instrumentos, se desea obtener indirectamente el error de X tal que $X = A - B$

$$E = \frac{\Delta X}{X} = \frac{\Delta(A - B)}{A - B} = \frac{\Delta A + \Delta B}{A - B}$$

Evidentemente, si la diferencia $A - B$ es muy pequeña el error aumenta.

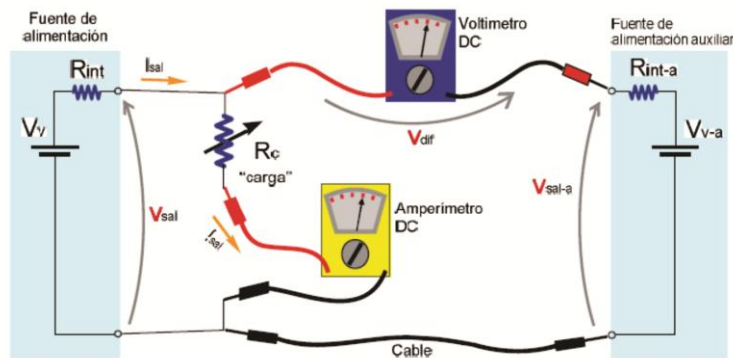
IV. Cuarta clase

1) Explique qué entiende por regulación de carga.

La regulación de carga es la capacidad de mantener una tensión constante en el canal de salida de una fuente de alimentación a pesar de los cambios en la carga de la alimentación (por ejemplo, un cambio en el valor de la resistencia conectada a través de la salida de la fuente).

2) Qué entiende por método de compensación para medir la regulación de carga? Qué beneficios tiene respecto del método directo?

- Medir la tensión en vacío V_v de la fuente.
- Montar el siguiente banco de medición.



- Con la rama del amperímetro desconectada, variar la tensión de la fuente auxiliar hasta que el voltímetro indique 0 V, con la mayor resolución posible.
- Conectar el amperímetro para que circule corriente por R_c . Variar la resistencia R_c hasta que la corriente indicada por el amperímetro sea la adoptada como nominal, verificando que no se esté trabajando en la zona de protección de la fuente.
- En la condición anterior, anotar el valor de la tensión medida por el voltímetro. Luego, el valor de regulación de carga será

$$\frac{V_{df}}{V_v}$$

La ventaja que posee el método de compensación en relación al método directo es que no se realiza la diferencia de tensiones $V_v - V_{sal}$, disminuyendo el error, puesto que

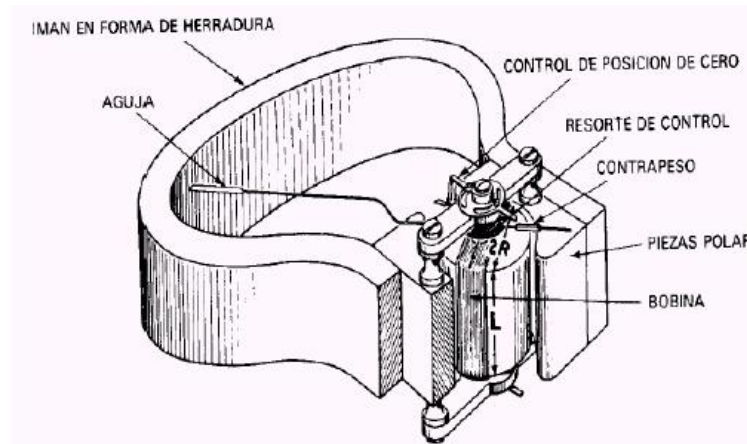
$$r = \frac{V_v - V_{sal}}{V_v}$$

$$\rightarrow \varepsilon = \frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta(V_v - V_{sal})}{V_v - V_{sal}} + \frac{\Delta V_v}{V_v} = \frac{\Delta V_v + \Delta V_{sal}}{V_v - V_{sal}} + \frac{\Delta V_v}{V_v}$$

Como $V_v \cong V_{sal}$, la diferencia $V_v - V_{sal}$ produce que el error ε tienda a ser muy grande en el método directo. Otra ventaja del método de compensación es que se involucra una sola incerteza en la medición ΔV_{dif} y no dos (ΔV_v y ΔV_{sal}) como ocurre en el método directo.

