



**Jorge Vicente
Teixeira Riço**

**Módulo sem fios para controlo de temperatura de
uma habitação**



**Jorge Vicente
Teixeira Riço**

**Módulo sem fios para controlo de temperatura de
uma habitação**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica de José Paulo Oliveira Santos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Vítor António Ferreira da Costa

Professor Associado C/ Agregação da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Rui Manuel Escadas Ramos Martins

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Arguente Principal)

Prof. Doutor José Paulo Oliveira Santos

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientador)

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, pela sua prontidão e disponibilidade mostrada no decurso desta dissertação e, enquanto professor, ao longo do meu percurso académico.

Aos meus pais e irmão, sem eles não estaria aqui hoje. Em primeiro lugar, por me terem dado a oportunidade de seguir com os estudos, suportando financeiramente todos estes anos e encargos extra associados. Obrigado, também, pela presença e pela motivação em qualquer ocasião. São um pilar fundamental.

À minha namorada, pela vontade em me ajudar a ultrapassar os momentos mais difíceis, pela companhia e alegria sempre demonstradas, e pelos momentos de paciência durante estes meses de trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso, pelo companheirismo ao longo destes cinco anos. Pelos momentos de diversão, saídas à noite e viagens mas também pelos momentos de estudo e horas a fio em trabalhos de grupo. Levarei grandes lembranças e recordações que um dia, decerto, me deixarão saudades.

Por fim agradeço à minha avó e ao meu avô. Quanto gostaria que tivessem presenciado este dia tal como o fizeram durante todos estes anos.

O meu muito obrigado!

Palavras-chave

Domótica; SCADA; Movicon; Controlo de Temperatura; PID; Lógica Difusa; Rádio Frequência

Resumo

A automação e o controlo apareceram nas habitações para simplificar o quotidiano das pessoas. As palavras “Domus” (casa) e “Robótica” (controlo automatizado) deram origem à “Domótica”. Esta é responsável por gerir os diversos sistemas de uma habitação, como por exemplo: climatização, segurança e iluminação.

Esta dissertação apresenta uma solução integrada para controlo e monitorização de temperatura de sistemas de aquecimento, nomeadamente um sistema de atuação elétrica. A solução proposta baseia-se numa plataforma SCADA constituída pela unidade central, em Movicon, e por diversas unidades remotas modulares, tantas quantas o número de equipamentos a controlar. Cada unidade remota é composta por diferentes sensores e atuadores e, separadamente, por um analisador de energia. A comunicação entre a unidade central e remota é estabelecida por rádio frequência.

Em cada módulo de temperatura foram implementados algoritmos de controlo por forma a reduzir o *overshoot* e manter mais estável a temperatura pretendida.

Keywords

Domotics; SCADA; Movicon; Temperature Control; PID; Fuzzy Logic; Radio Frequency

Abstract

The home automation arrived to simplify the people's life. The words "Domus" (house) and "Robotics" (automated control) gave origin to "Domotics". This is responsible for managing the different house systems, such as: climatization, security and illumination.

This work develops an integrated solution for control and monitoring temperature of a heating system, mainly an electric actuation system. The propose solution is based on a SCADA platform constituted by the central unit, in Movicon, and several modular remote units, as many as the number of devices to control. Each remote unit is composed by different sensors and actuators and, separately, by an energy analyzer. The communication between the central and remote unit is established by radio frequency.

In each temperature module we implemented control algorithms in order to reduce the overshoot and maintain more stable the setpoint temperature.

Índice

Lista de Figuras	V
Lista de Tabelas	IX
Acrónimos	XI
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Organização do Documento	1
1.2 Contexto	2
1.3 Problema a resolver e qual a sua importância	3
1.4 Resultados esperados	4
Capítulo 2 - Aquecimento nas habitações	5
2.1 Sistemas elétricos de aquecimento	6
2.1.1 Radiadores, convectores e piso radiante elétricos	6
2.1.2 Bomba de calor	6
2.1.3 Termoacumuladores elétricos	7
2.2 Controladores – Soluções comerciais.	8
Capítulo 3 - Monitorização e controlo	11
3.1 Sensores de temperatura	11
3.1.1 Termopares	11
3.1.2 RTD's	13
3.1.3 Termístores	14
3.1.4 Pirómetros	14
3.1.5 Circuitos Integrados	15

3.2	Atuação PWM.	16
3.2.1	PWM.	17
3.2.2	Semicondutores de potência.	18
3.3	Algoritmos de controlo	21
3.3.1	PID.	22
3.3.2	Lógica difusa	23
3.4	Soluções académicas.	27
3.4.1	<i>Auto-tuning</i> de controladores PID pelo método <i>relay</i>	27
3.4.2	<i>Design and realization of fuzzy self-tuning PID water temperature controller based on PLC</i>	28
3.4.3	<i>Temperature control applications by means of a pic16f877 microcontroller</i>	29
3.4.4	<i>Temperature control using fuzzy logic</i>	30
3.4.5	<i>Study on fuzzy self-tuning PID cascade control algorithm for temperature of active solar house heating system</i>	30
3.5	Transmissão de dados	31
3.5.1	Protocolo de comunicação ModBus	32
3.5.2	Comunicação sem fios – Rádio Frequência	35
 Capítulo 4 - Proposta de uma nova solução		37
 Capítulo 5 - Implementação da solução proposta		41
5.1	<i>Hardware</i> desenvolvido	42
5.1.1	Pic18f46k22	44
5.1.2	PT 1000	44
5.1.3	Circuito de potência	45
5.1.4	Módulos nRF24L01+	46
5.1.5	Transmissão de mensagens	46
5.1.6	LCD e botões	51
5.1.7	Analisador de energia EM4-din.	53
5.2	<i>Software</i> desenvolvido.	54
5.2.1	Movicon	54
5.3	Análise de resultados	55
5.3.1	Controlador on/off	56
5.3.2	Controlador PID	57
5.3.3	Controlador lógica difusa	58

5.3.4	Controladores	60
Capítulo 6 - Conclusão e trabalho futuro		63
6.1	Conclusão	63
6.2	Trabalho futuro	64
Referências Bibliográficas		65
Anexo A	Protocolo Rs232	71
Anexo B	LCD	75
Apêndice C	Desenho das placas PCB	81
Apêndice D	Esquemas elétricos	85

Lista de Figuras

1.2.1	Abastecimento de energia primária em 2010 (adaptado de [2])..	2
1.2.2	Consumo final de energia por setor - EU – 27 (Mtep) [3]..	3
1.3.1	Repartição dos consumos de eletricidade pelos diferentes usos finais (adaptado de [4])..	4
2.2.1	Imagem representativa de vários controladores de uma habitação [6]..	8
2.2.2	Centralina digital ZCA 1.0 [8]..	9
2.2.3	Controlador PID de temperatura Novus N1040 [10]..	10
3.1.1	Evolução da tensão/resistência com a temperatura para os diversos tipos de sensores [9]..	12
3.1.2	Termopar tipo K [12]..	12
3.1.3	Termopar [14]..	13
3.1.4	Termístores [16]..	15
3.1.5	Pirómetros [17]..	15
3.1.6	Sensores de temperatura de circuito integrado [18]	16
3.2.1	Exemplo de um controlador <i>on/off</i> com histerese..	16
3.2.2	Sinal PWM gerado por <i>hardware</i>	17
3.2.3	SCR [19]..	19
3.2.4	Símbolo do TRIAC e comparação entre dois SCR's em antiparalelo [19].	20
3.2.5	Controlo de fluxo de potência por TRIAC's: (A) Controlo por ciclos inteiros, (B) Controlo do ângulo de fase [19]..	20
3.3.1	Sistema de controlo com realimentação unitária (adaptado de [27])..	21
3.3.2	Organização de um sistema difuso (adaptado de [32])..	24
3.3.3	Etapa de defuzzificação..	27
3.4.1	Diagrama de blocos (adaptado de[34])...	28

3.4.2	Resultados obtidos do controlador [34].	28
3.4.3	Esquema simplificado do sistema (adaptado de [35]).	29
3.4.4	Resultados dos controladores (a) e (b)..	29
3.4.5	Esquema simplificado do sistema [36].	30
3.4.6	Protótipo [36].	30
3.4.7	Comparação entre o algoritmo Cascade-PID e FS-PIDC [39].	31
3.5.1	Estrutura mensagem ModBus [23].	32
3.5.2	Códigos função Modbus [23].	33
3.5.3	Mensagem ModBus RTU [23].. . . .	34
3.5.4	Mensagem ModBus ASCII [23].	34
4.1	Arquitetura proposta..	39
5.1	Sistema desenvolvido..	42
5.1.1	Rendering da placa PCB desenvolvida para o protótipo do módulo central.	43
5.1.2	Rendering da placa PCB desenvolvida para o protótipo de cada unidade remota modular.	43
5.1.3	PT1000 e condicionamento de sinal (adaptado de [42]).	44
5.1.4	Calibração do sensor PT1000.	45
5.1.5	Esquema elétrico do circuito de potência.	45
5.1.6	Módulos nrf24l01+ versão: (a) com antena. (b) sem antena.	46
5.1.7	Esquema simplificado da transmissão de mensagens entre equipamentos.	47
5.1.8	Envio dos caracteres em hexadecimal.	48
5.1.9	Transmissão de mensagens Movicon - μ C mestre.	48
5.1.10	Mensagens de função 03 (0x03) ModBus - leitura de um registo [23].	49
5.1.11	Mensagens de função 06 (0x06) ModBus - escrita num registo [23].	49
5.1.12	Transmissão de mensagens μ C mestre/ μ C escravo..	51
5.1.13	Canais comuns do LCD.	52
5.1.14	Criação de algarismos ou caracteres.	53
5.1.15	Analisador de energia EM4-din..	53
5.1.16	NPort 5600 - Moxa..	54
5.2.1	Interface Movicon.	55
5.3.1	Evolução da temperatura com o controlador <i>on/off</i>	56
5.3.2	Evolução da temperatura com o controlador PID.	57
5.3.3	Etapa de fuzzificação..	58
5.3.4	Etapa de defuzzificação.	59
5.3.5	Evolução da temperatura com controlador de lógica difusa..	59
5.3.6	Comparação da temperatura entre controladores.	61

A.1	Ficha Rs232 macho.	73
B.1	Segmentos que compõem cada caracter.	76
B.2	Exemplo de binarização de um número ou letra.	77
C.1	Desenho da placa PCB da unidade remota modular.	82
C.2	Desenho da placa PCB do módulo central.	83
D.1	Esquema elétrico da unidade central.	86
D.2	Esquema elétrico da unidade remota.	87

Lista de Tabelas

3.3.1	Operadores difusos [32],[33].	26
3.3.2	Métodos de agregação [32],[33].. . . .	26
3.3.3	Métodos de defuzzificação [32], [33].. . . .	26
3.5.1	Comparação entre tecnologias sem fios [24], [25].	36
3.5.2	Características do módulo sem fios nRF24L01+ [26]...	36
4.1.1	Comparação entre tecnologias existentes.. . . .	38
5.1.1	Tabela de registos ModBus.	48
5.3.1	Tabela de regras de inferência.. . . .	58
5.3.2	Comparação entre controladores.	60

Acrónimos

A/D	Conversão Analógica Digital
AQS	Água Quente Sanitária
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
Char	Caracter da tabela ASCII
CI	Circuito Integrado
CR	<i>Carriage Return</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
D/A	Conversão Digital Analógica
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
EIA	<i>Electronic Industries Alliance</i>
EIB	<i>European Installation Bus</i>
EV	Electroválvula
FLC	<i>Fuzzy Logic Controller</i>
FS-PIDC	<i>Fuzzy Self tuning PIDController</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
Hx	Hexadecimal
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IC	<i>Integrated Circuit</i>

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical radio bands</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LF	<i>Line Feed</i>
LRC	<i>Longitudinal Redundancy Check</i>
Mbps	Mega <i>bits</i> por segundo
Mtep	Mega tonelada equivalente de petróleo
NFC	<i>Near Field Communication</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
PIC	Microcontrolador da Microchip
PID	Proporcional Integrativo Derivativo
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
RF	Rádio Frequência
RS232	Recomendação para Standard 232
RS485	Recomendação para Standard 485
RSI	Rotina de Serviço à Interrupção
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TCP-IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TRIAC	<i>Triode for Alternating Current</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
USART	<i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i>
μC	micro Controlador

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo enquadra a presente dissertação quanto ao seu problema, importância e resolução.

1.1 Organização do Documento

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, segundo um fio condutor. Numa fase inicial pretende-se estudar o mercado e os principais sistemas utilizados para o aquecimento de uma habitação. Feito esse estudo importa perceber como estes funcionam e são capazes de monitorizar e controlar a temperatura. Por fim, e antes de apresentar uma solução e respetiva implementação, é feita uma pequena revisão bibliográfica de algoritmos para controlo de temperatura. No início de cada capítulo existe um pequeno resumo para melhor enquadramento da leitura. Os capítulos enumeram-se da seguinte forma:

- Capítulo 1 - Introdução
- Capítulo 2 - Aquecimento nas habitações
- Capítulo 3 - Monitorização e controlo
- Capítulo 4 - Proposta de uma nova solução
- Capítulo 5 - Implementação da solução proposta
- Capítulo 6 - Conclusão e trabalho futuro

1.2 Contexto

O consumo de energia é um dos problemas mais gritantes nos dias de hoje. A crescente preocupação com este tema deve-se à escassez das matérias-primas e à incapacidade para suportar o aumento da população e da sua dependência energética.

É graças à utilização da energia que o ser humano pode usufruir dos mais variados serviços e tecnologias, do conforto e qualidade de vida a que hoje está acostumado. Porém, e à medida que a sociedade se torna cada vez mais desenvolvida, é necessário controlar este consumo, tornando-o mais eficiente e, sobretudo, mais sustentável.

Quando se fala em poupança de energia, eficiência energética, ou modelo energético fala-se, primariamente, da origem dos recursos utilizados. Quanto à sua origem estes podem ser divididos em energias renováveis e não renováveis. As energias renováveis são fontes inesgotáveis de energia, provenientes da natureza, e ao qual se pode recorrer de forma permanente. Caracterizam-se ainda por terem um impacto ambiental nulo na emissão de gases de efeito de estufa. São exemplos a energia solar, eólica, hídrica, de biomassa, geotérmica e das ondas. As energias não renováveis diminuem à medida que são consumidas, têm reservas limitadas e são fontes de poluição. São exemplos o carvão, gás natural, petróleo e o urânio [1].

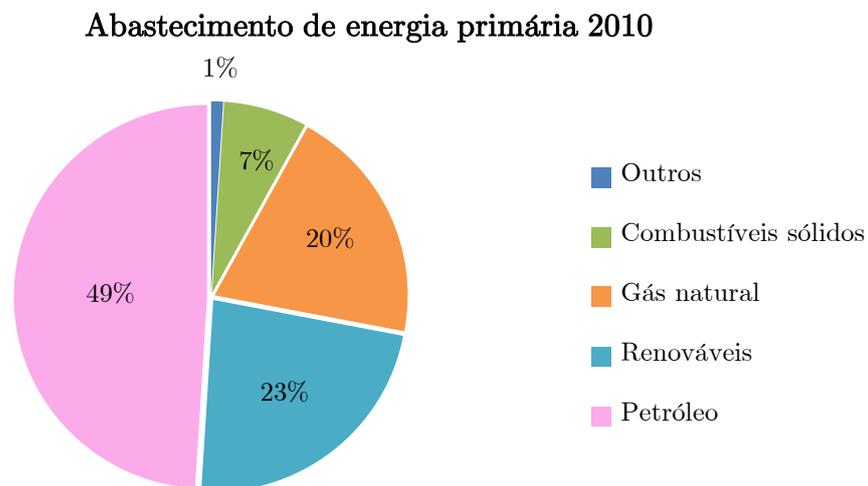


Figura 1.2.1 - Abastecimento de energia primária em 2010 (adaptado de [2]).

Em 2010, o consumo final de energia na união europeia, dos 27 estados membros, foi de 1153,3 Mtep (Mega tonelada equivalente de petróleo), sendo que 40,8%, o equivalente a 470,5 Mtep, foi para o setor residencial e de edifícios [3].

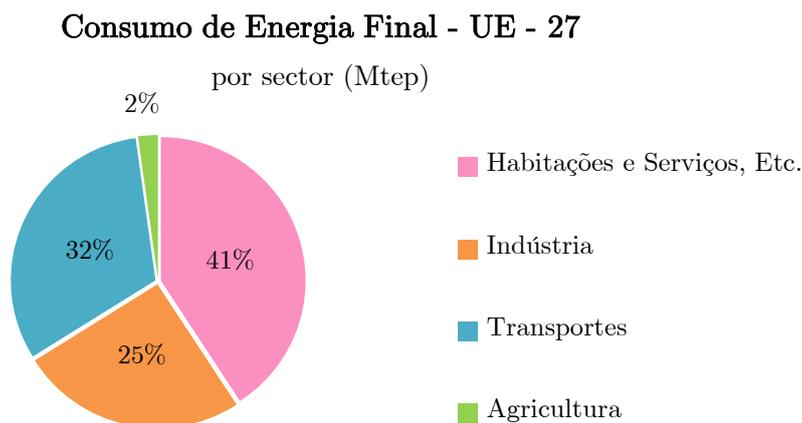


Figura 1.2.2 - Consumo final de energia por setor - EU – 27 (Mtep) [3].

1.3 Problema a resolver e qual a sua importância

Num mundo em desenvolvimento e cada vez mais exigente quanto às suas necessidades, é essencial que todos os países apostem, fortemente, na eficiência energética. Não só o planeta depende do ser humano mas também é o ser humano que depende deste tipo de medidas para se tornar cada vez mais competitivo e alimentar o crescimento exponencial do novo mundo.

A indústria será a primeira a recuperar o seu investimento e implementar novas medidas energético-ambientais, pois consumirá menos energia por unidade de produto ou serviço prestado. No entanto, no sector dos edifícios a situação é um pouco diferente, não existe a evolução desejada. Pelo contrário, verifica-se inclusive um aumento no consumo energético das habitações, justificado em parte pela maior aquisição de equipamentos consumidores de energia. Em Portugal, o sector residencial, com cerca de 3,9 milhões de alojamentos, contribuiu com 17,7% do consumo de energia final em termos nacionais, representando cerca de 42,6% do consumo de eletricidade, o que evidencia, desde logo, a necessidade de moderar, especialmente, o consumo elétrico [1].

É este consumo elétrico que se pretende diminuir, não só o que advém de maus hábitos de utilização dos equipamentos mas também o que advém da falta de otimização dos mesmos. Em especial, os que respeitam ao aquecimento/arrefecimento ambiente e aquecimento de águas. Como se pode observar pela Figura 1.3.1 estas parcelas correspondem a um total de aproximadamente 13% do consumo elétrico anual médio de uma habitação, 3700 kWh.

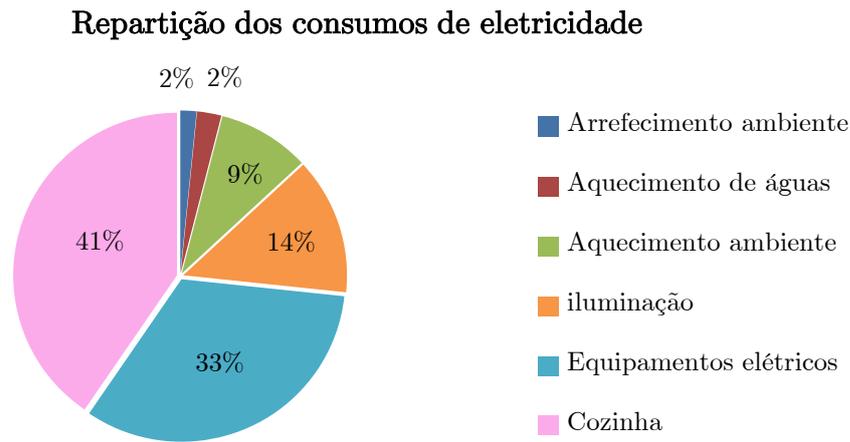


Figura 1.3.1 - Repartição dos consumos de eletricidade pelos diferentes usos finais (adaptado de [4]).

1.4 Resultados esperados

Com este trabalho pretende-se desenvolver um sistema domótico de monitorização e controlo de temperatura de uma habitação, nomeadamente, dos equipamentos elétricos para aquecimento/arrefecimento ambiente e aquecimento de águas. Espera-se uma redução no consumo de energia provocado quer pela ineficiência de determinados equipamentos quer pela má regulação de temperatura. Note-se que o simples aumento de um grau Celsius poderá traduzir-se num consumo de 5% a 7% mais do aquecimento ambiente [5]. É uma percentagem relevante e que poderia ser colmatada com uma regulação da temperatura mais adaptada às necessidades, talvez um ou dois graus abaixo do que realmente seria necessário.

A nível prático espera-se desenvolver uma plataforma modular capaz de monitorizar e controlar vários equipamentos de aquecimento. A monitorização passa pela recolha de dados dos diversos sensores e apresentação em “tempo real” do consumo da habitação. O controlo mantém a temperatura pretendida mais estável, sem *overshoots* nem oscilações. A opção tomada passa pela substituição dos controladores *on/off*, por PID’s ou outros algoritmos.

No que à domótica diz respeito, exige-se uma solução integradora. É necessário desenvolver um sistema sem fios baseado num equipamento central, responsável pela monitorização da habitação, e várias unidades remotas modulares, de aquisição de dados e controlo dos diversos equipamentos.

Capítulo 2

Aquecimento nas habitações

Este capítulo pretende dar uma breve explicação dos sistemas de aquecimento de uma habitação, em especial dos sistemas elétricos, e dos controladores de temperatura já existentes.

A redução no consumo de energia a nível global passa por todos os cidadãos, sobretudo pela consciencialização de que a energia não é um recurso inesgotável. As habitações são o ponto de partida para uma maior sustentabilidade energética.

Em Portugal, cada habitação consome cerca de 22% da energia no aquecimento ambiente [4]. A redução deste consumo passa não só por medidas de poupança energética mas também por medidas de eficiência energética. Distinga-se as duas pela diferença de consumo entre apagar uma luz quando não é necessária e consumir menos por investir em equipamentos mais eficientes. A compra deste tipo de bens depende, essencialmente, da zona climática, do tipo de uso que se dá à habitação e do custo dos próprios equipamentos.

Os sistemas de aquecimento podem ser divididos em: produtores de energia térmica - e são exemplo as caldeiras e as bombas de calor -, e distribuidores de calor - os radiadores e piso radiante. Os dispositivos que adaptam a resposta do sistema às necessidades térmicas da habitação denominam-se unidades reguladoras e de controlo. A distinção pode ainda ser feita quanto ao tipo de energia utilizada: elétrica, gás ou biomassa.

Como o controlo de temperatura é feito num equipamento de funcionamento similar a um termoacumulador elétrico, as secções seguintes dizem respeito aos sistemas elétricos de aquecimento, à produção de AQS, e às unidades de controlo e regulação.

2.1 Sistemas elétricos de aquecimento

Uma vez que nesta dissertação o protótipo é atuado eletricamente importa estudar os equipamentos que controlem a sua temperatura através de um mecanismo elétrico, seja ele a regulação de potência de uma resistência de aquecimento, a variação de frequência de um motor de uma bomba de calor ou a simples atuação de electroválvulas. Por esta razão são apresentados de seguida os radiadores e pisos radiantes elétricos, as bombas de calor e os termoacumuladores elétricos.

2.1.1 Radiadores, convectores e piso radiante elétricos

Estes são equipamentos individuais de produção de energia térmica. O aquecimento é feito através da passagem de corrente elétrica por um fio ou resistência (efeito de “Joule”). Por esta razão, tanto a nível económico como de eficiência energética, estes aparelhos não são muito aconselháveis.

2.1.2 Bomba de calor

A bomba de calor é um equipamento que tem como finalidade transferir calor de uma fonte fria para uma fonte quente. Quando a energia elétrica é a energia disponível para o aquecimento, a bomba de calor é a solução mais eficiente.

É um exemplo de um sistema auxiliar e de apoio, que deve ser ligado em série com o sistema solar térmico. Este equipamento entra em funcionamento apenas em momentos de pico ou ausência prolongada de radiação, como é o caso das estações mais frias do ano. Mesmo nesta altura a prioridade é dada ao sistema solar [1].

