



# ELECTROTECNIA Y ELECTRÓNICA

(Mecánica - Electromecánica - Computación)

## TRABAJO DE APLICACIÓN N° 11

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

**TRANSDUCTORES - SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN:** Medición de esfuerzo, deformación, temperatura y presión.

**NOTA:** Adjuntos al presente TAp se incluyen tablas y hojas de datos necesarios para la resolución de algunos de los ej.

**REPASAR:** Circuitos en corriente continua. Resolución de circuitos. Amplificadores operacionales.

### EJERCICIO N° 01:

- Realizar el esquema completo de un sistema de instrumentación típico describiendo sus partes componentes.
- Explicar el principio de funcionamiento de los transductores conocidos.
- Para los transductores del punto b) efectuar una clasificación.

**Sugerencia:** Tomar como base la magnitud a medir y las características de conversión de energía de los transductores involucrados.

### EJERCICIO N° 02:

El circuito de la figura representa un acondicionador de señales de un sensor de temperatura que está representado por una **fente de tensión real**  $u_e$ . El sensor tiene una constante de proporcionalidad de  $10 \mu V/^{\circ}C$  y se puede considerar lineal.  $R_i = 5 \Omega$  es la resistencia interna del sensor y  $R_2 = 10 k\Omega$ ,  $R_1 = 50 \Omega$  los resistores que definen la amplificación del circuito.

- Describir los sensores de temperatura típicos indicando características principales, aplicaciones y datos de interés.
- Obtener la tensión de salida en función de la tensión de entrada explicando los pasos seguidos

**Sugerencia:** Utilizar el concepto de cortocircuito virtual.

RESPUESTA:  $u_s(t) = 201 \cdot u_e$ .

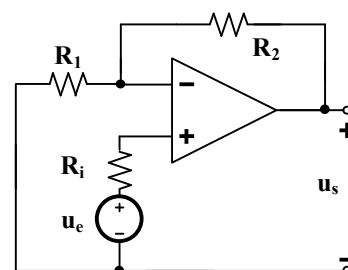
- Si  $u_s = 1,206 V$  y si, además, se considera que para  $T = 0^{\circ}C$ ,  $u_s = 0 V$ , determinar la temperatura que mide el sensor. Obtener una gráfica de temperatura en función de la  $u_s$ .

**Sugerencia:** Relacionar los datos medidos con la ley de funcionamiento del sensor.

RESPUESTA:  $T = 600^{\circ}C$ .

- Explicar cómo afecta en este circuito la resistencia interna del sensor. En este sentido, ¿qué hubiera sucedido si se hubiera utilizado un amplificador inversor? Sacar conclusiones.

RESPUESTA:  $u_s(t) = -182 \cdot u_e$ .



### EJERCICIO N° 03:

Se construye un puente de Wheatstone con una única galga extensométrica activa de valor nominal  $R_N = 120 \Omega$  y factor  $k = 2,0$ . El puente se alimenta con una fuente de tensión continua  $U_f = 12 V$ . Los resistores en las restantes ramas son del mismo valor.

- Explicar qué es una galga (strain gauge), para qué se utiliza y que propiedades tiene.
- Determinar la tensión de salida del puente en función de la deformación. Calcular dicha tensión cuando la deformación de la galga es  $5 mm/m$ .

RESPUESTA:  $U_{AB} = 29,85 mV$ .

- ¿Qué error se cometería si se considerase el funcionamiento del puente como totalmente lineal?

RESPUESTA:  $e_{rel} = -0,5\%$ ,  $E_{abs} = 150 \mu V$ .

- Si se acepta un error de hasta  $5 \%$  en la medición ¿Cuál debe ser el valor límite de la deformación?

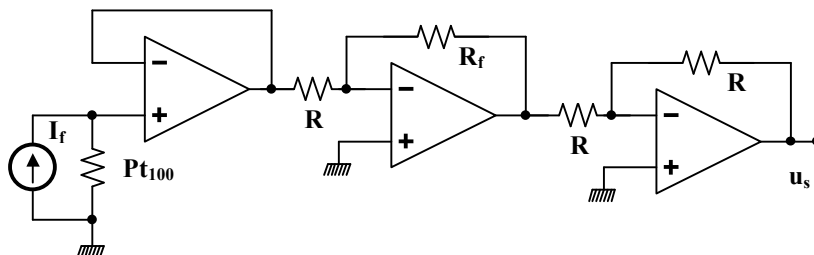
RESPUESTA:  $\delta \leq 50 mm/m$ .



