



universidade de aveiro

departamento de eletrónica, telecomunicações e informática

Curso 8309 - Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações

Disciplina 41489 – Sistemas de Instrumentação Eletrónica

Ano letivo 2021/2022

Relatório

Projeto 2 – Controlo de Processo Térmico

Autores:

84739 Manuel Silva

84953 Bruno Santos

Turma P2 Grupo 9

Data 28/06/2022

Docente Pedro Fonseca

Resumo: O objetivo deste projeto é desenvolver um sistema que seja capaz de controlar a temperatura de um processo térmico. Para tal desenvolvemos soluções em hardware e firmware, utilizando o chipKIT MAX32, assim como todos os circuitos eletrónicos necessários.

Introdução

Este trabalho prático tem como propósito a implementação de um sistema de controlo e medição de temperatura, numa gama entre 40 e 100 graus, recorrendo a um termopar.

O utilizador deste sistema deverá introduzir na interface do utilizador o valor de temperatura ao qual uma resistência cerâmica de 22 ohm deverá aquecer. Após a introdução dessa temperatura, deverá estar disponível o valor da temperatura da resistência no computador.

O microcontrolador usado foi o PIC32 (Evaluation board MAX32), a partir do qual será gerado um sinal PWM, serão utilizados conversores A/D para que seja feita a leitura dos sinais, e será feito um controlador, para que a seleção da temperatura por parte do utilizador possa ser feita sem erro.

Descrição do problema e objetivos

O controlo de temperatura baseia-se na utilização de uma resistência de aquecimento (*Heating Element*), e num sensor de temperatura, o termopar. O módulo da interface de potência transforma o sinal PWM do microcontrolador para níveis de tensão e corrente adequados para a resistência, permitindo assim ao microcontrolador regular a quantidade de energia fornecida à resistência.

A temperatura é lida através do termopar, que varia o valor da temperatura através do efeito de Seebeck, que nos dá o valor da temperatura em tensão. Este valor de temperatura é apenas o valor da resistência, para obtermos o valor da temperatura utilizamos o termistor, que é um dispositivo que varia a sua resistência dependendo da temperatura. Para obtermos a temperatura total do sistema convertemos os valores das tensões do termistor e do termopar em conversores A/D separados do microcontrolador e transformamos, por software, num valor de temperatura para o sistema.

Para que os valores de tensão do termopar possam ser lidos pelo microcontrolador, é necessário recorrermos ao amplificador de instrumentação, para obtermos a resolução pretendida das medidas.

A interface de utilizador é implementada num PC externo, num terminal. A comunicação entre o PC e o microcontrolador é feita utilizando um cabo USB, através de uma UART. Com este módulo, o utilizador deverá ser capaz de definir a temperatura desejada dentro de um intervalo de 40°C a 100°C, ver a temperatura instantânea, parar o sistema e a temperatura de pico.

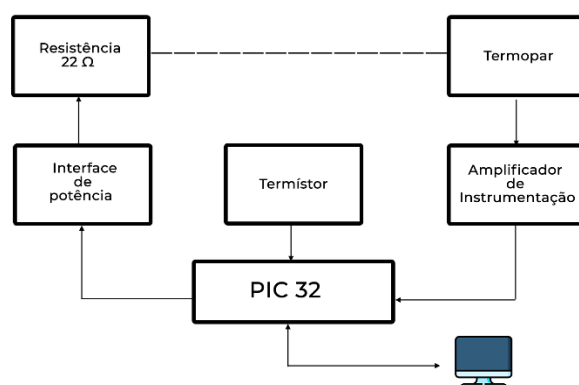


Figura 1- Esquema geral do Sistema

Projeto e conceção

Implementação do Hardware

O primeiro passo foi desenhar um circuito de forma que seja possível entregar potência à resistência cerâmica. O circuito que apresentámos foi o seguinte:

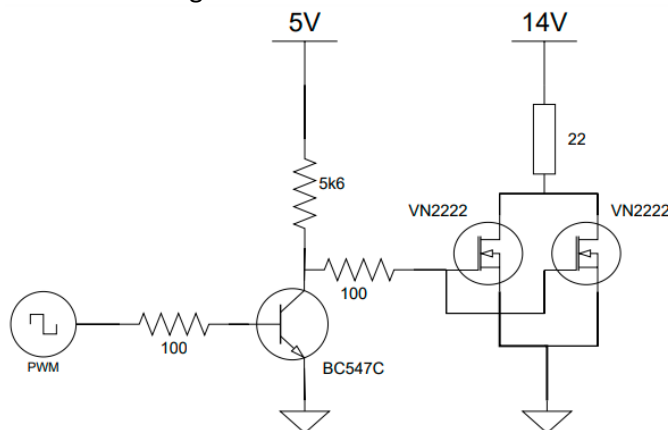


Figura 2- Interface de potência

Como se pode ver na figura, o sinal PWM está ligado à base de um transístor BC547C, que tem a função de subir o nível de tensão do sinal para 5V. Uma alternativa melhor seria configurar o pino da PIC32 como saída (TRIS = 0), assim, o FET do pino ficaria em *open-drain*, não sendo necessária a utilização do BC547C.

A razão pela qual aumentámos o nível de tensão do PWM, foi o devido à tensão de *threshold* dos FETs de potência VN2222 ser muito alta ($1V < V_{th} < 3V$), podendo fazer com que os FETs fiquem a funcionar na zona de tródo, assim, com 5V garantimos que os FETs vão estar na zona de saturação.

Após montado o circuito para aquecer a resistência, passámos para a medição da temperatura do termopar, contudo as tensões à saída do termopar têm valores da ordem dos mV, logo é preciso amplificar esse sinal. Para isso vamos recorrer ao amplificador de instrumentação AD623.

Para a gama de temperaturas que estão nas especificações deste trabalho prático (40 °C a 100 °C), a gama de tensões de saída do termopar é [1.612, 4.092] mV. Contudo, é preciso compreender que o que o termopar mede são diferenças de temperatura, ou seja, é preciso ter em conta a temperatura ambiente, a qual considerámos que estaria entre 10°C e 30°C. Para além disso, definimos uma margem de 10 °C para que o sistema fique em malha aberta antes dos 40°C e depois dos 100°C.

Com estas considerações, a tensão mínima à saída do termopar é o valor quando temperatura ambiente for 30°C e a temperatura da resistência for também 30°C, ou seja, uma diferença de temperatura de 0°C. A tensão máxima será o valor quando a temperatura ambiente for 10°C e a temperatura da resistência for 110°C, ou seja, uma diferença de temperatura de 100°C.

Desta forma, a gama de tensões à saída do termopar é: [0, 4.092] mV. Podemos agora aplicar esta gama no amplificador de instrumentação, que foi montado da seguinte forma:

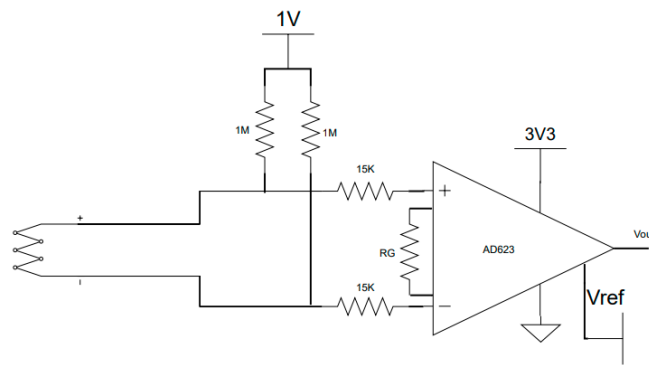


Figura 3 – Circuito com termopar e amplificador de instrumentação

Em primeiro lugar, foi necessário gerar a tensão de alimentação do amplificador de instrumentação. Para gerar os 3.3V, utilizámos o regulador de tensão LM293.

Usámos resistências relativamente altas para ligar a tensão de modo comum, para ter o máximo de corrente a polarizar o amplificador.

De seguida, tivemos que descobrir qual seria o melhor valor para a tensão de referência, tensão e modo comum e ganho. Para isso, utilizámos o simulador *Diamond* da *Analog Devices*:

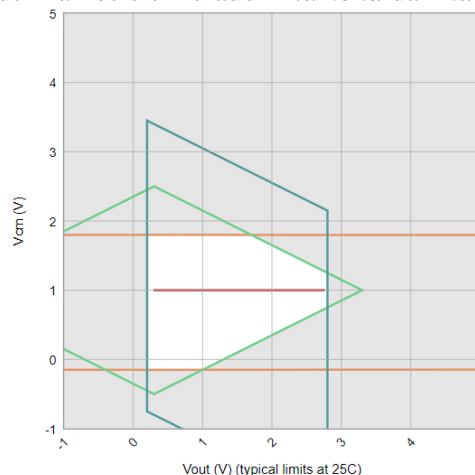


Figura 4 - Diamond AD623

Concluimos logo que a tensão de modo comum ideal seria 1V, já que é o valor que permite uma maior gama de tensão de saída do amplificador. Vimos também que a tensão de referência deve ser a mais baixa possível, pela mesma razão apresentada anteriormente. Chegamos a um valor de 300mV. Por fim, maximizámos o ganho do amplificador tendo o cuidado de que este fique dentro da zona de funcionamento. Chegámos a um ganho de 600, resultando em $R_G = 167 \text{ ohm}$.

Estes valores de tensão mencionados anteriormente foram gerados através de um divisor resistivo, ligado a um TL431:

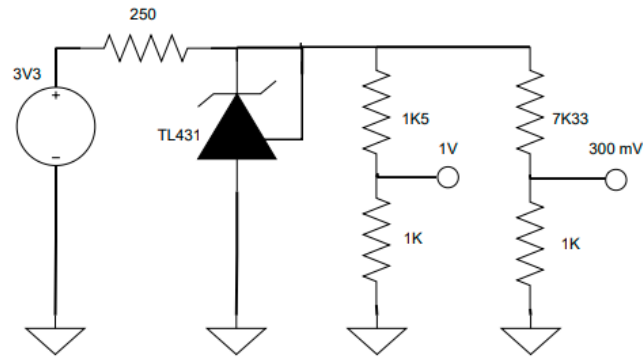


Figura 5 – Circuito para gerar tensão de modo comum e tensão de referência

A saída do amplificador de instrumentação foi ligada a um filtro passivo passa-baixo, com uma frequência de corte de, aproximadamente 6 Hz, de forma que o sinal que vai ser ligado à ADC0 do PIC32 vá mais “limpo” possível.

As tensões de saída do amplificador de instrumentação variam entre 300mV e 2.76V, o que dá uma resolução de:

$$Resolução = \frac{2.76 - 0.3}{100 - 40} = 41 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$$

Tendo em conta que a resolução da ADC do PIC32 é 3.23 mV/nível:

$$Resolução_{sistema} = \frac{3.23\text{mV}/\text{nível}}{41\text{mV}/^{\circ}\text{C}} = 0.08 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Por fim, montámos o termístor para que seja medida a temperatura ambiente para que seja feita a compensação:

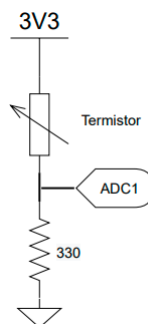


Figura 6 – Circuito com o termístor

Na secção seguinte vamos apresentar como fizemos a leitura da temperatura ambiente.

Implementação do Software

Para a leitura da temperatura ambiente, configuramos 2 conversores A/D (um para o termopar, e outro para o termistor) no microcontrolador. As leituras só são feitas quando é premida uma tecla, para que as leituras comecem quando o utilizador pressionar uma tecla na interface de utilizador.

Após obtermos os valores dos níveis de tensão dos conversores A/D, passamos o valor do termistor para a função *adc2thermistor*, e o valor do termopar para a função *adc2thermocouple*. Após a soma da saída da saída de cada uma destas funções, temos o valor da temperatura. Vamos explicar agora como funciona cada uma destas funções com mais detalhe.

A função *adc2thermistor* tem como argumento o valor de um dos conversores A/D. Esse argumento é depois utilizado numa equação de primeiro grau, obtida a partir da equação de Steinhart. Para obtermos a equação de Steinhart começamos por ver 3 valores, no *datasheet*, na nossa gama de interesse (0°-30°C) para multiplicar pela resistência do termistor (330 Ohm). Escolhemos 10° (2.052), 25° (1.000) e 30°C (0.795).

Depois, utilizamos um calculador online para nos devolver os coeficientes da equação de Steinhart.