A vantagem do sistema é a sua alta eficiência: por cada kWh de calor de eletricidade consumida, transfere-se entre 2 a 4 kWh de calor. Para além disso, a bomba de calor permite não apenas aquecer a habitação, mas igualmente arrefecê-la. O seu inconveniente dá-se quando as temperaturas exteriores são muito baixas, pela dificuldade em captar o calor necessário para aquecer o interior. Nestes casos, alguns equipamentos

recorrem a resistências elétricas de apoio. Os aparelhos do tipo *inverter*, que regulam a potência por variação da frequência elétrica, poupam energia e são mais eficazes com baixas temperaturas exteriores. [1].

2.1.3 Termoacumuladores elétricos

Tendo em conta as limitações da potência máxima que é possível instalar numa rede elétrica doméstica, monofásica de baixa tensão, as potências térmicas disponíveis são muito reduzidas (da ordem de 1,5kW) quando comparadas com a utilização de aparelhos a gás (da ordem dos 25kW). Em consequência os tempos de reaquecimento do depósito de acumulação elétrico até à temperatura de consumo poderão chegar a várias horas [1]. Por esta razão é bastante importante prever o consumo ao longo do dia, e dimensionar corretamente o depósito quanto à sua capacidade e isolamento. Do ponto de vista energético e financeiro esta solução é pouco recomendável.

Produção de AQS

Os sistemas de AQS podem ser divididos em instantâneos e de acumulação. Os sistemas instantâneos e, como o próprio nome indica, aquecem a água quando são ativados. São exemplo os esquentadores a gás, elétricos ou as caldeiras murais. Este tipo de sistema traz inúmeras desvantagens. Uma delas é o desperdício de uma quantidade considerável de água e energia até que se atinja a temperatura desejada, agravada com o aumento da distância entre o sistema de aquecimento e o ponto de consumo. Outra desvantagem são os “para-arranca” constantes que aumentam consideravelmente o consumo, bem como deterioração do equipamento. No abastecimento de dois pontos de consumo em simultâneo apresentam igualmente uma prestação limitada.

Os sistemas de acumulação podem ser subdivididos em dois tipos: o equipamento que aquece a água (por exemplo, uma caldeira ou uma bomba de calor) mais termoacumulador e os termoacumuladores de resistência elétrica. Os sistemas de acumulação mais utilizados são as caldeiras com acumulação integrada. Contrapondo aos anteriores sistemas (os instantâneos), estes funcionam de forma mais eficiente uma vez que trabalham em contínuo, sem “para-arranca”. Uma vez aquecida, a água quente é armazenada num tanque acumulador isolado, o que permite posteriores utilizações simultâneas [1].

2.2 Controladores – Soluções comerciais

As necessidades de aquecimento de uma habitação são inconstantes pois existem oscilações de temperatura, tanto ao longo do ano como ao longo do dia. Estas refletem-se até no interior da habitação, de divisão para divisão. Espaços como a cozinha têm as suas próprias fontes de calor e por isso requerem menos aquecimento. Desta forma, é muito importante dispor de um sistema de regulação de aquecimento que adapte as temperaturas da habitação às diferentes necessidades – unidades reguladoras e de controlo.



Figura 2.2.1 - Imagem representativa de vários controladores de uma habitação [6].

Além de assegurar o conforto exigido é necessário economizar os sistemas de aquecimento. Como controladores mais usuais podem-se destacar [7]:

- Relógios encastráveis – permitem programar os períodos de funcionamento do sistema, parando-o automaticamente nos períodos em que normalmente o utilizador está ausente.
- Termóstatos – permitem o controlo do funcionamento do sistema de aquecimento, com base na temperatura da divisão da habitação onde estão instalados.
- Termóstatos programáveis – juntam as funções de termóstato ambiente e de relógio programador, conciliando ambos os mecanismos de regulação num único acessório.

Nesta secção são apresentados alguns controladores de temperatura de equipamentos de aquecimento.

Termóstato programável TR 15-RFT – Vulcano

Este termóstato ambiente programável é compatível com todas as caldeiras da gama Vulcano. Sem fios e com possibilidade de ativar/desativar o sistema via telefone tem também programação de períodos de funcionamento, um lcd, programas de economia de energia, conforto e anti gelo [7].

Centralina digital ZCA 1.0

A série de centralinas de aquecimento ZCA 1.0 serve de apoio à bomba de calor Montreal. Dispõe de uma visualização em tempo real, seis sensores de temperatura pt1000, quatro saídas relé, função AQS, circuito de aquecimento com mistura, três variantes hidráulicas, bloqueio de menu, função *reset*, função anti legionela e horários de funcionamento para aquecimento económico e de conforto e produção de AQS [8].



Figura 2.2.2 - Centralina digital ZCA 1.0 [8].

Controlador WPM Econ5Plus para bomba de calor - Dimplex

Para além do controlo do circuito de refrigeração da bomba de calor, o controlador encarrega-se da ativação e desativação da mesma, dependendo da necessidade de aquecimento. Tem como principais características: temperaturas de sistema otimizadas para o funcionamento, na função de aquecimento para altos coeficientes anuais de trabalho e baixos custos de funcionamento; funções de tempo para o aquecimento, preparação de água quente e da água da piscina [9].

Este controlador recorre a vários módulos extra tais como: módulo para uma ligação de rede *Ethernet*; módulo para uma ligação bus KNX/EIB; módulo para uma ligação ModBus; regulador da temperatura ambiente para ligar ao controlador da bomba

de calor WPM; e um comando para controlar a bomba de calor WPM 2006/2007/EconPlus/R [9].

Controlador PID de temperatura N1040 - Novus

O controlador de temperatura microprocessado N1040 é um exemplo distinto. Foi desenvolvido para dar resposta a um universo de aplicações onde se pretende reunir baixo custo e um controlo de temperatura mais preciso e sofisticado. Tem um sistema de conexão elétrica removível que facilita a sua instalação. Aceita sensores de temperatura pt100 e termopares do tipo J, K e T, tem duas saídas para controlo ou alarme, alimentação universal e ajuste automático dos parâmetros PID, uma melhoria aquando da adaptação ao controlo de outros sistemas [10].



Figura 2.2.3 - Controlador PID de temperatura Novus N1040 [10].

Capítulo 3

Monitorização e controlo

O presente capítulo serve de fundamentação teórica à solução implementada. É analisado todo o sistema domótico de aquecimento: desde a medição de grandezas e meios para troca de informação, até ao circuito de potência e algoritmos de controlo.

3.1 Sensores de temperatura

Os sensores de temperatura são o componente principal de um sistema térmico. Dos vários tipos existentes podem-se destacar quatro. São eles os termopares, os sensores resistivos (ou RTD's), os termístores (com coeficiente de temperatura negativo, NTC) e os sensores de circuito integrado, CI. A Figura 3.1.1 apresenta, para cada caso, a evolução da tensão ou resistência com o aumento da temperatura.

3.1.1 Termopares

Os termopares são o tipo de sensores mais utilizados na indústria dada a sua resistência e o range de temperaturas que conseguem alcançar. Dependendo do tipo do termopar, ou seja, dos metais que o constituem, estes podem medir temperaturas entre os $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $2315\text{ }^{\circ}\text{C}$ [11]. Muito consoante o tipo de termopar e o seu encapsulamento o custo de um sensor deste tipo situa-se entre uma dezena e uma centena de euros.

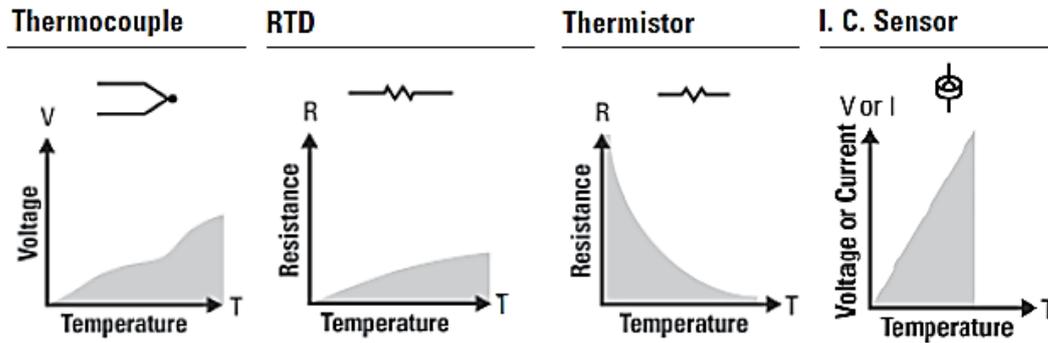


Figura 3.1.1 - Evolução da tensão/resistência com a temperatura para os diversos tipos de sensores [9].



Figura 3.1.2 - Termopar tipo K [12].

Estes sensores de temperatura baseiam-se no efeito de Seebeck. Este fenómeno, descoberto pelo cientista Thomas Seebeck, demonstra que dois materiais diferentes, quando ligados entre si, criam um circuito fechado por onde circula uma corrente devido à força eletromotriz existente. Esta é proporcional à diferença de temperatura entre as junções, quente e fria [13]. Por esta razão, para conhecer a temperatura absoluta é necessário saber qual a temperatura da junção fria. Este fenómeno é conhecido por compensação de junção fria e pode ser feita por hardware ou software.

Como a utilização de um termopar pressupõe a utilização de outro sensor para a obtenção da temperatura da junção fria, estes são especialmente úteis para medir temperaturas que se encontrem fora das gamas de medida de outros sensores. Para medir temperaturas próximas da temperatura da junção de referência os termopares não são aconselháveis pois, neste caso, a tensão de saída é muito pequena, o que possibilitará erros elevados.

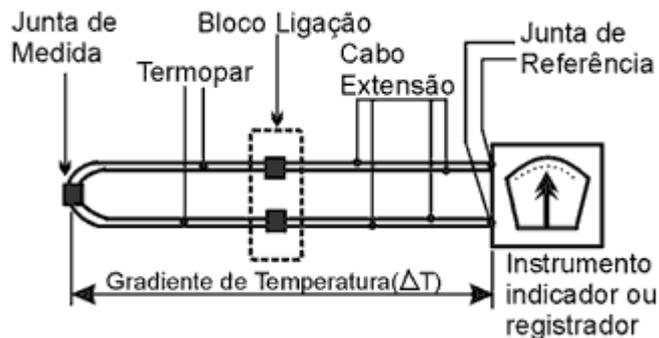


Figura 3.1.3 - Termopar [14].

3.1.2 RTD's

Os RTD's são sensores de temperatura de precisão utilizados em aplicações industriais e laboratórios. São geralmente construídos por um substrato cerâmico revestido com um fino filme de metal. Tipicamente, são mais precisos do que os termopares e conseguem manter essa precisão por um maior período de tempo. A sua gama de temperaturas atinge os 650°C. A resistência varia de forma aproximadamente linear com a temperatura. Ao contrário de um termopar este não produz um sinal elétrico. Para conhecer a sua resistência é preciso excitá-lo com uma corrente e tirar o seu valor através da lei de ohm ($U=RI$).

A grande maioria das RTD's é feita de platina, pois é o metal que proporciona uma maior gama de temperatura. As RTD's de platina mais usadas a nível industrial têm uma resistência nominal de 100 Ω a 0°C. Outras, no entanto, têm uma resistência base de 500 ou 1000 ohms, a 0°C.

É necessário ter algumas precauções com estes sensores. Por exemplo, a tensão elétrica aplicada ao RTD pode por ela própria e, por efeito de joule, aquecer a resistência fazendo assim subir a temperatura e falsear os resultados. Uma vez que o ponto de medida costuma estar relativamente longe, os fios elétricos da ligação têm uma resistência elétrica não desprezável e que deve ser tida em conta. Nestes fios podem também ser induzidas tensões (lei de Faraday) e conseqüentemente correntes indesejadas. Por estas razões os sensores devem ter 3 e 4 fios [13]. Tomando por exemplo os RTD's de platina, ao utilizar um pt1000 em vez de um pt100 consegue-se minimizar os erros introduzidos pelos condutores pois os pt1000 têm uma variação de resistência efetiva por °C superior às

pt100 (o que também faz com que se consiga uma melhor resolução de leitura). A nível de custo, os RTD's situam-se no mesmo patamar que os termopares.

3.1.3 Termístores

Um termístor é construído a partir de um material semicondutor cuja resistência, tal como nos RTD's, varia com a temperatura. Por norma apresentam um coeficiente de temperatura negativo (NTC).

A sua principal característica é a não linearidade da resistência com a variação de temperatura. Este comportamento torna-os extremamente sensíveis a pequenas variações de temperatura, podendo estas ser da ordem de $0,1^{\circ}\text{C}$. Porém também diminui a gama de funcionamento, indo dos -100°C até aos 300°C , inferior aos termopares e RTD's. Têm ainda outra desvantagem, é que o seu comportamento não linear faz com que não existam curvas standard que os caracterizem e como tal é necessário recorrer a modelos matemáticos para conhecer a temperatura. O mais aproximado é a equação Steinhart-Hart que devolve um erro de leitura na ordem dos $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$ [15].

Os termístores podem ser muito pequenos, o que significa uma rápida resposta às mudanças de temperatura. Significa também que a sua pequena massa térmica torna-os especialmente suscetíveis a erros por aquecimento [15]. Os termístores mais baratos chegam a custar cêntimos e os mais caros situam-se na ordem da meia centena de euros.

3.1.4 Pirómetros

Os pirómetros são dispositivos de medição da radiação infravermelha. Todos os corpos emitem uma radiação infravermelha, de comprimento de onda variável com a temperatura. Quanto menor for o comprimento de onda, maior é a frequência da radiação e, conseqüentemente, maior é a temperatura a que o corpo se encontra. É possível direcionar essa mesma radiação e fazê-la incidir num termopar e conhecer assim a temperatura através da tensão gerada.



Figura 3.1.4 - Termístores [16].



Figura 3.1.5 - Pirómetros [17].

3.1.5 Circuitos Integrados

Os sensores de circuito integrado são bastante fáceis de utilizar pois não requerem linearização, nem um circuito alternativo, e têm um custo muito reduzido. Podem ser encontrados em placas de circuito para monitorização e controlo de temperatura, em processadores de computador, em telemóveis e em algumas aplicações industriais. Estão disponíveis com saída em tensão ou corrente, linearmente proporcional à temperatura. O valor de temperatura pode ainda ser apresentado, diretamente, sob o formato digital. Os sensores com saída em corrente são especialmente úteis para leituras remotas, pois contornam os problemas de quedas de tensão nos condutores que seriam problemáticos nos sensores com saída em tensão. Como se tratam de sensores construídos com materiais semicondutores, tal como os termístores, têm uma gama de temperatura limitada, geralmente de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

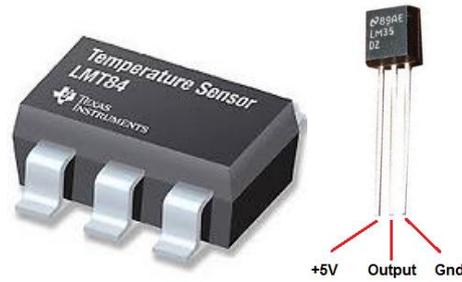


Figura 3.1.6 - Sensores de temperatura de circuito integrado [18].

3.2 Atuação PWM

Nesta secção é apresentada a fundamentação teórica da tecnologia de atuação utilizada neste trabalho. Esta é dividida em dois grupos: o tipo de sinal aplicado ao circuito - a modulação PWM - e os dispositivos que processam a energia para alimentar as cargas - os semicondutores.

A modelação PWM surge em detrimento do controlo *on/off*. Este é considerado o mais simples dos controladores e muitas das vezes até o mais económico. Contudo tem algumas limitações, principalmente no que diz respeito ao comportamento dinâmico e em regime permanente do sistema em malha fechada. Em regime permanente, a saída do sistema apresenta uma oscilação em torno do valor de referência. Este aspeto confere ao controlador uma baixa precisão, impossível de aceitar em muitos casos. A Figura 3.2.1 demonstra, esquematicamente, o seu modo de funcionamento. Como em muitas situações a atuação é feita por meio de relés, levando a constante oscilação ao desgaste mecânico destes atuadores. Por esta razão são utilizados semicondutores.

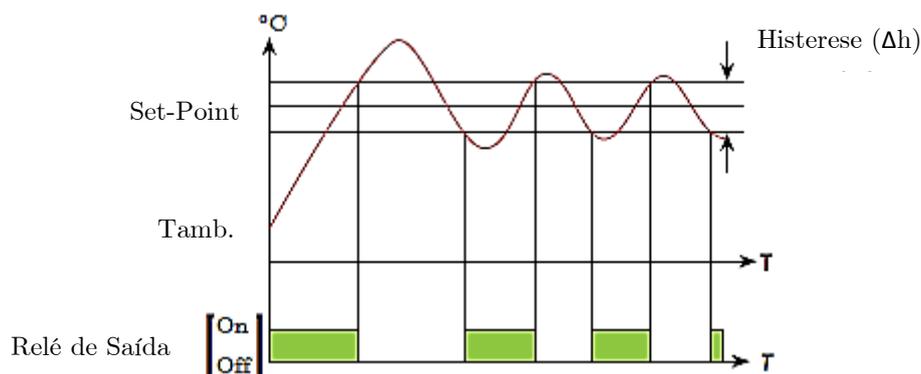


Figura 3.2.1 - Exemplo de um controlador *on/off* com histerese.

3.2.1 PWM

Designa-se por PWM, do inglês *Pulse-Width Modulation*, a técnica de modulação que permite controlar a largura de pulso. É amplamente utilizada nas mais diversas aplicações de eletrónica e é uma forma bastante simples de controlar a energia fornecida a equipamentos elétricos.

Observando num osciloscópio, uma PWM tem a forma de uma onda quadrada com um determinado período e *duty cycle*. Na prática, e por *hardware*, é possível gerar uma PWM de forma simples. A Figura 3.2.2 apresenta um diagrama funcional simplificado da obtenção das ondas retangulares à custa de um gerador de ondas em dente de serra.

O modulador da largura de pulso consiste num gerador de ondas de dentes de serra, num amplificador de erro e num comparador. O amplificador de erro compara a tensão de referência com a tensão de realimentação. A saída do amplificador de erro é comparada com a onda de dentes de serra. Quando esta é superior o comparador está a ‘1’, ou seja, à condução. Quando é inferior a saída lógica do comparador está a ‘0’, logo ao corte.

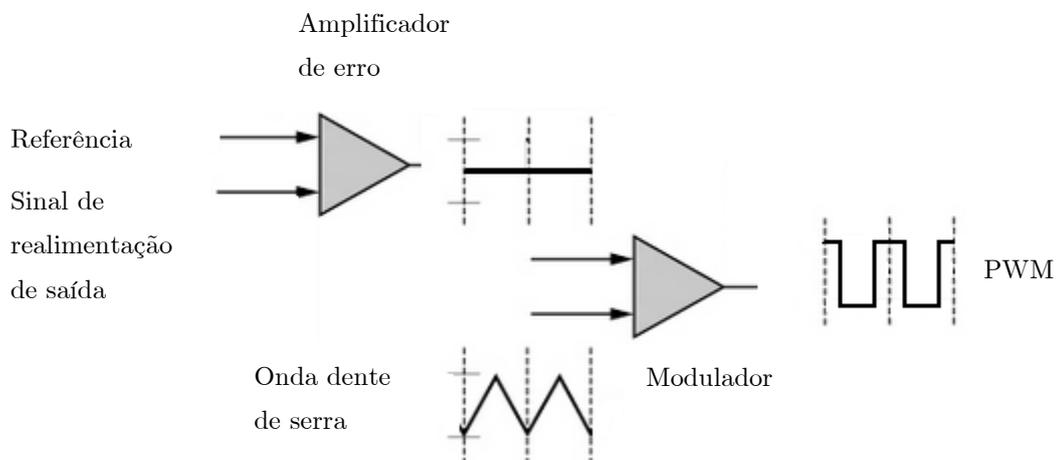


Figura 3.2.2 - Sinal PWM gerado por *hardware*.

Também é possível obter um sinal PWM através de *software*, nomeadamente através de interrupções ao código de um microcontrolador. Quando é gerada uma interrupção o programa salta para a rotina de serviço à interrupção, RSI, deixando o restante código em suspenso. Isto acontece sempre que um *timer*, incrementado pelo microcontrolador, atinge o seu limite e reinicia a sua contagem. Se forem considerados dois estados do *timer*, sendo que, num deles é atuada uma saída do microcontrolador e no seguinte essa mesma saída é desligada, então é criada uma onda quadrada com um período

que deriva da soma dos dois tempos de estado, e que ora está a 5V ora está a 0V. Outra hipótese ainda é recorrer aos comparadores existentes nos microcontroladores. De um modo geral, é possível criar um *timer* incrementado por *hardware* e que compara o seu valor com um valor pré-estabelecido pelo utilizador. Quando o valor do *timer* iguala o valor pré-estabelecido então ocorre o estouro do *timer*. Neste caso a grande diferença é que o processo ocorre de forma paralela, ou seja, o microcontrolador consegue correr o código à medida que gera a PWM, o que não se verifica no primeiro caso.

Explicada a formação de sinais PWM, resta saber quais os dispositivos eletrónicos passíveis de serem comutados através destes mesmos sinais, mais conhecido por eletrónica de potência.

3.2.2 Semicondutores de potência

A eletrónica de potência tem a função de controlar o fluxo de potência, processando energia das fontes de alimentação disponíveis (rede elétrica, geradores ou baterias) para alimentar as cargas, através de dispositivos semicondutores de potência. A sua importância está presente em algumas aplicações [19]:

- Residencial e comercial: iluminação – computadores pessoais; equipamentos eletrónicos de entretenimento; elevadores; sistemas ininterruptos de energia; equipamentos de escritório.
- Industrial: acionamento de bombas, compressores, ventiladores, máquinas ferramenta e outros motores; iluminação; aquecimento indutivo.
- Transporte: veículos elétricos; carga de baterias;

Para a escolha de um semicondutor de potência é necessário ter em conta determinados fatores, tais como: o custo do dispositivo, os níveis de tensão e corrente, a complexidade do circuito de comando e o seu custo, e a frequência com que o dispositivo irá operar.

Neste contexto, os semicondutores podem ser considerados como interruptores, podendo estar à condução (*on*) ou ao corte (*off*). De acordo com o grau de controlabilidade podem ser divididos em três grupos [19]:

- Interruptores não controlados: estado *on* e *off* dependentes do circuito de potência. Ex.: díodos.
- Interruptores semi-controlados: estado *on* controlado por um sinal externo e *off* dependente do circuito de potência. Ex.: Tirístores (SCR, TRIAC).

- Interruptores controlados – estados *on* e *off* controlados por sinal externo. Ex.: Transístor (BJT), MOSFET, IGBT, GTO.

Nesta dissertação importa controlar os momentos em que o circuito externo alimenta a carga segundo um sinal PWM. Por esta razão os interruptores não controlados não são uma opção. Não sendo uma exigência controlar o estado *off* com um sinal externo, a opção recaiu sobre os tirístores. Estes são os semicondutores de potência de menor custo. São amplamente utilizados em conversores que usam comutação pela rede. Todavia, note-se que para aplicações mais exigentes, apresentam limitações devido à baixa velocidade de comutação, à complexidade do circuito de comando e dificuldade no bloqueio.

SCR e TRIAC

Quando o SCR (Figura 3.2.3) está diretamente polarizado ($v_T > 0$) e é aplicado um pulso positivo de corrente da *gate* (G) para o cátodo (K), este dispositivo entra em condução permitindo a circulação da corrente I_T entre ânodo e cátodo. Uma vez em condução, o pulso da *gate* pode ser removido e o SCR continua em condução como um diodo, ou seja, não pode ser comandado a bloquear. Para que deixe de conduzir é necessário que a corrente I_T caia abaixo do valor mínimo de manutenção, desta forma o SCR entra novamente na região de corte. Quando o SCR está inversamente polarizado ($v_T < 0$) não conduz [20].

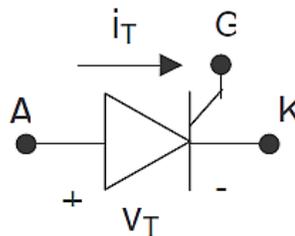


Figura 3.2.3 - SCR [19].

O TRIAC é um tirístor que permite a condução de corrente nos dois sentidos, entrando em condução e bloqueando de modo análogo ao SCR. Uma visão simplificada do TRIAC é a de uma associação de dois SCR's em antiparalelo. A Figura 3.2.4 mostra o símbolo do TRIAC e a comparação com dois SCR's. Como é bidirecional, não se usa os termos ânodo e cátodo, deste modo os terminais do TRIAC são chamados ânodo 1 (A1), ânodo 2 (A2) e *gate* (G). Além de conduzir nos dois sentidos, o TRIAC pode ser disparado tanto com pulso positivo como por pulso negativo de corrente aplicado entre a *gate* (G) e o ânodo1(A1) [20].

