



Relatório de Projeto

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica

Controlador de Caldeiras e Salamandras Domésticas

João Ricardo Cardoso Silva

Leiria, março de 2017



Relatório de Projeto

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica

Ramo de Energia e Automação

Controlador de Caldeiras e Salamandras Domésticas

João Ricardo Cardoso Silva

Relatório de Projeto de Mestrado realizado sob a orientação do Doutor Pedro Marques, Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Mestre Paulo Ventura, Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, março de 2017

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Dedicatória

Aos meus pais, aos meus avós.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Apesar do processo solitário a que uma tese de mestrado está destinada, inevitavelmente reúne o contributo de várias pessoas.

Agradeço aos meus orientadores, Professor Doutor Pedro Marques e Professor Mestre Paulo Ventura, o apoio, dedicação e disponibilidade que sempre demonstraram ao longo deste projeto.

Ao Eng.º Felisbelo Lisboa e à Eng.^a Alexandra Lisboa, pelo acompanhamento, confiança e ensinamentos bem como a todos os colaboradores da METALOMECÂNICA VICTOR MONTEIRO pela forma como fui tratado, recebido, pela integração que me proporcionaram e pela disponibilidade demonstrada desde o primeiro instante, deixo também uma palavra de agradecimento.

Agradeço também aos meus colegas de curso, docentes e restantes colaboradores do Instituto Politécnico de Leiria pelo auxílio, pela camaradagem e pelo apoio ao longo destes anos de estudo.

Ao colega de curso e amigo Cristiano Justino, quero agradecer o apoio, a motivação e o espírito de entajuda que sempre demonstrou, não só durante o desenvolvimento deste projeto, mas ao longo de todo o curso de mestrado.

Por último, um agradecimento aos meus pais, irmão e avós, por todo o contributo prestado na minha educação e pela forma como sempre me enriqueceram enquanto pessoa. Sem eles, nada teria sido possível. A eles, reforço a minha gratidão!

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

Os *pellets* são uma fonte de energia renovável proveniente da compactação de desperdícios da madeira. Ocupam menos espaço do que a lenha, produzem menos cinzas, são mais fáceis de transportar e podem ser utilizados em sistemas com funcionamento automático, proporcionando maior conforto aos seus utilizadores. Por terem origem na biomassa, são considerados neutros em termos ambientais e o seu preço não depende diretamente das oscilações do preço do petróleo. Estas características fazem dos *pellets* um combustível que tem ganho cada vez mais quota de mercado.

Um sistema de aquecimento a *pellets* necessita de um controlo eletrónico que garanta o seu bom funcionamento. Sistemas de aquecimento doméstico derivados deste combustível já são fabricados em Portugal. No entanto, não existe no país nenhum fabricante de controladores eletrónicos dedicados a sistemas de queima de *pellets*. Este projeto de mestrado teve como motivação o repto lançado pela empresa nacional e fabricante de sistemas de aquecimento a *pellets*, a MVM – Metalomecânica Vítor Monteiro, Lda, de desenvolver um controlador com um custo competitivo, com assinatura portuguesa.

Neste trabalho foram analisados os elementos que constituem um sistema de aquecimento a *pellets*, estudadas as melhores formas de os controlar e integrou-se esse conhecimento no estudo do processo de queima. Tudo isto resultou no desenvolvimento de uma placa controladora e respetivo *firmware* capaz de garantir o funcionamento de uma salamandra a *pellets* que oferece ao utilizador o controlo automático da climatização, programação de funcionamento automático com controlo remoto por *Bluetooth* e/ou infravermelhos.

Durante o desenvolvimento, o controlador foi testado num equipamento comercializado pela MVM, local onde foi possível comprovar o seu bom funcionamento.

Palavras-chave: *Pellets*, Aquecimento doméstico, Salamandras a *pellets*, Controlo de salamandras.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

Pellets are a source of renewable energy made from the compaction of wood waste. They occupy less space than firewood, produce less ashes, are easier to carry and can be used in systems with automatic operation, providing greater comfort to its users. Because they have their origin in biomass, they are considered harmless in environmental terms and their price doesn't depend directly on the oil price fluctuations. These characteristics make *pellets* a fuel type that has gained more and more market share.

A *pellet* heating system needs an electronic control system to ensure that it functions properly. Domestic heating systems derived from this fuel are already manufactured in Portugal. However, there isn't any electronic control system manufacturer in the country. This master's project was motivated by the challenge launched by the national company and manufacturer of *pellet* heating systems, MVM – Metalomecânica Victor Monteiro, Lda, to develop a controller with a competitive cost, with Portuguese signature.

In this work, the elements that constitute a *pellet* heating system were analyzed, the best ways of controlling them were studied and the knowledge was integrated in the study of the burning process. All this has resulted in the development of a controller board and its firmware capable of guaranteeing the operation of a *pellet* stove that offers the user automatic climate control, automatic function programming and Bluetooth and/or infrared remote control and automatic function programming. During the development, the controller was tested on an equipment marketed by MVM, where it was possible to assess its good operation.

Keywords: *Pellets*, Domestic heating, Pellet stoves, Stoves Control

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1 - Evolução do preço do barril de petróleo (\$USD/Barril) nos últimos 16 anos [1].2	
Figura 2 - Simulação de custos de utilização a prazo dos equipamentos para aquecimento [6].	4
Figura 3 - Pellets [10].	8
Figura 4 - Comparativo do custo do kWh térmico para aquecimento.	10
Figura 5 - Lareira aberta encastrada [16].	12
Figura 6 - Lareira aberta no centro de uma divisão [17].	12
Figura 7 - Esquema de fluxos de ar de um recuperador de calor [21].	14
Figura 8 - Corte lateral de um sistema recuperador de calor ventilado [16].	15
Figura 9 - Sistema de recuperador de calor interligado com águas sanitárias [24].	16
Figura 10 - Salamandra típica, com aquecimento por irradiação [25].	17
Figura 11 - Corte lateral de uma salamandra com recuperação de calor [23].	18
Figura 12 - Corte lateral de esquema de uma caldeira [27].	19
Figura 13 - Esquema de um sistema de aquecimento doméstico a caldeira [28].	20
Figura 14 - Evolução do mercado nacional de pellets [9].	20
Figura 15 - Corte lateral de uma salamandra a pellets [29].	21
Figura 16 - Exemplo de recuperador de calor a pellets [30].	22
Figura 17 - Salamandras com aquecimento de águas sanitárias [31].	23
Figura 18 - Controlador de queima de pellets da marca FUMIS ALPHA [32].	24
Figura 19 - Resistência incandescente de modo a iniciar a combustão dos pellets [33].	24
Figura 20 - Esquema elétrico de um controlador de queima de pellets [34].	26
Figura 21 - Corte lateral de uma caldeira a pellets [35].	27
Figura 22 - Fluxograma de funcionamento de um equipamento a pellets.	29
Figura 23 - Interface com botões para salamandra a pellets [36].	30
Figura 24 - Interface com potenciômetros para salamandra a pellets [37].	31
Figura 25 - Interface com LCD para salamandra a pellets [38].	31
Figura 26 - Interface de ecrã-táctil para salamandra a pellets [39].	32
Figura 27 - Painel remoto com botões [40].	33
Figura 28 - Painel remoto de ecrã táctil [41].	33
Figura 29 - Interface de LCD com um comando remoto [42].	34
Figura 30 - Módulo Wi-Fi [43].	35

Figura 31 - Módulo GSM/GPRS [44].	36
Figura 32 - Diagrama de blocos do controlador a desenvolver.	38
Figura 33 - Protoshield para Arduíno Uno [45].	41
Figura 34 - Shield de Ethernet para Arduíno [46].	41
Figura 35 - Arduíno Uno.	43
Figura 36 - Arduíno Mega 2560.	44
Figura 37 - Placa de desenvolvimento PICDEM LAB II [47].	45
Figura 38 - Placa de desenvolvimento Explorer 8 [47].	45
Figura 39 - Placa de desenvolvimento ChipKIT Uno32 [49].	47
Figura 40 - Raspberry Pi 2 Model B.	48
Figura 41 - Comparação do Raspberry Pi Zero com uma nota de 5\$ [50].	48
Figura 42 - Salamandra de testes, modelo Prima Air, durante um ensaio de queima.	53
Figura 43 - Elementos constituintes da salamandra a controlar.	54
Figura 44 - Relação entre tensão de saída e ângulo de disparo [49].	56
Figura 45 - Tensão e corrente numa carga resistiva controlada com TRIAC [51].	56
Figura 46 - Tensão e corrente numa carga indutiva controlada com TRIAC [51].	57
Figura 47 - Diagrama de blocos do controlo de velocidade de um motor AC.	58
Figura 48 - Circuito de snubber com resistência e condensador [52].	59
Figura 49 - Ilustração de uma passagem por zero [52].	61
Figura 50 - Esquema elétrico do circuito utilizado na deteção de zero.	61
Figura 51 - Módulo de relé utilizado na comutação da resistência de aquecimento.	65
Figura 52 - Informação disponibilizada pelo ecrã.	66
Figura 53 - Conjunto de comando remoto emissor e recetor de infravermelhos.	67
Figura 54 - Módulo transceptor Bluetooth.	68
Figura 55 - Esquema elétrico do circuito de leitura dos sensores de temperatura.	68
Figura 56 - Saída do circuito de deteção de zero.	70
Figura 57 - Sinal de disparo de TRIAC em sincronismo com a deteção de zero.	71
Figura 58 - Ecrã corrompido pela comutação do motor de alimentação.	73
Figura 59 - Registo de efeito da comutação do relé na alimentação de 5V.	73
Figura 60 - Acionamento de motor de alimentação, em protótipo, através de opto-isolador com deteção de passagem por zero.	75
Figura 61 - Comparação entre sinal, temperatura lida e real do sensor de fumos.	76
Figura 62 - Comparação entre sinal, temperatura lida e real do sensor ambiente.	76

Figura 63 - Interface da aplicação móvel para Windows 10, com comandos por Bluetooth.	78
Figura 64 - Placas constituintes do controlador desenvolvido.	81
Figura 65 - Análise de ruído em carga de um carregador USB.....	83
Figura 66 - Diagrama de blocos dos circuitos de alimentação e deteção de zero com a placa de controlo/Arduino.....	84
Figura 67 - Esquema de circuito de deteção de zero com recurso a transformador.	84
Figura 68 - Esquema elétrico do circuito de alimentação do controlador.	87
Figura 69 - Sinal de saída do detetor de passagem por zero.....	88
Figura 70 - Análise de tensão à entrada do regulador após retificação e filtragem.....	89
Figura 71 - Análise da componente AC da tensão de saída do regulador de tensão.	90
Figura 72 - Teste de instalação num equipamento de queima de pellets.	92
Figura 73 - Fluxograma do ciclo principal de funcionamento do firmware.....	93
Figura 74 - Fluxograma de início do processo de queima.....	96
Figura 75 - Mensagem informativa de início de funcionamento.	96
Figura 76 - Fluxograma do processo de extinção da queima de pellets.....	98
Figura 77 - Mensagem de término de funcionamento.....	98
Figura 78 - Menu de programação de funcionamento.....	100
Figura 79 - Botões do painel de interface.....	101
Figura 80 - Aquisição de dados através de comunicação por infravermelhos e Bluetooth.	103
Figura 81 - Informação no ecrã em modo de funcionamento manual.....	104
Figura 82 - Símbolo de alarme e informação no modo de climatização automática.....	104
Figura 83 - Informação no LCD durante a utilização de um menu.....	106
Figura 84 - Função de conversão de tensão em temperatura.....	107
Figura 85 - Fluxograma da função de gestão de estado do motor alimentador.....	109
Figura 86 - Função de gestão de alimentação de pellets.	110
Figura 87 - Fluxograma de controlo por ângulo de fase implementado no firmware,	111
Figura 88 - Fluxograma de eventos interruptivos do controlo dos motores de velocidade variável.	112
Figura 89 - Atribuição de valor ao registo de contagem TCNT1.....	114
Figura 90 - Encoder de efeito de Hall do motor extrator de fumos.....	114

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 1 - Comparação de custos anuais para aquecimento de uma moradia.....	3
Tabela 2 - Utilidade e categoria dos diferentes tipos de biocombustíveis [7].....	7
Tabela 3 - Comparação do preço e rendimento entre os vários combustíveis para aquecimento [11].....	9
Tabela 4 - Critérios de certificação de qualidade de pellets.....	11
Tabela 5 - Requisitos de um controlador de queima de pellets, sem interface.....	39
Tabela 6 - Especificações técnicas Arduíno Uno.....	42
Tabela 7 - Especificações técnicas Arduíno Mega 2560.....	43
Tabela 8 - Especificações técnicas da placa de desenvolvimento ChipKIT Uno32.....	46
Tabela 9 - Análise às plataformas de controlo face aos requisitos do projeto.....	50
Tabela 10 - Equivalência entre botões do comando remoto, painel de interface e etiquetas.	103
Tabela 11 - Intervalos de tempo de funcionamento do motor alimentador para os diferentes níveis de potência.....	110
Tabela 12 - Comparação de preços do controlador em diferentes métodos de produção.	118
Tabela 13 - Lista de componentes utilizados no controlador.....	131

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

COP	<i>Coefficient of Performance</i>
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
FTDI	<i>Future Technology Devices International</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
LCD	<i>Liquid-Crystal Display</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
PID	<i>Proportional Integral Derivative</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TRIAC	<i>Triode for Alternating Current</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

DEDICATÓRIA	III
AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE SIGLAS	XVII
ÍNDICE	XIX
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	5
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2. SISTEMAS DE QUEIMA DE BIOMASSA	7
2.1. BIOMASSA	7
2.2. SISTEMAS DE AQUECIMENTO A BIOMASSA	11
2.2.1. AQUECIMENTO A LENHA	11
2.2.2. AQUECIMENTO A PELLETS	20
2.3. CONTROLO DA QUEIMA DE PELLETS	23
2.3.1. CONTROLADOR	28
2.3.2. INTERFACE DIRETA	29
2.3.3. INTERFACE À DISTÂNCIA	33
2.3.4. FUNCIONALIDADES	36
2.3.5. CONTROLADOR A IMPLEMENTAR	37
3. SOLUÇÕES DE CONTROLO	39
3.1. ARDUINO	40
3.1.1. ARDUINO UNO	42
3.1.2. ARDUINO MEGA 2560	43
3.2. MICROCHIP	44
3.3. CHIPKIT	45
3.3.1. CHIPKIT UNO32	46
3.4. RASPBERRY PI	47
	xix

3.5. ANÁLISE COMPARATIVA	49
4. CONTROLADOR DESENVOLVIDO	53
4.1. PROTÓTIPO - HARDWARE	55
4.1.1. CONTROLO DE MOTORES E RESISTÊNCIA	55
4.1.2. INTERFACE E SENSORES	65
4.1.3. TESTES E RESULTADOS	69
4.2. CONTROLADOR - HARDWARE EM PLACA ÚNICA	78
4.2.1. ALIMENTAÇÃO DE CONTROLO	82
4.2.2. TESTES E RESULTADOS	87
4.3. CONTROLADOR - FIRMWARE	92
4.3.1. DESCRIÇÃO DE FUNCIONAMENTO	95
4.3.2. GESTÃO DA INTERFACE	100
4.3.3. CONTROLO DO SISTEMA	108
4.3.4. TESTES E RESULTADOS	116
4.4. ANÁLISE DE CUSTOS / PRODUÇÃO	117
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	119
REFERÊNCIAS	123
ANEXOS	131

1. Introdução

1.1. Enquadramento

O conforto térmico é uma sensação relacionada com o ambiente térmico circunjacente, de suma importância para o nosso bem-estar. Significa na prática que uma pessoa nestas condições não tem a sensação de frio nem de calor.

O Homem necessita de manter a temperatura do seu corpo a cerca de 37°C o que o obriga a uma procura constante de equilíbrio para com o meio envolvente, que influencia diretamente a sua temperatura interna. Um ambiente neutro ou confortável permite que a produção de calor metabólico se equilibre com as trocas de calor com o meio. A busca pelo conforto térmico está diretamente ligada à natureza do Homem. Há centenas de milhar de anos, altura da prova mais concreta de domínio do fogo, esta busca traduzia-se numa fogueira ao ar livre.

A tecnologia evoluiu e a busca constante pelo conforto permanece. Facilmente se atingem temperaturas baixas, desconfortáveis, no inverno. Em alguns locais do mundo, as temperaturas são demasiado baixas o ano inteiro, bem longe do conceito de conforto térmico.

Em Portugal, muitos edifícios têm um isolamento térmico deficiente, sobretudo os mais antigos, pelo que manter uma habitação aquecida é essencial, em especial durante o inverno, altura em que se atingem temperaturas abaixo dos 10°C em qualquer parte do país. O aquecimento com origem na eletricidade ou em combustíveis fósseis tem vindo a tornar-se demasiado dispendioso e nem todas as habitações permitem armazenar quantidades de lenha suficientes que durem uma estação. Cada vez mais o custo, a eficiência energética e também as preocupações ambientais devem ser fatores a ter em conta quando se escolhe um combustível para aquecimento. Os combustíveis fósseis têm-se caracterizado por uma forte instabilidade no preço, motivo pelo qual investir num sistema de aquecimento deste tipo traz associado um risco assinalável. A Figura 1 mostra a evolução do preço do barril de petróleo, em dólares, desde o ano 2000 até ao ano de 2016.



Figura 1 - Evolução do preço do barril de petróleo (\$USD/Barril) nos últimos 16 anos [1].

Podemos observar variações de mais de 100\$USD, tendo o barril de petróleo chegado a estar cotado a um máximo de 140\$USD e registado um preço mínimo abaixo dos 40\$USD. Para um utilizador que queira aquecer um edifício ou habitação, recorrer a combustíveis fósseis pode tornar-se demasiado dispendioso e instável uma vez que está à mercê destas oscilações.

Quer a nível governamental quer a nível social, tem existido uma consciencialização em termos ambientais que tem levado à procura de soluções ecológicas, eficientes e renováveis no aquecimento de edifícios. No mercado de combustíveis para aquecimento doméstico os sistemas alimentados a biomassa têm vindo a ganhar quota de mercado relativamente a outros sistemas.

A necessidade de modernizar os sistemas de queima tradicionais alimentados a biomassa lenhosa, fez com que surgissem combustíveis de biomassa densificada, como os *pellets*, com a vantagem de permitir o funcionamento automático do sistema de aquecimento como ocorre com alguns sistemas a gasóleo, gás butano ou gás natural.

Os *pellets* são pequenos aglomerados constituídos exclusivamente por biomassa florestal residual e subprodutos da indústria florestal, devidamente triturados e secos [2]. Como são uma fonte renovável de produção nacional, a estabilidade e previsibilidade do preço são garantidas - não está dependente de guerras, conflitos internacionais, etc. - além de que, devido ao tratamento a que está sujeito na sua transformação, a humidade é muito reduzida, permitindo que a combustão seja muito mais eficiente e liberte menos fumo que a

lenha normal, o que lhe confere um elevado poder calorífico. Existem ainda outras mais-valias na escolha de *pellets* em vez de outros combustíveis. Uma vez que são produzidos a partir da limpeza das florestas, contribuem para a redução do risco de incêndio florestal. Reduzem também a dependência energética que temos em relação a outros países, beneficiando a economia nacional. Outra vantagem é o facto de serem um combustível menos poluente do que os combustíveis fósseis, pois libertam muito menos monóxido de carbono e dióxido de carbono na sua utilização; são considerados um combustível neutro em termos ambientais uma vez que a quantidade de CO e CO₂ libertados na combustão é equivalente à que a árvore absorveu ao longo da sua vida. Os *pellets* são também uma escolha mais prática porque são vendidos em sacos, o que facilita o seu transporte e armazenamento [3].

Em Portugal a floresta ocupa cerca de 38% do território [4], o que oferece vastas áreas com os recursos necessários à produção de *pellets*. Existem alguns fabricantes nacionais de *pellets* que inclusive têm feito investimentos muito significativos [5]. Desta forma, os *pellets* perspetivam-se como uma solução ecológica, económica e sustentável.

Os *pellets* são bastante menos volumosos do que a lenha - e, portanto, são mais fáceis de armazenar -, têm um poder calorífico semelhante a esta e a sua utilização como combustível torna estes sistemas de aquecimento muito competitivos em termos de custos de utilização relativamente aos sistemas de aquecimento a combustíveis fósseis, eletricidade ou gás natural. Exemplo disso é o aquecimento de várias divisões de uma moradia que não possua uma lareira. Quando comparados os custos de utilização de um equipamento a *pellets* com os de uma caldeira a gás natural, ar condicionado ou um termoventilador, o equipamento a *pellets* tem um custo de utilização menor que as outras opções [6].

Tabela 1 - Comparação de custos anuais para aquecimento de uma moradia.

Custos	Termoventilador	Ar condicionado	Caldeira a gás natural	Salamandra a <i>pellets</i>
Aquisição	120€	2600€	1600€	1400€
Instalação	0€	325€	175€	250€
Manutenção anual	0€	60€	30€	60€
Gasto anual de energia	1263€	224€	572€	304€

A Tabela 1 contém dados de uma simulação [6] do custo de aquecimento de uma moradia – 3 ou mais divisões – que permitem concluir que os dois equipamentos mais baratos para aquecer uma moradia são a salamandra a *pellets* e o ar condicionado. A diferença anual de custo em termos energéticos, entre ambos, é de 80€. Apesar de ainda ser uma diferença considerável, é necessário avaliar também todas as outras despesas, como a manutenção, aquisição e instalação dos equipamentos para se ter uma ideia do custo a longo prazo. Na Figura 2 podemos ver a simulação dos custos de utilização de todos os equipamentos ao longo de diferentes prazos.

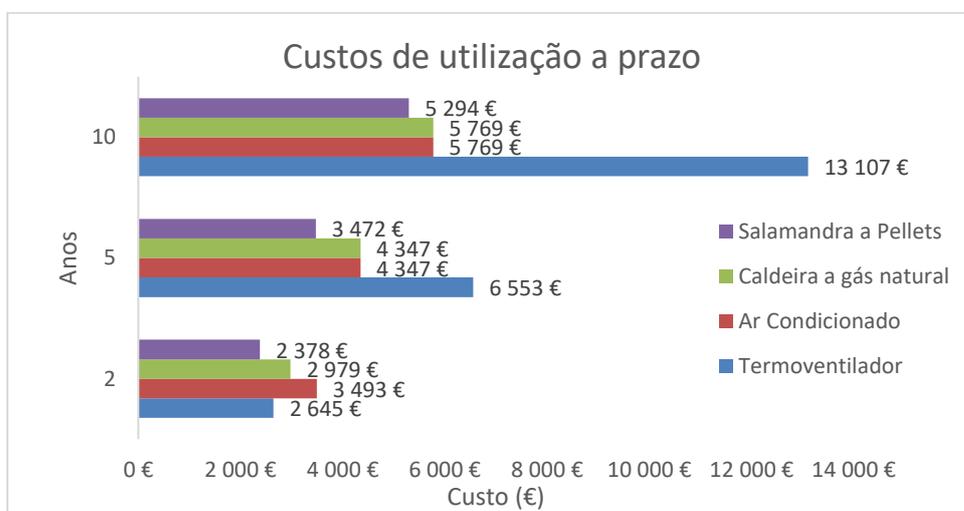


Figura 2 - Simulação de custos de utilização a prazo dos equipamentos para aquecimento [6].

É possível concluir que apesar de ser o equipamento com o menor custo de aquisição, o termoventilador ultrapassa de imediato todos os outros equipamentos no que respeita aos custos de utilização após 5 anos. A caldeira a gás natural mantém a sua posição de terceiro equipamento mais caro para os prazos de 2 até 10 anos de utilização. O ar condicionado aparece nos primeiros 2 anos como o equipamento com um custo de utilização mais elevado, mas compensa para prazos mais alargados, tornando-se no equipamento mais barato logo a seguir à salamandra. Esta, aparece desde os 2 anos de utilização como sendo o equipamento mais barato. Mesmo após 10 anos, entre os dois equipamentos mais baratos à partida, a salamandra a *pellets* e o ar condicionado, a salamandra continua a ser a opção financeiramente mais vantajosa. Esta vantagem deve-se à disparidade do custo de aquisição e instalação entre os equipamentos onde o equipamento de queima de *pellets* tem menor custo.

O processo de queima dos *pellets* para aquecimento doméstico difere ligeiramente em relação à combustão de lenha. Nestes sistemas a *pellets* a eficiência da queima é suportada pela presença de eletrónica de controlo embbebida que garante o início, a continuidade da queima e a potência final regulada em calor, pretendida pelo utilizador.

Com vasto conhecimento de mercado, a empresa MVM – Metalomecânica Vítor Monteiro, Lda, produz e comercializa sistemas de aquecimento a lenha e *pellets* - caldeiras, salamandras, bailarinas e recuperadores de calor - mas necessita de importar toda a eletrónica de controlo associada. Esta necessidade deu origem ao desafio lançado pela empresa: ser desenvolvido um controlador de origem nacional, com um custo competitivo.

1.2. Objetivos

Aceite o desafio, o objetivo deste projeto foi desenvolver um controlador de queima de *pellets* com um custo competitivo relativamente a outras opções existentes, partindo de uma análise do sistema de queima e de um estudo de mercado para avaliar quais as melhores opções e características que este deverá contemplar, não descurando a possibilidade de, no futuro, acrescentar funcionalidades com relativa facilidade.

O desenvolvimento efetuado engloba a componente de controlo – *firmware* –, *hardware* e ensaios num equipamento comercializado pela MVM.

1.3. Estrutura do trabalho

Este relatório é composto por 5 secções que distinguem as várias etapas de estudo, pesquisa e desenvolvimento do trabalho.

A secção 1 consiste numa introdução ao tema do desenvolvimento do projeto, a sua motivação e objetivos.

Na secção 2 é feita uma apresentação do estudo efetuado acerca dos sistemas de queima de biomassa, aprofundado para o caso concreto deste trabalho que são os sistemas

de queima de *pellets*. É também feita uma descrição de várias opções de controlo existentes no mercado e finaliza-se com a ideia do controlador a ser realizado.

A comparação e análise de plataformas de controlo que melhor se adequam à realização deste projeto é feita na secção 3.

O desenvolvimento de todo o *hardware* e *firmware* do controlador bem como dos testes efetuados é explicado ao longo da secção 4, onde também é feita uma análise aos custos de produção do controlador.

Por fim, na secção 5, são apresentadas conclusões relativas ao trabalho desenvolvido e algumas ideias de desenvolvimento futuro.

2. Sistemas de queima de biomassa

2.1. Biomassa

A energia proveniente da biomassa é uma das formas de energia utilizada há mais tempo pelo Homem, tanto para a produção de calor como para o aquecimento de alimentos, pela sua abundância e facilidade de aproveitamento. Cerca de 80% da oferta mundial de energias renováveis deriva do aproveitamento de biomassa [7].

Definida pela Diretiva Europeia 2009/28/CE de 23 de abril, a biomassa é “*a fração biodegradável de produtos, resíduos e detritos de origem biológica provenientes da agricultura (incluindo substâncias de origem vegetal e animal), da exploração florestal e de indústrias afins, incluindo da pesca e da aquicultura, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos*” [8].

Atualmente, através de várias tecnologias de conversão, é possível obter da biomassa biocombustíveis sólidos, líquidos e gasosos, capazes de gerar energia térmica, energia mecânica e energia elétrica. A Tabela 2 mostra diferentes utilidades dos tipos de biocombustíveis existentes.

Tabela 2 - Utilidade e categoria dos diferentes tipos de biocombustíveis [7].

Tipo de biocombustível	Categoria	Utilidade
Sólido	Lenha, carvão vegetal, resíduos florestais e agrícolas, fração orgânica do lixo, restos de madeira	Queima em lareiras, fogões, braseiros (para geração de calor), queima industrial (para geração de vapor e eletricidade)
Líquido	Biodiesel, etanol, metanol	Combustível para automóveis
Gasoso	Biogás	Queima (para geração de calor e eletricidade)

A energia térmica gerada a partir da biomassa florestal traz importantes benefícios sociais, económicos e ambientais. Na União Europeia, em 2012, o consumo de biomassa para a produção de calor representou 74,7Mtep. Em Portugal, a lenha é a fonte de energia mais utilizada no sector do aquecimento ambiente e com menor custo unitário. É utilizada

em 54,7% dos alojamentos que utilizam caldeiras a biomassa para aquecimento de águas sanitárias [9].

- **Lenha**

A biomassa lenhosa é vulgarmente conhecida como lenha. Inicia o seu processo de combustão a cerca de 200°C, temperatura à qual se começa a decompor em gases e carvão. Durante a decomposição parte dos gases são queimados, chegando a atingir temperaturas de 700°C, altura em que é necessária uma grande quantidade de ar para manter a combustão. Seguidamente inicia-se a última fase do processo de combustão, a queima do carvão, onde a quantidade de ar necessária à combustão diminui bastante.

- ***Pellets***

Os *pellets*, apresentados na Figura 3, são considerados biomassa pois são pequenos aglomerados cilíndricos constituídos apenas por biomassa florestal, devidamente triturada e seca. Ao contrário da lenha que é normalmente tratada como biomassa lenhosa, os *pellets* não têm qualquer designação específica. São uma fonte de energia renovável produzida a partir da limpeza das florestas e desperdícios da indústria da madeira, e devido à produção nacional existente, tal como referido anteriormente, é garantida a estabilidade dos preços.



Figura 3 - Pellets [10].

Os *pellets* têm já alguma relevância no panorama térmico e até elétrico, nacional e europeu, apresentando-se a produção destas energias como uma alternativa económica e

energeticamente eficiente. São produzidos para os segmentos de mercados industrial, comercial e residencial.

Devido ao tratamento na sua transformação a humidade é muito reduzida - abaixo de 1% - permitindo assim que a combustão seja muito mais eficiente e liberte menos fumo que a lenha, garantindo um elevado poder calorífico. O Poder Calorífico Inferior (PCI), que quantifica a energia realmente disponível por unidade de massa em forma de calor, após evaporação da água, é de 14,4MJ/kg na lenha. Nos *pellets*, o PCI é de 18,0MJ/kg, o que corresponde a 5 kWh/kg [2].

O elevado rendimento dos aparelhos de combustão de *pellets* em conjunto com seu poder calorífico fazem deles uma solução muito atrativa. Em termos concretos, numa rápida análise é possível verificar que além da vantagem financeira na aquisição de um aparelho de combustão deste tipo de biomassa, demonstrada na secção 1.1, o preço por unidade de energia, kWh, também é bastante competitivo. A Tabela 3 mostra um resumo dos preços, rendimento e poder calorífico inferior de vários tipos de combustíveis para aquecimento.

Tabela 3 - Comparação do preço e rendimento entre os vários combustíveis para aquecimento [11].

	Preço	Rendimento	PCI
Lenha	0,13 €/kg	70%	14,4 MJ/kg
Pellets	0,22 €/kg	85%	18,0 MJ/kg
Eletricidade - bomba de calor	0,171 €/kWh	2,5 COP*	-
Gás natural	0,081 €/kWh	85%	-
Gasóleo	1,35 €/L	85%	42,9 MJ/kg
Eletricidade	0,171 €/kWh	100%	-
Gás propano	2,172 €/kg	85%	46,3 MJ/kg

*COP: Coeficiente de Performance.

Os dados da tabela anterior permitem-nos avaliar o custo por kWh térmico, que se traduz diretamente no custo do aquecimento. A Figura 4, mostra uma análise comparativa do custo do kWh térmico para aquecimento [12].

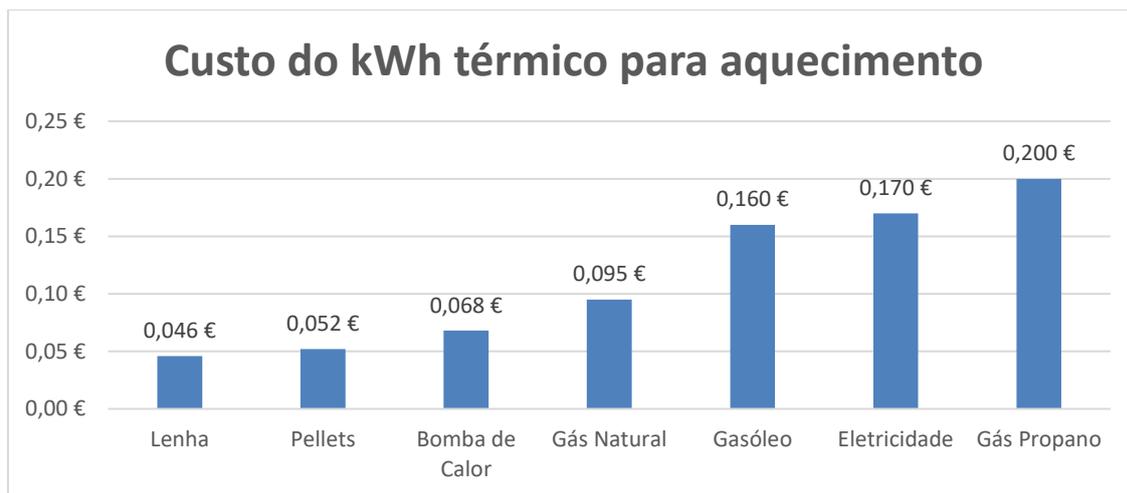


Figura 4 - Comparativo do custo do kWh térmico para aquecimento.

Os *pellets* aparecem numa posição bastante competitiva quando comparados com o combustível de custo mais diminuto, a lenha, onde a diferença não ultrapassa os 0,006€ por kWh. Se é verdade que esta pequena diferença económica pode ser decisiva para algumas pessoas, também é verdade que o facto de terem armazenamento e transporte facilitado por serem vendidos em sacos em qualquer grande superfície comercial tem muita importância, especialmente se o destino for aquecer um apartamento, onde regra geral o espaço de armazenamento é reduzido. Um equipamento de queima deste tipo de biomassa oferece também habitualmente uma autonomia superior a 25h.