3) **Explique el principio de funcionamiento del instrumento de bobina móvil.**

Se trata de un instrumento formado por un imán permanente y dentro del campo creado por ese imán aparece una bobina móvil a la cual se encuentra solidariamente unida el índice o aguja.



Sabemos que sobre una espira con corriente inmersa dentro de un campo magnético aparecerá una fuerza, y si dicha espira se encuentra suspendida por su eje, también aparecerá una cupla o par de fuerzas.

Según la teoría del campo magnético, podemos escribir $F = BiL$. Si tenemos N espiras, debemos multiplicar por dicho valor, es decir $F = BiLN$. Además el par motor valdrá $C_m = BiLN2R$.

Por su parte el instrumento tiene resortes que cumplen una doble función, permiten que la corriente llegue a la bobina móvil, y además, crean la cupla resistente para lograr el equilibrio.

Cuando se alcanza dicho equilibrio, la cupla motora y la resistente deben igualarse, entonces $C_m = C_r$. Además la cupla resistente para un resorte de torsión es proporcional al ángulo girado, es decir $C_r = k\alpha$, donde α es el ángulo girado por el índice.

Finalizando, el ángulo girado por la aguja y, consecuentemente la lectura será proporcional a la corriente.

$$\alpha = \frac{2RBLN}{k} i = K_{cte} i$$

En general los valores de inducción magnética varían entre $0,15 \text{ T}$ y $0,5 \text{ T}$.

4) **Cómo sería la deflexión de la aguja que obtendría en un IBM básico, si se le aplica una corriente alterna?**

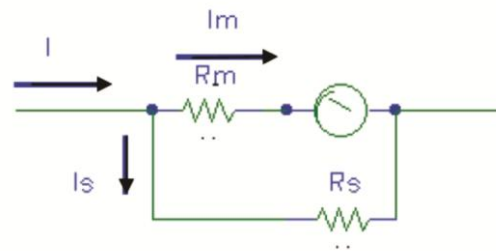
El galvanómetro de movimiento D'Arsonval responde al valor promedio o de *cd* de la corriente que circula por la bobina móvil. Si el galvanómetro conduce una corriente alterna con medios ciclos positivos y negativos, el par producido será en una dirección para el ciclo positivo y en la otra para el negativo. Si la frecuencia de la señal es muy baja, la aguja oscilará hacia adelante y hacia atrás alrededor del punto cero de la escala del medidor. A altas frecuencias, la inercia de la bobina es tan grande que la aguja no puede seguir rápidas inversiones del par y vibra suavemente alrededor del cero.

5) **Qué es la corriente de fondo de escala del IBM?**

La desviación máxima diseñada para el medidor se denomina desviación a fondo de escala. La corriente necesaria para producir esta desviación se denomina corriente a fondo de escala del instrumento.

6) **Qué haría para ampliar el rango de medición de un IBM como amperímetro?**

Como, en general, el instrumento de bobina móvil es muy sensible, si se quiere medir corrientes más grandes será necesario agregar una resistencia en paralelo con el instrumento de manera que por ella se derive la diferencia entre la corriente a medir y la máxima que puede manejar el instrumento.



Deberá cumplirse que la tensión sobre el instrumento sea igual a la caída en la resistencia R_s

$$I_s R_s = I_m R_m$$

Además $I_s = I - I_m$

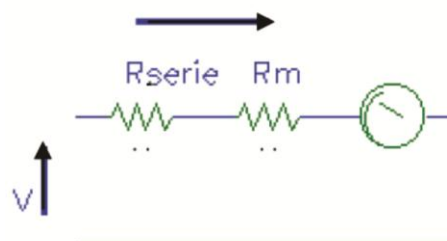
$$\rightarrow (I - I_m) R_s = I_m R_m$$

$$\rightarrow R_s = \frac{I_m R_m}{I - I_m}$$

7) **Qué haría para ampliar el rango de un IBM como voltímetro?**

Deberemos conectar ahora una resistencia en serie con el instrumento de tal forma que con la tensión máxima que se desea medir V se cumpla

$$V = I_m (R_m + R_{serie})$$



Por lo tanto, el valor de la resistencia serie estará dada por la expresión

$$R_{serie} = \frac{V}{I_m} - R_m$$

8) **Qué entiende por sensibilidad del voltímetro basado en un IBM?**

Para cada una de las escalas de voltaje, el cociente de la resistencia total del circuito R_T y el voltaje de la escala es siempre constante. Esta figura a menudo se conoce como sensibilidad o régimen ohm por volt, del voltímetro. Nótese que la sensibilidad

