

Autor: Pedro I. López

Contacto: dreilopz@gmail.com | www.dreilopz.me

Licencia: Creative Commons Attribution 3.0 Unported (CC BY 3.0

<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>)

Fecha: Febrero 2012.

En ninguna circunstancia el autor se hace responsable de cualquier daño a cualquier persona o hardware causado por realizar lo descrito en este documento.

## Práctica 4

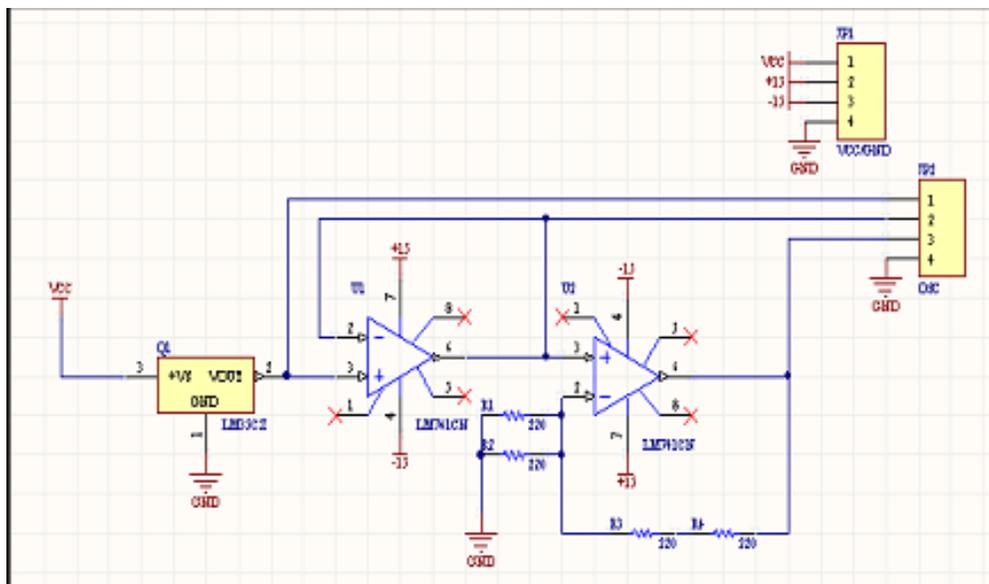
# Concepto de error

## Objetivo

Cuantificar los errores de los componentes del sistema, de manera que el estudiante identifique cada uno de éstos y pueda tomarlos en cuenta para sus consideraciones de diseño.

## Desarrollo

Acorde con el objetivo de la práctica, se busca analizar el sistema de la tarjeta DAQ0 y cuantificar sus errores. Creí conveniente la relación directa entre la práctica 4 y 5, por esta razón incluí algunas referencias en esta práctica hacia la 5, de manera que el trabajo se desarrolle en conjunto. Esto de hecho es algo muy congruente, ya que el acondicionamiento de señal debe tomar en cuenta sin excepción el error esperado en las mediciones y adquisición de datos.



f4-1. Diagrama esquemático de la DAQ0

Para esto, seguiremos los pasos indicados en el documento de la práctica de laboratorio:

## Reporte

Cuantificar los diferentes tipos de errores en la tarjeta DAQ0, explicar a que tipo de error pertenecen y determinar cuales son los errores que no pudieron ser cuantificados, explicando las razones por las cuales no se realizó la cuantificación. Exponer las conclusiones del tema así como la bibliografía utilizada.

## Pasos para cuantificación de errores

## 1. Definir niveles de señal

En esta etapa definimos el rango de salida del sensor así como del punto analizado. Esto servirá para seleccionar las ganancias de la etapa de amplificación, para cubrir el rango completo del sensor y poder maximizar la resolución del convertidor analógico-digital.

El sensor LM35 es un sensor de temperatura de precisión, su salida de voltaje es linealmente proporcional a la escala de temperatura Celsius. Su factor de escala es de  $+10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  y su rango de funcionamiento es de  $-55$  a  $150^\circ\text{C}$ , operando con una alimentación de 4 a 30 V. No es lineal de  $\pm 1/4^\circ\text{C}$ . Desde este primer punto utilizaré como referencia la Sección I de la práctica 5, Acondicionamiento de Señal (el problema principal). En esta sección se requiere diseñar un termómetro de 0 a  $100^\circ\text{C}$ , entonces el voltaje de salida de sensor será de 0 a 1 V. El rango de análisis será todo el rango disponible de lecturas de temperatura. La señal de salida del sensor debe ser digitalizada con ayuda del convertidor A/D, y como la entrada de voltaje de tal convertidor es 0 a 5 V, la salida del sensor debe ser multiplicada por un factor de ganancia igual a 5. Entonces,

*Voltaje out sensor = 0 a 1 V*

*Rango análisis = Salida de voltaje de sensor completa =  
0 a 1 V*

*Ganancia = 5*

Entonces la entrada al convertidor A/D que se piense utilizar es de 0 a 5 V, mientras que su salida es un valor binario que dependerá del componente utilizado así como de su configuración.

