



Calibração de sensores de fluxo de calor

Ação 69015

Curso de Especialização Tecnológica - Tecnologia Mecatrónica

Carlos Duarte da Silva Completo

Orientador: Marco Martinho

Dezembro de 2021

Resumo

Neste trabalho foi desenvolvido um protótipo de calibrador de sensores de fluxo de calor. O objectivo é que este dispositivo permita determinar a sensibilidade dos sensores de fluxo de calor, uma vez que os valores fornecidos pelos fabricantes parecem ser incertos.

Os sensores de fluxo de calor geram uma diferença de tensão nos seus terminais proporcional ao calor que os atravessa. Uma vez que a magnitude da diferença de tensão é inferior a 20 mV, é necessário adquirir, ampliar e tratar o sinal. Para isso desenvolveu-se um circuito electrónico dedicado com amplificadores de instrumentação. Para adquirir sinais de outros sensores utilizam-se placas específicas ou a própria placa do microcontrolador.

Num calibrador, o calor que atravessa o sensor de fluxo de calor deve ser controlado por forma a que se possam efectuar os cálculos necessários à determinação da sensibilidade do sensor. Para esse efeito, desenvolveu-se a programação do microcontrolador (que controla a activação da resistência de aquecimento e faz a aquisição de sinais) e a programação de uma aplicação em ambiente Windows que funciona como interface com o utilizador.

Agradecimentos

Agora que chegámos à etapa final do curso gostaria de prestar o meu agradecimento a todos os que contribuíram para a realização e conclusão do mesmo.

Agradeço ao Cenfim de Caldas da Rainha, onde incluo a direcção e demais colaboradores, pela possibilidade da minha participação no curso, pela organização e re-organização do mesmo (em tempos de pandemia).

Agradeço aos formadores dos módulos e orientadores do projecto final pela sua partilha de conhecimentos e pela fomentação ao gosto da aprendizagem contínua, permitindo-nos expandir as possibilidades profissionais de cada um.

Agradeço aos meus colegas que tornaram a participação no curso mais agradável e enriquecedora, principalmente aos que tiveram a resiliência para chegar ao fim do mesmo, ou seja ao Armando, ao Benson, ao Fernando, ao Filipe, ao Miguel, ao Ricardo e ao Rui.

Agradeço à Smartfreez, a minha entidade empregadora, por ter tido a disponibilidade e flexibilidade de facilitar a minha participação no curso e no seu interesse e apoio no desenvolvimento do projecto apresentado neste trabalho final.

Índice Geral

Resumo	i
Agradecimentos	iii
Índice Geral	v
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Listas	ix
Abreviaturas	xi
Nota prévia	xiii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. A empresa	3
1.3. Descrição e objectivos do projecto	5
1.3.1. Hardware do protótipo de calibrador	5
1.3.2. Software do protótipo de calibrador	8
1.3.3. Testes de utilização do protótipo de calibrador/software.....	9
2. Desenvolvimento da electrónica do protótipo de calibrador	11
2.1. Considerações gerais.....	11
2.2. Alimentação eléctrica.....	12
2.3. Amplificação de sinais do sensor de fluxo de calor.....	13
2.3.1. Testes à amplificação de sinal	15
2.4. Aumento da resolução de sinais do sensor de fluxo de calor	17
2.4.1. Testes à placa Adafruit ADS1115.....	17
2.5. Placas de aquisição e amplificação de sinal de termopares	19
2.6. Aquisição de temperatura utilizando circuito integrado DS18B20.....	19
2.7. Placa de aquisição de sinal de corrente eléctrica	20
2.8. Divisor de tensão como sensor de tensão	21
2.9. Electrónica de potência.....	22

2.10.	Ligações à placa do microcontrolador.....	23
2.11.	Placa electrónica experimental	24
3.	Desenvolvimento do software de controlo.....	27
3.1.	Considerações gerais.....	27
3.2.	Alguns pormenores da programação do Arduino.....	29
3.2.1.	Obtenção de valores de sinais.....	29
3.2.2.	Obtenção de valores a partir da IHM e definição da acção	30
3.2.3.	Controlo de temperatura em valor fixo e com histerese	31
3.2.4.	Obtenção do valor de temperatura de um termopar	32
3.2.5.	Utilização de bibliotecas.....	35
3.3.	Alguns pormenores da programação da aplicação em Visual Basic	35
3.3.1.	Envio de informação da aplicação para o Arduino.....	36
3.3.2.	Temporizadores para comunicação e escrita.....	37
3.3.3.	Funcionamento da aplicação em Windows	38
4.	Comentários gerais.....	45
5.	Trabalho futuro	47
6.	Conclusões.....	49
7.	Referências.....	51

Índice de Figuras

Figura 1 – Esquema genérico da transferência de calor entre dois meios.	1
Figura 2 – Sensor de fluxo de calor de filme fino: a) imagem de um sensor fabricado pela Fluxteq; b) esquema de ligações diferenciais para o sensor de fluxo de calor e termopar incorporado.	2
Figura 3 – Exemplo de comparação entre o congelamento experimental e o obtido por simulação (num certo instante temporal). Copyright: Smartfreez.....	4
Figura 4 – Exemplos de equipamentos desenvolvidos pela Smartfreez: a) Equipamento passivo “Scale-down device”; b) “Micro Scale-Down”; c) Adaptação de câmaras convencionais. Copyright: Smartfreez.....	5
Figura 5 – Esquema do protótipo de calibrador de sensores de fluxo de calor.....	6
Figura 6 – Esquema detalhado do bloco de aquecimento (não à escala).....	7
Figura 7 – Fonte simétrica a partir de duas fontes simples.	12
Figura 8 – Esquema da regulação de tensão.....	13
Figura 9 – Esquema genérico de amplificador somador não-inversor de duas tensões.	14
Figura 10 – Esquema de aquisição de sinais do sensor de fluxo de calor.....	15
Figura 11 – Relações da amplificação, entre tensão de entrada e saída, utilizando amplificadores de instrumentação AD623. A azul: amplificação com ganho teórico de 214. A laranja: amplificação com ganho teórico de 547.	16
Figura 12 – Relações da amplificação, entre tensão de entrada e saída após amplificador somador, utilizando amplificadores de instrumentação AD623. A azul: amplificação com ganho teórico de 214. A laranja: amplificação com ganho teórico de 547. ...	16
Figura 13 – Placa Adafruit ADS1115.....	17
Figura 14 – Relação entre a diferença de tensão à entrada dos amplificadores de instrumentação AD623 e o sinal digital gerado pela placa Adafruit ADS1115. A azul: amplificação com $R_g = 469 \, \Omega$. A laranja: amplificação com amplificação com $R_g = 183 \, \Omega$	18
Figura 15– Relação entre o sinal digital gerado pela placa Adafruit ADS1115 e a diferença de tensão à entrada dos amplificadores de instrumentação AD623. A azul: amplificação com $R_g = 469 \, \Omega$. A laranja: amplificação com amplificação com $R_g =$ $183 \, \Omega$	18
Figura 16 – Placa Adafruit MCP9600.....	19
Figura 17 – Esquema de ligação entre DS18B20 e microcontrolador.	20

Figura 18 – Relação entre corrente eléctrica e sinal digital gerado no conversor ADC do microcontrolador.....	21
Figura 19 – Divisor de tensão como sensor de tensão.....	22
Figura 20 – Esquema da parte de electrónica de potência.....	23
Figura 21 – Esquema de ligação entre placa de microprocessador e sensores/actuadores.	24
Figura 22 – Placa electrónica experimental.	25
Figura 23 – Estrutura geral dos programas para IHM e Arduino.	27
Figura 24 – Esquema genérico de um termopar.....	32
Figura 25 – Propriedade do temporizador “TimerSerial” na parte gráfica.....	38
Figura 26 – Ecrã de entrada e configurações da IHM.	39
Figura 27 – Secção de conexão por porta Série.....	39
Figura 28 – Seleção de tipo de controlo da resistência de aquecimento e outras configurações.	40
Figura 29 – Sistema conectado e a receber informação.....	40
Figura 30 – Separador Run.	41
Figura 31 – Dados a serem inseridos na tabela e no gráfico.....	41
Figura 32 – Processo de gravação de dados da tabela para um ficheiro no formato Excel.	42
Figura 33 – Ficheiro gerado aberto no Excel.....	42
Figura 34 – Ecrã de ajuda da aplicação.	43
Figura 35 – Activação de alarmes.....	43

Índice de Listas

Lista 1 – Início do loop: atribuição de sinais a variáveis e verificação de alarmes.....	29
Lista 2 – Exemplo de função para determinação do valor de um sinal: função get_VHR(int x). 29	
Lista 3 – Extração de valores enviados pela aplicação Windows para o Arduino.....	30
Lista 4 – Código de controlo ligado/desligado da resistência de aquecimento.....	31
Lista 5 – Algoritmo para obtenção da temperatura usando um termopar e temperatura de referência.....	33
Lista 6 – Código de cálculo de temperatura usando um termopar e temperatura de referência.	33
Lista 7 – Bibliotecas incluídas no código.	35
Lista 8 – Envio de informação ao Arduino na escolha de tipo de controlo quando se clica no botão “Set / Run”.	36
Lista 9 – Envio de informação ao Arduino para desligar resistência de aquecimento quando se clica no botão “Reset / Stop”	37
Lista 8 – Programação do temporizador “TimerSerial” na parte de código (parcial).	38

Abreviaturas

A	Área de transferência de calor, [m ²]
ADC	Conversor Analógico-Digital
AHR	Corrente eléctrica que passa resistência de aquecimento, [A]
$AHRa$	Valor digital de AHR
G	Ganho de amplificação, [adimensional]
I	Corrente eléctrica, [A]
I^2C	Inter-Integrated Circuit, tipo de barramento série
IHM	Interface Homem-Máquina
LED	Diodo emissor de luz (<i>light-emitting diode</i>)
q	Fluxo de calor, [W·m ⁻²]
$\dot{Q}$	Calor transferido por segundo (potência), [W]
P	Potência, [W]
R_1	Resistência R1 num divisor de tensão, [Ω]
R_2	Resistência R2 num divisor de tensão, [Ω]
R_g	Resistência de ganho num amplificador, [Ω]
S	Sensibilidade do sensor de fluxo de calor, [V/(W·m ⁻²)]
TAL	Temperatura na superfície inferior do bloco de alumínio, [K]
TBO	Temperatura na placa electrónica, definida como <i>cold junction</i> , [K]
THR	Temperatura junto da resistência de aquecimento, [K]
THF	Temperatura do termopar incorporado no sensor de fluxo de calor, [K]
$THF1$	THF obtida utilizando o método de amplificação de sinal com AD623
$THF1a$	Valor digital de $THF1$
$THF2$	THF obtida utilizando a placa Adafruit MCP9600
$THF2a$	Valor digital de $THF2$
U	Tensão eléctrica, [V]
VHF	Diferença de tensão eléctrica no sensor de fluxo de calor, [V]
$VHFa$	Valor digital de VHF
VHR	Tensão eléctrica à entrada da resistência de aquecimento, [V]
$VHRa$	Valor digital de VHR
V_i	Tensão eléctrica na entrada, [V]
V_o	Tensão eléctrica na saída, [V]
ΔT	Diferença de temperatura, [K]
ΔV	Diferença de tensão eléctrica, [V]

Nota prévia

O autor não usa o Acordo Ortográfico de 1990.

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Em processos de congelamento (ou de descongelamento) ocorre transferência de energia entre o meio envolvente e o meio a congelar (ou descongelar). Neste tipo de processos a energia em jogo é normalmente na forma de calor.

Na Figura 1 apresenta-se o esquema genérico da transferência de calor entre dois meios (meio a congelar/descongelar e o meio envolvente). A quantidade de calor transferida na interface entre os dois meios depende de vários factores entre os quais: a diferença de temperatura entre os dois meios; a espessura da interface, o material da interface, e os materiais de ambos os meios. Se o meio envolvente for fluido (gasoso ou líquido) outro factor com relevância extrema na transferência de calor é a velocidade desse fluido sobre a interface. Neste caso ocorre o fenómeno de transferência de calor por convecção, sendo que a transferência de calor aumenta com o aumento da velocidade do fluido.

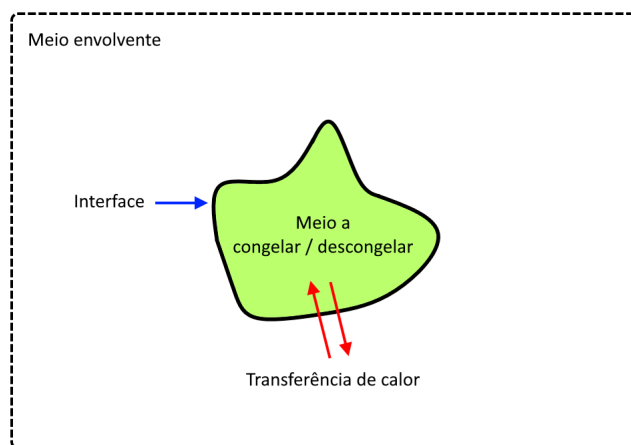


Figura 1 – Esquema genérico da transferência de calor entre dois meios.

No desenvolvimento e produção de biomisturas farmacêuticas as etapas processuais podem estar desfasadas no tempo e no espaço pelo que é necessário efectuar o congelamento dessas biomisturas para a sua preservação (para posterior utilização). Pode ser necessário congelar volumes desde poucos mililitros (nas fases de desenvolvimento) até centenas ou milhares de litros (em processos produtivos). Neste último caso o congelamento é efectuado em garrafas e sacos (até 20 L) ou em tanques.

Nos casos de congelamento (ou descongelamento) de biomisturas em garrafas, estas são colocadas no interior de câmaras refrigeradas. Dependendo do tipo de câmara de refrigeração, obtêm-se melhores, ou piores, performances em termos de transferência de calor e de rapidez do processo.

A performance da transferência de calor por convecção entre uma interface e um meio envolvente é analisada de uma forma normalizada através do coeficiente de transferência de calor, h , com unidades $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ que é definido por

$$h = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T} = \frac{q}{\Delta T}$$

Equação 1

em que $\dot{Q}$ é o calor transferido por segundo (em W), A é a área de transferência de calor (em m^2), ΔT é a diferença de temperatura entre a interface e o meio envolvente (em K), e q é o fluxo de calor (em $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), [1].

Existem várias formas de determinar o calor transferido através de uma interface, sendo a forma mais prática a utilização de sensores de fluxo de calor do tipo “filme fino”. Os sensores de fluxo de calor de filme têm espessura inferior a 1 mm (usualmente inferior a 0.5 mm), são constituídos por um filme externo que protege uma sequência de uniões do tipo termopar que originam uma diferença de tensão proporcional ao fluxo de calor que atravessa o sensor. Estes sensores costumam também incluir na sua estrutura um termopar independente que serve como aproximação à temperatura na interface.

Assim, os sensores de fluxo de calor do tipo “filme fino” têm tipicamente quatro fios de sinal, sendo dois referentes ao sinal diferencial do fluxo de calor e dois referentes ao sinal diferencial do termopar independente. Na mostra-se uma foto e um esquema típicos de um sensor de fluxo de calor de filme fino.

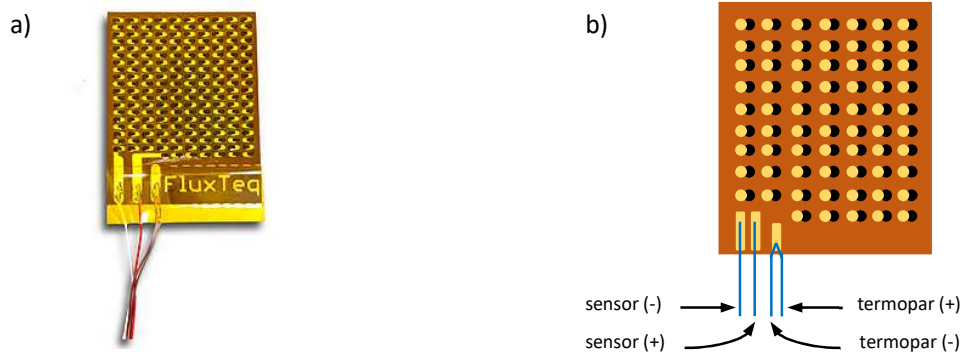


Figura 2 – Sensor de fluxo de calor de filme fino: a) imagem de um sensor fabricado pela Fluxteq; b) esquema de ligações diferenciais para o sensor de fluxo de calor e termopar incorporado.

O fluxo de calor, q , já definido na Equação 1 pode ser calculado através de

$$q = \frac{\Delta V}{S}$$

Equação 2

em que ΔV é a diferença de tensão gerada pelo sensor de fluxo de calor e S é o parâmetro denominado por “sensibilidade do sensor de fluxo de calor” sendo este indicado pelo fabricante do sensor.

