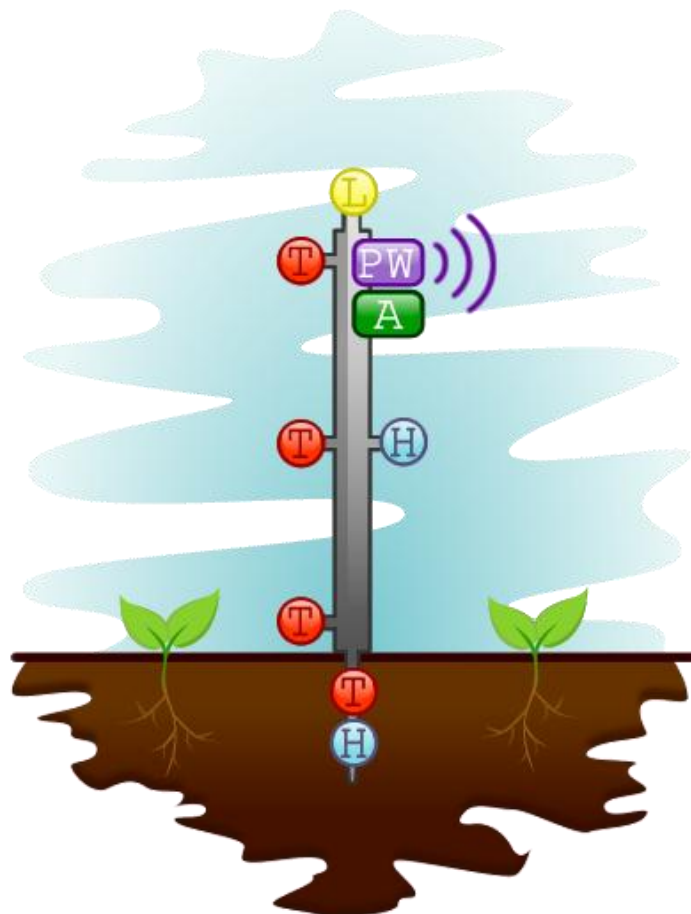




Andreia Sofia
Henriques Gonçalves
Abreu

Sistema de Monitorização de Estufas Agrícolas





**Andreia Sofia
Henriques Gonçalves
Abreu**

Sistema de Monitorização de Estufas Agrícolas

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Dr. Alexandre Mota, Professor Associado do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e do Dr. Manuel Pedro Graça, Investigador Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

A todos aqueles que me acompanharam neste percurso

O júri

Presidente

Prof. Dr. José Alberto Gouveia Fonseca
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Dr. José António Barros Vieira
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Prof. Dr. Alexandre Manuel Moutela Nunes da Mota
Professor Associado da Universidade de Aveiro (orientador)

Dr. Manuel Pedro Fernandes Graça
Investigador Auxiliar da Universidade de Aveiro (coorientador)

Agradecimentos

Durante a realização deste projeto foram muitos os que me incentivaram e motivaram. Não posso deixar de agradecer a todas estas pessoas que não só contribuíram para a realização desta dissertação, como também estiveram a meu lado quando mais precisei.

Ao meu orientador, professor Alexandre Mota, pela confiança depositada em mim, por me ter encaminhado para a escolha desta área e deste trabalho em particular e por todo o incentivo que demonstrou durante o decorrer deste projeto.

Ao meu coorientador, Dr. Pedro Graça, pelo contributo prestado a este trabalho e pela disponibilidade demonstrada.

A Jorge Neto (Sócio-Gerente da Prilux) pela disponibilização do painel solar.

Aos meus pais por impulsionarem todo o meu percurso académico, por sempre acreditarem nas minhas capacidades e, em especial, por terem feito de mim a pessoa que sou hoje.

À minha irmã que me proporcionou alguns momentos de descontração e que nunca se importou de ser “filha única” quando fiquei a trabalhar até mais tarde.

Ao meu namorado por todos os momentos de discussão construtiva e por todo o apoio demonstrado.

A todos os meus amigos que, apesar de nem sempre estarem presentes, fizeram-me sempre sentir que estavam disponíveis para me ajudar no que fosse preciso. Um agradecimento também especial aos meus colegas de laboratório pelos momentos de reflexão e descontração.

Palavras-chave

Sensores, comunicações sem-fios, redes sem fios, energy harvesting, microcontrolador, IEEE802.15.4, 1-wire, protocolos de comunicação, painel solar

Resumo

Os sistemas de aquisição de dados são essenciais no controlo ótimo das variáveis climatéricas numa estufa agrícola, possibilitando uma redução dos custos de operação e um aumento da produtividade.

Esta dissertação descreve uma nova abordagem às redes de sensores sem-fios para estufas agrícolas através da construção de colunas móveis com sensores, mantendo o carácter de baixo-custo inerente a este tipo de rede.

Neste documento é apresentado todo o *hardware* e *software* desenvolvidos neste contexto. Foi desenvolvida eletrónica de condicionamento de sinal para sensores de temperatura, humidade do ar, humidade do solo e luminosidade. Foi implementado um barramento 1-wire para interligar os sensores ao microcontrolador e uma rede sem-fios baseada no protocolo IEEE802.15.4. Foi também desenvolvido um sistema de *energy harvesting* solar como método de prolongar sua autonomia energética.

Os ensaios realizados demonstraram o bom-funcionamento dos sensores, da rede e do sistema de recolha de energia corroborando a viabilidade do projeto. No entanto, será necessário no futuro modificar alguns aspetos do sistema implementado para que este possa ser considerado como um protótipo industrial e não um protótipo de laboratório.

Keywords

Sensors, wireless communications, wireless networks, energy harvesting, microcontroller, IEEE802.15.4, 1-wire, communication protocols, solar panel

Abstract

Data acquisition systems are essential to the optimal control of climate variables in a greenhouse which enables possible cost reductions and an increase in productivity.

This dissertation describes a new approach to wireless sensor networks in greenhouses by the construction of mobile sensor columns, maintaining the low-cost profile inherent to this type of network.

This document presents all the hardware and software developed in this context. This includes the development of signal conditioning electronics for temperature, humidity, luminosity and soil moisture sensors and the implementation of an 1-wire bus to interconnect the sensors to the microcontroller and a wireless sensor network based on the IEEE802.15.4 protocol. An energy harvesting system was also developed in order to extend battery life.