Outra vantagem é o facto de ser o combustível sólido mais limpo, onde a emissão de compostos químicos como óxidos de nitrogénio (NOx) ou compostos orgânicos voláteis é muito reduzida, o que torna os *pellets* uma das formas de aquecimento menos poluentes disponíveis no mercado [13].

Em 2011, foram introduzidas novas normas Europeias no sistema de certificação para biocombustíveis sólidos. Entre elas está a norma onde se incluem os *pellets* de madeira, EN 14961-2, que veio substituir as normas nacionais. Esta norma inclui duas classes de qualidade, A1 e A2. Os produtos de qualidade A1 produzem menor quantidade de cinza e são usados normalmente em condições domésticas enquanto os produtos de qualidade A2 produzem mais cinza e são utilizados em aplicações industriais [14]. Os critérios para qualificação dos *pellets* incluem a sua densidade, tamanho, comportamento de fusão das

cinzas e temperatura de amolecimento da cinza. A Tabela 4 mostra as diferenças dos principais critérios para a classificação de qualidade A1 ou A2, segundo a norma.

Tabela 4 - Critérios de certificação de qualidade de pellets.

	A1	A2
Comprimento (mm)	≤40	≤40
Finos (% , massa)	≤1	≤1
Teor de Cinza (% , massa)	≤0,7	≤1,5
Temp. fusão de cinza (°C)	≥1200	≥1100

Relativamente ao comprimento, está estipulado que 1% do total dos *pellets* pode ser maior do que 40mm desde que não exceda os 45mm de comprimento. O teor de cinza é analisado a 550°C e a determinação da sua temperatura de fusão é feita a 815°C [15]. Do ponto de vista do controlo, é indiferente a qualidade dos *pellets* utilizados. No entanto, para uso doméstico é preferível utilizar *pellets* de qualidade superior uma vez que quanto mais elevada for a qualidade do combustível, menos quantidade de cinza é produzida.

2.2. Sistemas de aquecimento a Biomassa

2.2.1. Aquecimento a lenha

- **Lareira aberta**

Uma lareira aberta, representada na Figura 5, é a forma mais antiga de obter energia térmica a partir da biomassa no sector residencial. Numa lareira aberta não há controlo sobre a combustão a não ser através da quantidade de lenha nela colocada.



Figura 5 - Lareira aberta encastrada [16].

Constituída por uma câmara de combustão, normalmente em tijolo refratário, diretamente ligada à chaminé, a lareira aberta clássica está normalmente encastrada numa parede. É extremamente ineficiente além de ser nociva para a saúde pois a queima da lenha consome o ar existente e liberta poluentes atmosféricos para o ar interior.

As lareiras abertas mais recentes podem estar em qualquer espaço que tenha uma chaminé vertical, como ilustra a Figura 6.



Figura 6 - Lareira aberta no centro de uma divisão [17].

A sua eficiência não excede os 10% pois o calor resultante é apenas o irradiado pelo fogo e pelos tijolos refratários. Tudo o resto é perdido pela chaminé e quanto mais “fuma” a

lareira, mais depressa sobe por ela o calor que é suposto ser aproveitado, criando uma corrente de ar frio que entra na câmara de combustão, é aquecido e sobe pela chaminé.

Neste tipo de sistema apenas se conseguem aquecer as zonas mais próximas. Uma lareira normal precisa de 80 a 300m³/h de ar para a queima de lenha, o que corresponde a renovar o ar de uma divisão várias vezes por hora. A renovação é feita pelo ar frio que entra pelas frestas das portas e janelas um pouco por toda a habitação, arrefecendo-a. Se não houver renovação de ar da divisão em que se encontra, a lareira põe em perigo a saúde dos utilizadores uma vez que devido à queima liberta monóxido de carbono, gás altamente tóxico e cuja inalação é mortal.

Segundo um estudo apresentado pela Universidade de Aveiro, a combustão de lareiras é responsável por cerca de 20% das emissões de partículas para a atmosfera devido à combustão residencial, causas de, por exemplo, problemas respiratórios [18].

Face à evolução tecnológica, este tipo de sistema para aquecimento tornou-se completamente obsoleto, motivo pelo qual só as lareiras mais antigas resistem e dessas muitas não são utilizadas.

- **Recuperador de calor**

Uma evolução da ineficiente e clássica lareira é o recuperador de calor. Um recuperador de calor é um equipamento que se pode instalar numa lareira, uma vez que uma lareira é, por definição, um espaço vazio que serve o propósito da queima de lenha. Com um recuperador, segundo informações dadas por alguns fabricantes [19], o calor produzido é aproveitado até 70% enquanto o consumo de lenha diminui até 4 vezes [20], o que representa uma grande melhoria da eficiência relativamente à lareira. O sistema de recuperação de calor consiste na circulação do ar ambiente num circuito fechado impedindo que este se misture com o ar da câmara de combustão e escape pela chaminé. Tem ainda a vantagem de ser possível canalizar parte deste ar quente para outras divisões do edifício. A Figura 7 representa o esquema de fluxos de ar de um recuperador de calor.



Figura 7 - Esquema de fluxos de ar de um recuperador de calor [21].

Neste tipo de equipamento, o ar aquecido circula através de uma câmara de aquecimento, normalmente em chapa de aço soldada ou ferro fundido, totalmente estanque, sem qualquer comunicação com o compartimento dos fumos. São fabricados com uma porta de vidro cerâmico de modo a difundir o calor, fechar o equipamento e aumentar o rendimento da combustão, tornando-a mais limpa devido ao decréscimo da libertação de poluentes para o local que está a ser aquecido, como o monóxido de carbono. Por estar totalmente fechado, deixa de haver inconvenientes como o risco de contacto direto com o fogo, a crepitação, cinzas e fumo.

Um recuperador de calor tem duas correntes de ar: uma para a queima e uma do aquecimento ao ar. O ar da câmara de combustão resultante da queima de lenha, ao aquecer, sobe e sai diretamente pela chaminé. Este ar é normalmente renovado através de uma entrada de ar exterior - no exterior da casa ou situada noutra divisão - à divisão em que o aparelho se encontra, criando um fluxo de ar. Aquando da instalação destes equipamentos em lareiras já existentes, onde não existe outro local para a entrada de ar, a renovação de ar da câmara de combustão pode ser feita através do ar da própria divisão, como no caso apresentado na Figura 7. A entrada de ar para a câmara de combustão é controlada manualmente através de uma pequena porta localizada na frente do recuperador. Ao controlar a entrada de ar, conseguimos controlar a queima da lenha e, por consequência, o calor gerado.

O aquecimento da divisão é feito ou pela convecção natural ou por circulação forçada. O recuperador de calor é dotado de uma entrada de ar na parte inferior, por onde o

ar frio entra para a câmara de aquecimento e uma saída de ar na zona superior, por onde sai o ar já aquecido pelas paredes da câmara. Esta corrente de ar pode ser totalmente natural através do processo de convecção ou pode ser forçada, com a presença de ventiladores. Ao forçar o ar a circular, as paredes da câmara de aquecimento arrefecem. Ao arrefecerem, mais calor vão retirar à queima, logo menos calor será perdido pela chaminé, aumentando ainda mais o rendimento. Este processo está ilustrado na Figura 8.

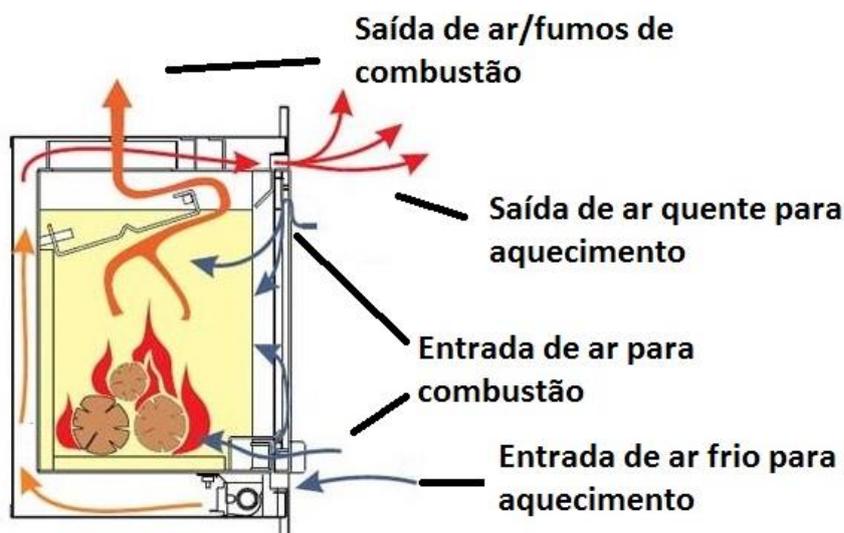


Figura 8 - Corte lateral de um sistema recuperador de calor ventilado [22].

Os sistemas que extraem o ar da câmara de aquecimento trabalham em depressão – exaustores - enquanto que trabalham em pressão - insufladores - os sistemas cujo ar é insuflado. Se trabalhar em pressão o sistema necessita de um cárter, também conhecido como carenagem, que serve como caixa de ar. O tamanho e potência dos ventiladores exaustores ou insufladores devem ser adequados à área de ferro exposto ao fogo [23].

Não faz sentido, nos sistemas com ventilador, a circulação do ar ser forçada imediatamente quando a queima começa pois iria atrasar o aquecimento das paredes da câmara. O mesmo sucede quando se pretende extinguir a chama, situação onde se pretende aproveitar o calor remanescente. Para este efeito, usa-se um sistema eletrónico ou eletromecânico simples com um termóstato que faz acionar o ventilador. Este termóstato é regulado manualmente pelo utilizador para permitir definir a temperatura a partir da qual se pretende que o ventilador ligue e desligue.

Existem ainda recuperadores de calor que além de aquecerem o ar ambiente, conseguem distribuir o calor pela casa através fluidos térmicos. Estes recuperadores podem funcionar de forma autónoma ou interligados com outros sistemas de aquecimento central - geotérmico, aerotérmico ou solar. O fluido aquecido circula por radiadores ou piso radiante para dissipar o calor para as outras divisões da habitação. O aquecimento de águas sanitárias também pode ser feito, com este sistema, de modo independente ou interligado com sistemas de painéis solares, p. ex. como mostra a Figura 9.

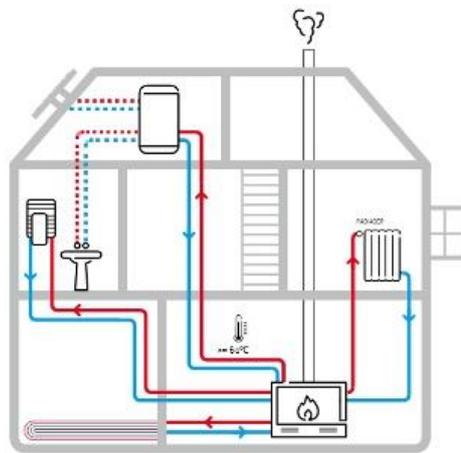


Figura 9 - Sistema de recuperador de calor interligado com águas sanitárias [24].

- **Salamandra**

As salamandras são equipamentos completamente fechados, ideais para aquecer espaços mais pequenos ou para instalar em sítios onde não existe chaminé vertical. Quando comparados aos recuperadores de calor, são equipamentos mais baratos e podem ser instalados em qualquer divisão sem necessidade de encaixe numa parede.

Os modelos mais antigos não eram nada mais do que uma lareira fechada, sem qualquer tecnologia ou controlo, como mostra a Figura 10. Atualmente, as salamandras conseguem ter todas as características e opções de um recuperador de calor com um rendimento muito semelhante.



Figura 10 - Salamandra típica, com aquecimento por irradiação [25].

Construídas em aço ou em ferro fundido, as salamandras mais antigas aquecem o ar ambiente apenas por irradiação, onde todo o corpo do equipamento é aquecido pelo calor da combustão. O rendimento destes equipamentos varia entre os 50 e os 70%.

Atualmente existem salamandras com a particularidade de recuperar o gás libertado quando as achas - bocados de lenha - são consumidas e utilizá-lo como combustível, chamadas salamandras com dupla combustão. Conseguem rendimentos muito elevados, à volta de 80%, tendo duas chamas diferentes na fornalha - a chama relacionada com as achas e a chama relacionada com a recuperação do gás. Uma vez que 75% do poder energético da madeira provém do gás que contém, este aproveitamento faz da salamandra de dupla combustão um aparelho muito ecológico e eficiente.

Outro tipo de salamandra, conhecida como salamandra de massa, armazena o calor produzido pela combustão da madeira e restitui-o ao longo do dia. São fabricadas à base de materiais como a faiança, tijolo refratário, rochas vulcânicas ou pedra. Por terem capacidade de acumular calor, conseguem atingir rendimentos de entre 70% e os 85%. Segundo informações de uma cadeia revendedora, a autonomia destes aparelhos pode chegar a 20h, sendo necessário carregar a salamandra ao longo do dia [26].

Também as salamandras possibilitam a recuperação de calor, tendo a possibilidade de distribuir parte dele por várias divisões de uma habitação, como acontece com os recuperadores. O corte lateral de uma salamandra com recuperação de calor é ilustrado na Figura 11, onde é possível identificar as zonas de entrada e saída de ar, bem como a zona onde ocorre o seu aquecimento.

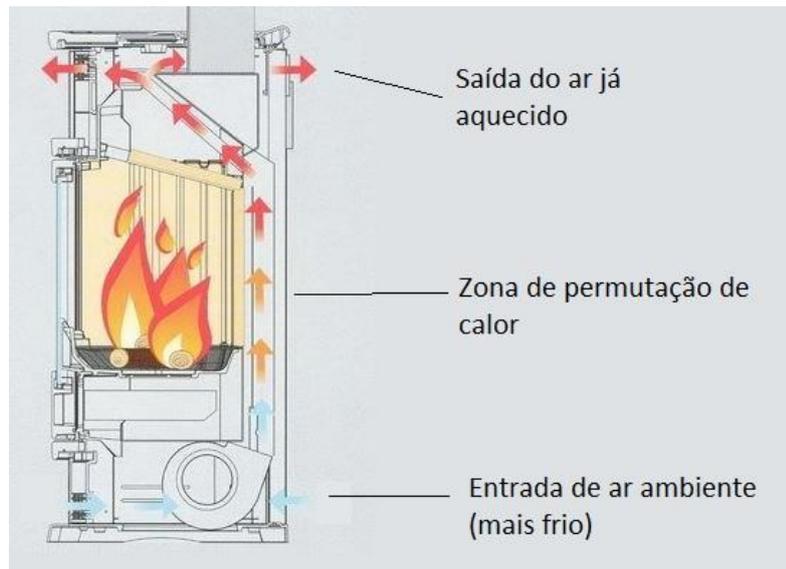


Figura 11 - Corte lateral de uma salamandra com recuperação de calor [23].

Ao compararmos os equipamentos representados na Figura 8 e na Figura 11, podemos observar que não existem diferenças entre uma salamandra e um recuperador de calor em termos de processo.

Alguns fabricantes têm modelos em que o fumo passa duas vezes na câmara de combustão de modo a aumentar o poder de recuperação do aparelho, melhorando assim a sua eficiência.

Existem também modelos de salamandra com forno. Isto significa que podem ser - e normalmente são - instaladas numa cozinha, permitindo utilizar o forno para cozinhar alimentos enquanto aquecem a divisão.

- **Caldeira**

Uma caldeira tem um método de aquecimento de ambiente diferente dos sistemas anteriormente mencionados. Em vez de aquecer o ar, a caldeira aquece exclusivamente um fluido térmico que deve respeitar uma série de requisitos como ter uma boa estabilidade térmica, não atacar quimicamente o material onde circula, ter um baixo ponto de congelação, baixa pressão de vapor e viscosidade, alta condutibilidade térmica, não ser tóxico nem ter

odor forte, etc. Os fluidos mais utilizados para este fim são a água, o vapor ou o óleo térmico. A escolha depende da temperatura de funcionamento, pressão e potência exigidas, estabilidade e capacidade térmica, viscosidade, boa compatibilidade com metais e ligas, entre outras.

O calor da combustão, numa caldeira, é utilizado para aquecer serpentinas metálicas a altas temperaturas. Uma bomba hidráulica força a circulação do fluido térmico por essas serpentinas, aquecendo-o. Um esquema de uma caldeira, em corte lateral, pode ser observado na Figura 12.

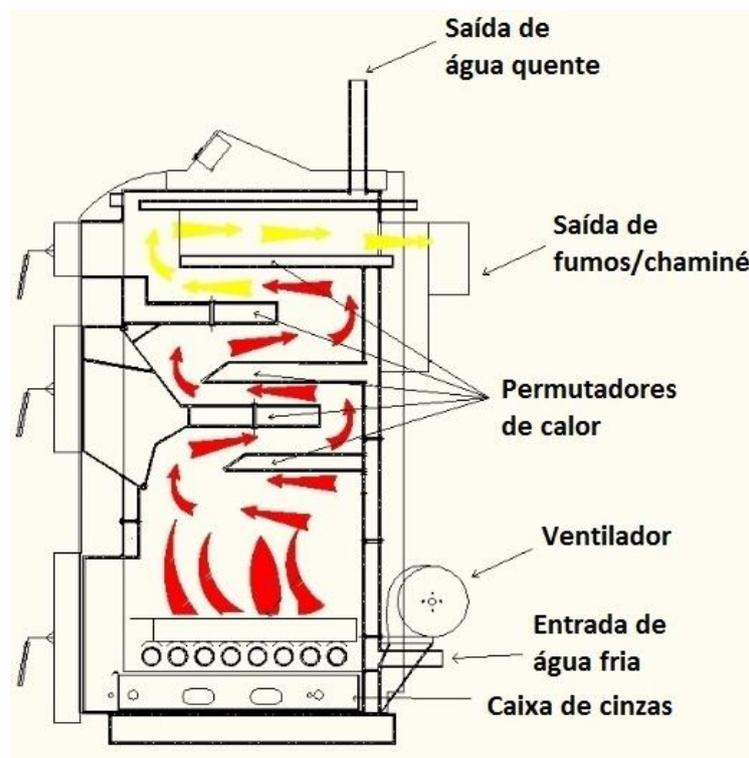


Figura 12 - Corte lateral de esquema de uma caldeira [27].

As divisões da habitação são aquecidas pela circulação do fluido térmico pelos sistemas radiadores existentes, que podem incluir radiadores de parede como na Figura 13, piso radiante ou transferir o calor para um sistema de aquecimento e armazenamento de águas sanitárias.

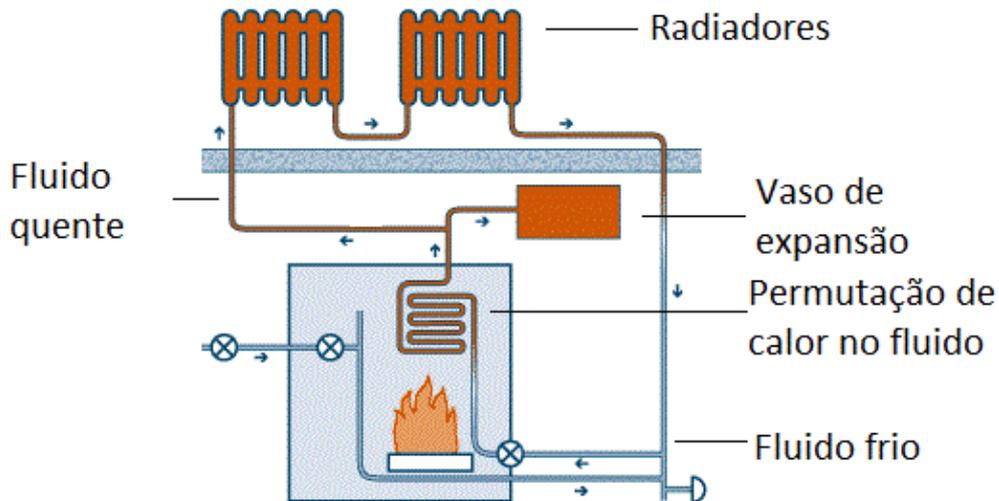


Figura 13 - Esquema de um sistema de aquecimento doméstico a caldeira [28].

2.2.2. Aquecimento a *pellets*

À exceção da lareira aberta, todos os sistemas anteriormente descritos têm uma versão cujo combustível são *pellets*, em vez da lenha.

O aquecimento a *pellets* tem atraído cada vez mais consumidores. A Figura 14 mostra a evolução do mercado nacional de *pellets*.

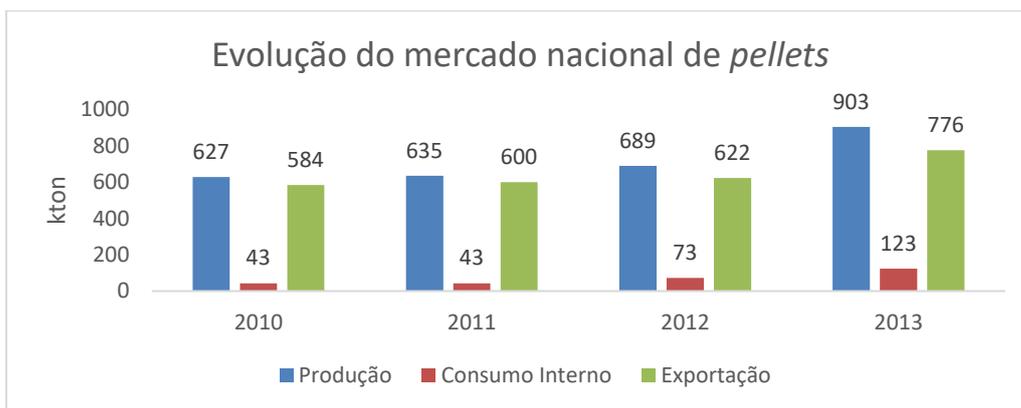


Figura 14 - Evolução do mercado nacional de *pellets* [9].

Entre 2010 e 2013 verificou-se uma subida considerável na produção e na exportação de *pellets*. No entanto, é no consumo interno que a subida é mais acentuada: em três anos quase triplicou, passando de 43 kton para 123 kton. Em 2014 houve um aumento de produção para 1Mton e o consumo interno atingiu 200kton dos quais 60% representam o consumo no sector doméstico [9]. Estes dados revelam que os consumidores estão a apostar nos sistemas de queima de *pellets*.

Na Figura 15 podemos visualizar o esquema típico de uma salamandra a *pellets*.

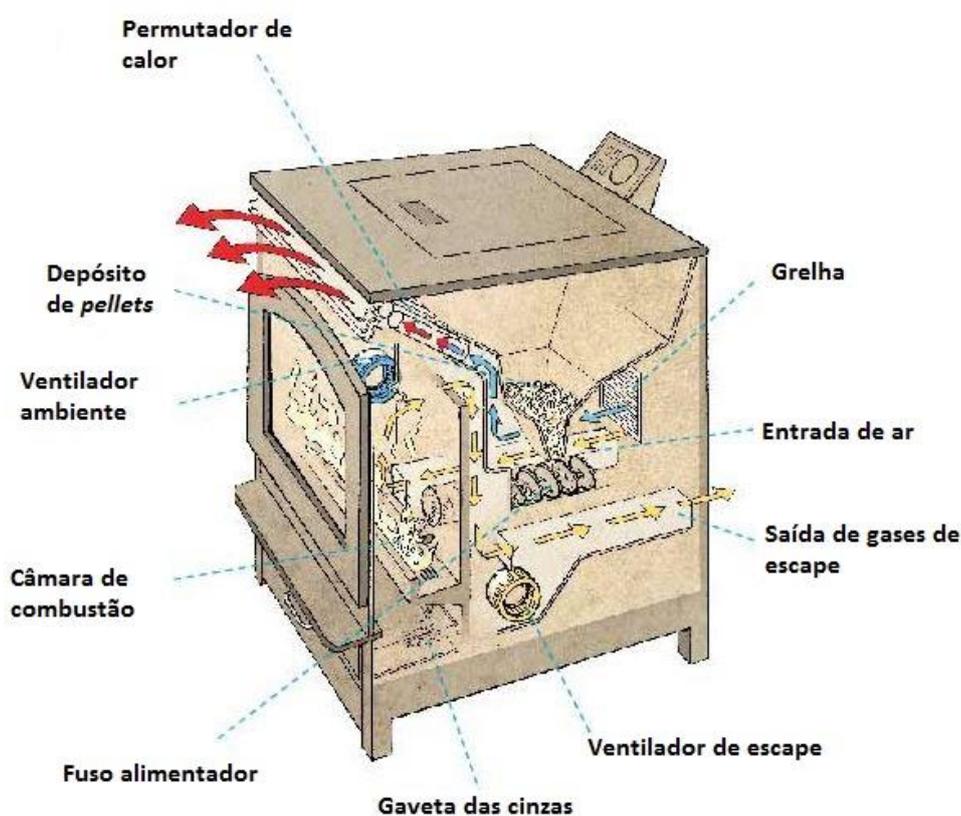


Figura 15 - Corte lateral de uma salamandra a pellets [29].

Os *pellets* são armazenados num depósito, normalmente situado acima de um fuso sem-fim. A gravidade faz os *pellets* caírem para o fuso que, ao rodar, os transporta para a câmara de combustão. Além de transportados, são também comprimidos na câmara. Este transporte e compressão são acionados por um motor que faz rodar o fuso. Quando a câmara de combustão está devidamente carregada, a ignição é feita através de uma resistência elétrica, incandescente, que se desliga quando se inicia a combustão. A partir deste momento,

são a rotação do ventilador que controla a entrada de ar e a velocidade do fuso de transporte que controlam a combustão. No caso da Figura 15, o ventilador que controla a admissão de ar é o ventilador de escape, algo que é comum a vários modelos de salamandra a *pellets*.

Numa salamandra a *pellets* o aquecimento do ambiente é feito através de radiação e convecção do ar. Quando o ar aquece, sobe, pois torna-se mais leve e menos denso, passando pelo permutador de calor. A entrada e saída de ar na salamandra são feitas através de circulação forçada. A saída de ar da salamandra faz-se através da passagem do ar pelo permutador - aquecido pelo ar da câmara de combustão-, aquecendo assim o espaço onde o aparelho está instalado. Os gases da câmara de combustão são renovados a partir de uma entrada de ar existente, fluindo por um circuito de escape. A queima é controlada pela regulação da quantidade de *pellets* e do ar renovado que necessitam de entrar na câmara de combustão, quantidade esta que é proporcional à energia térmica gerada.

Entre uma salamandra e um recuperador de calor a *pellets*, como o da Figura 16, não há diferenças no processo de queima. Tal como nas versões a lenha, são equipamentos que se distinguem essencialmente pela colocação, já que o recuperador necessita de ser encastrado numa parede.



Figura 16 - Exemplo de recuperador de calor a *pellets* [30].

As versões a *pellets* de recuperadores e de salamandras também permitem aproveitar o calor gerado para o aquecimento de águas sanitárias, adicionando um circuito de água que passa dentro de uma estrutura, normalmente tubular, ligada a uma parede da câmara de

combustão. O corte lateral de uma salamandra com aquecimento de águas sanitárias pode ser visto na Figura 17.

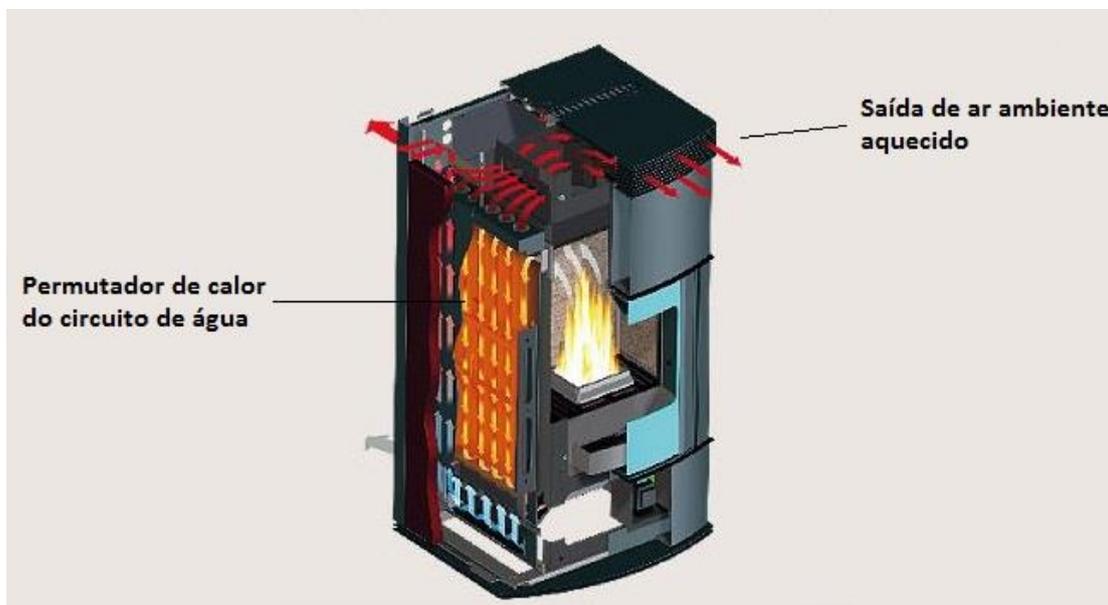


Figura 17 - Salamandras com aquecimento de águas sanitárias [31].

As caldeiras também têm uma versão a *pellets*. Tal como nas versões a lenha, neste equipamento é utilizado um fluido para propagar energia térmica produzida pelo edifício.

2.3. Controlo da queima de *pellets*

Em todos os sistemas de queima de *pellets* está presente um controlador eletrónico. Este controlador consegue oferecer um leque de opções que proporcionam maior conforto e comodidade ao utilizador enquanto otimizam a eficiência e o desempenho e asseguram a monitorização da segurança do equipamento. A Figura 18, mostra um exemplo de um controlador existente no mercado.



Figura 18 - Controlador de queima de pellets da marca FUMIS ALPHA [32].

O transporte e compactação dos *pellets*, feito através do fuso sem-fim, é acionado através de um motor. Uma volta do fuso vai corresponder a um determinado número de *pellets* que caem na câmara de combustão. A quantidade de *pellets* que cai por unidade de tempo está diretamente relacionada com a potência térmica que pretendemos obter, motivo pelo qual o controlador tem que saber quando o fuso dá uma volta completa – caso o motor tenha um *encoder* - ou quanto tempo está a rodar.

Para iniciar a queima dos *pellets* é utilizada uma resistência elétrica, normalmente em cerâmica, que aquece até atingir temperaturas de cerca de 600°C. Esta resistência, igual à da Figura 19, está ligada apenas até que haja combustão, sendo desligada assim que é detetado o fogo.

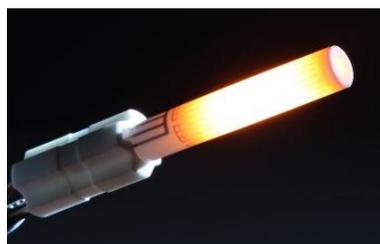


Figura 19 - Resistência incandescente de modo a iniciar a combustão dos pellets [33].

Para que a combustão seja detetada, existe um sensor de temperatura localizado na conduta de fumos. Quando a temperatura dos fumos ultrapassa os 50°C, significa que existe fogo na câmara de combustão. Nesse momento a resistência é desligada e só volta a ser ligada num reinício do processo de acendimento.

No caso de uma salamandra há, dependendo do modelo, dois ou três ventiladores que precisam de ser controlados: o ventilador de entrada de ar, o ventilador de saída e o ventilador de escape. O ventilador de escape extrai os fumos e o ar da câmara de combustão e deve funcionar a partir do momento em que se pretende dar início à queima. O ventilador de saída, força o ar a sair da salamandra, aquecido pela passagem pelo permutador, para o local onde o equipamento se encontra. Nos modelos mais recentes raramente o ventilador de entrada é utilizado. Quando é, força a entrada de ar para a câmara de combustão e pode também forçar a passagem pelo permutador de calor, dependendo do modelo do equipamento. Quando não existe, é o ventilador de escape que força a entrada de ar na câmara de combustão.

A velocidade do ventilador responsável pela admissão de ar na câmara de combustão está diretamente ligada, na programação de controlo, à velocidade de alimentação dos *pellets*. O fluxo de ar depende do nível de potência desejada. A Figura 20 ilustra o esquema de ligações entre um controlador e os elementos que constituem a salamandra a *pellets*.

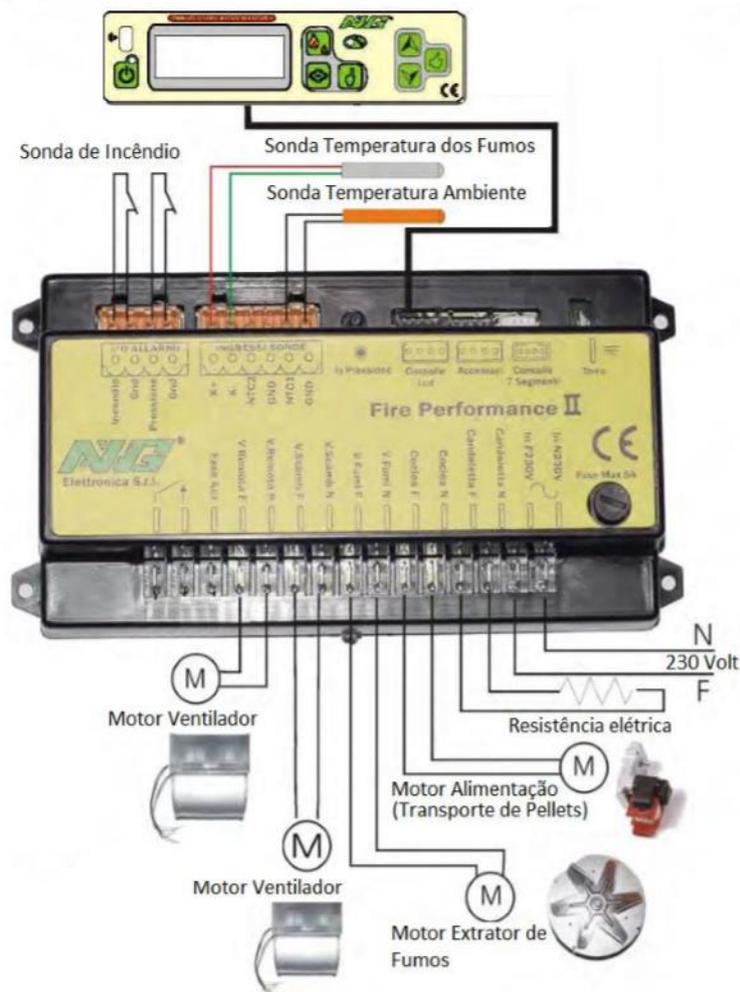


Figura 20 - Esquema elétrico de um controlador de queima de pellets [34].

