

Práctica 6b:

Lectura de datos analógicos usando el RP240 y la Raspberry Pi

Fundamentos de Sistemas Embebidos

Autor: José Mauricio Matamoros de Maria y Campos

1. Objetivo

El alumno aprenderá a comunicar circuitos integrados mediante el bus I²C, así como a leer e interpretar señales analógicas con un microcontrolador.

2. Introducción

La presente práctica resume los pasos a seguir para leer una señal analógica con un microcontrolador. En particular, se interesa en la lectura de la temperatura registrada por un sensor LM35 mediante un microcontrolador RP240 (Raspberry Pico). Los datos registrados serán posteriormente enviados vía I²C a una Raspberry Pi para llevar una bitácora de temperatura que podrá ser desplegada en un navegador web.

2.1. El sensor LM35

El circuito integrado LM35 es un sensor de temperatura cuya salida de voltaje o respuesta es linealmente proporcional a la temperatura registrada en escala centígrada. Una de las principales ventajas del LM35 sobre otros sensores lineales calibrados en Kelvin, es que no se requiere restar constantes grandes para obtener la temperatura en grados centígrados. El rango de este sensor va de -55°C a 150°C con una precisión que varía entre 0.5°C y 1.0°C dependiendo la temperatura medida [1].

Las configuraciones más comunes para este integrado se muestran en la Figura 1. La configuración (Figura 1a) básica, la más simple posible pues sólo requiere conectar al integrado LM35 entre VCC y GND, permite medir temperaturas entre 2°C a 150°C. Por otro lado, la configuración (Figura 1b) clásica permite medir en todo el rango completo del sensor, es decir entre -55°C y 150°C, pero requiere de un par de diodos 1N914 y una resistencia de

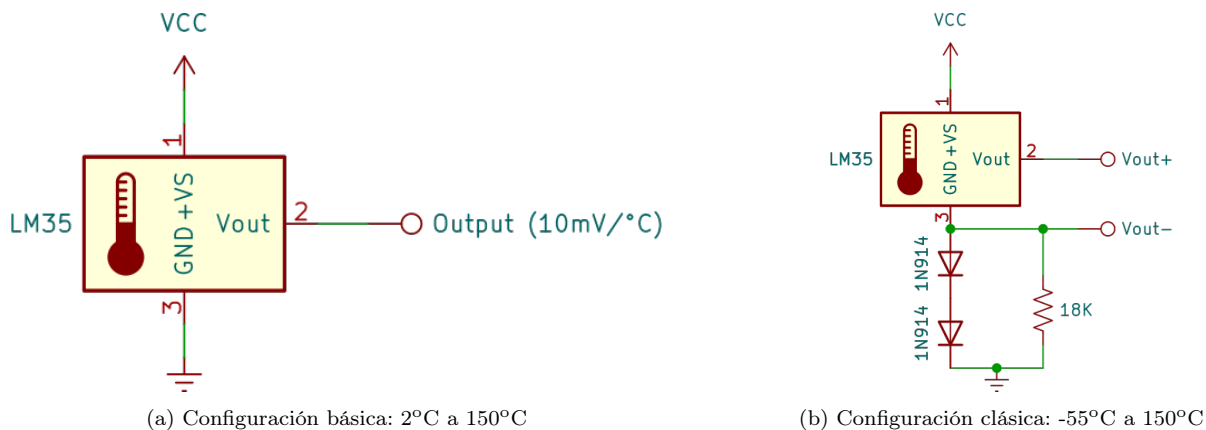


Figura 1: Configuraciones típicas del LM35

18K Ω para proporcionar los voltajes de referencia. En ambos casos, el LM35 ofrece una diferencial de 10mV/°C, por lo que los voltajes medidos rara vez excederán de 2V respecto a tierra.

Cuando opera en rango completo y las temperaturas registradas son inferiores a cero, se permite un flujo de corriente inverso entre los pines GND y V_{out} del LM35, es decir, una salida de voltaje negativo respecto a la referencia. Debido a que el LM35 no puede generar voltajes inferiores respecto a la referencia del circuito (tierra) se utilizan dos diodos 1N914 en serie colocados en el pin de referencia o tierra del LM35 (véase Figura 1b) para elevar el voltaje del subcircuito del LM35 aproximadamente 1.2V por encima del voltaje de referencia o tierra general. Así, cuando el LM35 entre en contacto con temperaturas negativas, el voltaje de diodo o V_{DD} referenciable mediante la resistencia de 18K hará posible que el voltaje de V_{out+} sea inferior al de V_{out-} y pueda calcularse la diferencia, tal como se muestra en la Tabla 1.

