



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Remodelação e colocação em funcionamento de uma instalação solar térmica**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

## **Remodeling and start up a didactic solar installation**

**Autor**

**Rafael Jorge Galvão Santos**

**Orientadores**

**Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites**

**João Alexandre Dias Carrilho**

**Júri**

**Presidente** Adélio Manuel Rodrigues Gaspar  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Orientador** Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Marco Alexandre dos Santos Fernandes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Coimbra, setembro, 2018**



## Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero deixar um especial agradecimento ao Professor Doutor Gonçalo Brites por todas as opiniões e críticas que foi dando ao longo do projeto, que contribuíram para a melhoria do mesmo, por todo o apoio prestado tanto a nível teórico como a nível prático e por toda a paciência que teve, tendo sido fundamental para a conclusão deste projeto. Queria agradecer também ao Professor João Carrilho pelo apoio dados e por todas as sugestões.

Aos meus pais, por todo o apoio dado ao longo do meu percurso académico e porque sem eles nada disto teria sido possível. À minha irmã por acreditar sempre em mim.

Aos meus avós por todo o incentivo dado e por terem sempre orgulho em mim.

Aos meus amigos, em especial os que estiveram presentes no meu percurso académico, por todas as horas de lazer e de trabalho.

Por fim, à Cláudia pelo carinho e motivação dado, por toda a paciência que teve ao longo desta etapa e pela leitura cuidada da dissertação.



## Resumo

Os sistemas de energia renováveis estão cada vez mais presentes na sociedade. Torna-se assim fundamental para o seu estudo desenvolver ferramentas educacionais que não só ilustrem os princípios básicos do seu funcionamento como também permitam aos alunos testar soluções tecnológicas inovadoras.

Este projeto de dissertação tem como finalidade a remodelação e colocação em funcionamento de uma instalação solar didática e o desenvolvimento de um sistema de controlo e monitorização remoto para a mesma, apto para ser utilizado em qualquer tipo de instalação solar térmica.

O processo de remodelação da instalação passou pela substituição dos componentes deteriorados com o tempo e a adição de novos componentes que possam melhorar o funcionamento da mesma.

O controlo e monitorização remoto é feito à distância, no software Node-RED, instalado num PC do tipo Raspberry PI, que recebe e transmite os dados de e para os sensores e atuadores instalados na instalação solar térmica. Os sensores e atuadores são controlados por uma placa Arduino e os dados são transmitidos recorrendo a um módulo HC12 com comunicação por radiofrequência.

Atualmente a instalação e o sistema de monitorização e controlo remoto podem ser utilizados no apoio à lecionação de matérias que envolvam os sistemas solares térmicos, e o sistema de monitorização e controlo pode ser empregue em instalações solares térmicas domésticas ou industriais, com as devidas adaptações.

**Palavras-chave:** Sistema solar térmico, Monitorização e controlo remoto, Sensores, Arduino, Raspberry Pi, Node-RED



## Abstract

Renewable energy systems are more and more present in the society which makes the development of tools that help study them and that can improve the efficiency of them fundamental.

This dissertation project has the purpose of remodelling and start up a didactic solar installation and the development of a remote control and monitoring system for it, suitable for use in any type of solar thermal installation.

The process of remodelling the installation went from replacing the components that deteriorated with the time to the addition of new components that can increase the efficiency of the installation.

The remote monitoring and control process is done in the software Node-RED that is installed on a Raspberry PI that receives and transmits the data to and from the sensors and the electronic components that are installed in the thermal installation which are controlled by a microcontroller installed on an Arduino board. Through the sensors it is possible to obtain several temperatures throughout the installation, several pressures in the solar circuit, the flow of the solar circuit, the solar radiation incident on the solar collectors and other data that make the installation more educational.

Currently the installation and the remote monitoring and control system can be used to support the teaching of materials involving solar thermal systems and the system can be used in domestic hot water systems or industrial hot water installations.

**Keywords:** Solar thermal system, Remote monitoring and control, Sensors, Arduino, Raspberry PI, Node-RED



## Índice

|  |      |
|--|------|
| Índice de Figuras .....                                  | ix   |
| Índice de Tabelas .....                                  | xi   |
| Nomenclatura e Siglas .....                              | xiii |
| Nomenclatura.....  | xiii |
| Siglas .....   | xiv  |
| 1. INTRODUÇÃO.....                                       | 1    |
| 1.1. Enquadramento .....                                 | 1    |
| 1.2. Objetivos.....                                      | 1    |
| 1.3. Metodologia .....                                   | 2    |
| 1.4. Estrutura.....                                      | 2    |
| 2. ENERGIA SOLAR .....                                   | 3    |
| 2.1. Radiação Solar .....                                | 3    |
| 2.2. Distribuição Espectral da Radiação .....            | 4    |
| 2.3. Disponibilidade Energética em Portugal .....        | 5    |
| 3. SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS.....                        | 7    |
| 3.1. Componentes de uma instalação solar térmica .....   | 8    |
| 3.1.1. Coletores solares.....                            | 8    |
| 3.1.2. Depósito de acumulação .....                      | 14   |
| 3.1.3. Permutador de calor.....                          | 15   |
| 3.1.4. Bomba de circulação .....                         | 16   |
| 3.1.5. Tubagens.....                                     | 16   |
| 3.1.6. Outros componentes .....                          | 16   |
| 3.1.7. Controlador solar .....                           | 16   |
| 4. INSTALAÇÃO SOLAR TÉRMICA .....                        | 19   |
| 4.1. Componentes pré-existentes .....                    | 19   |
| 4.1.1. Coletores solares.....                            | 19   |
| 4.1.2. Bomba de circulação .....                         | 21   |
| 4.1.3. Depósito de acumulação .....                      | 22   |
| 4.1.4. Vaso de expansão .....                            | 23   |
| 4.1.5. Manómetro e válvula de segurança .....            | 24   |
| 4.1.6. Válvulas de seccionamento .....                   | 24   |
| 4.1.7. Válvula de regulação de caudal .....              | 24   |
| 4.1.8. Tubagens.....                                     | 24   |
| 4.2. Componentes substituídos e adicionados .....        | 26   |
| 4.3. Sensores e componentes eletrónicos adicionados..... | 27   |
| 5. SISTEMA DE CONTROLO E MONITORIZAÇÃO.....              | 29   |
| 5.1. Hardware.....                                       | 29   |
| 5.2. Software .....                                      | 35   |
| 5.2.1. Node-RED .....                                    | 35   |
| 5.2.2. WinSCP .....                                      | 35   |

|   |    |
|---|----|
| 5.3. Sistema de comunicação.....  | 36 |
| 5.4. Interface de utilizador.....                                       | 38 |
| 5.5. Aplicabilidade do sistema a sistemas domésticos e industriais..... | 41 |
| 6. TESTES À INSTALAÇÃO.....   | 43 |
| 7. Conclusões.....  | 47 |
| 7.1. Trabalhos futuros.....   | 47 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 49 |
| ANEXO A.....  | 51 |
| ANEXO B.....  | 53 |
| APÊNDICE A.....   | 59 |
| APÊNDICE B.....   | 60 |
| APÊNDICE C.....   | 64 |
| APÊNDICE D.....   | 65 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1. Irradiação solar diária mensal em Coimbra ( <i>kWh/m<sup>2</sup></i> ).....   | 4  |
| Figura 2.2. Distribuição espectral da radiação solar (Duffie, 2003). ....   | 5  |
| Figura 2.3. Distribuição da radiação solar na Europa ((PVGIS) <i>European Commision</i> ).....  | 6  |
| Figura 3.1. (a) Sistema de termossifão (Kalogirou, 2014); (b) Sistema de circulação forçada. ....   | 8  |
| Figura 3.2. Tipos de ligação: (a) Ligação em série; (b) Ligação em paralelo. ....   | 9  |
| Figura 3.3. Ângulos formados entre o Sol e um coletor solar (Duffie, 2003). ....  | 10 |
| Figura 3.4. Coletor plano (Kalogirou, 2014). ....   | 12 |
| Figura 3.5. Coletor parabólico composto (Kalogirou, 2014). ....   | 12 |
| Figura 3.6. Curvas típicas de eficiência dos coletores ( <i>Energia Solar Térmica - manual sobre tecnologias projecto e instalação</i> )..... | 14 |
| Figura 3.7. Estratificação térmica. ....  | 15 |
| Figura 3.8. Esquema de princípio (AQSpP/DGGE, 2004). ....   | 17 |
| Figura 4.1. Coletores solares. ....   | 20 |
| Figura 4.2. Ligação em série ou em paralelo dos coletores. ....   | 21 |
| Figura 4.3. Bomba de circulação. ....   | 22 |
| Figura 4.4. Depósito de acumulação. ....  | 22 |
| Figura 4.5. Vaso de expansão. ....  | 23 |
| Figura 4.6. Tubagens da instalação. ....  | 25 |
| Figura 4.7. Componentes substituídos e componentes novos: (a) Rotâmetros; (b) Sensores de temperatura; (c) Purgadores de ar. ....             | 26 |
| Figura 4.8. Filtro em Y. ....   | 27 |
| Figura 4.9. Sensores e componentes eletrónicos na instalação. ....  | 28 |
| Figura 5.1. Caixa para proteger o fotodíodo. ....   | 32 |
| Figura 5.2. LCD. ....   | 33 |
| Figura 5.3. Comunicação entre a instalação e o Node-RED. ....   | 37 |
| Figura 5.4. Ligações entre nós no Node-RED. ....  | 38 |
| Figura 5.5. Interface de utilizador. ....   | 40 |
| Figura 5.6. Separador na interface de utilizador. ....  | 40 |
| Figura 6.1. Inclinação e orientação dos coletores. ....   | 43 |
| Figura 6.2. Pressão antes e depois da bomba de circulação. ....   | 43 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 6.3. Variação do caudal do circuito solar [l/hour].                    | 44 |
| Figura 6.4. Variação das temperaturas [°C].                                   | 45 |
| Figura 6.5. Variação da radiação incidente nos coletores [W/m <sup>2</sup> ]. | 45 |
| Figura 6.6. Variação do rendimento instantâneo.                               | 46 |
| Figura B1.1. Sensor de temperatura DS18B20.                                   | 53 |
| Figura B1.2. Sensor de pressão SKU237545.                                     | 54 |
| Figura B1.3. Caudalímetro.  | 54 |
| Figura B1.4. Fotodíodo SFH203P.   | 55 |
| Figura B1.5. MPU6050.   | 55 |
| Figura B1.6. HMC5883L.  | 56 |
| Figura B1.7. ACS712.  | 56 |
| Figura B1.8. Relé.  | 57 |
| Figura B1.9. LCD.   | 57 |
| Figura A2.1. Fluxograma geral da instalação                                   | 59 |
| Figura B2.1. Esquema elétrico dos sensores de temperatura.                    | 60 |
| Figura B2.2. Esquema elétrico dos sensores de pressão.                        | 60 |
| Figura B2.3. Esquema elétrico do caudalímetro.                                | 61 |
| Figura B2.4. Esquema elétrico dos componentes com interface I2C.              | 61 |
| Figura B2.5. Esquema elétrico do fotodíodo.                                   | 62 |
| Figura B2.6. Esquema elétrico do sensor de medição de corrente.               | 62 |
| Figura B2.7. Esquema elétrico dos relés.                                      | 63 |
| Figura B2.8. Esquema elétrico do HC-12.                                       | 63 |
| Figura C2.1. Curva de calibração do fotodíodo.                                | 64 |
| Figura D2.1. Esquema de ligação dos coletores em série ou paralelo            | 65 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 4.1. Legenda da Figura 4.6 ..... | 25 |
| Tabela 4.2. Legenda da Figura 4.9 ..... | 28 |



## NOMENCLATURA E SIGLAS

### Nomenclatura

$A$  – Área do absorvedor dos coletores [ $m^2$ ]

$A_{SV}$  – Valor de histerese da válvula de segurança [ $bar$ ]

$C_p$  – Calor específico [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$E_{difusa}$  – Radiação difusa [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$E_{direta}$  – Radiação direta [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$E_{global}$  – Radiação global [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$H_{ST}$  – Desnível entre o topo da instalação e o vaso de expansão [ $m$ ]

$I$  – Radiação global [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$\dot{m}$  – Caudal mássico [ $kg \cdot s^{-1}$ ]

$p_e$  – Pressão de funcionamento [ $bar$ ]

$p_{SV}$  – Pressão de abertura da válvula de segurança [ $bar$ ]

$p_{vap}$  – Pressão de saturação da água [ $bar$ ]

$p_0$  – Pressão de controlo [ $bar$ ]

$Q_t$  – Potência da radiação incidente nos coletores [ $W$ ]

$Q_u$  – Potência térmica útil dos coletores [ $W$ ]

$T_{in}$  – Temperatura à entrada dos coletores [ $^{\circ}C$ ]

$T_{out}$  – Temperatura à saída dos coletores [ $J/kg \cdot K$ ]

$T_{in}$  – Calor específico [ $J/kg \cdot K$ ]

$T_{in}$  – Calor específico [ $J/kg \cdot K$ ]

$\alpha_s$  – Altura solar [ $^{\circ}$ ]

$\beta$  – Inclinação do coletor [ $^{\circ}$ ]

$\gamma$  – Azimute do coletor [ $^{\circ}$ ]

$\gamma_s$  – Azimute solar [ $^{\circ}$ ]

$\eta$  – Rendimento instantâneo [%]

$\theta_z$  – Ângulo zenital [ $^{\circ}$ ]

$\rho$  – Densidade da água [ $kg.m^{-3}$ ]

## **Siglas**

AQS - Águas Quentes Sanitárias

CSV - Comma-Separated Values

DEM - Departamento de Engenharia Mecânica

GND - Ground

GPU - Graphics Processing Unit

HDMI - High Definition Multimedia Interface

I2C - Inter-Integrated Circuit

IDE - Integrated Development Environment

IoT - Internet of Things.

JSON - JavaScript Object Notation

LCD – Liquid Crystal Display

PC - Personal Computer

SCL - Serial Clock Line

SDA - Serial Data Line

USB - Universal Serial Bus

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

As energias renováveis estão progressivamente mais presentes na sociedade mundial. Estas surgem como solução para o aumento da escassez de recursos naturais de origem fóssil (U.S. Energy Information Administration, 2017) e consequente diminuição da poluição ambiental causada pelos mesmos recursos fósseis. Entre as fontes de energias renováveis, a energia solar tem particular interesse pelo seu potencial e pelos sistemas de energia solar serem cada vez mais acessíveis. Sendo maioritariamente utilizada para sistemas de energia solar fotovoltaica e para sistemas de energia solar térmica.

Os sistemas de energia solar térmica são processos cada vez mais utilizados mundialmente, quer seja no aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS), no aquecimento ambiente, no aquecimento de piscinas ou em aplicações industriais. No entanto, em Portugal o uso de sistemas solares térmicos ainda não é uma prática recorrente, sendo que em 2013 se estimava uma capacidade total de coletores de  $58,5 \text{ kW}_{th}$  por 1000 habitantes (Mauthner, Weiss e Spörk-Dür, 2015), o que comparado com outros países da Europa é baixo. Sendo Portugal um dos países da Europa com maior taxa de irradiação solar, como demonstrado na secção 2.3, tem todas as condições para aumentar o uso de sistemas de energia solar diminuindo assim a poluição ambiental. Mas para tal é necessário um desenvolvimento de novas tecnologias que viabilizem o investimento em sistemas solares e permitam aumentar a eficiência dos mesmos assim como aumentar o conhecimento da sociedade portuguesa sobre os sistemas. É nesse sentido que surge a realização deste projeto de tese de mestrado.

## 1.2. Objetivos

Os principais objetivos deste projeto passam pela remodelação e colocação em funcionamento de uma instalação solar térmica didática existente no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), que estava desativada há alguns anos e o desenvolvimento de um sistema de controlo e monitorização remoto para a instalação. Deste modo a instalação poderá ser utilizada como apoio à lecionação de aulas no DEM assim como, futuramente,

poder-se-á aplicar o sistema de monitorização e controlo em ambientes domésticos ou industriais.

### **1.3. Metodologia**

A realização deste projeto passou por diversas fases. Inicialmente foi feito o diagnóstico da instalação e dos diferentes componentes, de seguida foram feitas as reparações e substituições que se acharam pertinentes. Posteriormente procedeu-se à programação dos novos sensores e dispositivos eletrónicos. Foi testado o circuito hidráulico com os novos componentes e adicionados os novos sensores e dispositivos eletrónicos à instalação. Por último foram realizados os devidos testes à instalação.

### **1.4. Estrutura**

A dissertação está dividida em seis capítulos além da presente introdução, que aborda a necessidade de substituição das energias fósseis por energia renováveis, a aplicabilidade da energia solar e os sistemas solares em Portugal. Neste capítulo são ainda descritos os objetivos pretendidos com a realização desta dissertação e a estrutura da mesma.

No capítulo 2 é feita uma abordagem teórica à energia solar e ao potencial energético de Portugal.

No capítulo 3 são caracterizados os sistemas solares térmicos onde são abordados detalhes importantes para o trabalho desenvolvido.