## 2. Cuantificación de máximo cambio de temperatura para cada componente

Revisemos primero los límites de temperatura. Los límites de operación de temperatura del LM35 son 0 a  $100^\circ\text{C}$ , con esto nos damos cuenta que utilizaremos el sensor ocupando su rango completo de operación. También, los límites de almacenamiento del componente son  $-60^\circ\text{C}$  a  $+150^\circ\text{C}$ . De hecho, la tarjeta tiene un impedimento físico en su diseño (en referencia con el problema de la sección I de la práctica 5), ya que el amplificador operacional utilizado (741CP de *Texas Instruments*) tiene un rango de temperatura de operación igual a  $0^\circ\text{C}$  a  $70^\circ\text{C}$ . Se ignorará esta cuestión en esta y la siguiente práctica. La temperatura de almacenamiento del 741CP es  $-65^\circ\text{C}$  a  $+150^\circ\text{C}$ .

Con ayuda de *f4-2*, hay que poner especial atención a las líneas que se encuentran subrayadas. Esta parte de la hoja de datos solo concierne a los sensores similares al de la DAQ0. El sensor es el LM35DZ, entonces centramos la atención a lo que describe LM35D. Ya que necesitamos las máximas variaciones por temperatura en la precisión del sensor (*accuracy*), busquemos números que tengan los valores absolutos mayores. En la línea de *Accuracy* para LM35D, tenemos que la máxima variación por temperatura será de  $\pm 2.0^\circ\text{C}$ , y esta variación sucederá cuando la temperatura de operación del sensor sea la mínima ( $0^\circ\text{C}$ ) o la máxima ( $100^\circ\text{C}$ ). A  $25^\circ\text{C}$ , la precisión del sensor es de  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ .

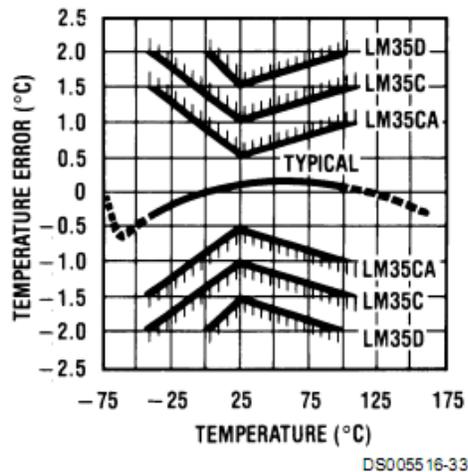
Los valores de precisión máxima encontrados se clasifican en la hoja de datos como **límites de diseño**. Se entiende por esto que esta precisión indicada está garantizada (aunque no se realizaron pruebas en toda la producción de componentes) sobre la temperatura indicada y los rangos de voltaje de alimentación. La parte subrayada de *f4-2* nos indica que la temperatura mínima que se necesita para que la precisión del sensor opere como acabamos de indicar es  $+2.0^{\circ}\text{C}$ .