The tests performed showed that the sensors, the network and the harvesting system are working accordingly, corroborating the feasibility of the project. However, in the future, it will be necessary to modify some aspects of the implemented system so that it may be considered an industrial prototype instead of a laboratory prototype.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura.....	2
2. Princípios de monitorização e controlo de uma estufa	3
2.1. Caracterização de uma estufa agrícola	3
2.2. Atuadores	4
2.2.1. Sistemas de ventilação	4
2.2.2. Sistemas de aquecimento.....	5
2.2.3. Sistemas de sombreamento	5
2.2.4. Sistemas de irrigação	6
2.2.5. Sistemas de pulverização.....	7
2.2.6. Sistemas de injeção de CO ₂	7
2.3. Sensores	8
2.3.1. Sensores de temperatura	8
2.3.1.1. Termopares.....	9
2.3.1.2. RTDs	10
2.3.1.3. Termístor.....	12
2.3.1.4. Circuito Integrado	13
2.3.2. Sensores de humidade do ar	14
2.3.2.1. Higrómetro de bolbo-seco e bolbo-molhado (psicrómetro)	14
2.3.2.2. Sensores capacitivos	15
2.3.2.3. Sensores resistivos.....	16
2.3.2.4. Sensores de condutividade térmica.....	17
2.3.3. Sensores de humidade do solo.....	17
2.3.3.1. Tensiómetro.....	17
2.3.3.2. Sensor resistivo	18
2.3.3.3. Sensor capacitivo	19

2.3.3.4.	TDR (Time Domain Reflectometry)	19
2.3.3.5.	Sonda de Neutrões.....	20
2.3.4.	Sensores de luminosidade/radiação	21
2.3.4.1.	Sensores PAR.....	21
2.3.4.2.	Piranómetros	22
2.3.4.3.	Sensores optoelectrónicos.....	23
3.	Estado da arte	27
3.1.	Soluções comerciais	27
3.1.1.	<i>Data Loggers</i> sem-fios	27
3.1.2.	Gemini Data Loggers.....	28
3.1.3.	E-Senza® Technologies	29
3.1.4.	Banner Engineering	29
3.1.5.	Pepperl+Fuchs	30
3.2.	Investigação académica e científica	30
3.3.	Discussão	32
4.	Desenvolvimento	35
4.1.	Escolhas tecnológicas e ferramentas de desenvolvimento	36
4.2.	Interface microcontrolador – 1-wire.....	38
4.3.	Sensores e condicionamento de sinal	39
4.3.1.	Sensor de temperatura.....	39
4.3.2.	Sensor de humidade do ar.....	40
4.3.3.	Sensor de humidade do solo	43
4.3.4.	Sensor de luminosidade	46
4.4.	Comunicações	48
4.4.1.	Comunicação Datasink/Gateway <-> Colunas de sensores.....	51
4.4.2.	Comunicação Datasink/Gateway <-> Terminal Local	54
4.4.3.	Processo de configuração.....	54
4.5.	Alimentação.....	55
4.6.	Interface gráfica	57
4.7.	Registo em cartão de memória	58
5.	Ensaios e Resultados.....	59
5.1.	Ensaios individuais dos sensores.....	59
5.1.1.	Sensores de temperatura	59

5.1.2. Sensor de humidade do ar.....	60
5.1.3. Sensor de humidade do solo	60
5.1.4. Sensor de luminosidade	61
5.2. Estudo energético	62
5.2.1. Dimensionamento do painel solar.....	64
5.2.2. Dimensionamento da bateria	66
5.3. Teste ao painel solar e circuito de <i>Energy Harvesting</i>	66
5.4. Ensaio no exterior	68
5.5. Análise de custos	72
6. Conclusão	75
6.1. Trabalho futuro	75
7. Bibliografia	77
Anexos.....	I
Anexo I: Esquema elétrico da placa de expansão principal	III
Anexo II: Interface gráfica	V
Anexo III: Processo de configuração das colunas de sensores (interface gráfica).....	IX

Lista de Figuras

Figura 1: Representação gráfica das entradas e saídas do modelo de uma estufa	3
Figura 2: Exemplo de sistema de irrigação gota a gota	6
Figura 3: Curvas características de vários sensores de temperatura.....	9
Figura 4: Representação de um termopar	9
Figura 5: Exemplo de compensação de junção fria por <i>software</i>	10
Figura 6: Termopares	10
Figura 7: Pt100	11
Figura 8: Termístores	12
Figura 9: Sensores de temperatura integrados (da esquerda para a direita: LM335, DS1820, AD590, LM75A, MCP9700).....	13
Figura 10: Dependência da densidade de vapor de água de saturação com a temperatura	14
Figura 11: Sensores de humidade do ar capacitivos (da esquerda para a direita: HS1101LF, HCH-1000, HIH-5031, SHT10)	15
Figura 12: Sensores de humidade do ar resistivos (da esquerda para a direita: HCZ-D5, HS15P, CHS-MSS).....	16
Figura 13: Sensor de humidade absoluta baseado no princípio da condutividade térmica (ABS-FS11).....	17
Figura 14: Tensiómetro (à esquerda); princípio de funcionamento de um tensiómetro (à direita).....	18
Figura 15: Bloco de gesso (à esquerda); Sensor de matriz granular WATERMARK (à direita).....	19
Figura 16: Sensor de humidade do solo capacitivo Vernier	19
Figura 17: Sensor de humidade do solo TDR TRIME-PICO	20
Figura 18: Sonda de neutrões e unidade de controlo Hydroprobe (CPN) (à esquerda); Princípio de funcionamento de uma sonda de neutrões (à direita)	20
Figura 19: Sensibilidade luminosa das plantas para efeitos de fotossíntese em relação ao comprimento de onda.....	21
Figura 20: Sensor PAR LI-190.....	21
Figura 21: Resposta espectral do sensor LI-190.....	22
Figura 22: Resposta espectral do piranómetro CMP6	23

Figura 23: Piranómetro CMP6.....	23
Figura 24: Resposta espectral de vários fotodíodos diferentes.....	24
Figura 25: Sonda de humidade do solo e Data Logger da Campbell.....	27
Figura 26: Exemplo de Data Loggers e Base Stations da empresa T&D. Da esquerda para a direita: RTR-574, RTR-503, RTR-500AW/NW, RTR-500.....	28
Figura 27: Recetor sem-fios TinyTag Wireless	28
Figura 28: SenzaBlocks	29
Figura 29: Banner Wireless I/O	29
Figura 30: Produtos Pepperl-Fuchs Wireless-HART	30
Figura 31: Topologia de rede (à esquerda) e hardware (à direita)	31
Figura 32: Arquitetura de rede.....	31
Figura 33: Estrutura típica de um nó de sensor	32
Figura 34: Implementação do nó de sensores e do sistema de recolha de energia solar	32
Figura 35: Diagrama funcional do sistema desenvolvido.....	35
Figura 36: Esquema de uma coluna de sensores	36
Figura 37: Módulos uMRF (à esquerda) e uMRFs (à direita)	37
Figura 38: Esquema do barramento para a ligação sensores-microcontrolador (placa wireless).....	37
Figura 39: Interface de hardware microcontrolador – barramento 1-wire	39
Figura 40: Esquema de ligação dos sensores de temperatura ao barramento 1-wire	39
Figura 41: DS18S20 encapsulado	40
Figura 42: Condicionamento de sinal para sensores de humidade relativa do ar.....	40
Figura 43: Switched Capacitor Resistor.....	41
Figura 44: Esquema do circuito de interface do sensor de humidade do ar	42
Figura 45: Sensor de humidade do ar	42
Figura 46: Exemplo de encapsulamento do sensor de humidade do ar.....	43
Figura 47: Diagrama de blocos conceptual do circuito de medição de humidade do solo	44
Figura 48: Placa de expansão principal	45
Figura 49: Relação entre a resistência do sensor e o valor de humidade do solo.....	45
Figura 50: Sensibilidade espectral do sensor de luminosidade	47
Figura 51: Esquema elétrico do <i>hardware</i> de condicionamento de sinal do sensor de luminosidade.....	47