Numa caldeira o processo varia ligeiramente. Continua a existir o ventilador de escape, mas dado o modo de permutação de calor utilizado deixa de haver ventilador de saída, substituído por uma bomba hidráulica que força a circulação do fluido. O ventilador de escape força também a admissão do ar que alimenta a combustão dos *pellets*. A Figura 21 ilustra um esquema típico de uma caldeira a *pellets*.

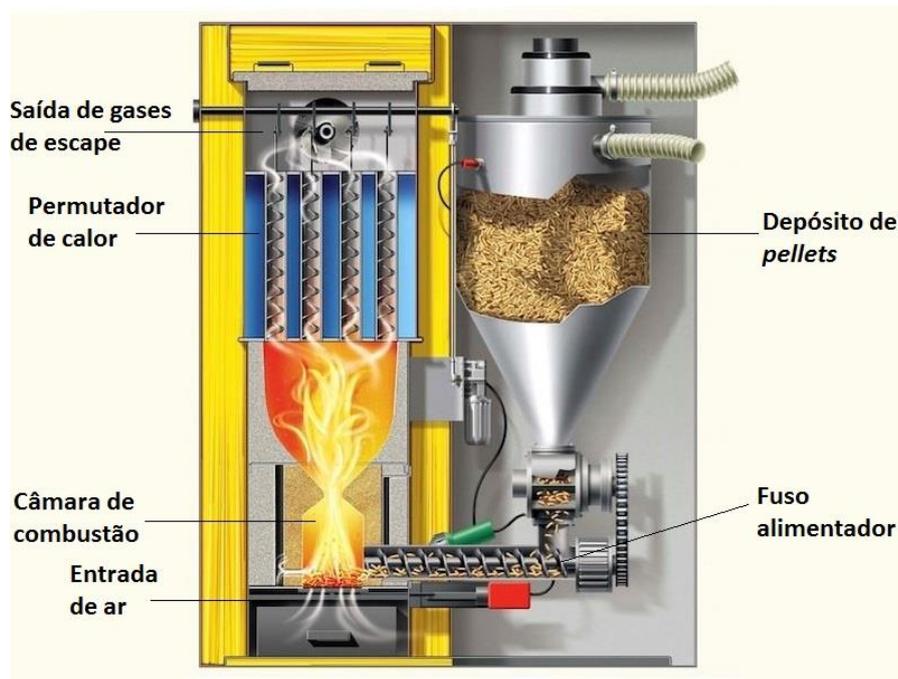


Figura 21 - Corte lateral de uma caldeira a pellets [35].

Todo este controlo eletrónico permite ao utilizador não só definir a potência de aquecimento que pretende que seja produzida, mas também, no caso das salamandras e recuperadores de calor, a temperatura ambiente que pretende. A existência de um sensor de temperatura ambiente, ligado ao controlador, permite que seja feita a gestão da potência térmica do equipamento de modo a que o local onde está instalada atinja e mantenha a temperatura desejada.

No caso da caldeira, por ser um sistema de aquecimento central, a temperatura a controlar é a temperatura do fluido, necessitando depois que o utilizador controle o calor dissipado individualmente nos radiadores ou pavimento radiante, caso pretenda regular a temperatura em espaços distintos. O controlador não consegue controlar cada dissipador térmico individualmente, mas pode ser definido um nível de potência que serve toda a habitação.

Por ser necessário garantir a segurança do equipamento e das pessoas, a temperatura de fumos da conduta de exaustão está constantemente a ser monitorizada por forma a alertar caso haja alguma anomalia. Quando através do sensor se detetam temperaturas na ordem dos 230°C, é emitido um aviso que de imediato deve cortar a alimentação de modo a extinguir o fogo o mais rápido possível até que haja intervenção do utilizador.

Dependendo do modelo, há também sensores de obstrução nas grelhas de ventilação de entrada, saída ou extração de fumos. Em caso de erro, o controlador cessa o processo de queima até que o problema seja resolvido de modo a permitir a correta circulação do ar.

Toda a eletrónica adjacente ao controlo permite que um sistema de aquecimento a *pellets*, nomeadamente as salamandras e recuperadores de calor, arranquem automaticamente e poupem bastante combustível, podendo atingir, como referido anteriormente, autonomias de 25 horas dependendo da capacidade do depósito.

Apesar das diferenças entre as salamandras, recuperadores e caldeiras, o processo de controlo e queima de *pellets* é sempre muito semelhante. Por isso, um controlador pode ser desenvolvido para ser aplicado a qualquer um destes sistemas.

2.3.1. Controlador

Neste projeto, o objetivo é desenvolver um controlador genérico de custo reduzido, aplicado numa salamandra e que não comprometa a sua adaptação a outro tipo de aparelho. Com essa premissa, seguidamente é apresentado o levantamento de algumas opções de controlo existentes no mercado, nomeadamente no que diz respeito à interface e comunicação dos controladores de sistemas a *pellets*.

O equipamento eletrónico que serve de controlo à queima dos *pellets* tem que ser capaz de atuar sobre o motor de alimentação de *pellets*, os ventiladores e a resistência de ignição em momentos de funcionamento distintos: início da queima, gestão de potência de queima e término do processo. Simultaneamente, deve monitorizar todos os sensores existentes pois servem de ponto de referência (p. ex.: início de ignição, temperatura pretendida) ou de sinal de erro (p. ex.: sobreaquecimento, porta aberta, etc.).

A gestão que o controlador faz da potência térmica do equipamento pode ter duas formas de referência: uma em que o utilizador define um nível de potência pré-programado e outra em que a gestão é feita em torno de um valor de temperatura ambiente escolhido pelo utilizador. O fluxograma de funcionamento de um sistema de queima de *pellets* pode ser visto na Figura 22.

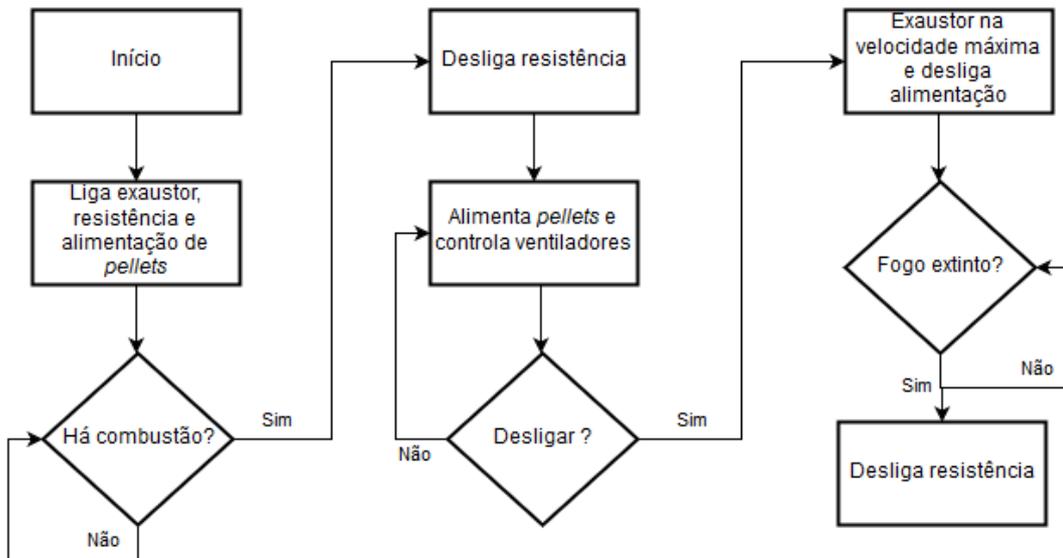


Figura 22 - Fluxograma de funcionamento de um equipamento a pellets.

Entre a gestão de potência automática, para atingir uma temperatura definida pelo utilizador e a gestão de potência para um nível previamente definido, não há diferenças no processo. Esta gestão é feita pelo número de vezes que a câmara de combustão é alimentada num determinado intervalo de tempo e variando a velocidade do ventilador que gere a admissão de ar na câmara de combustão.

Além da gestão de todo o processo, o controlador necessita ter recursos suficientes para interagir com o utilizador.

2.3.2. Interface direta

Utilizar um microcontrolador num equipamento de aquecimento doméstico, além de ter as vantagens no controlo do processo enunciadas anteriormente, também permite aumentar substancialmente o conforto do utilizador através da compatibilidade com várias formas de comunicação e interação.

De suma importância, a interface é o elo entre o utilizador e o controlador sem a qual seria impossível a interação do utilizador com o equipamento. É ela que permite ao utilizador interagir com o equipamento e, sobretudo, são as suas características que determinam o conforto, usabilidade e acessibilidade dessa interação. Em seguida são apresentadas as

interfaces mais comuns dos controladores de queima de *pellets* existentes no mercado, juntamente com uma breve análise a cada uma delas.

- **Painel de botões**

Uma forma simples de interagir com um controlador é através de um painel com botões como o da Figura 23 ou potenciômetros como o da Figura 24. É também a solução mais barata.



Figura 23 - Interface com botões para salamandra a pellets [36].

No exemplo da Figura 23, o utilizador pode alterar o nível da potência térmica da salamandra bem como variar a velocidade do ventilador de saída de ar quente. Uma série de cinco *leds* acendem de acordo com o nível de potência e velocidade escolhidos. Tem um potenciômetro que regula a velocidade do motor de alimentação e um botão de início de funcionamento.

É a maneira mais simples de utilizar uma salamandra e será também a que melhor será entendida pelo grosso da população, em especial aqueles que não estão habituados à tecnologia.



Figura 24 - Interface com potenciômetros para salamandra a pellets [37].

A interface da Figura 24 é idêntica à da figura anterior, mas esta permite também o controlo automático da temperatura ambiente da divisão.

Por serem tão simples, estes tipos de interface são bastante limitados em termos de funcionalidades. Têm vantagem no preço reduzido e na facilidade de utilização.

- **Painel com LCD**

Os painéis com um *LCD* como o da Figura 25 são o tipo de interface mais utilizado nos sistemas de aquecimento a *pellets*. Como o *display* apenas serve para leitura de informação, para a escrita no controlador é essencial outra forma de interação como uns botões de pressão. Estes painéis aliam a simplicidade de leitura de informação com a facilidade de interação e possibilidades de configuração de variadíssimas opções.



Figura 25 - Interface com LCD para salamandra a pellets [38].

Por ter um *display*, este tipo de interface permite ao utilizador ler um vasto leque de informações entre temperaturas, hora, data, informações de estado da salamandra ou detalhes acerca de erros que possam ocorrer.

Torna-se também essencial ter acesso a muita informação quando se pretendem incluir funcionalidades como a climatização num determinado horário ou mesmo gerir um calendário de funcionamento para a salamandra onde tudo é feito automaticamente pelo controlador; tendo o utilizador apenas que colocar os *pellets* na salamandra.

- **Painel de ecrã-táctil**

Alguns painéis de controlo mais recentes têm uma interface dotada de ecrã táctil como o da Figura 26. Estes painéis conseguem ter todas as vantagens dos painéis com *LCD* e evitam outro tipo de entradas de informação – botões ou potenciómetros. É uma solução mais cara do que as anteriores.



Figura 26 - Interface de ecrã-táctil para salamandra a pellets [39].

Além do preço não ser o mais adequado para a integração num controlador de custo reduzido, a facilidade de interação com ecrã-táctil ainda não é consensual, em especial dentro da população mais idosa. O ecrã necessita de ter um tamanho adequado para se tornar prático, podendo tornar-se inestético e aumentando bastante o seu custo.

2.3.3. Interface à distância

- **Painel remoto**

Alguns modelos de controlador dispõem de uma opção onde o painel não só não necessita de estar encastrado no aparelho, como também não tem um sítio fixo. É o caso do painel remoto da Figura 27.



Figura 27 - Painel remoto com botões [40].

Para ser cómodo tem que ser limitado em tamanho e, portanto, em funcionalidades. A portabilidade também está limitada a uma certa distância do equipamento e ao tempo de vida útil da bateria que utilizar. Esta solução aumenta o preço final do controlador pois é necessária comunicação sem fios para interagir com este. Esta opção pode também ser aplicada com um painel remoto de ecrã-tátil como o apresentado na Figura 28.



Figura 28 - Painel remoto de ecrã táctil [41].

As soluções apresentadas podem ser aplicadas em conjunto com outros tipos de interface, complementando-se entre si.

- **Controlo por comando remoto**

Relativamente à possibilidade de controlo remoto, existe uma opção mais simples e mais barata do que as anteriores: a integração de um comando remoto com um painel *LCD*. A Figura 29 apresenta um exemplo desta solução.



Figura 29 - Interface de LCD com um comando remoto [42].

Ao adicionar um módulo de infravermelhos ao controlador e um pequeno comando remoto, é possível controlar algumas variáveis do sistema, à distância, como a velocidade do motor ventilador ambiente, a temperatura ambiente desejada, ligar/desligar o equipamento, etc.

Em termos de custo esta solução não tem um valor elevado e pode ser uma mais-valia para alguns consumidores.

- **Módulo *Wi-Fi***

Acrescentar ao controlador um módulo de comunicação sem fios *Wi-Fi* como o representado na Figura 30 abre portas no que à comunicação e interação diz respeito.

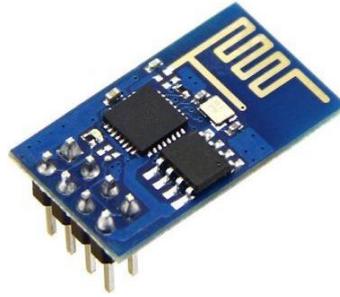


Figura 30 - Módulo Wi-Fi [43].

Um controlador com *Wi-Fi* permite, por exemplo, o acesso através de um computador, *smartphone* ou *tablet*, utilizando-os como controlo remoto dentro de casa ou em qualquer local com acesso à internet. Com este tipo de comunicação é possível configurar uma calendarização programada de aquecimento, monitorizar dados do controlador como a temperatura ambiente ou temperatura de fumos, iniciar ou terminar o processo de queima através de uma aplicação ou página *web*.

Esta solução implica o desenvolvimento de uma página *web* ou aplicação que permita comunicar e controlar o equipamento. Como nem toda a gente tem interesse numa solução de controlo à distância nem dispõe de uma ligação à internet em casa, uma implementação deste tipo deve ser vista como um método interface complementar e opcional. O preço elevado deste módulo também traz consequências a nível de preço final do produto.

- **Módulo *GPRS***

Um pouco mais barato que o módulo de *Wi-Fi*, a comunicação por *GPRS* - Figura 31 - está implementada em alguns modelos de controladores topo de gama.



Figura 31 - Módulo GSM/GPRS [44].

Semelhante ao módulo anterior, o *GPRS* permite ao utilizador enviar uma *SMS* ao controlador com comandos de controlo. É possível controlar totalmente a salamandra e ainda receber alguma informação relevante, relativa a alguma anomalia que possa ocorrer no equipamento durante a sua utilização, através do telemóvel pessoal do utilizador.

Os custos do módulo e da comunicação *GPRS* podem afastar os utilizadores desta solução, não fazendo também sentido num controlador que se pretende de baixo custo.

2.3.4. Funcionalidades

Como já foi referido, a presença de um controlador eletrónico permite uma série de funcionalidades ao equipamento. Algumas baseiam-se em programação e *hardware* adicional, outras apenas necessitam de programação. A primeira, que está sempre incluída em qualquer equipamento de queima de *pellets*, é o acendimento automático, onde o utilizador apenas carrega no botão e o processo de ignição é feito pelo controlador. Adicionalmente, os controladores podem ter implementadas:

- **Início automático da climatização:** pressupõe que o utilizador defina a temperatura mínima do local onde se situa o equipamento que determine o seu arranque. Caso se atinjam temperaturas abaixo do estipulado, a combustão inicia-se e o equipamento procede à climatização. A temperatura de limite mínimo e a temperatura de climatização devem ser previamente definidas.

- **Climatização:** a presença de um sensor de temperatura ambiente permite ao utilizador definir a temperatura que mais conforto lhe proporciona, relegando para o controlador a gestão da potência necessária para atingir e manter essa mesma temperatura. Esta funcionalidade não só traz mais conforto ao utilizador como também poupa bastante combustível, evitando situações em que a temperatura se torne desconfortável.
- **Limpeza de cinzas:** ao iniciar o funcionamento do equipamento, o ventilador de extração de fumos pode ser ligado na velocidade máxima durante uns segundos para limpar alguma cinza que esteja acumulada na câmara de combustão. Esta funcionalidade é limitada pelo *design* do equipamento.
- **Programação de funcionamento:** o controlador permite a programação do funcionamento do equipamento. Significa isto que o aparelho funciona automaticamente dentro de um intervalo horário estipulado pelo utilizador, climatizando o local onde se encontra. Esta função necessita de um circuito integrado *real time clock* para que o controlador mantenha o conhecimento da data e hora.

2.3.5. Controlador a implementar

Um controlador de queima de *pellets* pode oferecer várias funcionalidades em diferentes tipos de interface. Como descrito na presente secção, o controlo do processo mantém-se o mesmo, independentemente do tipo de interface ou funcionalidades presentes. Dada a variedade de opções e ao facto de no desenvolvimento deste projeto a programação do *firmware* não acrescentar nenhum custo, é possível desenvolver um controlador base, onde a competitividade e o baixo custo são os principais requisitos, preparado para receber mais do que um tipo de interface. A interface define o nível e gama do equipamento e isso traz novas funcionalidades; o controlo do processo de queima e tudo o que lhe é associado mantém-se. A Figura 32 representa o diagrama de blocos do controlador a desenvolver neste projeto.

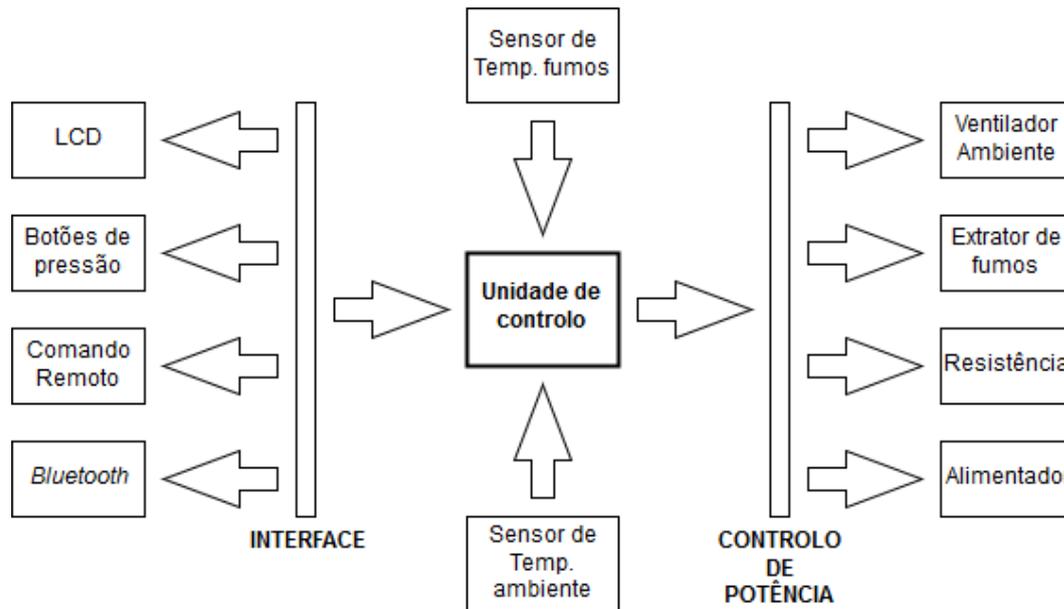


Figura 32 - Diagrama de blocos do controlador a desenvolver.

Para o desenvolvimento deste controlador, ter uma interface de fácil utilização e que fosse capaz de permitir usufruir das funcionalidades indicadas nesta secção era um dos objetivos. Em termos de *hardware*, a escolha recaiu sobre um ecrã *LCD* e 6 botões de pressão. Adicionalmente, o controlo remoto por infravermelhos e a comunicação *Bluetooth* também foram implementados como interface adicional.

A unidade de controlo também tinha que ter a capacidade de suportar o controlo básico de um equipamento de queima de *pellets*, portanto, ser capaz de adquirir informação dos sensores de temperatura e controlar os restantes elementos que constituem uma salamandra, ao mesmo tempo que permite uma expansão gradual do controlador em termos de capacidades (de comunicação, interação e monitorização) como p. ex. a comunicação por *Bluetooth* ou adição de sensores de nível de combustível.

3. Soluções de controlo

Uma vez que a programação do *firmware* desenvolvido neste projeto não acrescenta nenhum custo monetário direto, é da escolha do *hardware* que depende o preço final do controlador. Numa primeira fase pretendeu-se que o desenvolvimento fosse feito procurando a integração de soluções de *hardware* existentes no mercado tendo em vista uma poupança de tempo em desenvolvimento de *hardware*, a minoração do custo final da solução e desenvolvendo apenas o *hardware* específico necessário, mantendo-se também em consideração a fiabilidade na realização de poucas unidades e a disponibilidade de mercado.

Tendo em conta as explicações do funcionamento do sistema anteriormente referidas na secção 2.3, podemos definir os requisitos mínimos de *hardware* necessários para o início do desenvolvimento do projeto. A Tabela 5 faz um resumo do número e tipo de entradas e saídas necessárias para o desenvolvimento de um controlador, sem contabilizar a interface.

Tabela 5 - Requisitos de um controlador de queima de pellets, sem interface.

	Portos	Tipo
Motores Ventiladores	2x	Digital
Motor de alimentação	1x	Digital
Resistência	1x	Digital
Sondas de temperatura	2x	Analógico
Total	6	-

A plataforma precisa de ter disponíveis pelo menos quatro saídas digitais para os ventiladores, motor e resistência elétrica e duas entradas analógicas para as sondas de temperatura ambiente e temperatura de fumos de combustão. Isto para o controlo dos modelos básicos, pois há que ter em conta que uma salamandra, dependendo do modelo, poderá apresentar outros requisitos – monitorização de temperatura da câmara de combustão, fecho da porta de alimentação, *encoder* de motores ventiladores ou/e alimentador, etc. – que se traduzem na obrigatoriedade em ter mais entradas analógicas e/ou digitais disponíveis. Há ainda que reservar entradas e saídas digitais para a interface homem-máquina, cujo número depende do tipo de interface que for utilizado. Tal como foi apresentado nas secções 2.3.2 e 2.3.3, existem várias opções de interface que diferem no que respeita aos seus requisitos. O controlador não deve estar vinculado a apenas um tipo de interface, motivo

pelo qual a escolha da plataforma deve ter em consideração a capacidade de integrar várias opções.

Seguidamente apresenta-se uma análise de várias plataformas de controladores existentes no mercado que sejam capazes de cumprir com os requisitos técnicos e especificações do produto, com uma análise das suas características, preço, vantagens e desvantagens que cada uma pode representar na concretização deste projeto.

3.1. *Arduino*

Arduino é provavelmente a plataforma de prototipagem eletrónica de *hardware* mais conhecida em todo o mundo. A maioria das placas utiliza um microcontrolador da *Atmel AVR* e são programadas com um sistema de linguagem própria que na prática é C/C++. A programação é feita recorrendo a uma ligação *USB*, através de um adaptador *FTDI FT232* existente em cada placa e, portanto, não necessitam de nenhum dispositivo programador externo uma vez que o carregamento do *firmware* pode ser feito diretamente de um computador.

Esta plataforma inclui um Ambiente de Desenvolvimento Integrado chamado *Arduíno IDE* que contém um editor de texto para a escrita de código, uma consola de ligação série *RS232* e permite descarregar os programas para o microcontrolador.

A placa *Arduino* não só tem os portos de ligação disponíveis para que seja possível conectar qualquer dispositivo como existe uma grande variedade de dispositivos e acessórios normalmente conhecidos como *Shields*. Uma *Shield* é uma placa de ligação rápida à placa do *Arduino* que permite expandir as suas capacidades. Cada *Shield*, dependendo do seu *design*, pode ser compatível com vários modelos de *Arduino*.

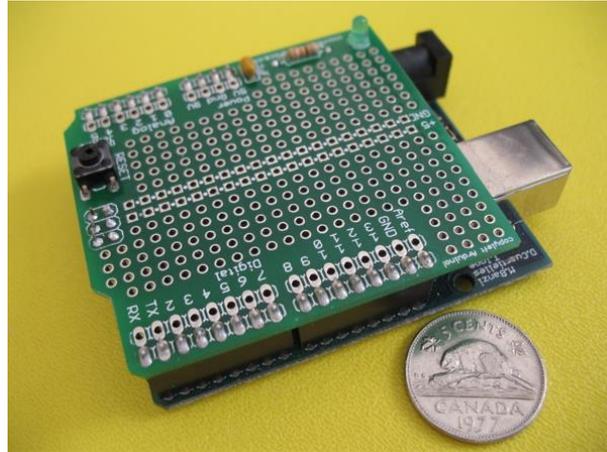


Figura 33 - Protoshield para Arduino Uno [45].

Encontram-se a custos reduzidos placas de ligação que são apenas placas de prototipagem e permitem desenvolver qualquer circuito, como a placa da Figura 33, mas também placas para ligação *Ethernet* como mostra a Figura 34, *Wi-Fi*, *Bluetooth*, *Drive* de motores *DC*, leitores de *encoders*, relés, *LCDs*, vários tipos de sensores, etc. [46].

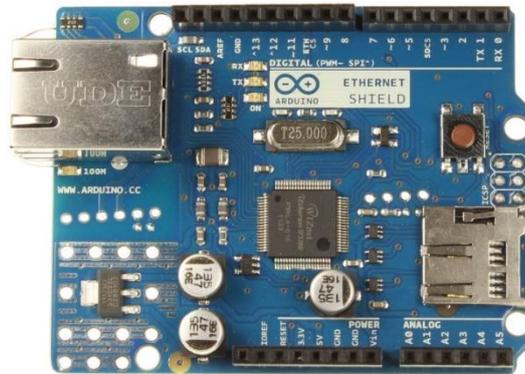


Figura 34 - Shield de Ethernet para Arduino [46].

Como é uma plataforma de código aberto, qualquer pessoa pode consultar, examinar ou modificar um produto já que todos os ficheiros de desenvolvimento - esquemas de *hardware* e *software* - estão disponíveis. Tal facto também faz com que existam muitas versões, feitas por terceiros, vendidas a preços mais acessíveis.

3.1.1. *Arduino Uno*

O *Arduino Uno* é a placa de desenvolvimento de entrada de gama da plataforma, que tem incorporado um microcontrolador de 8bits *ATmega328P*. Um resumo das especificações técnicas pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 - Especificações técnicas Arduino Uno.

Arduino	Uno
Microcontrolador	<i>ATmega328P</i>
Tensão de Operação	5V
Portos digitais I/O	14
Portos PWM	6
Entradas Analógicas	6 (10bits)
Velocidade de Relógio	16MHz
Memória flash	32KB

A partir dos dados da Tabela 5 do início desta secção é perceptível que esta placa tem os requisitos necessários para controlar a queima de *pellets*. Disponibiliza 6 entradas analógicas das quais são necessárias 2 e 14 portos digitais *I/O* sendo necessários 4. Supre as necessidades e ainda permite instalar uma interface de botões ou acoplar um *LCD* e botões de pressão. No entanto, a instalação de qualquer interface utilizaria praticamente todos os restantes portos disponíveis, inviabilizando a adição de qualquer funcionalidade que necessitasse de *hardware* extra. Esta opção deixa o controlador limitado em termos de evoluções futuras quer ao nível de expansão da interface quer de comunicação.

Uma placa de outros fabricantes, equivalente à *Arduino Uno* da Figura 35 encontra-se a preços que começam nos 2€.



Figura 35 - Arduino Uno.

3.1.2. *Arduino Mega 2560*

Mega 2560 é das placas *Arduino* que mais possibilidades oferece: incorpora um microprocessador de 8bits, *ATmega2560*, tem 54 portos *I/O*, 16 entradas analógicas e 256 kb de memória para carregar o *firmware*. Um resumo das especificações técnicas pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 7 - Especificações técnicas *Arduino Mega 2560*.

Arduino	Mega
Microcontrolador	<i>ATmega2560</i>
Tensão de Operação	5V
Portos digitais <i>I/O</i>	54
Portos <i>PWM</i>	15
Entradas Analógicas	16 (10bits)
Velocidade de Relógio	16MHz
Memória <i>flash</i>	256KB

Esta placa tem capacidade suficiente para suprir as necessidades deste projeto. O número de portos disponíveis e a capacidade de memória alargada dão a possibilidade de desenvolver e expandir as capacidades e funcionalidades de um controlador sem o limitar logo à partida. Com esta placa não existirão muitas limitações caso se pretenda adicionar comunicação *Wi-Fi*, *GPRS*, monitorização de sensores extra como tranca da porta ou aviso de falta de combustível, entre outros.

Recorrendo a outros fabricantes, consegue-se adquirir a um preço a partir dos 7€ uma placa idêntica à *Arduino Mega 2560*, representada na Figura 36.



Figura 36 - Arduíno Mega 2560.

3.2. *Microchip*

A *Microchip* é o fornecedor líder mundial de microcontroladores. A família *PIC* é utilizada em aplicações que vão desde o áudio, gestão de baterias, *Ethernet*, monitorização de energia, iluminação, comunicações sem fios, domótica, indústria automóvel, etc., numa gama de aparelhos que se estende desde máquinas de café até berbequins [47].

A *Microchip* vende os seus microcontroladores apenas como unidades simples. Não existe uma placa de desenvolvimento rápido que permita programar e fazer ligações a dispositivos eletrónicos externos, capaz de ser integrada numa solução final, como no caso do *Arduíno*. Há uma grande quantidade de modelos em diferentes gamas e tipos que podem ser utilizados para este projeto, desde que respeitem o número de portos digitais e entradas analógicas necessárias. Por ser vendido apenas o microcontrolador, o preço por unidade também é reduzido, mas implica a compra – ou criação - de uma placa de desenvolvimento e de um programador.

Existem duas placas de desenvolvimento próprias que permitem programar uma série de microcontroladores mas que não possibilitam a integração numa solução final. Uma delas apenas tem o *socket* para o microprocessador e uma *breadboard* - Figura 37 - enquanto outra traz agregados alguns periféricos como um ecrã *LCD*, botões de pressão e tem saídas disponíveis para fazer ligações - Figura 38.

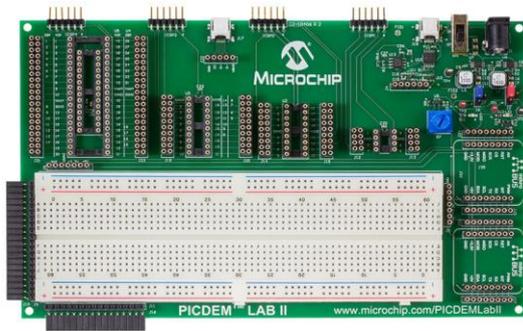


Figura 37 - Placa de desenvolvimento PICDEM LAB II [47].



Figura 38 - Placa de desenvolvimento Explorer 8 [47].

A placa *PICDEM LAB II* custa 92€, enquanto a placa *Explorer 8* tem um custo de 69€.

Apesar do *software* de desenvolvimento destes microcontroladores, o *MPLAB Xpress*, ser gratuito, caso não se utilizem as placas de desenvolvimento próprias, para descarregar o programa para o microcontrolador é necessário um programador específico, comprado à parte, cujo preço no fabricante é de 44€. Há possibilidade de desenvolver um programador próprio, mas obrigaria a desenvolver *hardware*. Existem também alguns programadores desenvolvidos por terceiros, disponíveis no mercado com um custo que começa nos 8€.

3.3. *ChipKIT*

A *ChipKIT* é o resultado de uma parceria da *Microchip* com a *Digilent Inc* que entra no mercado para tentar diminuir as desvantagens da *Microchip* como plataforma de desenvolvimento rápido e para introduzir microprocessadores de 32bits à comunidade que, até então, não existiam. Segundo a própria equipa de desenvolvimento, a *ChipKIT* é a mais recente plataforma de desenvolvimento rápido disponível, totalmente inspirada no *Arduino*. As placas não só foram desenhadas com o mesmo formato e disposição de furações para serem compatíveis com parte dos *shields* do *Arduino* como também as suas próprias bibliotecas e ambiente de programação foram trabalhadas para serem compatíveis nesta plataforma, tornando-as funcionais em ambas. A diferença para a plataforma *Arduino* está nos microprocessadores utilizados - da família *PIC32*, da *Microchip*, de 32bits, com uma tensão de operação de 3,3V [48].

3.3.1. *ChipKIT Uno32*

A placa de desenvolvimento *ChipKIT Uno32* está desenhada com o mesmo formato da placa *Arduino Uno*, mas integra o microprocessador *PIC32MX320F128*. É um processador de 32bits, velocidade de relógio de 80MHz e com 42 portos digitais I/O disponíveis. A Tabela 8 resume as especificações técnicas desta placa.

Tabela 8 - Especificações técnicas da placa de desenvolvimento *ChipKIT Uno32*.