Electrical Characteristics								
(Notes 1, 6)								
Parameter	Conditions	LM35			LM35C, LM35D			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy, LM35, LM35C (Note 7)	$T_A = +25^{\circ}\text{C}$ $T_A = -10^{\circ}\text{C}$ $T_A = T_{\text{MAX}}$ $T_A = T_{\text{MIN}}$	$\pm 0.4$ $\pm 0.5$ $\pm 0.8$ $\pm 0.8$	$\pm 1.0$  $\pm 1.5$  	   $\pm 1.5$	$\pm 0.4$ $\pm 0.5$ $\pm 0.8$ $\pm 0.8$	$\pm 1.0$    	  $\pm 1.5$ $\pm 1.5$ $\pm 2.0$	$^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$
Accuracy, LM35D (Note 7)	$T_A = +25^{\circ}\text{C}$ $T_A = T_{\text{MAX}}$ $T_A = T_{\text{MIN}}$	  $\pm 0.9$ $\pm 0.9$	    	    	$\pm 0.6$ $\pm 0.9$ $\pm 0.9$	$\pm 1.5$   	  $\pm 2.0$ $\pm 2.0$	$^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$
Nonlinearity (Note 8)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	$\pm 0.3$	  	$\pm 0.5$	$\pm 0.2$	  	$\pm 0.5$	$^{\circ}\text{C}$
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	$+10.0$	$+9.8$ , $+10.2$	  	$+10.0$	  	$+9.8$ , $+10.2$	mV/ $^{\circ}\text{C}$
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1$ mA	$T_A = +25^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	$\pm 0.4$ $\pm 0.5$	$\pm 2.0$  	 $\pm 5.0$	$\pm 0.4$ $\pm 0.5$	$\pm 2.0$  	 $\pm 5.0$	mV/mA mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^{\circ}\text{C}$ $4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	$\pm 0.01$ $\pm 0.02$	$\pm 0.1$  	$\pm 0.2$	$\pm 0.01$ $\pm 0.02$	$\pm 0.1$  	$\pm 0.2$	mV/V mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5\text{V}$ , $+25^{\circ}\text{C}$ $V_S = +5\text{V}$ $V_S = +30\text{V}$ , $+25^{\circ}\text{C}$ $V_S = +30\text{V}$	56 105 56.2 105.5	80  82  	158  161	56 91 56.2 91.5	80  82  	138  141	$\mu\text{A}$ $\mu\text{A}$ $\mu\text{A}$ $\mu\text{A}$
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$ , $+25^{\circ}\text{C}$ $4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	0.2 0.5	2.0  	3.0	0.2 0.5	2.0  	3.0	$\mu\text{A}$ $\mu\text{A}$
Temperature Coefficient of Quiescent Current		$+0.39$	  	$+0.7$	$+0.39$	  	$+0.7$	$\mu\text{A}/^{\circ}\text{C}$
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of <u>Figure 1</u> , $I_L = 0$	$+1.5$	  	$+2.0$	$+1.5$	  	$+2.0$	$^{\circ}\text{C}$
Long Term Stability	$T_J = T_{\text{MAX}}$ , for 1000 hours	$\pm 0.08$	  	  	$\pm 0.08$	  	  	$^{\circ}\text{C}$

*f4-2. Extraído de la hoja de datos del LM35. Características eléctricas.*

La siguiente gráfica (*f4-3*) obtenida también de la hoja de datos del LM35DZ nos es de mucha utilidad para visualizar los resultados de nuestra investigación.

### Accuracy vs. Temperature (Guaranteed)



*f4-3. Precisión (accuracy) contra temperatura. El sensor de la DAQ0 es el LM35D*

Las especificaciones del UA741CP **no muestran datos directos acerca de la variación de lecturas o salidas respecto a cambios en la temperatura**. En lugar de eso, se ofrecen medidas de las características eléctricas del componente para una temperatura común ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ) y para los límites de temperatura de operación. Esta información está cercana a las variaciones máximas por temperatura que buscamos, ya que el voltaje de alimentación indicado es  $\pm 15\text{V}$ , solo 3 V de diferencia de la alimentación máxima permitida ( $\pm 18\text{V}$ ). Revisemos cada dato en el orden en el que van apareciendo en el extracto de la hoja de datos (*f4-4*); cada parámetro que pueda variar y que sea pertinente estudiar para esta práctica se incluirá. Ya que las variaciones por temperatura en el UA741CP son pocas, se incluyen las que existan ya sea que fueran variaciones mínimas o máximas.

- ❖  $V_{IO}$  – *input offset voltage*: su valor máximo será modificado 1.5 mV al cambiar  $T_A = 25^{\circ}\text{C}$  a  $T_A = [\text{rango completo}]$ .
- ❖  $V_{ICR}$  – *common-mode input voltage range*: no se modifica al cambiar  $T_A = 25^{\circ}\text{C}$  a  $T_A = [\text{rango completo}]$ .
- ❖  $V_{OM}$  – *maximum peak output voltage swing*: con  $R_L = 10\text{ k}\Omega$  o  $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$  no se modifica al cambiar la temperatura. Con  $R_L = 2\text{ k}\Omega$  o  $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$  no se modifica al cambiar la temperatura.
- ❖  $A_{VD}$  – *large-signal differential voltage amplification*: con  $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$  y/o  $V_O = \pm 10\text{ V}$ , este valor variará 5 V/mV al cambiar  $T_A = 25^{\circ}\text{C}$  a  $T_A = [\text{rango completo}]$ .
- ❖ CMRR – *common-mode rejection ratio*: no varía cuando cambia la temperatura.
- ❖  $k_{SVS}$  – *supply voltage sensitivity*: no varía al cambiar la temperatura.