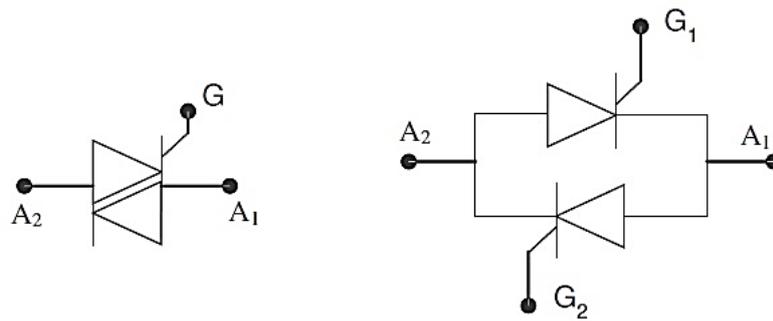


Figura 3.2.4 - Símbolo do TRIAC e comparação entre dois SCR's em antiparalelo [19].

O controlo pode ser feito de duas formas: (A) controlo por ciclos inteiros e (B) controlo do ângulo de fase. Uma vez disparado, o TRIAC continua a conduzir até que a corrente elétrica caia abaixo do valor de corte. O instante em que o pulso é aplicado dita o tipo de controlo que se pretende obter. Por esta razão o TRIAC é considerado um dispositivo de controlo conveniente para circuitos de corrente alternada, permitindo acionar grandes potências com circuitos em que as correntes de disparo são da ordem de miliampere.

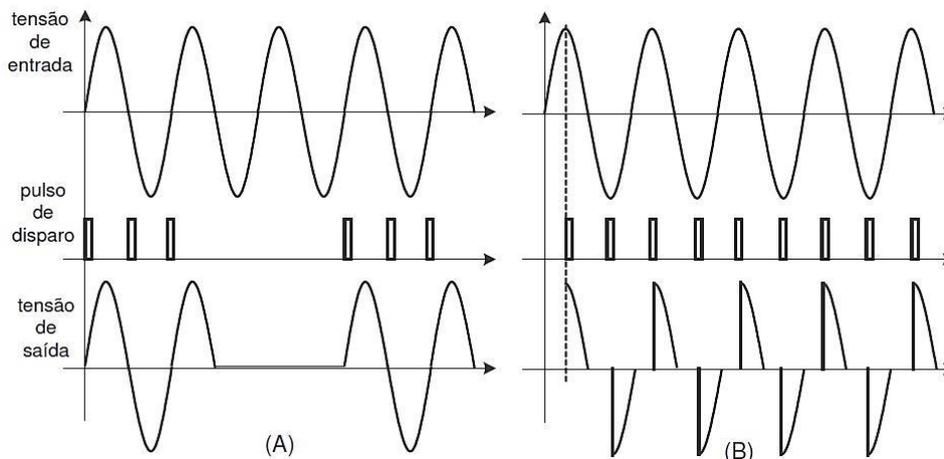


Figura 3.2.5 - Controlo de fluxo de potência por TRIAC's: (A) Controlo por ciclos inteiros, (B) Controlo do ângulo de fase [19].

Um componente muito utilizado num circuito de comando são os opto acopladores. Como os circuitos de disparo apresentam um baixo nível de potência, quando comparados com o do circuito principal, devem-se utilizar elementos que proporcionem um isolamento elétrico entre estes. Caso contrário ruídos indesejados podem causar o mau funcionamento do sistema ou até mesmo danificá-lo. O opto acoplador funciona da seguinte forma: quando o led é polarizado e emite luz, o transístor recebe a energia luminosa e passa a conduzir, operando como um interruptor. Estes dispositivos chegam a apresentar um isolamento típico de 2500V [21].

3.3 Algoritmos de controlo

A teoria dos sistemas de controlo procura conhecer as leis que regem um sistema para o melhor compreender e analisar. Numa relação de causa-efeito pretende-se manipular o elemento causa por forma a alcançar um determinado efeito, o mais desejado. Na área das engenharias o alvo de estudo são os sistemas físicos. Estes podem ser traduzidos matematicamente através de operações matemáticas e, na maioria dos casos, de forma muito semelhante ou até idêntica. O diagrama de blocos é a forma esquemática mais utilizada em engenharia para interligar os modelos matemáticos dos vários sistemas [27].

Um sistema de controlo poderá ser de malha aberta ou fechada. Em malha aberta a entrada do sistema não é afetada pela saída ao invés de sistemas em malha fechada, que são realimentados.

A Figura 3.3.1 apresenta um diagrama de blocos para um controlo com realimentação unitária. O controlador é excitado pelo sinal de erro, $e(t)$. Este resulta de uma soma algébrica no somador do sinal de referência, $r(t)$, com o sinal proveniente da unidade de realimentação, $h(t)$. Na maior parte das vezes torna-se necessário condicionar a saída do sistema através de uma unidade de realimentação que transforma o sinal de saída num sinal diretamente comparável com o de referência [27]. O sinal de erro, $e(t)$, aplicado à entrada do controlador será nulo quando o objetivo atingido coincidir com o pretendido. O controlador, por sua vez, gera um sinal $u(t)$, denominado força de controlo, que atuará diretamente no processo que se pretende controlar. Nestes sistemas o sinal de realimentação, $h(t)$, coincide com o de saída $c(t)$.

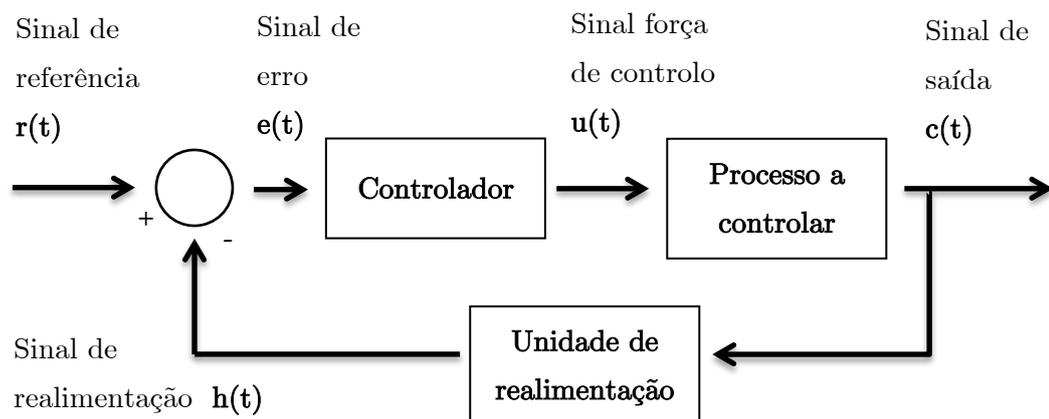


Figura 3.3.1 - Sistema de controlo com realimentação unitária (adaptado de [27]).

3.3.1 PID

O algoritmo PID é um algoritmo robusto e de fácil compreensão. Nos controladores com realimentação este é o mais utilizado. Apesar da variação do seu comportamento dinâmico fornece excelentes desempenhos.

Como o próprio nome indica a sigla PID deriva das palavras “Proporcional”, “Integrativo” e “Derivativo”. Estes são os parâmetros principais do algoritmo. Genericamente são usados quatro algoritmos básicos: PID, P, PI ou PD, sendo os três últimos, casos particulares do primeiro [28].

Uma expressão genérica do algoritmo pode ser dada pela seguinte equação [29]:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.3.1)$$

Na chamada forma paralela tem-se,

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.3.2)$$

sendo a variável de controlo, $u(t)$, a saída do controlador e o erro, $e(t)$, a diferença entre o output introduzido no sistema e a resposta do controlador. Os parâmetros K_p , K_i e K_d dizem respeito ao ganho proporcional, integrativo e derivativo, respetivamente.

Segundo a transformada de Laplace:

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + sK_d \quad (3.3.3)$$

Esta fórmula pode ainda ser rearranjada com os seguintes parâmetros:

$$K_p = K \quad (3.3.4)$$

$$K_i = \frac{K}{T_i} \quad (3.3.5)$$

$$K_d = KT_d \quad (3.3.6)$$

Para uma implementação digital interessa mais a transformada em z ,

$$U(z) = \left[Kp + \frac{K_i}{1 - z^{-1}} + K_d(1 - z^{-1}) \right] E(z) \quad (3.3.7)$$

e rearranjando:

$$U(z) = \left[\frac{(K_p + K_i + K_d) + (-K_p - 2K_d)z^{-1} + K_dz^{-2}}{1 - z^{-1}} \right] \quad (3.3.8)$$

Sendo:

$$K_1 = K_p + K_i + K_d \quad (3.3.9)$$

$$K_2 = -K_p - 2K_d \quad (3.3.10)$$

$$K_3 = K_d \quad (3.3.11)$$

pode-se reescrever da seguinte forma:

$$U(z) - z^{-1}U(z) = [K_1 + K_2z^{-1} + K_3z^{-2}]E(z) \quad (3.3.12)$$

e traduzir-se pela equação das diferenças,

$$u[k] = u[k - 1] + K_1e[k] + K_2e[k - 1] + K_3e[k - 2] \quad (3.3.13)$$

3.3.2 Lógica difusa

A lógica difusa é um algoritmo com bons resultados para sistemas térmicos. Os controladores de lógica difusa têm a capacidade de tirar conclusões e gerar respostas a partir de uma informação vaga, ambígua, qualitativa, incompleta ou imprecisa. Por esta razão são bastante úteis no controlo de sistemas em que o modelo matemático é desconhecido. Os sistemas baseados em conjuntos difusos são construídos de maneira a que a variação dos resultados de saída seja contínua e pouco abrupta, independentemente de as variáveis de entrada ultrapassarem certos limites.

A lógica difusa é uma técnica simples, poderosa e com uma aplicabilidade generalizada. Em parte, a sua capacidade de raciocínio assemelha-se à dos seres humanos e por isso a sua representação é feita de uma forma simples e natural, o que permite criar sistemas robustos, compreensíveis e de fácil manutenção. Além disso, uma abordagem difusa geralmente requer menos memória e capacidade de processamento do que os métodos convencionais, permitindo assim sistemas mais pequenos e menos caros [30].

A lógica difusa é em quase tudo semelhante à lógica normal aristotélica, exceto no seu lado difuso. Tradicionalmente, uma premissa lógica tem dois extremos: ou completamente verdadeira ou completamente falsa. Contudo, no mundo difuso, uma premissa varia num grau de veracidade de 0 a 1, o que permite que ela seja parcialmente verdadeira e parcialmente falsa. Por exemplo, num sistema de medição de temperatura estabelece-se que tudo acima de 40 graus é quente e tudo abaixo de 40 graus é frio. O que dizer se a temperatura for de 39,9 graus? A lógica normal diria que é frio. A lógica difusa diria que a temperatura estaria 99,5% quente e 0,5% fria [31].

Ao incorporar este conceito "grau de verdade", a lógica difusa estende a lógica tradicional de duas formas. Primeiro, os conjuntos são rotulados e aos elementos destes conjuntos são atribuídos diferentes graus de veracidade. Em segundo lugar, qualquer ação ou saída proveniente de uma premissa verdadeira reflete-se numa intensidade igual ao grau em que esta premissa é verdadeira.

Sistema difuso

A Figura 3.3.12 apresenta um esquema base de funcionamento de um sistema difuso. Até serem obtidas as variáveis nítidas de saída ocorrem três transformações principais. São elas a fuzzificação, o mecanismo de inferência e a defuzzificação.

Da fuzzificação obtêm-se as entradas difusas do sistema convertendo cada entrada num ou mais graus de associação. Esta conversão é feita com base em funções de associação previamente definidas. Num segundo passo, surge o mecanismo de inferência. Os graus de associação são conjugados na tabela de regras por forma a determinar a intensidade das saídas difusas. Associando a estas as funções de associação de saída obtêm-se as variáveis nítidas de saída [30], [31].

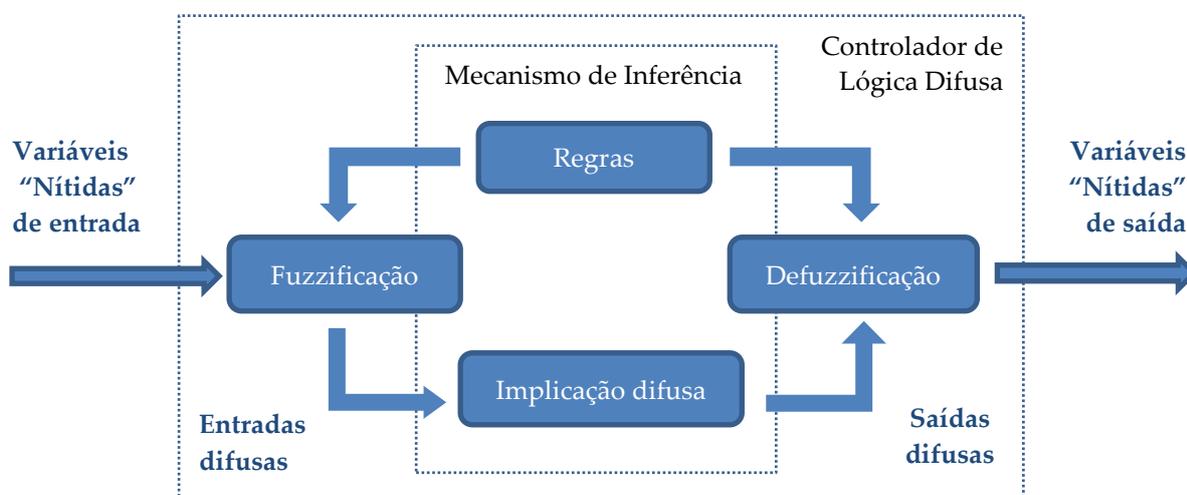


Figura 3.3.2 - Organização de um sistema difuso (adaptado de [32]).

Fuzzyficação

O processo de fuzzificação calcula um valor que representa uma entrada (em graus de associação) num ou mais grupos qualitativos, denominados de termos difusos. Este cálculo torna os termos mensuráveis para um processador.

O grau de associação é determinado através das funções de associação que são definidas com base na experiência ou intuição. O número de termos difusos (das funções de associação) bem como o tipo destas dependem de parâmetros como a precisão, a reação e a estabilidade do sistema e, respetivamente, da facilidade de implementação, manipulação e manutenção. Existem vários tipos de funções como por exemplo triangulares, trapezoidais, singulares, gaussianas e lineares por ramos. Contudo, as funções triangulares e trapezoidais são as mais comuns e têm demonstrado um bom compromisso entre eficácia e eficiência. Os termos difusos, representados no eixo das abcissas, devem abranger todo o intervalo de operação de uma entrada do sistema. O eixo das ordenadas varia de 0 a 1 e representa o grau de veracidade que uma entrada do sistema tem para um determinado termo linguístico. A sobreposição de funções em alguns intervalos é desejável e é a chave para a operação do sistema ser suave. É regra geral usar-se uma sobreposição de 25% entre termos difusos adjacentes. Na maior parte das vezes, assim que o sistema esteja operacional, as funções de associação não se alteram [32], [33].

Mecanismo de inferência

O comportamento do sistema é definido através do conhecimento empírico representado sob a forma de regras de inferência lógica “Se-Então”. O lado “Se” de uma regra contém uma ou mais condições denominadas de “antecedentes”, o lado “Então” contém uma ou mais ações denominadas “consequências”. Os antecedentes das regras correspondem diretamente aos graus de associação calculados durante a etapa anterior. Cada antecedente tem associado um grau de veracidade como resultado da fuzzificação. Durante a avaliação das regras as intensidades difusas são calculadas com base nos valores antecedentes e associadas a saídas difusas, denominada de implicação. Isso é feito à custa de operadores difusos que definem o “E” e o “OU” de uma combinação de antecedentes. Existem diversas formas, a Tabela 3.3.1 apresenta alguns desses operadores sendo $\mu_A(x)$ e $\mu_B(x)$ o valor do antecedente A e do antecedente B, respetivamente [32], [33].

Tabela 3.3.1 - Operadores difusos [32],[33].

OU		E	
Max	$\max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$	Min	$\min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$
Asum	$\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$	Prod	$\mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$
Bsum	$\min\{1, \mu_A(x) + \mu_B(x)\}$	Bdif	$\max\{0, \mu_A(x) + \mu_B(x) - 1\}$

No último passo, denominado acumulação, são obtidas as saídas difusas. Na acumulação ocorre a combinação de todas as consequências num único conjunto difuso. Mais uma vez, existem diversos métodos de agregação, alguns deles demonstrados na Tabela 3.3.2 onde $\mu_C(x)$ e $\mu_D(x)$ são, respetivamente, os valores de consequência da regra “C” e consequência da regra “D” [32], [33].

Tabela 3.3.2 - Métodos de agregação [32],[33].

Operação	Fórmula
Máximo	$\max\{\mu_C(x), \mu_D(x)\}$
Soma limitada	$\min\{1, \mu_C(x) + \mu_D(x)\}$
Soma normalizada	$\frac{\mu_C(x) + \mu_D(x)}{\max\{1, \max\{\mu_C(x), \mu_D(x)\}\}}$

Defuzzificação

O último processo é a defuzzificação. Esta etapa é necessária por duas razões. Uma é para decifrar o significado das ações ao serem usadas funções de associação. Outra é para resolver conflitos entre ações complementares, que podem surgir da inferência. Contudo, a defuzzificação incorpora técnicas que resolvem problemas de incerteza e ambiguidade. A Tabela 3.3.3 apresenta alguns métodos de defuzzificação [32], [33].

Tabela 3.3.3 - Métodos de defuzzificação [32], [33].

Método	Fórmula
Centro de gravidade	$U = \frac{\int_{min}^{max} u\mu(u)du}{\int_{min}^{max} \mu(u)du}$
Centro de gravidade por singularidades	$U = \frac{\sum_{i=1}^p [u_i\mu_i]}{\sum_{i=1}^p [\mu_i]}$
Máximo mais à esquerda	$U = \inf(u'), \mu(u') = \sup(\mu(u))$
Máximo mais à direita	$U = \sup(u'), \mu(u') = \sup(\mu(u))$

A Figura 3.3.3 representa graficamente o processo de defuzzificação e a obtenção de uma saída nítida através de cinco funções de associação triangulares ($\mu_E(x)$, $\mu_F(x)$, $\mu_G(x)$, $\mu_H(x)$ e $\mu_I(x)$). Com base nas únicas saídas difusas não nulas, μ_E , μ_F e μ_G , e nas respetivas funções de saída são definidas as zonas a sombreado. Através de um dos métodos da Tabela 3.3.3 é obtida a saída nítida do sistema [32].

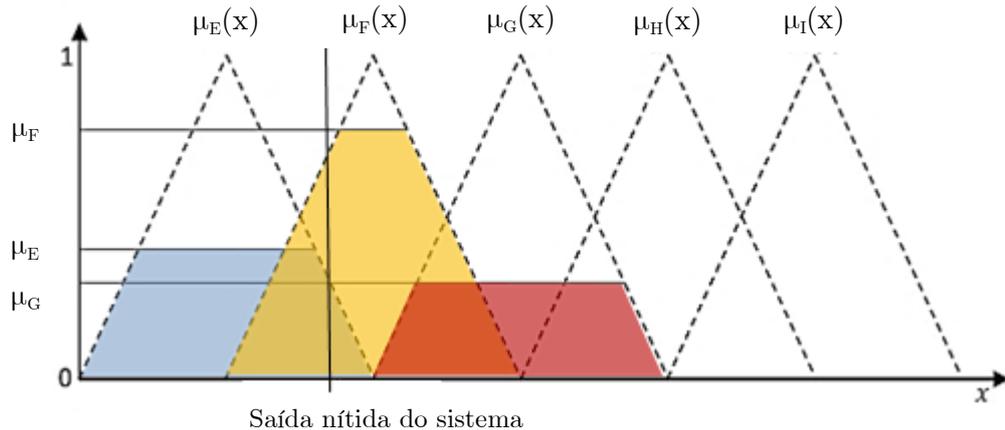


Figura 3.3.3 - Etapa de defuzzificação.

3.4 Soluções académicas

Nesta secção são apresentados pequenos resumos de dissertações e artigos científicos relacionados com o tema algoritmos para controlo de temperatura, mais concretamente, algoritmos PID e de lógica difusa.

3.4.1 *Auto-tuning* de controladores PID pelo método *relay*

No meio industrial, grande parte dos controladores PID trabalham abaixo da sua regulação ótima. Para os otimizar é preciso fazer morosos testes de regulação ou utilizar técnicas de *auto-tuning*. Esta dissertação opta por estudar o segundo caso, de *auto-tuning*. O método eleito foi o *relay*.

Com vista a poder testar a eficiência de calibração foi montada uma plataforma experimental composta por um computador com o sistema de supervisão, um PLC e a planta piloto. Na prática pretende-se que o algoritmo PID seja capaz de controlar o nível de água no tanque de forma mais eficiente e que os seus parâmetros P, I e D sejam

encontrados automaticamente pelo controlador. Os resultados são avaliados consoante o tempo de calibração, o comportamento do atuador e a rapidez de estabelecimento.

3.4.2 Design and realization of fuzzy self-tuning PID water temperature controller based on PLC

Um sistema de controlo de temperatura caracteriza-se pela sua não linearidade, grande atraso e inércia, e dificuldade de representação através de um modelo matemático bastante preciso. Os controladores PID convencionais não conseguem obter um controlo preciso, uma vez que os seus parâmetros são fixos. Este artigo propõe combinar a característica de melhor desempenho dinâmico dos algoritmos fuzzy com as vantagens do método de controlo PID tradicional, alta precisão e forte robustez [34]. Por fim, e através de um PLC é criado um *Fuzzy PID* com *auto-tuning*. Este permitiu reduzir o *overshoot* e obter uma melhor resposta aquando da introdução de uma perturbação no sistema (Figura 3.4.2).

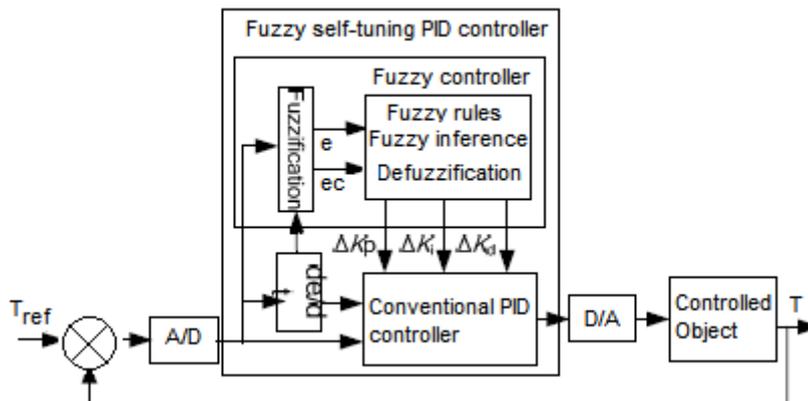


Figura 3.4.1 – Diagrama de blocos (adaptado de [34]).

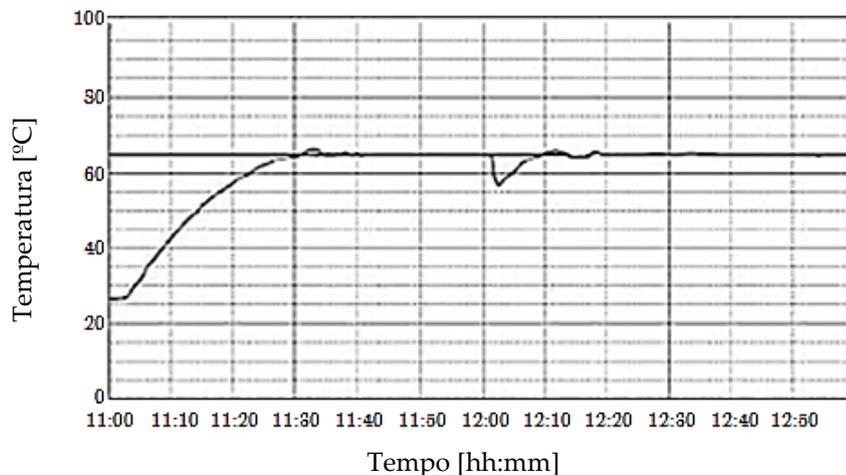


Figura 3.4.2 - Resultados obtidos do controlador (adaptado de [34]).