ChipKIT	Uno32
Microcontrolador	<i>PIC32MX320F128</i>
Tensão de Operação	3,3V
Portos digitais I/O	41
Portos PWM	5
Entradas Analógicas	16 (10bits)
Velocidade de Relógio	80MHz
Memória flash	512KB

Pelas características é perceptível que as capacidades desta placa são superiores às da placa *Arduino Uno* e pouco inferiores a um *Arduino Mega*, ficando ligeiramente atrás da última no número de portos disponíveis, situação que não é limitadora para este projeto. É possível verificar também que tem uma velocidade de relógio superior a ambas as placas concorrentes. A tensão de operação é de 3,3V, diferente dos 5V da plataforma *Arduino* o que leva a que só seja compatível com *shields* do mesmo nível de tensão. Os portos digitais apenas conseguem fornecer uma saída digital de 3,3V mas são tolerantes a tensões de entrada até 5V. A placa *ChipKIT Uno32* tem um preço de 27€ e está representada na Figura 39.



Figura 39 - Placa de desenvolvimento ChipKIT Uno32 [49].

Na família *ChipKIT* existe um modelo de gama superior, equivalente ao *Arduino Mega*, a placa *MAX32*. Ultrapassa em larga margem as necessidades deste projeto por ter 83 portas digitais, p. ex. e também um preço bastante superior - 45€ - ao já capaz modelo *Uno32*. Por este motivo e por se considerar que o preço estaria logo à partida a condicionar o valor final do controlador sem oferecer mais do que a placa *Uno32*, não se irá detalhar acerca das suas especificações técnicas nem considerar na decisão.

3.4. *Raspberry Pi*

O *Raspberry Pi* é um computador desenvolvido pela *Raspberry Pi Foundation*. Tem um baixo custo, é capaz de se ligar a um monitor ou televisão, permite navegar na internet, reproduzir vídeo em alta definição ou até utilizar um processador de texto, tudo com o tamanho de um cartão de crédito.

Este computador em miniatura contempla também 40 portas digitais, dando-lhe a capacidade de controlar um sistema de queima de *pellets* e adicionar sistemas de interface e comunicação. A programação é feita dentro do próprio sistema operativo, *Raspbian*, instalado num cartão de memória. O último modelo tem um preço de 40€, o que torna o preço do projeto mais elevado quando comparado com as outras opções/plataformas. A este preço é necessário adicionar também o preço do cartão de memória onde corre o sistema operativo e de uma placa *ADC* (*Analog-Digital Converter*), necessária para a leitura das sondas de temperatura. A Figura 40 representa um *Raspberry Pi 2 Model B*.



Figura 40 - Raspberry Pi 2 Model B.

Bem mais interessante, pelo preço e tamanho ainda mais reduzido, é um outro modelo *Pi*, o *Raspberry Pi Zero*. Representado na Figura 41, este modelo mantém o mesmo número de portas *I/O* que o modelo anterior - 40 portas digitais -, com um preço de cerca de 5€.



Figura 41 - Comparação do Raspberry Pi Zero com uma nota de 5\$ [50].

Também neste caso é necessário adicionar ao preço do *Raspberry* o preço de um cartão de memória de onde corre o sistema operativo e da placa *ADC*. O preço do cartão ronda os 4€ enquanto a placa de conversão analógica tem um custo de 26€.

No *Raspberry*, o *firmware* de controlo tem que ser executado através de uma aplicação desenvolvida que fica a correr no sistema. Deste modo, tudo fica guardado no cartão de memória, que precisa de ser carregado com uma imagem da aplicação e sistema operativo para operar corretamente.

3.5. Análise comparativa

Analisando as opções anteriores percebemos que todas são tecnicamente válidas e cada uma apresenta vantagens e desvantagens que se podem encaixar no desenvolvimento deste projeto.

O *Raspberry Pi* é a opção com mais poder de processamento. É desnecessário para o controlo da uma salamandra mas pode tornar-se vantajoso caso se pretenda implementar uma interface gráfica mais elaborada - para um ecrã-táctil, p. ex. - ou criar algum tipo de monitorização/interface através de uma rede doméstica - *ethernet* ou *Wi-Fi*. Implica o estudo de um ambiente de programação diferente das plataformas *Arduíno/ChipKIT* ou *Microchip*. A sua placa tem todos os portos *I/O* acessíveis para interligação com dispositivos eletrónicos, o que permite interagir com alguns módulos existentes no mercado ou até mesmo *shields* desenhadas para outras plataformas - embora não de uma forma integrada. Tanto o ambiente de programação como o sistema operativo estão disponíveis de forma gratuita.

O modelo *Zero* tem um custo mais reduzido. A sua arquitetura complica o desenvolvimento de uma placa única dedicada no futuro, para reduzir ainda mais os custos, mas não impossibilita o desenvolvimento de uma ou mais placas separadas para a interface e para o módulo de potência do controlador. No total, um controlador com *Raspberry Pi* começaria logo à partida em 69€ com o modelo Pi 2 e 35€ com o modelo Zero, um valor acima dos concorrentes que não justificariam esta escolha para a aplicação em causa.

A utilização de microcontroladores da família *PIC* da *Microchip* obriga a desenvolver uma placa que torne acessíveis os portos do microcontrolador e que o permita programar caso não se pretenda comprar o conjunto de placas de desenvolvimento e de programação. Esta placa tem que ter as dimensões corretas no caso de se pretender integrar com alguma *shield*, como na plataforma *Arduíno/ChipKIT* ou as *shields* podem ser utilizadas como placas separadas desde que o microcontrolador utilize a mesma tensão de operação do módulo. Como já foi referido anteriormente, nesta fase do projeto é uma mais valia não necessitar de desenvolver *hardware*.

A plataforma *ChipKIT* veio introduzir no mercado uma solução a grande parte das desvantagens da *Microchip*. São compatíveis com grande parte dos *shields* existentes para *Arduíno* e partilham bibliotecas de programação. Ter um preço superior às placas da

plataforma concorrente fez com que fosse preterida como plataforma de desenvolvimento. No entanto, a proximidade entre a programação, dimensão de placas e ambiente de desenvolvimento abre a possibilidade de, no final do projeto, transferir o trabalho desenvolvido para um microcontrolador da *Microchip*. Desta forma, é possível desenvolver um *firmware*, testá-lo numa placa *Arduino* e no final compilar o projeto no ambiente do *ChipKIT* para aplicar a um microcontrolador da família *PIC* ou vice-versa - com as devidas alterações aos seus registos.

A plataforma *Arduino* surge assim como a opção mais barata para desenvolver o protótipo. O ambiente de programação é gratuito e pode ser utilizado de forma livre. As placas têm o preço mais acessível quando comparadas com as outras opções e estão prontas a ser interligadas quer com *shields* ou módulos, quer com soluções desenvolvidas especificamente para este projeto pois têm acessíveis todos os portos *I/O*.

A Tabela 9 resume as vantagens e desvantagens de cada uma das plataformas, analisando as suas características face aos requisitos para o desenvolvimento deste projeto.

Tabela 9 - Análise às plataformas de controlo face aos requisitos do projeto.

	<i>Arduino</i>	<i>ChipKIT</i>	<i>Microchip</i>	<i>Raspberry</i>
Compatibilidade com <i>shields</i>/módulos	Sim	Sim	Não	Não
Portos <i>I/O</i> disponíveis	Sim	Sim	Não	Não
Necessidade de <i>hardware</i> p/ programação	Não	Não	Sim	Não
Capacidades de comunicação avançada (<i>ethernet, Wi-Fi, etc.</i>)	Não	Não	Não	Sim
Necessidade de <i>hardware</i> extra*	Não	Não	Sim	Sim

* Placa *ADC*, oscilador, resistências, etc.

Através da Tabela 9 é possível verificar que as ofertas da *Microchip* e da *Raspberry* têm algumas desvantagens relativamente às outras duas plataformas concorrentes, já enunciadas no decorrer da análise comparativa. A plataforma *Arduino* e *ChipKIT* são muito semelhantes. Entre elas, a escolha recaiu sobre a *Arduino* devido ao seu preço mais reduzido. O desenvolvimento iniciou-se com uma placa *Mega* cuja escolha, dentro das opções da plataforma, se deveu à relação entre o preço e capacidade de expansão que a placa proporciona. A placa *Uno* é capaz de controlar a salamandra mas poderia impedir o desenvolvimento de funcionalidades que se possam futuramente implementar. A *Mega*

continua a ser uma das placas mais baratas e não limita este projeto em termos de desenvolvimento, dando margem para integrar um conjunto de capacidades - de comunicação, de monitorização, etc. - que não obrigam à troca do microcontrolador e/ou placa associada como poderia acontecer no caso da *Uno*.

Além da placa *Mega*, para o início do desenvolvimento do projeto foram escolhidos um ecrã *LCD* e 3 botões de pressão para desenvolver e testar a interface principal, um módulo de relé e uma *protoshield*, - idêntica à da Figura 33 - para o controlo dos motores e resistência. O ecrã escolhido pode apresentar a informação numa dimensão que cause dificuldades de leitura por pessoas com problemas de visão. É possível e caberá a decisão ao fabricante das salamandras, substituir o ecrã escolhido por outro de maiores dimensões sem necessidade de ajuste na programação ou nas ligações elétricas do controlador.

4. Controlador Desenvolvido

Apesar da plataforma *Arduino* ter um grande número de módulos de *hardware* já desenvolvidos para as mais variadas aplicações, não foi possível encontrar no mercado todas as soluções de *hardware* necessárias para o desenvolvimento deste projeto, tanto por motivos de ordem técnica como financeira. Por exemplo, uma salamandra exige o controlo de velocidade de um motor AC. Não foi possível encontrar um módulo que permitisse o controlo requerido através de um microcontrolador e, portanto, teve que ser desenvolvido *hardware* com essa finalidade.

Para o teste das soluções implementadas e ensaios de utilização do controlador foi utilizado um sistema de queima de *pellets*, uma salamandra, disponibilizada pela MVM e localizada na sede da empresa. Há muitas opções para a constituição de um equipamento de queima de *pellets*, onde cada fabricante toma as suas decisões. Para este trabalho, o modelo disponibilizado para testes e desenvolvimento foi o *Prima Air* que pode ser visto na Figura 42.



Figura 42 - Salamandra de testes, modelo Prima Air, durante um ensaio de queima.

O controlador utilizado pela MVM no modelo *Prima Air* tem um sensor de massa de ar e um *encoder* acoplado ao ventilador extrator de fumos além dos constituintes básicos referidos na Tabela 5. Segundo as indicações da empresa, o *encoder* é um elemento essencial por questões de segurança mas o sensor de massa de ar é um elemento dispensável.

Caso haja uma falha no extrator de fumos, detetada através da leitura do *encoder*, a salamandra tem que ser impedida de iniciar a queima ou cessar de imediato o processo de queima se este estiver a decorrer. A presença do sensor de massa de ar garante um fluxo de ar mínimo na admissão – para cada nível de potência – pois é, quanto existe, através da sua leitura que se varia a velocidade do ventilador encarregue da admissão de ar. A sua presença não é fundamental e encarece o sistema de aquecimento, motivo pelo qual foi ignorado no desenvolvimento do controlo a aplicar neste modelo.

A Figura 43 mostra o conjunto de elementos deste modelo de salamandra que necessitam da atenção do controlador.

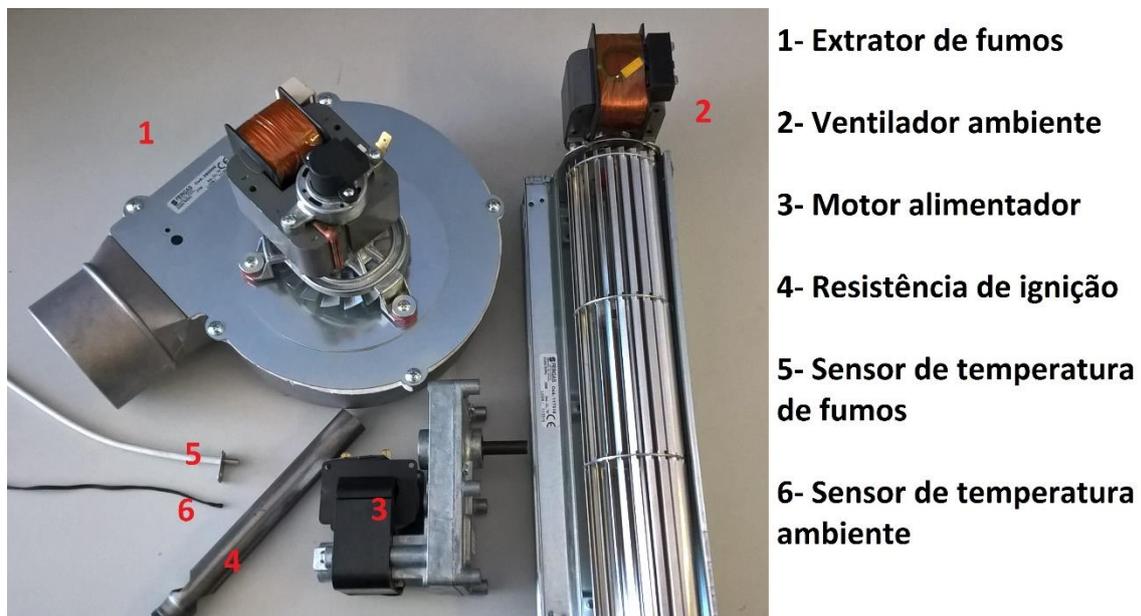


Figura 43 - Elementos constituintes da salamandra a controlar.

Tanto os motores como a resistência funcionam à tensão nominal da rede elétrica nacional, ou seja, 230V.

4.1. Protótipo - *hardware*

Nas secções seguintes são descritos os circuitos desenvolvidos para o controlo dos motores, controlo de resistência e os componentes utilizados na interface e aquisição de dados de temperatura, concluindo com testes e resultados da implementação relativos ao desenvolvimento do protótipo do controlador.

4.1.1. Controlo de motores e resistência

Aos motores de exaustão de fumos e ventilação ambiente, exige-se que tenham velocidade variável tanto para controlar a queima como para regular a quantidade de ar quente que circula para o ambiente onde o sistema se encontra. A resistência de aquecimento e o motor de alimentação têm um controlo de estado *on/off*. Para variar a velocidade dos motores ventiladores foi implementado um controlo por ângulo de fase.

- **Controlo por ângulo de fase**

O controlo por ângulo de fase é um tipo de controlo que permite variar a tensão numa carga a partir de uma fonte AC de tensão fixa. A velocidade varia consoante a tensão eficaz aplicada no motor, que por sua vez varia conforme o ângulo de disparo, como mostra a equação:

$$V_o = V_s * \cos(\theta) [V]$$

Onde:

V_o : tensão eficaz de saída

V_s : tensão eficaz de entrada

θ : ângulo de disparo

Um interruptor (*TRIAC*) é acionado num determinado instante do semi-ciclo da onda, o que faz com que a tensão eficaz aplicada na carga varie consoante o ângulo de semi-ciclo em que começa a conduzir: a tensão é máxima quando o ângulo de disparo é de 0 radianos

e será mínima para um ângulo de π radianos. A curva que estabelece a relação entre a tensão de saída V_o e o ângulo de disparo θ está representada na Figura 44.

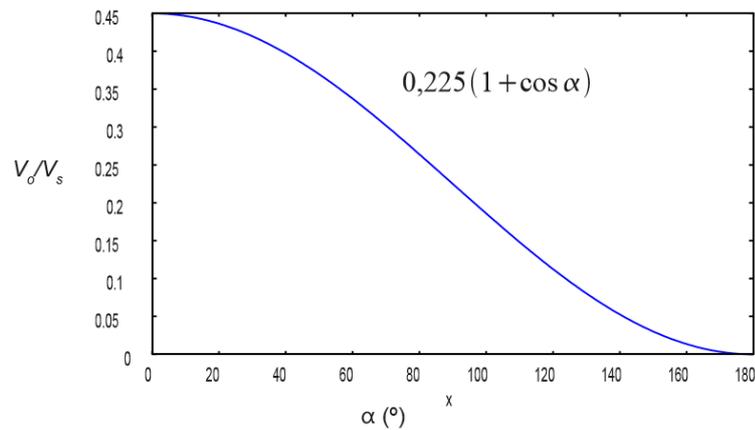


Figura 44 - Relação entre tensão de saída e ângulo de disparo [51].

Para uma carga puramente resistiva a corrente acompanha a tensão. Quando o disparo é dado no TRIAC, este inicia a condução até que a corrente seja inferior à corrente de manutenção, algo que acontece no final do semi-ciclo em que está a operar. Na Figura 45 podemos observar este comportamento, onde V_o representa a tensão e i_L a corrente na carga.

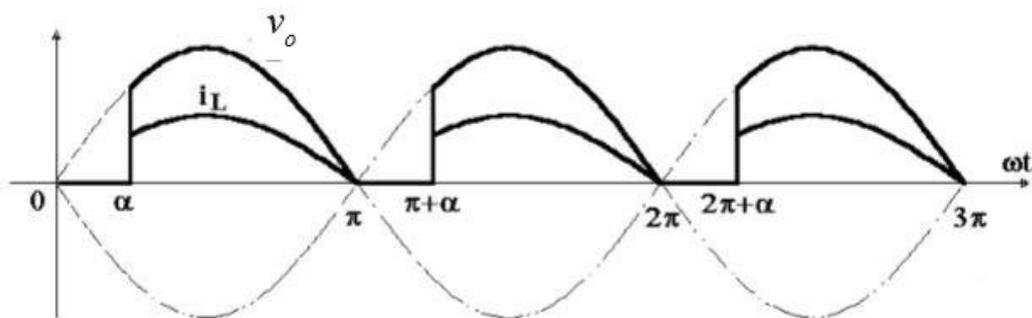


Figura 45 - Tensão e corrente numa carga resistiva controlada com TRIAC [51].

Como um motor AC é uma carga indutiva, o comportamento será ligeiramente diferente. A carga é excitada com a tensão correspondente ao ângulo de disparo α mas a

corrente não tem um valor instantâneo diretamente proporcional. Existe um desfasamento que faz com que a corrente apenas baixe o suficiente para interromper a condução β radianos após o início do semi-ciclo seguinte. A Figura 46 ilustra este comportamento, onde V_o e i_L representam a tensão e a corrente na carga, respetivamente.

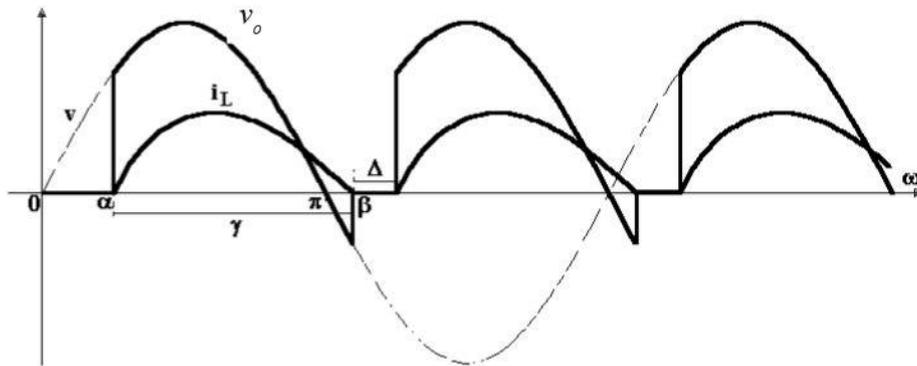


Figura 46 - Tensão e corrente numa carga indutiva controlada com TRIAC [51].

Como referido anteriormente, ao contrário de uma carga resistiva, uma carga indutiva como um motor AC não permite variações de corrente instantâneas. Este facto impede um controlo completo num semi-ciclo de onda: se o ângulo de disparo α for inferior ao ângulo em que a corrente é extinta, β , o motor estará sempre ligado porque o fornecimento de corrente nunca é interrompido. Isto significa que neste tipo de controlo numa carga indutiva não é possível variar a tensão em toda a gama.

Saber com precisão qual o ângulo num determinado momento pressupõe a existência de uma referência: o ângulo 0° . De maneira a encontrar uma referência angular foi implementado um circuito de deteção de zero – *zero crossing detector*. A Figura 47 mostra o diagrama de blocos do controlo de velocidade por ângulo de fase implementado nos motores ventiladores.

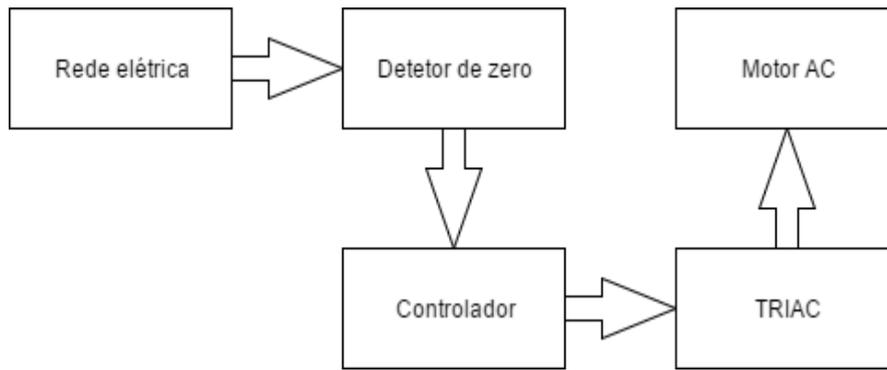


Figura 47 - Diagrama de blocos do controle de velocidade de um motor AC.

Um dos requisitos do *hardware* para controle de velocidade a desenvolver é garantir que estaria isolado do microprocessador de maneira a evitar-lhe danos em caso de avaria. Além da proteção dos elementos periféricos, é necessário proteger os próprios elementos de potência como o *TRIAC*. Para tal foram utilizados um opto isolador e um circuito de *snubber*.

O opto isolador escolhido foi o *MOC3022* que é um circuito integrado com saída a *TRIAC* ativada por um díodo emissor de luz infravermelha, utilizado para fazer o controle do disparo na *gate* de um *TRIAC* a jusante. Este integrado garante o isolamento para tensões eficazes até 5000V, o suficiente para garantir que um problema que exista a jusante deste não se propagará para os elementos a montante, pois caso aconteça alguma anomalia serve de elemento fusível.

O *snubber* é utilizado para proteger o *TRIAC* que comuta a carga e simultaneamente para diminuir a interferência eletromagnética provocada pela comutação. A interrupção repentina de corrente numa carga indutiva leva a um aumento da tensão, já que a tensão aos terminais da indutância é proporcional à taxa de variação da corrente, $L * di/dt$. Este aumento de tensão nos terminais do *TRIAC*, dv/dt , é descrito como *critical rate of rise*.

Por ser uma carga indutiva, o motor armazena energia na forma de campo magnético devido à corrente que por ele passa. Quando o *TRIAC* está “on”, a corrente flui por ele e pelo motor. Quando *TRIAC* abre e fica “off”, ainda há corrente - e energia armazenada na forma de campo magnético - a passar pelo motor, porém, neste momento, não tem por onde circular visto que o circuito foi interrompido. Isto vai provocar um aumento de tensão até que toda a energia armazenada em forma de campo magnético seja transformada em energia elétrica. A tensão vai subir até a um ponto em que seja suficiente para que a corrente possa

continuar ao mesmo nível – já que não pode alterar-se instantaneamente – mesmo que para isso tenha que ionizar o ar, tornando-o condutor, momento em que é possível observar um arco elétrico.

Este fenómeno transitório de aumento de tensão, conhecido como “*inductive spiking*”, é também uma fonte de interferências eletromagnéticas e caso a tensão gerada seja superior ao que o comutador pode suportar pode mesmo danificá-lo.

O *snubber* é um circuito tipicamente composto por uma resistência em série com um condensador, paralelos aos terminais do *TRIAC*, que serve para atenuar ou eliminar este problema. A Figura 48 mostra um esquema de um circuito de *snubber*.

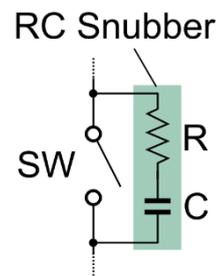


Figura 48 - Circuito de snubber com resistência e condensador [52].

A inclusão deste tipo de circuito garante um caminho para que a carga indutiva possa fazer fluir a corrente quando o *TRIAC* está *off*, de maneira a que a tensão aos seus terminais não aumente tanto e o faça de forma mais lenta quando este abre, ou seja, faz com que di/dt seja menor uma vez que a energia armazenada no motor será dissipada pelo *snubber*.

Neste projeto, para o controlo dos ventiladores foi utilizado o circuito recomendado pela ficha técnica do *MOC3022*, onde já está incluído um *snubber*.

O *TRIAC* escolhido foi o *BT136-600* que se encontra no mercado por valores a partir de 0,35€. Poderia ter sido feita outra escolha para o modelo do *TRIAC*, nomeadamente entre modelos com circuitos de *snubber* integrados – *snubberless TRIAC*. No entanto, dados os requisitos dos motores e o preço do dispositivo, este era o modelo mais acessível.

Como são dispositivos de entrega comutada de potência podem aquecer bastante e necessitar de um dissipador. A verificação desta necessidade foi feita seguindo a equação da relação entre a temperatura da junção e a potência dissipada:

$$T_j - T_a = (R_{\Theta JA} + R_{\Theta JC}) * P_j$$

Segundo a ficha técnica do *TRIAC*, a resistência térmica entre a junção e a cápsula ($R_{\Theta JC}$) é de $3,7^\circ\text{C}/\text{W}$ e a resistência térmica entre a junção e o meio ambiente ($R_{\Theta JA}$) é de $60^\circ\text{C}/\text{W}$. A temperatura ambiente dentro da salamandra, à qual a eletrônica de controle vai estar submetida, T_a , pode atingir durante o seu funcionamento os 40°C . A potência do *TRIAC*, P_j , pode ser calculada através da corrente que por ele passa (I_T) multiplicada pela tensão aos seus terminais (V_T) quando está a conduzir, que segundo a ficha técnica o valor máximo é de $1,7\text{V}$.

Na salamandra, os motores de ventilação e exaustão de fumos têm a mesma potência elétrica, 57W . O motor alimentador tem uma potência ligeiramente inferior, de 53W . As correntes dos motores ventiladores foram medidas, tendo-se verificado valores eficazes de $0,35\text{A}$.

Para efeitos de dimensionamento foram considerados os valores dos motores ventiladores pois são mais exigentes do que o motor alimentador no que a consumo de corrente elétrica diz respeito e a tensão máxima aos terminais do *TRIAC*:

$$P_j = V_T * I_T$$

$$P_j = 1,7 * 0,35 \cong 0,6 [\text{W}]$$

Pela fórmula da temperatura de junção, temos:

$$T_j = T_a + ((R_{\Theta JA} + R_{\Theta JC}) * P_j) = 40 + ((60 + 3,7) * 0,6) = 78,22 [^\circ\text{C}]$$

Com uma temperatura de junção máxima admissível de 125°C , o funcionamento do *TRIAC* nunca estará em perigo devido à temperatura. Segundo informação da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante, a corrente eficaz máxima admissível, 4A , apenas começa a decair acima dos 107°C , um valor ainda distante de atingir nesta situação pelo que a instalação de um dissipador se pode dispensar.

- **Deteção de Zero**

Os circuitos de deteção de zero recebem a tensão da rede como entrada e devolvem um pulso sincronizado com a passagem da tensão por $\sim 0V$ - Figura 49 -, ou seja, sincronizado com o início de cada semi-ciclo da onda de tensão. O pulso de saída do circuito é a referência do controlador.

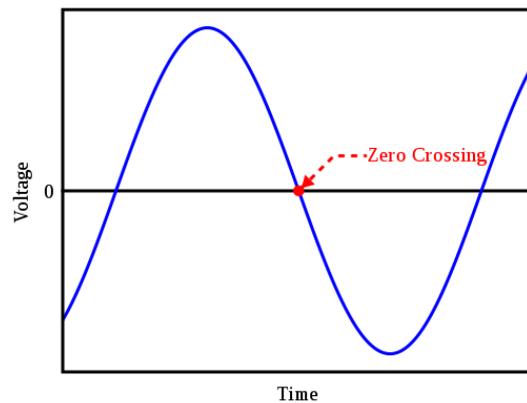


Figura 49 - Ilustração de uma passagem por zero [52].

O circuito de deteção de zero dimensionado está esquematizado na Figura 50.

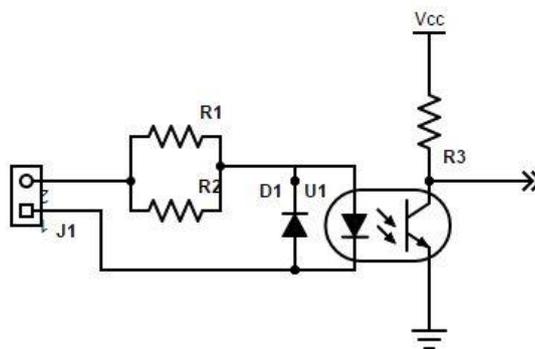


Figura 50 - Esquema elétrico do circuito utilizado na deteção de zero.

Quando a tensão de entrada - aplicada ao conector J1 - se encontra no final do semi-ciclo negativo, o seu valor vai aumentando - passando de negativo para positivo - até

ultrapassar a tensão necessária para que o *led* consiga entrar na zona de condução, passando a emitir luz que satura o transistor do opto acoplador, forçando a saída para o microcontrolador a uma tensão de 0V. Seguidamente, no final do semi-ciclo seguinte – positivo - a tensão baixa até passar de um valor positivo para um valor negativo fazendo com que o *led* entre na zona de bloqueio, deixe de conduzir e, por conseguinte, cesse a emissão de luz. O transistor passa então a estar na zona de corte, bloqueando a passagem de corrente, elevando a tensão de saída para o microcontrolador ao nível lógico ativo, ou seja, V_{cc} . Sempre que há uma alteração no nível da saída para o controlador, há praticamente no mesmo instante uma passagem por zero: praticamente, pois o circuito não deteta o valor de tensão 0V mas sim o valor da tensão à entrada que permite a passagem de corrente suficiente no *led* para que o valor de tensão aos terminais do coletor e emissor do fototransistor (V_{ce}) seja suficiente para que o microcontrolador reconheça como um nível lógico 0 ou 1.

Para o dimensionamento do circuito foi necessário garantir que a corrente no *led* seria suficiente para que o microprocessador reconhecesse uma mudança de estado lógico e ao mesmo tempo que não ultrapassasse o limite suportado pelo circuito integrado escolhido, o *PC814*.

Segundo informações do fabricante do microcontrolador que equipa a placa *Arduino*, a *Atmel*, as resistências de *pull-up*, R3 na Figura 50, têm um valor entre os 20k Ω e os 50k Ω . Esta informação permite saber qual a corrente necessária para a saturação do transistor. Assim, considerando o pior caso (*pull-up* de 20k Ω) e sabendo que $V_{cc} = 5V$, sabemos que a corrente é de:

$$I_c = \frac{5}{20 * 10^3} = 0,250 [mA]$$

A ficha técnica do *PC814* garante uma CTR (*current transfer ratio*) mínima de 20% mas que pode atingir os 300%. Isto significa que, para uma CTR de 20%, apenas 20% da corrente no *led*, I_f estará à saída, no fototransistor, I_c . Desta maneira foi possível estimar que, no pior dos casos, precisaremos de 1,25mA de corrente no *led*.

Ainda segundo informações da ficha técnica do opto-acoplador quando este se encontra diretamente polarizado e com uma corrente $I_f = \pm 20mA$ estabelece aos seus terminais uma tensão - *forward voltage* - de cerca 1,2V. Com base nestas informações e considerando o valor de tensão eficaz da rede elétrica de 230V, sabendo que a corrente I_f

máxima suportada pelo opto-acoplador é de 50mA, calculou-se um valor de resistência para limitar a corrente:

$$R = \frac{230 - 1,2}{20 * 10^{-3}} \sim 11 * 10^3 [\Omega]$$

Com este valor de resistência a corrente máxima no *led* estaria abaixo dos 50mA:

$$I_{f \max} = \frac{(\sqrt{2} * 230) - 1,2}{11 * 10^3} \cong 29,4 [mA]$$

A potência que essa resistência teria que dissipar seria de:

$$P_R = \frac{(230 - 1,2)^2}{11 * 10^3} \cong 4,76 [W]$$

Nesta configuração era necessária uma resistência de 5W de potência ou superior, uma vez que estando muito próximo do valor nominal, poderia não se conseguir dissipar a potência caso a temperatura ambiente fosse maior que o valor nominal, 25°C, como acontece no interior da salamandra. No entanto, por uma questão de preço e como o acesso a uma resistência com estas características não era imediato, optou-se por limitar um pouco mais a corrente no *led* e ao mesmo tempo tornar a solução mais barata, utilizando resistências de carvão. Uma resistência de 5W custa acima de 1,10€ enquanto que a solução adotada ficou nos 0,24€.

Uma vez que há resistências de carvão de 2W, foi possível reduzir o custo do circuito. Considerando os componentes disponíveis, optou-se por uma resistência equivalente de 23,5kΩ, resultado de um paralelo de duas resistências de 47 kΩ, com um preço unitário de 0,12€. Recalculando, obtemos:

$$I_f = \frac{230 - 1,2}{23,5 * 10^{-3}} \cong 9,73 * 10^{-3} [A]$$

A corrente de pico no *led*, nestas condições, seria de:

$$I_{f \max} = \frac{(\sqrt{2} * 230) - 1,2}{23,5 * 10^3} \cong 13,7 [mA]$$

Uma corrente eficaz de 9,73mA no *led* faz dissipar um total de potência em cada uma das resistências utilizadas em paralelo de:

$$P_R = \frac{(230 - 1,2)^2}{47 * 10^3} \cong 1,11 [W]$$

Este valor de potência encontra-se abaixo do valor nominal das resistências de carvão. Uma vez que lhes será aplicada uma tensão de pico superior a 300V, foram escolhidas resistências de maiores dimensões para não haver risco de arco elétrico entre os seus terminais.