Entonces, la razón por la cual algunas magnitudes de error que no pudieron ser determinadas fue que la información no estaba disponible en la hoja de datos del fabricante del componente. Recordemos también, que los errores de precisión debido a diferentes condiciones de temperatura es por definición un error aleatorio.

electrical characteristics at specified free-air temperature,  $V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$  (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	T <sub>A</sub> †	μA741C			μA741I, μA741M			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V <sub>IO</sub>	Input offset voltage	V <sub>O</sub> = 0	25°C	1	6	1	5	mV	
			Full range		7.5		6		
ΔV <sub>IO(adj)</sub>	Offset voltage adjust range	V <sub>O</sub> = 0	25°C	±15		±15		mV	
I <sub>IO</sub>	Input offset current	V <sub>O</sub> = 0	25°C	20	200	20	200	nA	
			Full range	300		500			
I <sub>IB</sub>	Input bias current	V <sub>O</sub> = 0	25°C	80	500	80	500	nA	
			Full range	800		1500			
V <sub>ICR</sub>	Common-mode input voltage range		25°C	±12	±13	±12	±13	V	
			Full range	±12		±12			
V <sub>OM</sub>	Maximum peak output voltage swing	R <sub>L</sub> = 10 kΩ	25°C	±12	±14	±12	±14	V	
		R <sub>L</sub> ≥ 10 kΩ	Full range	±12		±12			
		R <sub>L</sub> = 2 kΩ	25°C	±10	±13	±10	±13		
		R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ	Full range	±10		±10			
A <sub>VD</sub>	Large-signal differential voltage amplification	R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ	25°C	20	200	50	200	V/mV	
		V <sub>O</sub> = ±10 V	Full range	15		25			
r <sub>i</sub>	Input resistance		25°C	0.3	2	0.3	2	MΩ	
r <sub>o</sub>	Output resistance	V <sub>O</sub> = 0, See Note 5	25°C	75		75		Ω	
C <sub>i</sub>	Input capacitance		25°C	1.4		1.4		pF	
CMRR	Common-mode rejection ratio	V <sub>IC</sub> = V <sub>ICRmin</sub>	25°C	70	90	70	90	dB	
			Full range	70		70			
k <sub>SVS</sub>	Supply voltage sensitivity (ΔV <sub>IO</sub> /ΔV <sub>CC</sub> )	V <sub>CC</sub> = ±9 V to ±15 V	25°C	30	150	30	150	μV/V	
			Full range	150		150			
I <sub>OS</sub>	Short-circuit output current		25°C	±25	±40	±25	±40	mA	
I <sub>CC</sub>	Supply current	V <sub>O</sub> = 0, No load	25°C	1.7	2.8	1.7	2.8	mA	
			Full range	3.3		3.3			
P <sub>D</sub>	Total power dissipation	V <sub>O</sub> = 0, No load	25°C	50	85	50	85	mW	
			Full range	100		100			

f4-4. Características eléctricas del UA741CP

En resumen

**Máximo error precisión LM35DZ = ±2°C**  
**Máxima variación de V<sub>IO</sub> = 1.5 mV**  
**Máxima variación de A<sub>VD</sub> con R<sub>L</sub> ≥ 2 kΩ y/o V<sub>O</sub> = ±10 V = 5 V/mV.**

### 3. Cuantificación de VMC y parámetros relacionados

Indagaremos acerca de los valores de CMRR así como todo parámetro relacionado con tal medida. Directamente, encontramos en f4-4 que CMRR es igual a (típicamente) 90 dB. El voltaje offset de entrada es máximo 7.5 mV. En relación con el VMC, el rango máximo de entrada de voltaje común en el UA741CP es ±13 V. Luego,