2.2. Convertidor Analógico—Digital

Para leer la señal del LM35 se requiere de un Convertidor Analógico Digital o ADC (por sus siglas en inglés: *Digital-Analog Converter*). Un ADC se elige con base en dos factores clave: su precisión y su tiempo de muestreo. Debido a que la aplicación del ADC será convertir mediciones de temperatura y los cambios de temperatura son muy lentos,¹ puede obviarse el tiempo de muestreo. En cuanto a la precisión, los convertidores A/D más comunes son de 8 y 10 bits, de los cuales ha de elegirse uno.

La precisión del ADC se calcula tomando en cuenta el rango de operación y la precisión del componente analógico a discretizar. El LM35 tiene un rango de 205°C, una diferencial de voltaje $\Delta V = 10mV/°C$ y una precisión máxima de 0.5°C, por lo que el sensor entregará un máximo de 2.5V respecto al voltaje de referencia del mismo, con incrementos de 5mV. Debido a que 256 valores para un rango de 205°C en incrementos de 0.5°C (es decir 410 valores) es claramente insuficiente para este sensor, por lo que será conveniente utilizar un convertidor A/D de 10 bits.

Un ADC típico de 12 bits convertirá las señales analógicas entre voltajes de referencia V_{Ref-} y V_{Ref+} como un entero con valores entre 0 y 4096, interpretando los valores V_{Ref-} como 0 lógico y V_{Ref+} como 4096 de manera aproximadamente lineal. El decir, la lectura obtenida es directamente proporcional al voltaje dentro del rango, estimable mediante la fórmula:

$$V_{out} = value \times \frac{V_{Ref+} - V_{Ref-}}{4096} \quad (1)$$

En una configuración simple, V_{Ref-} y V_{Ref+} se conectan internamente dentro del RP2040 a tierra y V_{CC} respectivamente. Esto simplifica la fórmula como:

$$V_{out} = value \times \frac{5V}{4096} = value \times 1.22mV \quad (2)$$

En lo concerniente al RP040, éste incorpora un convertidor analógico-digital de 12 bits con soporte para voltaje de referencia V_{Ref+} , denominado ADC_VREF según las especificaciones del mismo [2]. Considerando que el LM35 en rango completo entrega hasta 2.05V ($10mV \times (150 - -55) = 2.05V$) la mayor parte de los 4096 valores jamás serán ocupados. Por este motivo, convendría sacar partido del pin de voltaje de referencia ADC_VREF del RP2040 mediante un divisor de voltaje. Sin embargo, el propio Datasheet del RP2040 recomienda que el ADC_VREF se mantenga dentro del rango de [2.79, 3.30] volts, por lo que no vale la pena utilizar un divisor de voltaje para dar mayor precisión al convertidor A/D. [2, §2.9.5, pp 155]

Con esta configuración se puede calcular de nueva cuenta la precisión del sensor digital una vez decodificado el valor analógico leído del LM35 dividiendo los 2.73V de referencia entre los 4096 valores posibles que entrega el ADC como sigue:

$$\Delta V = \frac{3.3V}{4096} = 805.7 \times 10^{-6}V = 806\mu V \quad (3)$$

Considerando que la resolución máxima del sensor LM35 determinada por su factor de incertidumbre es de 0.5°C equivalentes a 0.005V, esta configuración es más que adecuada para operar al sensor.

Tabla 1: Salida de un LM35 en rango completo

Temp [°C]	V_{out+} [V]
-55	0.65
0	1.20
50	1.70
100	2.20
150	2.70

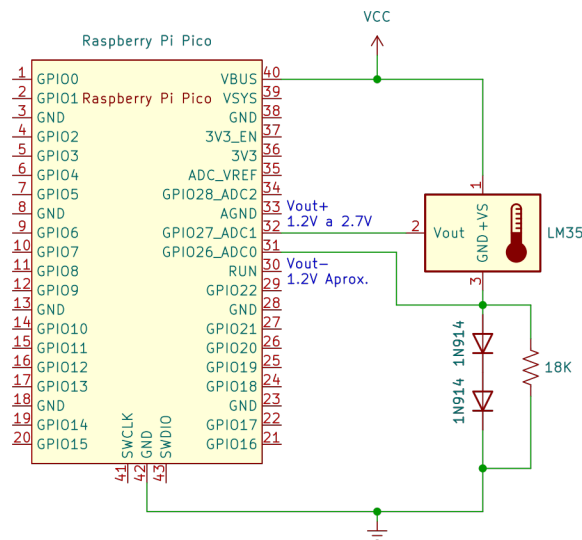


Figura 2: Circuito medidor de temperatura LM35 con el RP2040

2.3. Bus I²C

I²C es un protocolo serial inventado por Phillips y diseñado para conectar dispositivos de baja velocidad mediante interfaces de dos hilos (Figura 3). El protocolo permite un número virtualmente ilimitado de dispositivos interconectados donde más de uno puede ser un dispositivo maestro. El bus I²C es popular debido a su facilidad de uso y fácil configuración. Sólo es necesario definir la velocidad máxima del bus, que está conformado por dos cables con resistencias pull-up [3].