S es esencialmente el recíproco de la corriente de deflexión a plena escala del movimiento básico o

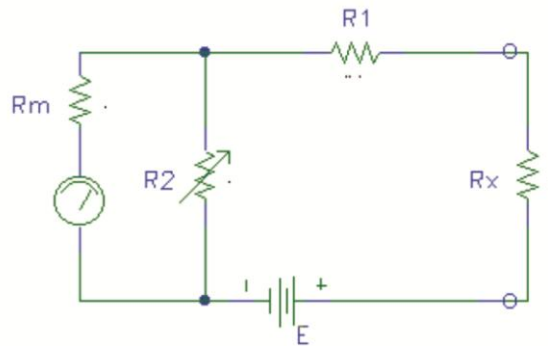
$$S = \frac{1}{I_{fsd}} \frac{\Omega}{V}$$

9)Cuál es el objetivo de la resistencia variable que posee el óhmetro basado en un IBM?

Cuando la resistencia desconocida $R_x = 0$ (terminales en cortocircuito), circula corriente máxima en el circuito. En estas condiciones, la resistencia variable se ajusta hasta que el galvanómetro indique la corriente a escala completa. La posición de la aguja para la corriente de escala completa se marca 0Ω .

10) Qué es la resistencia de media escala en un óhmetro basado en un IBM?

Una cantidad conveniente al uso en el diseño de un ohmiómetro tipo serie es el valor de R_x que origina media deflexión en el medidor. A esta posición, la resistencia a través de las terminales se define como la resistencia de media escala R_h . El circuito es analizable a partir de la corriente a escala completa I_{fsd} y la resistencia interna del galvanómetro R_m , el voltaje de la batería E y el valor deseado de la resistencia de media escala R_h ; esto es, se pueden calcular los valores de R_1 y R_2 .



El diseño se puede analizar ya que al introducir R_h se reduce la corriente a $\frac{I_{fsd}}{2}$, y la resistencia desconocida debe ser igual a la resistencia interna del ohmiómetro.

$$R_h = R_1 + \frac{R_2 R_m}{R_2 + R_m}$$

La resistencia total que se presenta a la batería es igual a $2R_h$, y la corriente necesaria para la deflexión a plena escala es

$$I_h = \frac{E}{2R_h}$$

Para producir la deflexión a plena escala, la corriente por la batería se debe duplicar, o sea

$$I_t = 2I_h = \frac{E}{R_h}$$

La corriente de derivación a través de R_2 es

$$I_2 = I_t - I_{fsd}$$

El voltaje en la resistencia de la derivación es igual al voltaje en el galvanómetro

$$\begin{aligned} I_2 R_2 &= I_{fsd} R_m \\ \rightarrow R_2 &= \frac{I_{fsd} R_m}{I_2} \end{aligned}$$

$$\rightarrow R_2 = \frac{I_{fsd} R_m}{I_t - I_{fsd}} = \frac{I_{fsd} R_m}{\frac{E}{R_h} - I_{fsd}} = \frac{I_{fsd} R_m R_h}{E - I_{fsd} R_h}$$

Como

$$R_1 = R_h - \frac{R_2 R_m}{R_2 + R_m}$$

$$\rightarrow R_1 = R_h - \frac{I_{fsd} R_m R_h}{E}$$

11) Qué procedimiento previo a la medición debe realizar con un óhmetro basado en un IBM?

Antes de cada medición se debe verificar la calibración del cero de la escala, cortocircuitando las terminales de salida y observando la lectura del instrumento. Si el mismo defleca a escala completa, el instrumento funciona esperadamente. De otra manera la tensión de la batería ha disminuido y se debe ajustar el valor de la resistencia R_2 hasta que la corriente por el galvanómetro sea máxima.