3.4.3 *Temperature control applications by means of a pic16f877 microcontroller*

Neste artigo são utilizados dois controladores para manter constante a temperatura de um ambiente fechado. O protótipo baseia-se num recipiente de vidro que é constantemente aquecido por uma resistência elétrica. O objetivo é arrefecer o ambiente através de um controlador PID e de lógica difusa. Os dados de temperatura são obtidos a partir de um sensor de temperatura LM35 e a saída de controlo determina a velocidade de um ventilador 220V através de uma PWM e um TRIAC. O microcontrolador adquire os dados de temperatura e a sua saída de controlo ajusta a taxa de arrefecimento do ventilador de modo a diminuir o calor interior [35]. Os resultados conseguidos estão presentes na Figura 3.4.4.

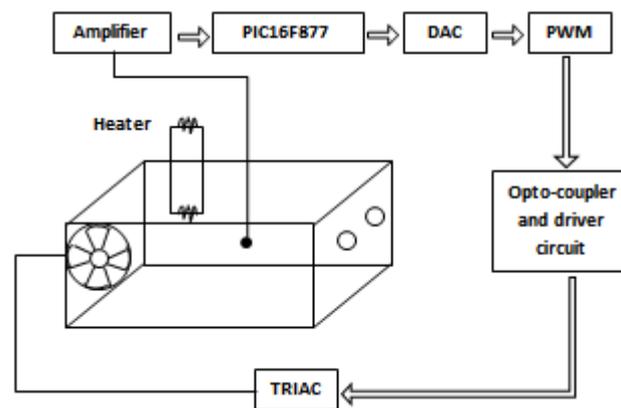


Figura 3.4.3 - Esquema simplificado do sistema (adaptado de [35]).

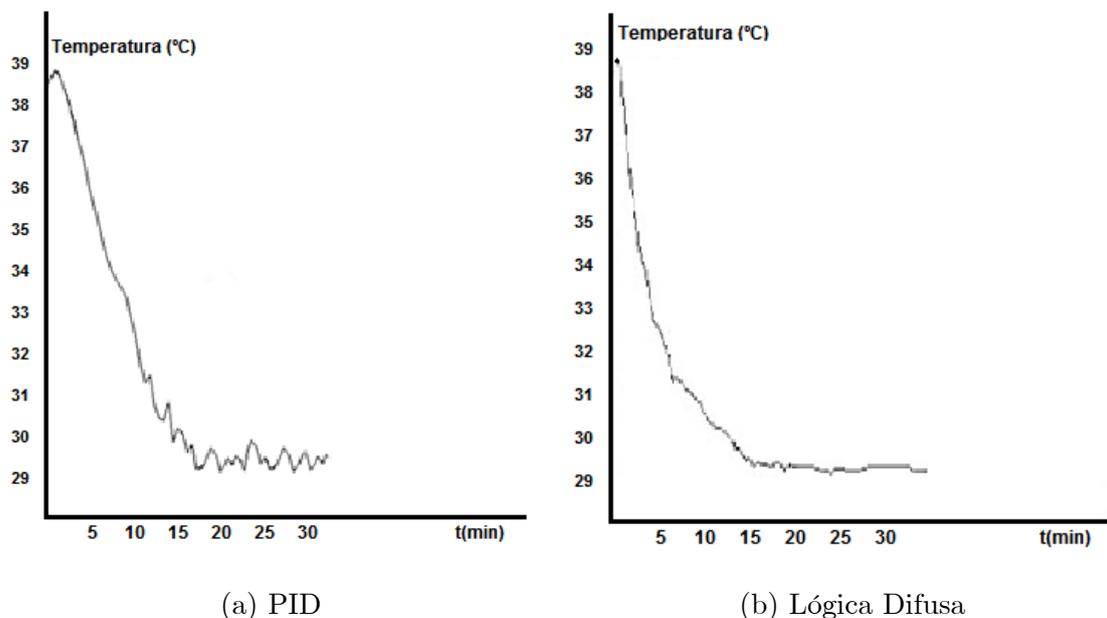


Figura 3.4.4 - Resultados dos controladores (a) e (b).

3.4.4 *Temperature control using fuzzy logic*

O objetivo do controlo é aquecer um determinado sistema até à temperatura desejada de forma segura e mais eficiente. Um controlador lógico difuso (FLC) é a melhor maneira em que este tipo de controlo de precisão pode ser realizado por um controlador [36]. Na prática, a temperatura pretendida do sistema é controlada através do aquecimento de uma resistência e o arrefecimento de uma ventoinha. No LCD são mostradas as percentagens de atuação destes equipamentos. Este artigo realça as vantagens de utilização deste algoritmo, concentrando-se na resolução do problema ao invés de o tentar modelar matematicamente para conseguir obter uma resposta. Com isto são reduzidos os custos de *hardware* e *software*.

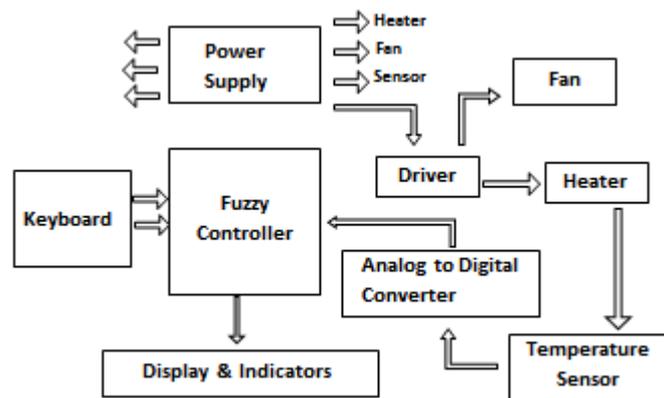


Figura 3.4.5 - Esquema simplificado do sistema [36].

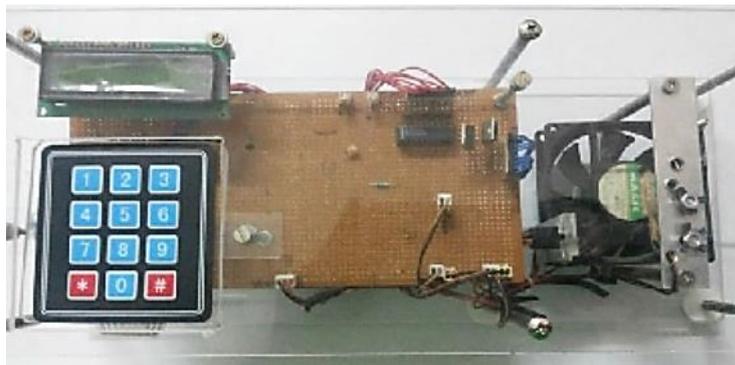


Figura 3.4.6 – Protótipo [36].

3.4.5 *Study on fuzzy self-tuning PID cascade control algorithm for temperature of active solar house heating system*

Este artigo procura dar uma nova solução para a manutenção da temperatura de aquecimento de uma habitação (num ponto ótimo e que não comprometa o conforto dos

residentes) mas que, efetivamente, utilize a energia solar. Segundo este são precisos cerca de 73760KJ por cada 100 m² para aumentar em um grau Celsius a temperatura.

Vários já são os algoritmos existentes para controlo de temperatura. Na literatura [37] é apresentado um *fuzzy self-tuning*. É adequado para uma situação em que o modelo do objeto controlado é incerto mas ainda assim apresenta um *overshoot* e tempo de ajuste significativos. A literatura [38] apresenta um controlador *Cascade PID*. É adequado para um grande sistema de inércia e de maior atraso, mas tem uma fraca adaptabilidade a variações dos parâmetros do modelo.

Com o objetivo de controlar um grande tempo de atraso, um modelo incerto e um sistema de grande inércia (características de um sistema solar de aquecimento) é proposto um algoritmo FS-PIDC (*Fuzzy Self-tuning PID Cascade control*) [39]. A Figura 3.4.7 apresenta os resultados para o aquecimento até à temperatura de *setpoint* e introdução de uma perturbação no sistema.

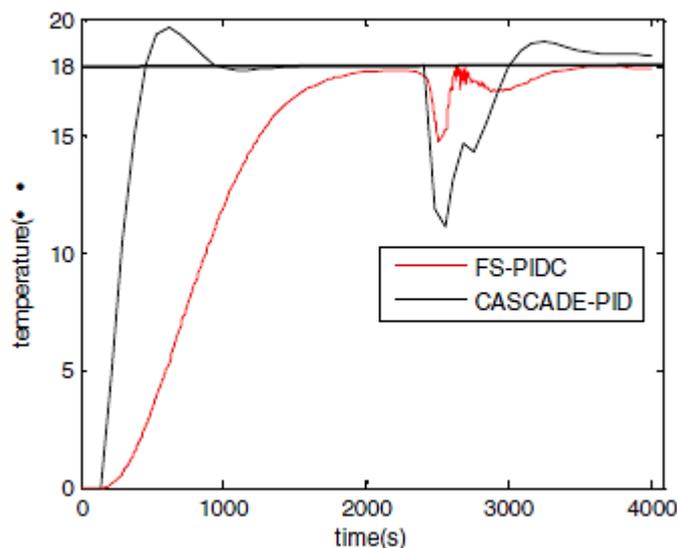


Figura 3.4.7 - Comparação entre o algoritmo Cascade-PID e FS-PIDC [39].

3.5 Transmissão de dados

Para monitorizar e controlar o sistema de aquecimento é necessário definir a partilha de informação entre equipamentos. Nesta dissertação são utilizados, essencialmente, dois protocolos padronizados - RS232 (Apêndice A) e ModBus. Existe ainda uma comunicação por rádio frequência que não opera segundo um protocolo específico.

3.5.1 Protocolo de comunicação ModBus

O protocolo ModBus foi criado em 1979 pela empresa Modicon. Inicialmente desenvolvido para comunicações entre PLC's, esta estrutura de mensagens tornou-se pública em 2004 e é utilizada nos mais diversos equipamentos industriais.

Ao contrário de outros protocolos, este não define um meio cablado, sinais elétricos ou redes físicas para a transmissão de mensagem. A sua implementação é feita por *software* e apenas define uma sequência de *bytes* capaz de ser interpretada pelos utilizadores em questão. Por esta razão, para haver comunicação segundo ModBus é necessário recorrer a protocolos de comunicação implementados por *hardware* - Rs232, Rs485 ou Ethernet.

O ModBus estabelece um diálogo entre equipamentos do tipo “mestre-escravo”. Esta configuração permite que um dos dispositivos, denominado de mestre, seja o responsável pela partilha do meio de transmissão por forma a evitar colisões de mensagens. Só o mestre pode enviar mensagens sempre que quiser e para qualquer um dos seus escravos. Os escravos limitam-se a responder aos pedidos do mestre. Quando existe comunicação do mestre com um só escravo designa-se *unicast*, quando a mesma mensagem é enviada para todos os escravos designa-se *broadcast* [22].

As mensagens ModBus podem ser de diferentes tipos. Quando o mestre pretende apenas saber o estado de entradas, saídas, ou posições de memória do escravo, este envia um pedido de leitura ao escravo exigindo uma resposta do mesmo. Podem existir situações em que o mestre apenas queira atualizar uma posição de memória do escravo ou simplesmente fazer atuar uma determinada saída. Nesses casos a mensagem para o escravo é do tipo escrita e não exige uma resposta do mesmo.

A Figura 3.5.1 representa a estrutura de uma mensagem ModBus, sendo composta da seguinte forma: endereço (1 *byte*), função (1 *byte*), dados (0 a 252 *bytes*), CRC/LRC (2 *bytes*).

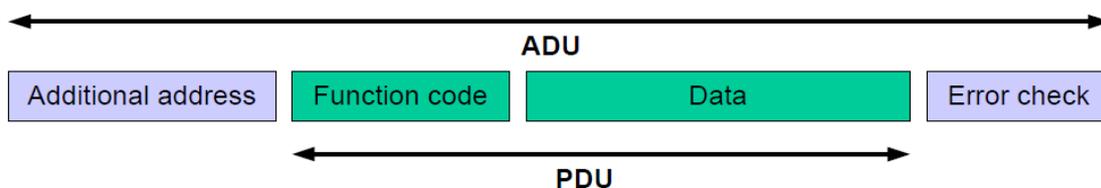


Figura 3.5.1 - Estrutura mensagem ModBus [23].

O primeiro *byte* da mensagem diz respeito ao destinatário. Uma vez que a codificação é feita com base em 8 *bits* apenas são aceites 255 endereços. Os endereços do 248 ao 255 estão reservados. Quando é necessário enviar uma mensagem para todos os escravos o mestre tem guardado para esse fim o endereço zero. Obrigatoriamente esta mensagem é do tipo escrita uma vez que uma resposta de todos os escravos em simultâneo seria impossível [23].

Cada mensagem enviada pelo mestre tem um determinado fim. Consoante o mestre queira ler o estado de entradas ou saídas digitais, de posições de memória, ativar ou desativar um *bit* interno, escrever numa posição de memória ou enviar uma mensagem de teste para o equipamento remoto, existe um determinado código associado e que é reconhecido por ambos os equipamentos (Figura 3.5.2).

			Function Codes				
			code	Sub code	(hex)	Section	
Data Access	Bit access	Physical Discrete Inputs	Read Discrete Inputs	02		02	6.2
		Internal Bits Or Physical coils	Read Coils	01		01	6.1
			Write Single Coil	05		05	6.5
			Write Multiple Coils	15		0F	6.11
	16 bits access	Physical Input Registers	Read Input Register	04		04	6.4
			Read Holding Registers	03		03	6.3
			Internal Registers Or Physical Output Registers	Write Single Register	06		06
		Write Multiple Registers		16		10	6.12
		Read/Write Multiple Registers		23		17	6.17
		Mask Write Register		22		16	6.16
		Read FIFO queue	24		18	6.18	
		File record access	Read File record	20		14	6.14
			Write File record	21		15	6.15
		Diagnostics	Read Exception status	07		07	6.7
	Diagnostic		08	00-18,20	08	6.8	
	Get Com event counter		11		0B	6.9	
	Get Com Event Log		12		0C	6.10	
	Report Slave ID		17		11	6.13	
	Other	Read device Identification	43	14	2B	6.21	
		Encapsulated Interface Transport	43	13,14	2B	6.19	

Figura 3.5.2 - Códigos função Modbus [23].

Existem mensagens ModBus RTU e ASCII. Numa mensagem RTU cada *byte* da mensagem ModBus é enviado em binário através de palavras série RS232 ou RS485. Cada uma delas é composta pelo *start bit*, seguido do *bit* menos significativo do *byte* Modbus, do *bit* de paridade e *stop bit*. Considerando que uma mensagem é enviada através de

Rs232 com uma taxa de transferência de 9600 *bits/s* então o tempo de envio de uma palavra série ModBus é de [22]:

$$T_{byte \text{ ModBus}} = 11/9600 = 1,145 \text{ ms}$$

Numa mensagem ModBus RTU o tempo de espera entre *bytes* não deve ser superior a 1,5 vezes o tempo de envio de um *byte* ModBus.

$$T_{espera} < 1,5 T_{byte \text{ ModBus}}$$

Outro tempo a ser respeitado é o tempo mínimo de espera entre envio de mensagens:

$$T_{espera \text{ entre mensagens}} > 3,5 \text{ vezes } T_{byte \text{ MODBUS}}$$

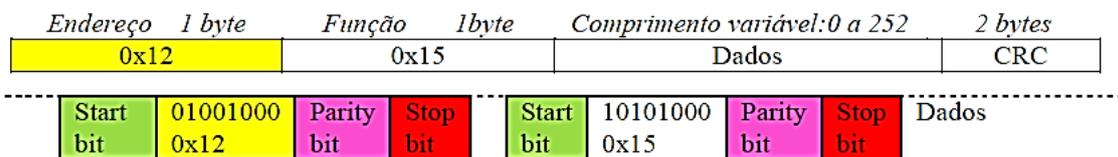


Figura 3.5.3 - Mensagem ModBus RTU [23].

Numa mensagem ModBus ASCII cada número (que representa um *byte* da mensagem) é dividido em dois dígitos. Cada um deles é codificado em 7 *bits* de acordo com a tabela ASCII e enviado por palavra série. Todas as mensagens ModBus ASCII começam pelo carácter “:” e terminam com os caracteres “CR” e “LF” [22].

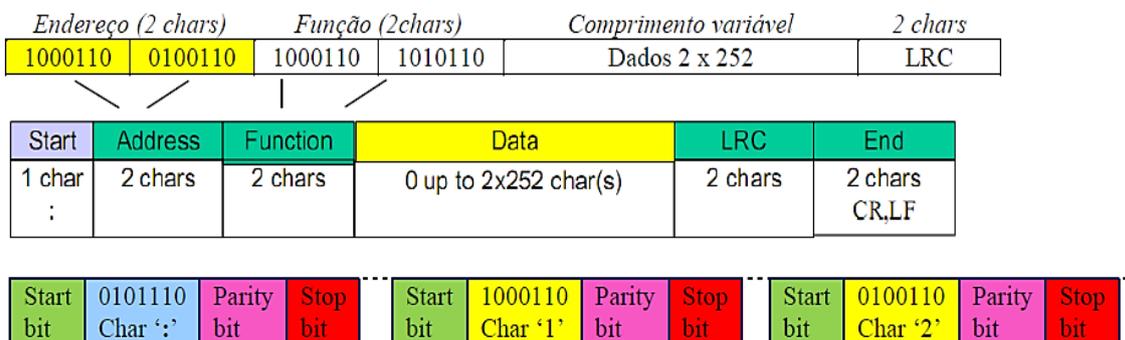


Figura 3.5.4 - Mensagem ModBus ASCII [23].

Os dois tipos de mensagens utilizam algoritmos de deteção de erro diferentes. No modo RTU utiliza-se o CRC16 enquanto que no modo ASCII o LRC8.

O CRC16 é gerado pelo equipamento emissor e calculado de novo pelo recetor. Para a rotina de cálculo, e como argumentos de entrada, entram um *array* com todos os *bytes* da mensagem e o seu comprimento. O algoritmo LRC8 calcula a soma de todos os *bytes* da mensagem, com exceção dos *bytes* “:”, “CR”, “LF”. O resultado da soma é negado e posteriormente incrementado em uma unidade. São gerados 8 *bits*, representando os 4 primeiros e os 4 últimos números de 0 a F. Cada um deles é considerado um carácter e codificado segundo a tabela ASCII [22].

3.5.2 Comunicação sem fios – Rádio Frequência

A comunicação sem fios veio revolucionar as telecomunicações e exponenciar a partilha de informação entre dispositivos. De outra forma seria impossível ou quase impraticável estabelecer a maioria das comunicações por cabo.

De entre as tecnologias sem fios existentes, tais como campos de luz, magnéticos ou elétricos ou ainda através de ondas sonoras, a rádio frequência é a mais comum. Através das ondas rádio é possível estabelecer comunicação quer com uma televisão, a poucos metros de distância, quer com equipamentos presentes no espaço, a milhares de quilómetros. A aplicação diverge por isso nas mais diversas áreas. São exemplo unidades de GPS, sistemas de comando para abertura de portões, ratos de computador, telefones sem fio, dispositivos *Bluetooth*.

Um sinal de rádio frequência é um sinal eletromagnético sem fios usado como forma de comunicação. As ondas de rádio são uma forma de radiação eletromagnética com frequências de rádio identificadas que variam de 3 Hz a 300 GHz. A propagação RF ocorre à velocidade da luz e não precisa de um meio de transmissão como o ar.

A banda 2.4 GHz ISM é talvez a mais comum. É internacionalmente reservada para fins médicos, industriais e científicos. Por não necessitar de licenciamento a banda ISM tornou-se na principal escolha para muitas tecnologias sem fio, como *ZigBee* (IEEE 802.15.4), *Bluetooth* (IEEE 802.15.1) e *Wi-Fi* (802.11). O facto de ser não licenciada não significa que não seja regulamentada, quer isto apenas dizer que o utilizador não precisa de uma licença individual por parte das autoridades reguladoras de telecomunicações. Até porque o próprio produto tem de cumprir normas e ser certificado pelas autoridades reguladoras competentes. A Tabela 3.5.1 estabelece uma comparação entre algumas destas tecnologias.

Tabela 3.5.1 - Comparação entre tecnologias sem fios [24], [25].

	<i>ZigBee IEEE</i> <i>802.15.4</i>	<i>Bluetooth IEEE</i> <i>802.15.1</i>	<i>Wi-Fi IEEE 802.11a/b/g</i>
Taxa de transmissão	20-250 Kbit/s	723 Kbit/s	30.6 Mbit/s (Ethernet); 2.6 Mbits/s (60 <i>bytes payload</i>)
Consumo Energético	Muito Baixo	Baixo	Médio
Retransmissões	Sim	Sim	Sim
Alcance	10 -100	1-10-100	50 - 100

A Tabela 3.5.2 apresenta as características para um módulo de rádio frequência, nRF24L01+, que não utiliza nenhum protocolo específico da banda ISM.

Tabela 3.5.2 - Características do módulo sem fios nRF24L01+ [26].

	Módulo nRF24L01+
Taxa de transmissão	250 Kbit/s, 1 Mbit/s, 2 Mbit/s
Consumo Energético	Ultra Baixo
Retransmissões	Sim
Alcance	100 m

Capítulo 4

Proposta de uma nova solução

Neste capítulo é apresentado um esquemático da solução proposta e os seus requisitos.

A nova proposta surge no seguimento da análise das soluções comerciais já existentes. Na Tabela 4.1 estão esquematizadas as características principais de cada produto. O que se pretende apresentar não é um conceito distinto do controlo de temperatura de uma habitação mas criar uma solução mais inteligente, dinâmica e integradora. No fundo uma solução domótica.

Dos produtos apresentados na tabela salientam-se alguns requisitos básicos a incorporar no protótipo, nomeadamente: rede sem fios; algoritmos de controlo; diferentes tipos de sensores; saídas em relé e de atuação variável; ecrã do controlador; monitorização dos consumos dos diferentes equipamentos.

Como aspeto diferenciador pretende-se: a criação de um sistema domótico integrador, capaz de agregar os restantes sistemas da habitação (iluminação, segurança, portadas, etc.); uma solução suficientemente flexível, que consiga trabalhar com diferentes equipamentos de aquecimento; e uma solução de baixo custo. Na Figura 4.1 é esquematizada uma arquitetura do protótipo.

Na prática, a solução passa por uma unidade central capaz de comunicar e recolher dados de várias unidades remotas modulares, tantas quantas o número de módulos necessários para a habitação.

Tabela 4.1 - Comparação entre tecnologias existentes.**Solução Comercial**

(a) Termóstato programável TR 15-RFT - Vulcano

(b) Centralina digital ZCA 1.0

(c) Controlador WPM Econ5plus - Dimplex

(d) Controlador PID de temperatura N1040 - Novus

Característica	(a)	(b)	(c)	(d)
Relógio – Períodos de funcionamento	✓	✓	✓	
Equipamentos	✓			✓
Rede sem fios	✓			
Controlo via telefone	✓			
LCD / visualização em tempo real	✓	✓	✓	✓
Diferentes sensores		✓		✓
Saídas relé		✓		✓
Saída atuação variável				✓
Módulos extra *			✓	
Algoritmos de controlo				✓

A unidade central está presente na habitação e é responsável pelos mais diversos sistemas de domótica. As unidades remotas são capazes de recolher dados da temperatura e também elas definirem um output de aquecimento. Na prática, todas elas funcionarão como escravos. O computador funcionará como mestre, auxiliado por um módulo central de receção, que estabelece a ponte entre o pc e os restantes módulos.

A troca de mensagens poderá ser efetuada através de um barramento 485 ModBus ou por comunicação sem fios. Sempre que possível, e para expandir o controlo a qualquer equipamento, torna-se vantajoso que os módulos comuniquem através de uma ligação não cablada (*Zigbee*, *Bluetooth*, ou rádio frequência).

Por cada dispositivo existe ainda um analisador de energia. Este tem a capacidade de medir potências e consumos e enviar estes registos para a interface da unidade central.