I²C utiliza solamente dos cables: SCL (reloj) y SDA (datos). La transferencia de datos es serial y transmite paquetes de 8 bits con velocidades de hasta 5MHz. Además, es requisito que cada dispositivo esclavo tenga una dirección de 7 bits que (el bit más significativo se utiliza para indicar si el paquete es una lectura o una escritura) debe ser única en el bus. Los dispositivos maestros no necesitan dirección ya que estos generan la señal de reloj y coordinan a los dispositivos esclavos [3].

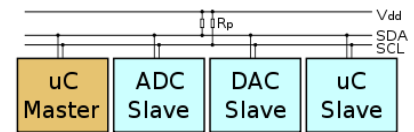


Figura 3: Bus I²C

3. Material

Se asume que el alumno cuenta con una Raspberry Pi con sistema operativo Raspbian e interprete de Python instalado. Se aconseja encarecidamente el uso de *git* como programa de control de versiones.

- 1 microcontrolador RP2040 (Raspberry Pico) con firmware MicroPython precargado.
- 1 sensor de temperatura LM35 en encapsulado TO-220 o TO-92
- 2 Diodos 1N914
- 2 resistencias de 10kΩ
- 1 resistencia de 12kΩ²
- 1 resistencia de 18kΩ
- 1 Condensador de 0.1μF
- 1 protoboard o circuito impreso equivalente
- 1 fuente de alimentación regulada a 5V y al menos 2 amperios de salida
- 1 cable micro-USB/USB-C para programar el RP2040
- Cables y conectores varios

²La resistencia de 12kΩ puede reemplazarse con resistencias de 13kΩ a 20kΩ dependiendo del voltaje de los diodos.

4. Instrucciones

1. Alambre el circuito mostrado en la Figura 2.
2. Realice los programas de las Subsecciones 4.3 y 4.4
3. Analice los programas de las subsecciones 4.3 y 4.4, realice los experimentos propuestos en la sección 5.

4.1. Paso 1: Alambrado

Importante

Aunque el RP2040 cuenta con un regulador de 5V integrado, opera a 3.3V. Asegúrese de conectar VCC únicamente a V_{BUS} (Pin 38) para no quemarlo.

El proceso de alambrado de esta práctica considera dos circuitos. El primer circuito, mostrado en la Figura 2, permite obtener valores discretos del sensor de temperatura LM35. El segundo circuito (Figura 4) consiste en la interfaz de conexión vía I²C entre el microcontrolador que lee el LM35 y la Raspberry Pi que genera los reportes y grafica los resultados.

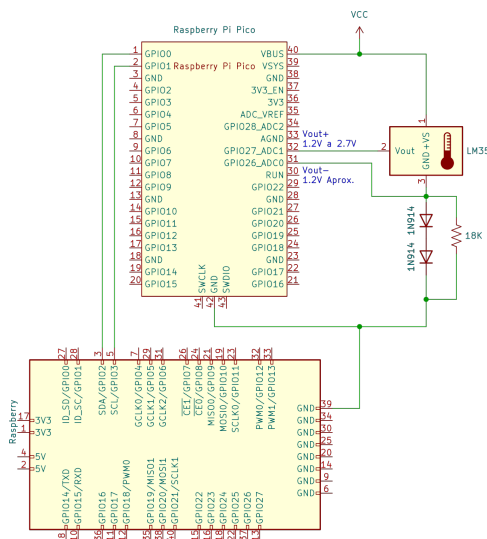
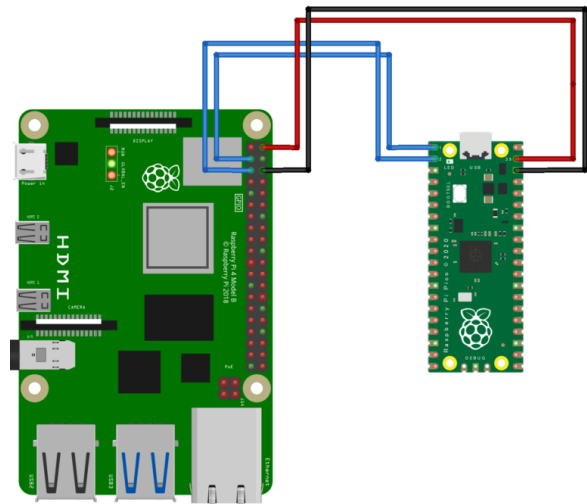


Figura 4: Circuito completo



fritzing

Figura 5: Conexión mediante I²C de una Raspberry Pi con una Raspberry Pico³

Alambre primero el subcircuito formado por los dos diodos, el integrado LM35 y la resistencia de 18kΩ. Paso seguido, alimente el subcircuito y mida la diferencia de potencial existente entre V_{OUT-} y GND.