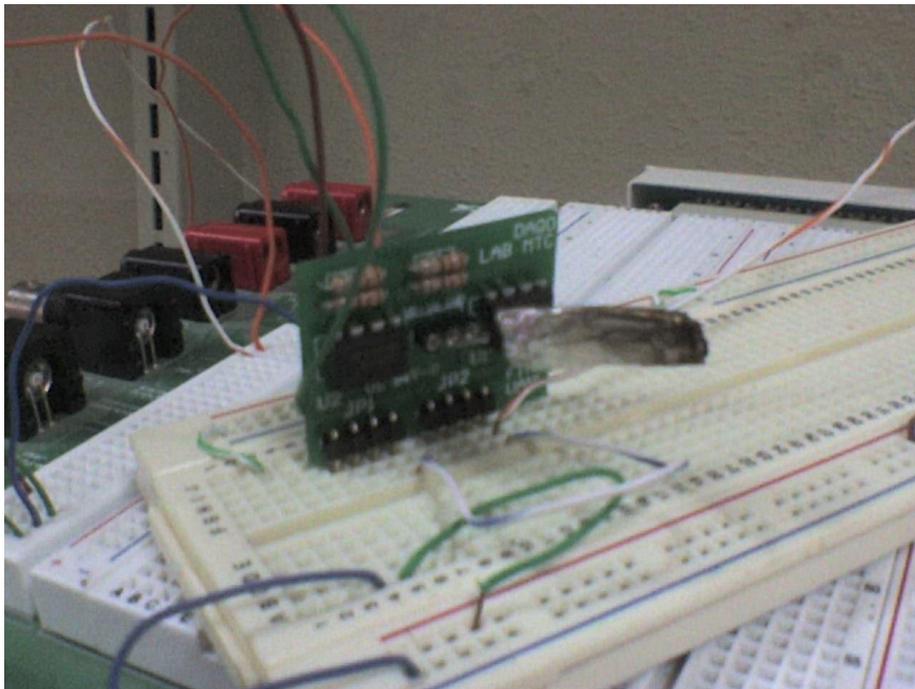
$$CMRR = 90 \text{ dB}$$

$$V_{IO} = 7.5 \text{ mV}$$

$$V_{ICR} = \pm 13 \text{ V}$$

#### 4. Desbalance de línea

Debido a la naturaleza de este error, la determinación de su magnitud se realizó de manera experimental. Esta magnitud se hizo al realizar la práctica 5 *Acondicionamiento de Señal*.



*f4- 1. Fotografía de medida de desbalance de línea*

El máximo voltaje entre GND y GND registrado fue aproximadamente igual a 1.3 mV.

#### *Comentario acerca de otros errores*

La cantidad de información disponible para la determinación de las magnitudes de otros tipos de errores es limitada, de manera que creí conveniente agruparlos en esta sección. La **precisión** del LM35 se especifica en la hoja de datos como una precisión de lectura de temperatura de 0.5 °C, pero la misma solo es garantizada a temperatura 25°C. Las variaciones de precisión al variar la temperatura se puede obtener revisando los resultados de la sección 2. Cuantificación de máximo cambio de temperatura para cada componente.

Los errores de **histéresis**, **repetibilidad** y **linealidad** se aprecian pequeños y de importancia relativa menor a los ya descritos. Además, ya que son considerados errores aleatorios, generalmente

se omite su compensación. De cualquier manera, tales errores podrán ser identificados durante la práctica 5 Acondicionamiento de Señal (es por eso que se comentaba al principio del documento la relación entre tal práctica y la presente). Los errores de la fuente de poder por rizado, estabilidad y regulación fueron ignorados relativamente, debido a su magnitud y a su condición aleatoria.

## Conclusión

---

El error es un resultado siempre presente en cualquier implementación tecnológica realizada. Es conocido ya que las mediciones realizadas tienen siempre un grado de incertidumbre de medición. El error es un concepto complejo en el área de adquisición de datos, y para facilitar su comprensión, frecuentemente se agrupan diferentes tipos de errores. Así, se nos presentarán definiciones como error general, precisión, exactitud, sensibilidad, errores por histéresis, error por no linealidad, error de repetitividad, error de reproducibilidad, estabilidad del sensor, banda o tiempo muerto, resolución, offsets, cambio por temperatura, entre otros.

El problema con tantas definiciones de error es que tales no se encuentran estandarizadas y muchos se ignoran u omiten en las hojas de datos de los componentes. Es tarea entonces del diseñador identificar congruencias entre términos, agrupar mediciones y errores, realizar pruebas e implementar soluciones. Lo más común es separar las partes del sistema de adquisición (como en etapa de sensor, de acondicionador, de muestreo, de conversión, etc.), identificar teóricamente y por prueba y error los errores encontrados, para posteriormente integrarlos por medio de un método numérico conveniente y obtener una medida general del error.

Tal medida servirá de referencia para los cambios necesarios, y como ya se mencionó, el proceso de determinación de errores y precisión nunca debe faltar en un diseño de algún sistema de adquisición de datos.

## Bibliografía

---

- **Documento de práctica de laboratorio**  
**Práctica 4 – Concepto de error**  
Laboratorio de Adquisición de Datos  
FIME – UANL
- **LM35 – Precision Centigrade Temperature Sensors**  
**Hoja de datos – National Semiconductor**  
Noviembre 2000.
- **μA741, μA741Y – General-Purpose Operational Amplifiers**  
**Hoja de datos – Texas Instruments**  
SLOS094B – November 1970 – Revised September 2000