V. Quinta clase

1) Defina lo que entiende como valor medio de una onda periódica.

Se define valor medio de una onda $f(t)$ de periodo T

$$\frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

Si la función $f(t)$ representa la intensidad de corriente en el tiempo, entonces el valor medio de $f(t)$ es la función continua tal que la carga acumulada por la misma, en un periodo, es igual a la carga que acumularía el valor medio en el mismo período.

2) Defina lo que entiende por valor eficaz de una onda periódica.

Se defina valor eficaz de una onda $v(t)$ de periodo T

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |v(t)|^2 dt}$$

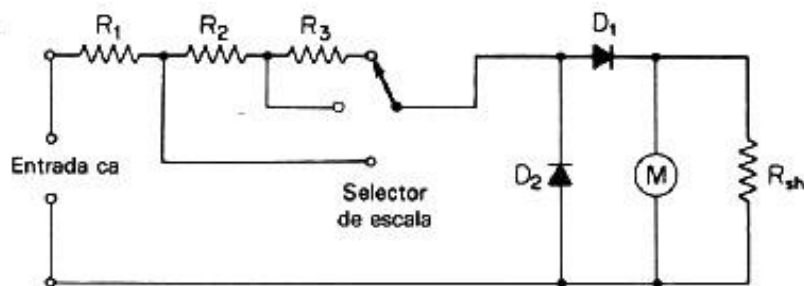
El valor RMS o valor eficaz es el valor del voltaje o corriente alterna que produce el mismo efecto de disipación de calor que su equivalente voltaje o corriente, en corriente continua sobre una misma resistencia.

3) Si mide una onda cuadrada en AC con un voltímetro analógico, mide el valor eficaz de esa señal?

Como los voltímetros están calibrados para realizar mediciones sobre señales senoidales, si se mide una onda cuadrada el valor no será el esperado, esto es, la lectura del instrumento no es el valor eficaz de la señal.

4) Dibuje un circuito que permita realizar la conversión de media onda en un multímetro analógico.

Se emplean dos diodos en este circuito, con el galvanómetro conectado de forma que sólo reciba la mitad de la corriente rectificada.



El diodo D_1 conduce la mitad del ciclo positivo de la señal de ca de entrada y hace que el medidor deflecte de acuerdo con el valor promedio de esa mitad del ciclo. La bobina móvil del medidor tiene una resistencia en derivación R_{sh} con el objeto de que circule más corriente por el diodo D_1 y así mover su punto de operación dentro de la parte lineal de su curva característica. Sin el diodo D_2 , la mitad del ciclo negativo del voltaje de entrada aplicaría un voltaje inverso a través del diodo D_1 , produciendo una pequeña corriente de fuga en la dirección inversa. En el semiciclo negativo, D_2 conduce completamente, y la corriente a través del circuito de medición, que ahora es en dirección opuesta, no pasa por el movimiento del medidor.

- 5) Si el instrumento es de media onda, cuál es el factor de forma que usa para la escala?

$$f_f = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cong 2,22$$

- 6) Si el instrumento es de onda completa, cuál es el factor de forma que usa para la escala?

$$f_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cong 1,11$$

- 7) Qué operaciones puede enumerar que realiza un instrumento digital de valor medio para medir una forma de onda?

- Filtra la componente continua de la señal.
- Rectifica la señal alterna pura.
- Calcula el valor medio de la señal rectificada y multiplica el valor obtenido por el factor de forma.

- 8) Qué tipo de voltímetro introducirá menor error de carga, uno analógico o uno digital?

Como los voltímetros digitales poseen impedancias de entrada mucho mayores que los analógicos, éstos introducen menor error de carga.

- 9) Qué tipo de instrumentos de valor eficaz verdadero conoce?

Voltímetro de valor eficaz verdadero AC y AC+DC (¿?)

- 10) Si mide una onda senoidal pura con los instrumentos analógico, digital y de valor eficaz verdadero, qué diferencias tendrían las lecturas?

No habría diferencia, suponiendo que el error producido por todos los instrumentos es despreciable, puesto que tanto el IBM como el DVM están calibrados para la medición de ondas senoidales. En el TRMS se observa el valor eficaz de cualquier onda, en particular de ondas senoidales.