No capítulo 4 é descrita a instalação solar térmica utilizada neste trabalho, apresentando todos os componentes presentes na mesma antes e depois do projeto.

No capítulo 5 é descrito todo o sistema de controlo e monitorização remota, caracterizando todo o hardware e software utilizado assim como a comunicação entre a instalação e o servidor. É também descrita a *interface* do utilizador utilizada para o controlo e monitorização da instalação.

No capítulo 6 são apresentados os testes realizados à instalação.

No capítulo 7 é abordada a aplicabilidade do sistema de controlo e monitorização remoto em sistemas solares térmicos domésticos e industriais.

No capítulo 8 apresentam-se as principais conclusões desta dissertação bem como algumas sugestões para trabalho futuro.

## 2. ENERGIA SOLAR

### 2.1. Radiação Solar

O Sol é a principal fonte de energia para a vida na Terra. O diâmetro do Sol é de aproximadamente  $1,39 \times 10^9$  m, sendo a distância entre o Sol e a Terra cerca de  $1,5 \times 10^8$  km, o que corresponde a uma unidade astronómica. Cerca de 74% da massa do Sol é composta por Hidrogénio, 25% por Hélio e a restante massa por traços de elementos mais pesados. Tem uma temperatura superficial de cerca de 5778 K, o que lhe dá uma cor branca, mas devido à dispersão dos raios solares na atmosfera terrestre o Sol aparenta ser amarelo.

A energia que chega à Terra, proveniente do Sol através de ondas eletromagnéticas, é o resultado da fusão nuclear de átomos de Hidrogénio em Hélio. A radiação solar viaja à velocidade da luz no vácuo, a cerca de 300000 km/s, demorando 8 minutos e 20 segundos a atingir a superfície da Terra. Apenas uma pequena porção da energia emitida pelo Sol atinge a atmosfera terrestre. O fluxo de energia que chega à atmosfera terrestre, definido como constante solar é praticamente constante, tendo o valor de  $1367 \text{ W/m}^2$ . As pequenas variações do fluxo são o resultado da distância da Terra ao Sol, pelo que, durante o solstício de inverno a Terra está mais próxima do Sol e durante o solstício do verão, mais afastada do mesmo, o que se deve ao facto da Terra rodar a um ângulo de cerca de  $23,5^\circ$ , entre o plano de órbita e o plano do Equador. Ao atravessar a atmosfera a intensidade da energia é reduzida devido a reflexões pela atmosfera, absorvida por moléculas de gases na atmosfera, pela difusão de *Rayleigh* (difusão através moléculas de ar) e difusão de Mie (difusão através de partículas de pó e contaminação do ar) (Roriz, 2010), fazendo com que apenas uma pequena parte atinja a superfície terrestre e desta uma parte é ainda refletida para o espaço, o albedo. No entanto a energia que atinge a superfície terrestre durante um quarto de hora é superior à energia utilizada, mundialmente, durante um ano.

A radiação global que atinge a superfície da Terra pode ser dividida em duas componentes, a radiação direta, que atinge a superfície diretamente a partir do Sol e a radiação difusa, que atinge a superfície após a dispersão causada pelas moléculas e partículas

presentes na atmosfera e que também inclui a reflexão causada pela superfície terrestre. A radiação global é traduzida por:

$$E_{global} = E_{direta} + E_{difusa}. \quad (2.1)$$

A partir dos dados de radiação direta e difusa, obtidas através do *software SolTerm*, para a cidade de Coimbra, é possível constatar que a radiação direta é a principal responsável pela variação da radiação global ao longo do ano. Devido à menor quantidade de nuvens nos meses de Verão, a radiação direta é maior que a radiação difusa neste período, no entanto durante os meses de inverno, em que existe maior quantidade de nuvens, essa diferença diminui, como se pode constatar na Figura 2.1.

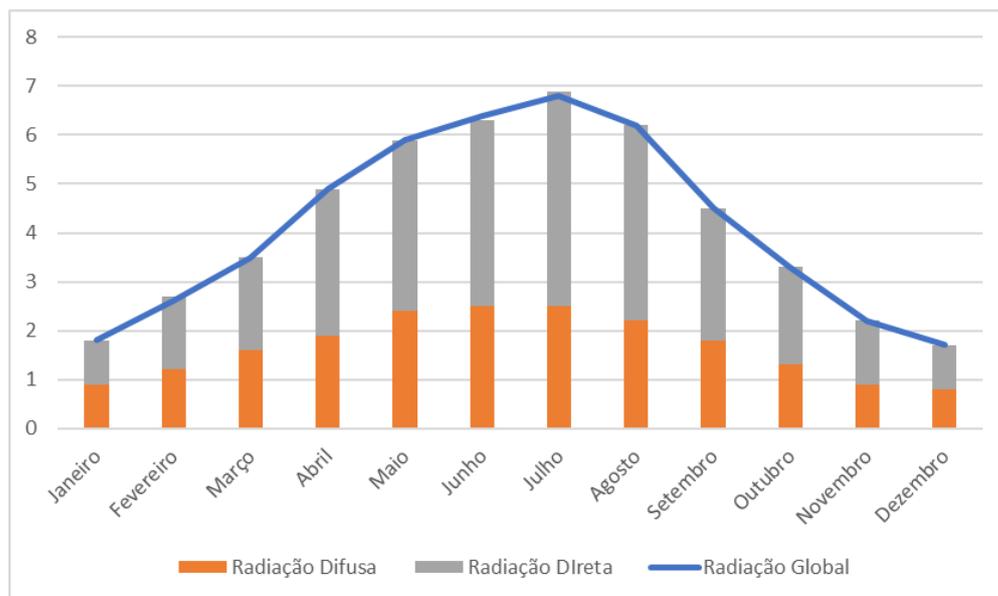


Figura 2.1. Irradiação solar diária mensal em Coimbra ( $kWh/m^2$ ).

## 2.2. Distribuição Espectral da Radiação

A distribuição espectral da radiação solar que chega à superfície terrestre está representada na Figura 2.2. Esta pode ser dividida em três zonas diferentes, consoante o comprimento de onda. A zona da radiação ultravioleta, corresponde à radiação solar com comprimento de onda inferior a  $0,4 \mu m$ . A zona da radiação visível, corresponde à zona onde

o comprimento de onda está compreendido entre os  $0,4 \mu\text{m}$  e os  $0,8 \mu\text{m}$ . Por último a zona onde a radiação solar possui comprimento de onda acima de  $0,8 \mu\text{m}$  denomina-se zona infravermelha.

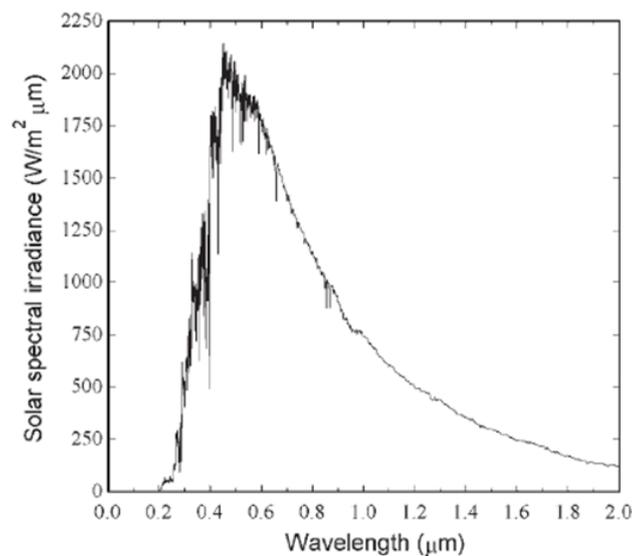


Figura 2.2. Distribuição espectral da radiação solar (Duffie, 2003).

### 2.3. Disponibilidade Energética em Portugal

Um dos fatores mais importantes no aproveitamento de energia solar é o nível de irradiação global conseguido numa determinada superfície, sendo este parâmetro muito dependente da localização da instalação. Na Figura 2.3 pode-se observar a distribuição europeia da irradiação global. Constata-se que Portugal é um dos países da Europa com maior potencial para aproveitamento da energia solar. No que diz respeito a Portugal, as regiões mais a Sul têm maior potencial para o aproveitamento da energia solar em relação às regiões mais a Norte, sendo essa diferença pouco acentuada.

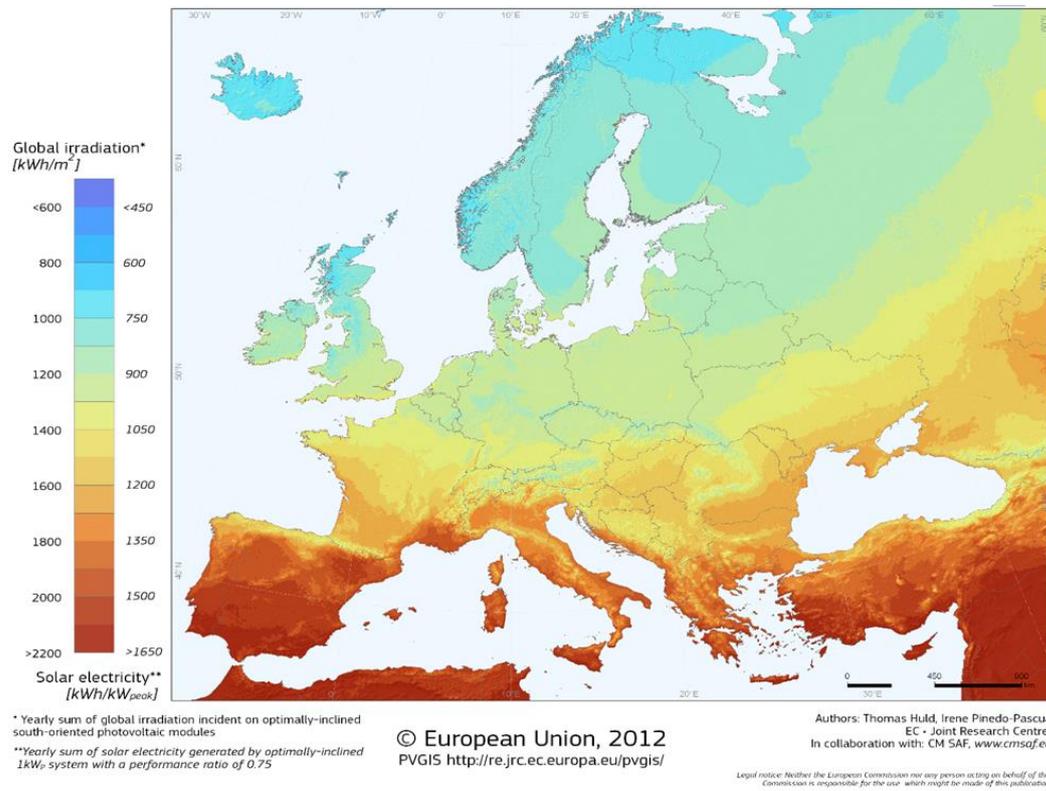


Figura 2.3. Distribuição da radiação solar na Europa ((PVGIS) European Commission).

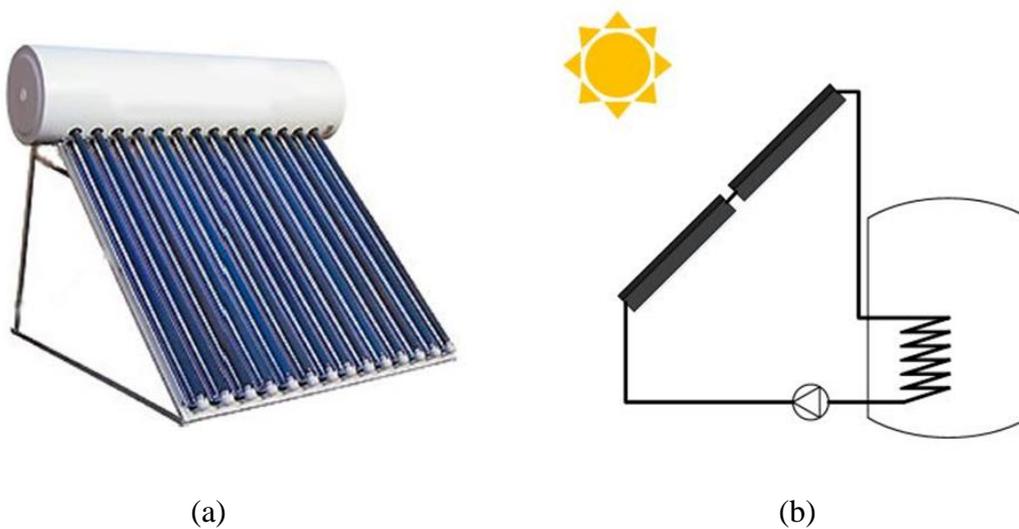
### 3. SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS

Um sistema solar térmico tem como objetivo converter a energia solar em energia térmica utilizando como principal elemento o coletor solar térmico. A energia térmica pode ser aproveitada para aquecer um fluido de trabalho. Essa conversão de energia é baseada no efeito de estufa, pelo que a radiação solar, com um baixo comprimento de onda, atravessa o vidro do coletor, transferindo o calor para o fluido térmico que circula nas tubagens da caixa do coletor.

Um coletor solar é uma caixa fechada, envidraçada na face superior e bem isolada termicamente nas outras faces, dentro da qual existe uma placa absorvedora (geralmente feita de cobre mas podem ser usados outros materiais bons condutores de calor) em contacto com um fluido transportador da energia térmica (geralmente água, mas também pode ser ar ou outros fluidos) que transforma a energia solar em energia térmica, utilizando a radiação solar para o aquecimento de água, através de trocas de calor.

Uma instalação solar térmica pode ser direta ou indireta, dependendo se o circuito é aberto ou fechado, respetivamente. No caso de o circuito ser aberto, o fluido que circula nos coletores é o mesmo que se utiliza para o consumo (água potável); no caso de um circuito fechado o fluido que circula nos coletores nunca entra em contacto com a água do depósito, transferindo o calor para a água potável através de um permutador de calor.

O tipo de circulação das instalações pode ser classificado de duas formas: sistema de termossifão, apresentado na Figura 3.1 (a), ou sistema de circulação forçada representado na Figura 3.1 (b). Nos sistemas de termossifão, o fluido circula de forma natural por convecção térmica, devido à diferença de densidades entre a água quente e a água fria. Sendo a água quente menos densa que a água fria a circulação ocorre de baixo para cima, o que obriga a colocar os depósitos de acumulação por cima dos coletores. Num sistema de circulação forçada, o fluido circula por um meio mecânico auxiliar, uma bomba de circulação.



**Figura 3.1.** (a) Sistema de termossifão (Kalogirou, 2014); (b) Sistema de circulação forçada.

### 3.1. Componentes de uma instalação solar térmica

Um sistema solar térmico é constituído por diversos componentes fundamentais ao seu funcionamento tais como o coletor, o permutador de calor e depósito de acumulação, sendo estes elementos comuns aos sistemas de circulação natural e de circulação forçada. Os sistemas de circulação forçada são ainda constituídos por uma bomba de circulação e um controlador.

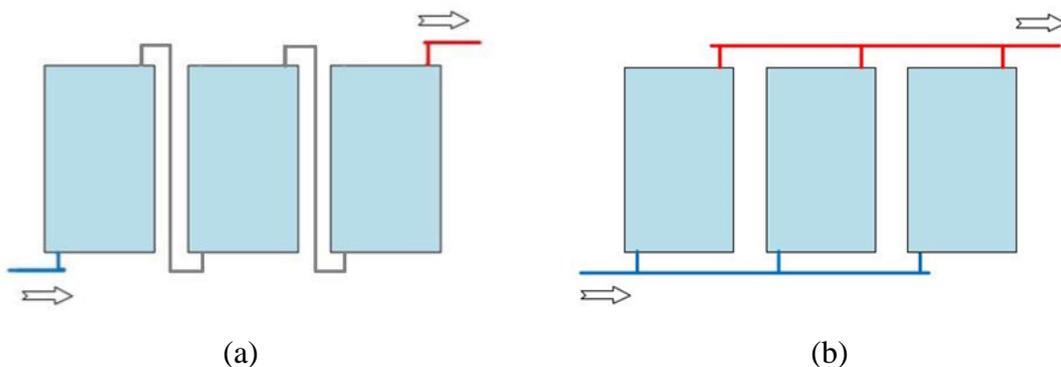
#### 3.1.1. Coletores solares

Os coletores solares são o componente mais importante de um sistema solar térmico. São responsáveis por captar a máxima energia solar possível, convertê-la em calor e transmiti-la para o fluido térmico com as mínimas perdas térmicas possíveis. O fluido térmico é usualmente composto por uma mistura de água e anticongelante, designado por glicol, que serve para proteger os coletores do perigo de congelamento. O elemento mais importante de um coletor é a placa absorvedora, responsável pela absorção da radiação solar e transferência da energia térmica para o fluido térmico que circula nos tubos adjacentes à placa e que por sua vez estão ligados ao permutador de calor. A placa absorvedora deve ter um comportamento seletivo, ou seja, uma elevada capacidade de absorção nos baixos comprimentos de onda para maximizar a captação de energia solar e menor emissividade

possível na banda da radiação térmica de baixa temperatura. De modo a diminuir as perdas de calor para o exterior, os coletores solares térmicos têm, geralmente, algum tipo de isolamento térmico e uma proteção transparente na superfície que recebe a radiação.