Continúe el alambrado del circuito. Es conveniente colocar un capacitor de 0.1μF entre VCC y GND para rectificar el voltaje de entrada eliminar cualquier oscilación parásita que pudiese afectar el funcionamiento del LM35. La presencia de este componente es opcional pero altamente recomendada.

Tras alambrear el primer circuito realice el experimento prueba indicado en la Subsección 4.2.

A continuación conecte el bus I²C entre la Raspberry Pi y el RP2040 como ilustran la Tabla 2 y la Figura 5.

Esto es posible debido a que el RP2040 no cuenta con resistencias de acoplamiento a positivo o *pull-up* integradas, mientras que los pines I²C de la Raspberry Pi están conectados internamente a la línea de 3.3V mediante resistencias de 1.8kΩ. Por este motivo, tendrán que quitarse las resistencias de *pull-up* a cualquier otro dispositivo esclavo que se conecte al bus I²C de la Raspberry Pi.⁴

³Imagen obtenida de <https://python-academia.com/en/raspberry-pi-pico-slave/>

⁴Para más información sobre el papel de las resistencias de acoplamiento a positivo o *pull-up* en un bus I²C se puede consultar <http://dsscircuits.com/articles/effects-of-varying-i2c-pull-up-resistors>

Tabla 2: Conexiones I²C entre Raspberry Pi y un RP2040

Pin Raspberry		Conexión			Pin RP2040	
3	(GPIO2)	Raspberry Pi SDA	→	RP2040 SDA	GPIO0/SDA	1
5	(GPIO3)	Raspberry Pi SCL	→	RP2040 SCL	GPIO1/SCL	2
6	(GND)	Raspberry Pi GND	→	RP2040 GND	GND	3

4.2. Paso 2: Lectura del sensor LM35

Antes de proceder, verifique conexiones con un multímetro en busca de corto circuitos. En particular verifique que exista una impedancia muy alta entre los pines VCC y GND del RP2040.

Para leer la temperatura con el RP2040 se necesitan convertir los valores discretos leídos por el ADC del microcontrolador en valores de temperatura. Esto se puede realizar mediante un simple análisis debido a la linealidad del LM35. Se tienen dos lecturas en el ADC: V_{OUT+} y V_{OUT-} , de las cuales la segunda es la referencia del LM35 y por lo tanto, la diferencia entre estos voltajes será proporcional a la temperatura en escala centígrada. Esto expresado matemáticamente es:

$$T[^{\circ}C] \propto V_{diff} = V_{OUT+} - V_{OUT-}$$

o bien

$$T[^{\circ}C] = k \times V_{diff} = k \times (V_{OUT+} - V_{OUT-})$$

lo que implica que en $T = 0^{\circ}C$; $V_{OUT+} = V_{OUT-} \rightarrow V_{diff} = 0$

Es necesario entonces calcular la constante de proporcionalidad k . Sabemos que el ADC entregará lecturas de 0 a 4096 para los voltajes registrados entre GND y ADC_VREF (0V y 3.3V respectivamente), además de que $1^{\circ}C = 0.01V$. Luego entonces

$$T[^{\circ}C] = V_{diff} \times \frac{3.3[V]}{4096 \times 0.01[\frac{V}{^{\circ}C}]}$$

$$T[^{\circ}C] = V_{diff} \times \frac{3.3}{40.96}[^{\circ}C]$$

Esta fórmula de conversión de unidades deberá programarse en el microcontrolador que adquiera los valores discretos de temperatura del sensor.

Micropython siendo Python

A pesar de que el RP2040 tiene un convertidor analógico digital de 12 bits, MicroPython utiliza la función `read_u16()` para leer del periférico, función que escala internamente los 4096 (2^{12}) valores a 65536 (2^{16}), por lo que la fórmula anterior se ha ajustado como:

$$T[^{\circ}C] = V_{diff} \times \frac{3.3}{655.36}[^{\circ}C]$$

El programa de ejemplo para el RP2040⁵ se presenta a continuación:

Código ejemplo 1: pico-code-adc.py:23-38, read_temp function

```
1 def read_temp():
2     """
3     Reads temperature in C from the ADC
4     """
5     # The actual temperature
6     vplus = adcp.read_ul6()
7     # The reference temperature value, i.e. 0°C
8     vminus = adcm.read_ul6()
9     # Calculate the difference. when V+ is smaller than V- we have negative temp
10    vdiff = vplus - vminus
11    # Now, we need to convert values to the ADC resolution, AKA 3.3V/65536
12    # We also know that 1°C = 0.01V so we can multiply by 3.3V / (0.01V/°C) = 330°C
13    # to get °C instead of V. Analogously we can multiply VAREF by 100 but
14    # since we will divide per 65536, it suffice with dividing by 655.36
15    temp = vdiff * VAREF / 655.36
16 # end def
```

En ocasiones los valores pueden fluctuar ligeramente debido a ruido o variaciones de voltaje. Para evitar este tipo de imprecisiones es común utilizar técnicas de filtrado, y uno de los métodos más simples y comunes es el promedio de varias lecturas consecutivas tal y como se muestra a continuación:

Código ejemplo 2: pico-code-adc.py:41-49, read_avg_temp function

```
1 def read_avg_temp(count=10):
2     """
3     Gets the average of N temperature reads
4     """
5     avgtemp = 0
6     for i in range(count):
7         avgtemp += read_temp()
8     return avgtemp / count
9 # end def
```

Otro método mucho más eficaz y seguro es llevar un registro de las últimas N lecturas del sensor en un buffer circular y estimar el siguiente valor probable, descartando aquellas lecturas que estén fuera de rango posible, es decir cuando $\Delta t \geq \epsilon_0$.