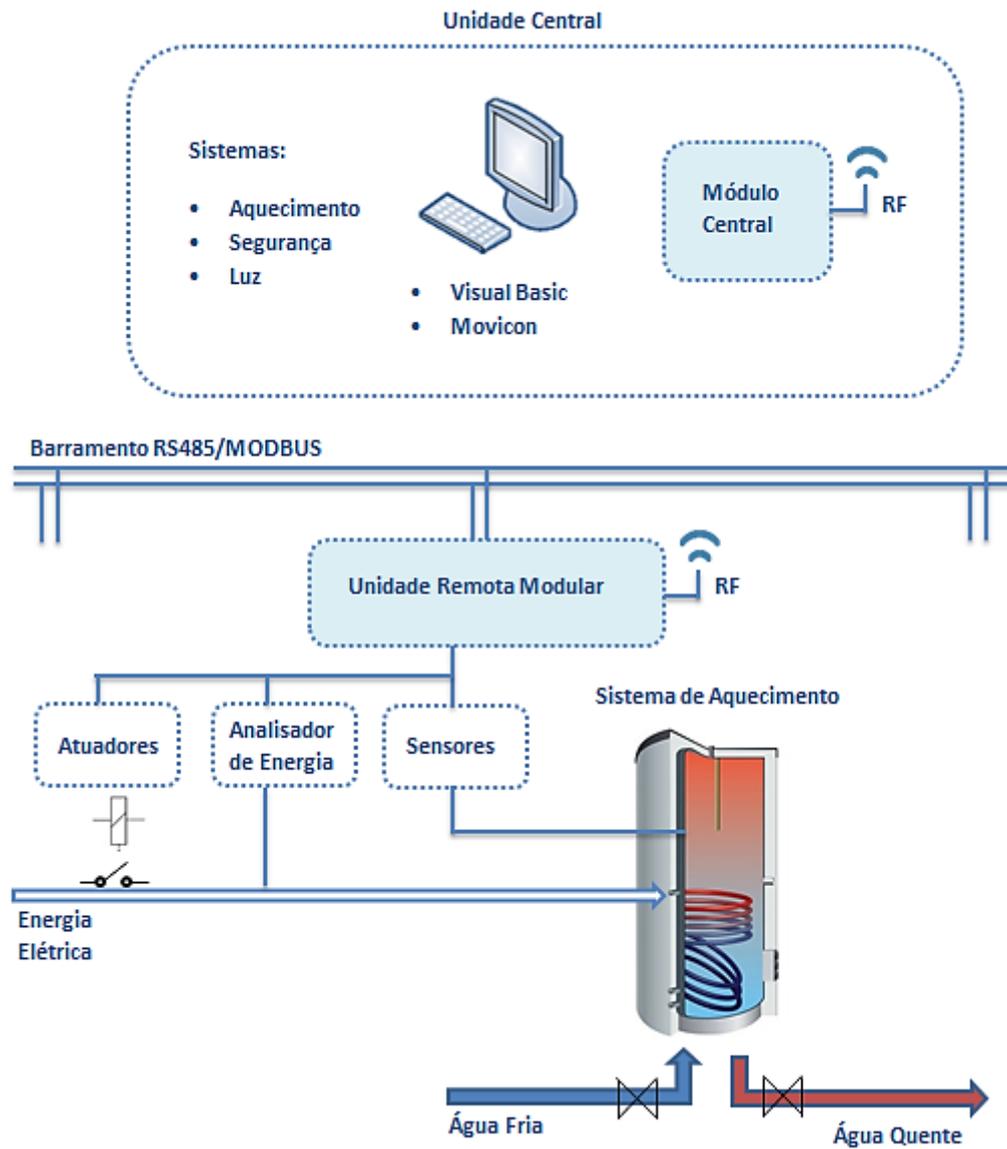


Figura 4.1 - Arquitetura proposta.

Capítulo 5

Implementação da solução proposta

Neste capítulo é apresentada a implementação do sistema detalhando cada um dos seus componentes e principais funções.

A Figura 5.1 apresenta o sistema domótico desenvolvido. A escolha para o *software* da unidade central é o Movicon. Com este programa pretende-se facilitar a integração de todos os sistemas da habitação e obter uma interface mais apelativa e interativa para o utilizador. Em vez do barramento Rs485/Modbus, o módulo central comunica para os restantes por rádio frequência, através dos módulos nRF24l01+, e por barramento Rs232/ModBus para o Movicon.

A unidade remota modular incorpora apenas dois dos três sistemas apresentados da Figura 4.1, um sensor de temperatura PT1000 e uma atuação variável através de PWM. O analisador de energia funciona como um dispositivo externo. Este é ligado a um servidor que estabelece a ponte entre todos os analisadores de energia e o Movicon. Cada unidade remota modular dispõe dos restantes pinos do microcontrolador para adicionar sensores ou atuadores e monitorizar outros equipamentos.

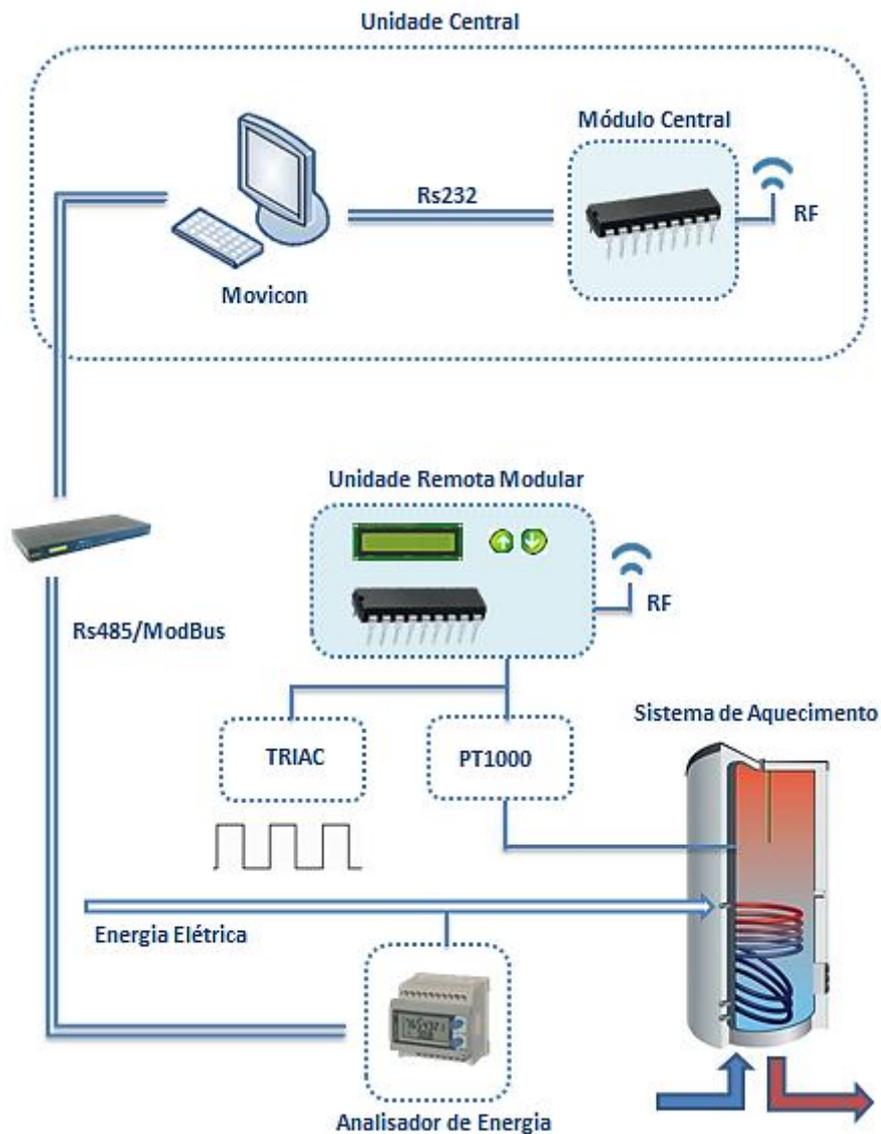


Figura 5.1 - Sistema desenvolvido.

5.1 *Hardware* desenvolvido

O sistema doméstico baseia-se, essencialmente, em dois módulos: o central e cada unidade remota modular. O módulo central é composto pelos seguintes dispositivos:

- Pic18f46k22
- nRF24L01+
- Ficha DB9 para comunicação Rs232

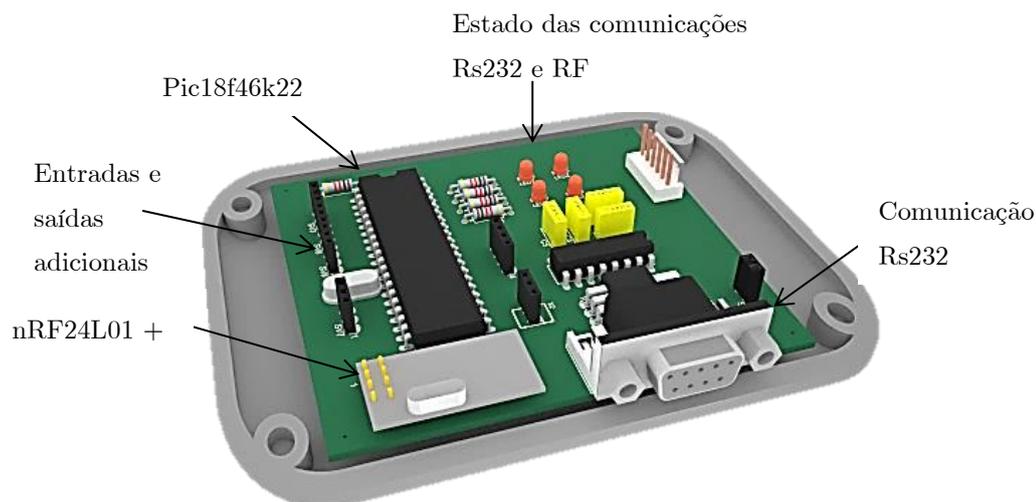


Figura 5.1.1 - Rendering da placa PCB desenvolvida para o protótipo do módulo central.

Cada unidade remota modular é composta por:

- Pic18f46k22
- PT1000
- TRIAC
- nRF24L01+
- LCD, interruptor e botões para controlo manual do set-point
- Pins adicionais para outros sensores e atuadores

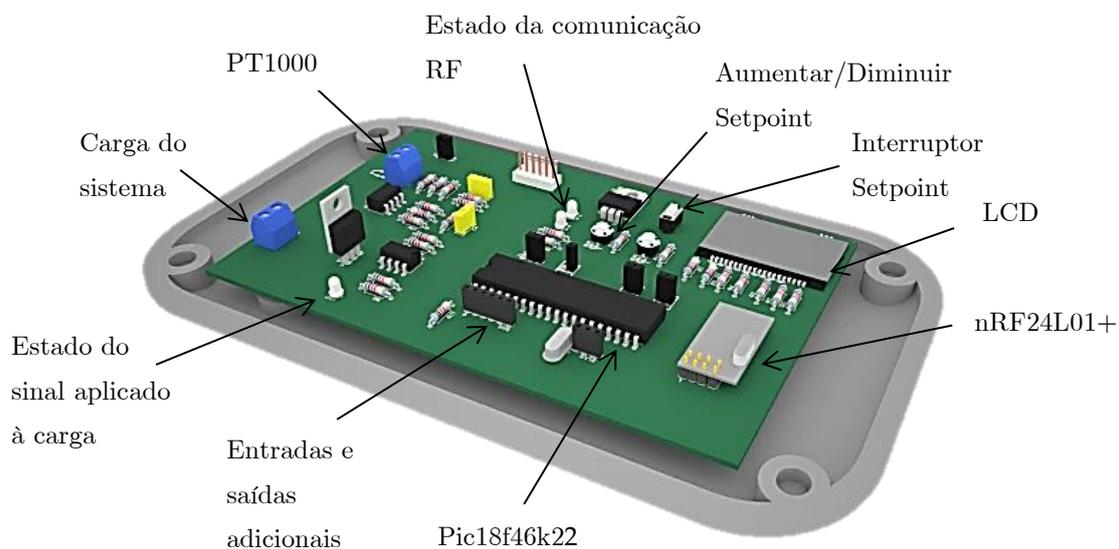


Figura 5.1.2 - Rendering da placa PCB desenvolvida para o protótipo de cada unidade remota modular.

5.1.1 Pic18f46k22

Um dos principais objetivos é desenvolver uma plataforma bastante modular e para isso a escolha de todos os componentes é bastante importante. Começando pela unidade base de cada módulo, o microcontrolador, a escolha está condicionada pela enorme flexibilidade e interação com diversos dispositivos. É necessário que o microcontrolador tenha várias entradas e saídas, memória e tipos de comunicação. Um pic18f46k22 responde a todas estas questões e potencia o funcionamento do módulo para esta configuração principal. Tem duas comunicações SPI, duas I²C, duas portas USART, dois comparadores, trinta entradas analógicas e é o pic com mais memória *flash* e *bytes* da EEPROM da sua família [40]. Ou seja, numa situação em que seja exigido mais que uma comunicação SPI (o módulo de rádio frequência já utiliza uma), ou mais que uma porta USART, por exemplo, não terá que se abdicar de nenhum componente em detrimento de outro. Como referido anteriormente, todas as entradas e saídas analógicas ou digitais não utilizadas estão libertas e acessíveis para outros sensores e atuadores. Desta forma não se compromete o funcionamento da placa para restantes aplicações.

5.1.2 PT 1000

O sensor de temperatura escolhido para a implementação do protótipo foi um RTD PT1000 [41]. Na Figura 5.1.3 é apresentado um esquema exemplo do condicionamento de sinal deste sensor. Para amplificar o sinal vindo da ponte Wheatston foi utilizado um amplificador AD623. De modo a filtrar os ruídos indesejados, provenientes dos fios elétricos (ver capítulo 3 – RTD's) e da rede elétrica, foram utilizados dois filtros RC, antes e depois do amplificador (ver Apêndice B – Esquemas Elétricos). Os valores de RC são calculados segundo a Equação (5.1.1).

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.1.1)$$

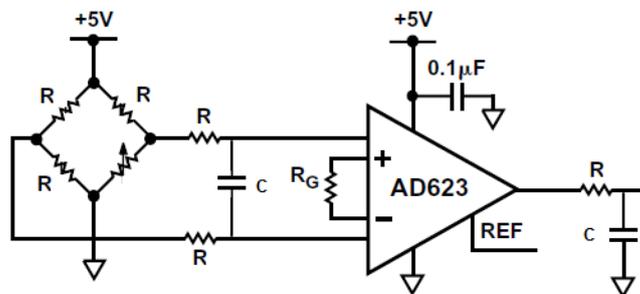


Figura 5.1.3 - PT1000 e condicionamento de sinal (adaptado de [42]).

A calibração do PT1000 foi feita através de um termómetro de mercúrio. Para cada temperatura foi registada a sua resistência e comparada com o valor teórico do *datasheet*. O desvio foi corrigido à posteriori, por *software*.

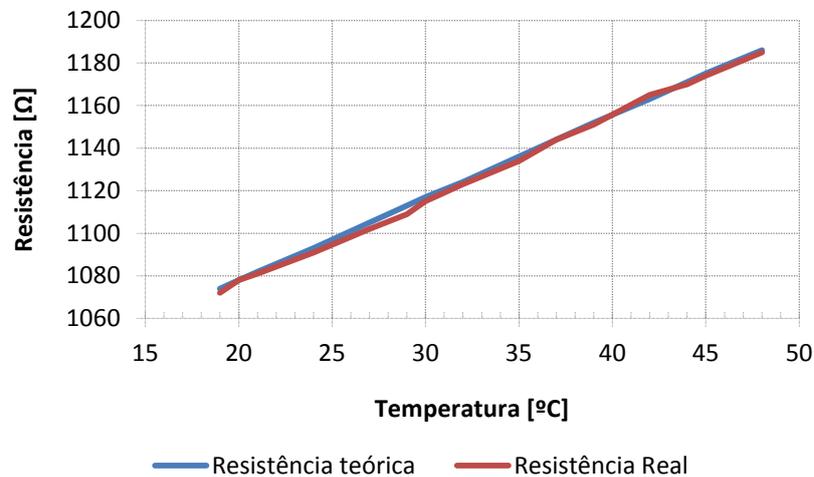


Figura 5.1.4 – Calibração do sensor PT1000.

5.1.3 Circuito de potência

A Figura 5.1.5 apresenta o esquema do circuito de potência implementado. É composto pela carga do sistema, R_{LOAD} , o semiconductor TRIAC tic206 [43], e o opto-acoplador MOC3021 [44].

Os algoritmos para controlo de temperatura baseiam-se na diferença entre a temperatura real e o *setpoint* introduzido ao sistema. Como resultado é obtido o valor de *duty cycle* da onda quadrada gerada pelo microcontrolador. Este sinal é aplicado à base do TRIAC. Cria-se assim uma atuação da carga, variável no tempo, que permite controlar o aquecimento e adaptar o consumo às necessidades térmicas.

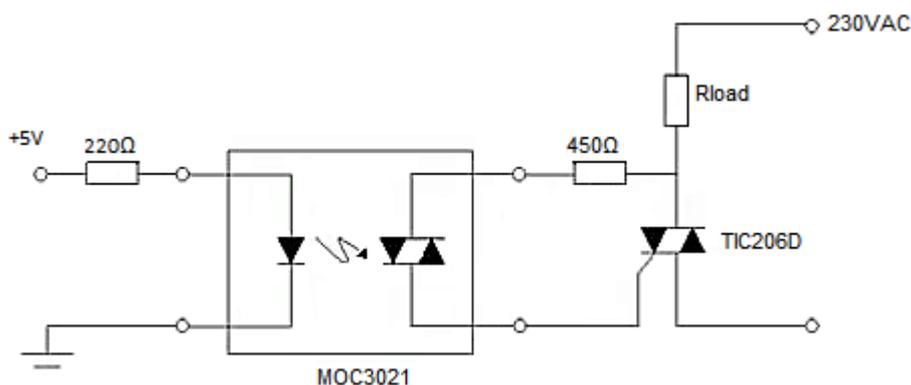
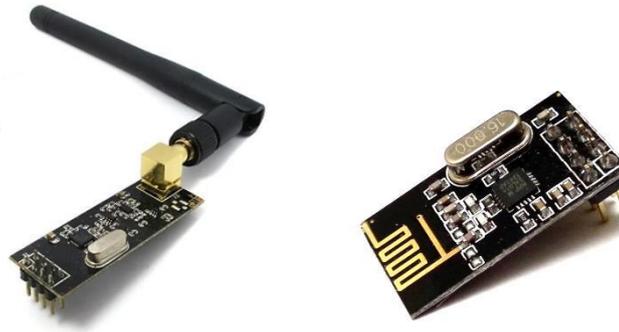


Figura 5.1.5 - Esquema elétrico do circuito de potência.

5.1.4 Módulos nRF24L01+

Os módulos nRF24L01+ foram os dispositivos escolhidos para a comunicação sem fios entre equipamentos.



(a) com antena.

(b) sem antena.

Figura 5.1.6 - Módulos nrf24l01+ versão:

O nRF24L01 + é um chip de 2.4GHz da banda ISM, adequado para aplicações de consumo de energia ultra baixo, sem fios. Com correntes de pico RX / TX menores que 14 mA, gestão avançada de energia, e uma alimentação de 3,3 V, o nRF24L01 + oferece uma solução que permite meses a anos de vida útil de bateria de célula tipo moeda ou AA / pilhas AAA. É ainda compatível com anteriores versões [26].

Para a sua utilização é necessário uma interface de comunicação periférica serial (SPI). O mapa de registos, acessível através de SPI, contém todos os registos de configuração do nRF24L01 + e está disponível em todos os modos de operação [26].

Antes de iniciar é necessário definir os seus parâmetros de configuração: canal de frequência, a potência de saída e taxa de transferência de dados (250 kbps, 1 Mbps até 2 Mbps). No trabalho foi utilizada uma taxa de transferência de 2 Mbps.

Quanto à estrutura das mensagens enviadas não foi utilizado nenhum protocolo. Cada *byte* do *buffer* de envio corresponde a um valor a enviar (ver secção 5.1.5 – “Transmissão de mensagens – Unidade central/unidades remotas”).

5.1.5 Transmissão de mensagens

Na Figura 5.1.7 é apresentado um esquema simplificado da transmissão de mensagens entre o computador e as unidades remotas. No centro da comunicação encontra-se o computador e o microcontrolador mestre, os dois compõem a unidade central de

monitorização e controlo de temperatura. Estes comunicam por ligação cablada Rs232 e segundo o protocolo ModBus. Junto a cada equipamento de aquecimento, espalhado pela habitação, encontram-se as unidades remotas modulares. A comunicação existente entre ambas é feita por rádio frequência. Neste caso não é utilizado qualquer protocolo para a estruturação de mensagens.

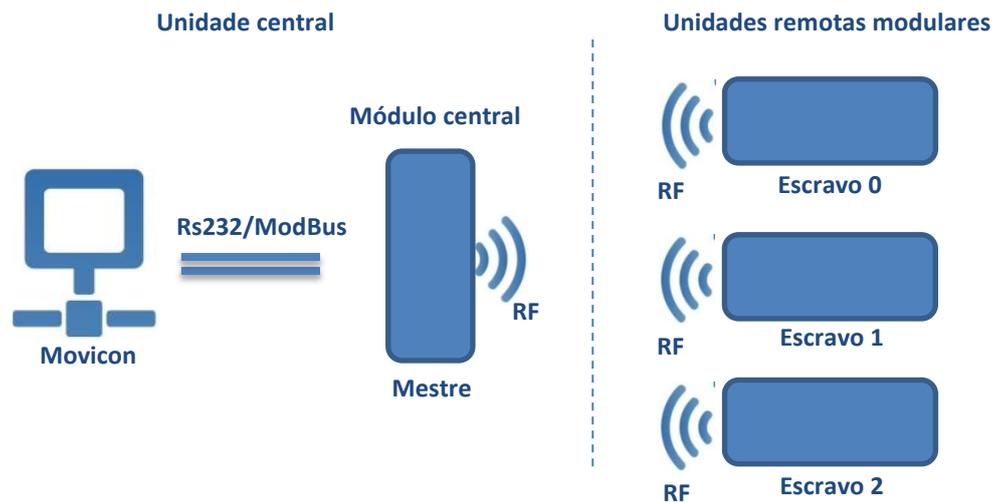


Figura 5.1.7 - Esquema simplificado da transmissão de mensagens entre equipamentos.

Transmissão de mensagens – Unidade central

O protocolo Rs232, que define o meio físico de transmissão, foi o escolhido para a unidade central uma vez que é uma solução de fácil implementação e garante as taxas de transferência de informação. Neste caso não é necessário uma ligação sem fios uma vez que o microcontrolador mestre é corpo integrante da unidade central.

O ModBus foi o protocolo escolhido para definir a estrutura das mensagens. Por ser implementado nos mais diversos equipamentos e seguir uma estrutura padronizada é de fácil interpretação e manipulação. Uma vez que o Movicon estabelece comunicações com dispositivos externos através de protocolos padronizados a forma mais fácil de partilhar informação entre todos os equipamentos é utilizar ModBus. Esta foi a principal razão para a escolha deste protocolo. A implementação do ModBus ASCII em detrimento do ModBus RTU reside na identificação das mensagens por parte do microcontrolador mestre. O Movicon envia, sequencialmente, vários pedidos de monitorização e ordens de controlo, tais como: saber a temperatura de cada escravo ou enviar o valor de temperatura pretendido. Como no modo ASCII as mensagens começam sempre pelo carácter ':' e terminam sempre por "CR" e "LF" torna-se mais fácil identificar o início e o fim das

mensagens e guardar a informação num *buffer* de dados. Em contrapartida, o comprimento e o tempo de envio de cada mensagem aumentam para o dobro. Porém, e como é descrito na secção seguinte, a atualização dos dados não é afetada.

A Tabela 5.1.1 apresenta os registos ModBus desenvolvidos para dois escravos. Os restantes escravos terão uma configuração similar. Ambos os equipamentos (Movicon e módulo central) trocam informação acerca das temperaturas medidas (AN0, AN1, etc.), dos *duty cycles* aplicados (Dutycycle0, Dutycycle1, etc.) e dos *setpoints* definidos para cada escravo (SP0, SP1, etc.). O envio dos caracteres é feito em hexadecimal (Figura 5.1.8).

Tabela 5.1.1 - Tabela de registos ModBus.

Nº do Escravo	Código de Função	Posição de Memória	Nº de bytes	Descrição
01	03	0001	2	Leitura da entrada analógica AN0
-	-	0002	1	Leitura do <i>Dutycycle0</i> aplicado
-	06	0003	1	Escrita do setpoint0
02	03	0004	2	Leitura da entrada analógica AN1
-	-	0005	1	Leitura do <i>Dutycycle1</i> aplicado
-	06	0006	1	Escrita do setpoint1

ANO: 3A 30 31 30 33 30 30 30 31 30 30 30 31 46 40 0D 0A (Hx)
 : 0 1 0 3 0 0 0 1 0 0 0 1 F A CR LF (Char)

Figura 5.1.8 - Envio dos caracteres em hexadecimal.