Figura 52: Sensor de luminosidade	47
Figura 53: Exemplo de encapsulamento do sensor de luminosidade.....	48
Figura 54: Esquema das comunicações possíveis	48
Figura 55: Estrutura básica de dados usada em todas as comunicações	49
Figura 56: Descrição do campo de dados para cada tipo de mensagem.....	50
Figura 57: Diagrama de blocos do funcionamento do <i>Datasink/Gateway</i> em relação às comunicações.....	51
Figura 58: Empacotamento da estrutura básica numa trama de dados 802.15.4.....	51
Figura 59: Exemplo de funcionamento da rede híbrida conceptual.....	53
Figura 60: Estrutura de uma trama do protocolo sobre RS232	54
Figura 61: Diagrama de blocos de um sistema típico de energy harvesting.....	55
Figura 62: Ponto de potência máxima de um painel solar.....	56
Figura 63: Circuito de <i>energy harvesting</i>	56
Figura 64: Placa de circuito impresso do circuito de <i>energy harvesting</i>	57
Figura 65: Separador inicial da interface gráfica.....	57
Figura 66: Esquema de ligação do cartão de memória ao microcontrolador.....	58
Figura 67: Formato de dados gravados no cartão de memória	58
Figura 68: Dados recolhidos no teste aos sensores de temperatura.....	59
Figura 69: Resultados do ensaio ao sensor de humidade do ar	60
Figura 70: Teste ao sensor de luminosidade – período entre as 11:00 e as 13:30 (pico de luminosidade).....	61
Figura 71: Teste ao sensor de luminosidade – período entre as 12:30 e as 22:30.....	62
Figura 72: Perfil de consumo do nó de sensores durante a leitura dos sensores	63
Figura 73: Perfil de consumo do nó de sensores durante a transmissão de dados.....	64
Figura 74: Relação entre o perfil de radiação solar e o número médio de horas de sol	65
Figura 75: Painel solar	66
Figura 76: Resultados do teste ao painel solar	67
Figura 77: Exemplo de curva de tensão regulada de entrada em função da corrente de saída para um carregador solar com tensão de potência máxima de 17 V e uma corrente máxima de 2 A (à esquerda); Resultados experimentais para o circuito de Energy Harvesting (à direita)	68
Figura 78: Coluna de sensores montada no exterior	69
Figura 79: Disposição das placas de circuito impresso no interior da caixa na coluna de sensores.....	69

Figura 80: Resultados do ensaio 1.....	70
Figura 81: Resultados do ensaio 2.....	71

Lista de Tabelas

Tabela 1: Tabela comparativa de algumas das RTDs mais comuns	11
Tabela 2: Comparação entre sensores de temperatura integrados	13
Tabela 3: Comparação entre os sensores fotométricos mais usados.....	24
Tabela 4: Resumo das características das soluções descritas.....	33
Tabela 5: Comparação entre tecnologias sem-fios	36
Tabela 6: Possíveis soluções e problemas resultantes do uso das mesmas	41
Tabela 7: Descrição dos vários tipos de mensagem diferentes	50
Tabela 8: Teste ao circuito de condicionamento do sensor de humidade do solo.....	60
Tabela 9: Níveis médios de luminosidade no exterior	61
Tabela 10: Condições dos ensaios realizados no exterior.....	68
Tabela 11: Análise de custos dos componentes essenciais ao sistema	73

Lista de abreviaturas e acrónimos

AC	Alternate Current; Corrente Alternada
ADC	Analog-to-digital Converter
CI	Circuito Integrado
CO ₂	Dióxido de Carbono
CRC	Cyclic Redundancy Check
DC	Direct Current; Corrente Contínua
DS	Datasink
G	Gateway
IDE	Integrated Development Environment
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LDR	Light Dependent Resistor
NTC	Negative Temperature Coefficient
PAR	Photosynthetically Active Radiation
RH	Relative Humidity; Humidade Relativa
RTD	Resistive Temperature Detector
SDI	Subsurface Drip Irrigation
SPI	Serial Peripheral Interface
TDR	Time Domain Reflectometry
TL	Terminal Local
UV	Ultravioleta

1. Introdução

1.1. Motivação

A indústria de estufas é a que está em maior expansão entre todas as atividades relacionadas com a agricultura. Isto deve-se maioritariamente ao facto de o ambiente interior de uma estufa estar isolado do ambiente exterior, permitindo o desenvolvimento de culturas em locais ou condições ambientais que não seriam os mais adequados ao seu crescimento [1].

É do maior interesse dos proprietários de estufas medir e controlar as suas variáveis internas para conseguirem obter um crescimento mais rápido das culturas, mantendo a sua saúde; ou seja, manter essas variáveis próximas do seu valor ideal. Este controlo permite uma maior independência da estufa em relação aos parâmetros ambientais exteriores, pois o ambiente interior da estufa é controlado artificialmente. Além disso, tal controlo pode contribuir, na maioria dos casos, para uma poupança energética muito significativa.

As soluções mais convencionais, ainda utilizadas em algumas estufas comerciais, usam um único ponto para efetuar as medições necessárias (temperatura e humidade do ar, no mínimo). Contudo, hoje em dia, com o aumento das dimensões das estufas comerciais, esta abordagem deixa de ser adequada pois os parâmetros podem variar de forma muito significativa com a distância ao ponto de medida. É, então, necessário um sistema em que as medições sejam efetuadas em vários pontos. Esta abordagem não pode implicar um aumento significativo dos custos. Com os tradicionais sistemas cablados e com sensores com interfaces proprietárias, estes dois critérios costumam ser mutuamente exclusivos. Põe-se portanto a hipótese de se desenvolver uma solução inovadora de aquisição de dados sem-fios que responda a esta nova necessidade de forma eficiente, tanto a nível de monitorização como a nível económico.

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e ensaio de um sistema versátil de aquisição de dados para fazer o controlo dos parâmetros ambientais no interior de uma estufa agrícola. Por sistema entende-se todo o *hardware* necessário incluindo eletrónica de condicionamento de sinal para os sensores, um sistema de recolha de energia solar e um sistema de registo de dados em cartão memória. Inclui também o desenvolvimento de uma interface gráfica para o utilizador.

Pretende-se que o sistema desenvolvido seja viável tanto a nível tecnológico como económico. Pretende-se também, no futuro, corroborar um modelo teórico de uma estufa através dos dados recolhidos com o auxílio deste sistema.

1.3. Estrutura

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. Este capítulo, o primeiro, é um capítulo introdutório em que se dá a conhecer a motivação do trabalho, assim como os principais objetivos.

No segundo capítulo é efetuada uma descrição breve de uma estufa agrícola do ponto de vista de controlo, incluindo um estudo relativo a atuadores e sensores.

O terceiro capítulo descreve algumas soluções comerciais já utilizadas no meio industrial assim como os desenvolvimentos mais relevantes na área do meio académico. É também efetuada uma discussão sobre as soluções descritas, posicionando este trabalho no mercado.

O quarto capítulo descreve as escolhas efetuadas a nível tecnológico e são descritas as soluções de *hardware* e *software* desenvolvidas no âmbito desta dissertação. São também definidos os protocolos de comunicação estudados.

No quinto capítulo são descritos os ensaios a todo o sistema e são apresentados os resultados. São também apresentadas uma análise de consumo e uma análise económica.