#### EJERCICIO N° 04:

El circuito de la figura se utiliza para medir temperaturas por medio de un sensor de tipo  $Pt_{100}$ .  $I_f$  es una fuente de corriente continua.  $I_f = 10 \text{ mA}$  y  $R = 10 \text{ k}\Omega$ .

- a) Explicar las propiedades de los termorresistores y datos típicos.



- b) Explicar el funcionamiento del sensor mostrado, su curva y definir la relación entre resistencia y temperatura mediante una ecuación o una tabla.  
c) Calcular  $R_f$  para que a  $100^\circ\text{C}$  la indicación del voltímetro sea  $10 \text{ V}$ . ¿Cuánto vale la tensión de salida a  $T = 0^\circ\text{C}$ ?

RESPUESTA:  $R_f = 72.202 \Omega$ .

#### EJERCICIO N° 05:

Para efectuar un ensayo de alargamiento de una barra de cierto material, se usa una galga extensométrica, cuyo factor de galga vale  $1,8$  y la resistencia en reposo es igual a  $120 \Omega$ . La galga forma parte de un puente de medición, ocupando una de las ramas. Si la fuente de tensión que alimenta al puente es de  $9 \text{ V}$  y la tensión que indica el instrumento vale  $11,3 \mu\text{V}$ .

- a) ¿A qué valor de alargamiento corresponde la tensión eléctrica medida?

RESPUESTA:  $\Delta l = 2,8 \mu\text{m}$ .

- b) Si se desea compensar las variaciones de temperatura y las longitudes de los cables de conexión ¿qué disposición de elementos debería adoptarse para el circuito?  
c) Se desea registrar la deformación en una computadora. Para ello se utiliza un adquisidor de señales cuya tensión de entrada máxima es de  $5 \text{ V}$ . Proponer un circuito amplificador que permita llevar la tensión de salida del puente a dicho valor de  $5 \text{ V}$  si la deformación máxima esperada es de  $200 \mu\text{m}$ .

RESPUESTA: Amplificador diferencial con relación  $R_f / R = 6.172$ .

#### EJERCICIO N° 06

El control de temperatura en el tambor de una tostadora de granos de café se realiza con circuitos como el de la figura. Cuando la temperatura supera  $T_{\text{máx}} = 250^\circ\text{C}$  se activa el circuito que inyecta agua al tambor de la tostadora y activa una sirena. Los datos: termocupla cromel-alumel (tipo K) con  $\alpha = 43 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ;  $U_r = 0,4 \text{ V}$ ;  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ .

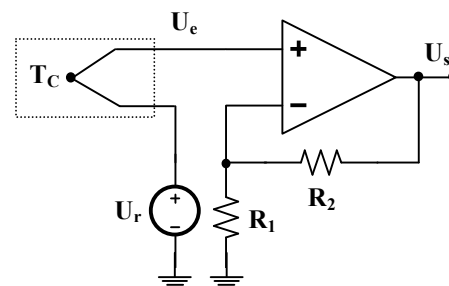
- a) Describir los distintos tipos de termocupla indicando diferencias.  
b) Calcular la tensión de salida en función de la temperatura.

**Sugerencia:** Tener en cuenta la información de la TC tipo K de las hojas de datos provistas.

RESPUESTA:  $U_s = 0,8 + 86 \mu\text{V} \cdot T$ .

- c) Determinar  $U_r$  para que a  $T = 1200^\circ\text{C}$  la tensión de salida sea de  $5 \text{ V}$ .

RESPUESTA:  $U_r = 2,45 \text{ V}$ .