4.3. Paso 3: Configuración de comunicaciones I²C

Primero ha de configurarse la Raspberry Pi para funcionar como dispositivo maestro o *master* en el bus I²C. Para esto, inicie la utilidad de configuración de la Raspberry Pi con el comando

```
| # raspi-config
```

y seleccione la opción 5: Opciones de Interfaz (*Interfacing Options*) y active la opción P5 para habilitar el I²C.

A continuación, verifique que el puerto I²C no se encuentre en la lista negra. Edite el archivo `/etc/modprobe.d/raspi-blacklist.conf` y revise que la línea `blacklist spi-bcm2708` esté comentada con `#`.

Código ejemplo 3: `/etc/modprobe.d/raspi-blacklist.conf`

```
# blacklist spi and i2c by default (many users don't need them)
# blacklist i2c-bcm2708
```

Como paso siguiente, se habilita la carga del driver I²C. Esto se logra agregando la línea `i2c-dev` al final del archivo `/etc/modules` si esta no se encuentra ya allí.

Por último, se instalan los paquetes que permiten la comunicación mediante el bus I²C y se habilita al usuario predeterminado *pi* (o cualquier otro que se esté usando) para acceder al recurso.

⁵Para cargar el código de Python en el RP2040 utilice el editor [Thonny](#). Para que los cambios sean persistentes, salve el archivo dentro del microcontrolador con el nombre `main.py`. Recuerde que no es posible programar el RP2040 via I²C.

```
# apt-get install i2c-tools python3-smbus
# adduser pi i2c
$ pip install smbus2
```

Reinicie la Raspberry Pi y pruebe la configuración ejecutando `i2cdetect -y 1` para buscar dispositivos conectados al bus I²C. Debería ver una salida como la siguiente:

```
$ i2cdetect -y 1
   0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  a  b  c  d  e  f
00: -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
10: -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
20: -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
30: -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
40: -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
50: -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
60: -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
70: -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
```

4.4. Paso 4: Bitácora de temperatura via I²C

Con la Raspberry Pi configurada, basta con generar los dos programas para transferir las temperaturas registradas en el RP2040 a la Raspberry Pi que se encargará de almacenar esta información en un archivo o bitácora.

Primero, es necesario configurar al RP2040 como dispositivo esclavo e inicializar el bus I²C, tal como se muestra en los [Códigos de Ejemplo 4](#) y [5](#).

Python es un lenguaje MUY lento que carece de tipos nativos primitivos y por ende hace un uso excesivo del *heap*, lo que hace imposible gestionar interrupciones de forma rápida y segura. Por este motivo las comunicaciones via I²C son **SÍNCRONAS** y requieren verificar el estado de los registros internos de forma continua en un loop.

Además, MicroPython sólo ofrece soporte para utilizar los módulos I²C en configuración maestro. Luego entonces es necesario realizar la configuración y la lectura y escritura de datos a nivel registro, mecanismo que se conoce como envoltorio o *wrapping*. Dicho código se provee por conveniencia en el archivo `i2cslave.py`.

Código ejemplo 4: `pico-code-i2c.py:14-19` — Dirección asignada al dispositivo esclavo

```
1 from i2cslave import I2CSlave
2 VAREF = 3.3
3 I2C_SLAVE_ADDR = 0x0A
```

Código ejemplo 5: `pico-code-i2c.py:51-56` — Configuración del bus I²C y funciones de control

```
1 def setup():
2     global i2c, adcm, adcp
3     i2c = I2CSlave(address=I2C_SLAVE_ADDR)
4     adcm = machine.ADC(machine.Pin(26)) # Init ADC0
5     adcp = machine.ADC(machine.Pin(27)) # Init ADC1
6 # end def
```

El envío de datos se realiza byte por byte, por lo que es necesario convertir la medición de temperatura (*objeto tipo float*) en un arreglo de bytes que pueda ser transmitido. Esto se hace con la función `pack` de `ustruct`, librería dedicada a la conversión de objetos de python a arreglos de bytes que representen los tipos primitivos que operan en C [Código de Ejemplo 6](#).