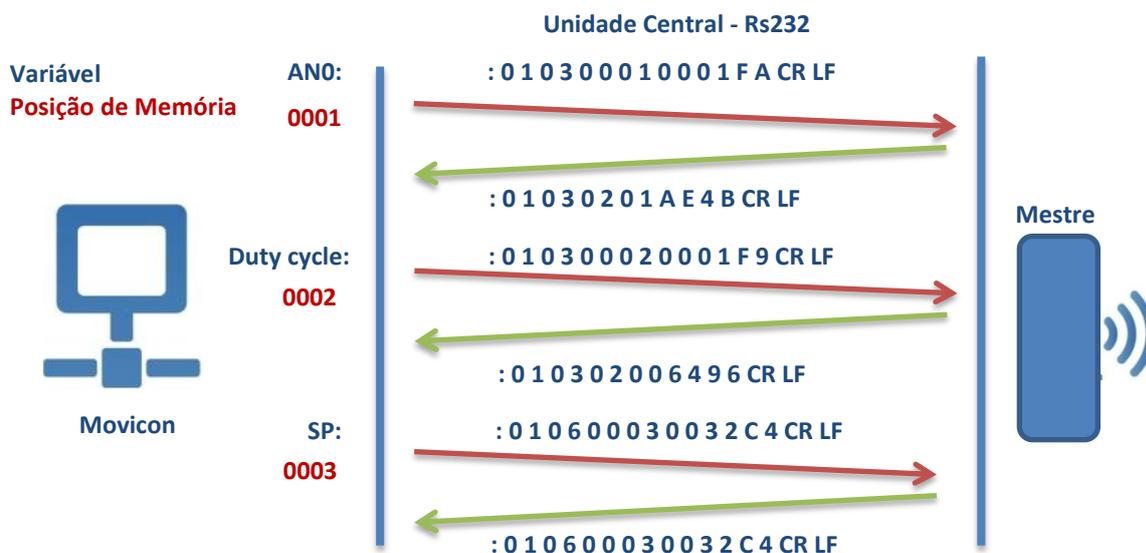


Figura 5.1.9 - Transmissão de mensagens Movicon - μC mestre.

Request		Response	
Field Name	(Hex)	Field Name	(Hex)
Function	03	Function	03
Starting Address Hi	00	Byte Count	06
Starting Address Lo	6B	Register value Hi (108)	02
No. of Registers Hi	00	Register value Lo (108)	2B
No. of Registers Lo	03	Register value Hi (109)	00
		Register value Lo (109)	00
		Register value Hi (110)	00
		Register value Lo (110)	64

Figura 5.1.10 – Mensagens de função 03 (0x03) ModBus – leitura de um registo [23].

Request		Response	
Field Name	(Hex)	Field Name	(Hex)
Function	06	Function	06
Register Address Hi	00	Register Address Hi	00
Register Address Lo	01	Register Address Lo	01
Register Value Hi	00	Register Value Hi	00
Register Value Lo	03	Register Value Lo	03

Figura 5.1.11 - Mensagens de função 06 (0x06) ModBus – escrita num registo [23].

Quando ocorre o envio das variáveis requeridas pelo Movicon a informação não segue a sequência Movicon/ μ Cmestre/ μ Cescravo/ μ Cmestre/Movicon. Como já foi referido anteriormente, ainda que a mensagem enviada seja do tipo escrita no escravo, o mesmo é obrigado a reencaminhar uma mensagem igual e no tempo respetivo. Só assim é que a comunicação entre ambos os dispositivos (da unidade central) se estabelece permanentemente, caso contrário o Movicon suspende a comunicação até a reestabelecer segundos depois. Assim sendo, desde que o μ C mestre recebe uma mensagem e é obrigado a enviar uma resposta, segundo o tempo pré estabelecido, não é possível trocar informação com cada unidade remota modular. Por esta razão existe a partilha simultânea e em sincronia de informação Movicon/ μ Cmestre e μ Cmestre/ μ Cescravo.

Uma ferramenta usada na programação dos microcontroladores são as chamadas interrupções. Um programa é executado passo a passo, instrução a instrução, pela mesma ordem de gravação da memória *flash* do microcontrolador. Tal acontece se não ocorrer uma de três situações: “*goto*”, “*cal*” ou “*interrupt*”. A instrução “*goto*” aplica um salto na execução do código, saltando para a posição de leitura indicada pela instrução. Da mesma forma, quando se pretende chamar uma sub-rotina do microcontrolador, através de *software*, retomando porém à posição original, invoca-se a instrução “*call*”. Com o mesmo objetivo, mas utilizando *hardware*, são criadas rotinas de serviço à interrupção (RSI). Neste caso o programador apenas define as instruções que devem ser executadas quando a

interrupção ocorrer. A interrupção ocorre por diversos motivos: recepção/envio por porta série, alteração do estado de um pino, estouro de um timer ou conclusão da conversão de uma entrada analógica. Independentemente da instrução que na altura esteja a ser executada o microcontrolador executa o código correspondente à sua origem. Para tal, o microcontrolador ativa *bits* específicos da memória de dados, denominados *flags*.

Posto isto importa salientar a importância da RSI na partilha de informação, nomeadamente, na organização das informações enviadas e recebidas e no *timing* de resposta aos equipamentos. No caso da unidade central existe logo a condicionante de resposta do microcontrolador ao Movicon. Essa é uma prioridade que tem de ser estabelecida para esta unidade. Além disso, entre o intervalo das comunicações Rs232, o microcontrolador tem de enviar e receber informação dos escravos por rádio frequência.

Para a transmissão de mensagens, na unidade central, o código é composto da seguinte forma: uma rotina de acesso à interrupção - que é despoletada por recepção porta série, recepção de mensagens do módulo sem fios e pelo estouro do *timer* (sincronizado para o envio de mensagens Modbus) - e pelo ciclo *while* principal - onde são enviados os pedidos (provenientes do Movicon) para os escravos por ligação sem fios. Dentro das interrupções podem ser definidos níveis de prioridade. Uma vez que a comunicação com o Movicon (Rs232) tem de prevalecer sobre a comunicação sem fios é atribuído um nível de alta prioridade à interrupção causada pela ativação da *flag* respetiva. Armazenada a mensagem num *buffer* é ativado o *timer* que procede ao envio da resposta, *byte a byte*. No final o *timer* é desativado e as comunicações sem fios são retomadas.

Transmissão de mensagens – Unidade central / unidades remotas

A Figura 5.1.12 apresenta o esquema simplificado da transmissão de mensagens entre o microcontrolador mestre e qualquer uma das unidades remotas. As entradas analógicas de cada escravo (representadas por AN0 na Figura 5.1.12), são o resultado da conversão analógica em dez *bits* do sinal elétrico proveniente do PT1000 e previamente amplificado para um intervalo de zero a cinco volts. Este é o valor que é enviado para o Movicon e que posteriormente sofre conversão para graus Celsius. O valor de *setpoint* (SP0) é o definido pelo Movicon, sendo que para cada unidade remota poderá assumir diferentes valores. O *duty cycle* é calculado em cada unidade remota e enviado para o Movicon.

Quanto à utilização dos módulos sem fios, como referido anteriormente, a transmissão de dados ocorre por rádio frequência. Este módulo sem fios opera a 2.4 GHz e com taxa de transferência de até 2Mbps. É capaz de comunicar com qualquer equipamento dentro de uma habitação comum e num raio de 200 metros em campo aberto (versão sem

antena). A informação é armazenada e enviada para o outro módulo até ao limite de trinta e dois *bytes*, o valor limite do *buffer* de envio. Por esta razão a comunicação entre mestre e escravo não obedece a nenhum protocolo.

Cada módulo RF é capaz de receber informação, para a mesma configuração inicial, de até no máximo seis módulos distintos. Quando são requeridos mais do que seis dispositivos é necessário reconfigurar o módulo tantas vezes quantas o número de dispositivos existentes [26].

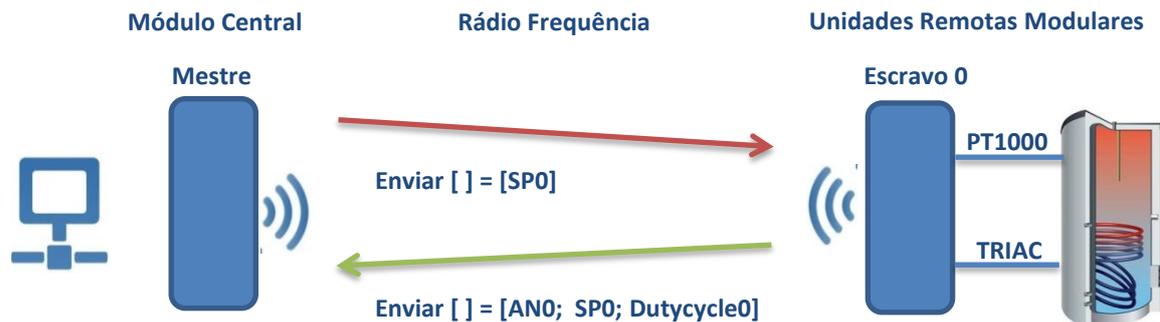


Figura 5.1.12 - Transmissão de mensagens μC mestre/ μC escravo.

O tempo de atualização das variáveis no Movicon depende unicamente do mesmo. A troca de informação, desde a unidade central (Movicon) até à leitura do sensor (no equipamento a controlar), é feita através de Rs232/Modbus e posteriormente por rádio frequência. Uma vez que a comunicação de rádio frequência tem uma taxa de transferência de dados bastante superior, o peso maior para o tempo total advém do barramento Rs232/ModBus. Para que todas as variáveis sejam atualizadas, e considerando para a comunicação Rs232/ModBus: apenas uma unidade remota; um baud rate de 19200 bps; envio de 4 variáveis; respetivos tempos de espera entre mensagens, e para a comunicação de rádio frequência: o envio do *buffer* e respetivos tempos de troca de estado (recção/envio), o tempo total de atualização corresponde a 0,089 ms. Muito inferior ao tempo atual de atualização do Movicon, de 500 ms.

5.1.6 LCD e botões

Cada módulo de temperatura é também composto por um LCD, um interruptor e dois botões. O LCD permite a visualização da temperatura registada e do valor de set-point aplicado ao módulo em questão. O interruptor cria a possibilidade de estabelecer o set-point de forma manual. O aumento e diminuição do valor pretendido é feito através dos

dois botões. Uma vez definido o *setpoint* manualmente o valor enviado pelo Movicon passa a ser ignorado.

O LCD utiliza *bitbang* para a troca de dados. O *bitbang* é um meio de comunicação entre dispositivos que utiliza *software* em detrimento de *hardware* para realizar as trocas de sinais. Quando é utilizado *hardware* é o próprio a fornecer uma interface de dados com a configuração de parâmetros e de *buffers* necessários. Por *bitbang* o *software* é o responsável pelos tempos de envio e sincronizações. Este tipo de comunicação tem algumas limitações e não se adequa a todas as utilizações. A taxa de transferência de informação está limitada ao dispositivo que processa os dados. O microcontrolador pode gastar muito do seu tempo a ler ou enviar amostras para e do pino. O sinal produzido normalmente tem mais instabilidade ou falhas, especialmente, se o processador também executar outras tarefas durante a comunicação. É necessário garantir que o envio da informação é feito no tempo correto. Em contrapartida, o *bitbang* utiliza uma comunicação bastante versátil e extremamente simples. Uma vez que o LCD disponível no laboratório utiliza este princípio e é o necessário para apresentar a informação pretendida é a escolha para os módulos. Ao optar por outro LCD seriam necessárias criar todas as bibliotecas associadas à comunicação e aumentar o custo do protótipo.

Posto isto, a escrita no LCD passa pelo envio de 160 *bits* por *bitbang*. O LCD está dividido em 10 dígitos, cada um deles com 16 *bits*. A representação da informação é feita por binarização. A Figura 5.1.13 permite entender quais os conjuntos de pixéis ativados por cada um dos 16 bits respetivos (representados pela letra D e seguidos da ordem dos 16 *bits*) se pretendem representar com o valor '1' por forma a construir um algarismo, letra ou símbolo.



Figura 5.1.13 - Canais comuns do LCD.

Na figura seguinte estão representados os algarismos de ‘1’ a ‘4’ e as letras ‘A’ e ‘D’. Outras letras e símbolos foram criados.

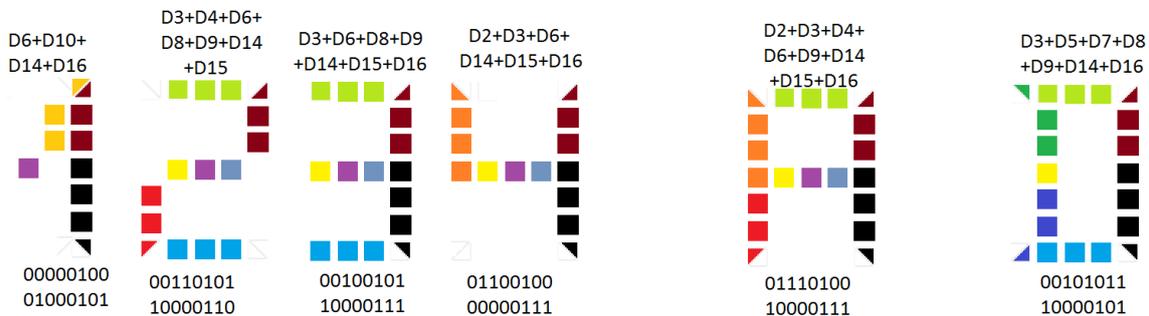


Figura 5.1.14 - Criação de algarismos ou caracteres.

5.1.7 Analisador de energia EM4-din

A monitorização dos equipamentos a controlar passa não só pelos valores de temperatura como também pelo registo constante de variáveis como a voltagem, amperagem, potência ativa e reativa e energia consumida.

Estes valores são dados pelo analisador de energia EM4-DIN. Este dispositivo possui uma interface série Rs485 com protocolo ModBus RTU [45].



Figura 5.1.15 - Analisador de energia EM4-din.

A trabalhar em paralelo com o analisador existe o NPort 5600 da Moxa (Figura 5.1.16). É a escolha ideal para aceder, em qualquer lugar, a equipamentos série Rs232, Rs422/485, tais como PLCs, medidores e sensores, através de uma rede local ou pela internet [46]. Desta forma, o Movicon (presente na unidade central) acede ao NPORT através da internet que por sua vez estabelece ligação com os analisadores de energia espalhados pela habitação.



Figura 5.1.16 - NPort 5600 - Moxa.

5.2 *Software* desenvolvido

5.2.1 Movicon

A interface gráfica foi desenvolvida em Movicon. É uma plataforma SCADA, ideal para a indústria e capaz de integrar todos os dispositivos da habitação, apresentando uma interface bastante mais interativa e dinâmica. Alarmes, base de dados e serviços web são ferramentas disponíveis neste *software*, bastante flexível e integrador. É por isso a escolha para este trabalho.

A Figura 5.2.1 representa a interface gráfica desenvolvida nesta dissertação. Foi criada para servir as funções base do sistema e obter as curvas de temperatura e consumo de energia para os diferentes controladores testados (ver secção 5.3: Análise de resultados). No canto superior esquerdo encontram-se as temperaturas medidas por dois sensores: o PT1000, que mede a temperatura do sistema de aquecimento e um sensor de circuito integrado, LM35, que mede a temperatura ambiente do módulo central (meramente informativa). Nos blocos inferiores encontram-se todas as informações relevantes dos sistemas a controlar. Neste caso apenas se registaram os valores do *duty cycle* aplicado a cada equipamento e o consumo de energia a ele associado. No caso do controlo de um motor poderiam ser registados os valores de potência ativa e reativa também disponibilizados pelo analisador de energia.

Recorrendo à interface desenvolvida, o Movicon permite a criação de páginas web de forma automática, sem necessidade de programação de raiz. Estas têm o aspeto gráfico igual ao apresentado na figura seguinte.

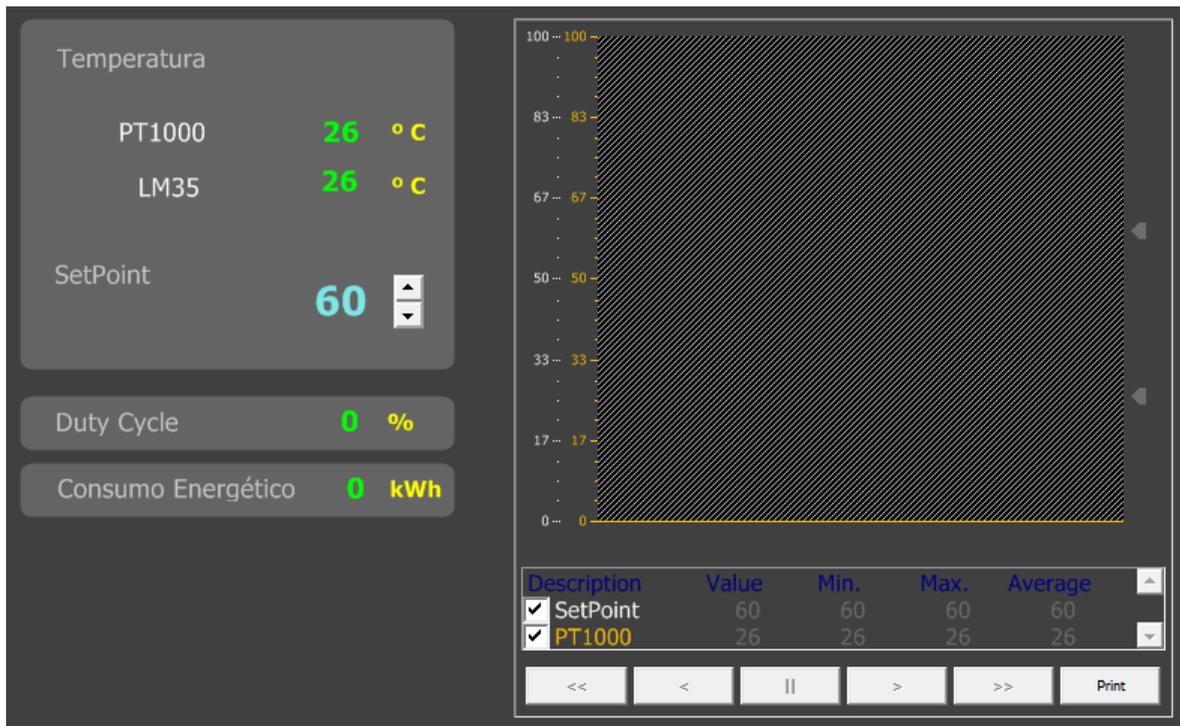


Figura 5.2.1 - Interface Movicon.

5.3 Análise de resultados

Como objetivo inicial pretende-se desenvolver um módulo sem fios que seja responsável por monitorizar e controlar a temperatura de uma habitação. Dada a impossibilidade de implementação do protótipo num equipamento à escala real, foi construído um sistema de menor dimensão. Este apenas se aplica ao aquecimento por resistências elétricas.

Desta forma, para estudar o *overshoot* do sistema, a manutenção do *setpoint* e o consumo de energia, foram implementados algoritmos de controlo, nomeadamente, um PID e um de lógica difusa. A comparação é feita com o habitual controlador *on/off*. A análise divide-se, essencialmente, em dois pontos, o aquecimento até à temperatura pretendida pelo utilizador e, posteriormente, a manutenção desse mesmo *setpoint*. A implementação dos algoritmos é feita em cada microcontrolador da unidade remota modular. Ou seja, a interface da unidade central apenas é responsável pela monitorização das temperaturas. A sua componente de controlo passa unicamente pela definição do *setpoint* imposta pelo utilizador.

Para a obtenção dos resultados o protótipo modular foi testado numa chaleira elétrica de 1800 W de potência. Ainda que o sistema térmico não corresponda à realidade

possibilita a uma menor escala, e numa fase inicial, obter uma análise do comportamento esperado. A aquisição de dados e a implementação da eletrónica são também simplificadas num sistema de menor dimensão. A título comparativo é feita uma análise energética.

5.3.1 Controlador on/off

No módulo sem fios, uma vez introduzido no sistema um *setpoint*, superior à temperatura atual, a unidade remota é responsável por ligar a chaleira. Atingido o *setpoint* o controlador desliga. Aí entra em funcionamento a histerese do sistema fazendo a temperatura oscilar entre os 59°C e os 61°C. A curva de temperatura obtida para este controlador é apresentada na Figura 5.3.1.

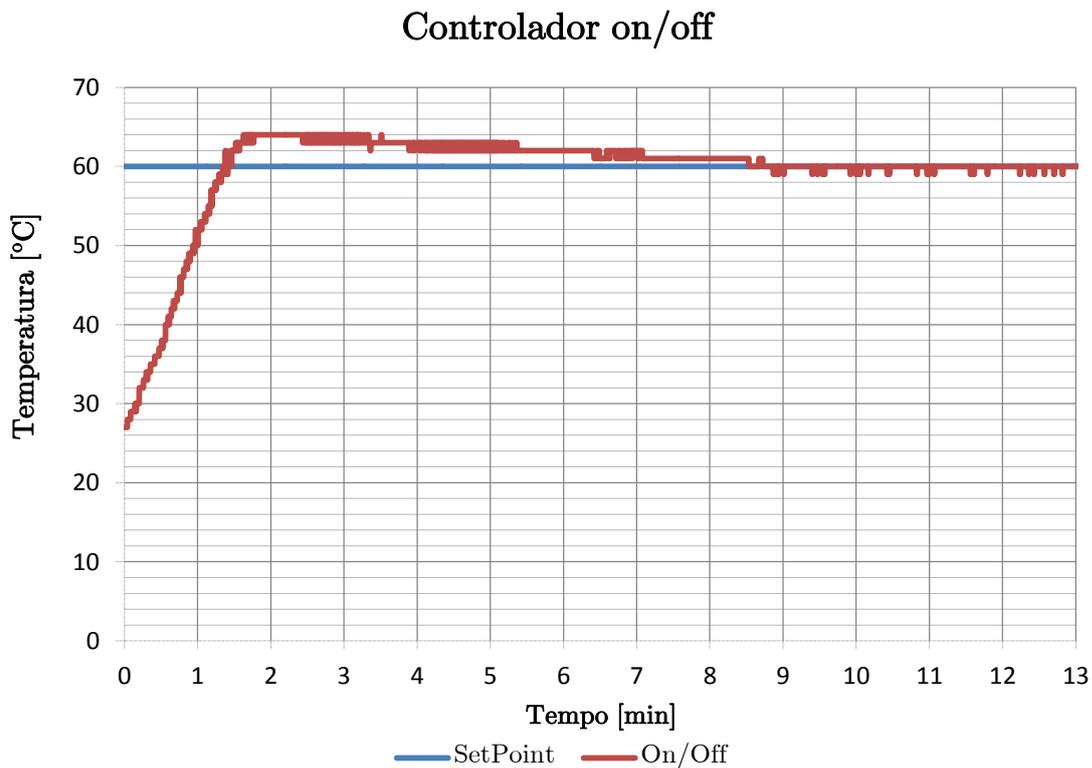


Figura 5.3.1 - Evolução da temperatura com o controlador *on/off*.

5.3.2 Controlador PID

Para o controlador PID a expressão utilizada para o cálculo da variável de saída do controlador é a Equação (3.3.13).

A variável de saída do controlador, $u[k]$, corresponde ao valor de *duty cycle* de uma atuação PWM. Como a fórmula indica, esta tem em conta o valor de *duty cycle* e os erros obtidos anteriormente. O erro resulta da diferença de temperaturas entre o *setpoint* pretendido e a temperatura medida em cada instante.

Para ajustar este controlador foi necessário mexer nas componentes K. Estas dependem dos parâmetros proporcional, integrativo e derivativo. O ganho proporcional, P, introduz no sistema uma resposta mais ou menos rápida e, como o próprio nome indica, proporcional ao erro. Por sua vez a componente integral soma o termo de erro ao longo do tempo e pretende conduzir o erro de regime estacionário para zero. Um número elevado pode conduzir o controlador à saturação e fazer com que o erro aumente exponencialmente. A componente derivativa introduz um maior atraso ou rapidez à resposta do sistema. A dificuldade neste controlador está em conciliar uma boa resposta em regime permanente com a ausência de *overshoot* (ainda observado na Figura 5.3.2).