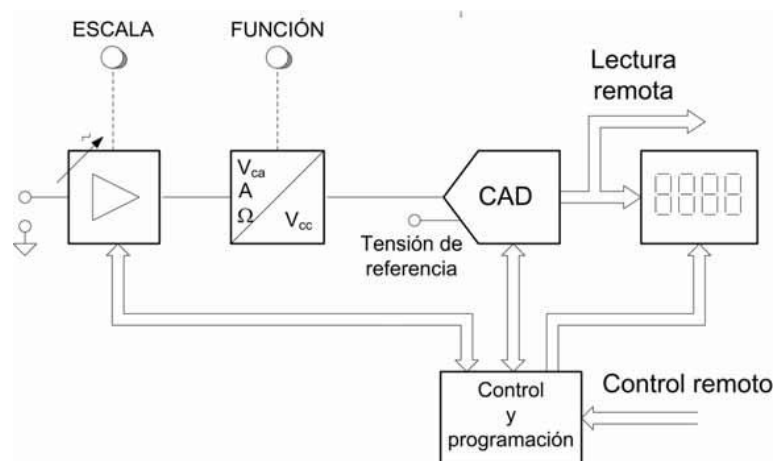
- 11) Si se dispone de un voltímetro de valor eficaz verdadero de AC solamente. Qué procedimiento realizaría para medir una señal que tiene además un valor medio no nulo?

- Obtener el valor medio v_{medio} de la señal de entrada, esto es, averiguar su componente continua.
- Medir la tensión eficaz de la componente alterna pura de la señal.
- Aplicar la igualdad de Parseval

$$v_{RMS(AC+DC)} = \sqrt{v_{medio}^2 + v_{RMS(AC)}^2}$$

VI. Sexta clase

- Dibuje un diagrama de bloques de un multímetro digital, indicando la función de cada bloque.



La figura representa el esquema de bloques funcionales de un DMM genérico, con indicación de los puntos donde inciden los controles de ESCALA y FUNCIÓN dispuestos en panel frontal.

Con el atenuador/amplificador se adapta el valor de la magnitud de entrada al campo de tensiones de entrada del convertidor A/D, que suele ser de entre 0 V y 1 V, a entre 0 V y 10 V. Esta etapa ofrece, además, la impedancia de entrada adecuada a la magnitud que se va a medir (alta para tensiones, baja para corrientes). El circuito de control se informa de la escala de medida elegida o la establece, en función de la selección en el panel frontal o bien según el resultado de la conversión A/D, si posee cambio de escala automático.

El bloque de conversión a tensión continua es necesario porque el convertidor A/D sólo admite tensiones continuas a su entrada. Por ello se convierten las corrientes y resistencias en tensiones, y las tensiones alternas, en continuas. Los elementos que convierten un mensurando eléctrico alterno en una corriente continua, una tensión continua o una señal digital, para propósitos de medida, se denominan transductores de medida eléctrica.

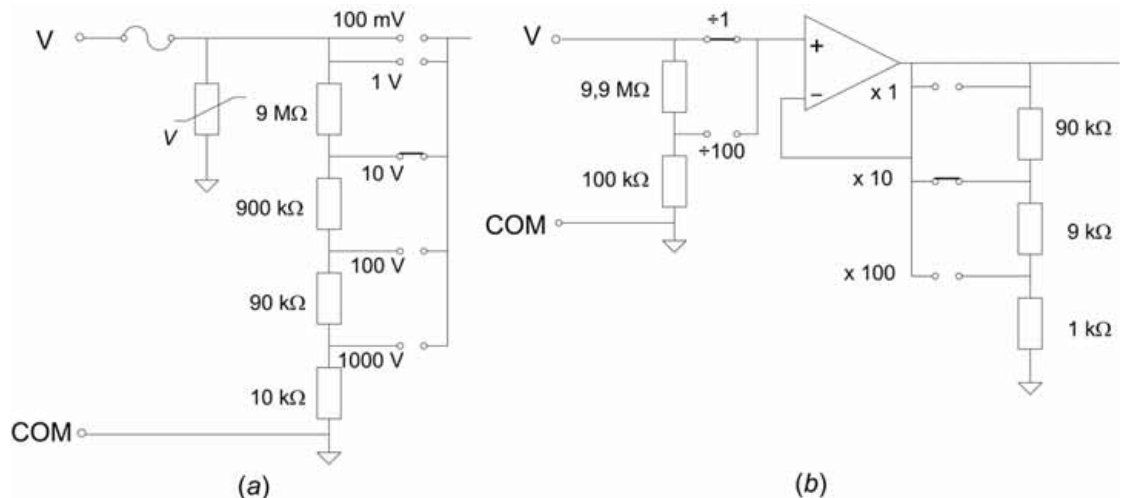
El convertidor A/D obtiene el valor de los dígitos a partir de la tensión de entrada, es decir, obtiene el valor indicado a partir del cual se calcula el resultado de la medida (valor medido e incertidumbre). También determina la velocidad de lectura, y en parte, el rechazo de las interferencias de red. Junto con los circuitos de entrada, determina el número de escalas, la resolución y la incertidumbre de la medida. La