O valor de S deve ser conhecido com rigor, caso contrário os valores calculados de q estarão desviados do valor verdadeiro. De facto, muitas vezes, quando se comparam valores experimentais de q para vários sensores verificam-se desvios elevados para as mesmas condições processuais, quando todos deveriam indicar o mesmo valor (dentro de alguma tolerância). Por vezes os desvios são superiores a 50 % quando os fabricantes indicam que o erro é inferior a 10 %.

É da necessidade de definir uma metodologia de confirmação dos valores de S indicados pelos fabricantes dos sensores de fluxo de calor que surge o tema proposto para o presente trabalho: o desenvolvimento de um equipamento que permita a calibração da sensibilidade dos sensores de fluxo de calor comerciais.

1.2. A empresa

O projecto foi desenvolvido na Smartfreez, [2], que é uma empresa que desenvolve soluções para os processos de congelamento e descongelamento realizados na indústria farmacêutica.

A Smartfreez foi fundada em 2012, está sediada no Taguspark, em Oeiras, e actualmente os seus clientes são empresas farmacêuticas multinacionais, existindo também projectos de pesquisa e inovação em parceria com universidades e empresas Portuguesas.

A actividade da Smartfreez foca-se em três vertentes principais:

- Estudos bioquímicos sobre a estabilidade ao congelamento/descongelamento de biomisturas farmacêuticas (por exemplo: soluções de proteínas, soluções com culturas de células, etc).
- Simulação computacional dos processos de congelamento/descongelamento de biomisturas.

- Desenvolvimento de equipamentos de congelamento/descongelamento para a indústria farmacêutica (máquinas laboratoriais, máquinas industriais e acessórios).

Para estudar a estabilidade de misturas farmacêuticas aos processos de congelação utiliza-se, normalmente, o equipamento CSA (Cold Stability Accelerator), desenvolvido pela Smartfreez, que permite reduzir o tempo de análise da estabilidade da formulação, quando comparado com os métodos tradicionais. As biomisturas são posteriormente analisados através de técnicas de análise padrão em laboratório, como a microscopia, a cromatografia HPLC (High Performance Liquid Chromatography), a análise de partículas por DLS (Dynamic Light Scattering), entre outras.

A simulação computacional é utilizada para mimetizar os processos de congelação e/ou descongelação. Assim, é possível prever o comportamento das biomisturas reduzindo os custos relacionados com o seu estudo laboratorial ou industrial real. Com base nas propriedades físico-químicas das biomisturas, os processos de congelamento e/ou descongelamento são simulados tanto em pequena escala (em vials, sacos, garrafas) ou como em larga escala (em tanques).

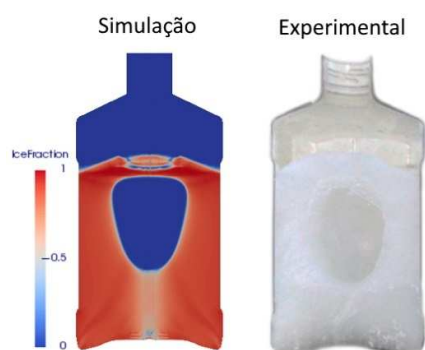


Figura 3 – Exemplo de comparação entre o congelamento experimental e o obtido por simulação (num certo instante temporal).
Copyright: Smartfreez.

Em termos de equipamentos desenvolvidos pela Smartfreez destacam-se os seguintes:

- “Cold Stability Accelerator” (equipamento de laboratório para estudo de estabilidade de biomisturas a baixas temperaturas)
- “Micro Scale-Down” (equipamento de laboratório para scale-down de processos).
- “Scale-down devices” (dispositivos passivos de scale-down).
- “Norma devices” (dispositivos passivos de melhoria da performance de congelação/descongelação).
- Controladores de ventoinhas (associadas a dispositivos Norma)

- Adaptação de câmaras de convecção forçada para utilização com dispositivos Norma.

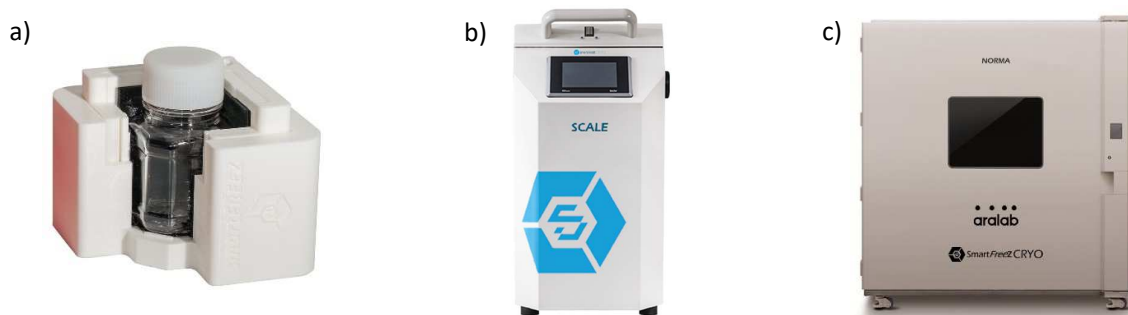


Figura 4 – Exemplos de equipamentos desenvolvidos pela Smartfreez: a) Equipamento passivo “Scale-down device”; b) “Micro Scale-Down”; c) Adaptação de câmaras convencionais. Copyright: Smartfreez.

1.3. Descrição e objectivos do projecto

O projecto está dividido em três partes:

- Desenvolvimento e construção física do protótipo de calibrador.
- Desenvolvimento e programação de software de aquisição de dados.
- Testes de utilização do protótipo/software.

Nas seguintes sub-secções descreve-se o trabalho projectado para cada umas das partes.

1.3.1. Hardware do protótipo de calibrador

A parte física do protótipo de calibrador divide-se em duas partes distintas:

- Bloco de aquecimento do sensor de fluxo de calor.
- Electrónica de alimentação e aquisição de sinal.

Na Figura 5 apresenta-se o esquema genérico do protótipo de calibrador de sensores de fluxo de calor, indicando-se os principais sensores e variáveis a utilizar na programação (indicadas a verde).

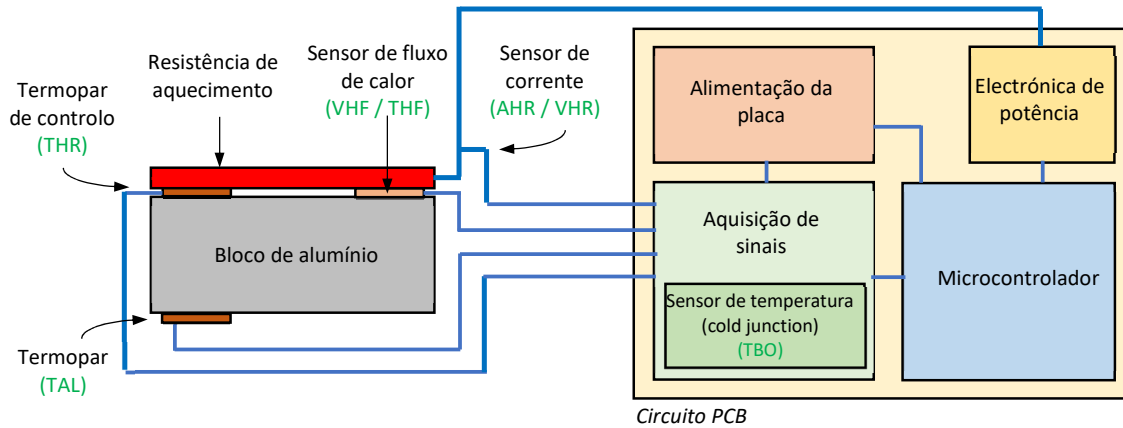


Figura 5 – Esquema do protótipo de calibrador de sensores de fluxo de calor.

Bloco de aquecimento do sensor de fluxo de calor

No bloco de aquecimento, o sensor de fluxo de calor é colocado entre um bloco de alumínio e uma resistência de aquecimento. Como as especificações técnicas da resistência de aquecimento são conhecidas e admitindo que a potência eléctrica se dissipa sem perdas sobre a forma de calor, que a produção de calor na resistência de aquecimento e a sua transferência são uniformes, então é possível estimar o calor que atravessa o sensor de fluxo de calor através de

$$\dot{Q} = P = U \cdot I$$

Equação 3

em que P é a potência da resistência de aquecimento, U é a diferença de tensão entre a entrada e saída da resistência de aquecimento, e I é a intensidade de corrente eléctrica que atravessa a resistência de aquecimento.

Para um determinado par (U, I) obtém-se por um lado o valor de $\dot{Q}$ (ou q , através da Equação 1) e por outro lado obtém-se uma diferença de potencial através do sensor de fluxo de calor, e assim, pode-se obter o valor da sensibilidade S , através da Equação 2. Na realidade, S não é constante e depende da temperatura, mas como primeira aproximação podemos considerar esta metodologia. Além disso, é objectivo que seja

possível que o software a desenvolver consiga controlar a temperatura da resistência de aquecimento, contudo isso implica que seja monitorizada a potência dissipada média da resistência de aquecimento.

Pretende-se que o bloco de aquecimento siga as normas padrão internacionais para testes de fluxo de calor. As instruções e exemplos nas normas variam dependendo do tipo de equipamento. Neste trabalho foi considerada a norma americana ASTM C-1114, [3]. As normas não são impositivas ao ponto de fixarem como um equipamento (neste caso o calibrador) deve ser construído, no entanto têm algumas regras a que se deve ter em atenção para, na prática, se obter uma transferência de calor unidirecional no sensor de fluxo de calor. Resumidamente, para que o fluxo de calor seja unidirecional, todo o bloco de aquecimento deve estar isolado termicamente do exterior com a exceção da parte inferior do bloco de alumínio. Desse modo, o calor fluirá unidirecionalmente da resistência de aquecimento para o bloco de alumínio, através do sensor de fluxo de calor.

Idealmente, para que o fluxo de calor seja homogêneo na passagem da resistência de aquecimento para o bloco de alumínio, todos os materiais entre estes (sensor de fluxo de calor, termopar, massa térmica) deveriam ter a mesma condutividade térmica, mas na realidade isso não é verdade. Para mitigar este problema para além de envolver o sensor de fluxo de calor e o termopar em pasta térmica são também colocadas placas de cobre por cima e por baixo destes. O cobre tem uma excelente condutividade térmica, e como a resistência ao fluxo de calor estará nas camadas dos sensores/pasta, as placas de cobre homogenizam a temperatura.

Para garantir simetria e homogeneidade no bloco de aquecimento, todos os componentes, à exceção do sensor de fluxo de calor de filme fino e do termopar, são circulares/cilíndricos (resistência de aquecimento, placas de cobre, bloco de alumínio, isolante térmico e estrutura externa). Na Figura 6 apresenta-se uma vista em corte do bloco de aquecimento.

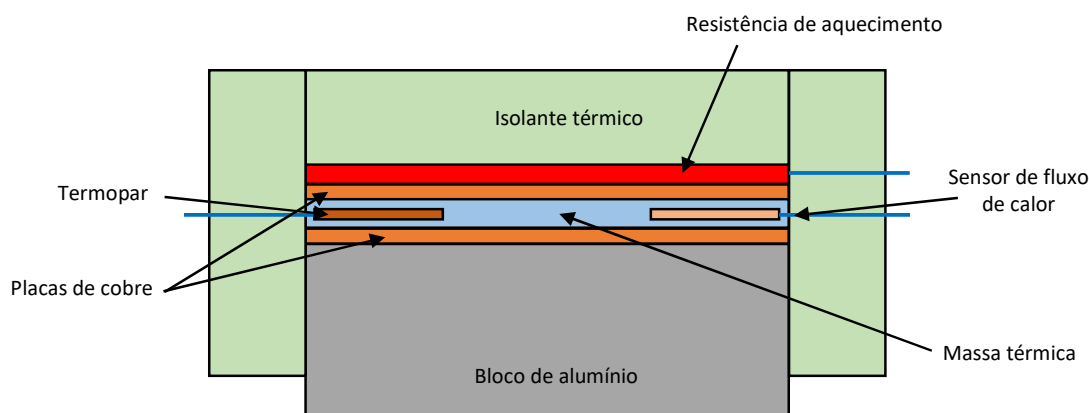


Figura 6 – Esquema detalhado do bloco de aquecimento (não à escala).

Electrónica de alimentação e aquisição de sinal

A electrónica de alimentação e aquisição de sinal é constituída por várias secções, cada uma com a sua função específica. Tal como sintetizado na Figura 5, existem as secções de: alimentação eléctrica da placa electrónica; aquisição e tratamento de sinais; processamento e comando através de microcontrolador; e, finalmente, a parte de electrónica de potência para fornecer energia à resistência de aquecimento do bloco de aquecimento do sensor de fluxo de calor.

Nesta fase de desenvolvimento do protótipo, o circuito electrónico será construído utilizando *breadboards*.

1.3.2. Software do protótipo de calibrador

Em engenharia as decisões devem-se basear em factos e estes em dados. Por isso é objectivo deste trabalho desenvolver um sistema que guarde os dados essenciais para posterior tratamento com vista à obtenção de dados e conclusões fiáveis.

Embora idealmente o sistema devesse ser amigável para o utilizador e determinar automaticamente o valor da sensibilidade do sensor de fluxo de calor, S , no caso de algum dos algoritmos de cálculos estarem errados perder-se-ia toda a informação experimental. Por esse motivo optou-se, nesta primeira fase de desenvolvimento, que o sistema guarde a informação de base (*raw data*), que posteriormente será tratada.

Assim, o sistema deve adquirir os sinais para obter os dados necessários ao cálculo de S e gravá-los num qualquer formato. Poder-se-ia ter optado por gravar a informação directamente do microcontrolador para um cartão SD. Contudo, a opção escolhida foi desenvolver uma Interface Homem-Máquina (IHM), para utilização no sistema operativo Windows, que grave um ficheiro a ser lido numa programa de folha de cálculo. Com esta IHM, o utilizador controla a partir de um computador o funcionamento do equipamento.

Para o funcionamento do protótipo de calibrador de sensor de fluxo de calor, foi necessário desenvolver software quer controlo do microcontrolador quer da IHM. Utilizou-se como microcontrolador o Arduino Mega 2560 R3, que foi programado no Arduino IDE. A interface IHM foi programada no Visual Studio Community 2019.

1.3.3. Testes de utilização do protótipo de calibrador/software

Após a construção da parte física do protótipo de calibrador de sensores de fluxo de calor e do software associado pretende-se efectuar dois tipos de testes:

- Comparação dos sinais de saída obtidos no protótipo de calibrador com placas de aquisição comerciais.
- Teste de sensores de fluxo de calor comerciais para determinação de S e comparação com os valores especificados pelos fabricantes.

O protótipo de calibrador só terá utilidade prática se não falhar no primeiro dos testes, e para isso o sistema de aquisição e tratamento de sinal deve ser fiável e robusto. Se tal não acontecer, e se não se perspectivar a possibilidade de melhorar essas características, o protótipo desenvolvido não irá mais além de de um instrumento educacional.

2. Desenvolvimento da electrónica do protótipo de calibrador

2.1. Considerações gerais

Tem-se como objectivo que o sistema adquirira sinais analógicos oriundos de varios sensores, tal como indicado na Figura 5, incluindo:

- diferencial de tensão gerada no sensor de fluxo de calor (VHF), que é função do calor que atravessa o sensor;
- temperatura na superfície do sensor de fluxo de calor (THF1 e THF2), usando o termopar incorporado no sensor;
- temperatura na resistência de aquecimento (THR), usando um termopar de filme fino colocado ao nível do sensor de fluxo de calor;
- temperatura na zona inferior do bloco de alumínio (TAL), usando por um termopar;
- temperatura na placa electrónica (TBO), que será considerada como temperatura de *cold junction*, necessária para o cálculo de temperatura em termopares (ver secção 3.2.4), usando um circuito integrado DS18B20 ;
- tensão à entrada da resistência de aquecimento (VHR), usando um divisor de tensão;
- corrente eléctrica que passa na resistência de aquecimento (AHR), usando um módulo de detecção de corrente.

O diferencial de tensão gerada no sensor de fluxo de calor (VHF) é da ordem dos microvolts pelo que é necessário amplificar e tratar o sinal através de amplificadores de instrumentação e amplificadores operacionais, respectivamente.

De igual forma, o diferencial de tensão gerada em termopares também é da ordem dos microvolts pelo que é necessário amplificação de sinal. Contudo aqui foram usados dois métodos distintos: a) manipulação de sinal tal como realizado para o diferencial de tensão gerada pelo fluxo de calor (método para determinar THF1); ou utilização de placas específicas dedicadas de aquisição de temperatura (usadas para determinar THF2, THR e TAL). THF1 e THF2 devem resultar no mesmo valor já que dizem respeito à temperatura na superfície do sensor de fluxo de calor, mas determinada por métodos diferentes.