Código ejemplo 6: `pico-code-i2c.py:25-33` — Envío de datos

```
1 # 1. Get temperature
2 temperature = read_temp()
3 # 2. Convert temperature from pyfloat to bytes
4 data = ustruct.pack('<f', temperature)
5
6 # 3. Check if Master requested data
7 if i2c.waitForRdReq(timeout=0):
8     # If so, send the temperature to Master
9     i2c.write(data)
```

Del lado de la Raspberry Pi, primero ha inicializarse el bus I²C mediante el uso de la librería `smbus`⁶ y posteriormente se realizarán las lecturas en un *poleo* o bucle infinito, cada una de las cuales se irá almacenando en un archivo bitácora. La inicialización del bus requiere de una simple línea (véase [Código de Ejemplo 7](#)).

Código ejemplo 7: `raspberry-code-i2c.py:26` — Configuración del bus I²C

```
1 import smbus2
2 import struct
3 # Initialize the I2C bus;
4 # RPI version 1 requires smbus.SMBus(0)
5 i2c = smbus2.SMBus(1)
```

La conversión de un arreglo de bytes a punto flotante en Python no es inmediata. Para esta operación se utilizará la librería `struct` (véase [Código de Ejemplo 7](#)) que tomará los cuatro paquetes de 1 byte recibidos vía I²C del RP2040 y los convertirá en un *float*, como se muestra en el [Código de Ejemplo 8](#). Nótese el símbolo `<` (menor que) a la izquierda del especificador de formato *f*, el cual se utiliza para definir el endianness de la transmisión de la información.

Código ejemplo 8: `raspberry-code-i2c.py:28-35` — Lectura de flotantes del bus I²C

```
1 def readTemperature():
2     try:
3         msg = smbus2.i2c_msg.read(SLAVE_ADDR, 4)
4         i2c.i2c_rdwr(msg) # Performs write (read request)
5         data = list(msg) # Converts stream to list
6         # list to array of bytes (required to decode)
7         ba = bytearray()
8         for c in data:
9             ba.append(int(c))
10        temp = struct.unpack('<f', ba)
11        print('Received temp: {} = {}'.format(data, temp))
12        return temp
13    except:
```

El resto del programa es trivial, pues consiste sólo en la escritura del *timestamp UNIX* y el valor de temperatura registrado en un archivo de texto y la lectura de datos del RP2040 cada segundo.

Por conveniencia, los códigos completos de los programas de ejemplo se encuentran en los [Apéndices A a C](#).

5. Experimentos

1. [6pt] Modifique el código de la [subsección 4.4](#) para que la Raspberry Pi imprima en pantalla los valores de temperatura leídos.
2. [4pt] Modifique el código de la [subsección 4.4](#) la Raspberry Pi grafique el histórico de temperaturas registradas, leyendo los valores almacenados e ingresados en la bitácora.
3. [+5pt] Con base en lo aprendido, modifique el código de la [subsección 4.4](#) para que la Raspberry Pi sirva una página web donde se pueda observar la gráfica de temperatura (histórico) desde la bitácora con resolución de hasta 1 minuto.

⁶La implementación de la práctica utiliza `smbus2` que es una reimplementación codificada exclusivamente en Python de la librería `smbus` que es un *wrapper* de la `smbuslib` de C.

6. Referencias

Referencias

- [1] *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*. Texas Instruments, August 1999. Revised: December, 2017.
- [2] *RP2040 Datasheet: A microcontroller by Raspberry Pi*. Raspberry Pi Ltd, March 2023. build-version: ae3b121-clean.
- [3] I2C Info: A Two-wire Serial Protocol. I2c info – i2c bus, interface and protocol, 2020. <https://i2c.info/>, Last accessed on 2020-03-01.
- [4] Charles Bell. Introducing the raspberry pi pico. In *Beginning MicroPython with the Raspberry Pi Pico: Build Electronics and IoT Projects*, pages 1–42. Springer, 2022.

A. Programa Ejemplo: `pico-code-adc.py`

```
src/pico-code-adc.py
1 from machine import ADC, Pin          # Board Analogic-to-Digital Converter
2 from utime import sleep_ms           # Delay function in milliseconds
3
4 VAREF = 3.3
5
6 def setup():
7     '''
8         Setup the Pico
9     '''
10    adcm = ADC(Pin(26))                # Init ADC0
11    adcp = ADC(Pin(27))                # Init ADC1
12 # end def
13
14
15 def read_temp():
16     '''
17         Reads temperature in C from the ADC
18     '''
19     # The actual temperature
20    vplus = adcp.read_u16()
21    # The reference temperature value, i.e. 0°C
22    vminus = adcm.read_u16()
23    # Calculate the difference. when V+ is smaller than V- we have negative temp
24    vdiff = vplus - vminus
25    # Now, we need to convert values to the ADC resolution, AKA 3.3V/65536
26    # We also know that 1°C = 0.01V so we can multiply by 3.3V / (0.01V/°C) = 330°C
27    # to get °C instead of V. Analogously we can multiply VAREF by 100 but
28    # since we will divide per 65536, it suffice with dividing by 655.36
29    temp = vdiff * VAREF / 655.36
30 # end def
31
32
33 def read_avg_temp(count=10):
34     '''
35         Gets the average of N temperature reads
36     '''
37    avgtemp = 0
38    for i in range(count):
39        avgtemp += read_temp()
40    return avgtemp / count
41 # end def
42
43
44 def main():
45     while(True):                     # Repeat forever
46         temp = read_avg_temp()       # Fetch temperature
47         print(f'Temp: {temp:0.2f}°C') # Print temperature
48         sleep_ms(1000)               # Wait for 1000ms
49 #end def
50
51 if __name__ == '__main__':
52     main()
```