Além da irradiação solar, apresentada no Capítulo 2.1, outros fatores como a orientação e a inclinação do coletor, a qualidade de construção e a existência de sombreamentos, também influenciam a capacidade de captar energia solar de uma instalação.

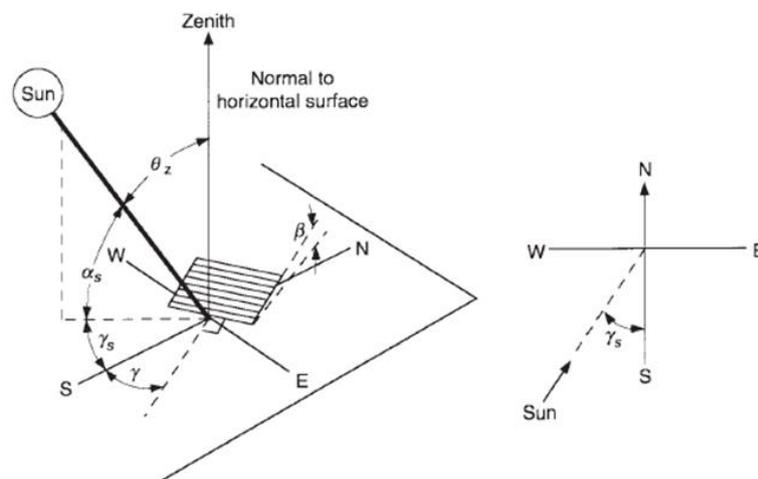
Uma instalação solar térmica pode ser composta por um ou mais coletores, sendo que para dois ou mais coletores a ligação pode ser em série ou em paralelo. No caso de ligação em série, representada na Figura 3.2 (a), apesar da facilidade e baixo de custo da instalação, comparativamente à ligação em paralelo, o rendimento total da instalação será menor, visto que a perda de carga total será igual à soma da perda de carga de cada painel, enquanto que na ligação em paralelo, representada na Figura 3.2 (b) em que cada painel trabalhará de forma independente, o rendimento será maior, visto que, sendo os painéis todos iguais e com o mesmo rendimento, a perda de carga total do sistema será igual à perda de carga de um painel, (Luis F. Roriz, 2010).



**Figura 3.2.** Tipos de ligação: (a) Ligação em série; (b) Ligação em paralelo.

Na Figura 3.3 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** está esquematizado o posicionamento de um coletor solar em relação ao Sol. Os principais ângulos, identificados na figura, são:

- Inclinação do coletor  $\beta$  – Ângulo que o coletor faz com o plano horizontal, sendo 0 para painéis horizontais e  $+90^\circ$  para painéis verticais.
- Altura solar  $\alpha_s$  – Ângulo entre a radiação solar direta e o plano horizontal, é o complementar do ângulo zenital.
- Ângulo zenital  $\theta_z$  – Ângulo entre a radiação solar direta e o plano vertical, é o complementar da altura solar.
- Azimute solar  $\gamma_s$  – Ângulo entre a direção Sul e a projeção da radiação solar direta no plano horizontal.
- Azimute do coletor  $\gamma$  – Ângulo entre a direção Sul e a projeção da normal ao coletor.



**Figura 3.3.** Ângulos formados entre o Sol e um coletor solar (Duffie, 2003).

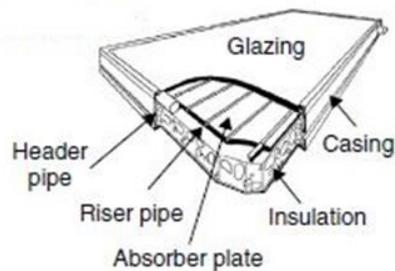
Existem diversos tipos de coletores disponíveis no mercado, dependendo do fim para o qual será utilizado e das temperaturas que se pretende atingir. Os coletores mais comuns são os coletores sem cobertura, os coletores planos, os coletores parabólicos compostos (CPCs) e os coletores de vácuo.

### **Coletores sem cobertura**

Este tipo de coletores é frequentemente constituído apenas por um conjunto de tubos flexíveis, geralmente em material plástico de cor preta (podendo também ser de metal), ligados em paralelo, pelo que devido à sua simplicidade de construção, estes são mais acessíveis. Por não possuírem cobertura, e conseqüentemente terem elevadas perdas térmicas este tipo de coletores não consegue atingir altas temperaturas. Todavia se se pretender temperaturas baixas, próximas da temperatura ambiente, estes apresentam baixas perdas térmicas e alta eficiência, razão pela qual este tipo de coletor é utilizado para o aquecimento de piscinas.

### **Coletores planos**

Os coletores planos são o tipo de coletor mais utilizado. Este permite atingir baixas e médias temperaturas, entre 40 a 110°C, e utilizam tanto a radiação solar direta como a difusa. A maioria dos coletores planos, tal como o coletor apresentado na Figura 3.4, consiste essencialmente numa caixa retangular plana com uma placa absorvedora de metal, uma cobertura transparente na parte superior, a tubagem interna soldada à placa absorvedora, e as ligações para unir o coletor ao circuito solar. A tubagem pode ser em serpentina (constituída por um só tubo), ou em harpa, com vários tubos ligados em paralelo. Quanto à placa absorvedora, esta pode ter uma maior ou menor eficiência, que, por consequência, irá afetar a eficiência do sistema. Dependendo do tipo de revestimento, a placa pode ter maior capacidade de absorção da radiação solar e menor emissividade nos comprimentos de onda da radiação térmica. Um revestimento seletivo, como o cromo-preto ou níquel-preto, garante maior eficiência do que um revestimento de pintura preto-baço, contudo os revestimentos com melhores características óticas são os revestimentos por deposição física de TiNO<sub>x</sub> (*Energia Solar Térmica*, 2011). Existem diversos modelos de placas absorvedoras, desde chapa moldada, de tubos prensados, de tubos soldados, processo *roll-bond*, entres outros. A cobertura transparente é outro componente dos coletores planos que influencia a eficiência do sistema: esta deve possuir características óticas que garantam uma elevada transmissão de luz e uma baixa reflexão. A cobertura pode ser de plástico ou de vidro, sendo que os vidros seletivos com tratamento antirreflexo são os que apresentam melhores características óticas. Para reduzir as perdas de calor para o ambiente através de condução térmica, o coletor é ainda constituído por uma camada de isolamento entre a caixa e a placa absorvedora, sendo a lã de rocha e a lã de vidro os isolamentos mais utilizados.

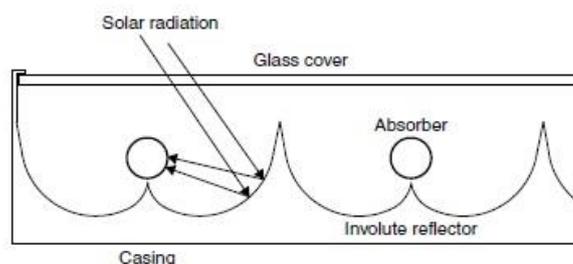


**Figura 3.4.** Coletor plano (Kalogirou, 2014).

Estes tipos de coletores podem ser classificados como coletores de baixa temperatura, quando se pretende água na ordem dos 60°C, sendo utilizados em sistemas de aquecimento solar de AQS ou como coletores solares de média temperatura, para temperaturas entre os 80 e os 100°C, que têm como finalidade a produção de AQS assim como o aquecimento ambiente.

### **Coletores parabólicos compostos (CPCs)**

Este tipo de coletores, tal como o nome indica, são constituídos por uma superfície parabólica que reflete a radiação solar para uma zona tubular, na qual circula o fluido térmico, como representado na Figura 3.5. Com este tipo de coletores a área de captação da radiação solar é superior à área de absorção, o que permite diminuir as perdas térmicas, aumentando assim a eficiência do sistema. Estes operam no intervalo de temperatura entre 80 e 110°C e, tal como os coletores planos, são usualmente utilizados no aquecimento de AQS e no aquecimento ambiente.

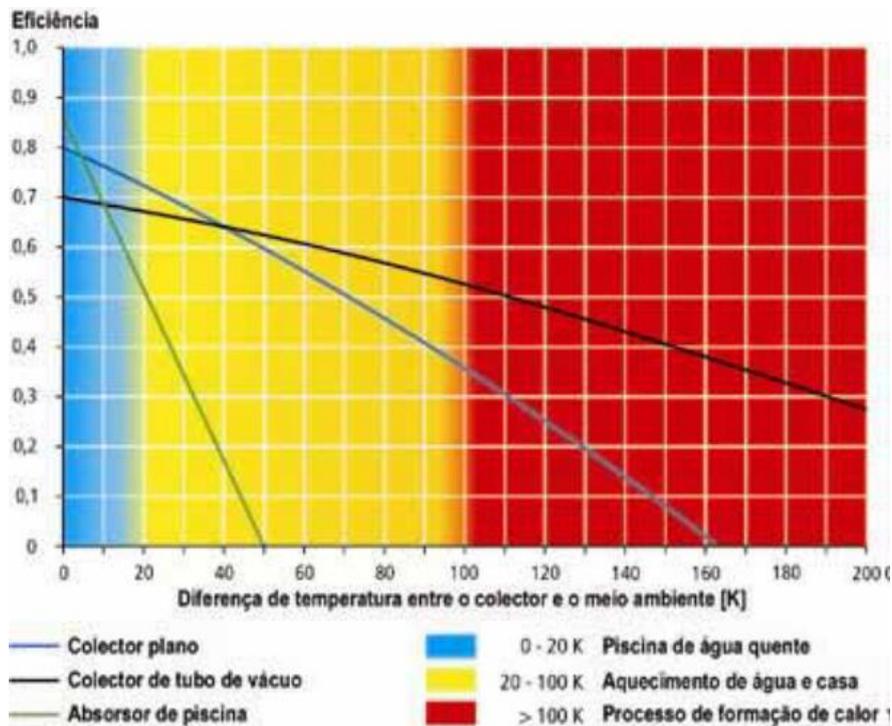


**Figura 3.5.** Coletor parabólico composto (Kalogirou, 2014).

### **Coletores de tubos de vácuo**

Nos coletores de tubos de vácuo, o fluido térmico circula no espaço interior de dois tubos concêntricos. Entre os tubos existe vácuo para reduzir as perdas de calor térmico para o ambiente, eliminando as perdas de calor por convecção. Este tipo de coletores é constituído por diversos tubos que estão ligados entre si e podem ser de dois tipos, coletor de vácuo de fluxo direto ou coletor de vácuo com separação de fluidos. No primeiro tipo o fluido térmico que circula no interior dos tubos de vácuo é o mesmo que circula no restante circuito hidráulico. No segundo caso, cada tubo de vácuo tem no seu interior um tubo de calor, no qual circula um fluido que não está em contacto direto com o fluido que circula no restante sistema solar térmico. Dentro do tubo de calor o fluido térmico absorve calor da radiação solar, é vaporizado e o vapor sobe para a parte superior. Depois troca calor num permutador com o fluido do circuito principal, condensa e volta a descer para a parte inferior. Este tipo de coletores tem de ser instalado sempre com uma inclinação mínima.

Na Figura 3.6 estão apresentadas as curvas típicas de eficiência dos diferentes coletores. Observando a figura pode-se concluir que para o aquecimento de piscinas os coletores sem cobertura (absorvedor de piscina) são os mais aconselhados. Para o aquecimento de águas sanitárias e aquecimento central da habitação os coletores que garantem maior eficiência são os coletores planos ou os de tubo de vácuo, no entanto devido ao custo elevado coletores de tubos de vácuo os coletores planos são os mais aconselhados. Por fim para aplicações onde sejam necessárias temperaturas mais elevadas, por exemplo para arrefecimento com energia solar, os coletores de tubo de vácuo são os mais indicados.



**Figura 3.6.** Curvas típicas de eficiência dos coletores (*Energia Solar Térmica - manual sobre tecnologias projecto e instalação*).

### 3.1.2. Depósito de acumulação

As necessidades de água quente, quer seja para AQS quer para o aquecimento ambiente, nem sempre coincidem com a altura em que a energia é fornecida pelo sol, e como tal é necessária a utilização de um depósito de acumulação. Este serve para armazenar a energia captada ao longo do dia sob a forma de água quente. Em sistemas de termossifão, o depósito está acoplado ao coletor (ou seja, está localizado no exterior da habitação), e nos sistemas de circulação forçada, o depósito está afastado dos coletores, estando geralmente localizado no interior dos edifícios. Estes reservatórios devem ser dimensionados para dar resposta às necessidades diárias de água quente, pelo que o número de coletores solares utilizados deve ser o adequado para evitar o desperdício de calor durante períodos de forte insolação e minimizar a energia que o sistema de apoio tem de fornecer quando a energia solar não é suficiente.

O material dos reservatórios pode ser se aço inoxidável, aço esmaltado ou aço com revestimento de plástico. Existem duas geometrias para os depósitos de acumulação: podem ser verticais ou horizontais, no entanto os depósitos verticais são a solução que garante maior

eficiência térmica visto favorecerem o efeito de estratificação térmica, no qual a água quente (menos densa) se acumula na parte superior do depósito, e a água fria (mais densa) se acumula na parte inferior do depósito. Outra forma de favorecer a estratificação térmica, nos depósitos de acumulação, é a extração da água quente (AQS) ser feita na parte superior do depósito e a reposição de água fria na parte inferior do depósito, tal como representado na Figura 3.7.

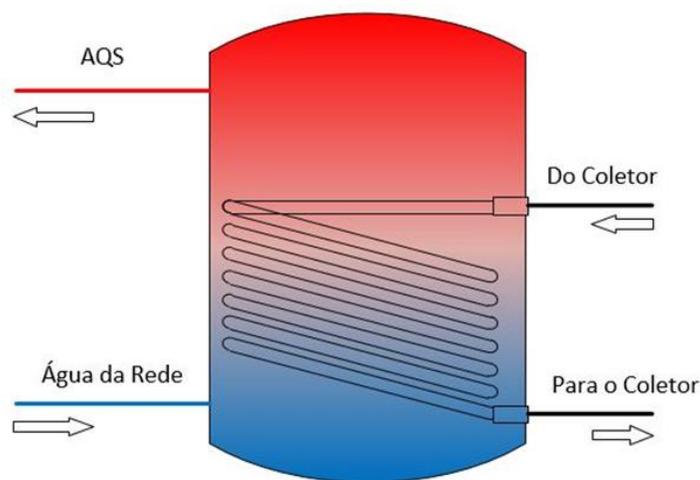


Figura 3.7. Estratificação térmica.

### 3.1.3. Permutador de calor

O permutador de calor, que serve para transmitir o calor do fluido térmico que circula no circuito solar para o depósito de acumulação, pode estar dentro ou fora do reservatório. No caso de estar dentro do depósito de acumulação, trata-se de um permutador de calor interno do tipo serpentina, e no caso de estar fora do depósito de acumulação, trata-se de um permutador de calor externo. Os permutadores de calor internos podem ser “tubulares com alhetas” ou “tubulares lisos” e, de forma a favorecer a estratificação térmica, estes devem ser instalados na vertical, sendo a entrada de água na serpentina da parte superior e a saída na parte inferior. Quanto aos permutadores de calor externos, estes podem ser de placas ou tubulares. Apesar de terem um valor de mercado superior aos permutadores de calor internos, a transferência de calor é mais elevada.

### **3.1.4. Bomba de circulação**

Quando se utiliza um sistema de circulação forçada é necessário utilizar uma bomba de circulação para efetuar a movimentação da água, sendo que em instalações solares geralmente é usado uma bomba centrífuga. Estas devem ser dimensionadas em função do caudal volumétrico e da perda de carga do circuito.

### **3.1.5. Tubagens**

A tubagem é o componente que faz a ligação entre os coletores e o depósito de acumulação, sendo o cobre o material mais utilizado para nas mesmas, devido à facilidade de construção da instalação (maleabilidade e ductilidade permitem uma cómoda manipulação).