Com estes valores de resistência a deteção de passagem por zero é, no pior dos casos, feita a um nível de tensão de entrada de:

$$V_{zerocross} = (23,5 * 10^3 * 0,625 * 10^{-3}) + 1,2 \cong 15,8 [V]$$

O circuito foi composto pelos seguintes elementos:

- 2x 47k Ω - 2W
- 1x PC814

O díodo D1 está incluído no encapsulamento do *PC814* enquanto a resistência R3 é uma resistência de *pullup* interna, parte integrante do microprocessador e habilitada por *software*.

- **Controlo *on/off***

A resistência de aquecimento para dar início à queima e o motor alimentador não estão constantemente ligados durante o funcionamento da salamandra. A resistência apenas tem importância no início do processo para garantir a ignição dos *pellets* e o motor alimentador é ligado apenas durante um curto intervalo de tempo ao longo de um período pré-definido, dependente do nível de potência selecionado.

Para o controlo da resistência foi utilizado o módulo de relé da Figura 51 que tem um custo unitário de cerca de 1,60€. Este módulo já inclui um díodo em antiparalelo na bobine e é acionado por intermédio de um transístor para proteger o microcontrolador de picos de tensão gerados na sua comutação, tal como o circuito de *snubber* referido anteriormente.



Figura 51 - Módulo de relé utilizado na comutação da resistência de aquecimento.

No motor de alimentação, o controlo é feito através de um opto-isolador com circuito de deteção de passagem por zero integrado, o *MOC3041*. Inicialmente foi testado o controlo através de um módulo de relé idêntico ao da resistência sem resultados satisfatórios, como é descrito na secção 4.1.3.

4.1.2. Interface e Sensores

A escolha da interface é sempre muito importante em qualquer sistema, em especial nos sistemas que pretendem, como este, abranger clientes de todas as faixas etárias e níveis de literacia. Como referido na secção 2.3.5, era essencial escolher algo que permitisse uma interação simples, de fácil implementação, com ampla capacidade de troca de informação na relação homem-máquina, ao mesmo tempo que não limitasse o sistema em funcionalidades. Dentro destas características optou-se por um ecrã *LCD* de 16 colunas por 2 linhas e 6 botões de pressão como interface principal. Foi adicionado um módulo recetor de infravermelhos para permitir o controlo da salamandra através de um comando remoto, um sinalizador sonoro e um relógio de tempo real. Foi também adicionado um módulo de comunicação *Bluetooth* para permitir a comunicação com outros equipamentos, como um *smartphone*.

- **Ecrã *LCD***

A presença do ecrã permite ao utilizador ter acesso a informações úteis da salamandra como o nível de potência debitada, temperatura ambiente, horas, data e dia da semana, obter

alguns detalhes sobre algum possível mau funcionamento ou disponibilizar informação acerca de várias funcionalidades como o funcionamento programado ou outras que possam ser adicionadas no futuro. A Figura 52 mostra o aspeto da informação dada pelo ecrã ao utilizador.



Figura 52 - Informação disponibilizada pelo ecrã.

- **Botões de pressão**

Os 6 botões de pressão da interface estão associados a 6 portos digitais - configurados como entrada - do microcontrolador. Têm funções de início e paragem do processo de queima, alteração do modo de funcionamento do equipamento e incremento/decremento de variáveis.

Todos os portos digitais associados aos botões são asserridos a zero e foram configurados com *pull-up* interno. A resistência de *pull-up* tem valor variável entre os 20k Ω e os 50k Ω , dependendo do microcontrolador [46] e é acionada por *software*.

- **Comando remoto / recetor de infravermelhos**

O sensor recetor de infravermelhos foi adicionado por uma questão de comodidade, de maneira a igualar a oferta de muitos controladores atuais, existentes no mercado. É um elemento opcional – a sua ausência não afeta o comportamento do sistema - e está acompanhado de um comando transmissor de infravermelhos para permitir a comunicação. A Figura 53 mostra ambos os componentes bem como as ligações do recetor, modelo VS1838B.



Figura 53 - Conjunto de comando remoto emissor e recetor de infravermelhos.

Esta solução, com um custo total - comando e sensor de infravermelhos - a rondar os 1,20€, apresenta uma boa relação entre o custo e a comodidade oferecida ao utilizador e daí a sua integração neste projeto. A presença ou ausência de controlo remoto também não carece de nenhuma configuração especial no *firmware* pelo que o fabricante de equipamentos pode decidir acerca da sua inclusão a cada venda de forma individual.

Este protótipo também incorporou um bescuro que emite um sinal sonoro a cada clique num botão de pressão ou ação por intermédio do comando remoto e um módulo com relógio de tempo real *DS1302* para o controlador reter a informação horária e permitir a programação do funcionamento automático da salamandra. O conjunto tem um preço a rondar o 1€.

- **Módulo de comunicação *Bluetooth***

O módulo de comunicação por *Bluetooth*, cujo preço ronda os 5€, foi integrado no sistema como forma de comunicação complementar, que lhe acresce valor mas que é opcional. Em primeiro lugar porque nem toda a gente tem um *smartphone* ou está disposta a pagar mais para algo que pode não lhe ser essencial. Segundo, porque a utilização pressupõe o desenvolvimento de uma aplicação e esse desenvolvimento acarreta custos. A utilização não é exclusiva a *smartphones*. Qualquer aparelho com comunicação *bluetooth*, - computador, *tablet*, etc. – pode interagir com o controlador.

A Figura 54 mostra o módulo *bluetooth* utilizado neste projeto, o módulo *HC-05* que é um transceptor *TTL* – combina transmissor e recetor.

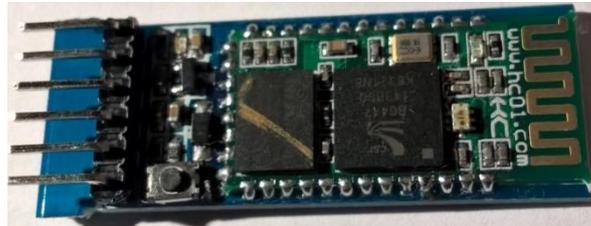


Figura 54 - Módulo transceptor Bluetooth.

- **Sensores de temperatura**

A leitura dos sensores de temperatura deste modelo de salamandra é feita através da ligação a duas portas analógicas de duas resistências *NTC* de $240\text{k}\Omega$ e $10\text{k}\Omega$ uma para monitorização da temperatura dos fumos de combustão e outra de monitorização da temperatura ambiente do local onde a salamandra se encontra, respetivamente. Para obter o valor de temperatura destas resistências foi utilizado o circuito cujo esquema é apresentado na Figura 55.

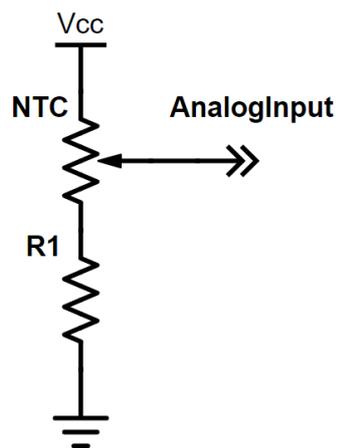


Figura 55 - Esquema elétrico do circuito de leitura dos sensores de temperatura.

A *NTC* é ligada em série com outra resistência, R_1 , de valor equivalente ($240k\Omega$ e $10k\Omega$ para estes sensores), criando um divisor de tensão aplicado numa entrada analógica do microcontrolador. A tensão aplicada, V_{cc} , é a mesma tensão de alimentação do microcontrolador. A variação do valor resistivo de uma *NTC* não é linear, obrigando a um tratamento da leitura do valor de tensão no porto analógico, que será abordado na secção 4.3.2.

4.1.3. Testes e resultados

Para comprovar o bom funcionamento do *hardware*, foi realizada uma série de testes. Nesta secção descrevem-se os trabalhos realizados com vista ao teste/verificação do bom funcionamento do *hardware* desenvolvido. Serão abordados o circuito de controlo de velocidade por ângulo de fase, o circuito de deteção de zero com aferições das variações de sinal correspondentes à deteção de zero no que diz respeito ao seu valor e frequência, medida a corrente à entrada do mesmo circuito de maneira a confirmar que esta se encontra dentro dos limites do optoacoplador e testada a conformidade do sinal de disparo do *TRIAC*. A temperatura lida pelo microcontrolador através dos sensores de temperatura foi comparada com uma medição através de um sensor calibrado. Foi também desenvolvida uma aplicação móvel para comprovar o funcionamento do módulo de comunicação *Bluetooth*.

- **Circuito de controlo de velocidade por ângulo de fase**

No teste de verificação do valor de corrente na entrada do circuito detetor de zero, anteriormente apresentado na Figura 50, o valor medido foi de $10,38\text{mA}$.

Embora não seja uma discrepância significativa, a diferença está também relacionada com o valor de tensão da rede ser superior ao utilizado nos cálculos. A corrente foi calculada para um valor de tensão eficaz de 230V , mas aquando a medição do seu valor real verificou-se um valor de 239V . Com este valor, cada resistência dissipa na realidade uma potência de:

$$P_R = 239 * \left(\frac{10,38 * 10^{-3}}{2} \right) \cong 1,24 [W]$$

O valor real está abaixo da potência nominal da resistência e não se desvia consideravelmente do valor calculado.

Após confirmação de que o limite de corrente no *led* e nas resistências é válido, seguiu-se o teste de funcionamento do circuito de detecção de zero utilizando um osciloscópio ligado à saída do circuito e a um transformador 230V/12V. O recurso ao transformador para este teste deve-se às limitações técnicas da ponta de prova utilizada que não suportava diretamente a tensão da rede, 230V. Ao utilizar o transformador, garantiu-se uma análise fiável do ponto zero; dependendo do sentido do enrolamento, as tensões de entrada e saída dos transformadores ou estão em fase ou desfasadas 180°. A Figura 56 apresenta os resultados do teste.

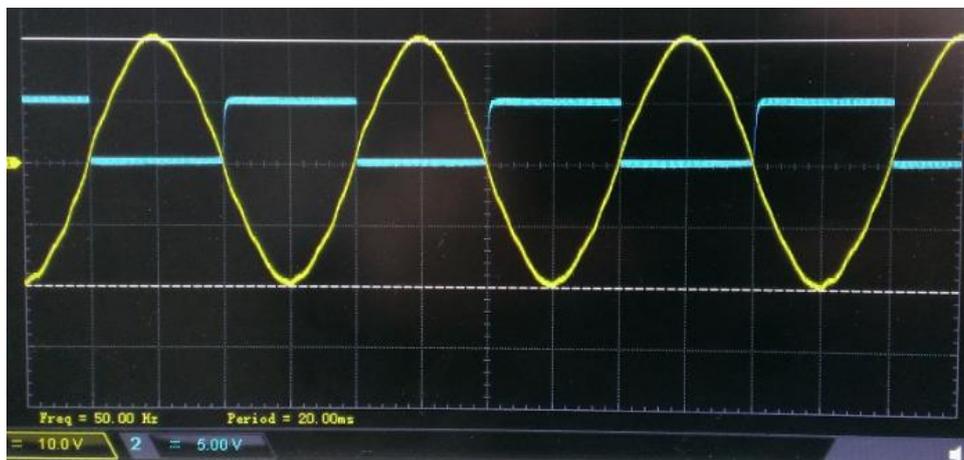


Figura 56 - Saída do circuito de detecção de zero.

A amarelo está representada a tensão da rede, reduzida pelo transformador, enquanto o gráfico a azul mostra a variação do nível de tensão à saída do circuito de detecção. Os resultados visíveis na Figura 56 provam que o circuito de detecção de zero está a funcionar com um desfasamento muito pequeno relativamente a cada passagem da tensão da rede por zero, momento onde é possível observar a saída do circuito a variar entre os 0V e os 5V, tal como era esperado. Estes resultados são melhores do que os inicialmente calculados.

A corrente mínima necessária no *led* foi verificada a partir de um ensaio que consistiu no aumento da tensão aos terminais de entrada do circuito da Figura 50 até que houvesse múltiplas leituras sequenciais do mesmo estado lógico, 1 ou 0, sendo o estado enviado

através da porta série do *Arduino*. Os resultados mostraram uma tensão de entrada de 6,9V, que resultou numa tensão aos terminais do *PC814* de 1V. Conseguimos assim encontrar a corrente por:

$$I_f = \frac{6,9 - 1}{23,5 * 10^3} \cong 0,251 [mA]$$

Para este valor de corrente no *led*, é possível calcular que a deteção de zero aconteça quando a senoide da tensão de entrada, 230V, atinge um valor instantâneo de:

$$V_{zerocross} = (23,5 * 10^3 * 0,251 * 10^{-3}) + 1 \cong 7,1 [V]$$

Este atraso na deteção de zero não tem consequências práticas no controlo dos motores.

Para completar os testes no circuito de controlo com variação de velocidade, foi feito um teste que consistia na atuação no *TRIAC* para alimentar o motor, cerca de 5ms após o controlador receber o sinal de passagem por zero. O objetivo do teste era apenas confirmar que a atuação num *TRIAC* era feita de forma correta, com o tempo de espera em sincronismo com a passagem por zero, com início durante um semi-ciclo e o fim próximo do final do mesmo semi-ciclo. Os resultados podem ser observados na Figura 57.

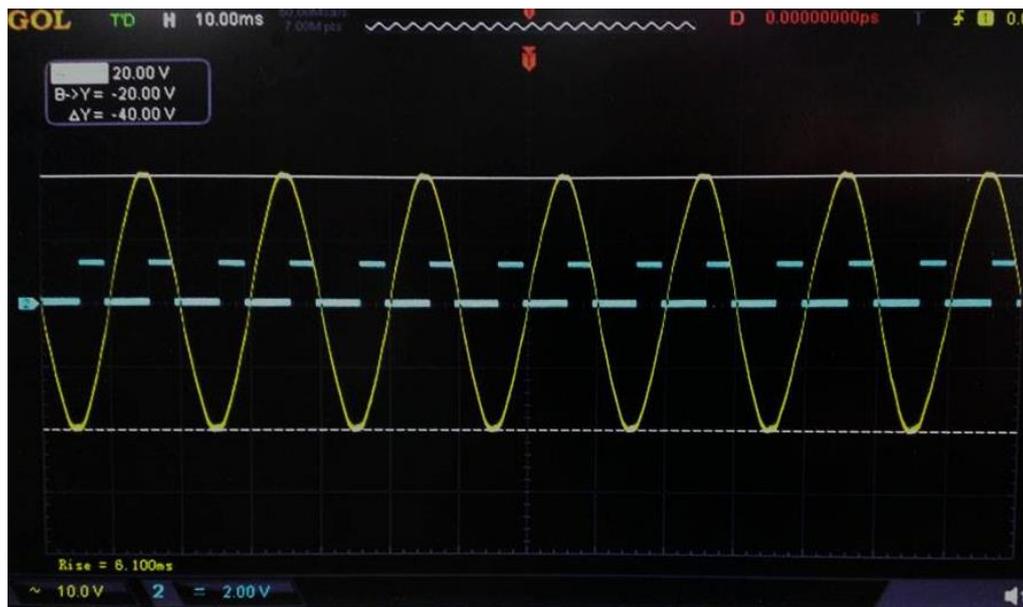


Figura 57 - Sinal de disparo de TRIAC em sincronismo com a deteção de zero.

Representado a amarelo aparece a tensão da rede, novamente reduzida através do transformador já referido, e a azul o sinal de disparo do *TRIAC*. Observa-se na imagem que o controlador dá o sinal de disparo praticamente a meio do ciclo de onda e terminando momentos antes do final do ciclo e da próxima passagem por zero, como pretendido, uma vez que foi programado um tempo de atraso de cerca 5ms.

Confirmado o bom funcionamento da sucessão de sincronismo com zero e sinal de atuação no *TRIAC*, foi testado todo o circuito no *TRIAC* escolhido, conforme descrito na secção 4.1.1, com um motor aplicado. Este teste permitiu observar a rotação do motor e a variação de velocidade que ocorria quando se alterava o valor do tempo de espera do disparo relativamente à deteção de zero.

Estes testes permitiram validar o correto funcionamento do *hardware* de controlo de velocidade dos motores ventiladores.

- **Controlo do motor de alimentação**

Os parâmetros usados para a alimentação da salamandra pelos controladores da MVM têm um tempo de alimentação variável – dependente do nível de potência selecionado - durante um período de 4 segundos. Para a utilização de um relé de contacto mecânico, o período e os tempos de alimentação foram ajustados para intervalos mais longos, proporcionais aos dos controladores existentes, de maneira a evitar um desgaste precoce do mecanismo de contacto e a diminuir a frequência de comutação deste, geradora de ruído audível que se torna incómodo. O motor alimentador mostrou-se funcional quando testado com o módulo de relé anteriormente referido, no entanto, o restante sistema apresentava anomalias no funcionamento.

No início dos testes com o controlador instalado na salamandra, invariavelmente o *LCD* produzia caracteres típicos de um sistema corrompido ao final de algum tempo. Uma imagem desse estado pode ser vista na Figura 58.



Figura 58 - Ecrã corrompido pela comutação do motor de alimentação.

Mesmo com o *LCD* ilegível o controlador continuava a operar de acordo com o expectável. Dado que o *LCD* é bastante sensível a flutuações de tensão e como estamos a lidar com comutações de carga com potência muitas vezes superior à do ecrã poderia haver alguma interferência, sobretudo tendo em conta que neste protótipo a disposição e comprimento dos cabos de ligação e o espaço entre os elementos com diferentes níveis de tensão permitiam uma maior exposição a perturbações como interferências eletromagnéticas (*EMI*) radiadas.

Após análise da tensão de alimentação do ecrã recorrendo a um osciloscópio foi possível verificar que a alimentação do ecrã (5V) apresentava de forma frequente um fenómeno transitório e que esta anomalia coincidia com a comutação do relé do motor alimentador da salamandra. Na Figura 59 pode ser observado um registo da linha de 5V, capturado pelo osciloscópio, num momento de comutação do relé do motor alimentador.

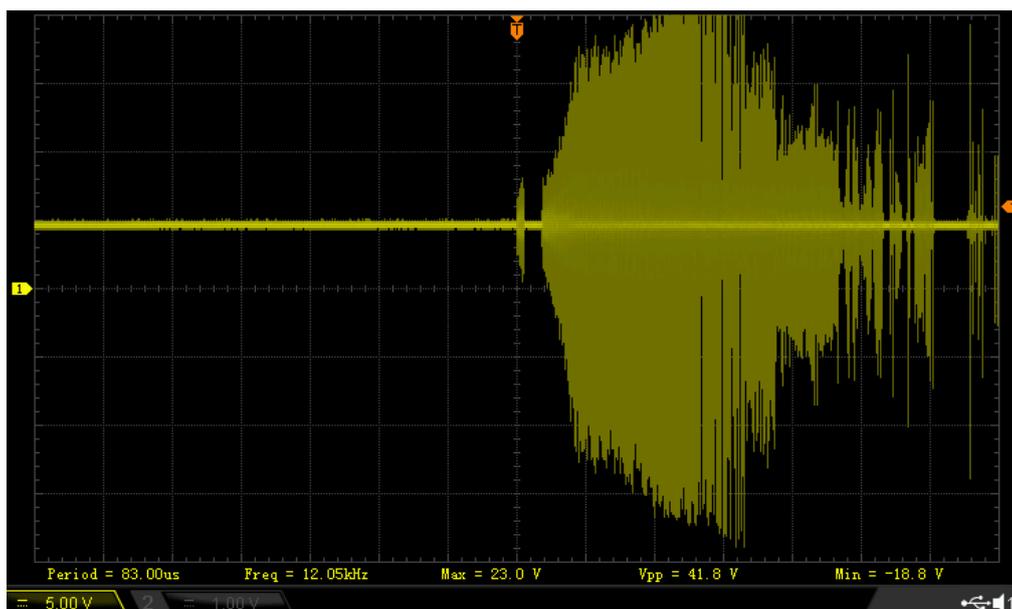


Figura 59 - Registo de efeito da comutação do relé na alimentação de 5V.

Os picos de tensão registados são demasiado elevados, chegando a ultrapassar os 20V, um valor quatro vezes superior à tensão nominal. Cada comutação do motor de alimentação provocava um transitório forte o suficiente para corromper os dados do *LCD*. Apesar de o microcontrolador partilhar a alimentação, não há evidências de efeitos destas variações de tensão no seu funcionamento. No entanto, estes picos de tensão podem facilmente provocar danos, comprometendo a sua fiabilidade e longevidade.

Comprovada a relação da comutação com os problemas no sistema de visualização, teria que se testar para aferir da existência de ruído em situação de funcionamento com carga e em vazio.

Foram mantidos todos os elementos da salamandra ligados ao controlador com exceção do motor alimentador, ficando o programa a correr com a comutação do relé sem carga. Ao fim de mais de 1 hora não foi registada nenhuma anomalia observável diretamente – corrupção no ecrã – ou medida com o osciloscópio, o que provou a origem do problema na comutação do motor de alimentação através do relé.

O motor é uma carga indutiva e, como tal, não permite que o valor da corrente se altere instantaneamente. No entanto, é isso que o relé faz quando abre e fecha os contactos, interrompendo o circuito e causando uma perturbação que é captada pela bobine do relé e consequentemente propagada para a alimentação de 5V. Aquando da comutação dos contactos é criado um pico de tensão e um arco eléctrico entre eles, gerados pela energia armazenada no motor – que inclusivamente, por breves momentos, se torna um gerador de energia pois não se imobiliza de imediato.

A solução para comutar o motor de forma linear foi a utilização de um opto-isolador com circuito de deteção de passagem por zero integrado como o *MOC3041*. Este circuito apenas conduz quando a tensão da rede se aproxima do valor zero, independentemente do momento em que o controlador dê o sinal de comando. O mesmo acontece quando o sinal de comando deixa de existir, uma vez que o integrado só inibe a alimentação do motor na passagem por zero seguinte ao término do sinal de comando. Desta forma o arranque e paragem do motor são bastante suaves, evitando flutuações e picos de tensão. Tem ainda uma vantagem para um possível cliente, que deixa de ouvir qualquer ruído ao proveniente do controlo do motor de alimentação como acontecia no caso do relé cujo movimento dos contactos mecânicos é audível.

O circuito de controlo do motor foi o recomendado pelo fabricante do *MOC*, segundo informação disponibilizada na ficha técnica, onde está incluído um circuito de *snubber* idêntico ao utilizado no controlo dos ventiladores.

A placa desenvolvida para testar o circuito é apresentada na Figura 60.



Figura 60 - Acionamento de motor de alimentação, em protótipo, através de opto-isolador com deteção de passagem por zero.

Para comprovar o bom funcionamento do sistema, a salamandra ficou em funcionamento durante várias horas e simultaneamente a alimentação de 5V era monitorizada pelo osciloscópio – configurado para detetar qualquer pico de tensão superior a 5,1V. Durante o teste não houve qualquer registo de interferência na linha de alimentação de 5V nem houve registo de qualquer anomalia no ecrã *LCD* até à data de escrita deste relatório.

- **Aquisição de sinal – sensores de temperatura**

A análise ao funcionamento dos sensores de temperatura foi feita através do envio, através da porta série, dos valores de temperatura e tensão reportados pelo controlador comparando-os com os valores medidos por um equipamento de referência, calibrado, de forma a aferir acerca da sua fiabilidade.

A Figura 61 e a Figura 62 mostram os resultados da análise aos sensores de temperatura de fumos e ambiente, respetivamente.

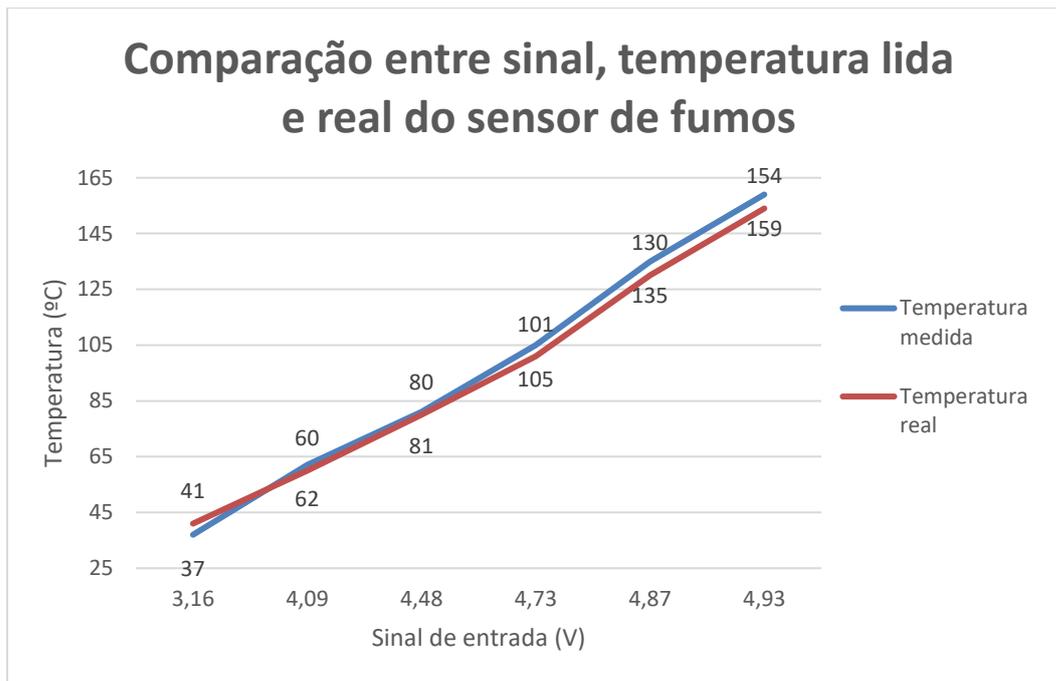


Figura 61 - Comparação entre sinal, temperatura lida e real do sensor de fumos.

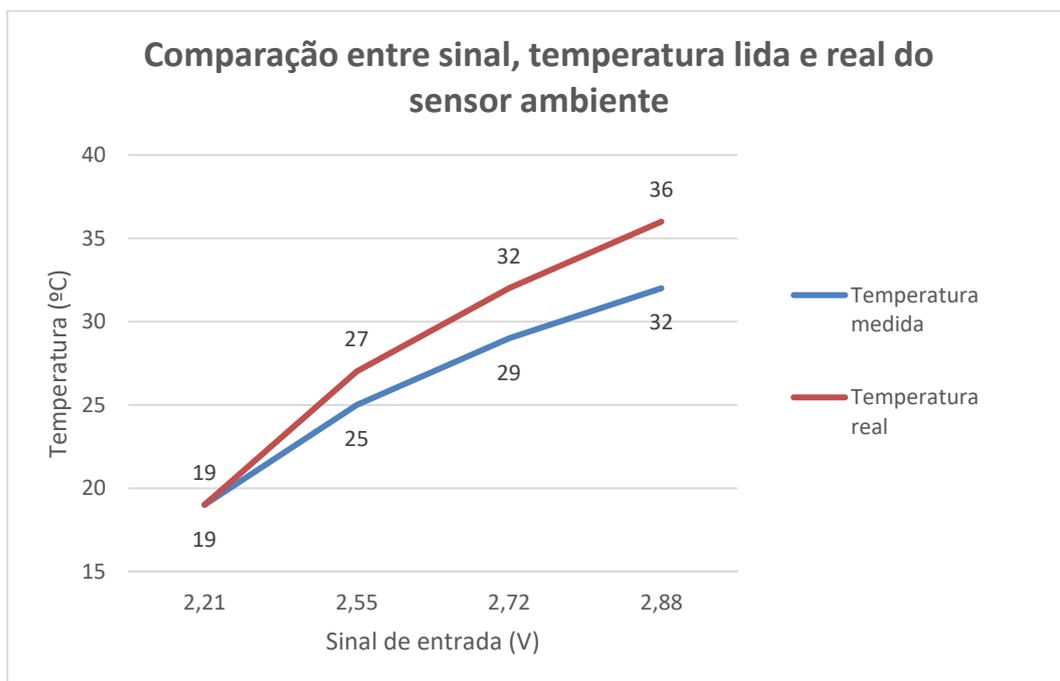


Figura 62 - Comparação entre sinal, temperatura lida e real do sensor ambiente.

Os resultados indicam uma leitura correta por parte do controlador não tendo sido verificadas discrepâncias consideráveis entre o valor medido e o valor real para a gama de

medição do teste. O sensor de temperatura ambiente revelou uma margem de erro superior ao sensor de temperatura de fumos. Esta diferença mais acentuada deve-se à constituição física que lhe confere uma resistência térmica superior – o sensor está envolvido por material plástico, ao contrário do sensor de fumos cujo corpo envolvente é metálico. Por este motivo, também foi mais difícil, durante o teste, garantir a homogeneidade térmica no sensor de temperatura ambiente, fator que pode ser motivo de erro de leitura. Uma vez que estes são os sensores utilizados pela MVM, não foi ponderada uma troca por outro tipo de sensores, nomeadamente no que diz respeito ao sensor de temperatura ambiente.

- **Comunicação por *Bluetooth***

O teste de comunicação por *Bluetooth* foi feito recorrendo a uma aplicação que serve de interface com o controlador. Esta aplicação foi desenvolvida com recurso ao programa *Visual Studio 2015*, a exemplos de aplicações e tutoriais disponibilizados pela *Microsoft*. Por utilizar as mais recentes ferramentas, a aplicação pertence à *Windows Universal Platform*, o que significa que é capaz de correr em todas as versões do sistema operativo *Windows 10*; em computador, *tablet* ou *smartphone*.

O teste consistiu no controlo da salamandra através da aplicação utilizando um *smartphone*, algo que se mostrou funcional e mais prático que a utilização do comando remoto pois o *smartphone* não necessita de ser apontado em direção à salamandra como o comando. A Figura 63 mostra a interface da aplicação, onde é possível verificar a existência de 6 botões tal como os utilizados na placa de interface ou no comando remoto.

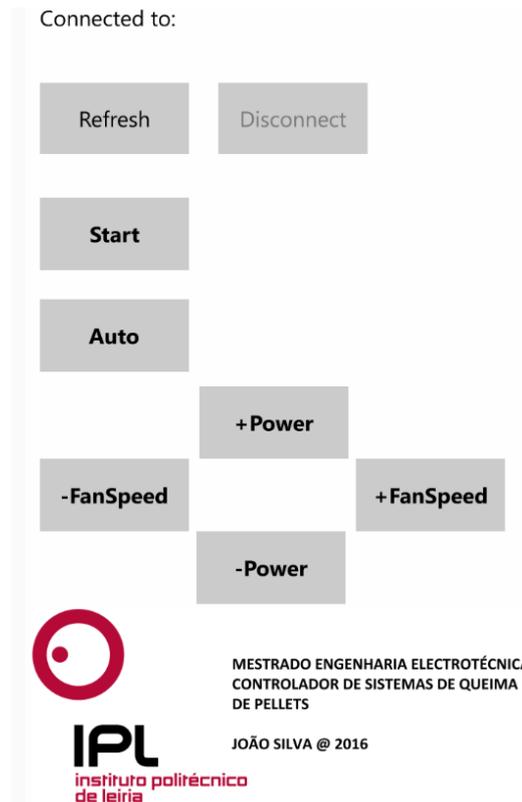


Figura 63 - Interface da aplicação móvel para Windows 10, com comandos por Bluetooth.

4.2. Controlador – *Hardware* em placa única

Os ensaios ao controlador realizados na secção anterior procuraram, além de corrigir eventuais anomalias, comprovar a fiabilidade técnica do equipamento.

Como o conjunto de *hardware* utilizado nos ensaios não apresentou problemas ou falhas de ordem técnica ao longo das horas, ciclos de teste e parametrização a que foi sujeito, considerou-se estar em condições de avançar com o desenvolvimento de um sistema integrado.

A integração do sistema de controlo podia ser feita de duas maneiras: a primeira, mais comum, agregando todos os componentes eletrónicos numa única placa, a segunda, aproveitando o conceito das *shields* do *Arduino* e tornar o próprio controlador numa *shield*, separando o *hardware* desenvolvido no projeto da plataforma de desenvolvimento que

agrega o microcontrolador. Apesar de ser uma solução pouco vulgar, é sustentada pelo fator financeiro: o custo de produção inferior.

Uma placa de desenvolvimento equivalente ao *Arduino Mega*, como a utilizada no protótipo do controlador, pode comprar-se por cerca de 7€ enquanto que comprar apenas o microcontrolador, *ATmega2560*, custa cerca de 10€ e exige normalmente volumes mínimos de compra entre as 1000 e as 1500 unidades. Para comprar uma quantidade menor o preço unitário sobe para cerca de 15€. A este preço ainda teríamos que adicionar o preço de um módulo de comunicação para programar o microcontrolador (cerca de 2€), oscilador e condensadores que apesar de terem um custo reduzido - na ordem dos cêntimos - acabam por ter o seu peso com o acumular de unidades fabricadas. Futuramente, caso se pretenda avançar para um volume de produção, o preço da placa com todos os componentes integrados pode tornar-se mais competitivo.

Finalizados os testes de *hardware* no protótipo, avançou-se para o desenvolvimento das placas e dos seus esquemas elétricos. Para tal, foi utilizado o *software* gratuito *DesignSpark PCB*. Este *software* permite selecionar os componentes diretamente de uma loja online, importando o *footprint* (desenho da colocação do componente na placa de circuito impresso) específico.

O controlo do equipamento ficou a cargo da mesma placa *Arduino Mega*, que tem como “*shield*” a placa desenvolvida neste projeto. O *LCD*, os botões de pressão e o recetor infravermelhos ficaram integrados numa placa à parte, exclusiva à interface do equipamento. O módulo de *Bluetooth* e o módulo de relógio de tempo real podem ser ligados à placa principal por intermédio de conectores dedicados.

Nesta placa de interface deveria também ter sido integrado um sinalizador sonoro para emitir um *feedback* de uma entrada seja de um botão, sinal do comando ou comunicação *Bluetooth*, tal como no protótipo. O sinalizador foi substituído por um *led* que emite luz a cada entrada do utilizador como sinal de *feedback*.