B. Programa Ejemplo: `raspberrypi-code-i2c.py`

src/raspberrypi-code-i2c.py

```
1 import smbus2
2 import struct
3 import time
4
5 # RP2040 I2C device address
6 SLAVE_ADDR = 0x0A # I2C Address of RP2040
7
8 # Name of the file in which the log is kept
9 LOG_FILE = './temp.log'
10
11 # Initialize the I2C bus;
12 # RPI version 1 requires smbus.SMBus(0)
13 i2c = smbus2.SMBus(1)
14
15 def readTemperature():
16     try:
17         msg = smbus2.i2c_msg.read(SLAVE_ADDR, 4)
18         i2c.i2c_rdwr(msg) # Performs write (read request)
19         data = list(msg) # Converts stream to list
20         # list to array of bytes (required to decode)
21         ba = bytearray()
22         for c in data:
23             ba.append(int(c))
24         temp = struct.unpack('<f', ba)
25         print('Received temp: {} = {}'.format(data, temp))
26         return temp
27     except:
28         return None
29
30 def log_temp(temperature):
31     try:
32         with open(LOG_FILE, 'w+') as fp:
33             fp.write('{} {}°C\n'.format(
34                 time.time(),
35                 temperature
36             ))
37     except:
38         return
39
40 def main():
41     while True:
42         try:
43             cTemp = readTemperature()
44             log_temp(cTemp)
45             time.sleep(1)
46         except KeyboardInterrupt:
47             return
48
49 if __name__ == '__main__':
50     main()
```

C. Programa Ejemplo: `pico-code-i2c.py`

src/pico-code-i2c.py

```
1 from i2cslave import I2CSlave
2 from utime import sleep_ms, sleep_us
3 import ustruct
4
5 VAREF = 3.3
6 I2C_SLAVE_ADDR = 0x0A
7
8
9 def main():
10     setup()
11     while True:
12         # 1. Get temperature
13         temperature = read_temp()
14         # 2. Convert temperature from pyfloat to bytes
15         data = ustruct.pack('<f', temperature)
16
17         # 3. Check if Master requested data
18         if i2c.waitForRdReq(timeout=0):
19             # If so, send the temperature to Master
20             i2c.write(data)
21             # end if
22
23         # 3. Check if Master sent data
24         if i2c.waitForData(timeout=0):
25             # If so, print it
26             rcv = i2c.read()
27             print(rcv.decode('utf-8'))
28             # end if
29     # end def
30
31
32 def read_temp():
33     # '''Reads temperature in C from the ADC'''
34     return 25.0
35 # end def
36
37
38 def setup():
39     global i2c, adcm, adcp
40     i2c = I2CSlave(address=I2C_SLAVE_ADDR)
41     adcm = machine.ADC(machine.Pin(26)) # Init ADC0
42     adcp = machine.ADC(machine.Pin(27)) # Init ADC1
43 # end def
44
45
46 if __name__ == '__main__':
47     main()
```