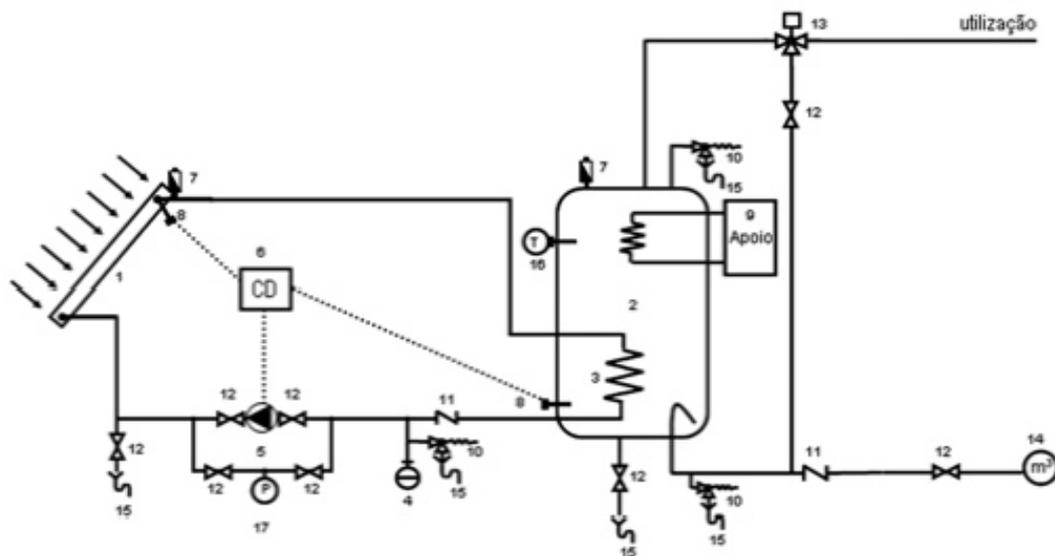
### **3.1.6. Outros componentes**

As instalações solares são ainda compostas por outros componentes, indispensáveis para o bom funcionamento das mesmas, tais como o vaso de expansão, que serve para compensar a dilatação do fluído térmico aquando do aumento de temperatura do mesmo, purgadores de ar, que servem para evacuar algum ar que se possa estar misturado com o fluído térmico, válvulas de segurança, que abrem quando a pressão de regulação é excedida, protegendo o circuito solar do efeito destruidor de sobrepressões. Os sistemas podem ainda incluir um medidor de caudal, que serve para medir o fluxo volumétrico do fluído térmico, manómetros e termómetros para monitorização do funcionamento da instalação.

### **3.1.7. Controlador solar**

Os sistemas de circulação forçada têm um controlador solar, que é o cérebro da instalação. Nos sistemas básicos este serve para ligar ou desligar a bomba de circulação em função da diferença de temperatura entre o depósito de acumulação e a saída dos coletores. Essa diferença de temperatura é medida utilizando sensores de temperatura. Nos sistemas mais complexos o controlador solar pode ainda medir o tempo de operação, a quantidade de calor, ou ainda fazendo interface com um computador, efetuar o controlo remoto assim como o diagnóstico à distância.

Na Figura 3.8 está representado o esquema de princípio de um sistema solar térmico de circulação forçada.



1\_colector solar; 2\_deposito de acumulaco; 3\_permutador de calor; 4\_vaso de expanso; 5\_bomba circuladora; 6\_comando diferencial; 7\_purgador de ar; 8\_sonda de temperatura; 9\_energia de apoio; 10\_valvula de seguranca; 11\_valvula de reteno; 12\_valvula de passagem; 13\_valvula misturadora; 14\_contador de agua; 15\_esgoto sifonado; 16\_termometro; 17\_manometro

**Figura 3.8.** Esquema de princpio (AQSpP/DGGE, 2004).



## 4. INSTALAÇÃO SOLAR TÉRMICA

A instalação solar térmica em estudo é uma instalação solar didática de circuito fechado e de circulação forçada, comercializada pela empresa italiana *ISI Impianti S.P.A.* A instalação encontra-se no Laboratório de Climatização do DEM, não tendo sido utilizada desde há vários anos e, visto não ter tido manutenção, alguns dos seus componentes apresentavam alguma deterioração. No entanto, num panorama geral, a instalação estava em bom estado.

Neste capítulo irão ser enumerados e descritos todos os componentes da instalação, anteriores e posteriores à remodelação da mesma. Doravante os componentes anteriores à remodelação e posteriores à mesma serão classificados como pré-existentes e adicionados, respetivamente.

### 4.1. Componentes pré-existentes

Inicialmente a instalação já possuía: dois coletores solares, uma bomba de circulação, um depósito de acumulação com apoio por resistência elétrica, um vaso de expansão, um manómetro, uma válvula de segurança, diversas válvulas de seccionamento, um purgador de ar, um rotâmetro, uma válvula de regulação de caudal, dois sensores de temperatura e um sistema de controlo.

#### 4.1.1. Coletores solares

A instalação é composta por dois coletores solares, apresentados na Figura 4.1. São coletores planos constituídos por uma placa absorvedora do tipo *roll-bond* de alumínio, obtida através da união a alta pressão de duas chapas planas (Peuser, 2005) deixando um circuito de canais paralelos impresso no seu interior, no qual circula o fluido térmico. Cada um dos coletores dispõe de uma área bruta de  $0,65 \text{ m}^2$  e uma área de abertura de  $0,5 \text{ m}^2$ , igual à área de absorção. As caixas dos coletores são de alumínio, a cobertura de vidro e o isolamento é poliuretano.



**Figura 4.1.** Coletores solares.

A ligação dos coletores pode ser efetuada tanto em paralelo como em série, dependendo da posição das válvulas apresentadas na Figura 4.2. Se a válvula 2 estiver aberta e as válvulas 1 e 3 estiverem fechadas, os coletores estão ligados em série. Se pelo contrário as válvulas 1 e 3 estiverem abertas e a válvula 2 fechada, os coletores estão ligados em paralelo. No APÊNDICE está esquematizado o modo como se liga os coletores em série ou em paralelo.



Figura 4.2. Ligação em série ou em paralelo dos coletores.

#### 4.1.2. Bomba de circulação

A circulação da água no circuito solar é realizada através de uma bomba de circulação da marca *Lowara*, modelo NPMB10, apresentada na Figura 4.3. Tem um caudal máximo de  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ , uma altura manométrica máxima de  $7,5 \text{ m}$ , sendo que, manualmente, é possível variar a velocidade de rotação entre  $1600$  e  $2600 \text{ rpm}$ , com 5 níveis de velocidade disponíveis. Constatou-se que a bomba está sobredimensionada para a instalação, no entanto como era a bomba que já estava na instalação optou-se por continuar a utilizar.



**Figura 4.3.** Bomba de circulação.

#### **4.1.3. Depósito de acumulação**

O depósito de acumulação, apresentado na Figura 4.4, é um depósito convencional, da marca *LAMETAL S.P.A.*, de 50 litros, , contendo no seu interior um permutador de calor ligado ao circuito solar e ainda uma resistência elétrica de 1200 *W*, que serve como sistema de apoio interior. Dispõe ainda de ligações exteriores à serpentina que permite a ligação de um sistema de apoio exterior.



**Figura 4.4.** Depósito de acumulação.

#### 4.1.4. Vaso de expansão

O vaso de expansão existente na instalação é da marca Zilmet, com uma capacidade de 8 *litros* e uma pressão máxima de 5 *bar*. Tem como finalidade absorver as dilatações e contrações do fluido térmico, para que a pressão se mantenha constante no circuito solar. A pressão a que o vaso de expansão deve estar sujeito durante o funcionamento da instalação pode ser calculada da seguinte forma, (Roriz, 2010):

$$p_e = p_{SV} - A_{SV}. \quad (4.1)$$

Onde  $p_{SV}$  é a pressão de abertura da válvula de segurança e pode ser calculado segundo:

$$p_{SV} \geq p_0 + 1,5 \text{ se } p_{SV} \leq 5 \text{ bar}. \quad (4.2)$$

$A_{SV}$  é o valor de histerese da válvula de segurança que pode ser obtido por:

$$A_{SV} = 0,5 \text{ bar se } p_{SV} \leq 5 \text{ bar}. \quad (4.3)$$

O valor da pressão de controlo,  $p_0$  é calculado segundo a seguinte equação:

$$p_0 = \frac{H_{ST}}{10} + p_{vap} + 0,3. \quad (4.4)$$

Onde  $H_{ST}$  é o desnível (em metros) entre o topo da instalação e o ponto onde o vaso de expansão está montado e  $p_{vap}$  é a pressão de saturação da água à temperatura de cálculo.

Tendo-se chegado ao valor de 1,5 *bar* para a pressão de funcionamento do vaso de expansão.



Figura 4.5. Vaso de expansão.

#### **4.1.5. Manómetro e válvula de segurança**

Existe também um manómetro, instalado à entrada da bomba, e uma válvula de segurança com uma pressão de abertura de 2,5 *bar*, que serve para proteger os equipamentos de sobrepensões.

#### **4.1.6. Válvulas de seccionamento**

Além das válvulas de seccionamento junto aos coletores, descritas na secção 4.1.1. Na entrada de água da rede do depósito e na entrada de água no circuito solar existiam válvulas de seccionamento. Apenas se manteve a válvula na entrada do depósito de acumulação. A válvula do circuito solar foi substituída por uma válvula maior, para facilitar o seu manuseamento. Na saída de água quente do depósito de acumulação também existia uma válvula de seccionamento, mas foi substituída por uma válvula solenoide, para se poder controlar remotamente.

#### **4.1.7. Válvula de regulação de caudal**

O circuito solar dispunha de uma válvula de regulação de caudal entre a bomba de circulação e o rotâmetro, usada para regular o caudal de água. Essa válvula, colocada à saída da bomba, foi mantida após a remodelação do sistema solar.

#### **4.1.8. Tubagens**

A instalação é constituída por diversos tipos de tubagem, tendo aço galvanizado entre a saída da serpentina do depósito de acumulação e a válvula reguladora de caudal e ainda entre as ligações dos coletores, sendo que entre os coletores o tubo está revestido com isolamento. Entre o rotâmetro e a entrada do fluído térmico nos coletores solares e entre a saída dos coletores e a entrada no depósito de acumulação existe mangueira flexível com isolamento. Por fim foi adicionado tubo multicamada com isolamento entre a válvula de três vias e o tê junto ao rotâmetro e mangueira flexível com isolamento entre a válvula de três vias e o tê junto ao rotâmetro no qual está ligado o caudalímetro.

referência não foi encontrada.



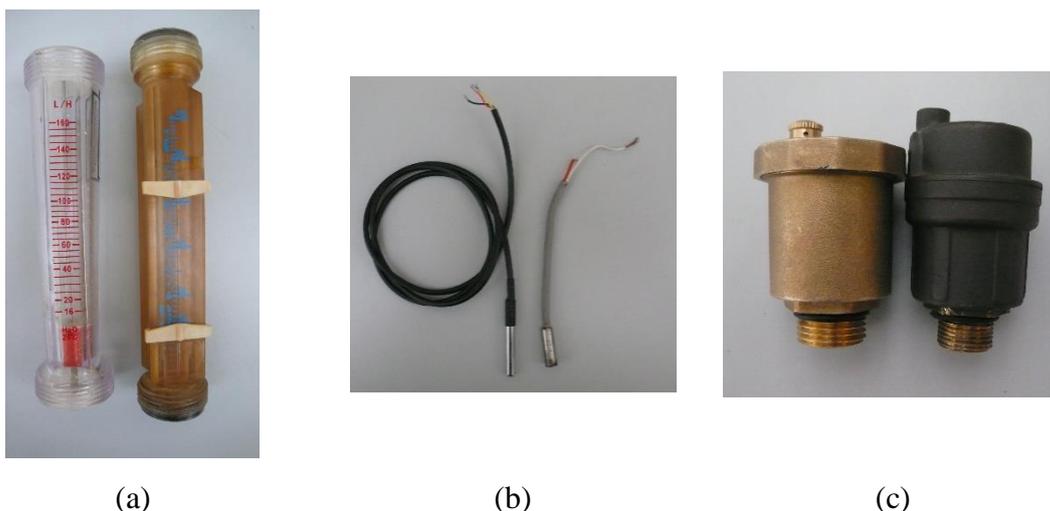
Figura 4.6. Tubagens da instalação.

Tabela 4.1. Legenda da Figura 4.6

|   |  |
|---|--|
| 1 | Tubo de aço galvanizado                |
| 2 | Tubo de aço galvanizado com isolamento |
| 3 | Mangueira flexível com isolamento      |
| 4 | Tubo de multicamada com isolamento     |

## 4.2. Componentes substituídos e adicionados

Dos componentes existentes na instalação foi necessário proceder à substituição do rotâmetro, do purgador de ar e dos sensores de temperatura, devido às condições de desgaste que estes apresentavam, como é possível observar na Figura 4.7. O rotâmetro é utilizado para consultar o caudal do circuito solar e este apresenta uma escala de medição de 16 a 160l/h e uma temperatura de trabalho de 0 a 60°C. O purgador de ar está localizado à saída dos coletores, que é o ponto mais alto do sistema e tem como finalidade a saída de ar que se acumula no topo da instalação. Quanto ao sensor de temperatura este está apresentado no capítulo 5.1. Procedeu-se também à substituição do controlador solar, por um sistema mais moderno, de modo a possibilitar o controlo e monitorização remotamente.



**Figura 4.7.** Componentes substituídos e componentes novos: (a) Rotâmetros; (b) Sensores de temperatura; (c) Purgadores de ar.

Foi adicionado um filtro de água em Y ao circuito solar, apresentado na Figura 4.8, de modo a proteger os equipamentos contra as impurezas presentes no circuito, e foi também adicionada uma válvula manual de três vias manual entre o filtro e o rotâmetro. Esta foi adicionada de forma a possibilitar o desvio do curso da água, podendo este passar pelo caudalímetro e depois para o rotâmetro ou diretamente para o rotâmetro.



Figura 4.8. Filtro em Y.

### 4.3. Sensores e componentes eletrônicos adicionados

Em relação aos componentes relacionados com o sistema de controlo e monitorização foram adicionados diversos sensores e outros elementos, de forma a tornar a instalação mais moderna e também de forma a poder ser utilizada com fins didáticos.

Tal como foi dito anteriormente, foram substituídos e adicionados 4 novos sensores de temperatura, de forma a medir a temperatura da água à entrada dos coletores, à saída dos coletores, no depósito de acumulação e a temperatura ambiente.

Foram adicionados dois sensores de pressão, colocados um antes e o outro depois da bomba de circulação, para monitorizar o aumento de pressão na bomba de circulação quando esta está em funcionamento.

Apesar de já haver um rotâmetro no circuito solar a medir o caudal, foi adicionado um caudalímetro de forma a ser possível monitorizar o caudal de água no circuito solar remotamente, uma vez que com o rotâmetro apenas se podia consultar o caudal junto ao mesmo, através da escala do rotâmetro. Este caudalímetro foi colocado a jusante da bomba de circulação.

No quadro elétrico foi também adicionado um sensor para a medir a corrente elétrica consumida pela bomba.

Foi também adicionado uma válvula solenoide na saída de água quente do depósito de acumulação, de forma a simular os consumos de água quente, uma vez que com a válvula solenoide é possível permitir a descarga de água remotamente. Sendo a reposição da água feita através da ligação com uma mangueira da água da rede ao depósito. A ligação da mangueira à água da rede foi feita utilizando um redutor de pressão para um 1 *bar*.

Nos coletores foram adicionados um sensor de orientação e um de inclinação, de forma a poder-se consultar a direção para a qual os coletores estão orientados assim como a

inclinação dos mesmos. Juntos dos coletores solares foi também adicionado um fotodíodo de forma a medir a radiação solar incidente nos mesmos.

Por fim foi também adicionado um LCD ao painel de controlo, de forma a possibilitar a consulta, junto da instalação solar, alguns dados fornecidos pelos sensores adicionados.

Na Figura 4.9 estão identificados os diferentes sensores e componentes eletrónicos referidos e na Tabela 4.2 a respetiva legenda.



**Figura 4.9.** Sensores e componentes eletrónicos na instalação.

**Tabela 4.2.** Legenda da **Figura 4.9**

|    |   |
|----|---|
| 1  | Sensor de temperatura à saída dos coletores   |
| 2  | Relés de 5V e sensor de medição de corrente   |
| 3  | LCD   |
| 4  | Sensor de temperatura ambiente                |
| 5  | Sensor de pressão antes da bomba              |
| 6  | Sensor de temperatura à entrada dos coletores |
| 7  | Sensor de orientação                          |
| 8  | Sensor de pressão depois da bomba             |
| 9  | Caudalímetro                                  |
| 10 | Sensor de temperatura do reservatório         |
| 11 | Válvula solenoide                             |
| 12 | Fotodíodo e sensor de inclinação              |

No APÊNDICE A está esquematizado o fluxograma da instalação juntamente com os sensores que estão colocados no circuito solar.

## 5. SISTEMA DE CONTROLO E MONITORIZAÇÃO

O objetivo deste sistema é, utilizando diversos sensores e componentes, poder fazer o controlo e monitorização da instalação remotamente através de um smartphone, tablet ou computador. É possível efetuar o controlo remoto da bomba de circulação, da resistência elétrica presente no depósito de acumulação, e da válvula solenoide utilizada para simular os consumos de água quente. A monitorização remota inclui a leitura dos valores do caudal do circuito solar, da temperatura em diversos locais da instalação, da pressão do circuito solar e da inclinação, orientação e radiação incidente nos coletores.

Neste capítulo será descrito todo o hardware utilizado na instalação como os sensores e microcontroladores, e todo o software, incluindo a forma como a comunicação entre os sensores e o servidor é feita, e por fim será apresentada a interface de utilizador utilizado para controlar e monitorizar a instalação remotamente.