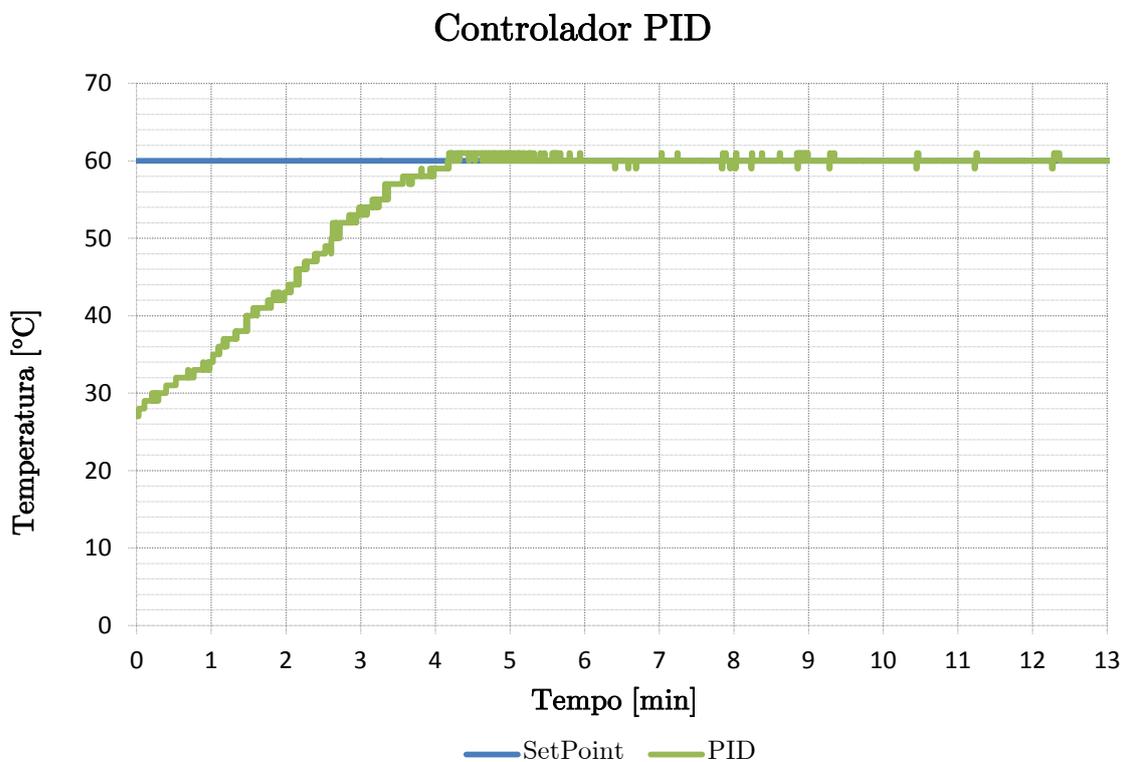


Figura 5.3.2 - Evolução da temperatura com o controlador PID.

5.3.3 Controlador lógica difusa

De seguida são apresentados os passos do controlador de lógica difusa implementados em linguagem C no microcontrolador.

Fuzzificação

Na primeira etapa, e a fim de conhecer os graus de associação ($\mu(e_n)$), são criados cinco termos difusos e as respetivas funções de associação (“Nulo”, “Pequeno”, “Médio”, “Grande” e “Muito Grande”). Estas baseiam-se na experiência e intuição. A variável de entrada corresponde ao erro (e_n) entre a temperatura de *setpoint* e a temperatura da água. As funções triangulares revelam um bom desempenho para este controlador. As funções de extremos cobrem o restante intervalo da entrada do sistema. Por esta razão, no aquecimento inicial este controlador comporta-se tal e qual um *on/off*. Apenas quando o intervalo de erro é inferior a dez graus é que o controlador atua de forma diferente. Este limite foi definido por forma a eliminar o *overshoot* e evitar morosos tempos de aquecimento, bastante inconvenientes em aplicações reais.

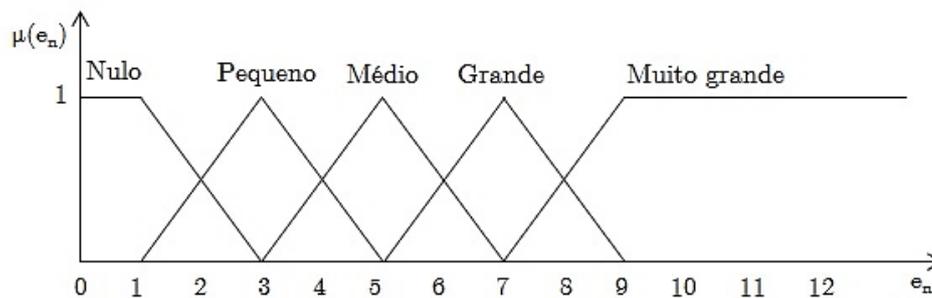


Figura 5.3.3 - Etapa de fuzzificação.

Mecanismos de inferência

Uma vez calculados os graus de associação, estes são conjugados segundo a Tabela 5.3.1 e determinadas as intensidades de cada saída difusa.

Tabela 5.3.1 - Tabela de regras de inferência.

SE	(e_n É Nulo)	ENTÃO	(<i>duty cycle</i> É Nulo)
SE	(e_n É Pequeno)	ENTÃO	(<i>duty cycle</i> É Baixo)
SE	(e_n É Médio)	ENTÃO	(<i>duty cycle</i> É Médio)
SE	(e_n É Grande)	ENTÃO	(<i>duty cycle</i> É Alto)
SE	(e_n É Muito grande)	ENTÃO	(<i>duty cycle</i> É Muito Alto)

Defuzzificação

Para obter as variáveis de saída nítidas correspondentes ao valor do *duty cycle* são criadas cinco funções de associação. Esse cálculo é feito pelo método do centro de gravidade. Verificou-se experimentalmente que criando uma função trapezoidal intermédia, entre regimes de maior e menor funcionamento, a transição do *duty cycle* seria mais suave e o controlador adaptava-se melhor à aproximação da temperatura de referência. Os valores obtidos para este algoritmo estão apresentados na Figura 5.3.5.

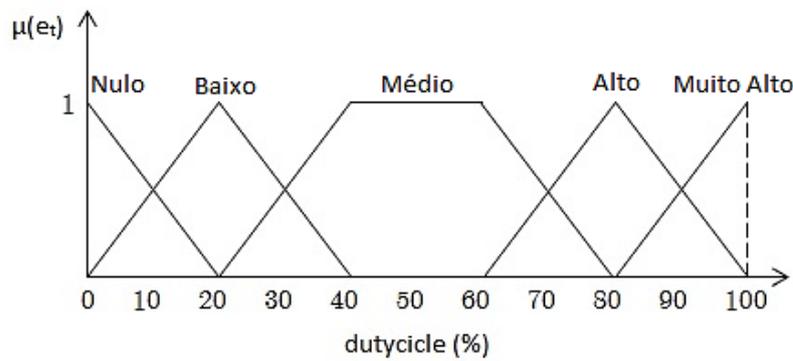


Figura 5.3.4 - Etapa de defuzzificação.

Controlador lógica difusa

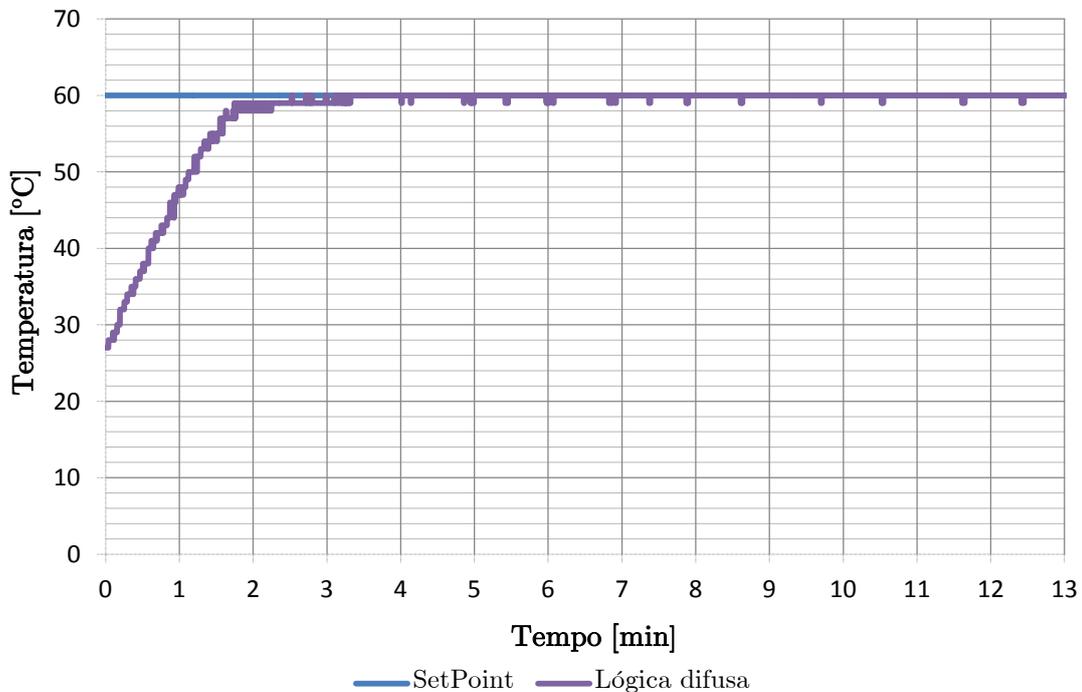


Figura 5.3.5 - Evolução da temperatura com controlador de lógica difusa.

5.3.4 Controladores

A Figura 5.3.6 apresenta a sobreposição dos gráficos anteriores. Uma análise a nível de existência de *overshoot*, tempo de subida, manutenção de *setpoint* e consumo de energia é apresentada na Tabela 5.3.2. Todos os ensaios foram realizados segundo o mesmo cenário, um aquecimento dos 27°C aos 60°C para o mesmo volume de água.

Tabela 5.3.2 - Comparação entre controladores.

Controlador	Overshoot	Tempo subida	Manutenção setpoint	Energia (Wh)
On/off	Elevado	1:20 min	Pouco estável	47,5
PID	Reduzido	4:15 min	Pouco estável	46,9
Lógica difusa	Inexistente	3:05 min	Muito estável	47,0

Os principais objetivos deste teste eram eliminar o *overshoot* e reduzir a instabilidade em torno do *setpoint* estabelecido. Ainda que os equipamentos de aquecimento com recurso a energia elétrica, tendo por base o efeito de Joule, apresentem um fator de eficiência de cerca de 1 pretendia-se estudar a possibilidade destas medidas reduzirem o consumo de energia do habitual controlador *on/off*.

Quanto a este consumo importa estudar dois regimes: o transitório e o permanente. No caso do controlador *on/off*, em regime permanente, quanto maior for o intervalo entre as temperaturas liga/desliga maior será o consumo associado. Na experiência prática este intervalo foi reduzido a $\pm 1^\circ\text{C}$. Por esta razão não existe diferença entre o consumo de energia dos controladores neste regime. Na resposta transitória tal não se verificou. Os fenómenos de transmissão de calor dão origem a correntes de convecção. Enquanto o volume de água não homogeneizar, a leitura do sensor não corresponderá à temperatura presente em todo o sistema térmico. O que se verificou é que ao desligar a resistência elétrica, uma vez atingidos 60°C, a temperatura aumentava até aos 64°C. O aumento destes 4°C de temperatura da água ditou o maior consumo do controlador *on/off*. Este facto denota o cuidado a ter com o número de sensores de temperatura a instalar bem como a sua localização. Num depósito de maiores dimensões importaria estudar até que ponto tal é conseguido e o *overshoot* é eliminado. Neste aspeto, os restantes algoritmos conseguem uma melhor adaptação à aproximação do *setpoint*.

Fazendo uma análise ao *overshoot* e à manutenção do *setpoint* o controlador que melhores resultados obteve foi o de lógica difusa. Não regista *overshoot* e consegue manter o *setpoint* de uma forma mais estável. Tal facto deve-se à capacidade deste algoritmo para gerar uma resposta pouco abrupta e, neste caso, com uma atuação mais controlada aquando da maior aproximação ao *setpoint* estabelecido. De notar ainda que o controlador PID registou um pequeno *overshoot* verificado pela dificuldade em compatibilizar uma boa resposta transitória com uma oscilação nula em torno do *setpoint*.

Quanto ao tempo de subida, este é outro ponto a ter em consideração e bastante importante num caso real. Como esperado o controlador on/off atinge a temperatura estabelecida mais rapidamente pois a resistência de aquecimento está sempre ligada. A lógica difusa apesar de atingir os 60°C em pouco mais do dobro do tempo, tem um comportamento inicial idêntico ao on/off e atinge uma temperatura de 58°C em um minuto e cinquenta, trinta segundos a mais que o on/off para os 60°C. Pelo contrário o controlador PID tem um tempo de subida superior aos restantes, um valor que se traduz numa grande desvantagem aquando da necessidade de água quente em tempo útil para o utilizador.

Pelas razões apresentadas a lógica difusa traduz-se no melhor controlador.

Controladores

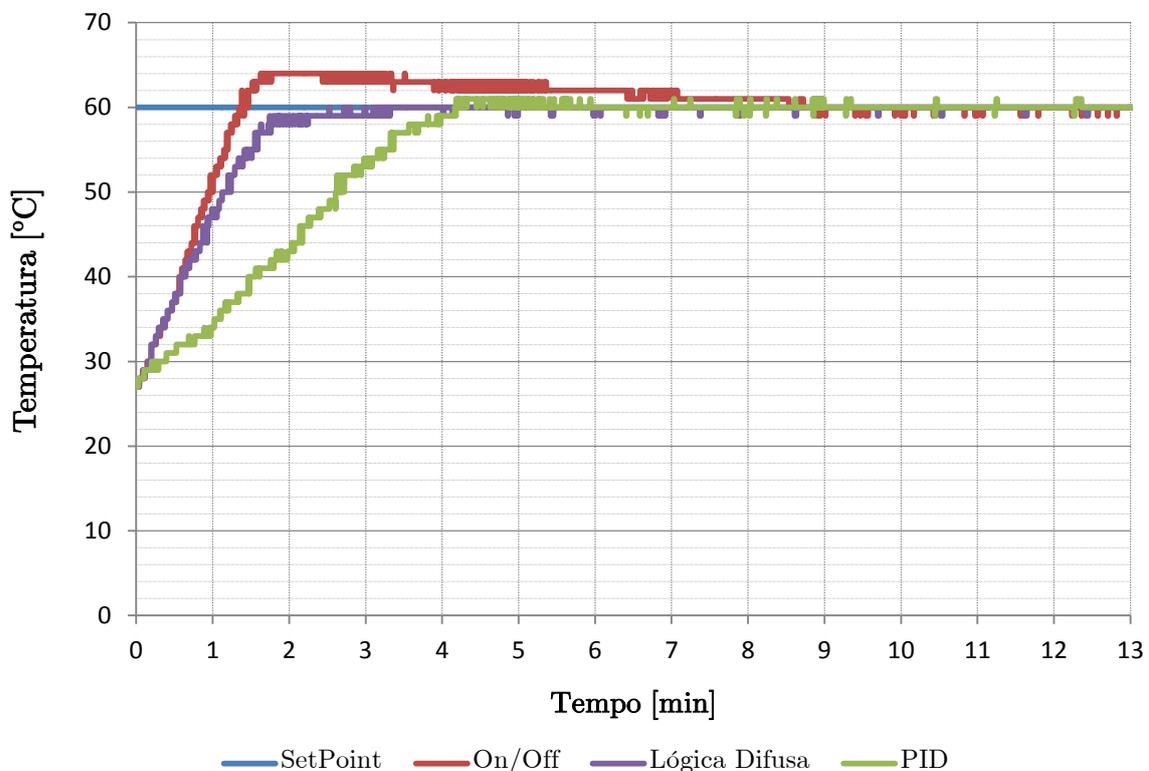


Figura 5.3.6 - Comparação da temperatura entre controladores.

Capítulo 6

Conclusão e trabalho futuro

6.1 Conclusão

Em jeito de conclusão, pode-se afirmar que a plataforma modular de controlo de temperatura responde às exigências práticas previamente definidas: ser um sistema flexível, pela capacidade de trabalhar com vários sensores e atuadores; modular, na medida em que pode ser replicada para trabalhar com outros equipamentos; e um sistema que não está limitado ao meio cablado, pela comunicação sem fios existente entre a unidade central e cada unidade remota.

O desenvolvimento da plataforma SCADA em Movicon foi justificado graças às suas potencialidades. Comparando com outros *softwares*, é possível construir uma interface gráfica de elevado grau de complexidade de forma mais simples, bem como mais intuitiva e apelativa para o utilizador. A troca de mensagens com os diferentes dispositivos também se revela bastante facilitada. Isto porque o *software* já reconhece os protocolos de comunicação mais utilizados (os parâmetros para o estabelecimento da comunicação e a leitura e escrita de variáveis são feitos de forma direta). Este *software* permite ainda criar páginas web sem necessidade de programação. Com uma simples ferramenta o Movicon cria todo o código capaz de replicar a interface gráfica desenvolvida.

A escolha dos módulos nrf24l01+ para a comunicação sem fios revelou-se a opção mais acertada. Apesar do tempo despendido com a sua configuração, o preço de mercado, o alcance de comunicação e a taxa de transferência de informação revelaram-se importantes vantagens para este tipo de aplicação.

A implementação dos algoritmos nos equipamentos de aquecimento foi testada e permitiu ao controlador eliminar o *overshoot* e manter mais estável a temperatura de desejada. A nível energético obteve-se uma pequena redução no consumo do aquecimento inicial. Contudo seria necessário implementar o protótipo num contexto real e comprovar quais as poupanças máximas conseguidas com estes e outros controladores.

6.2 Trabalho futuro

Como principal desenvolvimento desta plataforma domótica modular pretende-se criar um sistema que seja capaz de fazer a previsão das necessidades de aquecimento de uma habitação. O Matlab é uma ferramenta bastante poderosa e que poderia ser útil neste caso. Para além de já contar com ferramentas para aplicação de algoritmos PID (identificação de sistemas e ajuste automático dos parâmetros PID) ou ainda de lógica difusa, algumas já usadas neste trabalho, tem também toolbox's de redes neuronais associadas a lógica difusa, denominadas neuro-fuzzy. Com base num treino de todas as entradas e saídas do sistema estas redes são capazes de gerar uma função transferência. Quanto maior for o treino e mais dados forem obtidos para cada sistema maior será a correta previsão do modelo a implementar. A nível prático era necessário criar uma ponte entre o MatLab e o Movicon e desta forma passar o controlo de cada módulo para o MatLab.

A nível dos ensaios era necessário realizar testes à escala não só para comprovar os resultados obtidos como também para adaptar componentes, nomeadamente a eletrónica de potência.

Quanto ao modelo do protótipo, já foram realizados os desenhos para a criação de placas de circuito impresso. Com vista à sua redução e compactação propõe-se a criação de placas PCB *dual layer* com dispositivos SMD (*Surface Mount Device*).

Uma ferramenta que o Movicon disponibiliza mas que não foi abordada nesta dissertação são as aplicações para telemóvel. Já existente noutros serviços, a ativação e desativação do sistema via telemóvel é uma solução inovadora, criativa e que dá ao utilizador uma experiência diferente de controlo e autonomia.

Referências Bibliográficas

- [1] ADENE, “Guia da eficiência energética,” 2013. [Online]. Available: www.adene.pt. [Accessed: 10-Oct-2014].
- [2] DGEG, *Estatísticas-Balanços Energéticos 2010*. 2010.
- [3] E. Commission, *EU transport in figures*. Luxembourg: Publications office of the European Union, 2013, p. 132.
- [4] Instituto Nacional de Estatística, “Inquérito ao consumo de energia no sector doméstico 2010,” 2011. [Online]. Available: <http://goo.gl/323GF>. [Accessed: 10-Oct-2014].
- [5] Iberdrola, “Conselhos de poupança.” [Online]. Available: www.iberdrola.pt. [Accessed: 03-Oct-2014].
- [6] Vesternet, “Using home automation for heating control.” [Online]. Available: www.vesternet.com. [Accessed: 06-Oct-2014].
- [7] Bosch Termotecnologia SA, “Controladores,” 2010. [Online]. Available: http://www.vulcano.pt/consumidor/documentacao/catalogo_de_produtos/catalogodeprodutos. [Accessed: 13-Oct-2014].
- [8] Lux Magna, “Bombas de calor - a solução ideal para o seu bem estar.” .
- [9] Dimplex, “Acessórios opcionais, bombas de calor de aquecimento - regulação.” [Online]. Available: <http://goo.gl/XshrBr>. [Accessed: 08-Oct-2014].

- [10] NOVUS, “Controladores e Indicadores.” [Online]. Available: <http://www.novus.com.br/catalogos/?ID=907183>. [Accessed: 27-Oct-2014].
- [11] W. E. M. Company, “The watlow educational series,” in *Temperature Sensors*, 1995, pp. 1–35.
- [12] Eletrodex, “Termopar Tipo K HK-P01.” [Online]. Available: <http://www.eletrodex.com.br/termopar-tipo-k-hk-p01.html>. [Accessed: 14-Oct-2014].
- [13] J. P. Santos, “Aquisição de temperatura,” in *Tecnologias de Accionamento e Comando 2010/2011*, 2010, pp. 16–29.
- [14] “Introdução sobre termopares.” [Online]. Available: <http://goo.gl/fjbbhN>. [Accessed: 10-Oct-2014].
- [15] Agilente, “Practical Temperature Measurements.” p. 36.
- [16] T. T. C. LTD, “Sensor Termistor.” [Online]. Available: <http://spanish.alibaba.com/product-free/thermistor-sensor-101116690.html>. [Accessed: 14-Oct-2014].
- [17] B. Thermo-technik, “Pirômetros de mão.” [Online]. Available: <http://www.directindustry.es>. [Accessed: 06-Oct-2014].
- [18] SensorTips, “Solving Medical Sensing Application Problems.” [Online]. Available: <http://www.sensortips.com/pressure/solving-medical-sensing-application-problems/>. [Accessed: 27-Oct-2014].
- [19] M. Brumatti, *Eletrônica de potência*. 2005.
- [20] J. M. D. Costa, *Apontamentos de electrónica de potência*. 2012.
- [21] Faculdade de engenharia elétrica e de computação, “Módulo 2 - Tiristors e retificadores controlados.” .
- [22] J. P. Santos, “MODBUS,” in *Tecnologias de Accionamento e Comando 2010/2011*, 2010, pp. 100–113.

- [23] Modicon, “MODBUS application protocol specification V1.1b.” [Online]. Available: <http://goo.gl/ukJpB>. [Accessed: 10-Oct-2014].
- [24] A. B. Lugli and D. G. Sobrinho, “Tecnologias wireless para automação industrial: wireless_hart, bluetooth, wisa, wi-fi, zigbee e SP-100,” pp. 1–11.
- [25] H. Labiod, H. Afifi, and C. De Santis, *Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and WiMax*. Springer, 2007.
- [26] Nordic Semiconductor, *nRF24L01 Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification*. .
- [27] A. P. de Melo, *Teoria dos sistemas de controle lineares*. 2010.
- [28] K. Ogata., *Modern Control Engineering*, 4th ed. Aeeizh, 2002, p. 976.
- [29] V. Toochinda, “Digital PID Controllers.” [Online]. Available: <http://www.controlsystemslab.com/doc/b4/pid.pdf>.
- [30] G. Viot, “Fuzzy logic in c,” *Dr. Dobb's J.*, p. 94.
- [31] N. Schulze, “Fuzzy Logic : Introduction.” [Online]. Available: <http://goo.gl/7V3202>.
- [32] J. M. Mendel, “Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial,” *Proc. IEEE*, vol. 83, no. 3, pp. 345 – 377, 1995.
- [33] International Electrotechnical Commission (IEC), “Part 7 - Fuzzy Control Programming,” *IEC 1131 - Program. Control.*, vol. 0, no. 65, pp. 1–53.
- [34] Y. Yang and H. Bian, “Design and Realization of Fuzzy Self-tuning PID Water Temperature Controller Based on PLC,” in *International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, 2012, pp. 1–4.
- [35] S. Yilmaz, B. Tombaloglu, K. Karabulutlu, Y. Gumus, and H. Dincer, “Temperature control applications by means of a pic16f877 microcontroller.”
- [36] S. P, S. D.N, and P. B, “Temperature Control using Fuzzy Logic,” *Int. J. Instrum. Control Syst.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2014.