D. Programa Ejemplo: i2cslave.py

src/i2cslave.py

```
1 import machine
2 from utime import sleep_ms, sleep_us
3 class I2CSlave():
4     def __init__(self, id=0, address=0x27, sda=None, scl=None):
5         if id > 1: raise ValueError('Unsupported')
6         elif id == 0:
7             if sda is None: sda = 0
8             if scl is None: scl = 1
9             if sda not in [0, 4, 8, 12, 16, 20]:
10                 raise ValueError('Invalid pin number for sda')
11             if scl not in [1, 5, 9, 13, 17, 21]:
12                 raise ValueError('Invalid pin number for scl')
13         else:
14             if sda is None: sda = 2
15             if scl is None: scl = 3
16             if sda not in [2, 6, 10, 14, 18, 26]:
17                 raise ValueError('Invalid pin number for sda')
18             if scl not in [3, 7, 11, 15, 19, 27]:
19                 raise ValueError('Invalid pin number for scl')
20
21         if address < 0 or address > 0x7f:
22             raise ValueError('Address out of range (7bit addresses only)')
23
24         self._sda = sda
25         self._scl = scl
26         self._addr = address
27         self._base = __I2C0_BASE if id == 0 else __I2C1_BASE
28
29         self.__setupPin(sda)
30         self.__setupPin(scl)
31
32
33
34
35         self.__regClr(__IC_ENABLE, 0x0001)
36
37         self.__regClr(__IC_SAR, 0x01ff)
38         self.__regSet(__IC_SAR, address)
39
40
41
42         self.__regClr(__IC_CON, 0x0049)
43
44
45
46         self.__regSet(__IC_ENABLE, 0x0001)
47
48         self.__initialized = True
49
50
51     def __setupPin(self, pin):
52
53
54         gpioaddr = __IO_BANK0_BASE + 8 * pin + 4
55         machine.mem32[gpioaddr | __ATOM_CLR] = 0x1f
56         machine.mem32[gpioaddr | __ATOM_SET] = 0x03
57
58
59     def __regClr(self, reg, mask):
60         machine.mem32[self._base | __ATOM_CLR | reg] = mask
61
62
63     def __regSet(self, reg, mask):
64         machine.mem32[self._base | __ATOM_SET | reg] = mask
65
```

```

66
67 def __regRead(self, reg, andmask=0xffffffff):
68     return machine.mem32[self._base | __ATOM_RW | reg] & andmask
69
70 def __regWrite(self, reg, value):
71     machine.mem32[self._base | __ATOM_RW | reg] = value
72
73
74 def __regXor(self, reg, mask):
75     machine.mem32[self._base | __ATOM_XOR | reg] = mask
76
77
78 @property
79 def id(self):
80     return 0 if self._base == __I2C0_BASE else 1
81
82
83 @property
84 def sda(self):
85     return self._sda
86
87
88 @property
89 def scl(self):
90     return self._scl
91
92
93 @property
94 def address(self):
95     return self._addr
96
97 def idle(self):
98     return not self.__regRead(__IC_STATUS, 0x01)
99
100
101 def rxBufferCount(self):
102     return self.__regRead(__IC_RXFLR, 0x1f)
103
104
105 def rxBufferEmpty(self):
106     return not self.__regRead(__IC_STATUS, 0x08)
107
108
109 def rxBufferFull(self):
110     return self.__regRead(__IC_STATUS, 0x10)
111
112
113 def txBufferCount(self):
114     return self.__regRead(__IC_TXFLR, 0x10)
115
116
117 def txBufferEmpty(self):
118     return not self.__regRead(__IC_STATUS, 0x04)
119
120
121 def txBufferFull(self):
122     return not self.__regRead(__IC_STATUS, 0x02)
123
124
125 def read(self):
126
127
128     if not self.__initialized: raise IOError('Uninitialized')
129
130     while not self.__regRead(__IC_STATUS, 0x08) and self.__regRead(__IC_RXFLR, 0x1f) < 1:
131         sleep_us(10)
132
133     bytecount = self.__regRead(__IC_RXFLR, 0x1f)

```

```

134     ba = bytearray(bytecount)
135     for i in range(bytecount):
136         ba[i] = self.__regRead(__IC_DATA_CMD, 0xff)
137     return ba
138
139
140     def readByte(self):
141
142
143         if not self.__initialized: raise IOError('Uninitialized')
144
145         while not self.__regRead(__IC_STATUS, 0x08):
146             sleep_us(10)
147
148         return self.__regRead(__IC_DATA_CMD, 0xff)
149
150
151     def write(self, ba):
152
153
154
155
156
157         if not self.__initialized: raise IOError('Uninitialized')
158         if not isinstance(ba, (bytes, bytearray)): raise ValueError('An array of bytes is
159         required')
160         for b in ba:
161             self.writeByte(b)
162
163
164     def writeByte(self, b):
165
166
167
168
169         if not self.__initialized: raise IOError('Uninitialized')
170
171         while not self.__regRead(__IC_RAW_INTR_STAT, 0x20):
172             sleep_us(10)
173
174         self.__regClr(__IC_CLR_TX_ABORT, 0x01)
175
176         self.__regRead(__IC_CLR_RD_REQ)
177
178         while not self.__regRead(__IC_STATUS, 0x02):
179             sleep_us(10)
180         self.__regWrite(__IC_DATA_CMD, b & 0xff)
181
182
183     def waitForData(self, timeout=-1):
184
185
186
187         if not self.__initialized: raise IOError('Uninitialized')
188         while self.rxBufferEmpty() and (timeout > 0):
189             timeout-= 1
190             sleep_ms(1)
191         return not self.rxBufferEmpty()
192
193
194     def waitForRdReq(self, timeout=-1):
195
196
197
198         if not self.__initialized: raise IOError('Uninitialized')
199         while (self.__regRead(__IC_RAW_INTR_STAT, 0x20) != 0) and (timeout > 0):
200             timeout-= 1

```

```
201     sleep_ms(1)
202     return self.__regRead(__IC_RAW_INTR_STAT, 0x20)
203
204
```