### 5.1. Hardware

#### i. Arduino Uno

O Arduino Uno é uma placa que utiliza o microcontrolador ATmega328P como microcontrolador que possui uma memória Flash de 32 KB. O Arduino é composto por 14 pinos digitais e 6 pinos analógicos que podem ser usados como entrada ou saída de dados, podendo também fornecer tensões de 3,3V a 5V e uma corrente máxima de 40 mA nos pinos de *input* e *output* e de 200 mA nos pinos VCC e GND. Dispõe de um cristal oscilador de 16MHz, responsável por sincronizar as operações do microcontrolador, de uma entrada USB, entrada de energia e um botão de *reset*. A programação do Arduino Uno é feita através da ligação a um computador e da utilização do software *Arduino IDE* utilizando C/C++ como linguagem de programação, podendo ser utilizado ligado ao computador através da porta USB, a uma bateria ou a um adaptador de 9V a 12V através da entrada de energia.

Utiliza-se um Arduino na instalação solar térmica, ao qual estão ligados todos os componentes anteriormente descritos e que também tem por função transmitir os dados, e existe outro Arduino junto do Raspberry Pi. A comunicação entre os dois Arduinos está descrita na secção 5.3.

## ii. Sensores de Temperatura

Para medir as temperaturas no fluido térmico foi utilizado o sensor DS18B20. Trata-se de um sensor de temperatura de termistor do tipo NTC, com saída digital e bainha protetora em aço inoxidável. Os sensores medem a temperatura do fluido térmico indiretamente, pois estão colocados numa bainha metálica, que por sua vez está em contacto com o fluido térmico.

Cada sensor possui o seu próprio endereço, e por essa razão os quatro sensores podem ser instalados utilizando apenas um pino digital do microcontrolador. Foi utilizado o protocolo de comunicação 1-Wire, desenvolvido pela *Dallas Semiconductor Corp* para transmitir os dados do sensor de temperatura para o microcontrolador. Os sensores apresentam ainda as seguintes características:

- Tensão de Operação: 3 a 5,5 V
- Intervalo de Medição de Temperatura: -55 a +125°C
- Precisão: +/- 0,5°C entre -10 e +85°C
- Ponta de aço inoxidável (6 x 50 mm), com cabo de 108 cm de comprimento

## iii. Sensores de Pressão

Para realizar as medições de pressão no circuito solar antes e depois da bomba são utilizados dois sensores de pressão SKU237545, que realizam medições na gama de 0 a 0,5 MPa (pressão relativa). Este tipo de sensor apresenta as seguintes características:

- Intervalo de pressão: 0 a 0,5 MPa
- Tensão de operação: 5 V
- Intervalo de Temperatura: 0 a 85°C
- Pressão Máxima: 1,5 MPa

## iv. Caudalímetro

Para efetuar as medições do caudal de água no circuito solar é utilizado um caudalímetro YF-B1 de latão com um intervalo de medição de 0,3 a 6 l/min. A medida que a velocidade do rotor do caudalímetro varia o sensor de efeito de Hall, existente no caudalímetro, transmite o sinal de pulso correspondente. A partir dos sinais de pulsos

transmitidos e sabendo que o sensor envia 4,5 pulsos por segundo por cada litro/minuto de caudal é possível calcular o caudal de água que atravessa o circuito solar. O caudalímetro apresenta as seguintes características:

- Intervalo de medição: 0,3 a 6 l/min (18 a 360 l/hour)
- Intervalo de temperatura: -25 a 80°C
- Pressão máxima: 1,75 Mpa
- Tensão de Operação: 5 V a 18 V)

#### **v. Sensor de Inclinação**

O sensor utilizado para medir a inclinação dos coletores solares é o sensor MPU-6050. Este sensor é composto por um acelerómetro e um giroscópio no mesmo chip, o que faz com que as medições sejam bastante exatas. O sensor utiliza a interface I2C para comunicar com o microcontrolador e como tem o seu próprio endereço pode partilhar o mesmo pino de entrada com outros sensores que também utilizem o protocolo I2C.

#### **vi. Sensor de Orientação**

Para saber qual a direção para a qual os coletores solares estão apontados é utilizado o sensor de orientação HMC5883L. Este sensor comporta-se como uma bússola digital de 3 eixos que utiliza a interface I2C para comunicação com o microcontrolador. Tal como outros componentes que utilizam o protocolo de comunicação I2C, este também dispõe do seu próprio endereço, podendo partilhar o mesmo pino em simultâneo com outros componentes utilizando o mesmo microcontrolador.

#### **vii. Válvula Solenoide**

Para se poder simular os consumos de água quente e simultaneamente os controlar remotamente é utilizada uma válvula solenoide de 220 V. Existem dois tipos de válvulas solenoides, as normalmente abertas e as normalmente fechadas, referindo-se à posição da válvula quando não existe corrente a atravessá-la. Para este caso é utilizada a normalmente fechada. Este tipo de válvula é composta por um eletroímã que abre a passagem quando é atravessado por corrente elétrica, deixando correr água, e quando não é atravessado por corrente elétrica, fecha a válvula, bloqueando a passagem de água. A passagem de corrente

pela válvula é controlada por um relé ligado ao microcontrolador. A válvula apresenta ainda as seguintes características:

- Tensão elétrica: 220 V
- Pressão: 0 a 0,8 MPa
- Temperatura máxima do fluido: 80°C
- Modo de operação: Normalmente Fechada

#### **viii. Sensor de Medição de Corrente**

O sensor utilizado para a medição da corrente da bomba de circulação de fluido térmico é o sensor de corrente ACS712. Este sensor, do tipo invasivo, que necessita de interromper a passagem de corrente elétrica para realizar a medição, utiliza o efeito de hall para detetar o campo magnético gerado pela corrente elétrica e transmitir a tensão correspondente. Permite realizar medições de corrente até 5A.

#### **ix. Fotodíodo**

Para medir a radiação solar incidente nos coletores é utilizado um fotodíodo de cabeça plana SFH203P. Os fotodíodos convertem a energia incidente em corrente elétrica, sendo esta gerada em função dos fotões absorvidos pelo fotodíodo. Para proteger o fotodíodo da degradação causada pela exposição solar direta, e ao mesmo tempo garantir que este mede a radiação num plano, construiu-se uma pequena caixa em plástico POM de cor preta, maquinada no torno mecânico, com uma tampa de 1 mm de espessura em NYLON branco, apresentada na Figura 5.1. O fotodíodo foi calibrado utilizando o piranómetro instalado na estação solar térmica presente no DEM. A curva de calibração e respetiva equação está apresentada no APÊNDICE C.



**Figura 5.1.** Caixa para proteger o fotodíodo.

#### x. LCD

Foi instalado um LCD de 20x4 caracteres de forma a ser possível visualizar alguns dados da instalação solar na própria instalação. A comunicação com o microcontrolador é feita utilizando o protocolo de comunicação I2C, sendo que como o LCD dispõe de um endereço individual este pode ser utilizado nos mesmos pinos do microcontrolador, juntamente com outros componentes que também utilizem o I2C. No LCD é possível consultar a temperatura à entrada e saída dos coletores, a temperatura no reservatório, a temperatura ambiente, a irradiação incidente e a inclinação dos coletores, como se pode observar na. Figura 5.2,



Figura 5.2. LCD.

#### xi. Relés

Foram instalados 3 relés com sinal de controlo de 5 V DC e com capacidade para ligar e desligar equipamentos de 230 V e até 10 A. para efetuar o controlo da bomba de circulação, da resistência elétrica do reservatório de acumulação e da válvula solenoide. Devido ao facto de os relés consumirem mais corrente do que a que pode ser fornecida pelo Arduino, as bobines dos relés foram alimentadas com um transformador externo com saída de 5 V, recebendo cada relé apenas o sinal digital do respetivo pino do Arduino para ligar e desligar.

De modo a assegurar a segurança da instalação, o relé ligado à bomba de circulação foi programado para se desligar, desligando assim a bomba de circulação, caso a temperatura no reservatório atinja os 70°C. O relé ligado à resistência elétrica foi também programado para se desligar, desligando a resistência elétrica, caso a temperatura do reservatório atinja os 40°C.

## **xii. Raspberry Pi**

O Raspberry Pi foi o hardware escolhido para servir de servidor para o software Node-RED, descrito no capítulo 5.2. Optou-se pela utilização do Raspberry Pi visto ser necessário mais do que um simples microcontrolador, pois este é um componente de tamanho reduzido e de baixo preço que ao mesmo tempo possui as capacidades de um computador mais simples, tornando-se o componente ideal para o projeto. Por estas razões o Raspberry Pi é um dos componentes mais utilizados para o desenvolvimento de projetos IoT. O Raspberry Pi é uma pequena placa de circuitos impressos que funciona como um computador, utilizando como sistema operativo o *Raspbian*, sistema operativo oficial da Fundação Raspberry, sendo que para a realização deste projeto apenas foi utilizado o modo texto, para programar em C. O Raspberry Pi utilizado foi o Raspberry Pi 1, modelo B+, este tem 512 MB de memória, uma porta Ethernet para ligar à rede, quatro portas USB, das quais uma foi utilizada para ligar ao teclado e outra para a comunicação com o microcontrolador, uma porta HDMI, para ligar ao monitor ou televisão e uma entrada Jack 3,5 mm para transmissão de áudio. O Raspberry dispõe de um chip Broadcom BCM2835, um processador ARM1176JZFS e uma unidade de processamento gráfico (GPU) Videocore IV.

## **xiii. HC-12**

O HC-12 é um módulo de comunicação sem fios que comunica através de frequência rádio, podendo ser utilizado em 100 canais diferentes, entre 433,4 MHz a 473,0 MHz e devido à antena, que dispõe, este tem um alcance de transmissão de 1km em campo aberto. Este módulo comunica através da interface Serial aquando da ligação ao microcontrolador. De modo a possibilitar a comunicação entre o microcontrolador junto da instalação e o microcontrolador ligado ao Raspberry Pi, utilizam-se dois módulos de comunicação sem fios HC-12, e desta forma a instalação não necessita de estar localizada junto ao Raspberry Pi.

No APÊNDICE B estão esquematizados todas as ligações entre os sensores e componentes referidos e o Arduino.

## 5.2. Software

### 5.2.1. Node-RED

O Node-RED é uma ferramenta de programação que prima pela facilidade de utilização. Utiliza uma abordagem de programação gráfica para o desenvolvimento de projetos IoT, sendo também possível criar funções em JavaScript dentro do editor, utilizando um editor de texto enriquecido (rich text editor). A elaboração de um projeto no Node-RED consiste na ligação entre blocos, previamente programados, chamados de nós, para a realização de determinadas tarefas. A utilização do Node-RED no projeto deveu-se ao facto de ser uma ferramenta bastante intuitiva e que não necessita de um conhecimento grande de programação para a utilização da mesma. O Node-RED é utilizado para a receção e transmissão de dados entre os microcontroladores, e para o desenvolvimento da interface de utilizador para o controlo e monitorização da instalação. Para a utilização do Node-RED é necessário ter o computador, tablet ou smartphone ligado à mesma rede que o Raspberry PI, e depois de saber o endereço IP do Raspberry PI, inserir o seguinte na barra de endereço de um navegador de Internet:

`http:// {endereço de IP do Raspberry PI} :1880/`

Para saber o endereço de IP do Raspberry Pi pode-se utilizar o comando: “hostname -I” na linha de comandos do mesmo.

### 5.2.2. WinSCP

WinSCP é o programa utilizado para descarregar o ficheiro de resultados (gerado pelo Node-RED) a partir do Raspberry Pi, para o computador pessoal. Para isso é necessário fazer uma ligação SSH entre o computador e o Raspberry PI e copiar o ficheiro CSV do Raspberry PI para o computador.

### 5.3. Sistema de comunicação

Na Figura 5.3 está representada a comunicação entre a instalação solar térmica e a *interface* de utilizador de utilizador do Node-RED. Esta é dividida em três fases: na primeira fase existe a comunicação entre os diferentes dispositivos presentes na instalação e o Arduino 1, através dos diferentes protocolos de comunicação que cada dispositivo dispõe, quer sejam dispositivos digitais, analógicos ou de I2C. Toda a informação recolhida pelo microcontrolador dos sensores de temperatura, dos sensores pressão, do caudalímetro, do fotodíodo, do sensor de corrente, da posição dos relés (ligado ou desligado), do sensor de orientação e do sensor de inclinação é agrupada no formato JSON, utilizando a biblioteca ArduinoJson e transmitida, por comunicação sem fios, para o Arduino 2 que está junto do Raspberry Pi, pela radiofrequência 433,4 MHz, utilizando os dispositivos HC-12, sendo esta a segunda fase da comunicação. Por fim, a terceira fase dá-se quando o Arduino 2 transmite a informação recebida do Arduino1 para o Raspberry Pi através da ligação Serial entre a entrada USB tipo B do Arduino e a entrada USB tipo A do Raspberry PI. Essa informação é recolhida pelo software Node-RED, instalado no Raspberry PI, e transmitida para a interface de utilizador. A transmissão da informação da interface de utilizador para a instalação, que consiste em ligar ou desligar os relés utilizados para ligar ou desligar a bomba de circulação, a resistência elétrica e a válvula elétrica é feita da mesma forma que a informação é passada entre a instalação e a interface de utilizador. Trata-se assim de um sistema recíproco de transmissão de informação.

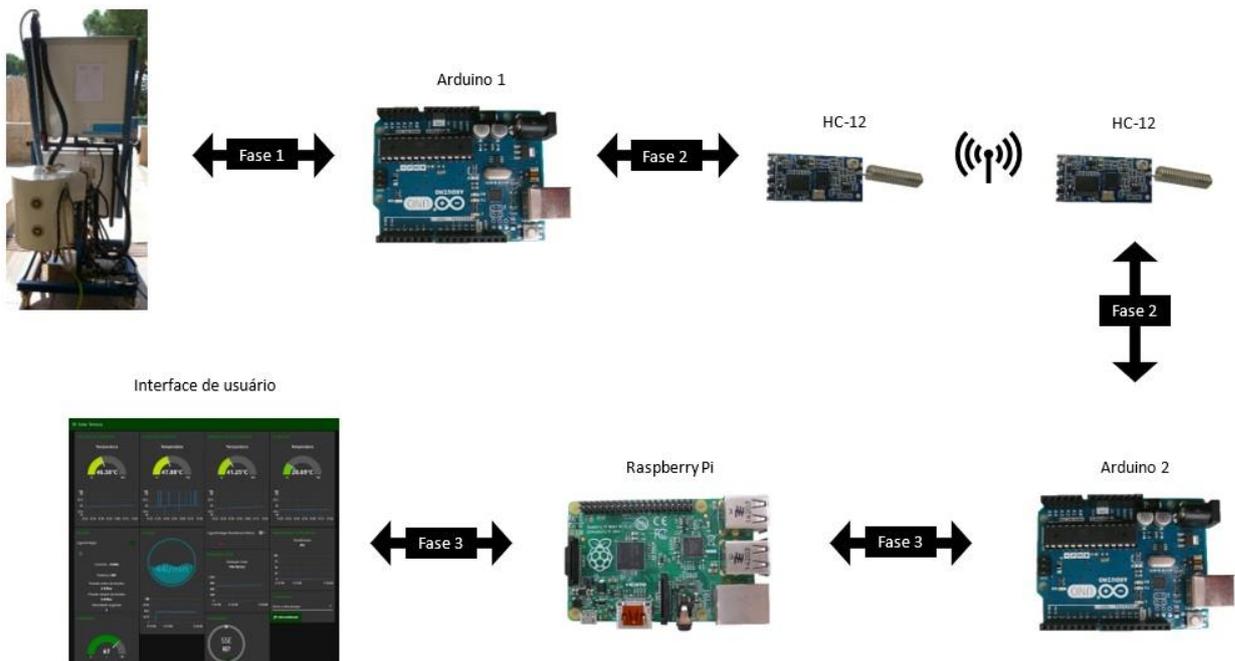


Figura 5.3. Comunicação entre a instalação e o Node-RED.

Na Figura 5.4 é possível observar as diferentes ligações de nós no Node-RED, dos quais os nós identificados com 1 dizem respeito à ligação *Serial* entre o Raspberry PI e o Arduino. Os nós identificados com 2 correspondem à programação feita para transformar o JSON transmitido pelo Arduino e separar os dados para serem ligados aos diferentes nós para a criação da interface de utilizador. Os nós identificados por 3 correspondem a programação feita para ligar e desligar os relés que controlam a bomba de circulação, a resistência elétrica e a válvula elétrica. Os nós identificados por 4 correspondem aos nós para a criação do ficheiro CSV com todos os dados, que podem ser descarregados para o computador. Os nós identificados por 5 correspondem aos nós utilizados para passar os dados, para uma janela de *Debug*, para ajudar na programação das ligações. Por fim os nós identificados com 6 dizem respeito às diferentes opções presentes na interface de utilizador, apresentados na secção 5.4 .