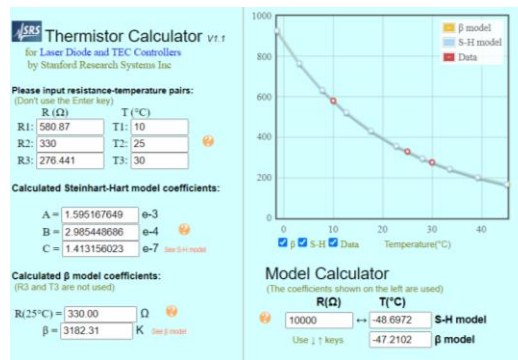


Figura 7- Calculador online dos coeficientes de Steinhart

Como para este intervalo tínhamos aproximadamente uma reta, a partir do valor da equação de Steinhart, fizemos uma regressão linear. A equação resultante foi:

$$thermistortemp = -32.6880 * (3.3 - valor_{adc}) + 79.7848$$

Para a função *adc2thermocouple* utilizamos outra saída do conversor A/D como argumento. A esse valor subtraímos a tensão de referência. De seguida, dividimos este valor pelo valor do ganho do amplificador de instrumentação, e finalmente aplicamos a reta de linearização do termopar. Para a obtenção da equação de linearização, fizemos uma regressão linear dos valores do termopar, a partir dos valores do *datasheet*. A equação obtida foi:

$$thermistortemp = 24335.0 * thermocoupletemp + 0.5014$$

Finalmente, para encontrarmos os parâmetros para maximizar a performance do controlador PI deixamos a resistência aquecer em malha aberta e registamos os valores. A partir desses valores corremos um *script* de Matlab que nos devolve os parâmetros ideais (recorrendo ao comando *pidentune*).

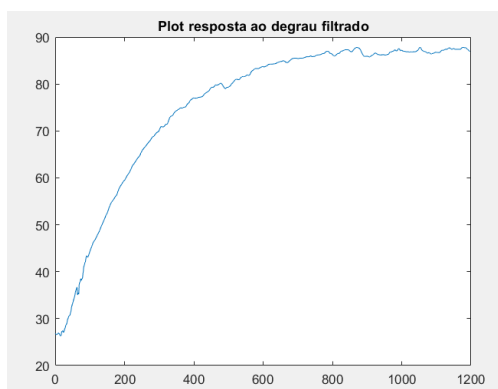


Figura 8- Resposta ao aquecer a resistência em malha aberta

Resultados

Para apresentar os sinais de saída do sistema, colocámos um *setpoint* 50 °C.

Em primeiro lugar verificámos a leitura da temperatura ambiente através do terminal e o sinal que é colocado na ADC1:

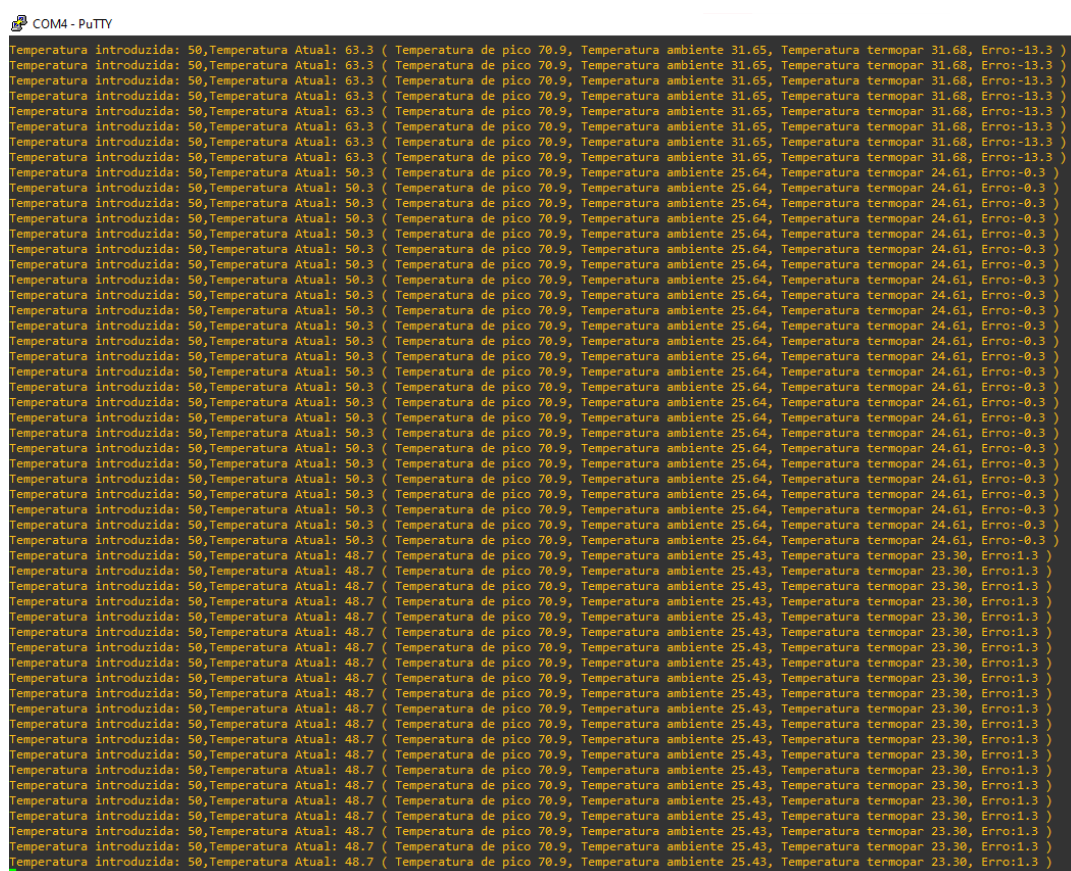


Figura 9 - Interface do utilizador

Projeto 2 – Controlo de processo Térmico

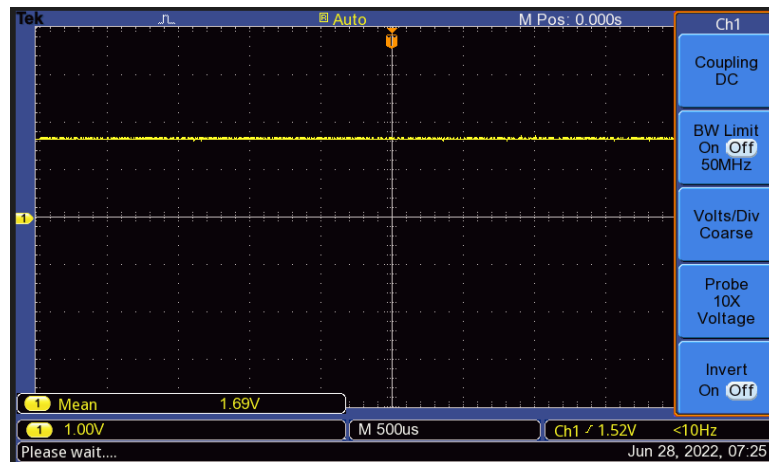


Figura 10 - Sinal gerado pelo divisor resistivo do termistor

Verificámos o sinal de saída do amplificador de instrumentação (filtrado):

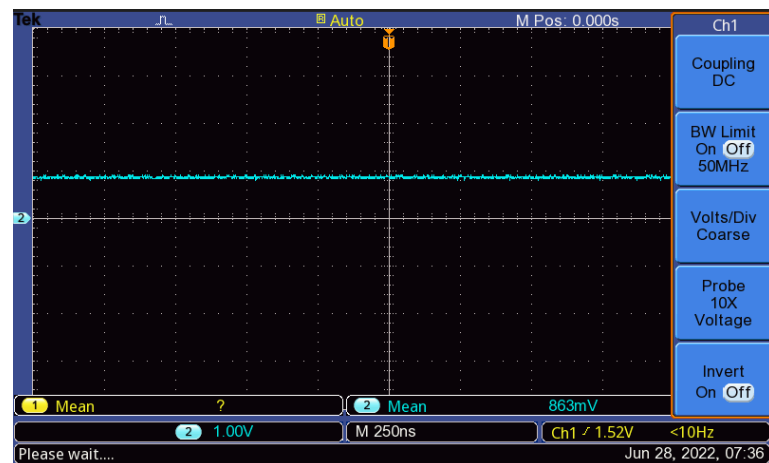


Figura 11 - Sinal à saída do amplificador de instrumentação

De seguida, com a ajuda de um multímetro Fluke, comparámos os valores apresentados na interface com os valores reais. Começando com a temperatura ambiente:

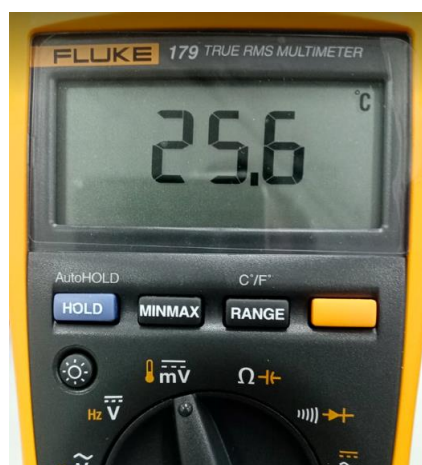


Figura 12 - Medição da temperatura ambiente

Logo a seguir medimos a temperatura na resistência, no ponto mais próximo possível da junção do termopar:

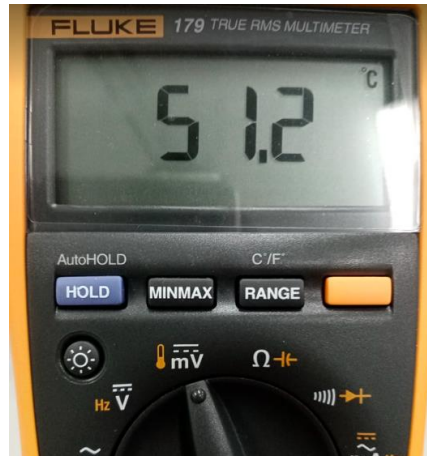


Figura 13 - Medição da temperatura na resistência

Por fim, observámos o comportamento do sinal PWM:

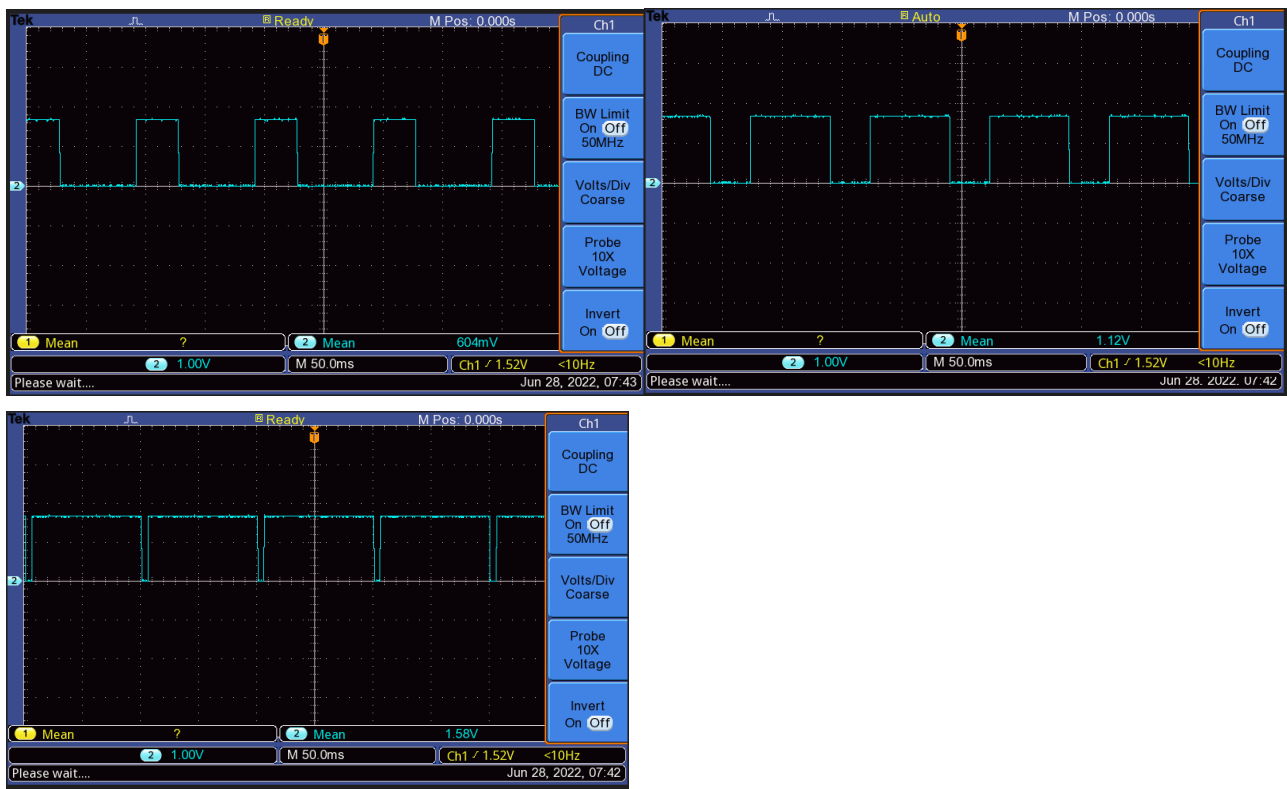


Figura 14 - Sinal PWM

Análise dos Resultados

Para verificar se a temperatura ambiente está a ser bem medida, calculámos a resistência do termistor:

$$1.69 = 3.3 * \frac{330}{R_{termistor} + 330} \quad (=) \quad R_{termistor} = 314 \, \Omega$$