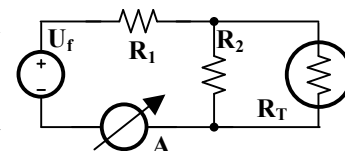
#### EJERCICIO N° 07:

El circuito de la figura se usa para medir la temperatura del agua de refrigeración de un intercambiador de calor.  $R_T$  es un termistor de las siguientes características:  $R_{25^\circ\text{C}} = 100 \text{ k}\Omega$  y  $B = 2800 \text{ K}$  y  $U_f = 12 \text{ V}$ . El instrumento es lineal, teórico y de  $1 \text{ mA}$  de fondo de escala. Se desea que entre el  $30\%$  y el  $80\%$  de la escala el instrumento indique  $48,73^\circ\text{C}$  a  $100,38^\circ\text{C}$ .

- a) Dibujar  $R = f(T)$  y calcular  $R_1$  y  $R_2$ .

RESPUESTA:  $R_1 = 1.195 \Omega$ ,  $R_2 = 173.318 \Omega$ .

- b) Graficar la relación corriente-temperatura y dibujar la escala de temperatura que tendrá el instrumento, indicando los valores extremos y algunos intermedios.



#### EJERCICIOS ADICIONALES

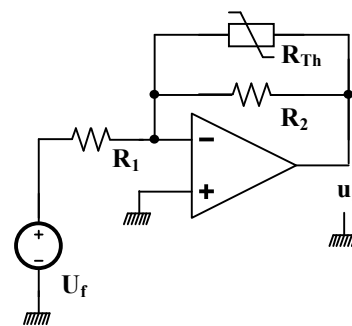
**Sugerencia:** Resolver todos los ejercicios siguiendo las pautas establecidas para los ejercicios anteriores: No dar por hechos u obvios suposiciones o afirmaciones, nada debe darse por implícito. Plantear, explicar, justificar, respetar la nomenclatura y simbología. En este caso, el hábito hace al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



### EJERCICIO N° 08:

El circuito de la figura es usado para medir la temperatura de una cámara refrigeradora.  $R_{Th}$  es un termistor de las siguientes características:  $R_{25^{\circ}C} = 10 \text{ k}\Omega$  y  $B = 2800 \text{ K}$ . El instrumento es lineal, teórico y de fondo de escala  $U_{m\acute{a}x} = 12 \text{ V}$ . Se desea que entre el 30% y el 80% de la escala el instrumento indique  $100^{\circ}C$  a  $50^{\circ}C$ .  $U_f = 12 \text{ V}$ .

- Indicar cómo se clasifican los transductores.
- Explicar el principio de funcionamiento de un termistor e indicar aplicaciones típicas. Dibujar  $R_{Th} = f(T)$ .
- Calcular los resistores para obtener la relación solicitada. Graficar la relación tensión de salida-temperatura y comparar con la curva del termistor. Sacar conclusiones.



RESPUESTA:  $R_1 = 381 \Omega$ ,  $R_2 = 15.130 \Omega$ .

### EJERCICIO N° 09:

Se utiliza un puente de Wheatstone para efectuar la medición del esfuerzo mediante una galga de  $350 \Omega$  de resistencia nominal en una de las ramas y resistores del mismo valor en las ramas restantes. Se dispone de un microamperímetro de resistencia interna igual a  $150 \Omega$  para medir la señal de salida del puente. El factor de la galga vale 2,04 y la tensión de la fuente es 22,5 V. Encontrar la lectura del instrumento para una deformación de  $1200 \mu\text{m/m}$ .

**Sugerencia:** Utilizar el circuito equivalente de Thevenin visto desde la salida del puente.

RESPUESTA:  $I_a = 27,5 \mu\text{A}$ .

### EJERCICIO N° 10:

La figura muestra un esquema de un transductor de fuerza formado por una planchuela de acero dulce (módulo de elasticidad  $E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ) en voladizo.

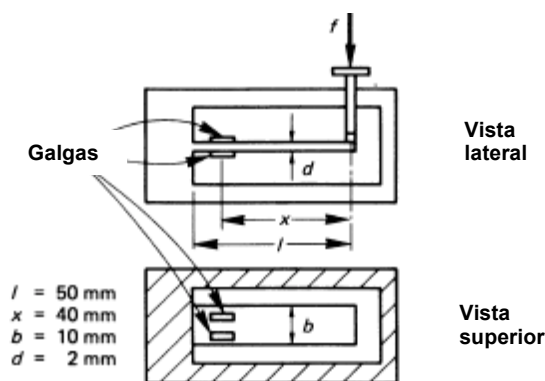
Cuatro galgas extensométricas metálicas (factor  $k = 2$  y  $R = 120 \Omega$  en reposo) están pegadas a las caras superior e inferior de la planchuela, como se ve en la figura, y están conectadas formando un circuito puente excitado con una fuente continua de 12 V. A su vez, la salida del puente se conecta a un amplificador de ganancia  $A = 200$ . El amplificador se alimenta con  $U_{cc} = \pm 15 \text{ V}$ .