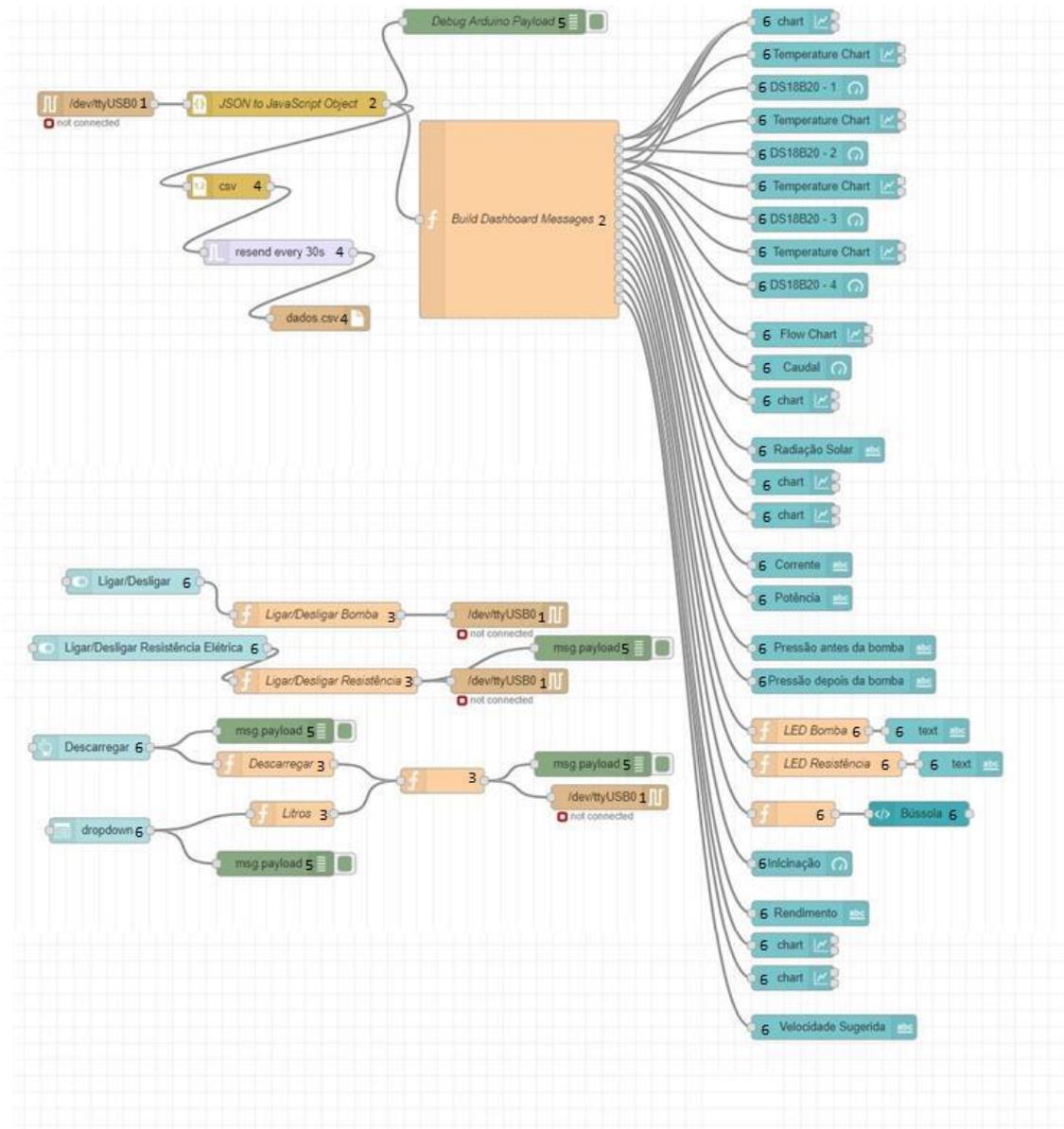


Figura 5.4. Ligações entre nós no Node-RED.

## 5.4. Interface de utilizador

Na Figura 5.5 está apresentado a *interface* de utilizador utilizada para controlar e monitorizar a instalação solar. É possível consultar a temperatura ambiente, a temperatura à entrada e saída dos coletores, a temperatura no depósito de acumulação assim como a temperatura ao longo das últimas horas através dos gráficos apresentados. Utilizando os botões é possível desligar a bomba de circulação e a resistência do depósito de acumulação assim como seleccionar os litros que se pretende descarregar, entre 5, 10, 15 ou 20 litros,

simulando assim os consumos de AQS. Na secção do depósito e da bomba é também apresentado um círculo que indica se a bomba ou a resistência estão ligados, mudando a cor do círculo para verde, ou desligados, mudando a cor do círculo para vermelho. Foi necessário acrescentar este indicativo devido à má transmissão de dados que pode ocorrer. Quanto à bomba de circulação, também é possível consultar a corrente elétrica e potência que está a gastar. É também sugerida a velocidade para a bomba de circulação em função da radiação lida pelo fotodíodo. Para uma radiação inferior a  $150 \text{ W/m}^2$  é sugerida a velocidade 1, entre  $150 \text{ W/m}^2$  e  $300 \text{ W/m}^2$  é sugerida a velocidade 2, entre  $300 \text{ W/m}^2$  e  $450 \text{ W/m}^2$  a velocidade 3, entre  $450 \text{ W/m}^2$  e  $750 \text{ W/m}^2$  a velocidade 4 e para uma radiação superior a  $750 \text{ W/m}^2$  é sugerida a velocidade 5. Na secção da bomba são também apresentadas as pressões antes e depois da bomba. Na interface é também possível observar o caudal presente no circuito solar assim como um gráfico do caudal nas últimas horas. Em relação aos coletores solares é exibida a radiação solar incidente nos coletores e também um gráfico com a radiação solar incidente nas últimas horas, a inclinação e a orientação dos mesmos. O rendimento instantâneo dos coletores também pode ser consultado na *interface* de utilizador, sendo calculado do seguinte modo:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_t} = \frac{\dot{m} \times C_p (T_{out} - T_{in})}{A \times I} \quad (5.1)$$

onde o caudal mássico  $\dot{m}$  é obtido através da multiplicação do caudal lido pelo caudalímetro pela densidade mássica da água a  $50^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 0,988 \text{ kg/l}$ . O valor da temperatura à saída e entrada dos coletores  $T_{out}$ ,  $T_{in}$ , e a irradiação são obtidos pelos diferentes sensores. O calor específico foi considerado  $C_p = 4180 \text{ J/kg.K}$  e a área total de abertura dos dois painéis  $A = 1 \text{ m}^2$ . Por fim através do separador presente no canto superior esquerdo da interface é possível consultar, em maiores dimensões, os gráficos do caudal, radiação solar incidente, do rendimento e um gráfico com todas as temperaturas monitorizadas juntas, como se pode observar na Figura 5.6.

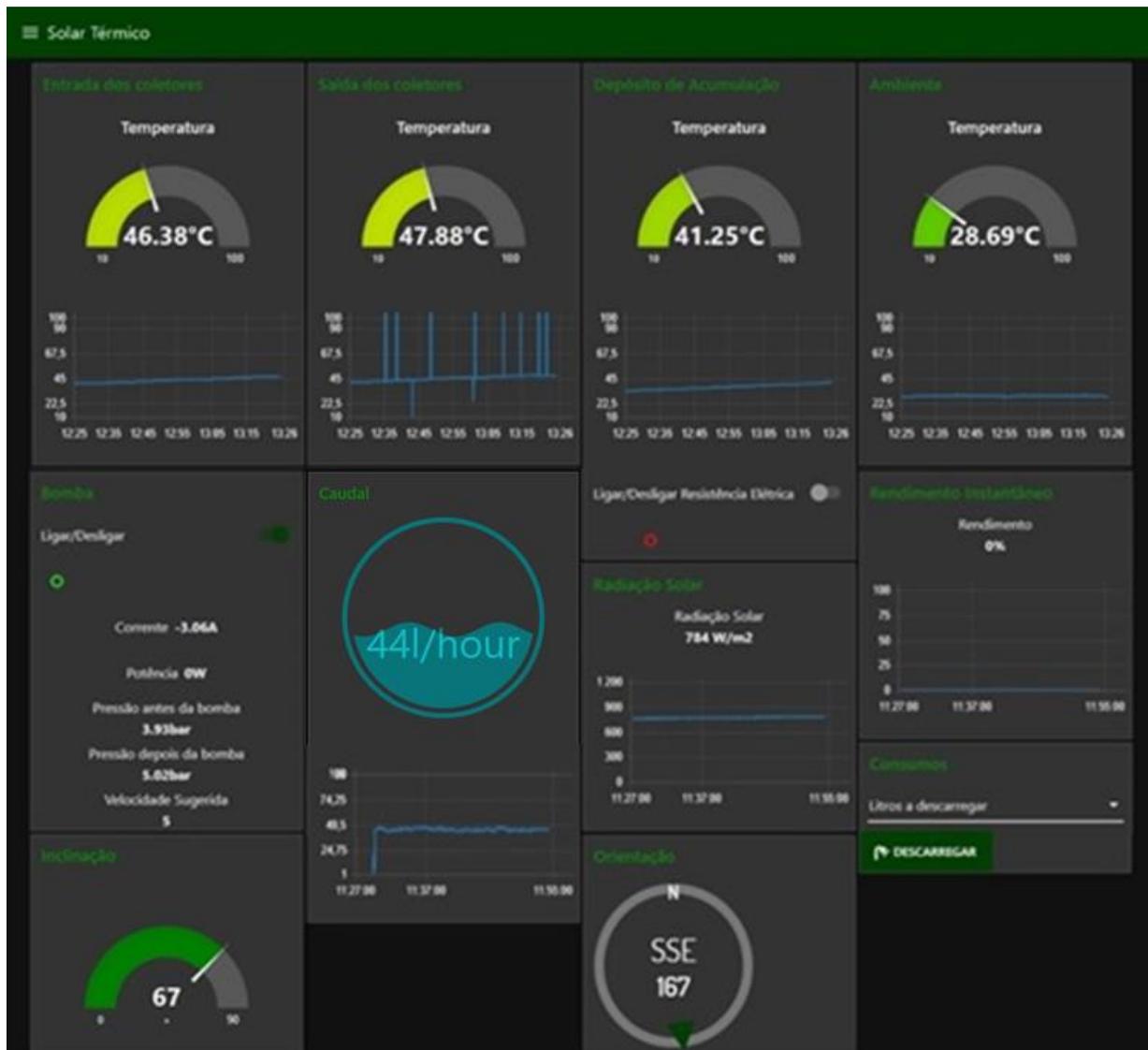


Figura 5.5. Interface de utilizador.



Figura 5.6. Separador na interface de utilizador.

## 5.5. Aplicabilidade do sistema a sistemas domésticos e industriais

O sistema de controlo e monitorização remoto desenvolvido para este projeto é composto por diversos sensores e componentes eletrónicos que, apesar de serem pertinentes para a instalação didática utilizada, para uma instalação doméstica ou industrial já não são tão essenciais. No entanto, este sistema pode ser aplicado a sistemas domésticos ou industriais de AQS ou aquecimento de piscinas, realizando algumas alterações, utilizando apenas os sensores necessários, tais como os sensores de temperatura, os sensores de pressão, o caudalímetro e o fotodíodo e todo o sistema de transmissão e receção de dados, composto pelo Arduino e pelo Raspberry PI. Seria possível ligar a bomba ou as bombas, dependendo do tipo de instalação, em função da diferença de temperatura entre o depósito e os coletores solares. Outra funcionalidade seria regular o caudal debitado pela bomba em função da radiação solar e da diferença de temperaturas entre o depósito de acumulação e os coletores. Seria também possível desligar o sistema caso os níveis de pressão da instalação atingissem um valor inseguro assim como avaliar a necessidade de manutenção de uma instalação avaliando o rendimento da mesma para os mesmos níveis de radiação. No caso de uma instalação com diversos coletores outra possível funcionalidade seria comparar o rendimento dos diversos coletores detetar erros, caso existam. Contudo a estratégia de controlo e monitorização da instalação pode ser tão complexa quanto a necessidade da instalação.

Assegurando uma ligação segura à Internet, todo o processo de monitorização e controlo pode ser feito em qualquer parte do mundo, o que o torna uma mais valia tanto a nível doméstico como a nível industrial. Pode-se então concluir que utilizando alguns sensores e componentes eletrónicos é possível garantir a segurança da instalação e assegurar um alto rendimento durante o processo de aquecimento.



## 6. TESTES À INSTALAÇÃO

Antes da montagem dos sensores, a instalação foi testada com os novos componentes de modo a detetar a presença de fugas no circuito hidráulico. De seguida e após o teste dos sensores fora da instalação estes foram montados na instalação e realizados os testes. Os gráficos apresentados nesta secção são os gráficos gerados na interface de utilizador, sendo que também se pode consultar os dados obtidos acedendo ao ficheiro CSV. No entanto, como um dos objetivos do projeto era o desenvolvimento de um sistema de controlo e monitorização, achou-se pertinente colocar os gráficos gerados na interface. Os testes iniciaram-se às 11h30 com os coletores ligados em paralelo, com uma inclinação de 67° e voltados para Sul, como se pode observar na Figura 6.1.



Figura 6.1. Inclinação e orientação dos coletores.

Ao iniciar os testes ligou-se a bomba de circulação na velocidade máxima e a válvula de regulação de caudal também aberta no máximo. Durante os testes observou-se que a pressão depois da bomba variava cerca de 1 *bar*, da pressão antes da bomba, como se pode observar na Figura 6.2.

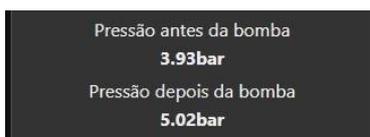


Figura 6.2. Pressão antes e depois da bomba de circulação.

Às 12h30 reduziu-se a velocidade da bomba e fechou-se um pouco a válvula de regulação de caudal, sendo perceptível essa variação de caudal na Figura 6.3. Às 13h30 realizou-se uma descarga de 5 litros e mudou-se a ligação dos painéis de paralelo para série. Pode-se observar uma diminuição da temperatura à entrada e saída dos coletores que se deve ao facto das tubagens correspondentes à ligação em série estarem frias, como constatado na Figura 6.4. Às 14h desligou-se a bomba e procedeu-se à realização de duas descargas de 15 litros de água do reservatório, pode-se observar a diminuição da temperatura do depósito na Figura 6.4. De seguida ligou-se a resistência elétrica, 30 minutos depois deligou-se automaticamente, quando a temperatura do depósito atingiu os 40°C. Consultando os gráficos obtidos é possível observar a variação das temperaturas de entrada e saída dos coletores e conseqüente aquecimento da água no depósito de acumulação assim como a variação da temperatura da água no depósito quando se liga a resistência e quando se realiza descargas de água quente, resultado da mistura com a água fria proveniente da rede. Pode-se também constatar alguns picos no gráfico das temperaturas e do caudal, tal pode dever-se à má transmissão de dados, visto ser um Raspberry antigo ou à má ligação dos sensores, uma vez que estes estão ligados ao Arduino utilizando uma *breadboard* e não por ligações soldadas.



Figura 6.3. Variação do caudal do circuito solar [l/hour].



Figura 6.4. Variação das temperaturas [°C].

Na Figura 6.5 pode observar-se a evolução da radiação incidente nos painéis durante os testes. Ocorrem algumas variações da radiação devido ao facto de os testes terem sido realizados com o céu um pouco nublado.



Figura 6.5. Variação da radiação incidente nos coletores [ $W/m^2$ ].

Quando se realizou os testes constatou-se que o rendimento não estava a ser calculado. Mais tarde percebeu-se que o erro se encontrava no código enviado para o Arduino, pelo que se procedeu à resolução do problema. No entanto a obtenção do rendimento instantâneo resultou em valores absurdos, como se pode observar na Figura 6.6, tal deve-se ao efeito de inércia térmica dos coletores que ocorre devido à passagem de nuvens que faz diminuir a radiação incidente nos coletores, apesar de se manter a diferença de temperatura à entrada e saída dos coletores. Aquando da realização dos testes também se constatou que o sensor de medição de corrente não estava em funcionamento, problema que não foi possível resolver, presumindo-se que o sensor se estragou, visto este ter funcionado antes da colocação na instalação.



Figura 6.6. Variação do rendimento instantâneo.

## 7. CONCLUSÕES

Após a execução experimental deste projeto pode-se concluir que a remodelação e colocação em funcionamento da instalação foi realizada com sucesso, assim como o desenvolvimento do sistema de monitorização e controlo remoto. A instalação é neste momento uma ferramenta capaz de ajudar à lecionação de conteúdos relacionados com sistemas solares térmicos possibilitando a realização de diversos testes que permitem estudar o rendimento da instalação, para diferentes condições, tais como a variação do caudal do circuito solar, a variação da inclinação dos coletores ou a variação da ligação dos coletores entre série e paralelo. Quanto ao sistema de controlo e monitorização, este apresenta-se como uma solução viável para o controlo e monitorização da instalação à distância. O Node-RED demonstrou ser uma solução robusta para a implementação do sistema de controlo e monitorização, apresentando uma interface bastante intuitiva e que dispõe de funcionalidades que podem vir a ser exploradas, tal como o envio de um mail com os dados obtidos. Efetuando as alterações e melhorias necessárias, este sistema de monitorização e controlo remoto desenvolvido pode ser implementado em sistemas solar térmicos domésticos ou industriais.

O resultado final do projeto que, apesar de não estar completo, pode-se considerar como uma ferramenta funcional que cumpre os objetivos propostos.

Com a realização deste projeto foi possível aplicar conhecimentos adquiridos durante o percurso académico e foi também possível adquirir algumas noções de programação assim como noções inerentes à realização de um projeto prático.