A placa de controlo tem as mesmas dimensões do controlador utilizado pela MVM de modo a ser possível trocar facilmente o controlador que existe nas salamandras comercializadas pela empresa pela placa desenvolvida neste projeto. Não foram tidas em consideração as dimensões para a criação da placa de interface pois nos modelos comercializados por outras marcas estas estão envolvidas numa caixa de plástico.

Para esta placa de controlo foram adicionadas algumas funcionalidades que poderão ser úteis no futuro e obrigariam a uma revisão da placa caso não fossem já contempladas:

- **Adicionada saída para relé de bomba de água para águas sanitárias e aquecimento central** – sabendo que muitas salamandras têm uma bomba de água para aquecimento de águas sanitárias era incoerente desenvolver uma placa e não preparar o sistema para controlar este tipo de equipamentos. Mais ainda, as caldeiras a *pellets* têm um processo de queima muito semelhante ao das salamandras e uma ligeira modificação no *firmware* do controlador permite-lhe funcionar em ambos os sistemas. A bomba de fluido térmico que existe nas caldeiras também pode ser controlada a partir deste relé.

- **Adicionadas 2 ligações analógicas na ligação à placa de interface** – a placa de interface do controlador está conectada com a placa de controlo através de uma ficha de 20 pinos. Para a interface utilizada no protótipo não são necessários todos os pinos que a ficha disponibiliza. No entanto, o controlador não deve estar limitado à utilização desta interface. A adição de duas ligações aos portos analógicos do microcontrolador permite por exemplo substituir a placa de interface por outra que apenas tenha dois potenciômetros que regulem a potência e a velocidade do ventilador ambiente. O número de ligações a portos digitais também permite substituir a interface por um ecrã táctil. A placa de controlo foi desenvolvida para estar preparada para receber vários tipos de interface necessitando apenas de alterações no *firmware*.

- **Adicionadas duas interrupções na alimentação de potência da placa** – as duas interrupções podem ser usadas com proteções térmicas ou pressostato. A abertura destes contactos interrompe a alimentação de toda a parte de potência da placa – motores e resistência.

Estas adições visam preparar as placas para futuros desenvolvimentos, não a limitando a um só equipamento de queima de *pellets* ou a uma só opção de interface. A Figura 64 mostra o conjunto das placas de controlo e de interface do controlador, bem como o cabo de ligação entre elas.

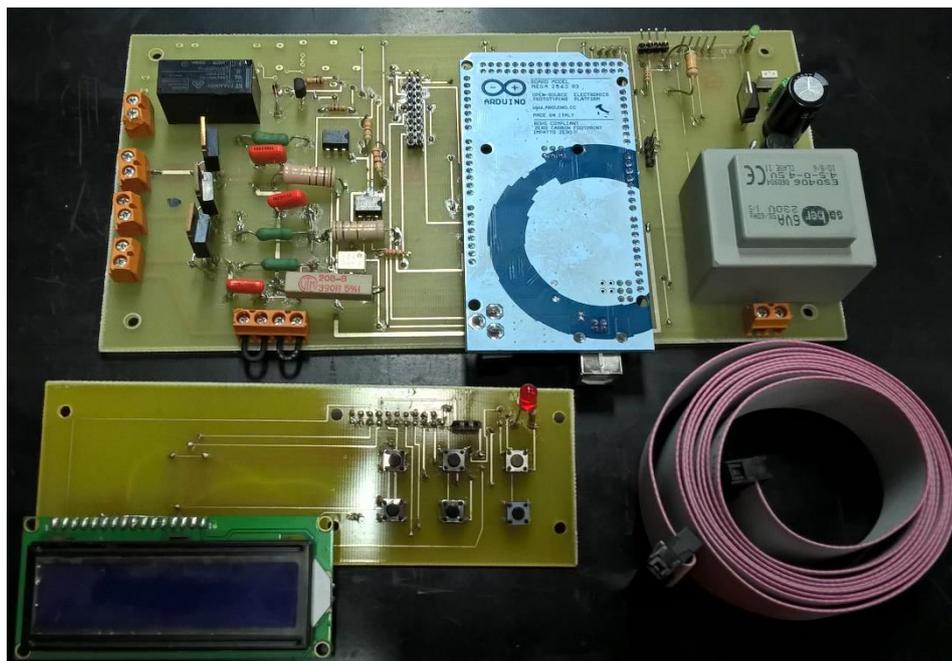


Figura 64 - Placas constituintes do controlador desenvolvido.

Para o sistema integrado foi necessário desenvolver um circuito de alimentação da eletrónica de controlo, que era até então feito através de uma porta *USB* de um computador portátil. Esta integração motivou também alterações no circuito de deteção de zero, que tiveram como objetivo melhorar alguns aspetos que, apesar de serem tecnicamente viáveis, podiam ser melhorados por motivos de segurança e até económicos, recordando que as resistências do circuito detetor de zero têm perdas de mais de 1W cada. Estas alterações relativamente ao protótipo são apresentadas na secção seguinte.

Aquando do desenvolvimento da placa, para a colocação dos seus componentes foi necessário ter em consideração a facilidade de instalação no equipamento e interligação aos componentes do equipamento de maneira a facilitar o processo e a minimizar erros de produção/montagem. Houve indicação por parte da empresa de que seria vantajoso ter fichas de ligação específicas para cada um dos componentes, que impossibilitassem uma instalação incorreta.

4.2.1. Alimentação de controlo

Durante a fase de testes e desenvolvimento do projeto a eletrónica de controlo foi alimentada através de uma ligação a um computador por uma porta *USB* que consegue fornecer até 500mA a 5V. A placa *Arduino* está preparada para ser alimentada diretamente a partir destas portas pelo que se tornou na solução mais rápida e prática, mais ainda porque a própria programação do microcontrolador é feita através desta ligação. Para uma solução final, utilizar uma porta *USB* de um computador para alimentar a eletrónica de controlo não faz sentido. Acrescentar um transformador externo ligado à rede de 230V que apenas alimente a tensão de 5V também não se torna prático e acrescenta complexidade indesejada na montagem da máquina.

Para dimensionar corretamente a alimentação do controlador é necessário perceber qual o seu consumo. A medição de consumo foi feita com o relé ativo e o brilho e contraste do ecrã no máximo de maneira a que o valor medido fosse o máximo necessário. Esta situação só se verifica quando o relé está energizado, ou seja, no início do processo de queima, quando a resistência está a aquecer. Arredondando os valores verificou-se que a alimentação da parte de controlo necessita de conseguir fornecer cerca de 1W de potência a 5V, o que equivale a 200mA. Como termo de comparação, foi feita uma medição também no estado normal de operação, sem o relé energizado, onde se verificou que o consumo de corrente reduz para os 102mA, indicando 0,511W, ou seja, praticamente metade dos valores máximos do conjunto *hardware* utilizado neste controlador.

A maneira mais rápida de solucionar a alimentação do microcontrolador sem qualquer ligação externa é utilizar um carregador *USB* e integrá-lo no desenho da placa final seja como módulo – tipo *shield* – ou integrando por completo todo o seu circuito elétrico na placa. Estes carregadores têm um custo aproximado de 1,5€.

Há ainda uma segunda opção que embora seja um pouco mais dispendiosa torna todo o projeto mais eficiente e fiável. Como referido anteriormente, o controlador irá permanecer instalado dentro da estrutura salamandra, local onde se atingem temperaturas na ordem dos 40°C. Os carregadores *USB* e os módulos de alimentação são bastante ineficientes e, como tal, aquecem bastante. Uma utilização prolongada em ambientes com temperaturas elevadas como é o caso do interior da estrutura de um equipamento de queima de *pellets* pode revelar-

se perigoso ou mesmo comprometer a fiabilidade do controlador. Além disso, o valor de tensão tem sempre presente um elevado nível de ruído, como mostra a Figura 65.

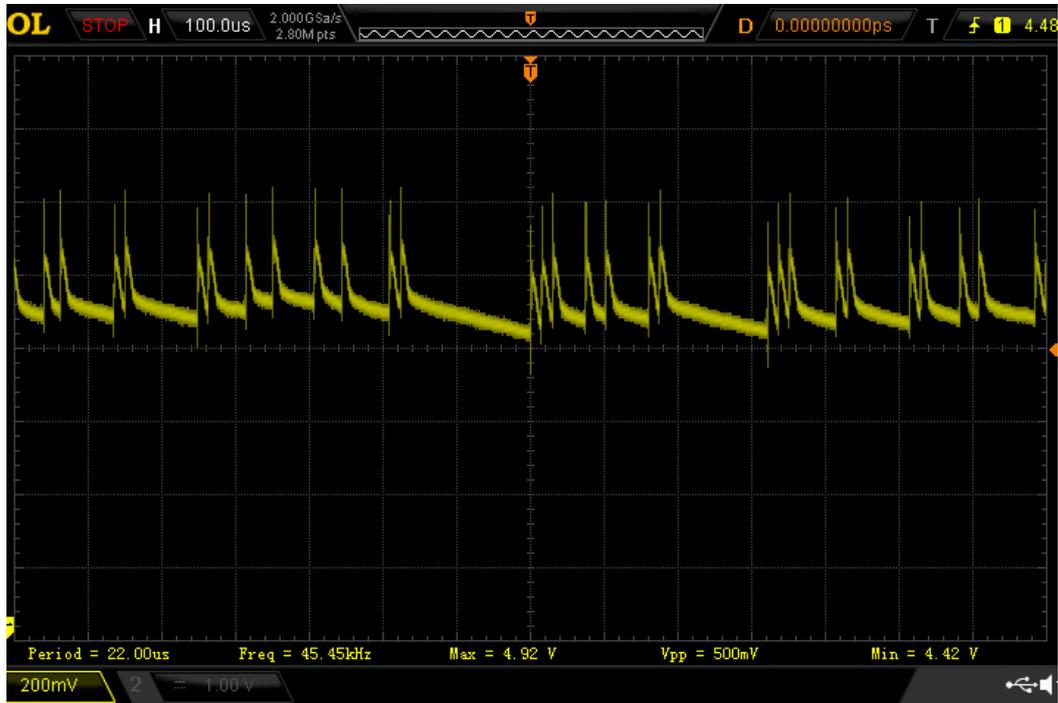


Figura 65 - Análise de ruído em carga de um carregador USB.

A análise da Figura 65 foi feita no protótipo de testes a fim de validar a ideia de integração no controlador final. Pelos resultados observáveis na Figura, esta solução não foi considerada satisfatória.

Um transformador de montagem em placa de circuito impresso, além de permitir uma solução de alimentação integrada, mais eficiente e segura, permite também utilizar a tensão do secundário no circuito de deteção de zero e assim eliminar as resistências de 2W de potência utilizadas. Para o desenvolvimento de uma solução integrada final esta mostrou-se a opção com o melhor compromisso apesar de ser mais dispendiosa. Foi utilizado um transformador de 230V/9V com uma potência de 5VA que no mercado tem um custo unitário de 5€. Podia ter sido utilizado um transformador com uma tensão menor no secundário para dissipar menos potência, mas estes têm um custo superior – transformador de 230V/8V de 4VA, p. ex., tem um preço superior a 8€. A Figura 66 mostra o diagrama de blocos dos

circuitos de detecção de zero e de alimentação redesenhados para a integração com utilização de um transformador.

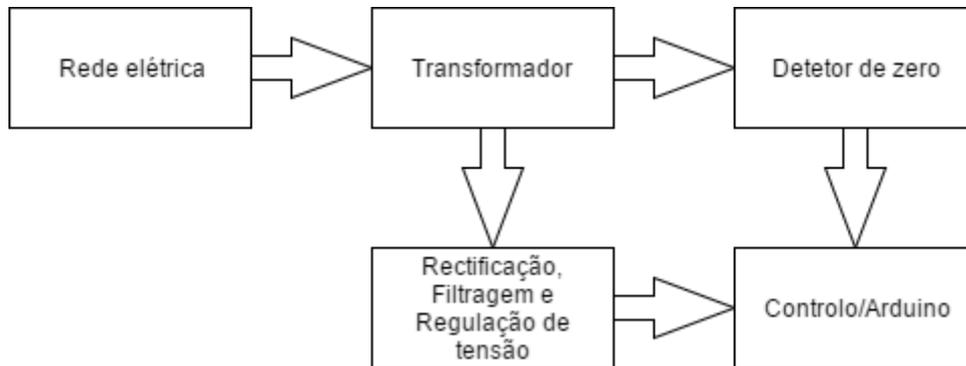


Figura 66 - Diagrama de blocos dos circuitos de alimentação e detecção de zero com a placa de controlo/Arduino.

A Figura 67 mostra o esquema elétrico redesenhado do circuito de detecção de zero recorrendo à senoide de tensão do secundário do transformador de montagem em placa de circuito impresso.

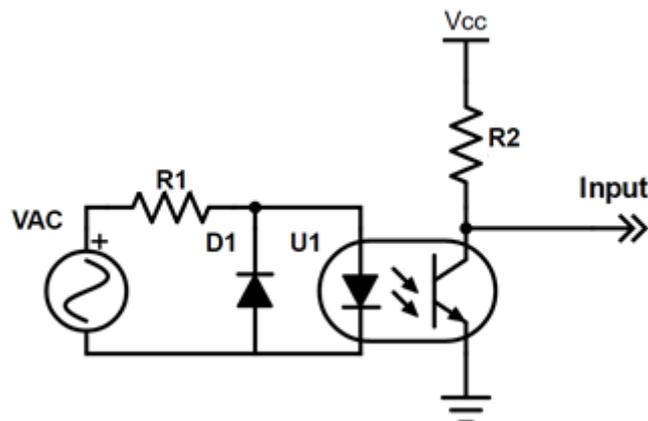


Figura 67 - Esquema de circuito de detecção de zero com recurso a transformador.

Fazendo os cálculos para o dimensionamento do circuito de detecção de zero considerando o transformador com uma tensão no secundário de 9VAC e uma tensão aos terminais do diodo - segundo a ficha técnica - $V_f = 1,2V$ para $I_f = 20mA$, de maneira a limitar a corrente no *led* do opto-acoplador, temos:

$$R = \frac{9 - 1,2}{20 * 10^{-3}} \cong 390 [\Omega]$$

Com este valor de resistência a corrente máxima no *led* mantém-se abaixo do valor máximo indicado pelo fabricante, 50mA:

$$I_{f \max} = \frac{(\sqrt{2} * 9) - 1,2}{390} \cong 29,4 [mA]$$

Uma resistência de 390Ω satisfaz a limitação de corrente para o *led* do opto-acoplador. Por se saber à partida que o consumo de potência por parte da eletrónica de controlo é percentualmente reduzido em relação à potência nominal do transformador - o que leva a um aumento de tensão aos terminais do secundário - foi utilizada uma resistência de valor superior, 680Ω.

Para este circuito, o integrado identificado na Figura 67 como U1 foi alterado para o *PC817* por dificuldades na aquisição do modelo utilizado no circuito anterior. Como consequência dessa alteração teve que ser colocado um díodo externo, D1, apesar de as suas características elétricas não diferirem do *PC814*.

Para o circuito de alimentação do controlador, a tensão do secundário do transformador tem que ser retificada, filtrada e de seguida regulada. A retificação da onda sinusoidal do transformador é feita através de uma ponte de díodos (custo de 0,36€).

As expressões que se seguem resultam da relação que se verifica entre a carga armazenada Q [C] num condensador com capacidade C [F], corrente constante de carga/descarga I [A], durante um tempo ΔT [s] e respetiva variação de tensão ΔV [V].

$$Q = C * V$$

$$I * \Delta T = C * \Delta V$$

A capacidade do condensador, C , é escolhida em função da corrente que o circuito tem de fornecer à carga I_{DC} (corrente de descarga do condensador) e da máxima variação de tensão admissível (V_{ripple}). ΔT é o período da onda retificada, que será de 10ms uma vez que a onda sinusoidal tem uma frequência de 50Hz (período de 20ms).

Usando as expressões anteriores, resulta:

$$\Delta V = V_{ripple} = \frac{I_{DC} * \Delta T}{C} C * \Delta V \leftrightarrow C = \frac{I_{DC} * \Delta T}{V_{ripple}}$$

O secundário do transformador tem uma tensão de 9VAC, o que significa que o seu valor máximo será de:

$$9 * \sqrt{2} \cong 12,73 [V],$$

tensão à qual temos que retirar 1,4V devido à tensão nos terminais dos díodos

$$12,73 - 1,4 = 11,33 [V]$$

O regulador de tensão utilizado foi o *LM7805* que, segundo a sua ficha técnica, necessita de ter pelo menos 7V ($V_{drop} = 2V$) na entrada para conseguir produzir uma tensão de saída regulada de 5V. Assim, conclui-se que a tensão de *ripple*, para que o circuito funcione corretamente, não pode ser superior a:

$$11,33 - 7 = 4,33 [V]$$

O transformador utilizado tem uma potência de 5VA, o que corresponde a uma corrente máxima de:

$$P = V * I$$

$$5 = 9 * I$$

$$\frac{5}{9} = I \cong 0,556 [A]$$

A partir destes cálculos é possível calcular a capacidade mínima do condensador de filtragem através da fórmula inicial:

$$C = \frac{0,556 * 0,01}{4,33} = 1284 [uF]$$

Conclui-se que um condensador com um valor de 1284 *uF* será o mínimo para o funcionamento do circuito. A esta capacidade corresponderia uma tensão de *ripple* de 4,33V para o consumo de corrente máximo admissível pelo transformador considerado. De maneira a diminuir o valor de *ripple*, foi utilizado um condensador de capacidade superior, de valor 2200uF.

O circuito final de alimentação pode ser visto na Figura 68.

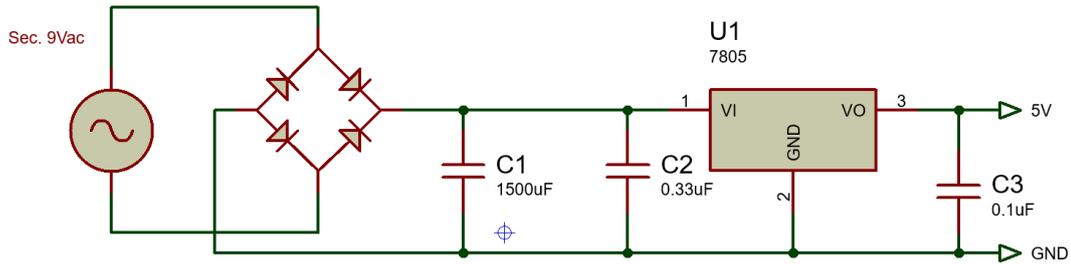


Figura 68 - Esquema elétrico do circuito de alimentação do controlador.

Os condensadores C2 e C3 têm um custo de 0,10€ e 0,07€ respectivamente. Foram adicionados ao circuito da Figura 68 por recomendação do fabricante do regulador de tensão, *LM7805*, que tem um custo de cerca de 0,40€. Para facilitar a montagem e por estar em paralelo com o condensador de filtragem, C2 foi ignorado uma vez que o valor de C1 utilizado é superior à soma dos valores C1 e C2 do esquema da Figura 68.

4.2.2. Testes e resultados

Após a fabricação das placas, foi necessário confirmar o bom funcionamento do circuito detetor de zero e de alimentação. A análise ao circuito de detecção de zero foi feita com a alimentação ligada à placa recorrendo a um osciloscópio para verificar o sinal à saída do circuito e medida a tensão na resistência de maneira a calcular a corrente que passa no *led*. Foi também aferida a tensão de *ripple* à entrada e à saída do regulador de tensão, medida a sua temperatura e verificou-se a necessidade de utilização de um dissipador.

A Figura 69 mostra a medição do sinal de detecção de zero.

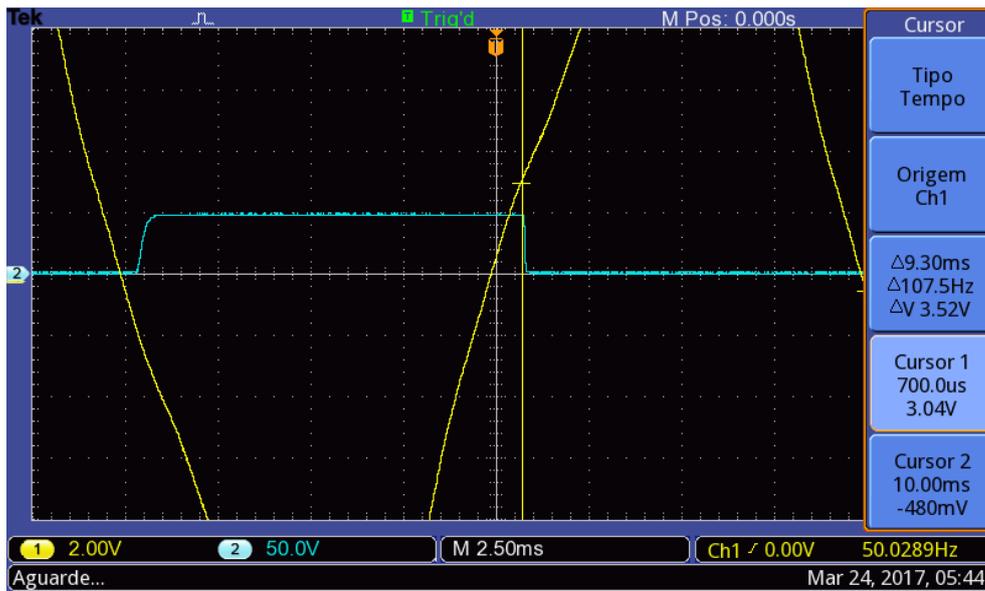


Figura 69 - Sinal de saída do detetor de passagem por zero.

Os resultados da análise no osciloscópio estão de acordo com o esperado. A cada passagem por zero o sinal do circuito alterna entre os 0V e os 5V. Obtemos uma onda quadrada com um período de 20ms, 50Hz de frequência. Na Figura 69 é possível ainda observar que a saturação do transistor do optoacoplador está a ser feita para um nível de tensão de entrada de 3,04V.

O valor medido de tensão na resistência de 680Ω foi de 10,04V de tensão eficaz. Concluimos que a corrente eficaz nela e no *led* do optoacoplador é de:

$$I_{rms} = \frac{10,04}{680} \cong 14,7 [mA]$$

Para analisar o circuito de alimentação da parte de controlo ligou-se a placa à alimentação principal de 230V e com o osciloscópio mediu-se a entrada do regulador de tensão. A Figura 70 representa o resultado dessa observação.

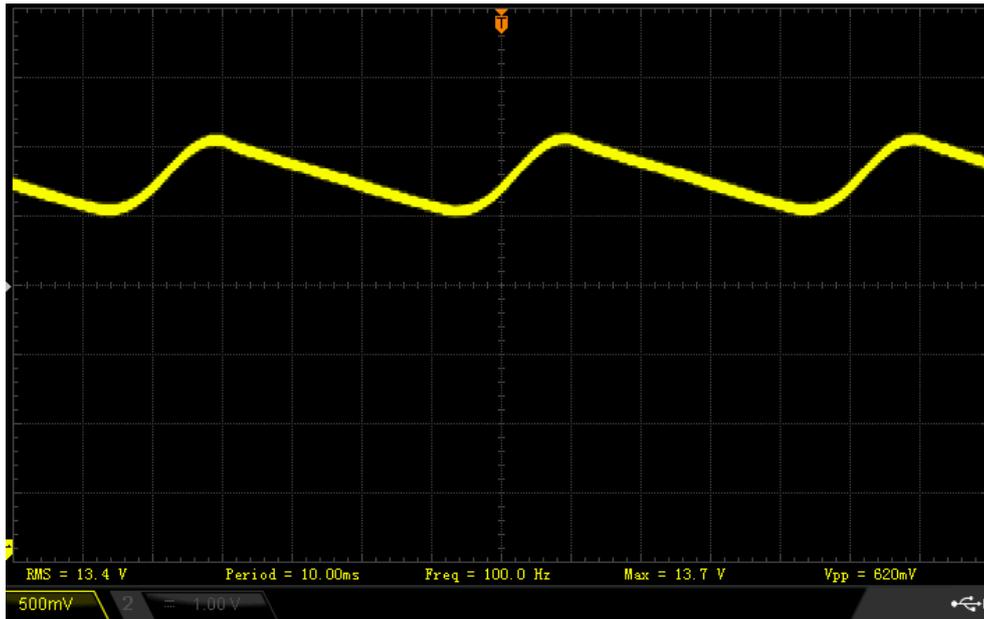


Figura 70 - Análise de tensão à entrada do regulador após retificação e filtragem.

Na Figura 70 é possível observar a tensão à entrada do regulador de tensão do circuito de alimentação, já retificada e filtrada, de valor 13,4V. Os valores são mais elevados do que o esperado, o que se deve ao facto do consumo de corrente da parte de controlo ser baixo relativamente à capacidade do transformador, o que faz com que a tensão aos terminais do secundário aumente. Verificamos também que o valor de *ripple* da tensão de entrada é de 620mV o que é suficiente para garantir a estabilidade da saída do regulador de tensão para estes níveis de tensão de entrada.

A componente AC da saída de tensão do regulador também foi analisada com recurso a um osciloscópio e está representada na Figura 71.

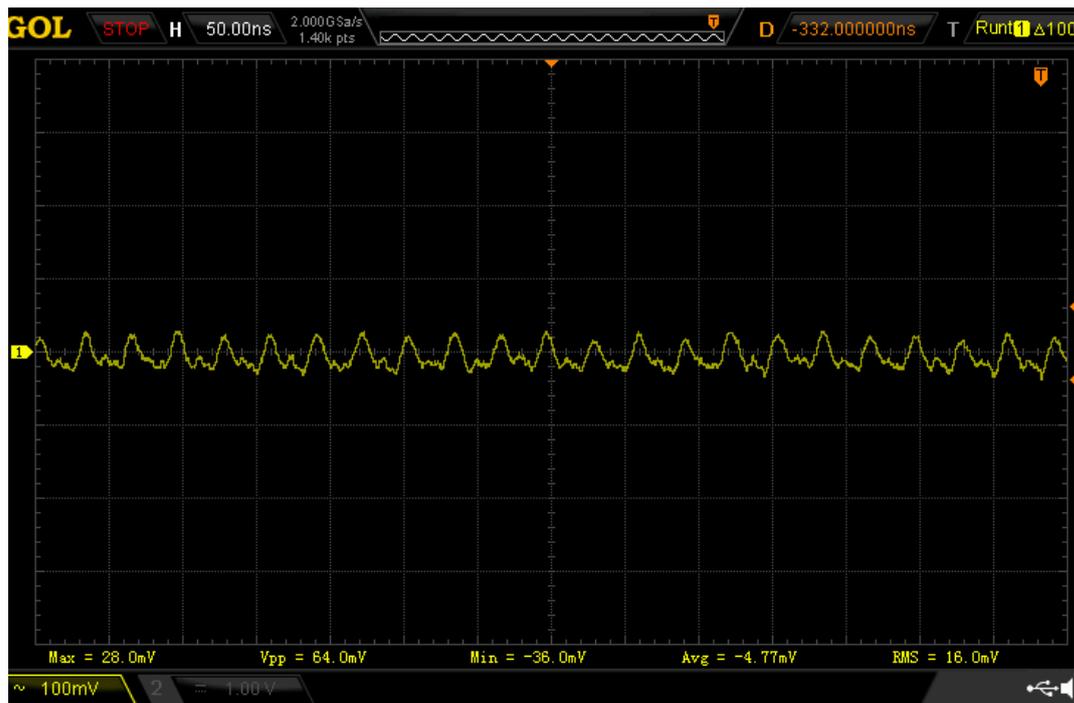


Figura 71 - Análise da componente AC da tensão de saída do regulador de tensão.

É possível verificar uma variação de tensão na ordem dos 64mV, o que é um valor bastante aceitável para uma tensão de 5V.

Tal como nos *TRIACs*, também no regulador de tensão é necessário ter atenção à potência dissipada. A sua ficha técnica informa uma resistência térmica, $R_{\theta JA} = 65^{\circ}C/W$ e $R_{\theta JC} = 5^{\circ}C/W$, sendo $R_{\theta JC}$ a resistência térmica entre a junção e a cápsula e $R_{\theta JA}$ a resistência térmica entre a junção e o meio ambiente.

A potência dissipada pelo regulador é dada pela fórmula:

$$P = (V_{in} - V_{out}) * I_{out}$$

Para um valor de tensão eficaz de 13,4V e considerando a corrente máxima necessária para alimentar o controlador de 200mA, a potência é dada por:

$$P = (13,4 - 5) * 0,2 = 1,68 [W]$$

A relação entre a temperatura da junção e a potência dissipada é dada por:

$$T_j - T_a = (R_{\theta JA} + R_{\theta JC}) * P_j$$

No interior da salamandra de testes, a temperatura atinge os 40°C mas apenas quando está em funcionamento, o que não coincide com o momento de maior requisito energético que o regulador de tensão irá atingir. Nesta altura, considera-se uma temperatura ambiente (T_a) de 25°C, ainda que seja um valor manifestamente elevado para a estação do ano em que a salamandra é suposta funcionar. Assim, temos segundo a equação anterior:

$$T_j = ((65 + 5) * 1,68) + 25 = 142,6 [^{\circ}C]$$

Esta situação é apenas temporária, enquanto o processo de queima está a iniciar e o relé tem que ser energizado para a resistência aquecer. Para comprovar os cálculos, foram feitos ensaios na salamandra, onde se verificou uma temperatura de 132°C a uma temperatura ambiente de cerca de 19°C.

Durante o processo de queima ou quando a salamandra está parada, o consumo de corrente baixa para os 102mA, o que se traduz numa potência dissipada pelo regulador de:

$$P = (13,4 - 5) * 0,102 \cong 0,86 [W]$$

Metade da potência significa também metade do calor produzido pelo regulador, mas nesta altura é necessário considerar o pior caso, onde a salamandra está em funcionamento e a temperatura ambiente atinge 40°C. Para estas condições, temos:

$$T_j = ((65 + 5) * 0,86) + 40 = 100,2 [^{\circ}C]$$

Se a temperatura atingir os 40°C no interior da salamandra, o regulador estará a cerca de 85,5°C. Em ambos os casos as temperaturas encontram-se abaixo dos 150°C de temperatura máxima indicada na ficha técnica ($T_j = 150^{\circ}C$) mas durante a queima as temperaturas são superiores a 100°C e durante o aquecimento está muito acima dos 125°C de temperatura máxima de funcionamento ($T_{OPR} = 125^{\circ}C$), motivo pelo qual a instalação de um dissipador se torna indispensável.

Para diminuir os riscos, garantir a fiabilidade térmica do regulador e prepará-lo para a possível instalação de um relé para acionamento da bomba de águas sanitárias, altura em que a potência dissipada será maior, foi instalado um dissipador: apesar de o relé da bomba de água não funcionar em simultâneo com o relé da resistência elétrica e, com isso, não existir um aumento no valor da corrente máxima necessária pelo controlador, é expectável

que o primeiro funcione durante longos períodos de tempo. Para uma temperatura ambiente de 19°C, o regulador de corrente registou uma temperatura máxima de 47°C.

A Figura 72 mostra o início da instalação da placa de controlo desenvolvida numa salamandra a *pellets*,



Figura 72 - Teste de instalação num equipamento de queima de pellets.

4.3. Controlador – *firmware*

Para que o microcontrolador execute todas as ações necessárias ao funcionamento da salamandra, precisa de executar um *firmware* que lhe permita atuar e comunicar corretamente com o *hardware* que o rodeia - TRIACs, relé, LCD, etc. –, receber e perceber a informação que o utilizador lhe quer transmitir.

O desenvolvimento do *firmware* deste controlador foi feito no ambiente de desenvolvimento disponibilizado pelo *Arduino*, o *Arduino IDE*, versão 1.6.9. O seu fluxograma de funcionamento geral pode ser visto na Figura 73.

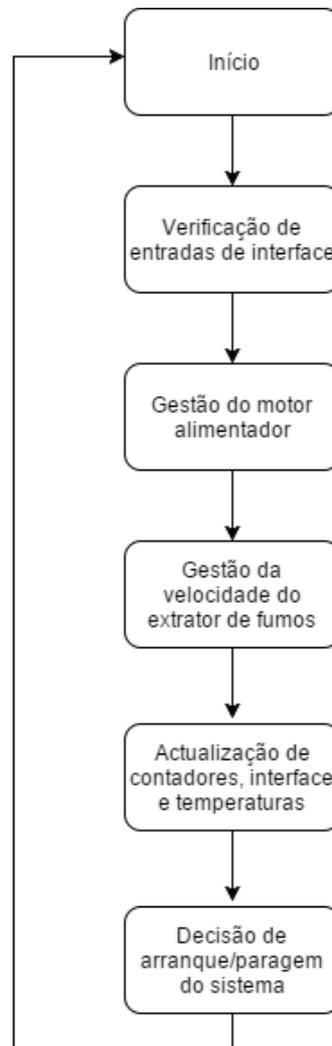


Figura 73 - Fluxograma do ciclo principal de funcionamento do firmware.

O ciclo principal do programa começa por verificar se existe alguma entrada correspondente à interface disponível no controlador: primeiro os botões de pressão e depois o comando remoto por infravermelhos e comunicação *Bluetooth*. Caso exista a pressão de algum botão ou tenha sido enviado algum comando através de infravermelhos ou *Bluetooth*, essa entrada é tratada de imediato já que este tratamento corresponde apenas à adição, subtração ou alteração de estado (de verdadeiro para falso e vice-versa) de uma variável. Nas

entradas dos botões de pressão é feita uma verificação do estado lógico dos seus portos enquanto que na comunicação por *Bluetooth* e infravermelhos existe transmissão de dados.

Seguidamente o programa passa para a gestão da alimentação do equipamento, onde corre uma função que gere o estado do motor alimentador de *pellets*. Esta função determina se a câmara de combustão deve ou não ser alimentada, tomando a decisão em função do intervalo de tempo estabelecido pelas variáveis “*feeder_on_lvl*” e “*feeder_off_lvl*”. Estas variáveis ditam o tempo que o motor deve estar ligado e desligado. Quando a salamandra não está a iniciar a queima ou esta não existe, o motor não entra em funcionamento.