Finalmente, o sexto e último capítulo encerra esta dissertação com uma nota conclusiva onde se faz um resumo do trabalho realizado até ao momento. Neste capítulo também são apresentadas algumas ideias para o trabalho que se podem introduzir no futuro.

2. Princípios de monitorização e controlo de uma estufa

2.1. Caracterização de uma estufa agrícola

Apesar de esta dissertação não abordar os processos de controlo numa estufa, focando-se apenas no sistema de aquisição de dados, o conhecimento das variáveis do modelo climático é essencial pois são essas as variáveis que se pretendem medir. A Figura 1 representa as entradas, saídas e perturbações de uma estufa agrícola. Considera-se, portanto, que o clima de uma estufa pode ser definido por um conjunto finito de variáveis ambientais: temperatura, humidade, radiação fotossinteticamente ativa, concentração de CO₂ e humidade do solo (no interior da estufa). Como a estufa não é um sistema completamente isolado, admite-se também que as variáveis ambientais no exterior interagem com o sistema estufa, dando origem a perturbações. Finalmente, é conhecido que uma estufa moderna possui um conjunto de dispositivos que servem para condicionar o seu ambiente interior.

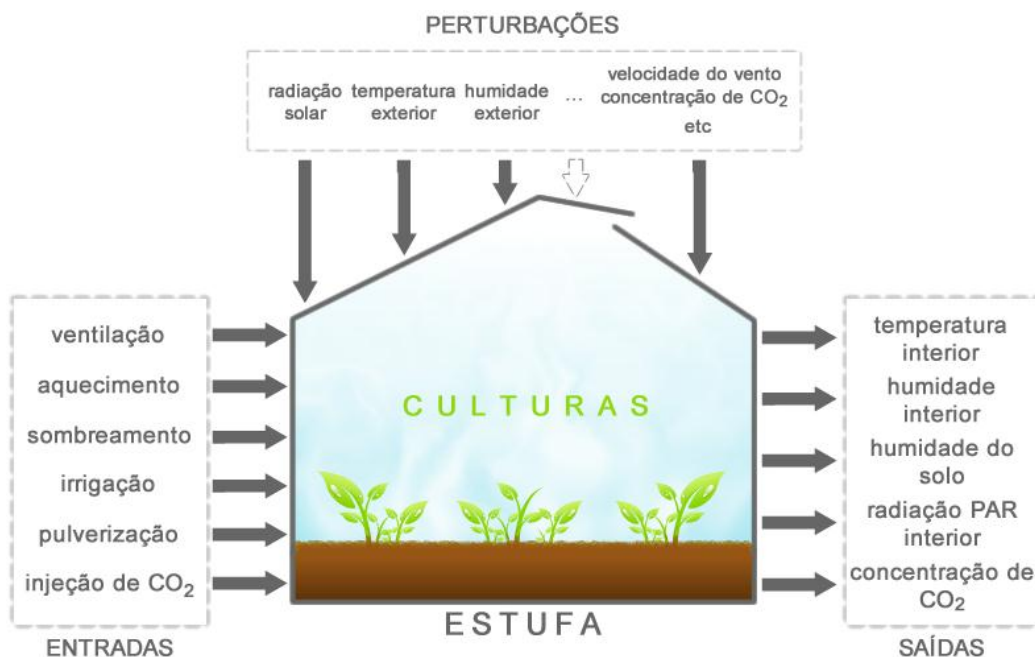


Figura 1: Representação gráfica das entradas e saídas do modelo de uma estufa (Adaptado de [2] e [3])

Fazem parte destes dispositivos os sistemas de ventilação, cujo propósito é a diminuição da humidade relativa do ar no interior da estufa, baixar a temperatura e fazer trocas de CO₂ com o ambiente exterior. A quantidade de ventilação necessária na estufa depende em grande parte do ambiente exterior: nos meses de inverno a ventilação serve essencialmente o propósito de baixar a humidade do ar interior com a entrada de ar seco e frio vindo do exterior; nos meses de verão serve principalmente para baixar a temperatura interior [4]. As estufas podem também possuir sistemas de aquecimento para elevar a temperatura quando a radiação solar não é suficiente, e sistemas de pulverização para baixar a temperatura ou aumentar a humidade do ar interior. Um sistema de sombreamento ou cortinas pode ser necessário para controlar o nível de radiação a que as plantas estão sujeitas ou até para baixar a temperatura na estufa. É também de grande importância a existência de um sistema de irrigação para manter o solo húmido e, em alguns casos, pode ser necessário também um sistema de injeção de CO₂ para estimular o crescimento das plantas.

Como se pode verificar pelas descrições anteriores, a alteração de uma das variáveis de entrada pode ter influência em mais do que uma variável de saída. Isto faz com que seja extremamente difícil fazer um controlo manual, além de que os próprios custos de mão-de-obra constituem um obstáculo à sustentabilidade económica da estufa [1]. Assim sendo, a melhor opção (a nível económico e de controlo) é utilizar um sistema de controlo automático. É então necessário um conhecimento mais aprofundado dos sistemas que compõem uma estufa para que se possa escolher a melhor forma de atuar sobre eles em função das variáveis ambientais medidas dentro da estufa.

2.2. Atuadores

São, de seguida, descritos os sistemas que constituem o conjunto de atuadores numa estufa agrícola.

2.2.1. Sistemas de ventilação

Existem dois grandes tipos de sistemas de ventilação: ventilação natural e ventilação forçada.

Os sistemas de ventilação natural consistem em janelas laterais e/ou superiores (zenitais) que podem ser abertas a diferentes ângulos. O ar move-se devido a diferenças de pressão que podem ser causadas pelo vento no exterior da estufa, ou devido ao movimento ascendente do ar quente no interior (efeito térmico). Devem sempre existir aberturas zenitais para que a ventilação não dependa apenas do movimento do ar no exterior.

A abertura/fecho das janelas é efetuado através da utilização de um motor de corrente alterna e o angulo de abertura é determinado por um controlador em função das variáveis climatéricas na estufa [3].

Os sistemas mecânicos usam ventiladores elétricos para forçar o movimento do ar. Os ventiladores são, geralmente, de grande diâmetro e baixa velocidade. Existem várias estratégias para a colocação e utilização dos ventiladores. A estratégia mais simples consiste em colocar um ventilador na zona superior de uma parede da estufa ou até mesmo na cobertura para expelir o ar para o exterior, obrigando ar exterior a entrar através de aberturas nas laterais.

2.2.2. Sistemas de aquecimento

Existe uma grande diversidade de fontes de energia geradoras de calor para as estufas agrícolas: combustão de combustíveis fósseis, biomassa, madeira ou palha, energia geotérmica, energia solar, calor proveniente da indústria ou eletricidade. No entanto existem, atualmente, apenas duas formas de distribuir esse calor dentro da estufa: distribuição por ar ou por água [5].

Apesar da grande diversidade de sistemas geradores de calor, aqueles que mais se utilizam hoje em dia ainda são os sistemas por combustão [6]. Isto porque a combustão de combustíveis fósseis ou biomassa resulta numa grande energia térmica para o sistema, ao contrário dos outros sistemas [5].