tensión de referencia es una tensión continua conocida y determina en gran parte la estabilidad o derivas del instrumento.

El circuito de control y programación determina la secuencia de operaciones y controla la presentación de la indicación: valor numérico, polaridad, punto decimal y unidades, y acepta instrucciones de programación externas.

- 2) **Bosqueje un circuito que permita trabajar como un atenuador de entrada y que mantenga constante la resistencia de entrada.**

El atenuador es el elemento que establece la impedancia equivalente de entrada del instrumento, le protege frente a sobretensiones y sobrecorrientes, y fija el valor máximo de la tensión aplicada al CAD. Puede ser un circuito meramente pasivo (a), o puede estar combinado con un amplificador (b).



En ambos casos se emplean redes de resistencias con una relación entre valores bien definida y estable.

En (a) el fusible en serie con la entrada evita los daños por corrientes altas, mientras que el varistor limita el valor de tensión pico. La resistencia equivalente de entrada en (a) es de $10\text{ M}\Omega$ para todas las escalas, que es el valor habitual. En alterna hay que considerar una capacidad del orden de 75 pF a 100 pF en paralelo con dicha resistencia. Con este esquema, en la escala de 100 mV , o bien se usa una referencia 10 veces menor en el CAD, o bien se da una ganancia previa de 10 antes de digitalizar la tensión.

Cuando se emplea una combinación atenuador-amplificador (b), se utiliza atenuación previa porque el campo de tensiones que acepta el amplificador es limitado y no soporta tensiones superiores a las de la alimentación propia.

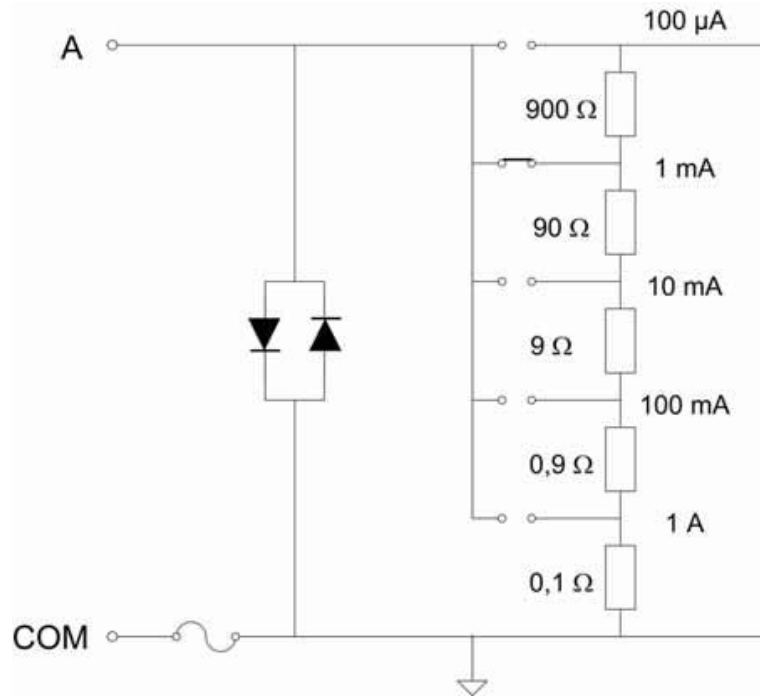
- 3) **Bosqueje un circuito que permita convertir corriente en tensión para poder medir corriente en un DVM.**