O ciclo continua com a execução dos cálculos do controlo *PID* que gere velocidade do motor exaustor, onde se inclui a leitura de velocidade através do *encoder* que lhe está associado. Este controlador *PID* atua diretamente no tempo de disparo do *TRIAC*, alterando o valor do registo do temporizador associado.

Na última função executada pelo ciclo principal, correspondente aos dois últimos blocos do fluxograma da Figura 73, são atualizadas as variáveis auxiliares de gestão de tempo, verificação de erros do sistema, são feitas leituras das temperaturas de fumos e ambiente, é atualizada a informação do *LCD* e é executado código referente à tomada de decisão de arranque e término de queima, seja através de funcionamento automático ou por intermédio da interface. Caso a potência da queima esteja a ser regulada automaticamente com o objetivo de climatizar uma divisão, também é nesta altura que um controlador *PID* faz os cálculos para gerir a potência de saída da salamandra.

O *firmware* está dividido em vários ficheiros para permitir uma melhor organização funcional. Além dos ficheiros que contêm código de funcionamento do sistema, existe ainda um ficheiro, “*configurations.h*”, que contém informação e configurações relativas ao controlo do processo de queima e ao controlador, que foi criado de maneira a facilitar a configuração do *firmware* no modelo de equipamento onde vai ser executado.

Como cada modelo de salamandra necessita de ser devidamente testado e parametrizado para que seja possível controlar a queima de *pellets*, neste ficheiro encontram-se os valores de alimentação e velocidade de rotação do extrator de fumos para os vários níveis de potência pretendida, para o acendimento da salamandra, valores de temperatura de deteção de fogo, extinção de fogo, período de alimentação de *pellets*, tempos de espera de mudança de nível de potência, tempo máximo de espera de acendimento da salamandra, etc..

Desta forma qualquer fabricante de salamandras poderá testar e parametrizar facilmente os seus modelos, bastando-lhe para isso alterar os valores de configuração existentes neste ficheiro e carregar o *firmware* para o controlador.

Ter as configurações agregadas num só ficheiro também permite mais facilmente organizar o *firmware* num momento em que este sirva para controlar vários modelos de equipamentos. Nessa altura, pode existir um ficheiro de configuração do controlador que selecione e carregue um ficheiro de configuração específico de cada modelo, já parametrizado, ainda que todos os ficheiros coabitem na mesma diretoria.

4.3.1. Descrição de funcionamento

A programação desenvolvida para este controlador garante o controlo da salamandra em todas as fases do processo de queima de *pellets*: o início e extinção de combustão e a queima contínua.

O fluxograma da Figura 74 representa o fluxograma do processo de início de combustão programado neste controlador. Este processo é iniciado aquando da execução do código referente à tomada de decisão, no final do ciclo principal do *firmware*, sendo a partir daí feita toda a gestão que permite a ignição dos *pellets*.

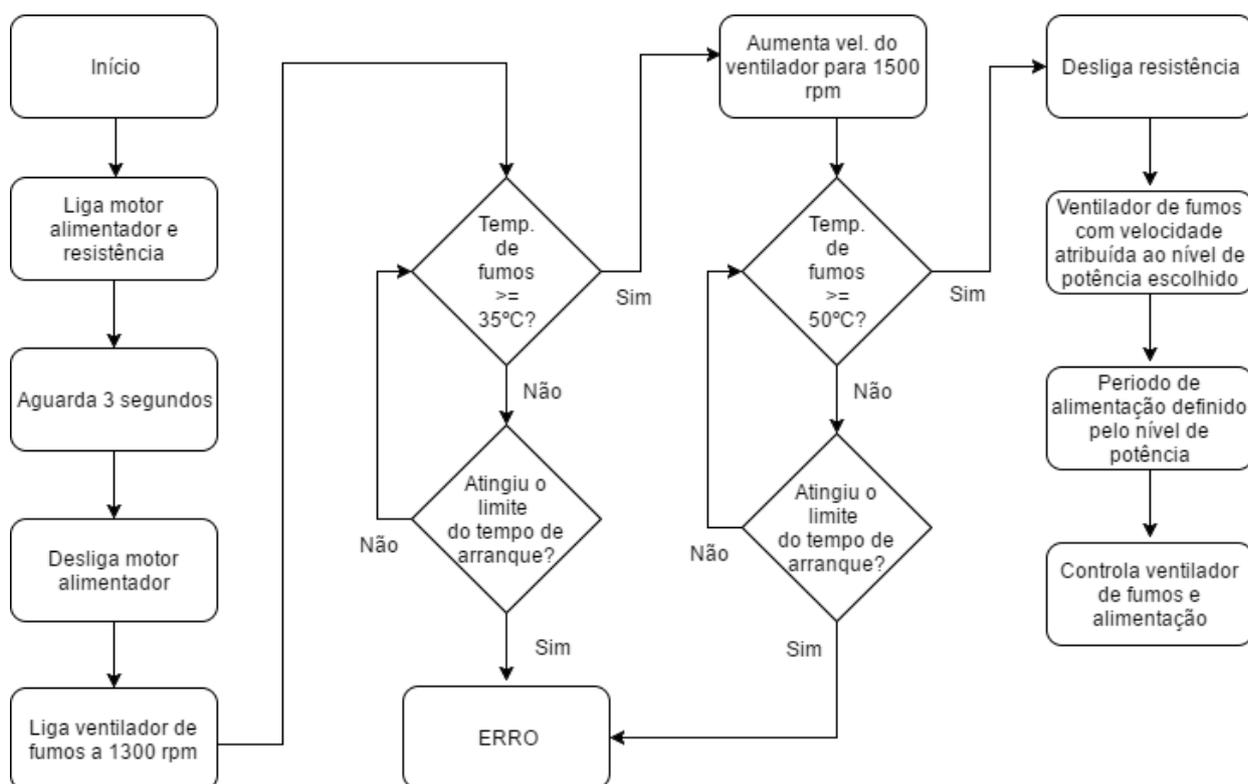


Figura 74 - Fluxograma de início do processo de queima.

Ao dar ordem de início ao controlador, aparece uma mensagem informativa no ecrã do controlador, como mostra a Figura 75.



Figura 75 - Mensagem informativa de início de funcionamento.

A resistência de aquecimento é ligada e o motor alimentador faz girar o fuso sem-fim que transporta os *pellets* durante 3 segundos. Esta rotação inicial garante o transporte de combustível para a câmara de combustão ou do depósito para o fuso caso o combustível tenha acabado durante a última utilização. O ventilador de fumos começa a renovar o ar da câmara de combustão a uma velocidade de 1300 rpm. A partir deste momento o sistema entra num processo em que aguarda a subida de temperatura de fumos. Quando esta

temperatura atinge um valor igual ou superior a 35°C o sistema deteta que os *pellets* já estão a começar a arder na câmara de combustão e aumenta a velocidade do extrator de fumos para as 1500 rpm. Este incremento de velocidade visa garantir um maior fluxo de ar na câmara de combustão e como consequência enriquecer a mistura e potenciar o incêndio.

Quanto se atinge uma temperatura igual ou superior a 50°C nos fumos, o sistema reconhece que o incêndio existe e é estável e passa a considerar-se em funcionamento. Nesta altura, a resistência de aquecimento é desligada e tanto a velocidade do motor de fumos como o intervalo e tempo de alimentação dos *pellets* assumem novos valores de acordo com o nível de potência selecionado pelo utilizador. O nível de potência está guardado na *EEPROM* do controlador, é lido a cada arranque do sistema e o seu valor no início da queima será o valor da última utilização do equipamento, podendo variar entre 1 e 5. Se a salamandra tiver sido encerrada com o modo de funcionamento automático, é lido o último valor de temperatura utilizado pelo utilizador.

Caso se exceda o limite de tempo em que o processo de acendimento pode estar a decorrer, 15 minutos por omissão, o sistema entra em estado de erro, provocando a interrupção imediata do processo e apresentando uma mensagem no *LCD*.

A Figura 76 representa o fluxograma do processo de extinção da queima implementado. Tal como no caso do início do processo de queima, também este processo é iniciado aquando da execução do código referente à tomada de decisão, no final do ciclo principal do *firmware*.

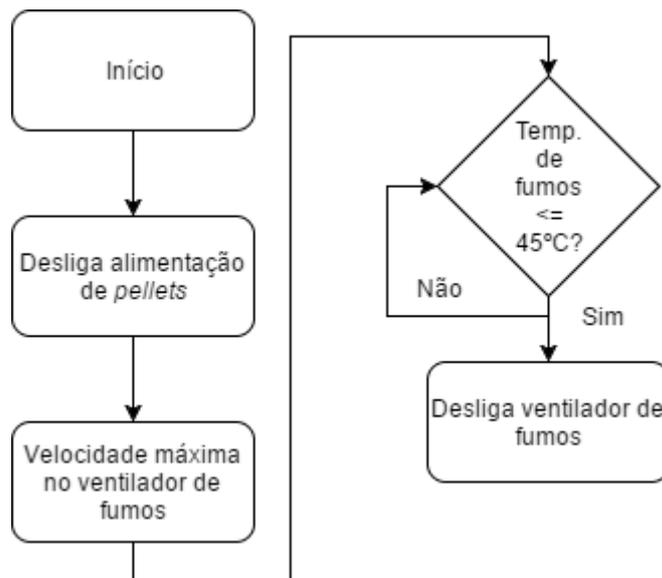


Figura 76 - Fluxograma do processo de extinção da queima de pellets.

Quando se pretende desligar o equipamento, o sistema desliga a alimentação de *pellets* e maximiza a rotação do extrator de fumos até que a temperatura destes seja inferior a 45°C, momento em que se desliga e o sistema fica a aguardar até receber nova ordem de iniciar. Na segunda linha do ecrã, até que a temperatura de fumos seja inferior a 45°C, é dada a informação de que o processo de queima está a terminar, como é possível observar na Figura 77.



Figura 77 - Mensagem de término de funcionamento.

Os processos de início e de paragem de queima não podem ser interrompidos por questões de segurança, motivo pelo qual embora a ordem de início, através do painel de botões, do comando de infravermelhos ou da comunicação *Bluetooth*, seja identificada, não é tratada se o equipamento estiver em algum momento de transição – processo de arranque ou de paragem.

Quando se está a dar início à queima de *pellets*, existe fogo na câmara de combustão muito antes de o controlador o detetar – como referido anteriormente, é necessário detetar uma temperatura de fumos de exaustão igual ou superior a 50°C para assumir a presença de fogo contínuo. Caso exista fogo mas a temperatura de fumos ainda não seja suficientemente alta para que o controlador o valide como tal, uma interrupção do início de queima desligaria os motores alimentadores e o ventilador de exaustão de fumos, causando uma queima deficiente, que gera muito fumo e resulta numa grande quantidade de cinzas.

O inverso aconteceria com a interrupção do processo de extinção de queima. Se o processo fosse interrompido, caso se voltasse a habilitar a alimentação de combustível e a admissão de ar para a câmara de combustão, mas as chamas não fossem suficientes para sustentar o processo de queima, a câmara iria acabar por se encher de *pellets* que não seriam queimados, até que a temperatura diminuísse naturalmente e o controlador entrasse em erro, aguardando intervenção humana.

Durante a queima de *pellets* o controlador apenas tem que se certificar que o motor alimentador faz girar o fuso dentro do tempo correto e que o ventilador de fumos está com a velocidade definida. Ambos os valores, tempo de alimentação e velocidade de extração, são assumidos quando existe uma mudança no estado da queima – de início de processo para queima continuada, p. ex. – ou no nível de potência selecionado.

Ao longo dos processos de início, de extinção e de queima contínua, a velocidade do motor ventilador é sempre monitorizada no ciclo principal do *firmware*.

Relativamente às funcionalidades potenciadas pela interface, os botões de pressão do painel, o comando remoto e aplicação para controlo através de *Bluetooth* permitem ao utilizador ligar ou desligar a queima de *pellets*, selecionar o nível de potência desejada e a velocidade do ventilador ambiente - através dos 5 níveis de potência pré-definidos - quando a salamandra está em funcionamento manual ou definir a temperatura desejada quando se encontra em modo de funcionamento automático. É possível também definir uma programação diária de funcionamento automático com horário de início e de fim bem como a hora, data e dia da semana do equipamento. O menu de programação de funcionamento pode ser visto na Figura 78.



Figura 78 - Menu de programação de funcionamento.

É também através dos botões que a hora e a data da salamandra são ajustadas em caso de necessidade.

4.3.2. Gestão da interface

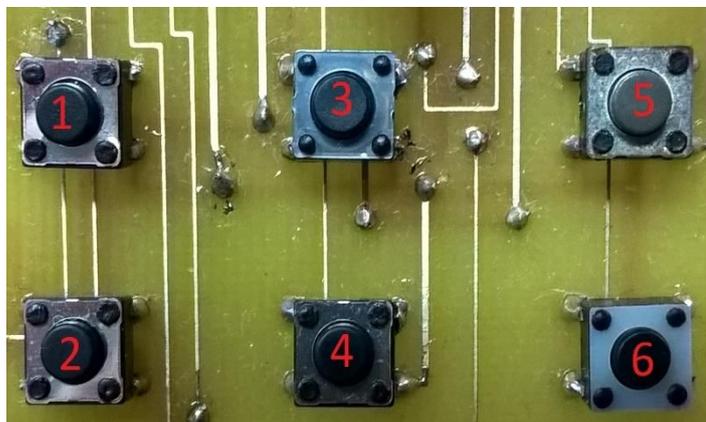
No ciclo principal de funcionamento do programa a gestão da interface do controlador é feita no início para as entradas de informação e no final para a saída de informação apresentada no *LCD*.

A gestão dos botões do painel de interface está dividida em duas funções. Uma das funções lê o estado dos pinos associados aos botões – “*read_buttons()*” - e outra efetua o tratamento de variáveis resultante da pressão do botão identificado – “*buttons_press_decode()*”.

A função “*read_buttons()*” verifica o estado de cada um dos pinos associados aos botões. Para esta verificação foi necessário ter em conta o tempo de repetibilidade da pressão, pelo que foi implementado um sistema de *debounce*. Esta função de leitura apenas devolve a identificação do botão pressionado caso a última pressão lida para aquele botão tiver sido feita há mais de 500ms. Desta maneira, mesmo que o utilizador mantenha o botão pressionado o controlador só assume como uma entrada válida de 500ms em 500ms, tempo suficiente para entradas de informação rigorosas e precisas. O valor deste tempo de espera está pré-definido na variável “*DEBOUNCE_BUTTONS*” e pode ser facilmente alterado no ficheiro “*configurations.h*”.

A função principal de tratamento de entradas nos botões é a função “*buttons_press_decode()*”. Esta função recebe o identificador gerado pela função de leitura e trata-o de imediato de acordo com a funcionalidade desejada. Existem 6 identificadores

diferentes, correspondentes aos 6 botões de pressão do painel de interface, como mostra a Figura 79.



- 1- **START_BUTTON**
- 2- **AUTO_BUTTON**
- 3- **BUTTON1**
- 4- **BUTTON2**
- 5- **BUTTON3**
- 6- **BUTTON4**

Figura 79 - Botões do painel de interface.

- **START_BUTTON_PIN** – identificador referente ao botão *start*. A pressão neste botão dá ordem de início ou paragem do processo de combustão dos *pellets*.
- **AUTO_BUTTON_PIN** – identificador referente ao botão de modo de climatização automática ou nível de potência manual. Quando o processo de queima está a decorrer, permite ao utilizador seleccionar o modo de climatização automática da divisão onde se encontra a salamandra ou seleccionar o modo manual, onde o utilizador selecciona o nível de potência e velocidade de ventilação desejados.
- **BUTTON1_PIN** – identificador referente ao botão número 1. Incrementa o nível de potência caso a salamandra esteja a funcionar em modo manual ou incrementa a temperatura desejada no caso de o equipamento estar a funcionar em modo de climatização automática. Quando não está a decorrer nenhum processo de queima – arranque, paragem ou queima contínua – este botão também incrementa as variáveis apresentadas no ecrã, como por exemplo a data, hora, o ano ou o dia da semana, para as funcionalidades de arranque e paragem autónoma da salamandra ou para a definição da data/hora.
- **BUTTON2_PIN** – identificador referente ao botão número 2. O tratamento deste identificador é em tudo semelhante ao botão número 1 com a diferença que serve de decremento ao invés de incrementar. As variáveis apresentadas no ecrã, o nível de potência desejado ou a temperatura de climatização são decrementadas com a pressão neste botão.

- **BUTTON3_PIN** – identificador referente ao botão número 3. Quando o processo de queima está a decorrer e está seleccionado o modo de funcionamento manual, este botão incrementa a velocidade do ventilador ambiente presente na salamandra. Se não existir processo de queima – arranque, paragem ou queima contínua – este botão movimentará os menus. No ecrã de funcionamento normal, a pressão deste botão entra no menu de funcionamento programado e sequencialmente avança sobre a definição de hora de arranque e paragem do mesmo, alterando a escolha da variável que se pretende modificar – horas e minutos. Caso esteja no menu de definição de hora e data, este botão faz recuar para a seleção de variável anterior.

- **BUTTON4_PIN** – identificador do botão número 4. Tem o funcionamento contrário ao botão número 3. Decrementa a velocidade do ventilador ambiente quando a queima está a decorrer e o modo de funcionamento é manual e serve de movimento de menus. A pressão deste botão durante a apresentação do menu principal leva ao menu de acerto de hora/data, avançando na seleção de variável dentro deste até à definição do dia da semana e consequente gravação de todas as opções – data, hora e dia da semana. A pressão deste botão durante a apresentação do menu de funcionamento programado faz recuar a seleção de variável a alterar.

O processamento das mensagens enviadas pelo comando remoto é feito de forma semelhante ao que é feito nos botões, mas neste caso foi utilizada uma biblioteca de comandos infravermelho já existente, instalada no ficheiro “*IRremote.h*”. A cada ciclo do programa é verificada a existência de alguma mensagem que, caso exista, é tratada logo de seguida. A verificação e tratamento das entradas de infravermelhos são processados na mesma função dos botões de painel, “*buttons_press_decode()*”. Cada botão do comando remoto envia uma mensagem específica, dando entrada no sistema como um valor hexadecimal.

Para atribuir as funcionalidades a cada botão, foram identificadas as mensagens de cada botão do controlador – etiqueta identificadora -, imprimindo o seu valor na porta de comunicação série do *Arduino*. Depois de identificadas as etiquetas dos botões foi possível escolher quais os botões que se pretendia usar e atribuir-lhes uma funcionalidade, idênticas às funções dos botões do painel.

O tratamento de informação recebida por *Bluetooth* também está implementado dentro da função “*buttons_press_decode()*”. A comunicação é estabelecida através da porta

série 3 do *Arduino Mega* e a aquisição de dados é feita do mesmo modo que uma comunicação por cabo, utilizando a biblioteca própria de comunicação série da plataforma.

A Figura 80 mostra a parte da função de tratamento de dados relativa às comunicações sem fio, onde é verificada a existência de informação primeiro por infravermelhos e, caso não exista, verifica-se a existência de dados na porta de comunicações onde o módulo *Bluetooth* está instalado.

```

//decode incoming IR messages
if(button == 0){ //if no panel button press detected
  if (irrecv.decode(&results) { //check for IR messages
    //Serial.println(results.value, HEX); //DEBUG received IR message if we received anything.
    irrecv.resume(); // Receive the next value
  }
  //decode incoming BT messages
  else if (Serial3.available()){ //if there is data available
    results.value = Serial3.read(); //read data
    Serial.write(results.value); //write data on the serial port
  }
  button = results.value;
  results.value = 0; //clean variable to be ready to use in the next entry
}

```

Figura 80 - Aquisição de dados através de comunicação por infravermelhos e Bluetooth.

A Tabela 10 mostra a equivalência entre os botões do comando, os botões do painel e as suas etiquetas identificadoras para cada tipo de comunicação no *firmware*.

Tabela 10 - Equivalência entre botões do comando remoto, painel de interface e etiquetas.

Botões		Etiquetas		
Comando	Painel	IR	Bluetooth	Botões de pressão
Play	Start	0xFFA857	1	START_BUTTON_PIN
Menu	Auto	0xFFE21D	2	AUTO_BUTTON_PIN
+	Botão 1	0xFF02FD	3	BUTTON1_PIN
-	Botão 2	0xFF9867	4	BUTTON2_PIN
>>/	Botão 3	0xFF906F	5	BUTTON3_PIN
/<<	Botão 4	0xFFE01F	6	BUTTON4_PIN

Cada vez que existe um *input* do utilizador, ou seja, cada vez que o utilizador pressiona um botão do painel, do comando remoto ou envia um comando por *Bluetooth* e essa entrada seja válida - com uma cadência superior a 500ms -, o *led* vermelho presente no painel acende durante um curto período de tempo. Na eventualidade do *led* ser substituído pelo sinalizador sonoro, este irá emitir um sinal audível.

Para o *output* da interface o *LCD* disponibiliza todas as informações ao utilizador, como a temperatura ambiente da divisão onde o equipamento se encontra e um relógio com a hora. Quando não está em funcionamento, o ecrã informa na linha inferior a data e dia da semana, como anteriormente mostrado na Figura 52. O acesso à informação de hora e data é feito através de comunicação com o módulo de relógio *DS1302*, utilizando uma biblioteca própria “*rtc.h*” [53] e uma ligação “*3-WIRE SPI*”, que é idêntica a uma ligação *SPI* mas *half-duplex*, com uma única linha de dados [54].

Durante a queima de *pellets* a segunda linha do ecrã é utilizada para informar acerca do nível de potência e do nível de velocidade do ventilador ambiente que estão a ser utilizados no caso do funcionamento se encontrar em modo manual ou a temperatura desejada caso o equipamento se encontre em modo de funcionamento automático.

A Figura 81 mostra a informação disponibilizada pelo ecrã durante o funcionamento da salamandra em modo manual.



Figura 81 - Informação no ecrã em modo de funcionamento manual.

O *LCD* informa também o utilizador se a programação de funcionamento está ativa ou não, através do símbolo de alarme, a seguir à informação horária, que pode ser visto na Figura 82, onde também é visível a informação de temperatura desejada, disponibilizada na segunda linha do ecrã durante o modo de funcionamento automático.



Figura 82 - Símbolo de alarme e informação no modo de climatização automática.

A segunda linha do ecrã também fornece informações em forma de texto acerca de alguns erros que possam ocorrer. Existem 4 erros identificados que são sinalizados com uma mensagem no ecrã:

- **“Erro!Queima”** – este erro ocorre quando há uma anomalia no funcionamento do controlador ou quando o sensor de temperatura de fumos está danificado. Aparece quando o sistema está em funcionamento, não se encontra em processo de paragem e a temperatura de fumos lida pelo controlador é 5°C inferior à temperatura de deteção de incêndio, portanto, aos 45°C para uma temperatura de deteção de incêndio de 50°C. O erro é considerado crítico, e como tal, o sistema interrompe de imediato a alimentação de *pellets* para a câmara de combustão e aguarda por intervenção do utilizador.

- **“Erro!Temp.Fumos”** – ocorre quando o sensor de leitura da temperatura de fumos está danificado ou a temperatura de fumos ultrapassa o valor estipulado pela variável *“MAX_SMOKE_TEMP”* – 240°C por omissão. Ao longo dos testes, a temperatura de fumos durante o funcionamento normal do equipamento rondou os 180°C. A ocorrência deste erro cessa a alimentação dos *pellets* e coloca o ventilador de fumos na velocidade máxima até que a temperatura de fumos seja inferior à temperatura de deteção de extinção de incêndio, *“FIRE_EXTINGUISH_TEMP”* – 45°C por omissão. Ambas as variáveis podem ser configuradas no ficheiro *“configurations.h”*.

- **“Erro!Vent.Fumos”** – este erro está relacionado com o *encoder* do ventilador de fumos. Se o sistema detetar que a velocidade do ventilador - medida pelo *encoder* – é de 0 rpm e este valor for diferente da velocidade pretendida ou se a velocidade detetada tiver um erro superior a 300 rpm relativamente à velocidade pretendida, entra em erro. O ventilador de fumos tem que funcionar sempre pelo que este erro não só cessa o processo de queima impedindo a alimentação de *pellets* caso este esteja a decorrer como também impede o arranque da salamandra. A verificação do *encoder* ocorre a cada 20 segundos.

- **“Erro!Acend.”** – erro relacionado com o arranque do processo de queima. Se demorar mais de 15 minutos – valor configurado pela variável *“START_TIMEOUT”* do ficheiro *“configurations.h”* – o sistema entra neste erro e termina a tentativa de acendimento dos *pellets*. Pode ocorrer por ausência de *pellets* no compartimento ou na câmara de combustão ou por deficiência na resistência de acendimento.

Além das mensagens de erro, o *LCD* informa também o utilizador das grandezas que está a manipular para definir a programação automática da salamandra ou o acerto de hora e

data. Durante a utilização de um destes menus o ecrã indica na primeira linha qual o menu onde se encontra e na segunda linha indica quais as grandezas que serão manipuladas, como indica a Figura 83, que mostra a informação dada pelo ecrã durante a definição de hora de arranque no menu de programação automática.



Figura 83 - Informação no LCD durante a utilização de um menu.

Durante a navegação nos menus o ecrã é atualizado imediatamente após um botão ser pressionado. No ecrã principal, a informação é atualizada automaticamente a cada 5 segundos.

A escrita de informação no *LCD* foi feita utilizando a biblioteca "*LiquidCrystal.h*", que está disponível publicamente e faz parte da lista de bibliotecas disponibilizadas pela plataforma *Arduino*.

Quando a informação é atualizada, é também feita uma atualização às leituras dos componentes que a ele estejam associados, nomeadamente o relógio e o sensor de temperatura ambiente. O período de atualização de 5 segundos é suficiente para manter o utilizador informado e para garantir a segurança da monitorização de temperaturas. Ao longo de 5 segundos não é possível haver uma variação considerável da temperatura que ponha em risco o sistema ou as pessoas, em especial na temperatura de fumos que é o parâmetro mais crítico no que à segurança diz respeito, no caso da salamandra utilizada neste projeto.

A atualização da leitura das temperaturas é feita pela função "*read_temp()*"; chamada dentro da função principal "*temperatures_update()*". A função principal garante a atualização dos valores das temperaturas e verifica se há algum valor em não conformidade. Se existir, a função obriga o sistema a entrar em estado de erro. Também é nesta função que são detetados o princípio de incêndio e o incêndio durante o início do processo de combustão e a extinção de incêndio quando se pretende terminar o processo.

O estado de “princípio de incêndio” ocorre quando o controlador deteta que a temperatura de fumos está a aumentar e ultrapassa os 35°C – variável “*START_FIRE_DETECT_TEMP*” - mas ainda é inferior à temperatura de deteção de incêndio. A função identifica o estado de “incêndio” quando a temperatura de fumos ultrapassa o valor estipulado pela variável “*FIRE_DETECT_TEMP*” – 50°C por omissão – e garante que o sistema inicia o controlo dos níveis de potência a partir deste momento. A extinção de incêndio acontece quando o processo de queima está a ser finalizado e a temperatura de fumos se torna inferior a 45°C – valor guardado na variável “*FIRE_EXTINGUISH_TEMP*” –, momento em que o motor ventilador interrompe o seu funcionamento e o sistema se encontra pronto para iniciar de novo quando assim for pretendido.

A função “*read_temp()*” devolve o valor da temperatura correspondente ao valor lido no porto analógico correspondente. O porto analógico do controlador devolve um valor entre 0 e 1023, lido pela função “*analogRead()*”, que necessita de ser convertido primeiro em tensão e depois para uma escala de temperatura - em graus Celsius.

Normalmente para o tratamento de informação de um sensor de temperatura *NTC* é utilizada uma tabela de conversão conhecida como “*look-up table*”. Neste caso para a conversão de valores foi utilizada a equação de *Steinhart-Hart* [55]. Além de ser mais simples, esta equação também ocupa menos memória no programa quando comparado com as tabelas de conversão. É a função “*read_temp()*”, ilustrada na Figura 84, que converte a informação lida no porto analógico pela função “*analogRead()*” para graus Celsius utilizando a equação e devolve o seu valor.

```
//read thermistor temp value from analog input
double read_temp(float RawADC) {
    double Temp;
    Temp = log(10000.0*((1024.0/RawADC-1)));
    Temp = 1 / (0.001129148 + (0.000234125 + (0.0000000876741 * Temp * Temp )) * Temp );
    Temp = Temp - 273.15;    // Convert Kelvin to Celcius
    return Temp;
}
```

Figura 84 - Função de conversão de tensão em temperatura.

4.3.3. Controlo do sistema

Além da gestão da interface, o *firmware* gere também a velocidade dos motores e o estado da resistência do sistema.

Na Figura 73 verifica-se que nem o motor ventilador ambiente nem a resistência de aquecimento estão presentes de forma direta no ciclo principal. Isto acontece porque são 2 elementos que não têm ligação com a potência de saída da salamandra, fazendo com que não exista necessidade de controlar o seu estado ciclicamente. A resistência é ligada quando há ordem – através de uma entrada na interface – para o início da queima e é desligada quando se deteta o incêndio cuja gestão é feita pela função de leitura de temperaturas. O motor ventilador apenas vê a sua velocidade variar em situações específicas, também originadas por *inputs* do utilizador, como a mudança do seu nível de potência ou a temperatura mínima de funcionamento – o ventilador só é habilitado automaticamente a partir de uma temperatura de fumos mínima “*START_ROOM_FAN_TEMP*” de valor por omissão de 55°C.

Por outro lado, o calor produzido pela salamandra depende diretamente tanto do estado do motor alimentador como da velocidade do exaustor de fumos. Ambos necessitam de controlo permanente de maneira a ser possível manter o nível de potência desejado.

- **Alimentação de *pellets* – motor alimentador**

O controlo do motor alimentador está a cargo da função *feeder_management()*. Esta função gere o estado do motor, ligado ou desligado, e a duração do funcionamento do mesmo. A Figura 85 mostra o fluxograma de funcionamento desta função.

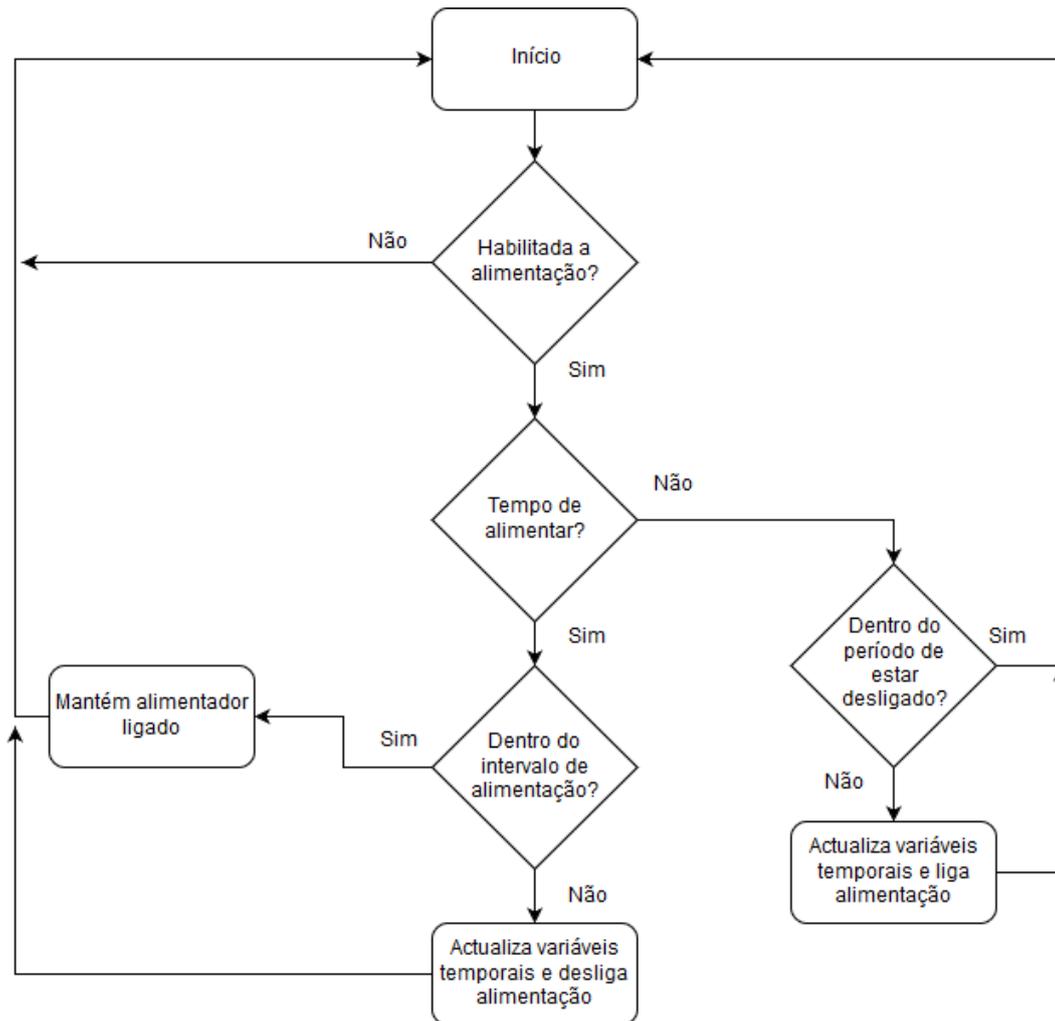


Figura 85 - Fluxograma da função de gestão de estado do motor alimentador.