Outra forma de adquirir um valor de temperatura é utilizando circuitos integrados específicos, tal como o DS18B20 (utilizado para determinar TBO)

2.2. Alimentação eléctrica

O sistema é alimentado através de 3 fontes de alimentação de 12 V. Uma das fontes está dedicada à alimentação da secção de electrónica de potência para fornecer energia à resistência de aquecimento. As outras duas fontes são usadas para alimentar a parte electrónica de aquisição de sinal e o microcontrolador. Com as duas fontes de +12 V obtêm-se tensões simétricas de +12 V e -12 V, tal com esquematizado na Figura 7. É necessária tensão negativa para alimentar os amplificadores operacionais e os amplificadores de instrumentação, por forma a não limitar os sinais adquiridos a valores com tensão positiva.

A partir dos +12 V são reguladas tensões de +8 V (utilizada em amplificadores e microcontrolador) e -8 V (utilizada em amplificadores) usando os reguladores de tensão L7808 [4] e L7908 [5], respectivamente. A partir da tensão de +8 V é regulada a tensão de +5 V (placas e circuitos integrados específicos para aquisição de sinal) usando o regulador de tensão L7805 [4]. A partir da tensão de +5 V é regulada a tensão de +2 V (utilizadas nos amplificadores somadores) usando o regulador de tensão LM317 [6]. O regulador de tensão LM317 permite definir a tensão objectivo (entre 1.2 V e 37 V) modificando o valor de duas resistências externas. Estas formam um divisor de tensão definindo uma tensão de ajuste que é uma das entradas do regulador de tensão. Após alguns ensaios foi definido que o divisor de tensão necessário é, para tensão regulada de +2 V e tensão de entrada de +8 V, $R_1 = 1.5 \text{ k}\Omega$ e $R_2 = 91 \Omega$. O esquema geral da secção de regulação de tensão é mostrado na Figura 8. Os condensadores foram seleccionados de acordo com as indicações nas folhas de especificação dos componentes.

Existe conectividade entre todos os pontos GND do circuito, incluindo as três fontes de alimentação, todos os circuitos electrónicos e o microcontrolador.

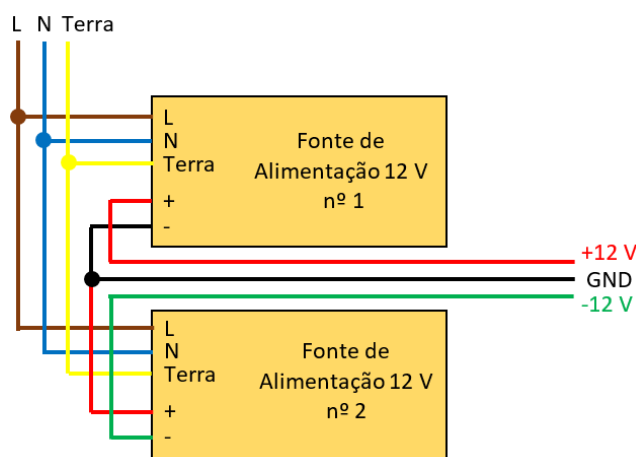


Figura 7 – Fonte simétrica a partir de duas fontes simples.

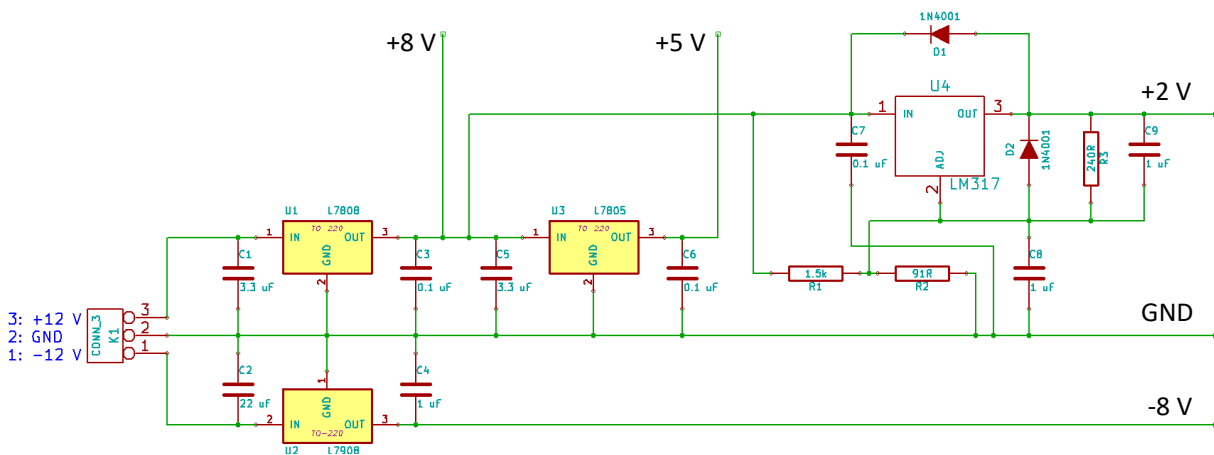


Figura 8 – Esquema da regulação de tensão.

2.3. Amplificação de sinais do sensor de fluxo de calor

Pretende-se que o sistema consiga ler temperaturas através do termopar do sensor de fluxo de calor entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esses limites correspondem, respectivamente, a diferenciais de tensão de -5.603 mV e $+9.288\text{ mV}$ para termopares do tipo T, [7], que é o tipo de termopar do sensor. Quanto ao sinal do sensor de fluxo de calor admite-se que funciona até $\pm 1800\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ e como a sensibilidade dos sensores de fluxo de calor vai até $2\text{ }\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ os limites de diferencial de tensão são -3.6 mV e $+3.6\text{ mV}$. O valor de $1800\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ é um valor de referência. Experimentalmente não foram obtidos fluxos de calor com magnitude superior a $1500\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. O valor absoluto do fluxo de calor pode ser negativo se as faces do sensor forem posicionadas de forma invertida.

Os dois sinais vindos do sensor de fluxo de calor (diferencial de tensão relativa ao fluxo de calor e diferencial de tensão relativa ao termopar) são da ordem de milivolts, sendo por isso necessário a sua amplificação antes de serem enviados para o microcontrolador. Sem placas de aquisição de sinal especiais, o microcontrolador consegue receber sinais analógicos entre 0 V e 5 V , pelo que os sinais amplificados deverão estar nesse intervalo. Como se verá mais à frente, utilizando placas de aquisição de sinal especiais seria possível usar sinais de tensão negativa.

Admitindo que o sinal amplificado tem de estar no intervalo padrão do microcontrolador será necessário não só necessário amplificar o sinal mas também fazer um deslocamento do sinal amplificado para que esteja limitado entre 0 V e 5 V .

A amplificação do diferencial de tensão dos dois sinais é realizada utilizando o amplificador de instrumentação AD623, [8]. Neste amplificador, o ganho de amplificação, G , é definido através da inclusão de uma única resistência eléctrica cujo valor, R_g , é calculado através de

$$R_g = 100 \text{ k}\Omega / (G - 1)$$

Equação 4

Utilizando resistências eléctricas de 469Ω e 183Ω obtêm-se ganhos teóricos de 214 e 547 para o termopar e para o sensor de fluxo de calor, respectivamente. O sinal amplificado apresentaria teoricamente tensões, para os limites definidos anteriormente, de -1.20 V e $+1.99 \text{ V}$ para o termopar e -1.97 V e $+1.97 \text{ V}$ para o fluxo de calor.

Para que o sinal amplificado à saída do amplificador esteja na gama $0 - 5 \text{ V}$ optou-se por a cada sinal aplicar um somador não-inversor de tensão. A tensão a somar é de $+2 \text{ V}$, sendo esta oriunda do regulador de tensão LM317 descrito na secção 2.2. O esquema de um circuito amplificador somador não-inversor de dois valores de tensão (V_{i1} e V_{i2}) é mostrado na Figura 9. Se todas as resistências eléctricas (presentes no esquema do somador) forem de igual valor então o sinal de saída (V_o) é igual à soma algébrica dos sinais de entrada. Neste caso, um dos sinais é o sinal amplificado, vindo dos amplificadores de instrumentação, e o outro sinal é a tensão de $+2 \text{ V}$.

Os sinais antes de entrarem nos amplificadores de instrumentação sofrem condicionamento de sinal, sendo os terminais negativos do termopar e do sensor ligados ao GND (tal como definido na folha de especificação do amplificador de instrumentação AD623, [8]) e passam por um amplificador *buffer*.

O esquema da secção de aquisição de sinais do sensor de fluxo de calor é mostrado na Figura 10.

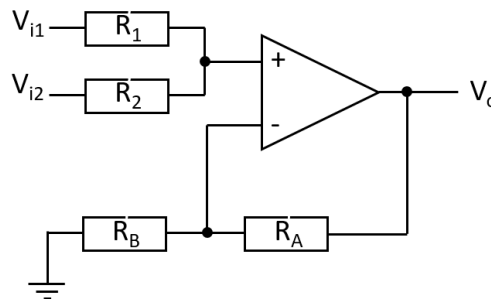


Figura 9 – Esquema genérico de amplificador somador não-inversor de duas tensões.

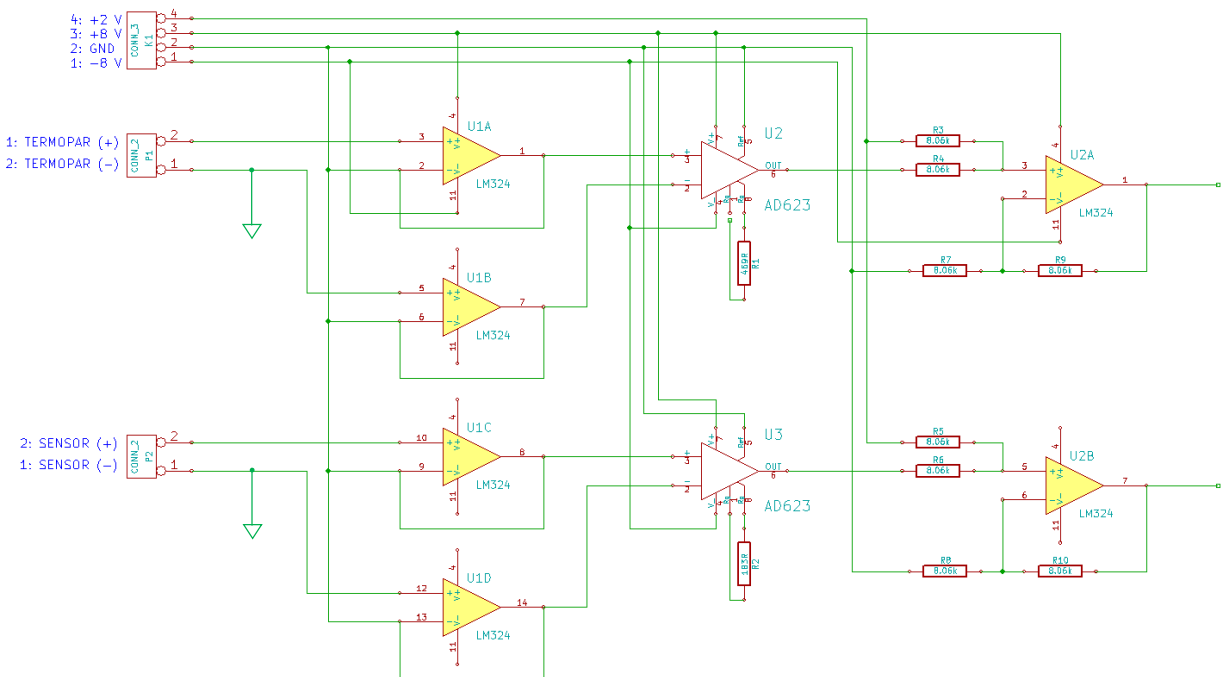


Figura 10 – Esquema de aquisição de sinais do sensor de fluxo de calor.

2.3.1. Testes à amplificação de sinal

Foi testada a amplificação de sinal nos amplificadores de instrumentação AD623 usando a diferença de tensão entre GND e um sinal controlado por um potenciômetro (em vez de um termopar). A tensão do sinal vindo do potenciômetro variou entre +0 mV e +30 mV. A construção e teste do sistema de amplificação foi efectuada por etapas. Primeiro analisou-se o sinal de saída utilizando somente a amplificação do amplificador de instrumentação AD623. Depois analisou-se o sinal de saída dos amplificadores somadores colocados após o AD623 e que deveriam somar +2.04 V. Em ambos os casos foram utilizados *buffers* à entrada. As medições de tensões foram efectuadas com um multímetro (Perrel EVM892).

Na Figura 11 mostra-se o gráfico obtido para a amplificação de sinal usando os amplificadores AD623. Com a resistência R_g de 469 Ω o ganho obtido foi de 215 em vez dos 214 teóricos. Com a resistência R_g de 183 Ω o ganho obtido foi de 554 em vez dos 547 teóricos. Os valores dos ganhos de amplificação são próximos dos valores teóricos contudo existe um desvio (valor “a” nas equações das rectas “a+bx”). Aparentemente, estes desvios não dependem muito do chip utilizado mas aumentam com o ganho de amplificação. Também se observou que os valores dos ganhos e desvios podem variar, ligeiramente, de experiência para experiência. Estes dois factores colocam muita incerteza nos resultados da amplificação, principalmente quando forem

utilizados termopares em que um pequeno erro nos valores de diferença de tensão correspondem a grandes diferenças de temperatura (na ordem de vários graus centígrados).

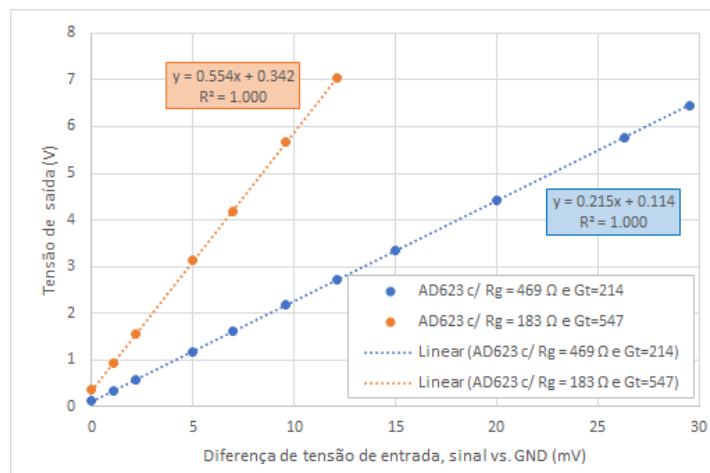


Figura 11 – Relações da amplificação, entre tensão de entrada e saída, utilizando amplificadores de instrumentação AD623. A azul: amplificação com ganho teórico de 214. A laranja: amplificação com ganho teórico de 547.

Na Figura 12 mostram-se os valores dos sinais amplificados após serem somados no amplificador somador. Os valores dos ganhos aumentaram muito ligeiramente (menos de 2%, pelo que esta alteração deve estar dentro do erro experimental).

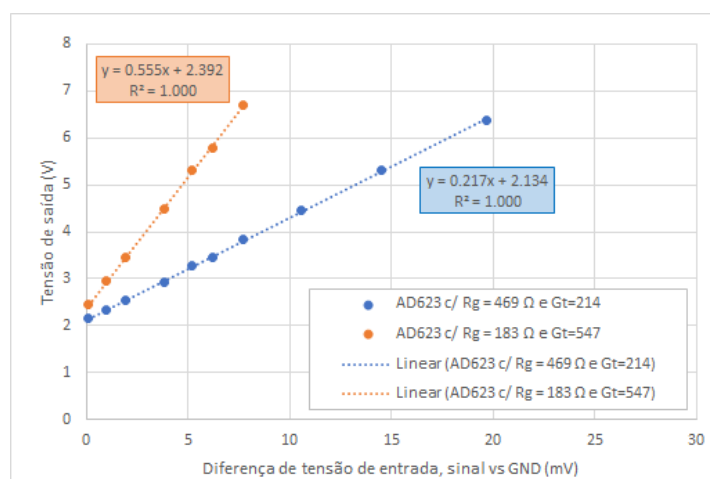


Figura 12 – Relações da amplificação, entre tensão de entrada e saída após amplificador somador, utilizando amplificadores de instrumentação AD623. A azul: amplificação com ganho teórico de 214. A laranja: amplificação com ganho teórico de 547.