### 7.1. Trabalhos futuros

No seguimento deste projeto sugerem-se alguns pontos que tornariam a instalação mais completa e o sistema de controlo e monitorização mais eficiente:

- Adição de um sensor para medir a corrente da resistência elétrica, possível utilizando um Arduino Due em vez do Arduino Uno, visto os pinos analógicos do Arduino Uno já estarem todos ocupados.
- Acoplar um pequeno motor ao regulador de velocidade da bomba possibilitando o controlo da velocidade da bomba à distância.

- Adicionar um amplificador ao fotodíodo de forma a obter valores com menos variações da radiação solar.
- Implementar um sistema de validação de dados ao código do Arduino de forma a eliminar os erros em que os dados transmitidos não correspondem aos valores lidos.
- Adicionar uma válvula de segurança ao depósito de acumulação de forma a tornar a instalação mais segura.
- Adicionar um painel fotovoltaico de forma a tornar a instalação menos dependente da energia elétrica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Commission, E. (2017) *PVGIS - Photovoltaic Geographical Information Systems*. Disponível em: [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_download/map\\_index.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html) (Acedido: 20 de Abril de 2018).
- AQSpP/DGGE (2004) «Guia para Instaladores de Coletores Solares».
- Duffie, J. a., Beckman, W. a. e Worek, W. M. (2003) *Solar Engineering of Thermal Processes, 4th ed.*, *Journal of Solar Energy Engineering*. doi: 10.1115/1.2930068.
- Energia Solar Térmica - manual sobre tecnologias projecto e instalação* (2011).
- Kalogirou, S. (2014) *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Second Edi, *Solar Energy Engineering*. Second Edi. doi: 10.1016/B978-0-12-374501-9.00014-5.
- Mauthner, F., Weiss, W. e Spörk-Dür, M. (2015) *Solar Heat Worldwide. Markets and Contributions to the Energy Supply 2013*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Peuser, F. A., Remmers, K.-H. e Schnauss, M. (2005) *Installations solaires thermiques - Conception et mise en oeuvre*. Editado por Le Moniteur.
- Roriz, L. *et al.* (2010) *Energia Solar em Edifícios*. Editado por Editora ORION.
- U.S. Energy Information Administration (2017) «International Energy Outlook 2017», *International Energy Outlook*, IEO2017(2017), p. 143. doi: [www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf).



## ANEXO A

Webgrafia consultada para a programação dos sensores no Arduino IDE e instalação do Node-RED no Raspberry Pi.

Sensores de temperatura – DS18B20:

*DS18B20 (digital temperature sensor) and Arduino - Arduino Project Hub* (2016). Disponível em: <https://create.arduino.cc/projecthub/TheGadgetBoy/ds18b20-digital-temperature-sensor-and-arduino-9cc806> (Acedido: 5 de março de 2018).

Biblioteca OneWire:

Stoffregen, P. (2018) *OneWire*. Disponível em: <https://github.com/PaulStoffregen/OneWire> (Acedido: 12 de março de 2018).

Biblioteca Dallas Temperature:

Burton, M. (2018) *Dallas Temperature*. Disponível em: <https://github.com/milesburton/Arduino-Temperature-Control-Library> (Acedido: 12 de março de 2018).

LCD 20x4:

Savochkin, A. (2016) *I2C LCD sketch*. Disponível em: <https://gist.github.com/AlexanderSavochkin/6045dad44130bbff80db> (Acedido: 15 de março de 2018).

Biblioteca LCD:

Fdebrabander (2016) *Arduino-LiquidCrystal-I2C-library*. Disponível em: <https://github.com/fdebrabander/Arduino-LiquidCrystal-I2C-library> (Acedido: 15 de março de 2018).

Relés:

*Control High Voltage Devices - Arduino Relay Tutorial*. Disponível em: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/control-high-voltage-devices-arduino-relay-tutorial/> (Acedido: 6 de março de 2018).

Fotodíodo:

*DIY Science: Measuring Light with a Photodiode II | Outside Science* (2012). Disponível em: <https://outsidescience.wordpress.com/2012/11/03/diy-science-measuring-light-with-a-photodiode-ii/> (Acedido: 19 de março de 2018).

Caudalímetro:

*How to Use Water Flow Sensor - Arduino Tutorial: 5 Steps (with Pictures)* (2016). Disponível em: <https://www.instructables.com/id/How-to-Use-Water-Flow-Sensor-Arduino-Tutorial/> (Acedido: 8 de abril de 2018).

HC-12:

*Arduino and HC-12 Long Range Wireless Communication Module - HowToMechatronics* (2017). Disponível em: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-and-hc-12-long-range-wireless-communication-module/> (Acedido: 22 de maio de 2018).

Sensor de medição de corrente ACS712:

*How to use the ACS712 with an Arduino | Henry's Bench* (2015). Disponível em: <http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-current-measurements/the-ac712-current-sensor-with-an-arduino/> (Acedido: 17 de maio de 2018).

Sensor de Inclinação MPU6050:

*MPU6050* (2017). Disponível em: <https://github.com/jrowberg/i2cdevlib/tree/master/Arduino/MPU6050> (Acedido: 4 de junho de 2018).

Sensor de Orientação QMC5883L:

*Mecha\_QMC5883L* (2017). Disponível em: [https://github.com/keepworking/Mecha\\_QMC5883L](https://github.com/keepworking/Mecha_QMC5883L) (Acedido: 6 de junho de 2018).

Sensor de Orientação QMC5883L:

*Mecha\_QMC5883L* (2017). Disponível em: [https://github.com/keepworking/Mecha\\_QMC5883L](https://github.com/keepworking/Mecha_QMC5883L) (Acedido: 6 de junho de 2018).

Instalação Node-RED no Raspberry PI:

*Node-RED: Running on Raspberry Pi*. Disponível em: <https://nodered.org/docs/hardware/raspberrypi> (Acedido: 11 de abril de 2018).

Biblioteca ArduinoJson:

Bblanchon (2016) *ArduinoJson*. Disponível em: <https://github.com/bblanchon/ArduinoJson> (Acedido: 13 de abril de 2018)..

---

## ANEXO B

Neste anexo estão apresentadas as características dos sensores e componentes eletrônicos instalados.

- Sensor de temperatura, DS18B20:

Tensão de operação: 3 a 5,5 V.

Intervalo de medição de temperatura: -55 a +125°C.

Precisão: +/- 0,5°C entre -10 a +85°C.

Ponta de aço inoxidável: 6 × 50 mm.

Comprimento cabo: 108 cm.



**Figura B1.1.** Sensor de temperatura DS18B20.

- Sensor de pressão SKU237545:

Intervalo de pressão: 0 a 0,5 MPa.

Tensão de operação: 5V.

Intervalo de temperatura: 0 a 85°C.

Pressão máxima: 1,5 MPa.

Corrente de funcionamento:  $\leq 10$  mA.

Erro de funcionamento:  $\pm 1,5\%$ .

Tempo de resposta:  $\leq 2,0$  ms.

Comprimento do cabo: 19 cm.



**Figura B1.2.** Sensor de pressão SKU237545.

- Caudalímetro YF-B1:

Intervalo de medição: 0,3 a 6 l/min.

Tensão de operação: 5 a 18V.

Intervalo de temperatura: -25 a 80°C.

Pressão máxima: 1,75 MPa.

Corrente de funcionamento máxima: 10 mA.

Erro de funcionamento:  $\pm 1,5\%$



**Figura B1.3.** Caudalímetro YF-B1.

- Fotodíodo SFH203P:

Comprimento de onda de pico: 850 nm.

Tensão no sentido inverso: 50 V.

Intervalo de temperatura: -40 a 100°C.

Altura: 5 mm.

Comprimento: 5,9 mm.

Largura: 5mm.



**Figura B1.4.** Fotodíodo SFH203P.

- Sensor de inclinação MPU6050:

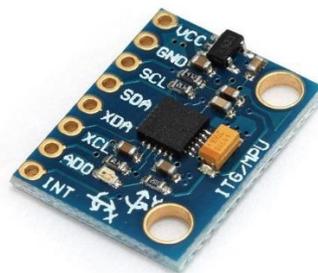
Acelerómetro e giroscópio na mesma placa.

Tensão de operação: 3 a 5 V.

Conversor analógico digital de 16-bits.

Medição em X, Y e Z.

Protocolo de comunicação I2C.



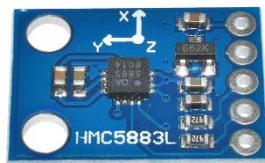
**Figura B1.5.** MPU6050.

- Sensor de orientação HMC5883L:

Tensão de operação: 3 a 5 V.

Protocolo de comunicação I2C.

Medição em X, Y e Z.



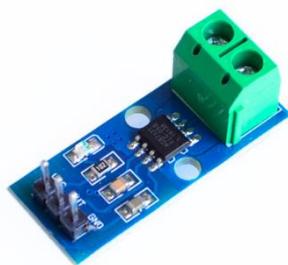
**Figura B1.6.** HMC5883L.

- Sensor de medição de corrente ACS712:

Intervalo de medição: 0 a 5 A.

Tensão de operação: 4,5 a 5 V.

Sensibilidade: 185 mV/A



**Figura B1.7.** ACS712.

- Relé:

Tensão máxima de carga: 240 V AC.

Tensão de operação: 5 V.

Corrente máxima de carga: -10 A.



**Figura B1.8.** Relé.

- LCD 20×4:

Fundo do ecrã: azul.

Cor dos caracteres: branco.

Tensão de operação: 5 V.

Adaptador I2C integrado.

Linhas: 4.

Coluna: 20.

Dimensões: 98×60×20 mm



**Figura B1.9.** LCD.



# APÊNDICE A

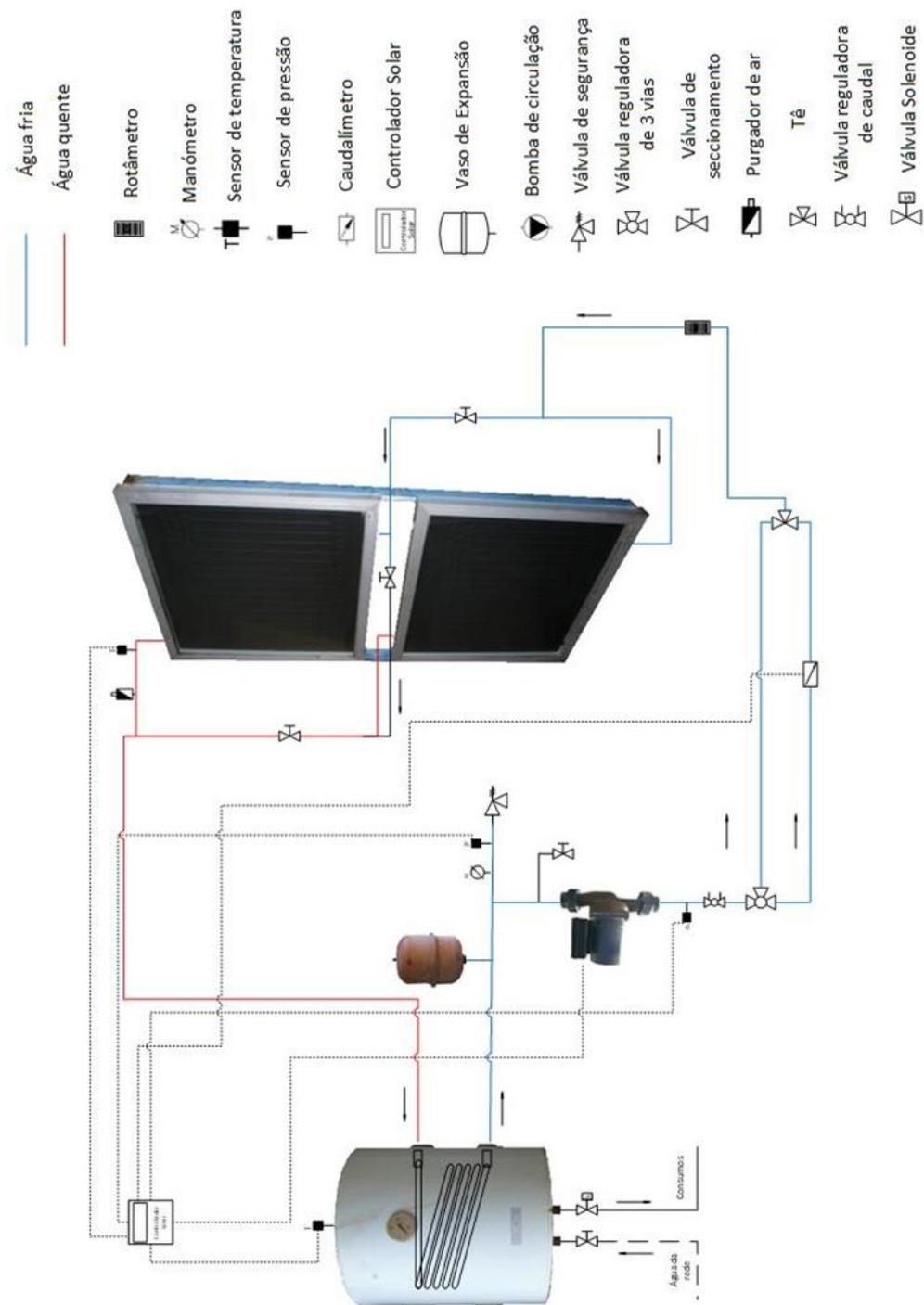


Figura A2.1. Fluxograma geral da instalação

## APÊNDICE B

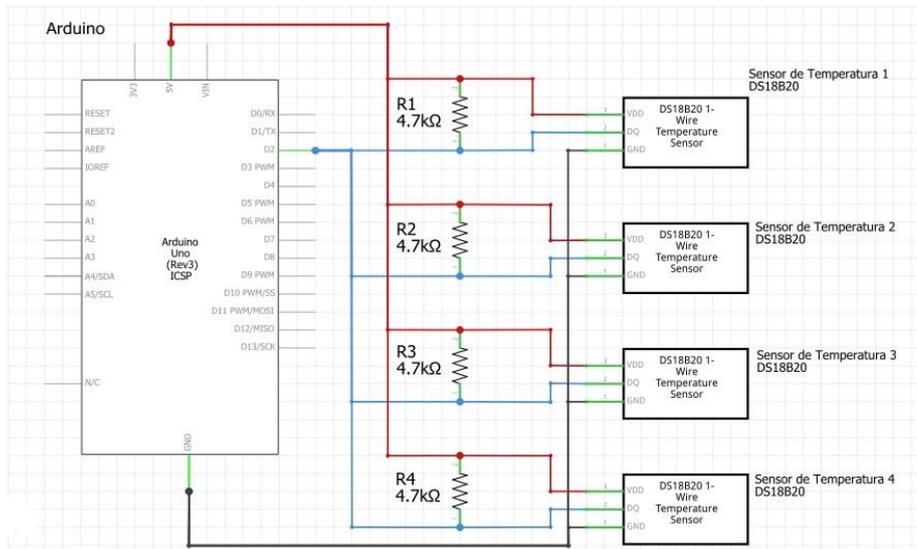


Figura B2.1. Esquema elétrico dos sensores de temperatura.

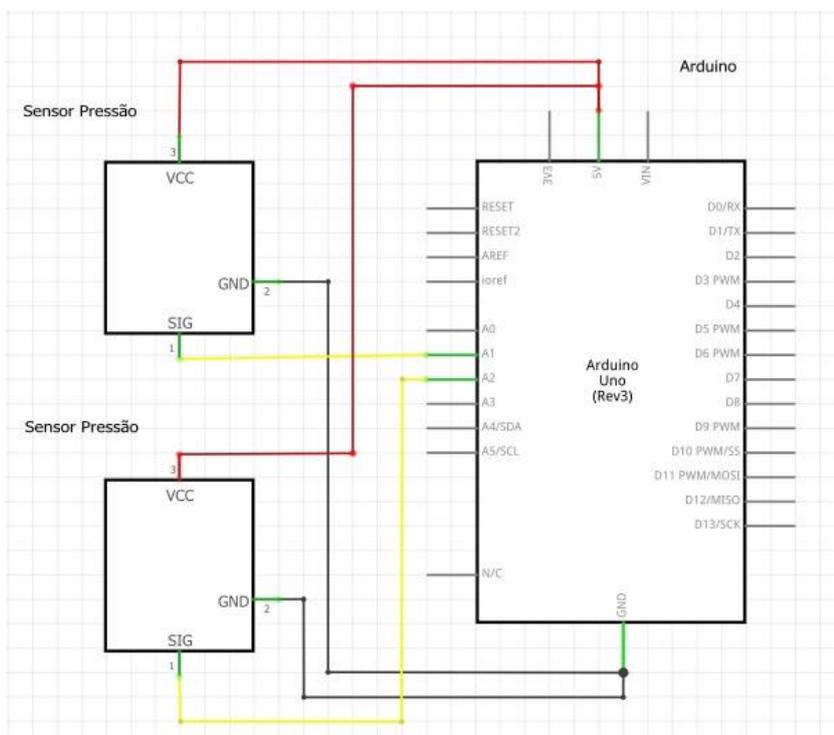


Figura B2.2. Esquema elétrico dos sensores de pressão.