- Dibujar el circuito del puente más el amplificador y su correspondiente circuito equivalente, indicando la disposición de las galgas en el puente de acuerdo a su ubicación en la planchuela.
- Con los datos dados obtener la expresión de la tensión de salida del amplificador en función de la fuerza aplicada.

RESPUESTA:  $u_s = 0,29 \cdot f$

- Calcular las resistencias de realimentación del amplificador si la fuerza máxima aplicada debe ser  $f = 100 \text{ N}$  considerando que el amplificador operacional no puede desarrollar más tensión de salida que su tensión de alimentación.

RESPUESTA:  $R_f = 12.5 \text{ k}\Omega$ .



**NOTA:** Una fuerza  $f$  en el extremo libre produce un esfuerzo en la superficie de la planchuela cuya expresión es

$$\sigma = 6 \frac{fx}{bd^2}$$

### 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° 11

Una aeronave dispone de un medidor de la temperatura a la que se encuentra operando el generador principal. El elemento sensor de temperatura consiste en una termocupla que posee los siguientes datos:

- Tipo: **Termocupla K**.
- Rango de trabajo: **0 a  $1200^{\circ}C$** .
- Tensión de salida:  **$41,32 \mu\text{V}/^{\circ}C$**  (se considera lineal en todo el rango de temperaturas medidas).
- Resistencia interna:  **$1 \Omega$** .

La temperatura máxima que puede alcanzar el generador es de  $250^{\circ}C$ . Para registrar la temperatura se elige un medidor digital lineal y que marca  $250^{\circ}C$  cuando se le aplica una tensión de 5 V (fondo de escala). Su resistencia interna  $R_i$  es de

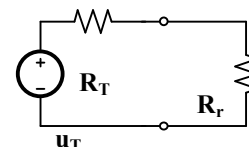


**10 kΩ.**

- Explicar qué temperatura marcaría el medidor si se conectara la termocupla en forma directa al equipo medidor y proponer una solución.
- Utilizar solamente circuitos inversores que amplifiquen la señal de la termocupla y calcular los componentes para llevar el fondo de escala de **250 °C** a **5 V**. Observar que el medidor no admite tensiones negativas.
- Realizar los cálculos nuevamente suponiendo que en lugar de una termocupla se utiliza un sensor que tiene la misma relación tensión – temperatura pero una impedancia interna de **10kΩ**. Explicar qué sucede y proponer una solución para resolver el problema.

RESOLUCIÓN:

- El modelo que se toma para la termocupla es el de una fuente de tensión real y el registrador se modela mediante un elemento resistivo de **10 kΩ**:



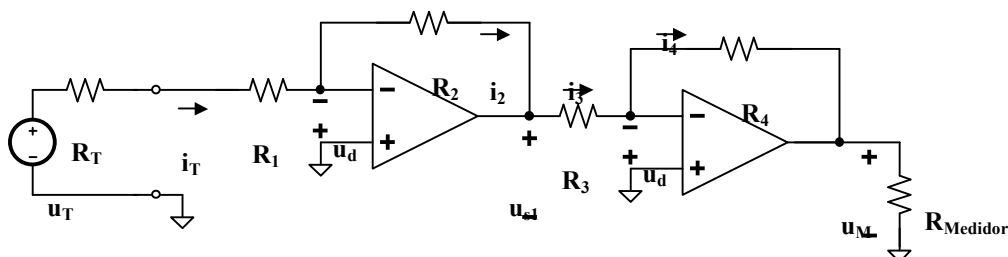
De acuerdo al circuito anterior, la tensión aplicada en el registrador es:  $u_{Medidor} = u_T \cdot \frac{R_{Medidor}}{R_{Medidor} + R_T} \approx u_T$

La aproximación puede realizarse ya que la  $R_T$  de la termocupla es mucho menor que la  $R$  de entrada del registrador.