Los convertidores corriente-tensión en multímetros digitales están basados en la ley de Ohm, cuando la corriente circula por una resistencia conocida, produce una caída de tensión, y ésta se digitaliza con el CAD (tras convertirla en tensión continua si la corriente era alterna). En un DMM, la resistencia (shunt) para medir intensidades de

corriente se elige de modo que la tensión máxima en cada escala de corriente sea la misma, la máxima que admite el circuito posterior, es decir, el CAD.

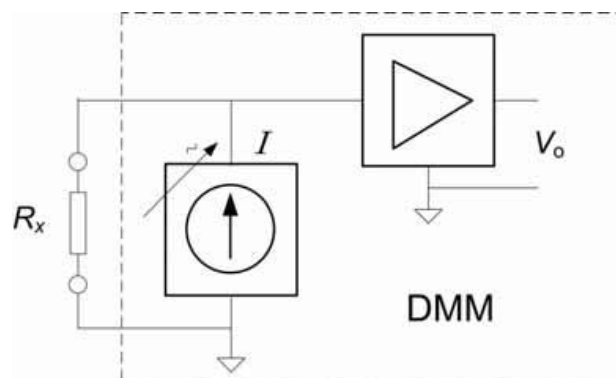
Los dos diodos conectados en antiparalelo protegen frente a tensiones elevadas (pero inferiores a las permitidas por el varistor) y el fusible limita la corriente máxima.

A diferencia de lo que sucede en la medida de tensiones, la impedancia de entrada varía ahora según la escala, y no siempre es tan baja como se desearía.



- 4) Bosqueje un circuito que permita medir resistencia en un DVM, explique las correcciones que debería realizar.

Para obtener una tensión continua a partir de una resistencia se hace circular por ésta una corriente de intensidad constante, que tenga una baja incertidumbre intrínseca, y se mide la caída de tensión en bornes de la resistencia desconocida.



La intensidad de la corriente se elige según el valor de las resistencias que se desea medir, que pueden ser desde $100\text{ m}\Omega$ hasta unos $300\text{ M}\Omega$. Pero, dado que el DMM aplica una corriente a la resistencia, con este método no se pueden medir resistencias conectadas en un circuito por el que circule corriente.

La fuente de corriente se puede obtener, por ejemplo, poniendo en serie con una fuente de tensión constante una resistencia conocida, elegida según la escala de

medida. El CAD mide entonces la relación entre la caída de tensión en dicha resistencia interna y la caída de tensión en la resistencia que se mide, de manera que el resultado es independiente del valor de la intensidad de la corriente inyectada en la resistencia desconocida.

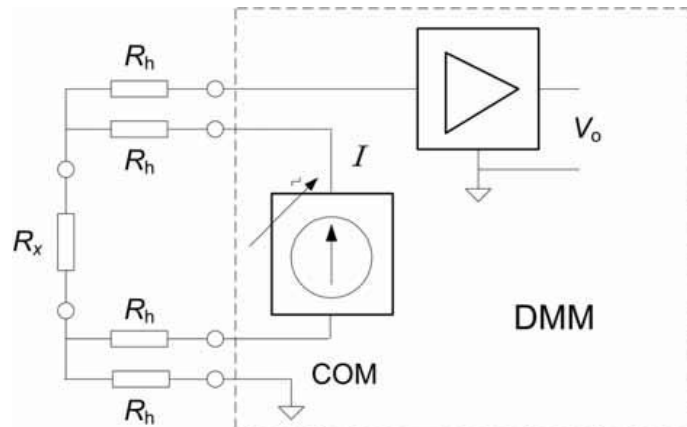
La tensión obtenida en bornes de la entrada del DMM es

$$V_m = IR_x$$

Pero si se considera la resistencia de cada cable de conexión R_h resulta

$$V_m = I(R_x + 2R_h)$$

De modo que el resultado incluye el efecto de los hilos. Para evitar este efecto, o bien se mide primero la resistencia de los hilos y luego se resta, o bien se emplea un *circuito de medida con cuatro hilos*