De acordo com o *datasheet* do termistor, a sua resistência a 25°C deve ser $1 * 330 = 330 \, \Omega$, e a 30°C será $0.795 * 330 = 262 \, \Omega$. Ou seja, como $314 \, \Omega$ é um valor intermédio, a temperatura ambiente estará entre os 25°C e 30°C (mais próximo de 25, já que a resistência calculada é mais próxima dos $330 \, \Omega$), o que se verifica

na interface (25.4 °C).

O sinal à saída do amplificador de instrumentação deverá corresponder à temperatura média. Em primeiro lugar calculámos a tensão que está à saída do termopar:

$$1) 863mV - V_{ref} = 563mV$$

$$2) \frac{563mV}{G} = 0.93833mV$$

3) Por último, calculámos a temperatura através da equação linear obtida:

$$T = 24335 * 0.93833mV + 0.5014 = 23.3^{\circ}C$$

Esta é a diferença de temperatura medida pelo termopar. Se compensarmos com a temperatura ambiente, a temperatura medida é: $23.3^{\circ}C + 25.4^{\circ}C = 48.7^{\circ}C$.

Para confirmarmos estes valores, medimos os valores reais. A temperatura ambiente corresponde ao valor obtido pelo termistor, já a temperatura medida pelo termopar apresenta um erro de, aproximadamente, 2 °C. Este erro pode ser justificado pela amostragem da interface ser muito mais lenta do que a do multímetro, e também devido ao facto do termopar do mesmo não estar no mesmo ponto da junção que é utilizada no nosso sistema.

Por fim, analisámos o comportamento do sinal PWM, que ajusta o seu *duty-cycle* quando o valor da temperatura está próximo do *setpoint* definido. Isto é de esperar quando é usado um controlador PI, contudo, o sistema tem um comportamento de um controlador *on-off*, já que apresenta uma ligeira oscilação. Isto deve-se ao facto de este ser um processo lento, e apesar de termos aplicado algumas técnicas para encontrar o Kp e Ti ideais do controlador, não conseguimos que a temperatura permanecesse num valor fixo.

Conclusões

Com este trabalho prático conseguimos compreender o funcionamento de um instrumento de medição de temperatura. Conseguimos compreender o que de facto o termopar mede: diferenças de temperatura. Daí a necessidade de compensar essa diferença, com recurso a um termistor, cuja sua resistência varia com a temperatura, para que seja medida a temperatura que está a resistência.

Compreendemos também a necessidade da utilização de um amplificador de instrumentação, uma vez que as tensões aos terminais do termopar são muito baixas, é necessário um amplificador com ganho diferencial elevado e que o sinal de saída esteja com menos ruído possível.

Durante a execução deste trabalho fomos percebendo que este circuito é altamente sensível ao ruído. Este foi um problema que conseguimos atenuar desde utilizarmos alguns filtros, até diminuirmos ao máximo o tamanho do circuito na placa branca.

Como foi referido, aquele que foi o ponto mais fraco do nosso trabalho foi o facto de o controlador PI, na realidade, se comportar como um *on-off*, o que quer dizer que os parâmetros do controlador não são os ideais e poderiam ser melhorados. Apesar disso, achamos que os principais objetivos deste trabalho foram concluídos, uma vez que conseguimos montar um sistema de medição com um erro relativamente baixo, conseguimos que os sinais que entram nas ADCs da PIC32 estivessem o menos ruidosos possíveis, e sobretudo, compreendemos o funcionamento destes instrumentos de medição.

Referências

[1] <https://www.thinksrs.com/downloads/programs/therm%20calc/ntccalibrator/ntccalculator.html>

[2] <https://tools.analog.com/en/diamond/>

[3] Mota, Alexandre, “Controladores PID”, Beta Version 0.1, 2018.

[4] Thermistor datasheet (330 Ohm, ND 03)

[5] Type K Thermocouple Reference Table

[6] AD623 Rail-to-Rail Instrumentation Amplifier, Datasheet

[7] VN2222 datasheet: <https://www.mouser.com/datasheet/2/268/VN2222-1181471.pdf>