2.4. Aumento da resolução de sinais do sensor de fluxo de calor

A resolução do Conversor Analógico-Digital (ADC) do microprocessador é de 10 bits, ou seja 1024 valores. Como o intervalo de sinal analógico no microprocessador é de 0 V a 5 V, isto corresponde a uma resolução de 4.9 mV.

Para aumentar a resolução do sinal podem ser utilizadas placas electrónicas específicas para o efeito. Neste trabalho foi utilizada a placa Adafruit ADS1115 que, teoricamente, tem uma resolução até 16 bits e permite sinais com tensão negativa. Contudo a resolução de trabalho foi de 15 bits (32768 pontos).

A ligação da placa Adafruit ADS1115 ao microcontrolador é feita através do protocolo I²C. É possível definir quatro endereços I²C, fazendo ligações eléctricas entre a porta ADDR da placa e outras portas existentes na placa. A placa pode adquirir quatro sinais analógicos pelo que usando um máximo de quatro placas podem-se adquirir até 16 sinais analógicos simples ou 8 sinais diferenciais. A obtenção do sinal digital é feita através da programação do microcontrolador.

Na Figura 13 mostra-se a placa Adafruit ADS1115.

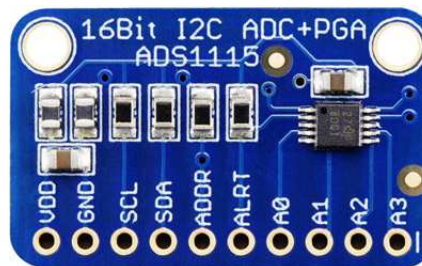


Figura 13 – Placa Adafruit ADS1115.

2.4.1. Testes à placa Adafruit ADS1115

Com estes testes pretende-se obter uma função que relacione a diferença de tensão de entrada (nos buffers) com o sinal digital gerado pela placa Adafruit ADS1115, [9, 10].

Na Figura 14 mostra-se a relação entre a diferença de tensão de entrada nos amplificadores de instrumentação AD623 com o sinal digital, gerado pelo conversor ADC da placa, aqui definidos por *THFa* e *VHFa* (que serão os valores digitais correspondentes à temperatura indicada pelo termopar incorporado no sensor de fluxo de calor e à diferença de tensão gerada pelo sensor de fluxo de calor). *THFa* corresponde ao

signal do amplificador com resistência R_g de $469\ \Omega$, enquanto que $VHFa$ o corresponde ao signal do amplificador com resistência R_g de $183\ \Omega$.

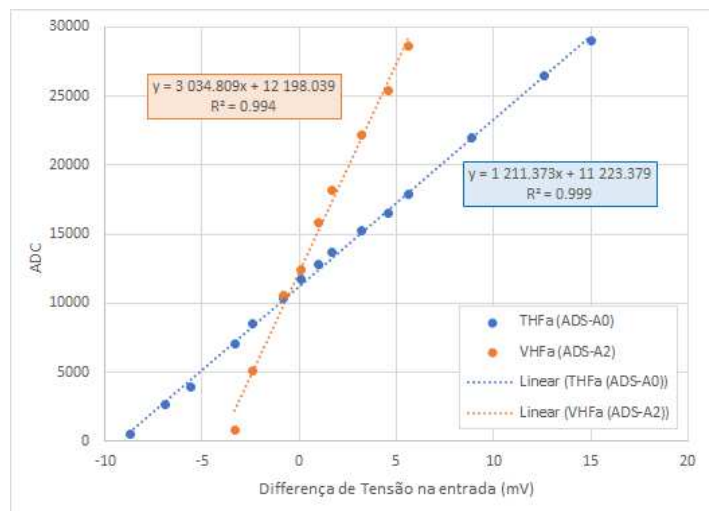


Figura 14 – Relação entre a diferença de tensão à entrada dos amplificadores de instrumentação AD623 e o sinal digital gerado pela placa Adafruit ADS1115. A azul: amplificação com $R_g = 469\ \Omega$. A laranja: amplificação com amplificação com $R_g = 183\ \Omega$.

Invertendo a ordenada e abcissa do gráfico obtêm-se as relações entre o sinal digital gerado pela placa e a diferença de tensão de entrada nos amplificadores de instrumentação AD623. Estas relações serão posteriormente incorporadas no software do micronrolador que controla o protótipo do calibrador para automatizar os cálculos. Estas relações são mostradas na Figura 15.

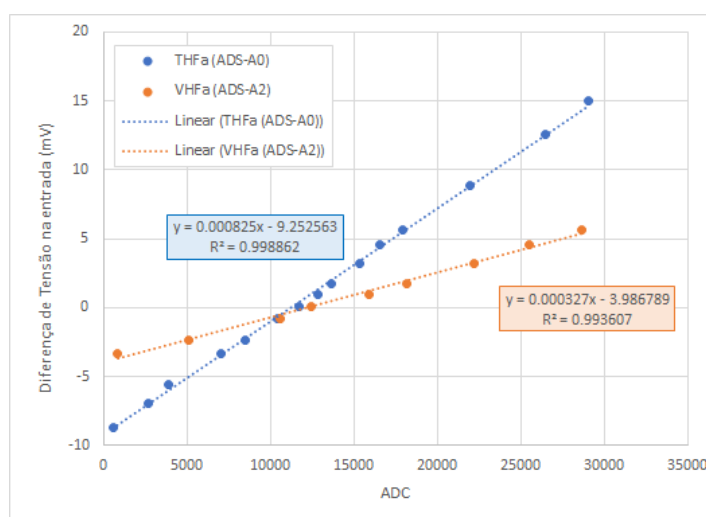


Figura 15– Relação entre o sinal digital gerado pela placa Adafruit ADS1115 e a diferença de tensão à entrada dos amplificadores de instrumentação AD623. A azul: amplificação com $R_g = 469\ \Omega$. A laranja: amplificação com amplificação com $R_g = 183\ \Omega$.

2.5. Placas de aquisição e amplificação de sinal de termopares

A aplicação anterior de amplificadores de instrumentação para tratar o sinal vindo de termopares, como se fez na secção 2.3, teve interesse educacional. O valor da temperatura indicado por termopares pode ser directamente obtido utilizando placas de aquisição específicas. Neste trabalho utilizam-se placas Adafruit MCP9600, [11, 12]. Cada placa permite adquirir a temperatura de um termopar, contudo podem ser utilizadas até oito placas por cada canal I²C, uma vez que configurando uma resistência externa (em cada placa) podem ser definidos oito endereços I²C diferentes.

A obtenção do valor da temperatura é através do uso de bibliotecas específicas na programação do microcontrolador. É também na programação que se define o tipo de termopar e outros parâmetros da aquisição de sinal.

No protótipo de calibrador desenvolvido, foram utilizadas três placas Adafruit MCP9600 por forma a adquirir as temperaturas em três pontos do sistema (ver Figura 5): temperatura da resistência de aquecimento (*THR*); temperatura da zona inferior do bloco de alumínio (*TAL*) ; e temperatura indicada pelo termopar incorporado no sensor de fluxo de calor (*THF1*).

Na Figura 16 mostra-se a placa Adafruit MCP9600.

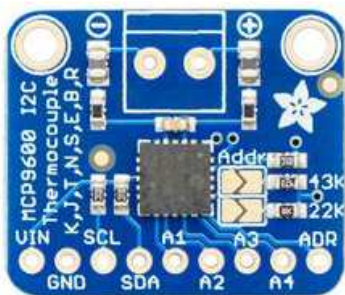


Figura 16 – Placa Adafruit MCP9600.

2.6. Aquisição de temperatura utilizando circuito integrado DS18B20

Outra forma de obter a temperatura é utilizando circuitos integrados específicos. No protótipo de calibrador desenvolvido foi utilizado o circuito integrado DS18B20, [13], para a obtenção da temperatura na placa electrónica (*TBO*), que será utilizada como temperatura de *cold junction* (ver secção 3.2.4).

A obtenção do valor da temperatura é através do uso de bibliotecas específicas na programação do microcontrolador. A ligação entre o circuito integrado DS18B20 e o microcontrolador é feito através de um único fio utilizando o protocolo 1-Wire, como se mostra na Figura 17. Segundo a folha de especificações do DS18B20 é necessário conectar uma resistência de 4.7 k Ω entre o fio de ligação e um ponto V_{PU} que foi considerado como sendo um ponto a +5 V (alimentação V_{DD} ao DS18B20).

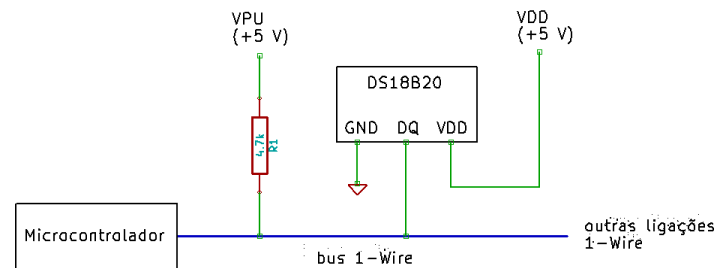


Figura 17 – Esquema de ligação entre DS18B20 e microcontrolador.

2.7. Placa de aquisição de sinal de corrente eléctrica

O valor da corrente eléctrica que atravessa a resistência de aquecimento (AHR) é adquirido através da placa VMA323 da Velleman, [14, 15]. Esta placa é colocada em série com a resistência de aquecimento, é alimentada (+5 V e GND) e gera um sinal analógico que entra directamente numa das portas analógicas do microcontrolador.

O fabricante da placa fornece, no seu website, código para inserir na programação do microcontrolador por forma a obter o valor da corrente eléctrica. Contudo, a execução do código parece não produzir o valor correcto da corrente que passa na resistência de aquecimento e por isso optou-se por usar outra metodologia: determinar uma relação matemática entre a corrente que atravessa a resistência de aquecimento e o sinal gerado pelo sensor VMA323 no conversor ADC do microcontrolador..

A resistência de aquecimento (modelo 245-607 da RS Pro) é do tipo de tapete de silicone e está especificada para 12 V com uma potência de 8 W, o que corresponde a uma corrente eléctrica de 0.667 A. Medindo a corrente eléctrica com um multímetro, para uma tensão de +12 V, o valor obtido foi de 0.551 A, que correspondia a um valor médio de sinal de 550.4 na entrada analógica do microcontrolador. Quando a corrente é nula o valor médio correspondente é 512.9. Usando estes dois pares de valores obtém-se a relação expressa na Figura 18, que é posteriormente utilizada na programação do microcontrolador.

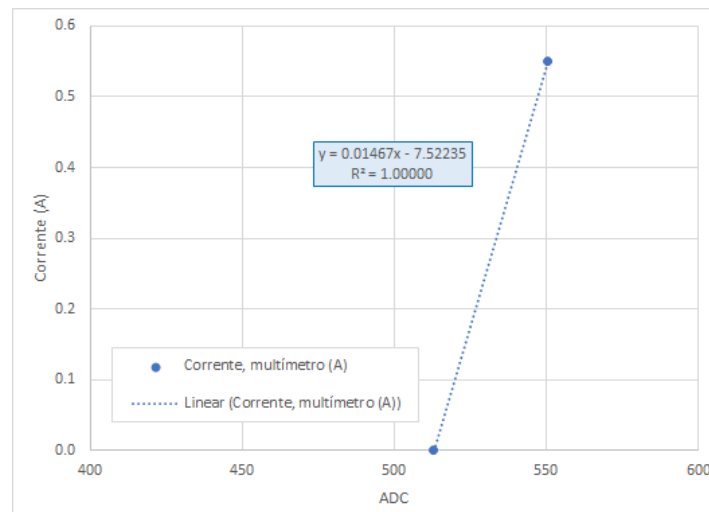


Figura 18 – Relação entre corrente eléctrica e sinal digital gerado no conversor ADC do microcontrolador.

Nesta fase de desenvolvimento do protótipo a resistência de aquecimento terá apenas dois estados (ligado ou desligado) pelo que a corrente será, respectivamente, máxima (0.551 A) ou nula (0 A). Contudo, determinado a relação matemática poder-se-á utilizar o sensor de corrente noutras circunstâncias. A relação deveria ter sido determinada com mais pontos, para verificar a sua linearidade, mas para esta fase de desenvolvimento é suficiente.

2.8. Divisor de tensão como sensor de tensão

Pretende-se monitorizar a tensão de entrada na resistência de aquecimento. Como a tensão a ser medida é superior à gama de tensão aceite nas entradas analógicas do microcontrolador e como não existem amplificadores de ganho inferior a um, utilizou-se um divisor de tensão, como mostrado na Figura 26. Como a tensão nominal da fonte de alimentação é +12 V, seleccionaram-se as resistências por forma a que +12 V sejam reduzidos para +4 V à entrada das portas analógicas do microcontrolador, ou seja um factor multiplicativo de 0.333.

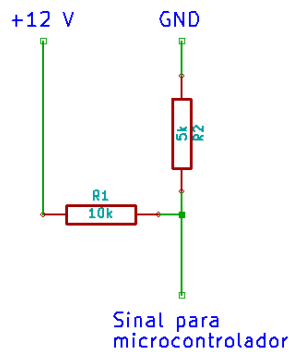


Figura 19 – Divisor de tensão como sensor de tensão.

A tensão no ponto intermédio de um divisor de tensão (entre V_i e 0 V) é

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i$$

Equação 5

pelo que se $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ e $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$ se obtém o factor multiplicativo pretendido (0.333).

2.9. Electrónica de potência

A resistência de aquecimento é controlada através do sinal que vem de uma saída digital do microcontrolador. O sinal do controlador permite, ou inibe, a passagem de corrente através de um MOSFET (IRF540) e por conseguinte através da resistência. Paralelamente à resistência, um LED acende quando há passagem de corrente ou fica apagado no caso contrário. Na Figura 20 apresenta-se o esquema desta secção, em que para simplificar optou-se por não incluir o sensor de corrente, em série com a resistência de aquecimento (ver secção 2.7), nem o divisor de tensão usado como sensor de tensão (ver secção 2.8).

Foi incluída uma resistência de $10 \text{ k}\Omega$, entre o sinal do microcontrolador e GND, para evitar a ocorrência de tensão flutuante.

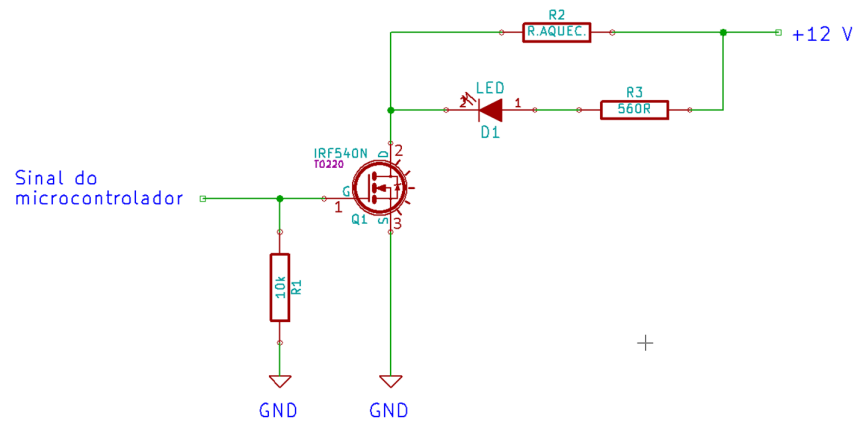


Figura 20 – Esquema da parte de electrónica de potência.

2.10. Ligações à placa do microcontrolador

A aquisição de sinal e controlo é feito através da placa Arduino Mega 2560 R3.

Na Figura 21 mostram-se as ligações físicas entre a placa do microcontrolador e os sensores e actuadores. Além destas, existe ainda uma ligação entre um ponto GND da placa e o GND do restante circuito eléctrico e electrónico.

Todos os sensores e utilização do MOSFET foram explicados nas secções anteriores. Existem ainda dois LEDs indicadores do tipo de controlo da resistência de aquecimento. O LED vermelho acende quando a variável “acciao” é igual a 1, e o LED verde acende quando essa variável é igual a 2. Quando “acciao” é igual a 1 a resistência de aquecimento está sempre ligada. Quando ACCAO é igual a 2 está activado o controlo de temperatura. O controlo da variável “acciao” é efectuado na interface IHM.