Nos sistemas com aquecimento por ar este é aquecido num gerador de combustão direta ou indireta (com permutador de calor) [6]. A diferença entre os dois é que no primeiro caso o ar é aquecido por combustão e injetado diretamente na estufa enquanto no segundo caso a combustão ocorre numa câmara isolada com escape, aquecendo o ar que será injetado na estufa quando este passa por um permutador de calor. Um ventilador empurra o ar quente para o sistema de distribuição que consiste em mangas de plástico perfurado colocadas junto às culturas [5].

Quando a distribuição é efetuada por água, esta é aquecida numa caldeira e conduzida pela estufa através de um sistema de tubagens. A estufa aquece por transferências térmicas entre as tubagens com água quente e o ar. A água pode circular nas tubagens devido ao desnível entre a caldeira e a distribuição, ou pode ser bombeada por motores-bomba elétricos [6].

2.2.3. Sistemas de sombreamento

Os sistemas de sombreamento baseiam-se em telas que podem ser estendidas ou recolhidas por um motor de corrente alterna com cremalheira e engrenagens. Na maioria dos casos pretende-se que as telas estejam completamente estendidas ou recolhidas para evitar que zonas da plantação cresçam mais que outras [3]. Por este motivo costuma ser suficiente a inclusão de sensores de final de curso, dispensando um controlo em malha fechada visto que não

é necessário saber a posição da malha durante o seu movimento (mas apenas quando é atingida uma das extremidades).

2.2.4. Sistemas de irrigação

O risco de doenças das culturas aumenta quando é usado um método de irrigação que molha a folhagem [7]. Assim sendo, os métodos mais adequados de irrigação numa estufa são a micro-rega (em especial a irrigação gota a gota tanto acima como abaixo da superfície) e a sub-irrigação. No entanto ainda existem estufas que usam a tradicional irrigação por aspersão que, além de molharem a folhagem, gastam mais água comparativamente com os sistemas referidos anteriormente.

Um sistema de irrigação gota a gota, também chamado de irrigação por gotejamento, é composto por filtro(s), regulador(es) de pressão e electroválvula(s) para abrir ou fechar a conduta de água e uma rede de distribuição que conduz a água até às plantas. A rede de distribuição consiste numa rede de tubos em que os tubos de última ordem (tubos laterais) têm a função de distribuir água uniformemente através de emissores (gotejadores ou tubagens emissoras) ou orifícios. Estes sistemas podem conter também misturadores de fertilizantes [8].

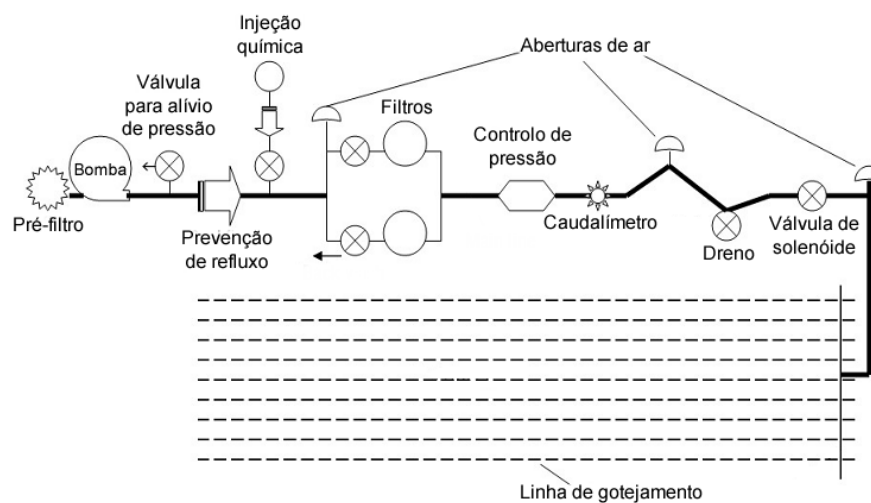


Figura 2: Exemplo de sistema de irrigação gota a gota
(Adaptado de [9])

Os sistemas de irrigação gota-a-gota abaixo da superfície (SDI – *Subsurface Drip Irrigation*) funcionam da mesma forma que os sistemas gota a gota tradicionais, com a diferença que os emissores se encontram enterrados no solo próximos da zona da raiz das plantas [10].

A sub-irrigação ou rega por capilaridade é o nome da família dos sistemas de irrigação que fornecem água à planta por baixo do meio de cultivo (solo), sendo depois absorvida pelo solo e pelas plantas de forma ascendente. O excesso de água pode ser recolhido e reutilizado. Este tipo de rega é essencialmente usada como método de rega para plantas em vasos e inclui métodos como [11] [12] [13]:

- Tapetes capilares: são colocados em bancadas forradas a plástico sob os vasos e distribuem a água (normalmente proveniente de tubos de gotejamento colocados sobre o tecido) por efeito capilar. As plantas absorvem a água através de furos na parte inferior do vaso.
- Rega por inundação e drenagem de bancadas ou do piso da estufa: tal como o nome indica, os vasos são colocados em bancadas niveladas ou no piso da estufa (de betão) que são alagados durante um período de tempo e drenados de seguida. Uma variante deste tipo de rega usa bancadas com uma ligeira inclinação em que a água é colocada na extremidade mais elevada, escorre através das bases dos vasos, e é drenada na extremidade oposta.

Todos estes métodos usam bombas e válvulas para fazer o bombeamento e drenagem da água de e para um reservatório ou tanque. Em qualquer um destes sistemas, caso a água seja reutilizada, será necessário passar por um processo de filtração (para remover partículas sólidas) e de tratamento com cloro, luz ultravioleta ou ozono (para prevenir o espalhamento de doenças) [11].

2.2.5. Sistemas de pulverização

Existe um requisito essencial para os sistemas de pulverização: as gotas de água devem ter um diâmetro suficientemente pequeno para que evaporem antes de tocar na superfície das plantas. É possível criar gotas de tamanho adequado de três formas:

- Utilizando difusores que combinam um fluxo de ar com um fluxo de água. Neste caso não são necessárias pressões muito elevadas em cada um dos fluxos, mas é necessário um compressor de ar e tubagem dupla (para o ar e para a água).
- Utilizando difusores de baixa pressão, conseguindo gotas com diâmetro entre 50 a 100 μm .
- Utilizando difusores de alta pressão conseguindo gotas com diâmetros entre 2 e 60 μm . Neste caso, como os orifícios dos difusores têm dimensões muito reduzidas, a água necessita de estar muito limpa e bem tratada para evitar entupimentos.

Os sistemas em si são compostos por um amaciador de água [14] [15], filtros para prevenir entupimentos, um reservatório de água, bombas, válvulas reguladoras de pressão e tubagem com os difusores sobre a plantação [5].

2.2.6. Sistemas de injeção de CO₂

A quantidade de dióxido de carbono numa estufa é importante para manter um nível de produção ótimo e a qualidade das culturas. Uma forma de tentar manter a concentração de CO₂

numa estufa é manter uma boa ventilação. No entanto, este método nem sempre é suficiente, pelo que pode ser necessária a injeção de CO₂.