Suponiendo que la termocupla se comporta linealmente, cuando la temperatura medida es **250 °C**, la misma presenta una tensión a circuito abierto de:  $u_{T-250^{\circ}C} = 41,32 \mu V/^{\circ}C \cdot 250^{\circ}C = 10,33 mV$

Si el medidor marca **250 °C** cuando se le aplican **5 V** entonces, cuando se le aplican los **10,33 mV** de la termocupla, registra una temperatura **0,52 °C** en lugar de **250 °C**. Debido a esto la señal de la termocupla debe amplificarse de **10,33 mV** a **5 V**, es decir, **484** veces.

- La tensión de la termocupla debe amplificarse pero si se utiliza un circuito amplificador inversor, la tensión queda negativa. El circuito propuesto para resolver el problema es utilizar dos etapas inversoras en cascada. La amplificación total debe ser **484** veces. Se propone conectar 2 etapas iguales de igual amplificación en cascada:



Es recomendable analizar cada etapa por separado aplicando el concepto de cortocircuito virtual.

Para la primera etapa:  $\begin{cases} i_2 \approx i_T \\ u_d \approx 0 \end{cases}$

Planteando 1ra y 2da ley de Kirchhoff:  $i_T = u_T / (R_1 + R_T)$  ;  $u_{s1} = -i_2 \cdot R_2$ . Entonces:  $u_{s1} = -\frac{R_2}{R_1 + R_T} \cdot u_T$

Para la segunda etapa:  $\begin{cases} i_3 \approx i_2 \\ u_d \approx 0 \end{cases}$

Planteando 1ra y 2da ley de Kirchhoff:  $i_3 = u_{s1} / R_3$  ;  $u_M = -i_4 \cdot R_4$ . Entonces:  $u_M = -\frac{R_4}{R_3} \cdot u_{s1}$

El resultado total es:  $u_M = \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_T} \cdot u_T$

Si se elige  $R_1 \gg R_T$ , entonces:  $u_M \approx \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot u_T$

De acuerdo al planteo anterior, la amplificación deberá ser:  $\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} = 22$

Se eligen valores para cumplir con la aproximación anterior:  $R_1 = R_3 = 1k\Omega \Rightarrow R_2 = R_4 = 22k\Omega$

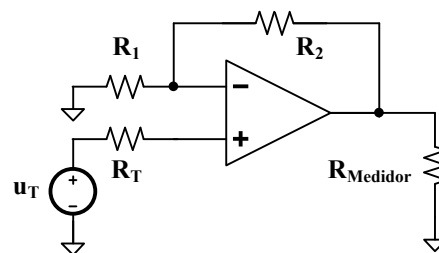
La relación entre la tensión y la temperatura resulta:  $u_M \approx 484 \cdot u_T = 0,02 \cdot T$

La resistencia de entrada del registrador no afecta en la relación de amplificación debido a la muy baja resistencia de salida de los amplificadores operacionales.



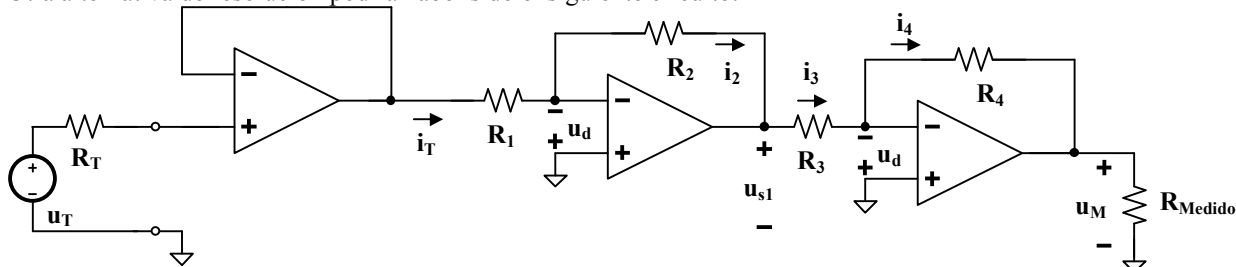
- c) Si la resistencia interna del sensor es de **10 kΩ** entonces no es despreciable y su valor altera la amplificación del circuito. No es deseable que esto suceda ya que el valor de resistencia interna de un sensor no es un dato confiable y puede variar con la temperatura, el tiempo, etc.