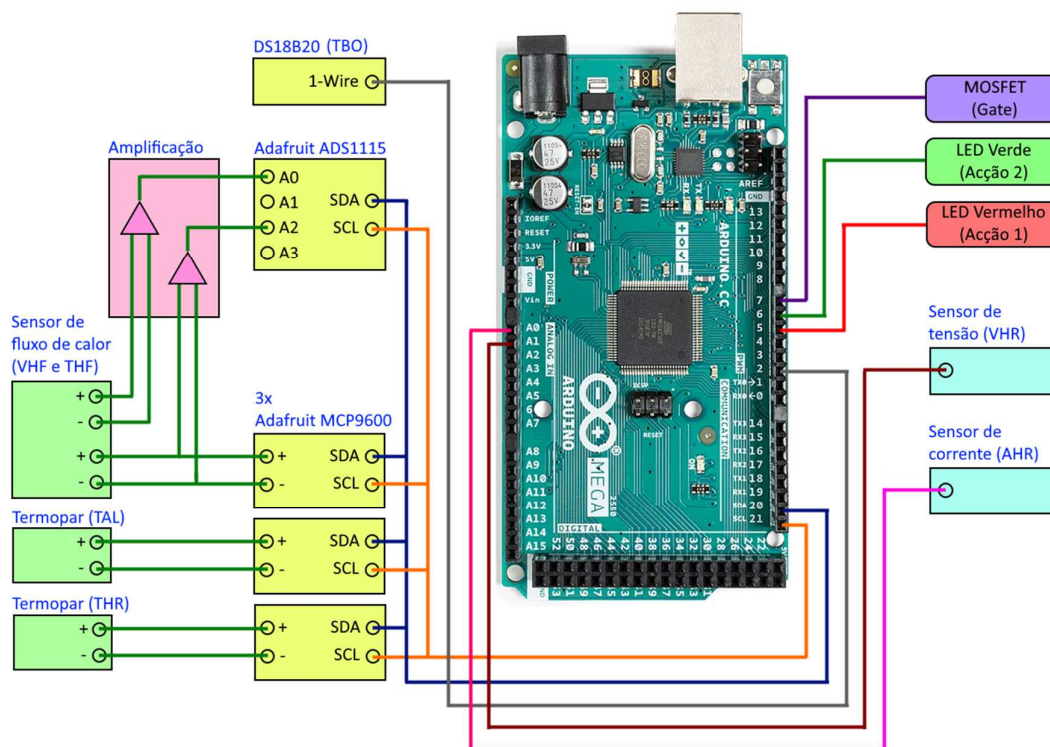


Figura 21 – Esquema de ligação entre placa de microprocessador e sensores/atuadores.

2.11. Placa electrónica experimental

Na Figura 22 apresenta-se o circuito experimental criado com breadboards.

Na zona “a” estão duas fontes de 12 V para formar uma alimentação simétrica (ver Figura 7).

Na zona “b” encontram-se os reguladores de tensão de +8 V, -8 V, +5 V e +2 V (ver Figura 8).

Na zona “c” encontra-se a placa Arduino (ver Figura 21).

A zona “d” é onde se faz a amplificação dos sinais diferenciais do sensor de fluxo de calor (fluxo de calor e temperatura). São utilizados dois amplificadores de instrumentação AD623 para fazer a amplificação e dois circuitos integrados LM324 para as operações de *buffer* e de somador não inversor (ver Figura 10).

Na zona “e” encontram-se a placa Adafruit ADS1115 utilizada para aumento de resolução dos sinais amplificados do sensor de fluxo de calor, as três placas Adafruit MCP9600 para obtenção de temperaturas a partir de termopares, o circuito integrado DS18B20 para obtenção de temperatura, e os dois LEDs indicativos do estado da variável “accão” (ver Figura 21).

Na zona “f” encontra a parte de potência onde se inclui a fonte de alimentação de 12 volts, o MOSFET IRF540, o sensor de corrente elétrica, o divisor de tensão usado como sensor de tensão, o LED indicador de resistência de aquecimento ligada e as ligações para a resistência de aquecimento (ver Figura 20).

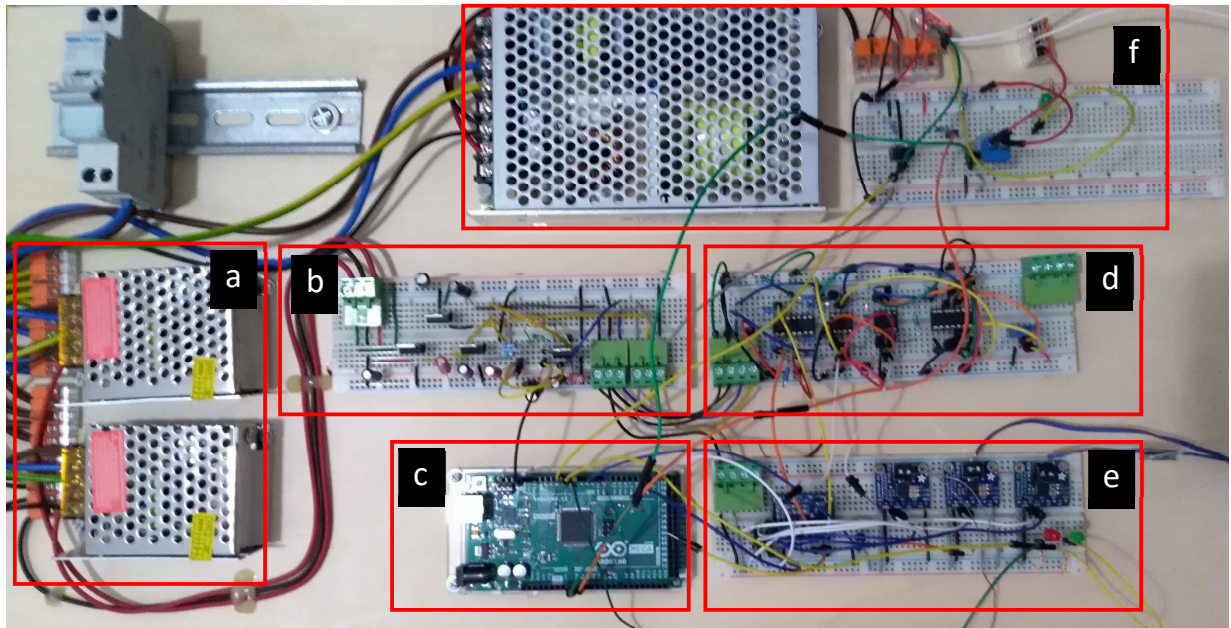


Figura 22 – Placa eletrônica experimental.

3. Desenvolvimento do software de controlo

3.1. Considerações gerais

A implementação do protótipo de calibrador de sensores de fluxo de calor implica a existência, programação e comunicação entre dois softwares. Por um lado, temos o programa que controla o microcontrolador e, por outro lado, temos o programa da interface homem-máquina.

É o microcontrolador, através do seu programa, que adquire e trata os sinais dos sensores e controla os actuadores (a resistência de aquecimento, neste caso em particular). Do lado da interface homem-máquina é permitido ao utilizador dar as ordens de comando (ao microcontrolador) e visualizar e gravar dados (enviados pelo microcontrolador). A comunicação entre os dois programas é feita através de porta Série.

Na Figura 23 apresenta-se esquematicamente, e de forma simplificada, a estrutura dos dois programas.

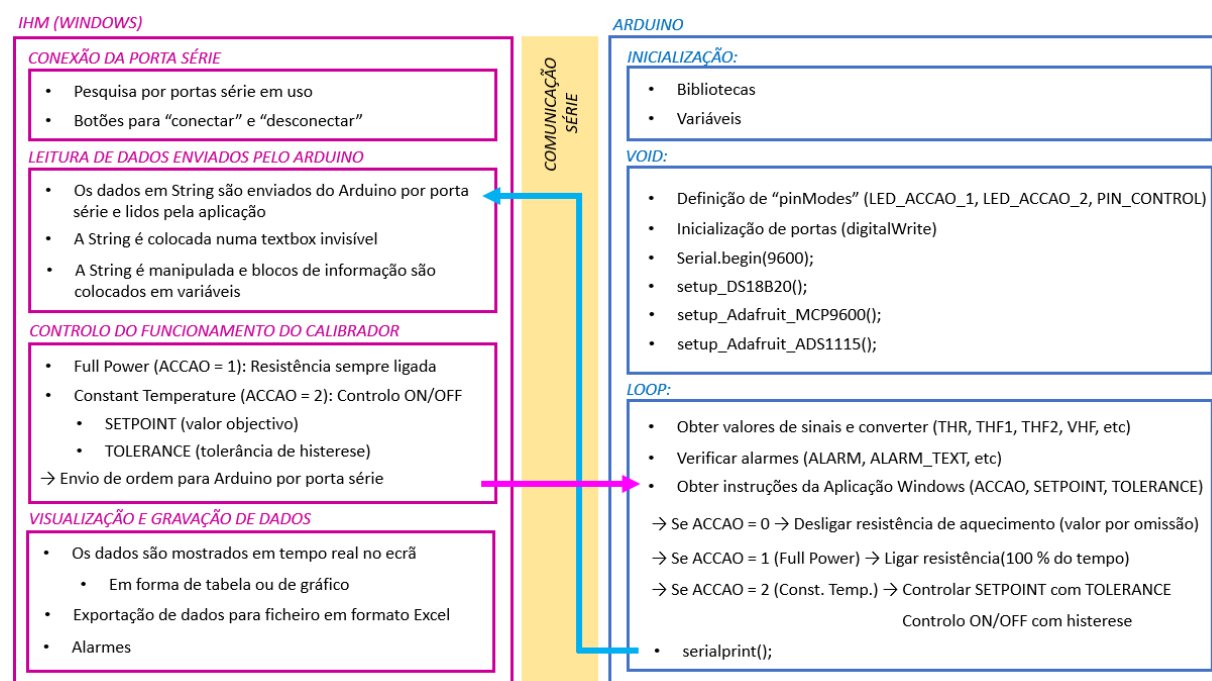


Figura 23 – Estrutura geral dos programas para IHM e Arduino.

A programação da placa Arduino, apesar de extensa, é bastante simples e linear. Começa-se por indicar quais as bibliotecas a serem utilizadas (e que estão relacionadas com as placas e circuitos integrados utilizados) e pela inicialização de variáveis.

A principal variável do programa é a variável “accas” que indica qual o comportamento de controlo da resistência de aquecimento. A variável “accas” é inicializada a “0”, o que faz com que a resistência de aquecimento esteja desligada. Se a variável “accas” for igual a “1” (que acontece no caso de o utilizador seleccionar “Constant Power” na IHM) então a resistência de aquecimento estará sempre ligada. Se a variável “accas” for igual a “2” (que acontece no caso de o utilizador seleccionar “Constant Temperature” na IHM) então a resistência de aquecimento será ligada (ON), ou desligada (OFF), por forma a que a temperatura no termopar junto à resistência de aquecimento, temperatura indicada pela variável THR (ver Figura 5), seja igual ao valor “setpoint” seleccionado pelo utilizador, na IHM. Como o controlo é do tipo ligado/desligado, com histerese definida pela variável “tolerance”, a evolução da temperatura na resistência apresenta alguma variância em redor do valor objectivo. A variável “accas” também é igual a “0” se na IHM o utilizador clicar nos botões “Reset/Stop” ou “Disconnect”.

A informação a ser enviada para a IHM é transmitida através de porta série usando os comandos *Serial.print* e *Serial.println* agrupados na função customizada *serialprint()*. A programação do lado da IHM colecta os dados enviados, concatena-os numa *String*, coloca-os numa *textbox* (não visível ao utilizador) e a partir daí extrai os dados a serem colocados em variáveis e a serem mostrados ao utilizador ou a serem gravados num ficheiro em formato Excel.

A configuração das placas e circuitos integrados é feita na programação Arduino (na função *setup*) e foi agrupada em funções específicas.

Foram implementados alarmes relacionados com limites extremos de temperatura. Estes alarmes são verificados no início do *Loop* e são também enviados para a IHM.

Para que haja comunicação entre o programa Arduino e o programa IHM é necessário que os dois comuniquem através do protocolo Série usando a mesma porta. O Arduino inicia uma porta Série (através do comando *Serial.begin*) e na IHM o utilizador tem de proceder a essa ligação. O programa da IHM procura autonomamente por portas Série activas e o utilizador tem apenas de seleccionar a correcta e carregar no botão “Connect”.

Nas secções seguintes apresentam-se alguns pormenores da programação efectuada no Arduino e na IHM.

3.2. Alguns pormenores da programação do Arduino

A programação da placa Arduino foi realizada utilizando a plataforma Arduino IDE.

3.2.1. Obtenção de valores de sinais

As primeiras tarefas a realizar dentro do ciclo *loop* é limpar as variáveis de alarmes, obter os valores dos sinais e verificar a ocorrência de alarmes, isto é, se os valores obtidos estão dentro das gamas admissíveis. O código desta etapa é mostrado na Lista 1.

Para simplificar o código, e a sua correcção, a programação para a obtenção de cada um dos sinais foi agrupada em funções próprias.

Lista 1 – Início do loop: atribuição de sinais a variáveis e verificação de alarmes.

```
ALARM_TEXT = "";
AHRa = get_AHRa();
AHR = get_AHR(AHRa);
VHRa = get_VHRa();
VHR = get_VHR(VHRa);
THR = get_THR();
TAL = get_TAL();
TBO = get_TBO();
VHFa = get_VHFa();
VHF = get_VHF(VHFa);
THF1a = get_THF1a();
THF1 = get_THF1(THF1a, TBO);
THF2 = get_THF2();
check_alarms();
```

A título de exemplo mostra-se, na Lista 2, a função *get_VHR()* utilizada para obter o valor da tensão à entrada resistência de aquecimento. A função *get_VHR()* faz uso da função *convert_analog_to_voltage(x)* que se encontra também na Lista 2.

Lista 2 – Exemplo de função para determinação do valor de um sinal: função *get_VHR(int x)*.

```
float get_VHR(int x){
    int resistor1 = 10;
    int resistor2 = 5;
    float gain;
    gain = 1.0*resistor2/(resistor1+resistor2);
```

```
float Voltage;  
Voltage = 1.0*convert_analog_to_voltage(x)/gain;  
return Voltage;  
}  
  
float convert_analog_to_voltage(int x){  
    int maxV = 5;  
    int maxAnalog = 1024;  
    float Voltage = (1.0*x/maxAnalog)*maxV;  
    return Voltage;  
}
```

3.2.2. Obtenção de valores a partir da IHM e definição da acção

Os valores enviados a partir da IHM são colocados em variáveis através das funções `Serial.parseInt()` e `Serial.parseFloat()`. Consoante o valor da variável "accao" são alterados os estados dos LEDs e activada a função de controlo de temperatura usando a função `constant_temperature_on_off_offset()`.

Lista 3 – Extração de valores enviados pela aplicação Windows para o Arduino.

```
if (Serial.available() > 0){  
  
    accao = Serial.parseInt();  
    setpoint = Serial.parseInt();  
    tolerance = Serial.parseFloat();  
  
    if (accao == 0) // se accao = 0 então "desligar"  
    {  
        digitalWrite(LED_ACCA01, LOW);  
        digitalWrite(LED_ACCA02, LOW);  
        digitalWrite(PIN_CONTROLO, LOW);  
        subida = 2;  
    }  
  
    if (accao == 1) // se accao = 1 então "Type of Run = Constant Power"  
    {  
        digitalWrite(LED_ACCA01, HIGH);  
        digitalWrite(LED_ACCA02, LOW);  
        digitalWrite(PIN_CONTROLO, HIGH);  
        subida = 2;  
    }  
  
    if (accao == 2) // se accao = 2 então "Type of Run = Constant Temperature"  
    {  
        Serial.print("subida = ");Serial.println(subida);  
        digitalWrite(LED_ACCA01, LOW);  
        digitalWrite(LED_ACCA02, HIGH);  
        constant_temperature_on_off_offset();  
    }  
}
```

```
if (acciao == 2){  
    constant_temperature_on_off_offset();  
}
```

3.2.3. Controlo de temperatura em valor fixo e com histerese

Na Lista 4 apresenta-se o código para controlo de temperatura com histerese, em que se agrupa o código na função *constant_temperature_on_off_offset()*. Aqui histerese significa que o controlo tenta que a temperatura se situe entre *setpoint-tolerance* e *setpoint+tolerance*. Foi necessário definir uma variável extra “*subida*” que indica, num determinado instante, se estamos num período de subida ou descida de temperatura.

Em subida de temperatura (*subida* = 1) é permitido que o sistema mantenha a resistência de aquecimento ligada até *setpoint+tolerance*. Quando esse valor é atingido a resistência de aquecimento é desligado (*subida* = 0) até que a temperatura desça abaixo de *setpoint+tolerance*. Nesse instante a resistência de aquecimento é novamente ligada (e a variável *subida* colocada igual a 1).