Existem várias fontes de CO₂, e para cada uma delas o método de utilização é diferente. Um dos métodos mais usados são a combustão de hidrocarbonetos, cujo produto é maioritariamente o dióxido de carbono e a água [16]. Como este método produz calor, funciona também como sistema de aquecimento e é em tudo idêntico ao sistema de aquecimento de ar por combustão direta. É necessário, no entanto, ter em atenção que não devem ser usados combustíveis como o carvão ou o petróleo devido à formação de dióxido de enxofre durante a sua combustão [6]. Uma boa circulação de ar é essencial para evitar concentrações de CO₂ diferentes em toda a área da estufa, pelo que a maior parte dos sistemas comerciais têm uma ventoinha incluída.

2.3. Sensores

Esta secção tem como objetivo fazer um estudo comparativo entre diferentes tecnologias usadas para a medição dos vários parâmetros ambientais necessários ao controlo dos sistemas que constituem uma estufa, para que seja feita uma escolha adequada de sensores a utilizar no âmbito deste trabalho¹. Para isso é também necessário saber entre que valores podem variar esses parâmetros ambientais. Os valores abaixo indicam os valores ótimos das grandezas a serem medidas.

- Temperatura (dia; noite): 22 a 28°C; 15 a 20°C (nunca abaixo de 0°C nem acima de 35-40 °C) [5]
- Humidade (ar; solo): 70 a 90% [5]; 10 a 30 cBars [17]
- Radiação (fotossinteticamente ativa): 400 a 700 nm [18]

2.3.1. Sensores de temperatura

Existem vários tipos de sensores de temperatura baseados em princípios de funcionamento distintos. A figura abaixo mostra as curvas características de saída dos quatro tipos de sensores de temperatura mais comuns. Esses sensores são os termopares, os sensores resistivos ou RTDs (Resistive Temperature Detectors), os termístores com coeficiente de temperatura negativo ou NTC (Negative Temperature Coefficient) e os sensores em circuito integrado (CI).

¹ Todos os valores monetários apresentados durante este estudo foram consultados de farnell.com e digikey.com

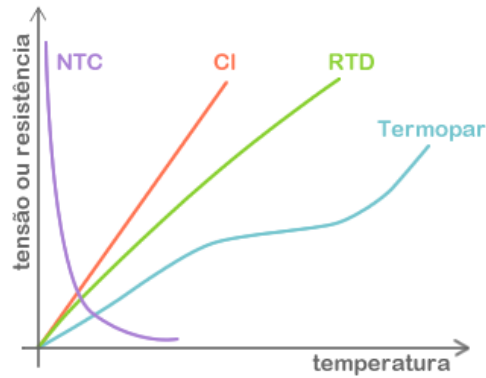


Figura 3: Curvas características de vários sensores de temperatura
(Adaptado de [19])

Os princípios de funcionamento de cada sensor, assim como métodos de medição usados e exemplos de utilização são descritos de seguida.

2.3.1.1. Termopares

Os termopares são sensores de temperatura baseados no efeito de Seebeck: num circuito fechado formado por duas junções de materiais condutores diferentes circula uma corrente que se deve à existência de uma força eletromotriz que é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre as duas junções. Assim sendo, um termopar não faz uma leitura de temperatura absoluta, mas sim uma leitura do gradiente de temperatura entre uma junção de referência (junção fria) e outra junção onde se pretende saber a temperatura (junção quente).

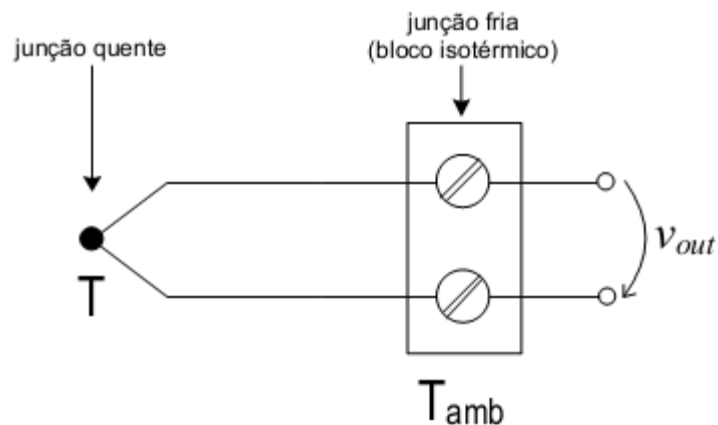


Figura 4: Representação de um termopar

Devido ao modo de funcionamento de um termopar é necessário fazer o que se chama de compensação de junção fria de modo a obter a temperatura absoluta na junção quente. Esta compensação consegue-se sabendo a temperatura da junção fria e pode ser feita por hardware ou software. A Figura 5 exemplifica o caso de uma compensação por software feita num microcontrolador: sabendo a temperatura da junção fria, conseguida através de um sensor de

temperatura embutido no bloco isotérmico, é possível saber a temperatura absoluta na junção quente medindo a tensão gerada pelo termopar (ou seja, o gradiente térmico).

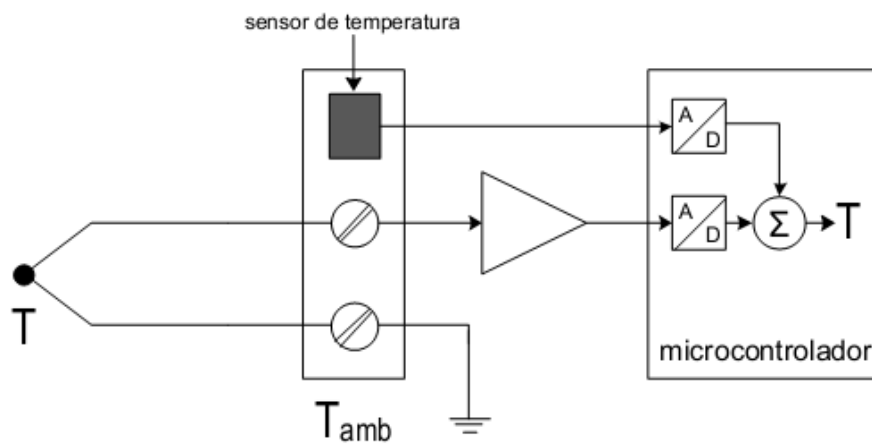


Figura 5: Exemplo de compensação de junção fria por *software*

Como a utilização de um termopar pressupõe a utilização de outro sensor de temperatura para a obtenção da temperatura da junção fria, estes são especialmente úteis para medir temperaturas que se encontram fora das gamas de medida dos outros sensores. Dependendo do tipo do termopar, ou seja, dos metais que o constituem, estes podem medir temperaturas entre os $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e os $2315\text{ }^{\circ}\text{C}$ [20]. Como suportam temperaturas muito elevadas e são muito resistentes, os termopares são usados em grande escala no meio industrial. O custo de um sensor deste tipo varia muito com o encapsulamento pretendido e com o próprio tipo de termopar, podendo variar entre uma dezena e uma centena de euros.