Existen varias formas de resolver este inconveniente, una de ellas se muestra en el siguiente circuito:



Si se analiza se puede observar que en este circuito la resistencia interna del sensor no altera el funcionamiento ya que en las entradas inversora y no inversora no se establece corriente debido a la gran impedancia de entrada que los amplificadores operacionales presentan. Además, este amplificador no invierte la tensión.

Otra alternativa de resolución podría haber sido el siguiente circuito:



En este circuito se agrega un amplificador operacional en configuración seguidor.

La tensión de salida de esta primera etapa es igual a la tensión a circuito abierto del sensor y por lo tanto su resistencia interna no afecta al circuito. De esta forma se agrega un componente a la entrada y no se modifica el circuito original.

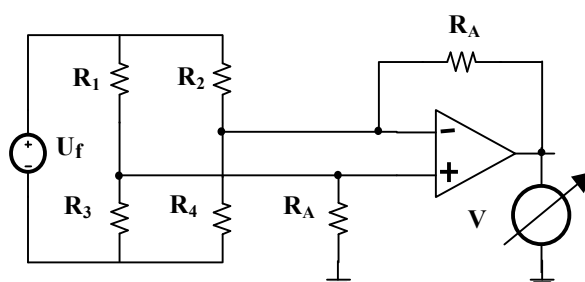
## EJERCICIO N° 12

Se desea medir presiones de hasta **5 psi** (**1 psi = 6,89 kPa**), con un sensor marca SenSym, cuyas hojas de características se adjuntan.

La amplificación de la señal de salida del sensor se efectúa mediante un amplificador operacional en configuración diferencial cuyo circuito se muestra en la figura, donde

$$R_1 = R_4 = R \cdot (1-x)$$

$$R_2 = R_3 = R \cdot (1+x)$$



Si se dispone de una fuente de continua  $U_f = 5 \text{ V}$  para alimentar el puente y el rango del instrumento indicador es de **2 V**, calcular el valor  $R_A$  para que la lectura de instrumento corresponda con el fondo de la escala cuando la presión aplicada sea la máxima. Suponer que la tensión de offset de salida (o de desbalance) del puente ( $U_{os}$ ) vale cero.

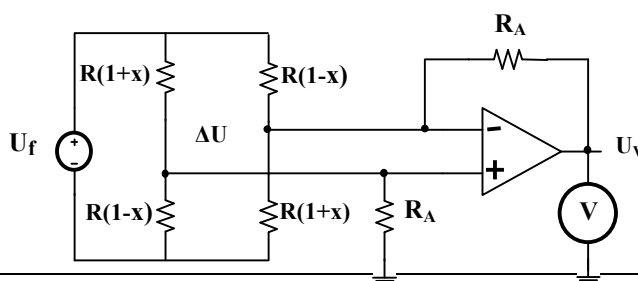
**Sugerencia:** Leer la sección informativa de las hojas de datos, donde se detalla el funcionamiento del dispositivo. Suponer al amplificador operacional ideal.

## Solución:

A los requerimientos de presión a medir (5 psi), tensión disponible de la fuente (5 V) y rango del instrumento indicador (2 V), deben sumarse los datos del sensor. Se verá a lo largo de la resolución qué datos necesitamos y cómo los obtenemos de las hojas de datos o características del dispositivo.

Debe observarse que las hojas de datos presentadas corresponden al mismo tipo de sensor, pero incluye dos rangos diferentes con sus correspondientes identificaciones: **SX01** (rango 0 a 1 psi) y **SX05** (rango 0 a 5 psi). Evidentemente, y de acuerdo a los requerimientos de problema, utilizaremos la información del segundo para la resolución.

Se redibuja el circuito, reemplazando las resistencias de cada rama del puente por la resistencia en reposo  $R$  (valor nominal) afectada por la variación  $x$  de las mismas.