Lista 4 – Código de controlo ligado/desligado da resistência de aquecimento.

```
void constant_temperature_on_off_offset(){  
  
    // primeira iteração após reset: subida = 2  
  
    if (subida == 2){          // primeira iteração após reset: subida = 2  
        if (THR >= setpoint){  
            subida = 0;        // se THR >= setpoint, temperatura elevada, não vai subir, subida = 0  
        }  
        else{  
            subida = 1;        // se THR < setpoint, temperatura baixa, vai subir, subida = 1  
        }  
    }  
  
    // sistema de controlo ON/OFF com offset  
    if(subida == 0){  
        if(THR > (setpoint - tolerance)){  
            digitalWrite(PIN_CONTROLO, LOW);  
        }  
        else{  
            subida = 1;  
            digitalWrite(PIN_CONTROLO, HIGH);  
        }  
    }  
    if(subida == 1){  
        if(THR > (setpoint + tolerance)){  
            subida = 0;  
            digitalWrite(PIN_CONTROLO, LOW);  
        }  
    }  
}
```

```
else{  
    digitalWrite(PIN_CONTROLO, HIGH);  
}  
}  
return;  
}
```

3.2.4. Obtenção do valor de temperatura de um termopar

Foram utilizados dois métodos para obter a temperatura de um termopar. Um dos métodos é a utilização de placas dedicadas, como a Adafruit MCP9600, em que a temperatura é obtida directamente por utilização de bibliotecas na programação. Outro método é a obtenção do sinal de diferencial de tensão do termopar, em que é necessário ampliá-lo e tratá-lo para convertê-lo em temperatura. Ambos os métodos têm vantagens e desvantagens.

O primeiro método é mais simples já que basta ligar o termopar aos conectores e usar as bibliotecas pré-definidas. Contudo pode ter um maior custo, não é tão educativo como o segundo, e o utilizador tem de acreditar nos valores obtidos, porque não tem controlo na forma como são calculados. Por outro lado, este primeiro método usa o segundo método mas de uma forma transparente.

O segundo método consiste em medir o diferencial de tensão e usar funções, ou tabelas, para converter esse diferencial num valor de temperatura. Contudo a conversão não é directa uma vez que pelo seu princípio de funcionamento, a diferença de potencial gerada num termopar não é indicativa de uma temperatura absoluta mas sim de uma diferença de temperaturas entre a extremidade do termopar e um referencial. Existem várias formas de criar o referencial de temperatura. A forma mais simples é admitir que o referencial é a temperatura ambiente controlada da zona de união entre os condutores do termopar e a parte electrónica de aquisição. Neste trabalho essa temperatura é dada pelo sinal TBO (ver Figura 5).

Na Figura 24 esquematiza-se a estrutura e funcionamento de um termopar que, basicamente, consiste em dois fios condutores de materiais diferentes ligados numa das pontas. Devido à diferença de temperatura entre o lado de medição (*hot junction* à temperatura T_j) e o lado de referência (*cold junction* à temperatura T_r) é gerada uma diferença de tensão E_{rj} . O que nos interessa determinar é T_j , que é uma incógnita.

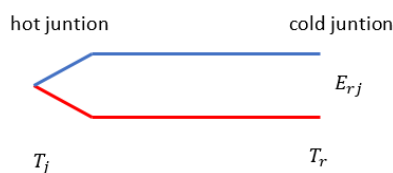


Figura 24 – Esquema genérico de um termopar.

Os valores tabelados de temperatura em função da diferença de tensão são para $T_r = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para se obter o valor de T_j , ou seja, o valor da temperatura na extremidade *hot junction* do termopar quando $T_r \neq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ é necessário efectuar o algoritmo descrito na Lista 5, [16]. As funções $F(T_r)$ e $G(E_{0r})$ podem ser determinadas a partir de tabelas disponibilizadas por entidades oficiais ou nas funções disponíveis em [16].

Lista 5 – Algoritmo para obtenção da temperatura usando um termopar e temperatura de referência.

- Determinar E_{rj} , a diferença de tensão no termopar (com extremidades às temperaturas T_j e T_r (ver Figura 24)
- Determinar T_r
- Calcular $E_{0r} = F(T_r)$, a diferença de tensão entre T_r e um referencial tabelado (usualmente $0\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Calcular $E_{0j} = E_{rj} + E_{0r}$, a diferença de tensão entre T_j e o mesmo referencial tabelado (usualmente $0\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Calcular $T_j = G(E_{0r})$

Na Lista 6 mostra-se o código relativo ao algoritmo da Lista 5. Na chamada da função *get_THF1* (ver Lista 1) o parâmetro *x* corresponde ao valor analógico do conversor ADC (THF1a) e T_r corresponde à temperatura na zona *cold junction* (admitida como igual a TBO). Na função *get_THF1* a expressão para E_{rj} é aquela determinada anteriormente na Figura 15. Os valores numéricos existentes nas funções da Lista 6 são válidos apenas para termopares do tipo T.

Lista 6 – Código de cálculo de temperatura usando um termopar e temperatura de referência.

```
float get_THF1(int x, float Tr){
    float Erj = 0.000824570*x - 9.252562749;
    float E0r = get_EfromT(Tr);
    float E0j = Erj + E0r;
    float T = get_TfromE(E0j);
    return T;
}

double get_EfromT(float T){
    double E;
    double b0n = 0;
    double b1n = 3.8748106364*pow(10,-2);
    double b2n = 4.44194434347*pow(10,-5);
    double b3n = 1.1844323105*pow(10,-7);
    double b4n = 2.0032973554*pow(10,-8);
    double b5n = 9.0138019559*pow(10,-10);
    double b6n = 2.2651156593*pow(10,-11);
    double b7n = 3.60711542055*pow(10,-13);
    double b8n = 3.8493939883*pow(10,-15);
    double b9n = 2.8213521925*pow(10,-17);
    double b10n = 1.4251594779*pow(10,-19);
    double b11n = 4.8768662286*pow(10,-22);
    double b12n = 1.0795539270*pow(10,-24);
```

```

double b13n = 1.3945027062*pow(10,-27);
double b14n = 7.9795153927*pow(10,-31);
double b0p = 0;
double b1p = 3.8748106364*pow(10,-2);
double b2p = 3.3292227880*pow(10,-5);
double b3p = 2.0618243404*pow(10,-7);
double b4p = -2.1882256846*pow(10,-9);
double b5p = 1.0996880928*pow(10,-11);
double b6p = -3.0815758772*pow(10,-14);
double b7p = 4.5479135290*pow(10,-17);
double b8p = -2.7512901673*pow(10,-20);
if (T<=0) {
    E
    b0n+b1n*pow(T,1)+b2n*pow(T,2)+b3n*pow(T,3)+b4n*pow(T,4)+b5n*pow(T,5)+b6n*pow(T,6)+b7n*pow(T,7)+b8n*pow(T,8)+b9n*
    pow(T,9)+b10n*pow(T,10)+b11n*pow(T,11)+b12n*pow(T,12)+b13n*pow(T,13)+b14n*pow(T,14);
}
else{
    E
    b0p+b1p*pow(T,1)+b2p*pow(T,2)+b3p*pow(T,3)+b4p*pow(T,4)+b5p*pow(T,5)+b6p*pow(T,6)+b7p*pow(T,7)+b8p*pow(T,8);
}
return E;
}

double get_TfromE(float E){
    double T;
    double c0n = 0;
    double c1n = 2.5949192*pow(10,1);
    double c2n = -2.1316967*pow(10,-1);
    double c3n = 7.9018692*pow(10,-1);
    double c4n = 4.2527777*pow(10,-1);
    double c5n = 1.3304473*pow(10,-1);
    double c6n = 2.0241446*pow(10,-2);
    double c7n = 1.2668171*pow(10,-3);
    double c0p = 0;
    double c1p = 2.592800*pow(10,1);
    double c2p = -7.602961*pow(10,-1);
    double c3p = 4.637791*pow(10,-2);
    double c4p = -2.165394*pow(10,-3);
    double c5p = 6.048144*pow(10,-5);
    double c6p = -7.293422*pow(10,-7);
    double c7p = 0;
    if (E<=0) {
        T = c0n+c1n*pow(E,1)+c2n*pow(E,2)+c3n*pow(E,3)+c4n*pow(E,4)+c5n*pow(E,5)+c6n*pow(E,6)+c7n*pow(E,7);
    }
    else{
        T = c0p+c1p*pow(E,1)+c2p*pow(E,2)+c3p*pow(E,3)+c4p*pow(E,4)+c5p*pow(E,5)+c6p*pow(E,6)+c7p*pow(E,7);
    }
    return T;
}

```

Como se depreende este segundo método para obtenção da temperatura através de termopares tem também vantagens e desvantagens. A principal vantagem é um maior entendimento dos fundamentos da medição com termopares. É possível que o custo seja menor já que se pode adquirir os componentes electrónicos não montados em placas comerciais. Contudo apresenta uma maior complexidade em termos de

cálculos e é necessário que o circuito electrónico de aquisição, amplificação e tratamento de sinal não tenha qualquer falha.

A maior vantagem do segundo método, em que se faz a amplificação de sinal, é que este tipo de amplificação é também necessária para a obtenção do sinal do sensor de fluxo de calor. Portanto otimizando a amplificação do sinal de termopares consegue-se ter uma boa confiança no sinal amplificado do sensor de fluxo de calor.

3.2.5. Utilização de bibliotecas

A utilização das placas Adafruit ADS1115 e Adafruit MCP9600 e do sensor de temperatura DS18B20 implicam inserção das bibliotecas expressas na Lista 7.

Lista 7 – Bibliotecas incluídas no código.

```
#include <OneWire.h>           // biblioteca para medir temperatura com DS18B20
#include <DallasTemperature.h> // biblioteca para medir temperatura com DS18B20

#include <Wire.h>               // biblioteca para usar Adafruit MCP9600
#include <Adafruit_I2CDevice.h> // biblioteca para usar Adafruit MCP9600
#include <Adafruit_I2CRegister.h> // biblioteca para usar Adafruit MCP9600
#include <Adafruit_MCP9600.h>   // biblioteca para usar Adafruit MCP9600

#include <Adafruit_ADS1X15.h>   // biblioteca para usar Adafruit ADS1115
```

Além de inserir as bibliotecas é necessário iniciar instâncias, configurar endereços I²C, configurar parâmetros e aceder a funções. Mas todo o processo é relativamente directo se se seguir os exemplos disponibilizados e as instruções dos fabricantes.

3.3. Alguns pormenores da programação da aplicação em Visual Basic

A programação em Visual Basic utilizando o pacote Visual Studio permite a construção de interfaces gráficas em ambientes Windows através de duas partes. Na parte gráfica são adicionados elementos de interação (texto, botões, conexões, *timers*, etc.) ao painel da interface gráfica. Na parte de código é programado o comportamento do programa e de todos os elementos inseridos na parte gráfica.

As aplicações em Visual Basic podem aceder a portas Série pelo que é possível fazer com que a aplicação comunique com a placa Arduino através dessa porta.

A aplicação desenvolvida foi feita com base em vídeos consultados na internet, [17], tendo sido adaptada ao objectivo pretendido.

3.3.1. Envio de informação da aplicação para o Arduino

As ordens de comando da aplicação para o microcontrolador são enviadas através da porta Série numa *string* única. São enviados apenas três parâmetros na forma “acciao, setpoint, tolerance”. O primeiro valor diz respeito ao tipo de acção a efectuar sobre a resistência de aquecimento. Os segundo e terceiro valores (“setpoint” e “tolerance”) apenas têm interesse no caso do parâmetro “acciao” ter valor igual a “2”, o que corresponde ao controlo de temperatura constante. O envio de informação da aplicação para o microcontrolador faz-se quando se clica nos botões “Set / Run”, “Reset / Stop” ou “Disconnect”.

Quando se clica no botão “Set / Run” é enviada a informação referente à escolha “potência constante” (“acciao” igual a 1) ou “temperatura constante” (“acciao” = 2), conforme se mostra no código presente na .Lista 8.

Lista 8 – Envio de informação ao Arduino na escolha de tipo de controlo quando se clica no botão “Set / Run”.

```

Sub ButtonSet_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles ButtonSet.Click
    If (RadioButtonTRF.Checked = False And RadioButtonTRC.Checked = True) Then
        StrToArduino = "2" + "," + ComboBoxTRS.SelectedItem.ToString() + "," +
            ComboBoxTRT.SelectedItem.ToString()
    Else
        StrToArduino = "1,0,0"
    End If

    Limit = TextBoxChartLimit.Text

    GroupBoxTR.Enabled = False
    GroupBoxABias.Enabled = False
    GroupBoxCharts.Enabled = False
    ButtonSet.Enabled = False
    ButtonReset.Enabled = True
    TabPageRun.Enabled = True

    SerialPort1.Write(StrToArduino)
End Sub

```

Se “Constant Temperature” seleccionada e “Constant Power” não seleccionada então:
StrToArduino = 2,setpoint,tolerance

Caso contrário será automaticamente activado o tipo “Constant Power” e:
StrToArduino = 1,0,0

Envio da *string* “StrToArduino” para a porta série

Quando se clica nos botões “Reset / Stop” ou “Disconnect” é enviada informação ao microcontrolador para desligar a resistência de aquecimento, sendo a *string* igual a “0,0,0” como se exemplifica na Lista 9.

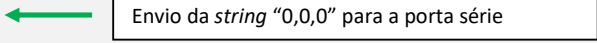
Lista 9 – Envio de informação ao Arduino para desligar resistência de aquecimento quando se clica no botão “Reset / Stop”.

```
Private Sub ButtonReset_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles ButtonReset.Click
    GroupBoxTR.Enabled = True
    GroupBoxABias.Enabled = True
    GroupBoxCharts.Enabled = True
    ButtonSet.Enabled = True
    ButtonReset.Enabled = False

    ButtonStartRecording.Enabled = True
    ButtonStopRecording.Enabled = False
    ButtonSaveToExcel.Enabled = True
    TimerDataLogRecord.Stop()
    PictureBoxRecordInd.Visible = True

    TabPageRun.Enabled = False

    SerialPort1.Write("0,0,0")
End Sub
```



Posteriormente o microcontrolador trata a informação enviada pela aplicação conforme descrito na secção 3.2.2.

3.3.2. Temporizadores para comunicação e escrita

A aquisição de dados a partir da porta série (enviados pelo Arduino) e a escrita de dados em tabela e em gráfico (ver secção 3.3.3) é feita com recurso a objectos temporizadores (*timers*). O valor do intervalo de tempo do temporizador pode ser definido na parte de programação gráfica e o comportamento do mesmo é programada na parte de código.

A título exemplificativo mostra-se na Figura 25 o ecrã de propriedades do temporizador “TimerSerial”, onde se definiu o intervalo de tempo de 200 milisegundos, e na Lista 10 mostra-se, parcialmente, o código do mesmo temporizador com destaque para a leitura da informação na porta Série. Para que seja possível obter informação da porta Série é também necessário que exista a instância relativa a essa porta (veja-se “SerialPort1” na Figura 25).

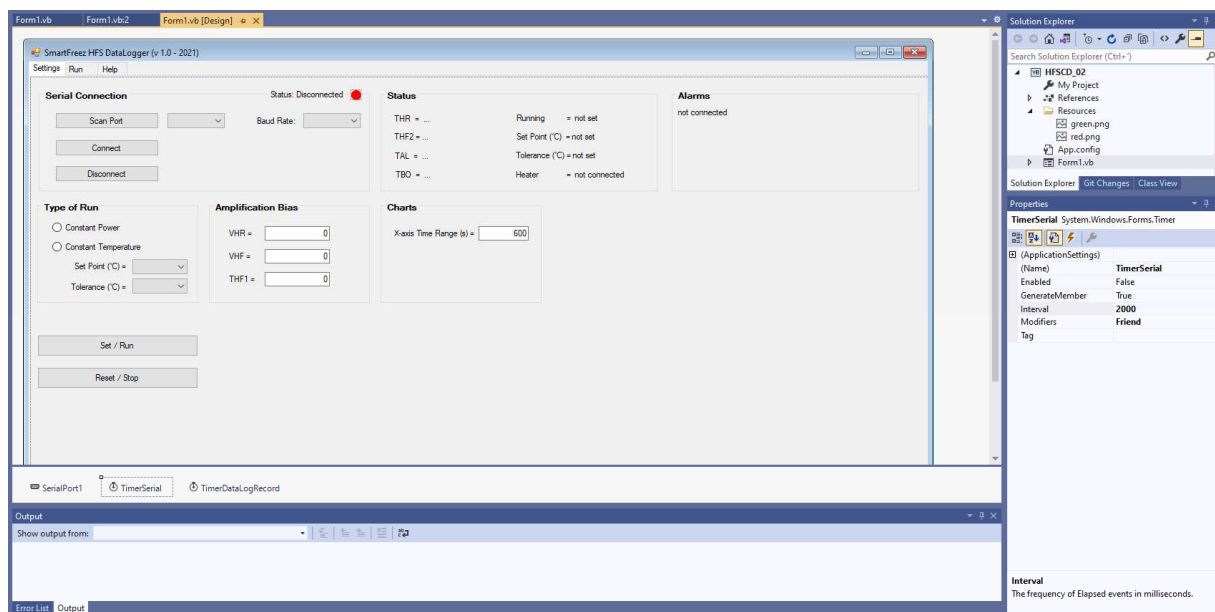


Figura 25 – Propriedades do temporizador “TimerSerial” na parte gráfica.