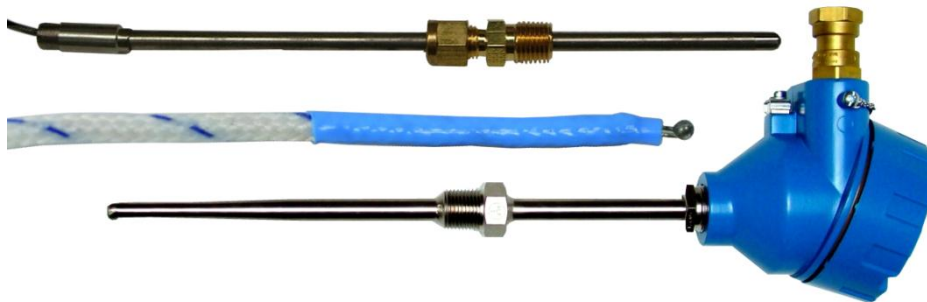


Figura 6: Termopares

Os termopares não são adequados para medir temperaturas próximas da temperatura da junção de referência, pois a tensão de saída nesse caso é muito pequena dando origem a erros possivelmente elevados.

2.3.1.2. RTDs

Trata-se de um sensor cuja resistência varia com a temperatura. São geralmente construídas por um substrato cerâmico revestido com um filme fino de metal, embora existam outras configurações. Este tipo de sensor baseia-se no princípio de que os metais têm um

coeficiente de temperatura positivo e conhecido, ou seja, à medida que a temperatura aumenta, também aumenta a sua resistividade. A grande maioria das RTDs é feita de platina, pois é o metal que proporciona uma maior gama de temperatura. As RTDs (de platina) mais usadas a nível industrial têm uma resistência nominal de 100 Ω a 0 °C – sensores Pt100 [21].



Figura 7: Pt100

No entanto existem outras RTDs feitas de metais diferentes e com outras temperaturas base. A Tabela 1 mostra as características principais de algumas das RTDs mais comuns.

Sensor	Metal	Resistência base	Gama de temperaturas	Coefficiente de temperatura ($\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$) ²
Pt100/Pt1000	Platina	100 Ω /1000 Ω a 0 °C	-200 a 650 °C ³	0.003850 ⁴
Ni120	Níquel	120 Ω a 0 °C	-100 a 205 °C	0.00672
Cu10	Cobre	10 Ω a 25 °C	-100 a 260 °C	0.00427

Tabela 1: Tabela comparativa de algumas das RTDs mais comuns (Retirado de [20])

Uma vez que a RTD é um elemento passivo, é necessário excitá-la com uma corrente conhecida para se poder efetuar uma medição em tensão aos seus terminais. Aplica-se depois a Lei de Ohm para se obter o valor da resistência. As RTDs têm uma característica quase-linear, o que facilita o processo de conversão entre a tensão lida e o valor de temperatura. Para aplicações que requerem maior exatidão existem outros métodos para a determinação da temperatura numa RTD que incluem aproximações polinomiais ou a utilização da equação de Callendar-Van Dusen [22], outro modelo matemático não-linear largamente utilizado na conversão resistência-temperatura em RTDs de platina.

² O coeficiente de temperatura (α) traduz a diferença de resistência por °C em relação à temperatura base ($\alpha = \frac{\Delta R}{R_{base}} / ^\circ\text{C}$)

³ Algumas RTDs de Platina estão especificadas até 800°C para certas aplicações

⁴ Existem vários *standards* que especificam coeficientes de temperatura diferentes para as RTDs de platina [105].

Um dos problemas que geralmente advém do uso de uma RTD é o facto de o sensor poder estar relativamente longe do ponto de medida, fazendo com que a resistência dos condutores deixe de ser desprezável, aparecendo em série com a resistência do sensor. Para contornar esse problema, a medição deve ser feita a três ou quatro fios. Além disso, a corrente que passa no sensor provoca aquecimento por efeito de Joule. Assim sendo, essa corrente deve ser o mais pequena possível para evitar erros de leitura, o que pode levar a tensões de saída de muito baixa amplitude, podendo ser necessário algum tipo de amplificação.

Tomando por exemplo as RTDs de platina, ao utilizar uma Pt1000 em vez de uma Pt100 consegue-se minimizar os erros introduzidos pelos condutores pois as Pt1000 têm uma variação de resistência efetiva por °C superior às Pt100 (o que também faz com que se consiga uma melhor resolução de leitura).

A nível de custo, as RTDs situam-se no mesmo patamar que os termopares.

2.3.1.3. Termístor

Os termístores, tal como as RTDs, são sensores cuja resistência varia com a temperatura. No entanto, ao contrário das RTDs, os termístores são construídos a partir de materiais semicondutores. Geralmente os termístores apresentam um coeficiente de temperatura negativo (NTC). Os NTCs, apesar de serem extremamente não-lineares, são o sensor de temperatura com maior sensibilidade, pois a sua característica exponencial faz com que uma pequena variação de temperatura provoque uma grande variação na sua resistência. No entanto, essa mesma característica faz com que os termístores tenham uma gama de medição mais curta que os termopares e as RTDs, tipicamente entre os -100 °C e os 300 °C [20].



Figura 8: Termístores

Para se converter a resistência em temperatura num termístor pode-se aproximar a curva característica do termístor com um modelo matemático. O modelo mais usado é a equação de Steinhart-Hart, um modelo de terceira ordem, que consegue erros de temperatura na ordem dos ± 0.02 °C [23].

Ao contrário dos sensores anteriores, os termístores são sensores frágeis e, devido às suas reduzidas dimensões, especialmente suscetíveis a problemas de auto aquecimento. Os termístores mais baratos chegam a custar cêntimos e os mais caros situam-se na ordem da meia centena de euros.

2.3.1.4. Circuito Integrado

Os sensores em circuito integrado (CI) estão disponíveis com saídas em tensão, ou corrente, linearmente proporcional à temperatura. Os sensores com saída em corrente são especialmente úteis para leituras remotas, pois contornam os problemas de quedas de tensão nos condutores que seriam problemáticos nos sensores com saída em tensão. Existem também sensores do tipo CI que disponibilizam o valor da temperatura em formato digital.

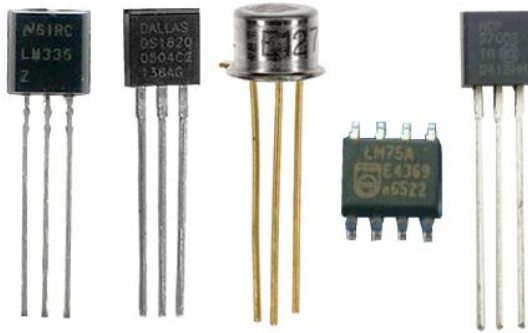


Figura 9: Sensores de temperatura integrados (da esquerda para a direita: LM335, DS1820, AD590, LM75A, MCP9700)

Como se tratam de sensores construídos com materiais semicondutores, tal como os termístores, têm uma gama de temperatura limitada, geralmente de -55 °C a 150 °C. No entanto são sensores muito fáceis de utilizar e de baixo custo.

A Figura 9 mostra alguns dos sensores integrados de temperatura disponíveis atualmente no mercado. A Tabela 2 mostra, de forma comparativa, alguma das características mais relevantes dos sensores de temperatura da Figura 9.