- [37] L. Juan, “Design and simulation of smith and fuzzy turning pid controller,” vol. 24, no. 3.
- [38] HUANGHP, CHIENIL, and LEEYC, “Simple method for tuning cascade control system,” *Chem. Eng. Commun.*, vol. 165, no. 1, pp. 89–121, 1998.
- [39] J. Yu, J. Zhou, Y. Liu, and T. Ai, “Study on Fuzzy Self-tuning PID Cascade Control Algorithm for Temperature of Active Solar Heating System,” in *Chinese Control and Decision Conference*, 2010, no. 50778144, pp. 2439–2443.
- [40] Microchip Technology Incorporated, *PIC18(L)F2X/4XK22 Data Sheet*, vol. 18, no. L. 2010.
- [41] REISSMANN, “Product Information - PT1000,” vol. 10, no. 0. pp. 1–9.
- [42] A. Devices, “Single-Supply, Rail-to-Rail, Low Cost Instrumentation Amplifier - AD623.” pp. 1–24.
- [43] Power Innovations Limited, “TIC206 SERIES SILICON TRIACS.” pp. 1–5, 1997.
- [44] Optoelectronics, “MOC3020, MOC3021, MOC3022, MOC3023 Data Sheet.” .
- [45] Carlo Gavazzi Controls, “Serial Communication Protocol: WM22-DIN / EM4-DIN.” pp. 1–22.
- [46] MOXA, *NPort 5600 Series User 's Manual*, Fourteenth., no. February. .
- [47] J. P. Santos, “RS232,” in *Tecnologias de Accionamento e Comando 2010/2011*, 2010, pp. 71–84.

Anexos e Apêndices

Anexo A

Protocolo Rs232

Este protocolo foi aprovado pela *Electronic Industries Association* -EIA, sob a designação EIA232C em 1969. A “Recomendação para Standard 232”, RS232, tinha por objetivo permitir a ligação de equipamentos digitais a redes públicas analógicas, por exemplo, a ligação de terminais e computadores à rede telefónica usando para o efeito *modems*. Convém lembrar que na época a única rede de comunicação mundial era a rede telefónica, analógica, concebida para transmitir a voz humana [47].

Topologia e meio de comunicação

No caso do protocolo Rs232, está prevista a ligação entre dois equipamentos apenas, não se trata por isso de uma verdadeira rede, mas sim uma ligação ponto a ponto entre dois equipamentos. Os fios de cobre, os cabos coaxiais, a fibra ótica e mesmo o ar, são alguns exemplos de meios de comunicação que podem ser usados para transmitir dados entre equipamentos. No caso vertente, o protocolo Rs232 preconiza a utilização do fio de cobre para interligar os dois equipamentos [47].

Formato da palavra série

Cada palavra série é constituída por um “*start bit*”, seguido de 5, 6, 7 ou 8 *bits* de dados, um *bit* de paridade e no final o “*stop bit*”: O “*start bit*” corresponde a uma tensão positiva aplicada durante um “*bit time*”; o *bit* de paridade serve para permitir que o equipamento recetor possa detetar eventuais erros de transmissão. Este *bit* é adicionado automaticamente pelo emissor e é analisado pelo recetor. Todavia, é opcional. No caso de ser utilizada a paridade par, este bit assume o valor “1” ou “0” por forma ao número de *bits* a “1” enviados na palavra série seja sempre um número par. O “*stop bit*” corresponde a uma tensão negativa aplicada no fio de cobre durante 1, 1½, ou 2 “*bit time*” [47].

Tipo de diálogo

Quando apenas um dos equipamentos pode enviar dados e outro se limita a receber, diz-se que têm um diálogo do tipo “*simplex*”. Quando os dois equipamentos podem receber e enviar dados, mas não em simultâneo, diz-se que têm um diálogo do tipo “*half duplex*”. Quando os dois equipamentos podem enviar e receber dados em simultâneo, têm um diálogo do tipo “*full duplex*”. Numa comunicação Rs232 existem dois fios de cobre distintos para a transmissão de dados, um em cada sentido, por essa razão os dois

equipamentos podem receber e enviar dados em simultâneo. Diz-se por isso que estamos na presença de um diálogo do tipo “*Full duplex*”[47].

Ficha

Os pinos Tx e Rx são utilizados pelo recurso (A) para enviar e receber dados. Os outros pinos são utilizados para controlar: o início e fim da ligação telefónica, o fluxo de dados e ainda se for caso disso controlar o sincronismo do recurso (A) com o modem (A). Os pinos secundários permitem que uma segunda transferência de informação possa ocorrer em simultâneo usando a mesma ficha (a mesma interface). A versão EID-232D prevê dois tipos comunicação: síncrona e assíncrona. Numa comunicação assíncrona o sinal gerado pelo emissor, mais exatamente o instante da transição do sinal (de 0 para 1 e de 1 para 0) depende apenas do seu relógio interno. Pelo contrário numa comunicação síncrona tanto o emissor como o recetor dependem do mesmo sinal de relógio para determinar os instantes da transição do sinal de dados. No modo de comunicação síncrona, além de ser necessário utilizar os pinos Tx e Rx para enviar e receber dados é necessário também utilizar os pinos TxClock e RxClock para sincronizar o emissor e o recetor [47].

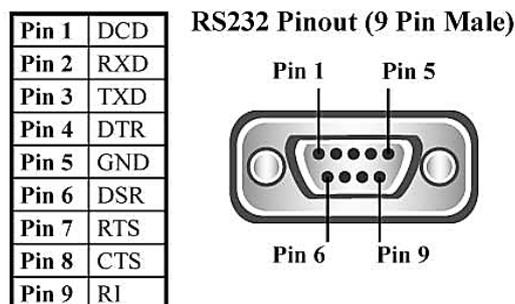


Figura A.1 - Ficha Rs232 macho.

Conversão dos níveis TTL para os níveis Rs232

A interface USART/Rs232 de um μC pode gerar apenas tensões de 0 e 5 volt, ao passo que os sinais elétricos gerados durante uma comunicação Rs232 atingem tensões entre 5 e 25 volt, positivas e negativas. Por esta razão é necessário utilizar um conversor de tensões. O circuito integrado MAX232 desempenha essa função e converte uma tensão de + 5 V numa tensão negativa de -7 V, e uma tensão de 0 volt numa tensão positiva de +7 V, e vice-versa [47].

Anexo B

LCD

B.1 - Codificação dos caracteres

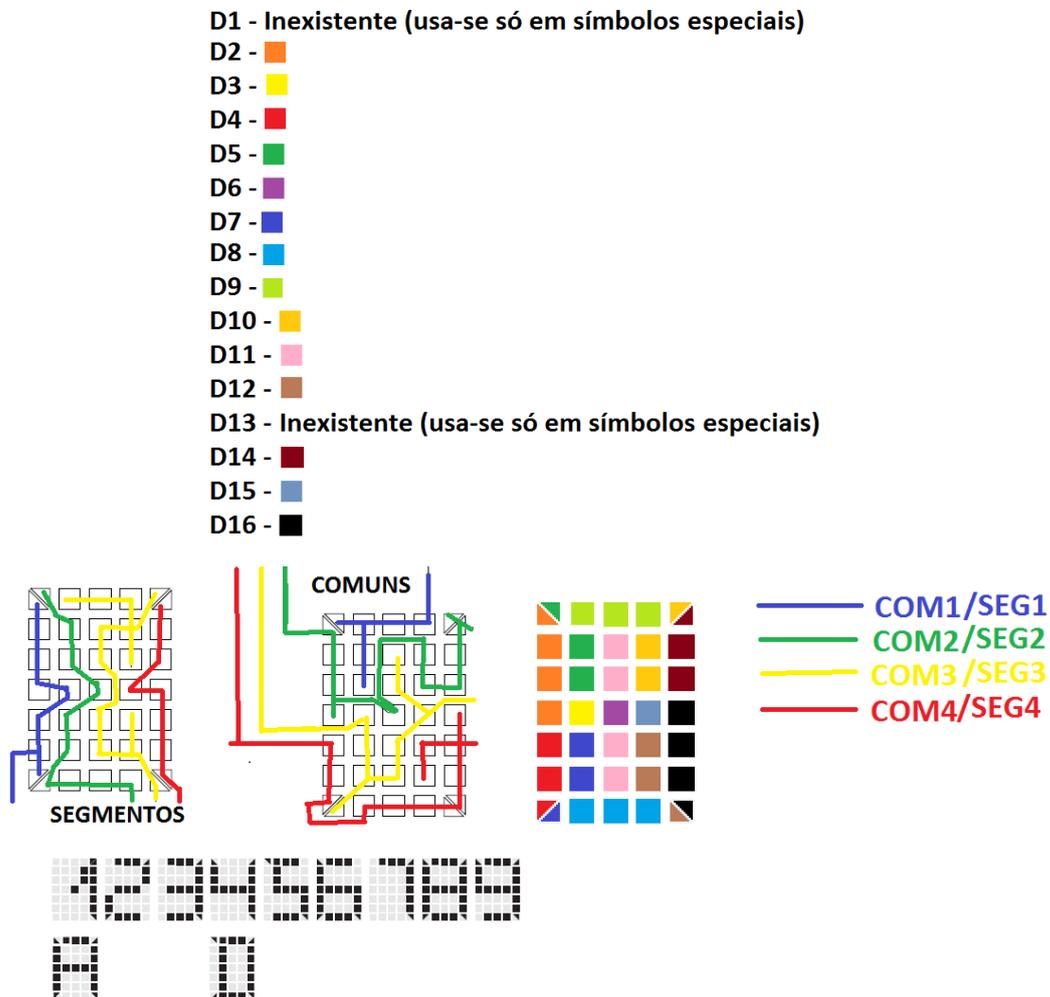


Figura B.1 - Segmentos que compõem cada caracter.

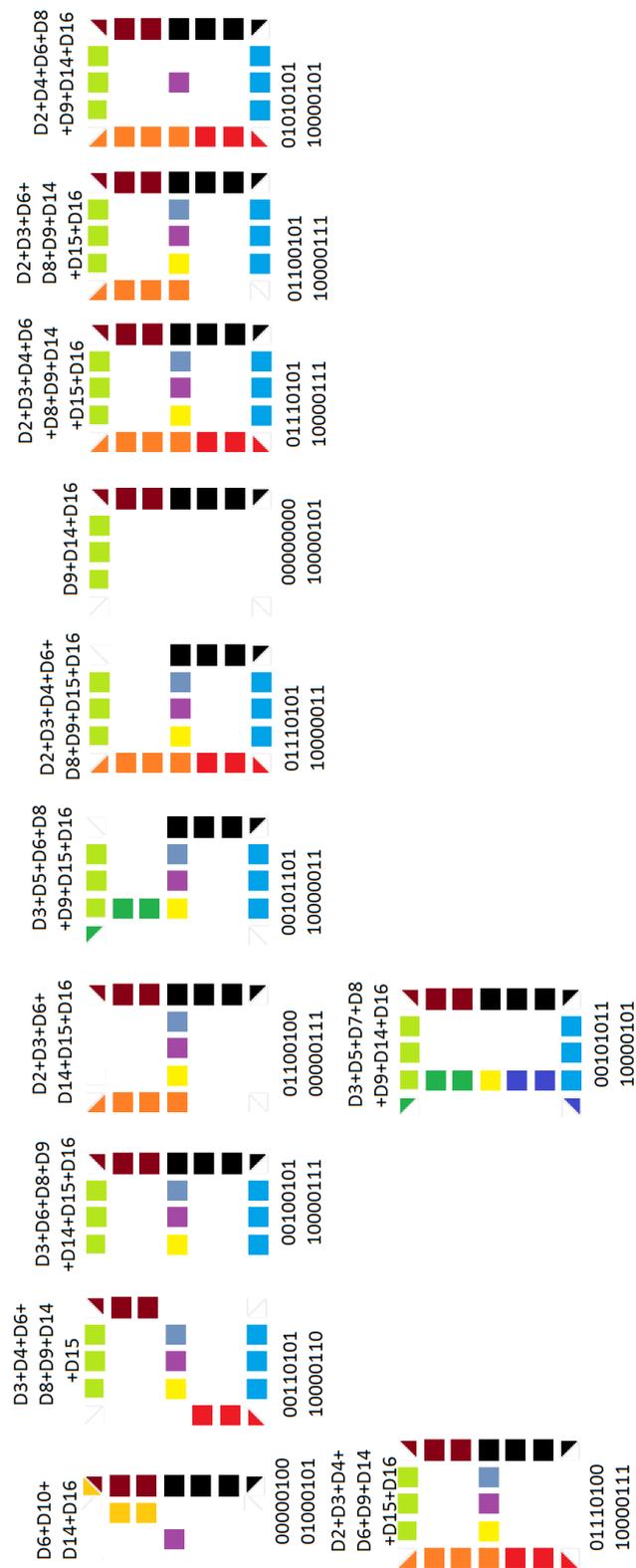


Figura B.2 - Exemplo de binarização de um número ou letra

B.2 – Código do microcontrolador para a programação do LCD

```
#include <htc.h>

unsigned int lcdcount=0;
unsigned int ii=0x0000;
unsigned int numero=0x0000;
unsigned int entrada;
unsigned int centenas,dezenas,unidades;
unsigned int centenasSP,dezenasSP,unidadesSP;

/*****
FUNÇÃO: Enviar os 16 bits correspondentes a cada caracter
*****/

void enviar(unsigned int caracter){
ii=1;
ANSELDbits.ANSD6=0;
ANSELDbits.ANSD7=0;
TRISD6=0;
TRISD7=0;
    while(ii<=16){
        PORTDbits.RD7=(caracter>>15)==1;
        caracter=caracter<<1;
        PORTDbits.RD6=1;
        PORTDbits.RD6=0;
        ii++;
    }
}

/*****
FUNÇÕES: Representação do caracter a mostrar no LCD
*****/

void nulo(void) {
numero=0b0000000000000000;
enviar(numero);
}
void C(void) {
numero=0b0101000110000000;
enviar(numero);
}
void graus(void) {
numero=0b0010110010000110;
enviar(numero);
}
void igual(void) {
numero=0b0010010100000010;
enviar(numero);
}
void S(void) {
numero=0b0110010110000011;
enviar(numero);
}
void zero(void) {
numero=0b0101010110000101;
enviar(numero);
}
void um(void) {
numero=0b0000010001000101;
enviar(numero);
}
void dois(void) {
numero=0b0011010110000110;
enviar(numero);
}
void tres(void) {
```

```

numero=0b0010010110000111;
enviar(numero);
}
void quatro(void){
numero=0b0110010000000111;
enviar(numero);
}
void cinco(void){
numero=0b0010110110000011;
enviar(numero);
}
void seis(void){
numero=0b0111010110000011;
enviar(numero);
}
void sete(void){
numero=0b0000000010000101;
enviar(numero);
}
void oito(void){
numero=0b0111010110000111;
enviar(numero);
}
void nove(void){
numero=0b0110010110000111;
enviar(numero);
}

/*****
FUNÇÃO: Escrever o caracter associado ao numeral (caracter a enviar)
*****/

void LCDwrite (unsigned char numeral){

if (numeral==0){zero();}
if (numeral==1){um();}
if (numeral==2){dois();}
if (numeral==3){tres();}
if (numeral==4){quatro();}
if (numeral==5){cinco();}
if (numeral==6){seis();}
if (numeral==7){sete();}
if (numeral==8){oito();}
if (numeral==9){nove();}

}

/*****
FUNÇÃO: Escrever no LCD - 160 bits (10 caracteres)
*****/

void comecar(int SetPoint, int entrada){

ANSELDbits.ANSD4=0;
TRISD4=1;
ANSELDbits.ANSD5=0;
TRISD5=0;
PORTDbits.RD4=1;
PORTDbits.RD5=1;

// Testar se o número é da ordem das unidades dezenas ou centenas

if (entrada >= 100){
    graus();
    C();
    igual();
    centenas= entrada / 100;
    LCDwrite(centenas);
    dezenas=(entrada % 100) / 10;
}
}

```

```
        LCDwrite(dezenas);
        unidades= entrada % 10;
        LCDwrite (unidades);
        S();
        igual();
        dezenasSP=(SetPoint % 100) / 10;
        LCDwrite(dezenasSP);
        unidadesSP= SetPoint % 10;
        LCDwrite (unidadesSP);
} else {
    if (entrada>=10){
        graus();
        C();
        igual();
        dezenas=(entrada % 100) / 10;
        LCDwrite(dezenas);
        unidades= entrada % 10;
        LCDwrite (unidades);
        nulo();
        S();
        igual();
        dezenasSP=(SetPoint % 100) / 10;
        LCDwrite(dezenasSP);
        unidadesSP= SetPoint % 10;
        LCDwrite (unidadesSP);
    } else {
        graus();
        C();
        igual();
        unidades= entrada % 10;
        LCDwrite (unidades);
        nulo();
        nulo();
        S();
        igual();
        dezenasSP=(SetPoint % 100) / 10;
        LCDwrite(dezenasSP);
        unidadesSP= SetPoint % 10;
        LCDwrite (unidadesSP);
    }
}

PORTDbits.RD4=0;
PORTDbits.RD5=0;
}
```

Apêndice C

Desenho das placas PCB

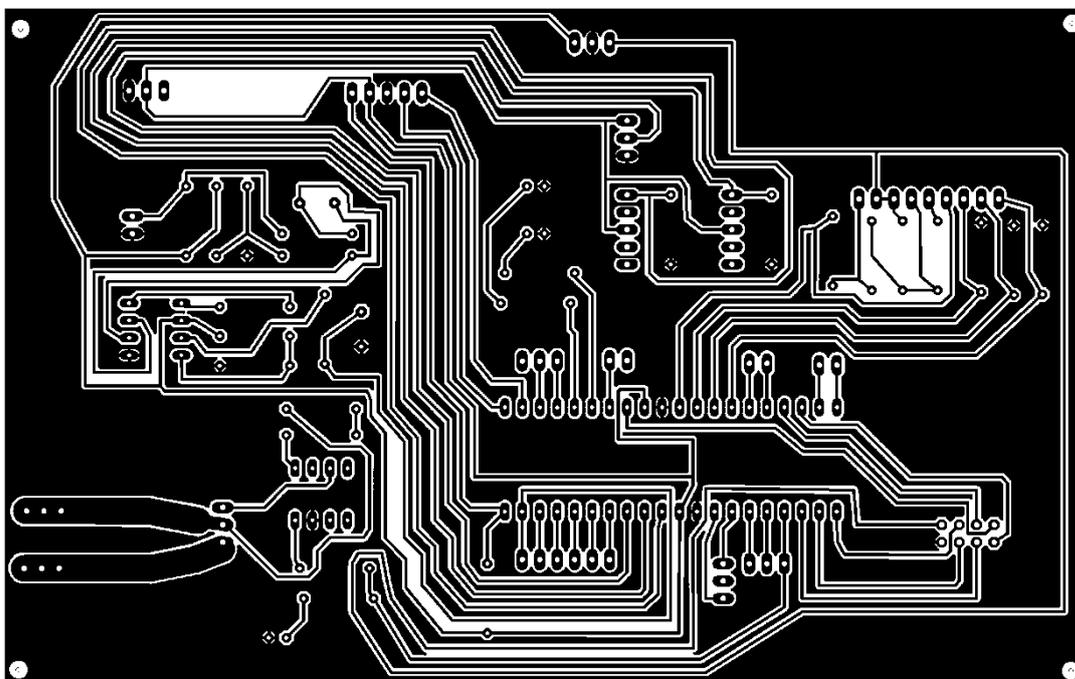


Figura C.1 - Desenho da placa PCB da unidade remota modular.

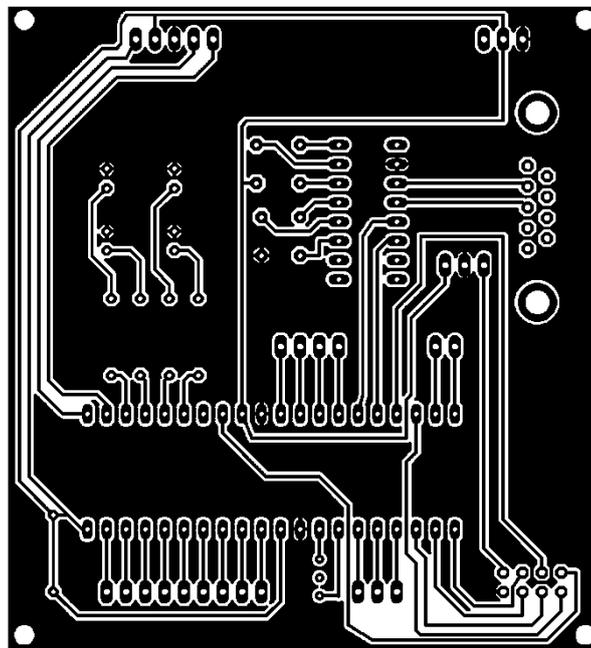
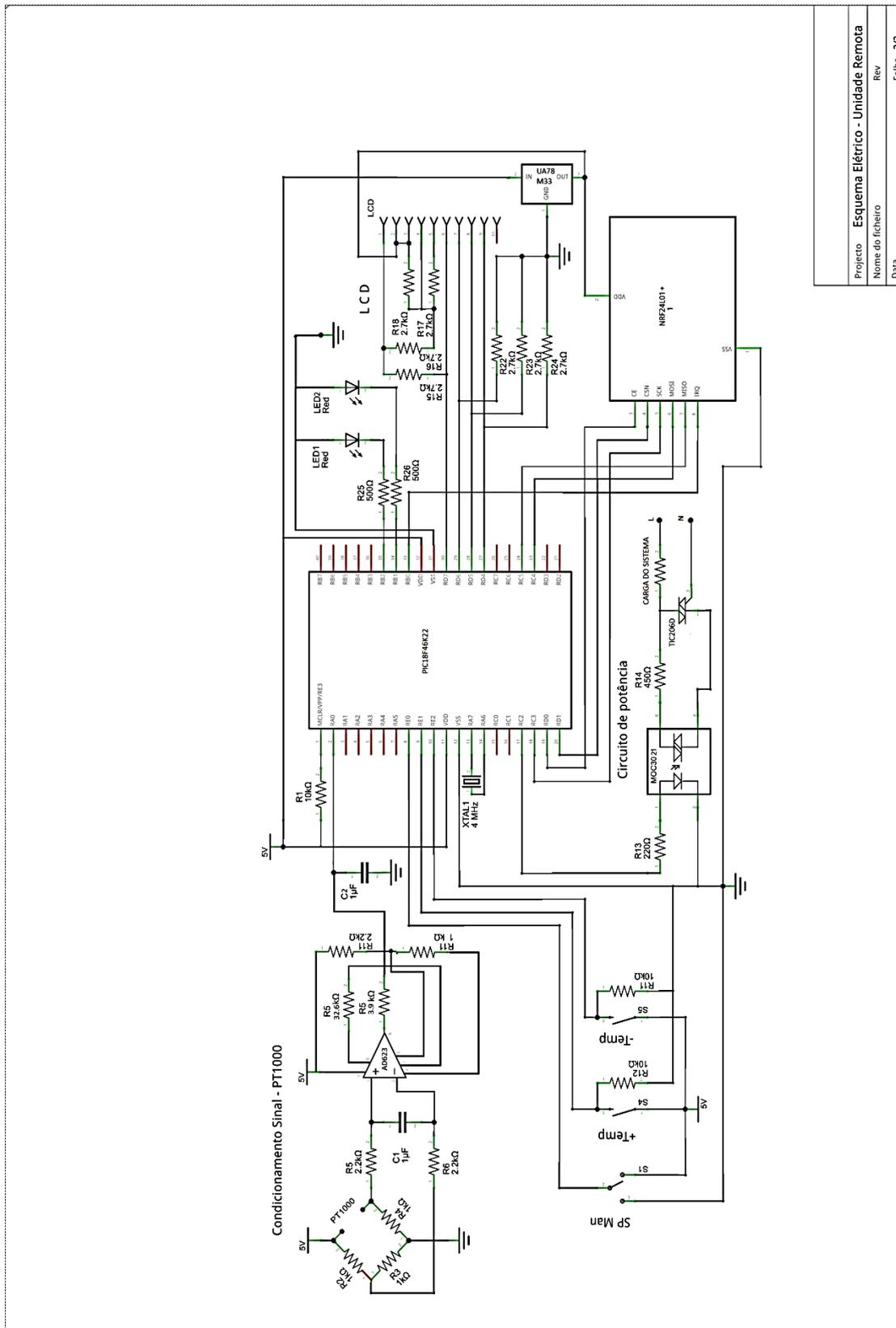


Figura C.2 - Desenho da placa PCB do módulo central.

Apêndice D

Esquemas elétricos



Projecto	Esquema Elétrico - Unidade Remota
Nome do ficheiro	Rev
Data	Folha 22

Figura D.2 - Esquema eléctrico da unidade remota.