Lista 10 – Programação do temporizador “TimerSerial” na parte de código (parcial).

```
Private Sub TimerSerial_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles TimerSerial.Tick
    Try
        Dim StrSerialIn As String = SerialPort1.ReadExisting
        Dim StrSerialInRam As String

        Dim TB As New TextBox
        TB.Multiline = True
        TB.Text = StrSerialIn

        StrSerialInRam = TB.Lines(0).Substring(0, 3)
        If StrSerialInRam = "AHR" Then
            AHRs = TB.Lines(0)
            AHRs_L = AHRs.Length
        Else
            AHRs = AHRs
        End If

        ...
    End Sub
```

Leitura da informação na porta Série

3.3.3. Funcionamento da aplicação em Windows

Quando se inicia a aplicação todos os elementos encontram-se desactivados excepto a secção de conexão por porta Série. O utilizador deve pesquisar por uma porta activa e conectar-se (ver Figura 26 e Figura 27).

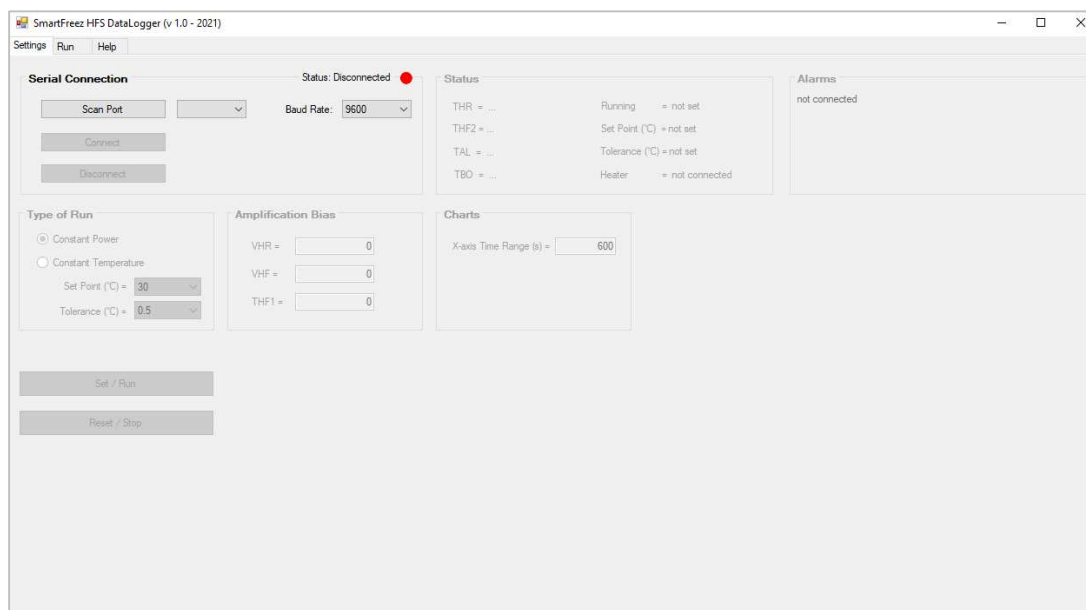


Figura 26 – Ecrã de entrada e configurações da IHM.

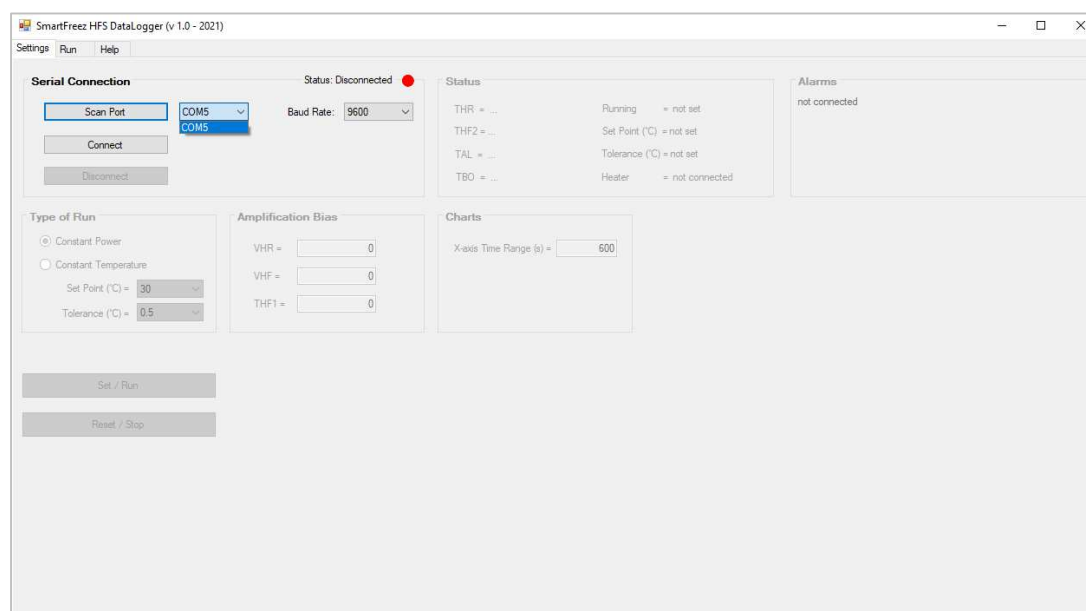


Figura 27 – Secção de conexão por porta Série.

Após conectado pode-se seleccionar o tipo de ensaio entre “potência constante” (*Constant Power*) ou “temperatura constante” (*Constant Temperature*) e alterar outros parâmetros (ver Figura 28). Para que os valores seleccionados sejam activados é necessário carregar no botão “Set / Run”, após o que alguns valores enviados do Arduino são mostrados na secção “Status” (ver Figura 29).

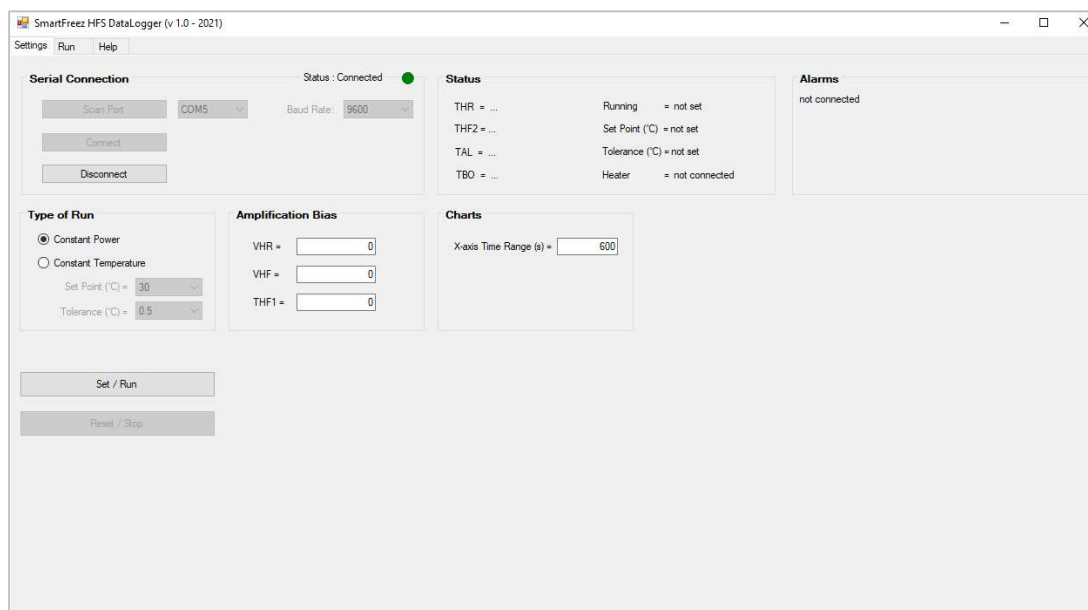


Figura 28 – Seleção de tipo de controlo da resistência de aquecimento e outras configurações.

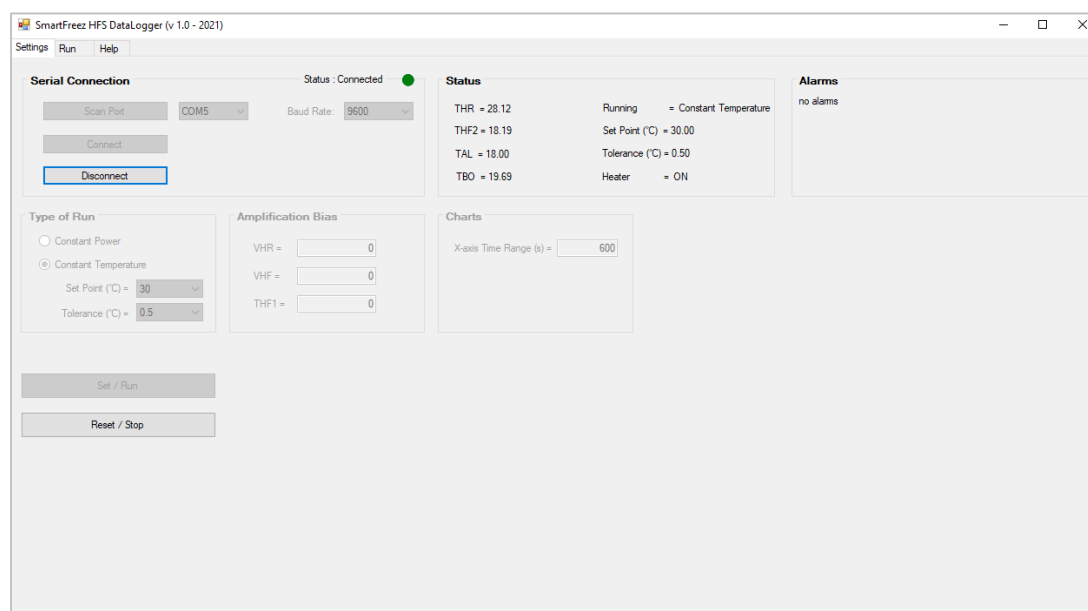


Figura 29 – Sistema conectado e a receber informação.

No separador “Run” são visualizados todos os dados numéricos enviados do Arduino (ver Figura 30). Se se clicar no botão “Start Recording” os dados são gravados na tabela em “Data Grid” e no gráfico em “Chart” (ver Figura 31).

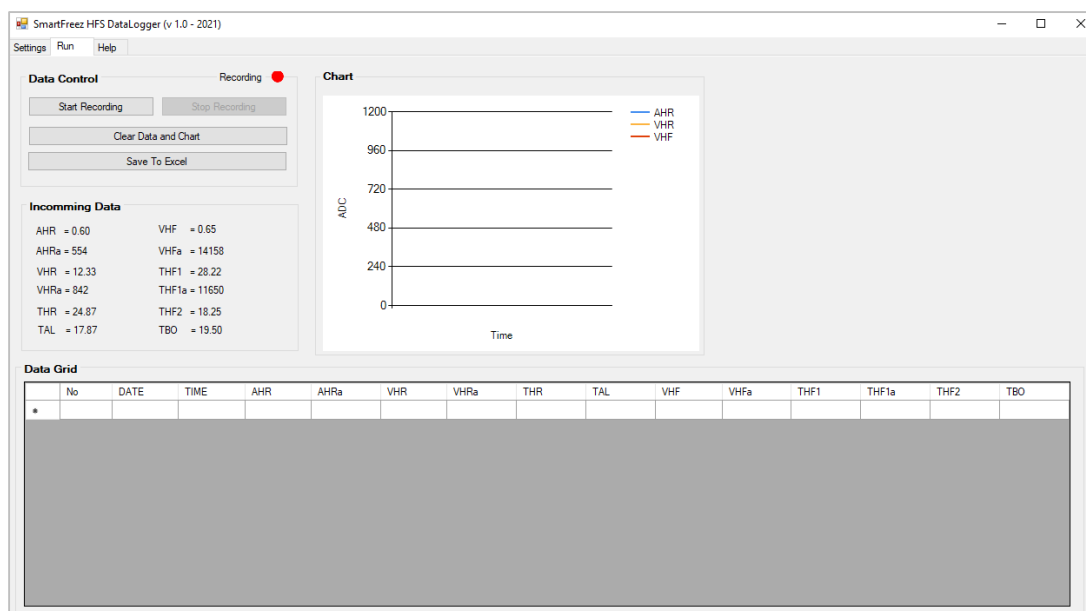


Figura 30 – Separador Run.

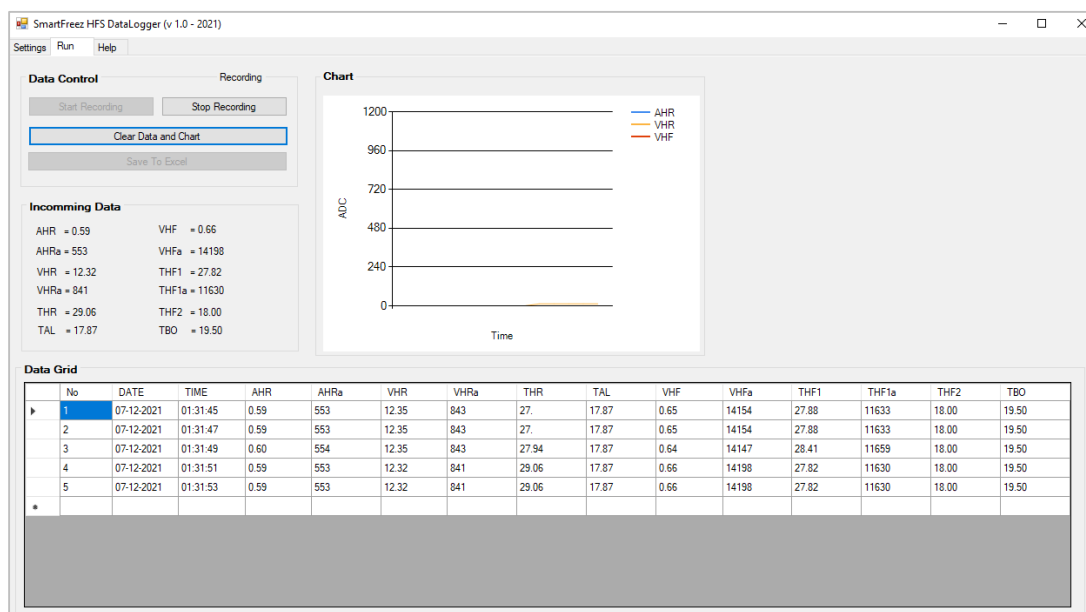


Figura 31 – Dados a serem inseridos na tabela e no gráfico.

Clicando no botão “Save to Excel” os dados da tabela são gravados num ficheiro de formato Excel (ver Figura 32 e Figura 33).

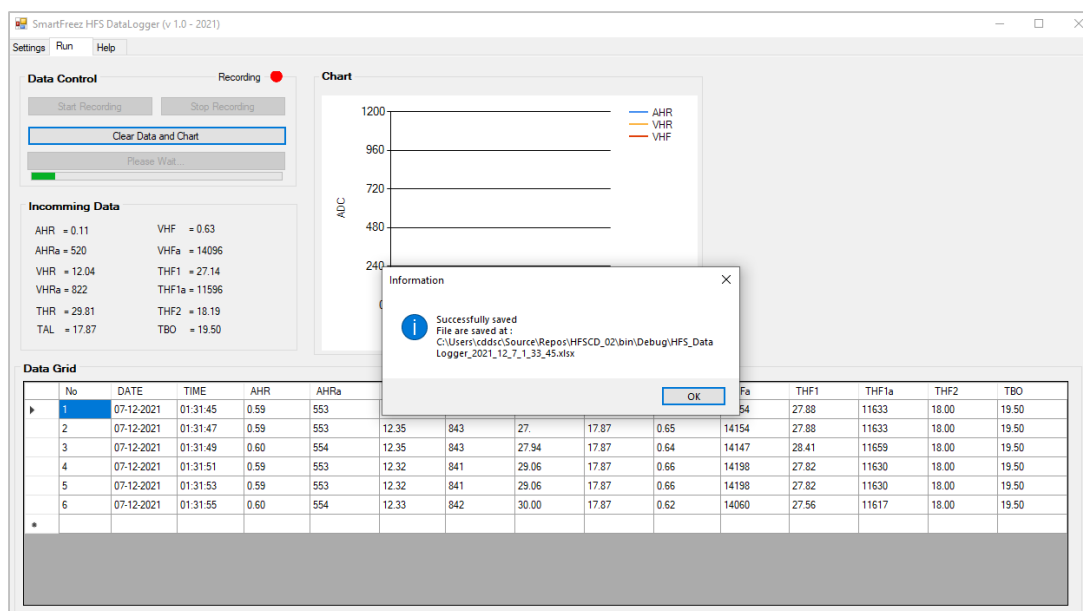


Figura 32 – Processo de gravação de dados da tabela para um ficheiro no formato Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	No	DATE	TIME	AHR	AHRa	VHR	VHRa	THR	TAL	VHF	VHFa	THF1	THF1a	THF2	TBO
2	1	12/07/2021	01:31:45	0.59	553	12.35	843	27	17.87	0.65	14154	27.88	11633	18	19.5
3	2	12/07/2021	01:31:47	0.59	553	12.35	843	27	17.87	0.65	14154	27.88	11633	18	19.5
4	3	12/07/2021	01:31:49	0.6	554	12.35	843	27.94	17.87	0.64	14147	28.41	11659	18	19.5
5	4	12/07/2021	01:31:51	0.59	553	12.32	841	29.06	17.87	0.66	14198	27.82	11630	18	19.5
6	5	12/07/2021	01:31:53	0.59	553	12.32	841	29.06	17.87	0.66	14198	27.82	11630	18	19.5
7	6	12/07/2021	01:31:55	0.6	554	12.33	842	30	17.87	0.62	14060	27.56	11617	18	19.5
8															
9															
10															
11															

Figura 33 – Ficheiro gerado aberto no Excel.