Debe recordarse que la variación  $x$  corresponde a una fracción de  $R$ , de la siguiente manera:  $x = \Delta R/R$

Recordando lo estudiado respecto del amplificador operacional en configuración diferencial, teniendo en cuenta que el puente de puede representarse mediante dos fuentes reales a partir del circuito equivalente de Thevenin visto desde las

entradas inversora y no inversora, y se puede escribir lo siguiente:  $U_V = 2 \cdot \frac{R_A}{R} \cdot U_f \cdot x$

Queda como ejercicio para el estudiante demostrar este resultado.

A partir de la expresión de  $U_o$ , se puede observar que la tensión de salida del amplificador depende de las resistencias de realimentación, de la tensión de alimentación del puente, de la resistencia nominal del puente y de la variación de ésta última.

Pero no hay que perder de vista que la tensión de salida debe ser función de la variación de la resistencia nominal, la cual debe ser proporcional a la variación de la presión. Por lo cual, el problema se reduce a definir los valores de las resistencias  $R$  y  $R_A$ . Por otra parte,  $R$  debe ser conocida, es decir, debe ser un dato del transductor; de la misma forma que la relación entre  $x$  y la presión a medir.

En efecto, la resistencia nominal del puente se puede encontrar en la tabla de la página 7 del archivo de hojas de datos, correspondiente al dispositivo **SX05D** e identificada como **Output Impedance** (impedancia de salida) y que resulta igual a **4,65 kΩ**.

La variación de  $x$  respecto de la presión a medir se encuentra, se podría decir, "escondida". En efecto, si se observa la expresión de la tensión de salida del puente de la Figura 1, página 3, del archivo de hojas de datos, se advierte que dicha expresión se encuentra en función de la *tensión de alimentación* del puente en  $V$ , la *presión* en  $psi$ , la *sensibilidad* del puente en  $mV/V/psi$  y del *error de desbalance* del puente. Teniendo en cuenta que esta última se considera cero, de acuerdo a lo indicado en el enunciado del problema, se puede escribir la expresión descripta como:  $U_o = S \cdot P \cdot U_f$

Esta expresión debe ser coincidente con aquella correspondiente a la tensión de salida de un puente de Wheatstone en la cual varían las cuatro resistencias del mismo, y que resulta:  $\Delta U = x \cdot U_f$

Con lo cual, comparando las dos anteriores, si  $\Delta U = U_o$ , debe ser  $x = S \cdot P$ ; y finalmente:  $U_V = 2 \cdot \frac{R_A}{R} \cdot U_f \cdot S \cdot P$

Esta última expresión presenta la tensión medida por el voltímetro como una función lineal de la presión. Como ya se dijo, la resistencia nominal (en reposo) del puente es dato del fabricante. También se sabe que la tensión de la fuente que alimenta al puente es conocida. Además, es condición del problema que cuando la presión es máxima, el instrumento indica su valor de fondo de escala. Para determinar  $R_A$  falta entonces conocer un dato más que debe ser brindado por el fabricante, que es la sensibilidad  $S$  del puente, es decir, cómo cambia la resistencia del mismo con la variación de la presión aplicada al transductor. En la misma tabla de la página 7 del archivo de hojas de datos, correspondiente al dispositivo **SX05D** se puede encontrar la *sensibilidad a 25°C* (Sensitivity  $T_A = 25^\circ C$ ), resultando tres valores (mínimo, típico y máximo), de los cuales se toma por cuestiones prácticas el *típico*, igual a **3.0 mV/V/psi**.

Finalmente, se puede despejar la incógnita  $R_A$  para obtener el resultado buscado, lo cual se deja para el estudiante.

## COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES

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

1. El conocimiento de distintos tipos de transductores.
2. El desarrollo de una aplicación que permita tomar una variable física y acondicionarla eléctricamente para diferentes fines (registro, visualización, actuación).
3. La integración de los transductores con los amplificadores operacionales, los circuitos puente y otros.
4. Entender conceptualmente la filosofía de un sistema de instrumentación, de acuerdo a las diversas y posibles aplicaciones en la industria.
5. La utilización de los transductores presentados en sistemas de instrumentación sencillos como los planteados.