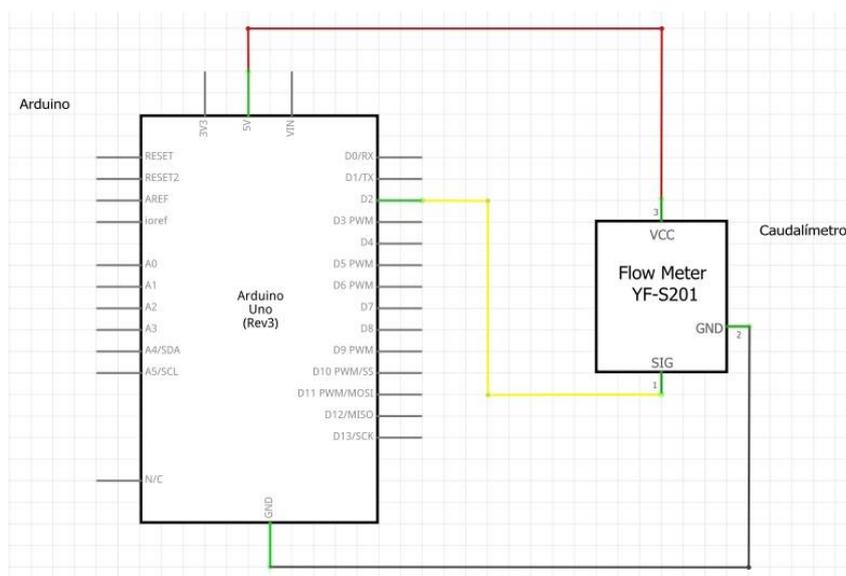


Figura B2.3. Esquema elétrico do caudalímetro.

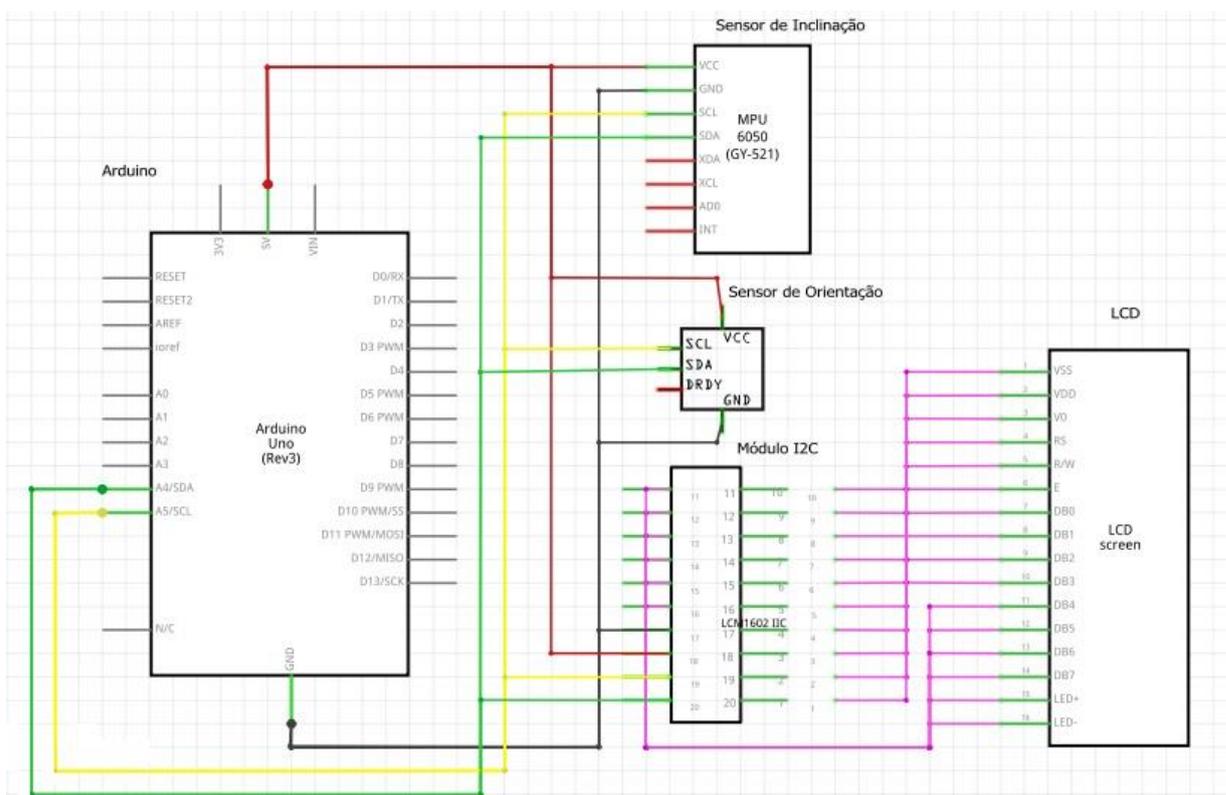


Figura B2.4. Esquema elétrico dos componentes com interface I2C.

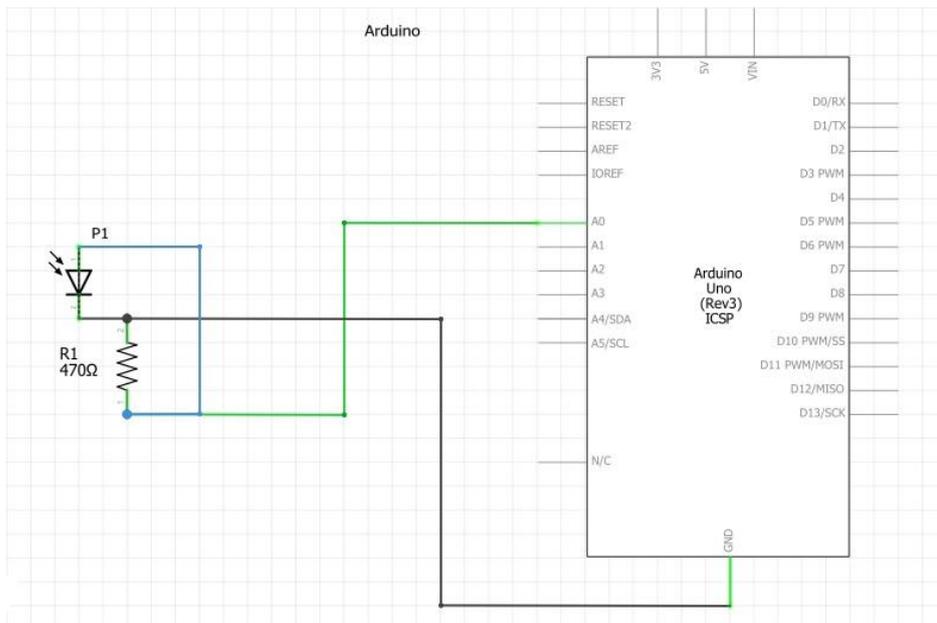


Figura B2.5. Esquema elétrico do fotodíodo.

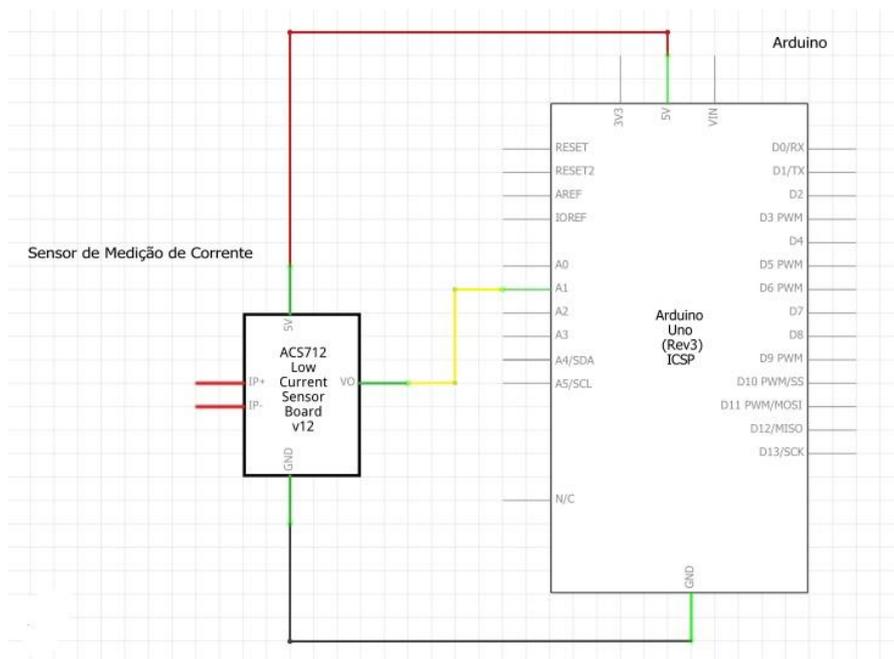


Figura B2.6. Esquema elétrico do sensor de medição de corrente.

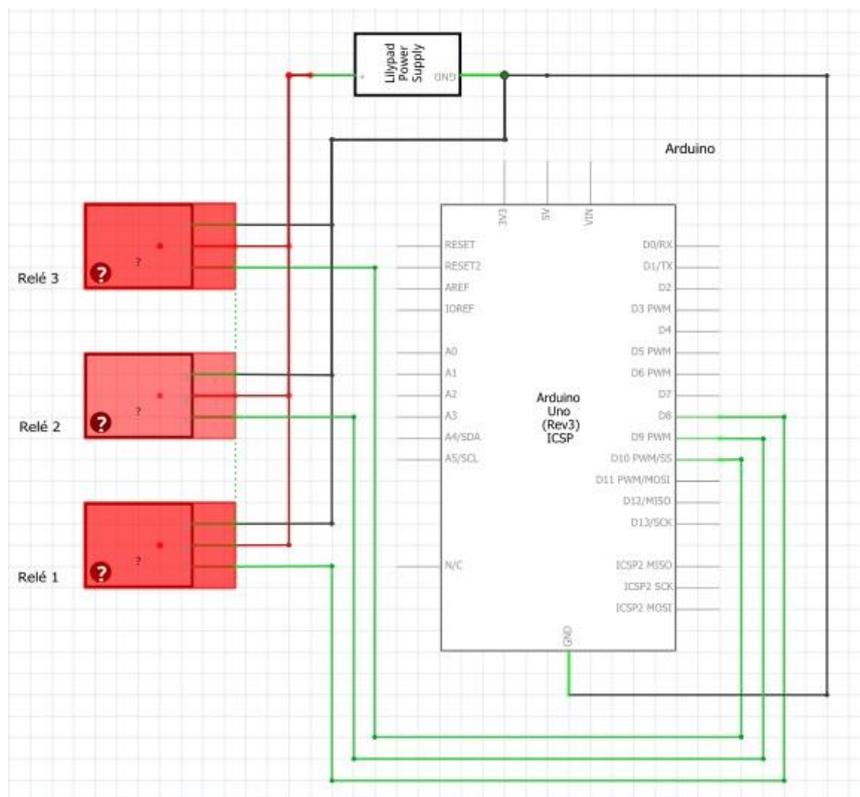


Figura B2.7. Esquema elétrico dos relés.

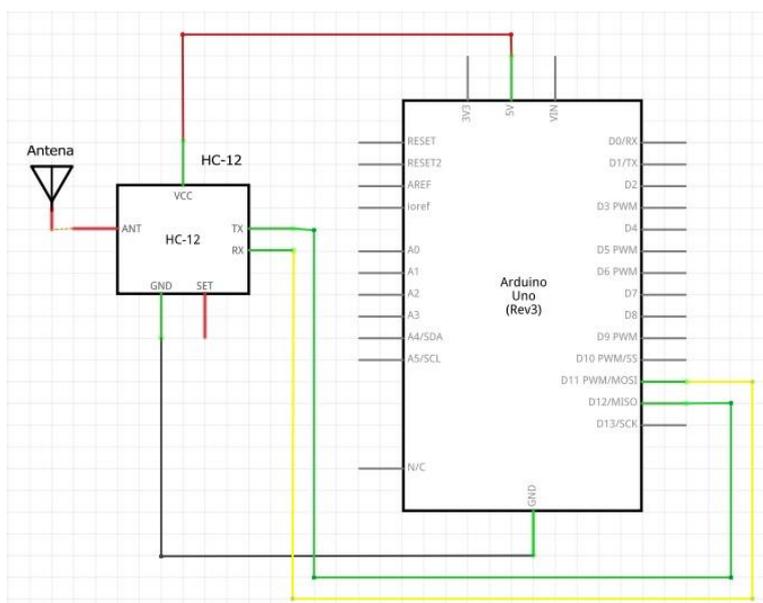


Figura B2.8. Esquema elétrico do HC-12.

## APÊNDICE C

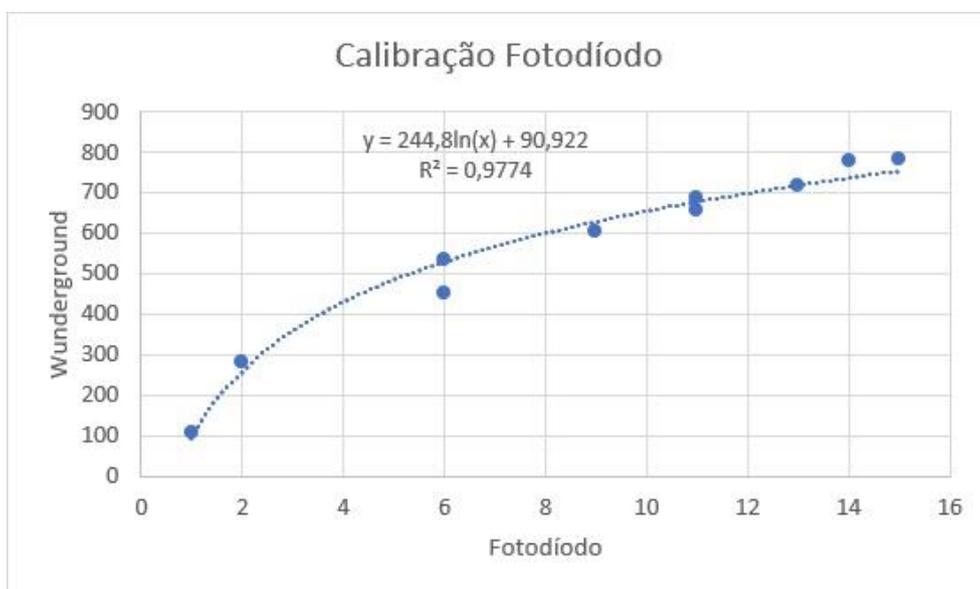


Figura C2.1. Curva de calibração do fotodíodo.

## APÊNDICE D

### Coletores em Série:

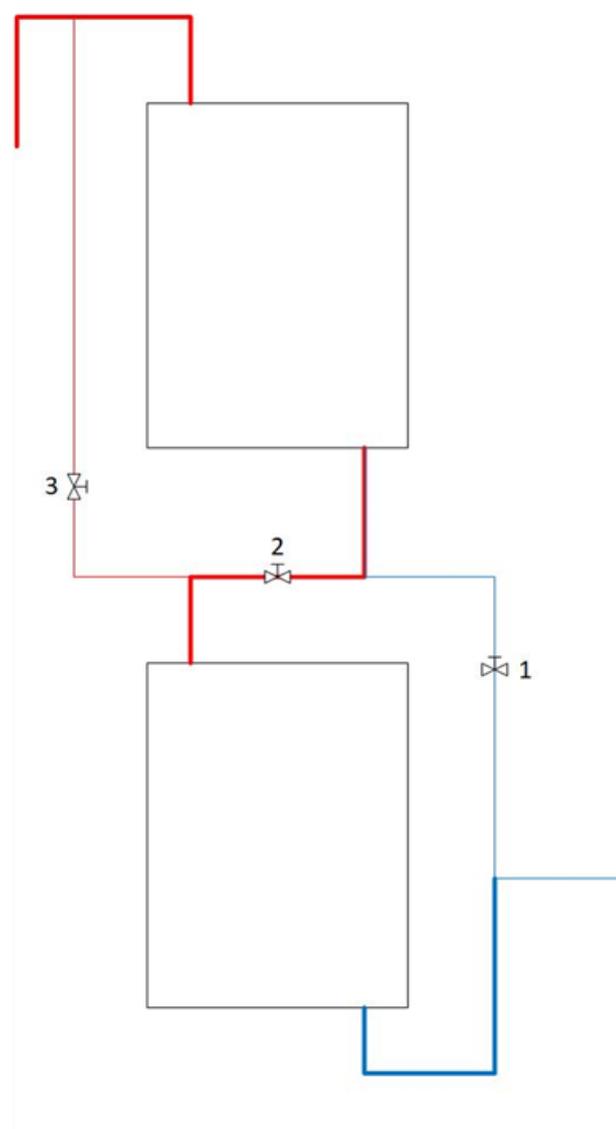
Válvula 2 **Aberta**

Válvula 1 e 3 **Fechadas**

### Coletores em Paralelo:

Válvulas 1 e 3 **Abertas**

Válvula 2 **Fechada**



**Figura D2.1.** Esquema de ligação dos coletores em série ou paralelo