No separador “Help” apresentam-se as instruções para operar com a aplicação (ver Figura 34).

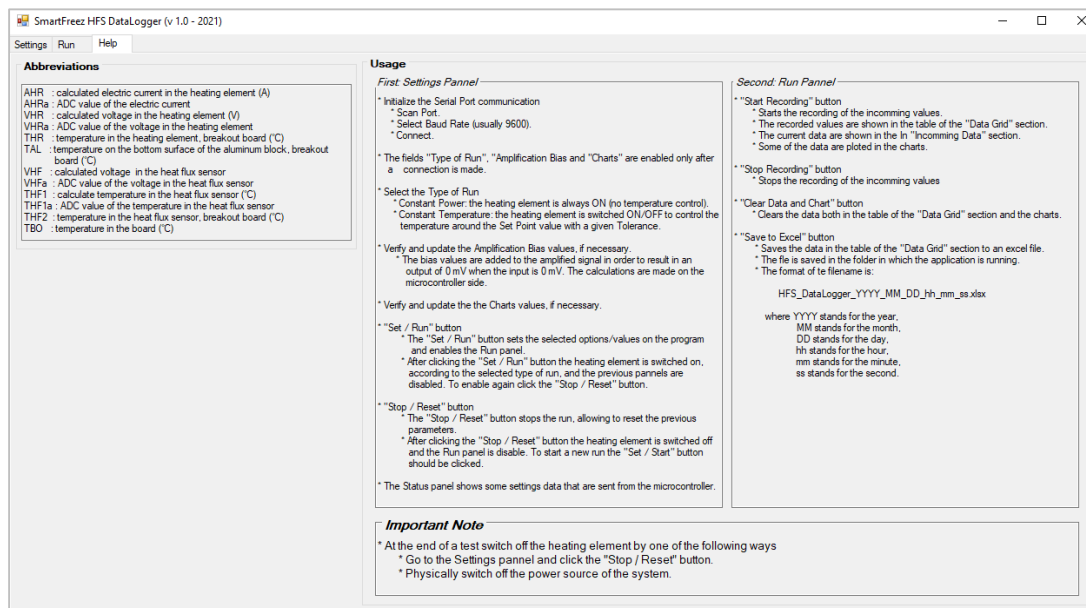


Figura 34 – Ecrã de ajuda da aplicação.

Quando algum alarme é activado essa informação aparece na secção “Alarms” (ver Figura 35). Em caso de activação de alarmes esta secção fica visível em todos os separadores.

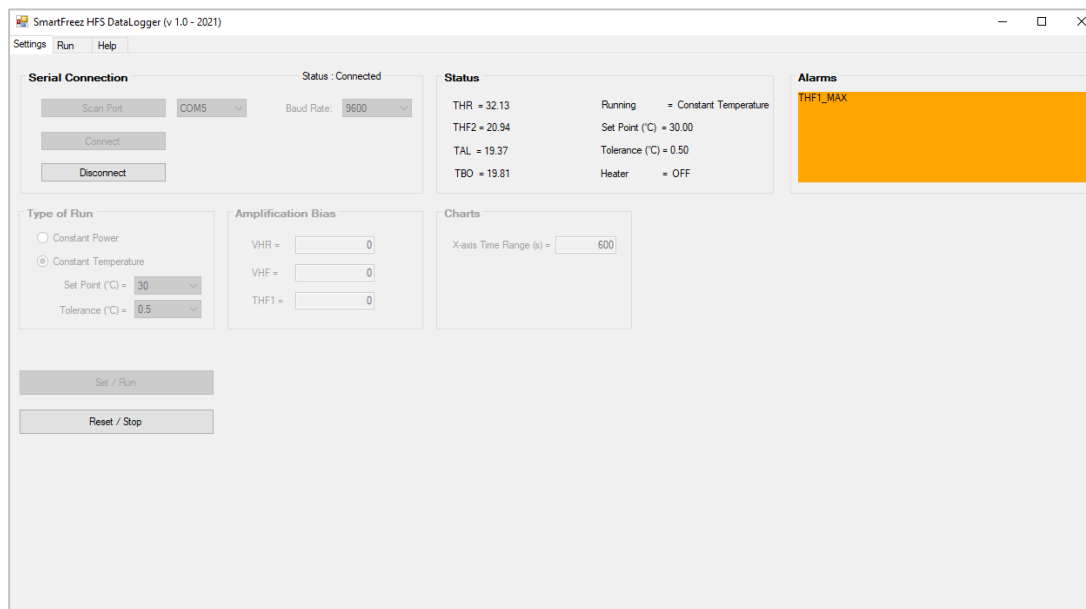


Figura 35 – Activação de alarmes.

4. Comentários gerais

O objectivo do trabalho proposto é interessante tanto a nível pessoal como da empresa de acolhimento. A nível pessoal porque permitiu tomar maior conhecimento em: circuitos electrónicos; utilização de placas específicas para uso com Arduino (através das bibliotecas); e programação em Visual Basic para criação de uma interface no sistema operativo Windows. No que diz respeito à empresa ainda não houve retorno uma vez que o projecto desenvolvido ainda não teve aplicação prática. Quanto à aplicação prática do protótipo de calibrador de sensores de fluxo de calor veja-se os tópicos sobre trabalho futuro na secção 5.

Não é do meu conhecimento a existência, a nível comercial, de sistemas integrados para calibração de sensores de fluxo de calor de filme fino. Na bibliografia que consultei os autores usam sempre montagens experimentais customizadas. Não sei como é que as empresas que comercializam sensores de fluxo de calor fazem as calibrações dos mesmos. Provavelmente usando também instalações customizadas pelos próprios. Uma possibilidade é adquirirem os dados do sensor de fluxo de calor usando uma placa de aquisição comercial enquanto que a potência eléctrica fornecida para aquecimento é controlada de uma qualquer outra forma.

Existem vários fabricantes de placas de aquisição a nível comercial. Dois exemplos para aquisição de sinais de tensão eléctrica na ordem dos microvolts são os equipamentos da National Instruments ou da Omega. Um sistema da National Instruments pode custar a partir de 2000 euros mas têm a possibilidade de ser integrados em sistemas programáveis com a linguagem *Labview* (que tem também o seu custo adicional – não menos de alguns milhares de euros). As placas da Omega custam a partir de 500 euros, mas não têm a possibilidade de integração em sistemas programáveis (ou pelo menos não de uma forma tão evidente). Estes custos são meramente indicativos, e dizem respeito apenas ao equipamento para aquisição de sinal do sensor (diferença de tensão relativa ao fluxo de calor e diferença de tensão relativa à temperatura do termopar incorporado no sensor).

Comparativamente, os gastos em termos de equipamento usado apenas para a amplificação de sinal usado no protótipo desenvolvido neste trabalho são inferiores (cerca de 200 euros). Contudo se contabilizarmos algum material inutilizado (vários amplificadores de instrumentação queimados, etc.) e, principalmente, as horas dispendidas no estudo e construção do sistema é claro que em termos monetários o sistema desenvolvido parece não ter grande vantagem em relação à utilização de uma placa de aquisição de sinal das mais baratas. Estas apresentam maior confiança porque foram desenvolvidas por equipas de engenheiros e foram já amplamente estudadas e testadas, quer pelos fabricantes quer pelos utilizadores. Aliás, o protótipo desenvolvido não terá grande utilidade prática se não resultar em resultados fiáveis (com erros inferiores a 10 %) mesmo que seja muito mais barato que as alternativas.

A grande vantagem deste trabalho foi a nível de desenvolvimento pessoal, nos temas descritos acima, e que sem dúvida poderá ser bastante útil no futuro como conhecimento geral quer profissionalmente quer. Outra vantagem de sistemas customizados, como o protótipo aqui desenvolvido, é o facto de que permite a sua utilização e desenvolvimento posterior sem usar sistemas proprietários de empresas.

5. Trabalho futuro

Para melhorar o protótipo de calibrador de sensores de fluxo de calor propõem-se os pontos discutidos nos seguintes parágrafos.

Estudar o deslocamento do sinal amplificado

Todas as relações obtidas entre o sinal de entrada e o sinal amplificado são lineares mas apresentam um deslocamento do sinal (ver secção 2.3.1). É necessário averiguar se as relações se mantêm em todas e quaisquer condições. Se as relações se mantiverem então será maior a confiança nos resultados obtidos e podem ser usadas internamente na programação do microcontrolador. Por outro lado, se os desvios e ganhos de amplificação mudarem com alteração dos circuitos integrado (do mesmo modelo) ou do circuito electrónico então será necessário efectuar um estudo mais aprofundado deste assunto para melhoria do sistema.

Averiguar a existência de sensores ou placas dedicadas para a amplificação de sinais diferenciais

Se existir este tipo de equipamento, e se for fiável, então a aquisição e amplificação de sinal deixa de ser um problema, ficando a cargo desse equipamento extra. A amplificação de sinal tal como feita neste trabalho teve como objectivo, além da obtenção de resultados, um intuito educacional. Se houver um equipamento fiável e a custo acessível então não há necessidade de sermos nós a fazê-lo da maneira difícil.

Melhorar o controlo da temperatura da resistência de aquecimento

O controlo da temperatura da resistência de aquecimento está a ser realizado usando um sistema liga/desliga. Para além de esse não ser o melhor método quando se pretende um controlo rigoroso, a deficiência actual prende-se com os tempos de actualização das variáveis e do controlo em si mesmo. Actualmente, o sistema, ou seja o loop do programa implementado no microcontrolador, só é actualizado de dois em dois segundos o que leva a um controlo pouco preciso, existindo picos na temperatura até 3 graus centígrados para além do especificado. Este comportamento deve-se ao facto de que quando a programação foi feita pareceu que a comunicação entre o microcontrolador e a aplicação em Windows ficava mais estável com esse intervalo de tempo.

No futuro deve-se estudar a alteração da programação em dois sentidos:

- Desacoplar a programação do Arduino da programação da aplicação Windows por forma que o *loop* no programa do Arduino tenha uma duração mais curta, levando a um maior controlo do sistema.
- Implementar um controlo PID em vez de um controlo liga/desliga. Para isso é necessário que se faça o desacoplamento da programação, ou seja, o controlo efectuado pelo Arduino tem de ser independente, e muito mais rápido, que os intervalos de aquisição de sinal por parte da aplicação Windows.

Produzir o invólucro do bloco de aquecimento do sensor de fluxo de calor

Estava previsto o desenho e produção de um invólucro para o bloco de aquecimento do sensor de fluxo de calor (ver secção 1.3.1). A modelação 3D seria realizada através do aplicativo OnShape, [18], e seria produzido por impressão 3D. Contudo não houve disponibilidade física nem temporal para avançar com esta parte do projecto.

Arrefecimento do bloco de alumínio

Estudar o impacto e vantagens de implementar arrefecimento da parte inferior do bloco de alumínio. Se a temperatura da parte inferior do bloco de alumínio for arrefecida, por exemplo com um banho de água corrente, então será possível realizar estudos mais aprofundados da transferência de calor no sistema. Embora a calibração de sensores de fluxo de calor necessite apenas dos valores de calor transferido e diferencial de tensão gerado, parece-me que seria interessante implementar o arrefecimento da parte inferior do bloco de alumínio. Aliás era já com esse objectivo em mente que se implementou na programação e na aquisição de dados a variável TAL (ver Figura 5).

Testes ao protótipo

Testar o protótipo desenvolvido, usando sensores reais, para avaliar a consistência dos resultados obtidos.

6. Conclusões

Foi desenvolvido um protótipo para calibrador de sensores de fluxo de calor. Embora não tenha sido possível atingir alguns dos objectivos iniciais (nomeadamente a verificação experimental do dispositivo com sensores reais), o trabalho efectuado permitirá, com algumas melhorias, determinar o valor da sensibilidade de sensores de fluxo de calor.

Na forma actual do protótipo é possível controlar a resistência de aquecimento que fornece calor ao sensor de fluxo de calor. Para isso desenvolveu-se software de controlo e monitorização de várias variáveis do sistema. Uma parte do software foi desenvolvida para controlar o microcontrolador de uma placa Arduino. Paralelamente desenvolveu-se uma aplicação em Windows que funciona como interface homem-máquina.

Grande parte do trabalho focou-se no estudo da amplificação de sinais diferenciais utilizando amplificadores operacionais e amplificadores de instrumentação. Na gama de valores de entrada, verificou-se que a amplificação tem comportamento linear. Contudo, em todos os casos ocorre um deslocamento do sinal, ou seja, para entradas de 0 mV a saída não é 0 V. Isto pode causar grande incerteza nos resultados obtidos uma vez que os sinais de entrada são na ordem dos pouco microvolts. Devido a este facto, optou-se por avançar com testes reais apenas após estudar com mais profundidade este assunto.

7. Referências

- [1] F. Incropera and D. DeWitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [2] "Smartfreez website," [Online]. Available: www.smartfreez.com. [Accessed 06 12 2021].
- [3] ASTM International, *C-1114 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Thin-Heater Apparatus*, 2006.
- [4] STMicroelectronics, *L78 Positive voltage regulator ICs (Document DocID2143 Rev 32)*, 2014.
- [5] STMicroelectronics, *L79 Negative voltage regulators (Document DocID2149 Rev 22)*, 2014.
- [6] STMicroelectronics, *LM217, LM317 1.2 V to 37 V adjustable voltage regulators (Document DocID2154 Rev 19)*, 2014.
- [7] Omega, *Revised thermocouple reference tables - Type T*.
- [8] Analog Devices, Inc., *Single and dual-supply, rail-to-rail, low cost instrumentation amplifier (Datasheet AD623 Rev. G)*, 2020.
- [9] Adafruit, *Adafruit 4-channel ADC breakouts*, 2021.
- [10] Texas Instruments Incorporated, *ADS111x ultra-small, low-power, I2C-compatible, 860-SPS, 10-Bit ADCs with internal reference, oscillator, and programmable comparator (Document SBAS444D)*, 2018.
- [11] Adafruit, *Adafruit MCP9600 I2C thermocouple amplifier*, 2021.
- [12] Microchip Technology Inc., *Thermocouple EMF to Temperature Converter, $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ Maximum Accuracy (MCP960X/LOX/RL0X) (Document DS20005426F)*, 2019.
- [13] Maxim Integrated Products, Inc., *DS18B20 Programmable resolution 1-wire digital thermometer (Document 19-7487)*, 2019.
- [14] Velleman nv, *VMA323 User Manual - Current sensor ACS712 module – 20 A (DC)*, 2018.

- [15] Allegro MicroSystems, LLC, *ACS712 Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor (Document ACS712-DS, Rev. 15)*, 2013.
- [16] G. Recktenwald, *Conversion of thermocouple voltage to temperature*, 2020.
- [17] U. Str, "Visual Basic .Net | Arduino Data Logger with VB Net (Export to Excel)," [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=EQpflovuJgw>. [Accessed 19 12 2021].
- [18] OnShape Inc., "OnShape | Product Development Platform," [Online]. Available: www.onshape.com. [Accessed 19 12 2021].
- [19] Vishay Intertechnology, *Power MOSFET (IRF540) (Document 91000)*, 2021.
- [20] Texas Instruments Incorporated, *LMx24-N, LM2902-N Low-Power, Quad-Operational Amplifiers (Document SNOSC16D)*, 2015.