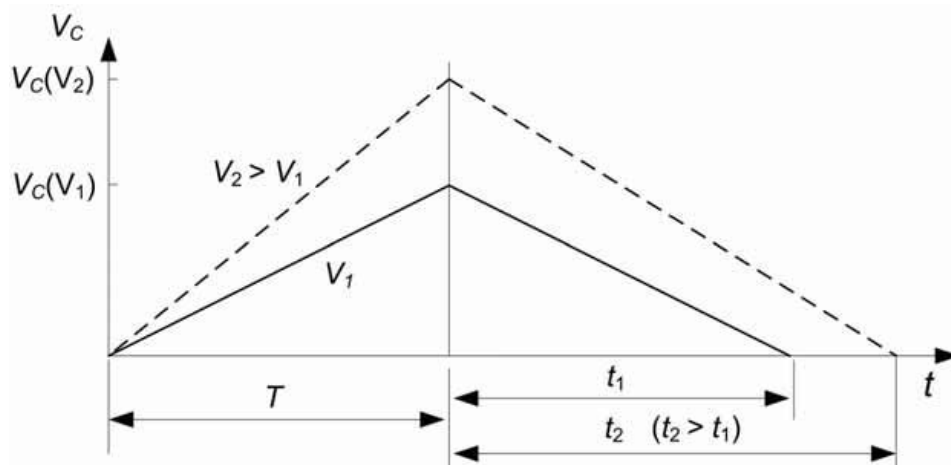
Si el amplificador tiene alta impedancia de entrada, la mayor parte de la corriente circulará por R_x , sin pasar por los hilos empleados para medir la caída de tensión. Para aplicar este método, la fuente de corriente debe ser flotante respecto al borne común del DMM.

5) **Explique conceptualmente cuál es el objetivo del conversor A/D.**

Es un dispositivo electrónico capaz de convertir una señal analógica de voltaje en una señal digital con un valor binario.

6) **Explique conceptualmente cuál es el principio de funcionamiento de un conversor A/D de tipo integración en doble rampa.**

En un CAD de doble rampa se convierte la tensión analógica de entrada en una corriente proporcional que se integra cargando un condensador durante un tiempo fijo determinado por un oscilador de frecuencia estable (primera rampa). El condensador se descarga luego (segunda rampa) mediante una corriente proporcional a una tensión de referencia interna, conocida y estable, y de signo opuesto a la entrada. El tiempo que tarda en descargarse el condensador es proporcional a la tensión de entrada.



Al final del tiempo de carga fijo T , el condensador alcanza una tensión

$$V_C = \frac{1}{\tau} \int_0^T V_x dt = \frac{V_x}{\tau} T$$

Donde τ es la constante de tiempo del integrador. La descarga hasta $0 V$ cuando se aplica una tensión de referencia V_r dura un tiempo t_x tal que

$$0 - V_C = \frac{1}{\tau} \int_T^{T+t_x} V_r dt = \frac{V_r}{\tau} t_x$$

De estas dos ecuaciones se deduce

$$\begin{aligned} \frac{V_x}{\tau} T &= -\frac{V_r}{\tau} t_x \\ \rightarrow \frac{t_x}{T} &= -\frac{V_x}{V_r} \end{aligned}$$

La relación entre la tensión de entrada y la de referencia se puede obtener, pues, midiendo una relación de tiempos.

7)

6) Explique conceptualmente cuál es el principio de funcionamiento de un conversor A/D tipo de integración en doble rampa.

7) ¿La indicación de un DVM en AC, dependerá de la frecuencia?

8) Si la respuesta anterior es positiva, indique los factores que influyen en el rango de utilización de frecuencias del instrumento.

9) ¿Conoce algún otro elemento aparte de la resistencia de entrada del DVM, que influye en el efecto de carga en AC?

- 10) ¿Un volt. en AC, se comporta del mismo modo al medir una onda senoidal que una onda cuadrada? Explique los fundamentos, si entiende que hay diferencias.
- 11) Qué mediría un DVM en DC al aplicarse una onda cuadrada.

VII.