Ao entrar na função é verificado se a alimentação de *pellets* está ou não habilitada, o que depende do estado da variável booleana “*enable_feed*”, onde *true* significa que está habilitada e *false* o contrário. Esta habilitação é dada pela função que inicia o processo de queima, *start_burning()*, e retirada pela função que termina o funcionamento do sistema, *stop_burning()*, ou por qualquer evento de erro detetado pelo sistema. Caso não esteja habilitada, a função termina. Caso contrário, continua para as verificações temporais. A Figura 86 mostra o pedaço de código que gere a alimentação.

```

//manage feeder output (on/off) and timings
void feeder_management(){

  if(enable_feed){ //boolean = true at start_burning function, =false at stop_burning or error detected

    if(feed_pellets){ //on time
      if(feeder_state_counter >= millis()) feeder_on(); //if the time we want to feed haven't already passed, feed.
      else{ //when feed enough, stop feeding
        feeder_state_counter = feeder_off_lvl + millis(); //set feeder off target counter
        feed_pellets = false; //set feed order to false
        feeder_off(); //feeder turned off
      }
    }else if(!feed_pellets){ //off time
      if(millis() >= feeder_state_counter){ //feed off time interval
        feeder_state_counter = feeder_on_lvl + millis(); //set feeder on target counter
        feed_pellets = true; //set feed order to true
      }
    }
  }
} //end if
} //end feeder_management()

```

Figura 86 - Função de gestão de alimentação de pellets.

O motor alimentador tem um tempo de funcionamento variável uma vez que a alimentação de *pellets* para a câmara de combustão é feita através de intervalos de tempo. A Tabela 11 mostra os diferentes tempos de alimentação conforme o nível de potência selecionado.

Tabela 11 - Intervalos de tempo de funcionamento do motor alimentador para os diferentes níveis de potência.

Nível de Potência	Alimentação Lig. (s.)	Alimentação Deslg. (s.)
1	0,7	3,3
2	0,84	3,16
3	1,04	2,96
4	1,24	2,76
5	1,44	2,56

Os tempos de alimentação utilizados são os mesmos dos parâmetros do controlador utilizado na salamandra *Prima Air*, parâmetros esses cedidos pela MVM. Durante os ensaios do controlador confirmou-se que estes parâmetros de alimentação servem os níveis de potência a que estão associados, confirmando também assim o bom funcionamento da gestão do motor alimentador por parte do controlador desenvolvido.

- **Ventilador ambiente e exaustor de fumos – motores de velocidade variável**

Os motores de ventilação ambiente e de exaustão de fumos necessitam de regulação de velocidade para proporcionar o maior conforto possível ao utilizador e para controlar a admissão de ar da câmara de combustão, respetivamente.

Além do *hardware* dedicado descrito na secção 4.1.1, é necessário um tratamento especial no *firmware* que permita o controlo de velocidade destes motores. A Figura 87 apresenta o fluxograma de controlo por ângulo de fase implementado.

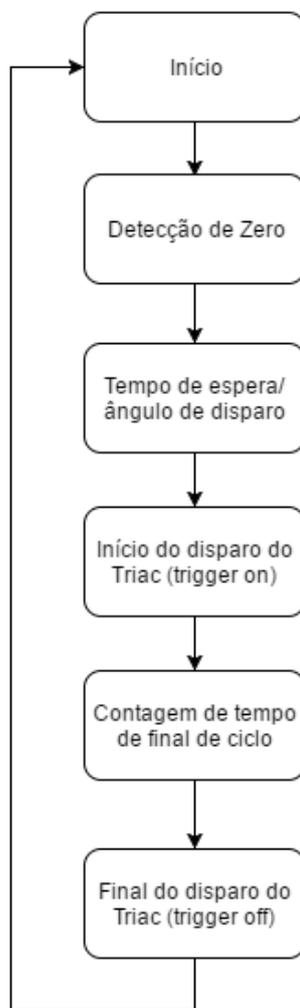


Figura 87 - Fluxograma de controlo por ângulo de fase implementado no firmware,

O controlo por ângulo de fase é tratado no *firmware* somente através de eventos despoletados por interrupções. Isto significa que todo o controlo é feito através de rotinas que não estão no ciclo principal do programa.

O primeiro evento é a aquisição de referência de zero. O circuito de deteção de zero fornece uma transição no seu sinal de saída – ver Figura 56 –, coincidente com a passagem por zero da onda sinusoidal de tensão da rede, que vai fazer variar o nível lógico de um porto de interrupção externa do *Arduino*. Foi utilizado o porto digital 2 para este efeito.

Após a deteção de zero é esperado o tempo necessário para que o ângulo de disparo seja o desejado. Nessa altura, o porto digital associado ao motor passa a ter à sua saída 5V até perto do final do semi-ciclo da onda sinusoidal, momento em que passa novamente a 0V, como ilustrado no exemplo da Figura 57.

O fluxograma da Figura 88 mostra o fluxograma da rotina dos eventos de interrupção que ocorrem por cada disparo do *TRIAC*. Estes eventos são tratados de forma imediata, fora do programa principal.

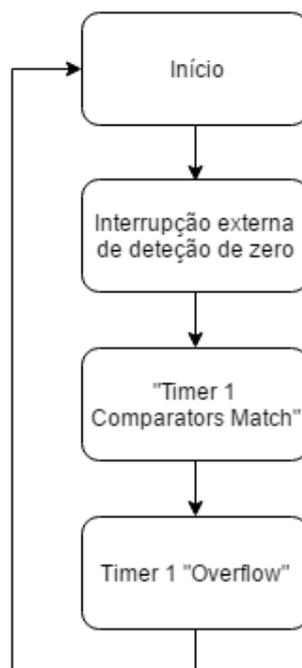


Figura 88 - Fluxograma de eventos interruptivos do controlo dos motores de velocidade variável.

A passagem por zero ativa uma interrupção externa. A rotina desta interrupção reinicia o temporizador 1 e dá início à contagem até ao momento de fazer o disparo do *TRIAC*, algo que é feito através do evento do comparador “*Timer 1 Comparators Match*”. O evento de interrupção de “*Timer 1 overflow*” desliga o disparo do *TRIAC*.

Cada motor tem a ele associado um registo comparador. É através do valor deste registo que é alterado o ângulo de disparo. No programa, representa um tempo de espera após a passagem por zero. Quando a contagem do temporizador for igual ao valor do registo comparador onde está definido o valor para a contagem do temporizador 1, *OCRIA/B*, ocorre a interrupção em que a sua rotina dispara o *TRIAC* associado e permite a condução de corrente para o motor.

A rotina de interrupção de final de contagem, *overflow*, tem a função de desligar o sinal de condução dos *TRIACs*. A sua ocorrência é manipulada dentro da última *ISR* de comparação que tenha existido. Se não tiver existido nenhuma, o temporizador nunca atinge o limite dos registos de contagem, recordando que são sempre reiniciados a cada 10ms, ou seja, a cada evento externo de deteção de zero.

Para que este ciclo de interrupções se complete e repita de forma adequada, foi necessária uma configuração prévia. A onda sinusoidal da tensão da rede tem uma frequência de 50Hz e o seu período é dado por $1/50 = 20\text{ms}$. Cada passagem por zero irá então ocorrer a uma frequência de 100Hz, ou seja, a cada 10ms.

Para calibrar este controlo, o temporizador 1 - *timer 1* na ficha técnica do controlador - foi configurado com um *prescale* de 1/256 que é basicamente um desmultiplicador de contagens. Uma vez que o *Arduino* funciona a uma frequência de 16Mhz, podemos calcular que ao longo de 1 segundo o temporizador irá efetuar

$$\frac{16 * 10^6}{256} = 62500$$

incrementos no seu registo de contagem, 16us por cada um. Desta forma foi possível relacionar quantos incrementos existem durante meio período de uma onda sinusoidal com 50Hz de frequência:

$$\frac{10 * 10^{-3}}{16 * 10^{-6}} = 625$$

Estes dados foram utilizados para garantir que a interrupção de *overflow* acontecesse antes de uma nova passagem por zero. Para este efeito, a última interrupção a acontecer associada a um registo comparador - *OCR* - atribui ao registo de contagem - *TCNT* - o valor máximo admissível menos o valor de contagens que faltam até estar próximo de uma nova passagem por zero, como mostra a Figura 89, onde “*j*” é a variável com o valor de contagens que já foram feitas desde última interrupção de deteção de zero.

$$TCNT1 = 65536 - 580 + j;$$

Figura 89 - Atribuição de valor ao registo de contagem *TCNT1*.

Foi definido o valor próximo de uma nova passagem por zero de 580 contagens, o que corresponde a cerca de 9,28ms.

- **Controlo de velocidade com *encoder***

A velocidade do motor de ventilação ambiente está pré-definida, associada aos níveis de potência disponíveis, mas também pode ser alterada pelo utilizador para que lhe sirva de melhor conforto. No caso do motor de exaustão de fumos a velocidade tem que ser precisa e vigiada.

O motor ventilador de fumos tem incorporado um *encoder* baseado num sensor de efeito de *Hall*, ilustrado na Figura 90.



Figura 90 - Encoder de efeito de Hall do motor extrator de fumos.

O sensor de efeito de *Hall* faz variar a sua saída a cada volta completa do motor. Essa variação é lida e contabilizada pelo microcontrolador que calcula a velocidade em rotações por minuto a que o motor está a rodar.

Esta contabilização de pulsos do sensor de *Hall* também está implementada através de um porto de interrupção externa. Sempre que o motor completa uma rotação, o sinal do *encoder* transita de 5V para 0V e a rotina de interrupção associada ao pino do *Arduino* incrementa uma unidade numa variável, “*revolutions*”.

Para variar o ângulo de fase de disparo do *TRIAC* por forma a controlar a velocidade do exaustor de fumos, o *firmware* utiliza uma biblioteca de controlo *PID* que garante a estabilidade e precisão da velocidade em função do fluxo de ar que se pretende na câmara de combustão. Inicialmente, implementou-se um controlo proporcional que apenas atuava conforme a diferença entre a velocidade pretendida e a medida. No entanto, com a variedade de bibliotecas da plataforma que já oferecem controlo proporcional, integral e derivativo, tomou-se por opção passar a usar uma delas, pois conseguiam uma maior estabilidade a velocidades constantes do motor e variações mais suaves durante as transições de velocidade.

O cálculo do ângulo de fase a aplicar no controlo do motor exaustor e a leitura da velocidade do ventilador são feitos na função “*compute_smoke_fan_speed()*”. A velocidade do ventilador é calculada apenas de segundo a segundo para se conseguir um bom nível de precisão na sua leitura. Foram efetuados testes para outros intervalos de medição, mais curtos, mas sem sucesso quanto à precisão do cálculo de velocidade: o valor calculado oscilava em demasia mesmo sem se verificar uma variação real de velocidade do motor. O aumento do intervalo de medição permitiu aumentar a precisão de leitura sem prejuízo do controlo do motor.

Como a verificação é feita a cada segundo, para obter a velocidade do ventilador em rotações por minuto basta multiplicar o número de voltas completas – o número da variável incrementada pela interrupção gerada pelo *encoder* - por 60. A função “*exhaust_fan_PID.Compute()*” corre fora do período de 1 segundo, sendo executada em todos os ciclos por indicação das instruções da biblioteca utilizada. Apesar de ser sempre executada, a função apenas faz cálculos quando é necessário.

4.3.4. Testes e resultados

O desenvolvimento do *firmware* deste projeto foi sempre suportado por ensaios no equipamento disponibilizado pela empresa MVM. Estes ensaios incluíram testes de início de queima, de variação e gestão de potência debitada, término da queima e de utilização dos vários tipos de interface implementados.

O processo de queima de *pellets* está parametrizado para o modelo utilizado durante os testes, o *Prima Air*. Após correta parametrização, não foi registada nenhuma falha no arranque, término ou manutenção da queima durante as várias horas – intercaladas - de testes a que foi submetido. Para obter maior garantia de bom funcionamento e maior prova de fiabilidade do sistema, seria oportuno reunir condições para manter o equipamento em funcionamento durante um período superior a 24h. Infelizmente, tal não foi possível durante o desenvolvimento deste projeto.

A parametrização do arranque do equipamento e da manutenção da queima para os diferentes níveis de potência foi feita inicialmente com valores idênticos aos utilizados noutros controladores. Após alguns ensaios, verificou-se que se obtinham melhores resultados durante o arranque fazendo com que o sistema fosse alimentando a câmara de combustão ao longo do tempo. Isto previne que o sistema tente arrancar sem combustível e garante uma combustão melhor durante o arranque do equipamento, acelerando a deteção de incêndio.

Para os vários níveis de potência de queima foi necessário alterar o valor de velocidade do ventilador exaustor de fumos, que controla também a admissão de ar. No controlador utilizado pela MVM, a velocidade do exaustor parametrizada é apenas um limite mínimo e esta é controlada pelo fluxo de ar que existe. Como neste projeto se abdicou do medidor de massa de ar, ajustou-se a velocidade do ventilador, aumentando-a, mantendo os parâmetros de alimentação de *pellets*, de maneira a obter resultados de queima visível e termicamente satisfatórios.

A função de climatização não foi testada num ambiente real devido a condicionamentos no que respeita à colocação do equipamento de testes. Esta funcionalidade deveria ter sido testada num espaço fechado, idêntico a uma divisão de um edifício, como por exemplo uma sala de estar, de maneira a aferir a capacidade de aumento, diminuição e

manutenção de temperatura por parte da salamandra especialmente no que diz respeito à estabilidade e velocidade de resposta. Preferencialmente, durante o teste, o equipamento deveria também ser sujeito a variações acentuadas de temperatura ambiente para ser estudado o seu comportamento, simulando a abertura de uma porta ou uma corrente de ar fria. Não obstante, o processo de climatização foi simulado, aquecendo e arrefecendo o sensor de temperatura ambiente e observando-se a resposta do controlador. Nesta simulação foram obtidos resultados satisfatórios. Para a climatização automática o *firmware* utiliza os 5 níveis de potência existentes.

O arranque e paragem programados não demonstraram nenhum problema no seu funcionamento.

4.4. Análise de custos / produção

Como foi sendo referido ao longo deste relatório, um dos principais objetivos do desenvolvimento do controlador seria ter um custo competitivo. Durante o desenvolvimento do *hardware* houve sempre a consideração do fator preço e disponibilidade no mercado na escolha dos componentes utilizados, tentando manter um compromisso entre o custo e a funcionalidade da solução final.

Para a elaboração de uma unidade de controlo semelhante à desenvolvida, são necessários os componentes descritos no Anexo A, Tabela 13. Além do preço dos componentes, é necessário considerar o preço da placa *Arduino* e da placa de circuito impresso, o que dará um preço total a rondar os 50€ - excluindo a comunicação *Bluetooth*, módulo pelo qual se terá que somar 5€. Neste caso, seria necessário contabilizar também os custos de montagem, que não estão incluídos no preço do material. Os preços dos componentes foram consultados em lojas online, em setembro de 2016, pelo que o seu preço pode estar sujeito a alterações.

É possível obter preços mais competitivos caso se opte pela compra em várias lojas distintas, procurando o preço mais baixo de mercado para cada componente, ou ainda caso se compre em grandes quantidades.

Para ter noção dos custos de produção e montagem deste controlador, foi feito um pedido de cotação a uma empresa internacional para 50 e 100 unidades. À produção e montagem de componentes para 50 unidades do controlador foi dada uma cotação de US\$2076 – 1941€ – enquanto 100 unidades custariam US\$3597 – 3364€, à taxa de conversão atual. Concluimos que a unidade ficaria por 38.82€ no caso da produção de 50 controladores e 33.64€ para a produção de 100. A estes preços, seria necessário adicionar o preço do *LCD* (1€) e da placa *Arduino* (7€) bem como do módulo de relógio de tempo real (1€), comando e recetor infravermelhos (1,20€) e, caso necessário, *Bluetooth* (5€). A Tabela 12 resume os preços unitários dos 3 modos de produção analisados.

Tabela 12 - Comparação de preços do controlador em diferentes métodos de produção.

Modo de Produção	Preço* total unitário
Produção individual, manual**	50€
Produção e montagem – 50 unidades	49€
Produção e montagem – 100 unidades	44€

*Os preços não incluem módulo *Bluetooth*.

**Exclui mão de obra.

Como era esperado, existe uma redução do custo unitário do controlador com o aumento da produção. Mesmo em pequenas quantidades, o custo de um controlador com montagem incluída é inferior ao preço da compra e montagem manual de um controlador se excluirmos o custo de mão de obra necessária para a operação.

Relativamente aos controladores existentes no mercado, a empresa MVM indicou um preço de referência que ronda os 57€ para os modelos com funcionalidades idênticas ao desenvolvido neste projeto, embora sem conectividade *Bluetooth* nem controlo através de infravermelhos.

Concluindo, pode-se afirmar que o controlador desenvolvido neste projeto apresenta um preço competitivo, que pode ser inferior aos utilizados atualmente conforme o método e volume de produção. A diferença de preço pode tornar-se mais significativa caso o número de unidades produzidas seja consideravelmente aumentado, bem como a procura por outros fornecedores pode levar à conclusão de que é possível um preço ainda mais baixo.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Para a realização deste trabalho foi necessário proceder a um estudo exaustivo acerca dos sistemas de queima para aquecimento doméstico, nomeadamente dos sistemas de queima a *pellets*: o estudo do seu funcionamento e das opções existentes no mercado para controlar estes sistemas caracterizaram o primeiro passo para o desenvolvimento deste controlador.

Reunida a informação acerca dos equipamentos, através de pesquisa e através do diálogo com a MVM, procurou-se iniciar o projeto escolhendo uma plataforma que se concluiu ser a mais adequada, o *Arduino*.

Posteriormente, durante o desenvolvimento do *hardware* protótipo, os vários métodos de controlo associados aos elementos da salamandra foram desenvolvidos e agregados a uma solução de interface e *firmware* desenvolvido em paralelo.

Este trabalho engloba ensaios num equipamento de testes, localizado na MVM, onde foram obtidos resultados satisfatórios no que à qualidade da queima – ausência de fumos – diz respeito. O sistema mostrou-se fiável ao longo das horas de teste, não havendo registo de nenhuma anomalia no que diz respeito à queima, à leitura de temperaturas ou mau funcionamento de *hardware*.

Para efeitos de comercialização, será necessário submeter o controlador a várias horas de testes monitorizados – os chamados *stress tests* – e também tratar dos processos de certificação. Durante a realização do projeto não foi possível efetuar testes de longa duração uma vez que não havia condições para o efeito, dado o equipamento estar localizado na empresa, local onde durante a noite não existe vigilância. Seria também importante aferir acerca do cumprimento das diretivas referentes à legislação a aplicar relativamente à compatibilidade eletromagnética do controlador, nomeadamente através de testes na câmara anecoica da ESTG. Seria necessário garantir o cumprimento das diretivas 2004/108/CE que diz respeito à compatibilidade eletromagnética e a 2006/95/CE que refere à baixa tensão e submeter o controlador ao organismo nacional de normalização, o Instituto Português da Qualidade (IPQ).

Relativamente ao custo deste controlador, tendo como referência o preço indicado pela MVM, que é de controladores produzidos para vários países – portanto, em vários

milhares de unidades -, pode-se considerar que o objetivo de apresentar um controlador com um custo competitivo foi alcançado. O custo é inferior ao valor de referência e consegue-se diluir caso seja produzido em grandes quantidades, o que implica a venda a várias empresas e provavelmente a exportação.

Para trabalhos futuros, apesar de objetivamente o trabalho inicial proposto estar concluído, a melhoria contínua é uma vantagem que se pretendeu garantir desde o início do projeto. O desenho da placa de controlo contempla as ligações para um relé que pode ser aproveitado para acionar uma bomba de água, aplicado a equipamentos com aquecimento de águas sanitárias e/ou a caldeiras. No entanto, o *firmware* não prevê essa situação. Bastaria, por exemplo, ligar a bomba de água sempre que a temperatura de fumos fosse superior a um determinado valor, conhecido e testado, que garantisse o aquecimento da água em circulação.

Ainda relativamente ao *firmware*, é possível reduzir os custos do controlador caso se implemente uma interface mais simples e barata. Há utilizadores que não dão valor a um ecrã ou comando remoto e cuja interação com dois potenciômetros seletores de nível de potência e velocidade de ventilador sejam suficientes. O *hardware* já prevê isso – diferentes placas de interface – mas o *firmware* necessita de ser adaptado. No caso de um utilizador ter dificuldades visuais, é possível substituir o ecrã utilizado neste projeto por outro de maiores dimensões, desde que tenha o mesmo controlador de ecrã (HD44780), sem efetuar alterações ao *firmware*; seria uma mais valia a ter em conta, mediante avaliação do custo inerente.

A climatização não foi testada em ambiente próprio neste trabalho e apenas reflete o controlo nos 5 níveis de potência pré-definidos. Uma climatização com débito de potência gradual poderá trazer melhores resultados tanto na manutenção de temperatura como na poupança de consumo de *pellets*. Para este efeito provavelmente seria necessário incluir o medidor de massa de ar para conseguir fazer um controlo direto da admissão de ar na combustão. Embora a integração do sensor medidor de massa de ar obrigue a uma revisão na placa do controlador e a implementação no *firmware*, esta poderia ser uma funcionalidade vantajosa para parte dos clientes de sistemas de aquecimento a *pellets*. A alteração à placa do controlador não daria origem a uma versão distinta mas sim a uma nova versão, compatível com a placa atual.

A comunicação sem fios também não ficou esquecida. Ao ser aplicado o módulo *Bluetooth*, o utilizador pode controlar o equipamento através vários dispositivos, fazendo

uso da aplicação universal criada no decorrer deste projeto, compatível com *smartphones*, *tablets*, ou computadores com o sistema operativo *Windows 10*. A aplicação desenvolvida, apesar de plenamente funcional, serve meramente para efeitos demonstrativos. Numa versão comercial deverá ser melhorada a sua interface e alargadas as capacidades. Seria útil por exemplo uma monitorização da temperatura da casa, receber alertas de pouco combustível no depósito ou até mesmo notificações de temperatura baixa na habitação, sugerindo o início de climatização automática – deste modo, a salamandra não deixaria o edifício arrefecer em demasia, poupando combustível na manutenção da temperatura e garantindo conforto térmico aos utilizadores. Outra possibilidade seria fazer uso da ligação *Bluetooth* para comandar o sistema através de um painel de controlo embutido na parede, com botões ou ecrã tátil, dispensando a interface presente no corpo da salamandra.

Fazendo uma retrospectiva ao trabalho desenvolvido, verifica-se que os objetivos principais foram cumpridos: desenvolvimento de um controlador nacional, com um custo reduzido e ainda com margem para evolução, que oferece algo que de momento não existe no mercado da MVM: a comunicação *Bluetooth* e a existência de uma aplicação móvel.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Referências

- [1] “TradingEconomics,” [Online]. Available: <http://www.tradingeconomics.com/>. [Acedido em 2016 Fevereiro 19].
- [2] “Enerpellets,” [Online]. Available: http://www.enerpellets.pt/our_pellets.html. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [3] “Energium,” [Online]. Available: <http://www.energenium.pt/energias/biomassa.html>. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [4] “Energias Renováveis,” [Online]. Available: <http://energiasalternativas.webnode.com.pt/energias-renovaveis/biomassa/>. [Acedido em 17 Fevereiro 2016].
- [5] “Jornal de Negócios,” [Online]. Available: http://www.jornaldenegocios.pt/empresas/detalhe/grupo_portugues_investe_53_milhoes_em_fabrica_de_pellets_nos_estados_unidos.html. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [6] “DECO Proteste,” [Online]. Available: <http://www.deco.proteste.pt/>. [Acedido em 19 Fevereiro 2016].
- [7] “Portal do Ambiente e do Cidadão,” [Online]. Available: <http://ambiente.maiadigital.pt/ambiente/energia/mais-informacao-1/sobre-as-energias-alternativas>. [Acedido em 23 Fevereiro 2016].
- [8] “Directiva Europeia,” [Online]. Available: http://www.apren.pt/fotos/gca/lexuriserv_1265321625.pdf. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [9] “BioEnergiaPortugal,” [Online]. Available: http://bioenergiaportugal.com/wp-content/uploads/2015/06/02_BioenergiaPortugal2015_CBE_TeresaAlmeida.pdf. [Acedido em 24 Fevereiro 2016].

- [10] “Chaleurnature,” [Online]. Available: <http://www.chaleurnature-granules-bois-76-chauffage-normandie.com/images/prod2-big.jpg>. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [11] “Enerpor,” [Online]. Available: www.enerpor.pt. [Acedido em 24 Fevereiro 2016].
- [12] “Enerpor,” [Online]. Available: <http://www.enerpor.pt/pt/Simulador>. [Acedido em 03 Agosto 2016].
- [13] “Câmara Municipal Oliveira de Azemeis,” [Online]. Available: www.cm-oaz.pt. [Acedido em 13 03 2016].
- [14] “Cebio,” [Online]. Available: http://www.cebio.net/web/images/stories/PellCert_flyer.pdf. [Acedido em 7 Setembro 2016].
- [15] “Associação Nacional de Pellets Energéticas de Biomassa,” [Online]. Available: <http://www.anpeb.pt/>. [Acedido em 25 Fevereiro 2016].
- [16] “Quente-e-frio,” [Online]. Available: <http://www.quente-e-frio.info/wp-content/uploads/2014/03/lareira-1.jpg>. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [17] [Online]. Available: http://img.edilportale.com/product-thumbs/b_prodotti-62649-rele9c2503b1fc64d40bf7996074373e526.jpg. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [18] “Tvi24,” 11 Fevereiro 2009. [Online]. Available: www.tvi24.iol.pt. [Acedido em 14 Março 2016].
- [19] “Alpis,” [Online]. Available: <http://www.alpis.pt/recuperadores/manualrecuperador.pdf>. [Acedido em 20 Outubro 2016].
- [20] “Salar Lareiras,” [Online]. Available: <http://www.salar-lareiras.pt/vantagens-lareira-recuperador-calor.html>. [Acedido em 5 Dezembro 2016].
- [21] “Maxima Interiores,” [Online]. Available: http://www.maximainteriores.xl.pt/decor/interiores/especial/19/esp_03.jpg. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].

- [22] “JVP Churrasqueiras,” [Online]. Available: http://www.jvp-churrasqueiras.com/imagens/recuperadores_calor_K78-c.jpg. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [23] “Sitiodelaslareiras,” [Online]. Available: <http://www.sitiodelaslareiras.com>. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [24] “Enat.pt,” [Online]. Available: <http://pt.enat.pt/media/342827/esquema-solzaima2.jpg>. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [25] “Oliveira & Carvalho,” [Online]. Available: http://img.pai.pt/mysite/media/40/02/5/961d8533-ee54-4c5f-bc3c-9cb1df07624a_LARGE.jpg. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [26] “LeroyMerlin,” [Online]. Available: <http://www.leroymerlin.pt/Site/Fazer-e-facil/Tutoriais/Tudo-o-que-precisa-saber-sobre-salamandras.aspx>. [Acedido em 15 Fevereiro 2017].
- [27] “Energokamin - Solid Fuel Flames,” [Online]. Available: <http://www.energokamin.com/EN/images/solid-fuel-flames-en.jpg>. [Acedido em 16 Fevereiro 2016].
- [28] “Hydronic Heating,” [Online]. Available: http://1.bp.blogspot.com/-wR7Oj8y_TVE/UmeE2Dy96heI/AAAAAAAAHDU/Fyznr1k-NJI/s1600/hydronic-heating-installation.gif. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [29] “Thisoldhouse,” [Online]. Available: http://www.thisoldhouse.com/toh/photos/0,,20654453_21251500,00.html. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [30] “MLE - Soluções de Climatização,” [Online]. Available: [http://www.mle.pt/extraflame/encastaveis-a-pellets/encastavel-a-pellets-comfort-mini-crystal/#prettyPhoto\[gallery1\]/1/](http://www.mle.pt/extraflame/encastaveis-a-pellets/encastavel-a-pellets-comfort-mini-crystal/#prettyPhoto[gallery1]/1/). [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [31] “Famarbrevetti,” [Online]. Available: <http://www.famarbrevetti.com/media/comuni/spaccato-karif-zefira.jpg>. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [32] “Enat.pt,” [Online]. Available: <http://pt.enat.pt/pt/produtos/biomassa/caldeiras-a-pellets>. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].

- [33] "Rauschert," [Online]. Available: http://rauschert.com/images/content_200x200/functional-components/gluehzuender-1.jpg. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [34] C. M. Mendes, "C. M. Mendes, "Ensaio de equipamento de aquecimento ambiente a pellets para marcação CE", Universidade do Minho," [Online]. Available: http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/21725/1/TESE_Carlos%20Mendes_2011.pdf. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [35] "Propellets," [Online]. Available: <http://www.propellets.at/en/heating-with-woodpellets/pellet-boilers/how-does-it-work/>. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [36] "PelletHead," [Online]. Available: http://pellethead.com/wp-content/uploads/2013/12/p-323-120559_one__34368.jpg. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [37] [Online]. Available: http://cdn.shopify.com/s/files/1/0270/8519/files/HarmanCircuitBoard_large.JPG?8666109069640077379. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [38] "CEZA," [Online]. Available: http://ceza.it/media/images/prodotti/pannello_display.jpg. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [39] [Online]. Available: <https://i.ytimg.com/vi/6rU2K6ZmTMs/maxresdefault.jpg>. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [40] "Amazon," [Online]. Available: http://ecx.images-amazon.com/images/I/41eEOMq2OpL._SX300_.jpg. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [41] "Amazon," [Online]. Available: http://ecx.images-amazon.com/images/I/51X%2BRUKJcuL._SX342_.jpg. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [42] "EveryChina," [Online]. Available: <http://img2.everychina.com/img/b1/af/b6dbb3d09292ee04744ba0417e31-300x300c0->

- aa6b/control_panel_home_heater_wood_pellet_stoves_burners_fire_place_cr_06.jpg. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [43] “Instructables,” [Online]. Available: <http://www.instructables.com>. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [44] “Módulo GPRS,” [Online]. Available: <http://g01.a.alicdn.com/kf/HTB1HoZgIVXXXXbTaXXXq6xXFXXXXK/New-SIM900A-V4-0-Kit-Wireless-Extension-Module-GSM-GPRS-Board-Antenna-Tested-Worldwide-Store.jpg>. [Acedido em 18 Fevereiro 2016].
- [45] “Wikimédia,” [Online]. Available: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Protoshield2.jpg>. [Acedido em 28 Fevereiro 2016].
- [46] “Arduino.cc,” [Online]. [Acedido em 28 Fevereiro 2016].
- [47] “Microchip,” [Online]. Available: <http://www.microchip.com/>. [Acedido em 29 Fevereiro 2016].
- [48] “ChipKITT,” [Online]. Available: <http://chipkit.net>. [Acedido em 10 Setembro 2016].
- [49] “EmbeddedAdventures,” [Online]. Available: http://www.embeddedadventures.com/images/uploaded_images/PLT_1005_600.jpg. [Acedido em 10 Setembro 2016].
- [50] “RaspberryPiOrg,” [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org>. [Acedido em 28 02 2016].
- [51] L. M. P. Neves, Rectificadores Controlados a Tiristor - Electrónica de Potência.
- [52] “Wikipédia,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Zero_crossing#/media/File:Zero_crossing.svg. [Acedido em 23 06 2016].
- [53] Arduino, “ArduinoDS1302,” [Online]. Available: <http://playground.arduino.cc/Main/DS1302>. [Acedido em 3 Fevereiro 2017].
- [54] “TOTALPHASE,” [Online]. Available: <https://www.totalphase.com/support/articles/200350046-Interfacing-with-3-wire-SPI>. [Acedido em 20 Setembro 2016].

- [55] C. Erlich Industrial Development, “EIDUSA,” [Online]. Available: http://www.eidusa.com/Electronics_Kits_TEMP_THERMISTOR_1.htm. [Acedido em 16 Novembro 2016].
- [56] [Online]. Available: http://www.solucoesindustriais.com.br/images/produtos/imagens_897/p_microcontroladores-8.jpg. [Acedido em 29 Fevereiro 2016].
- [57] Eletronica-pt, “Eletronica-pt,” [Online]. Available: <http://www.electronica-pt.com/>. [Acedido em 21 06 2016].
- [58] “Radio-Electronics,” [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/>. [Acedido em 2016 06 21].
- [59] “PCB Heaven,” [Online]. Available: <http://www.pcbheaven.com/>. [Acedido em 08 Setembro 2016].
- [60] “QPH.EC,” [Online]. Available: https://qph.ec.quoracdn.net/main-qimg-2e55af769c5750d552fc37570eb7f07b?convert_to_webp=true. [Acedido em 8 Setembro 2016].

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexos

Anexo A – Lista de material

Os preços indicados na Tabela 13 são valores de referência.

Tabela 13 - Lista de componentes utilizados no controlador.

Quantidade	Descrição	Preço und.
6	Botões de pressão	0,10€
1	<i>Buzzer</i>	0,2€
1	Condensador 0,1uF	0,26€
3	Condensador de <i>Poliester</i> 100nF	1,2€
1	Condensador 2200uF	0,35€
3	Conetor macho, passo 2,54mm	0,80€
1	Díodo 1N4148	0,05€
2	Ficha fêmea p/ cabo <i>flat cable</i>	1,35€
2	Ficha macho p/ <i>pcb flat cable</i>	0,55€
7	Fichas de parafuso	0,65€
1(m)	<i>Flat cable</i>	1,8€
1	<i>LCD</i>	1€
2	MOC3022	0,25 €
1	MOC3041	0,64 €
1	Módulo <i>Bluetooth</i>	5€
1	Módulo RTC DS1302	1€
1	Opto. PC814	0,18€
1	Ponte Rect. DF08M	0,36€
1	Recetor <i>IR</i> c/ Comando Remoto	1,20€
1	Reg. Tensão LM7805	0,4€
1	Relé 5Vdc	1€
2	Resistência 10k Ω	0,15€
2	Resistência 180 Ω 2W	0,10 €
1	Resistência 1k Ω	0,20€
3	Resistência 2,2k Ω 2W	0,18€
2	Resistência 220 Ω	0,13€
1	Resistência 240k Ω	0,20€
1	Resistência 360 Ω 2W	0,30€
1	Resistência 380 Ω	0,13€
1	Resistência 680 Ω	0,13€
1	Transformador 230V/9V, 5VA	5,01 €
1	Transístor 2n3904	0,05€
3	TRIAC BT136-600	0,35 €