Sensor	Saída	Gama	Coefficiente de Temperatura	Precisão	Preço ⁵
LM335	Tensão	-40 a 100 °C	10 mV/°C	±1 °C	0.55 €
DS18S20	Digital (1-wire)	-55 a 125 °C	-	±0.5 °C / ±2 °C	6.59 €
AD590	Corrente	-55 a 150 °C	1 µA/°C	±0.5 °C	11.40 €
LM75A	Digital (2-wire)	-55 a 125 °C	-	±2 °C / ±3 °C	0.72 €
MCP9700	Tensão	-40 a 125 °C	10 mV/°C	±4 °C	0.29 €

Tabela 2: Comparação entre sensores de temperatura integrados (Informação retirada de [24], [25], [26], [27] e [28])

⁵ Valor mais baixo (independentemente do encapsulamento) para uma unidade em www.farnell.com

2.3.2. Sensores de humidade do ar

A humidade é a medida da quantidade de vapor de água presente no ar. No entanto, essa quantidade pode ser expressa em termos de humidade absoluta, humidade relativa ou temperatura de ponto de orvalho.

A humidade absoluta representa o rácio entre a massa de vapor de água presente no ar e o volume de ar húmido considerado e é normalmente expressa em gramas por metro cúbico (g/m^3) [29].

A humidade relativa (RH) corresponde à razão entre a massa de vapor de água presente no ar e a massa de vapor de água que seria necessária para o ar saturar (este valor varia com a temperatura) [30].

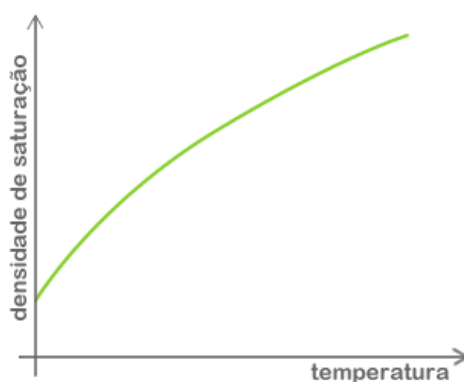


Figura 10: Dependência da densidade de vapor de água de saturação com a temperatura (Adaptado de [31])

A humidade relativa representa-se em percentagem (%), sendo que 0% corresponde a ar seco e 100% ao ar saturado. Como a quantidade de vapor de água necessária para saturar o ar aumenta com a temperatura (Figura 10), à medida que a temperatura aumenta o valor de humidade relativa diminui para a mesma quantidade de vapor de água no ar.

A temperatura de ponto de orvalho é a temperatura até à qual uma parcela de ar deve ser arrefecida para que a água nela presente na forma de vapor de água passe ao estado líquido (condensação) [32]. Trata-se de uma medida de humidade através da relação inversa à presente na Figura 10: a dependência da temperatura de ponto de orvalho com a densidade de vapor de água no ar.

2.3.2.1. Higrómetro de bolbo-seco e bolbo-molhado (psicrómetro)

Um dos primeiros métodos de medir a humidade relativa baseia-se no princípio do arrefecimento por evaporação: quando a água evapora retira energia sob a forma de calor do meio envolvente, ou seja, provoca o arrefecimento do meio [33].

Os higrômetros de bolbo seco – bolbo molhado foram desenhados com base neste princípio. Consistem em dois termômetros iguais, um deixado ao ar (bolbo seco) e outro envolvido numa manga de gaze humedecida (bolbo molhado). O objetivo é fazer com que o bolbo molhado esteja em evaporação constante, indicando portanto uma temperatura inferior à do bolbo seco. A diferença de temperaturas entre o bolbo seco e o bolbo molhado é tanto maior quanto menor for a humidade do ar [32]. Isto acontece porque quanto mais longe o ar estiver da saturação maior a quantidade de água que consegue absorver por evaporação, logo maior é o arrefecimento provocado. Quando o ar estiver saturado a diferença de temperatura entre os dois termômetros é nula [33].

Existem tabelas que contêm o valor de humidade relativa para vários valores de diferença de temperatura entre o bolbo-seco e o bolbo-molhado. Um exemplo de uma tabela deste tipo encontra-se em [34]. Também é possível fazer o cálculo algebricamente usando as fórmulas algébricas em [32].

2.3.2.2. Sensores capacitivos

Os sensores capacitivos são constituídos por uma película fina de um polímero ou óxido metálico depositada entre elétrodos metálicos num substrato cerâmico ou de vidro. Este tipo de sensores mede humidade relativa.

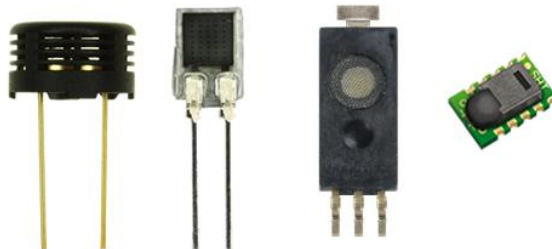


Figura 11: Sensores de humidade do ar capacitivos (da esquerda para a direita: HS1101LF, HCH-1000, HIH-5031, SHT10)

Estes sensores funcionam até altas temperaturas (200 °C), têm um baixo coeficiente térmico, possuem alguma resistência a vapores químicos e recuperam bem da condensação.

O aumento da humidade do meio provoca um aumento da constante dielétrica do sensor. Assim, um circuito de leitura típico deste tipo de sensores consiste num circuito ressonante em que o sensor é o elemento capacitivo, onde se medem alterações na frequência que se relacionam com as alterações da capacidade do circuito. Estas alterações de capacidade apenas podem acontecer devido a alterações da constante dielétrica e, conseqüentemente, da humidade do ar.

A Figura 11 mostra alguns sensores de humidade do ar capacitivos. Os sensores HS1101LF e HCH-1000 são sensores capacitivos puros e com gamas de saída entre 161.6 pF e 193.1 pF (HS1101LF) e entre os 297 pF e os 357 pF (HCH-1000) [35] [36]. O sensor HIH-5031 é um sensor

com condicionamento de sinal on-chip com saída em tensão tipicamente entre os 0.5 V e os 2.6 V quando alimentado a 3.3 V [37]. Finalmente, o sensor SHT10 é um sensor capacitivo com saída digital com precisão de $\pm 4.5\%RH$ [38].

Estes sensores são usados em grande escala em aplicações industriais e comerciais.

O custo de um sensor de humidade relativa capacitivo varia sensivelmente entre a meia dezena e a meia centena de euros.

2.3.2.3. Sensores resistivos

Os sensores resistivos funcionam sobre o princípio de que a resistência de um substrato varia com a variação da humidade relativa: a impedância do substrato relaciona-se com a humidade do meio de forma inversamente proporcional [39].

O processo de fabrico de um sensor de humidade resistivo consiste em depositar metais nobres num substrato coberto com um polímero condutor ou sal, ou em enrolá-los à volta de um cilindro de plástico ou vidro [39].

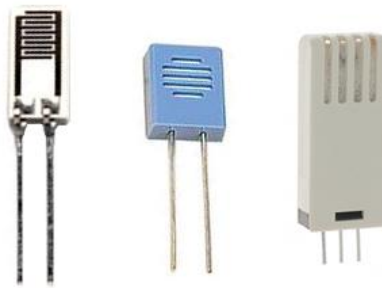


Figura 12: Sensores de humidade do ar resistivos (da esquerda para a direita: HCZ-D5, HS15P, CHS-MSS)

A Figura 12 mostra três exemplos de sensores resistivos. Os sensores HCZ-D5 e HS15P leem humidades relativas entre 20% e 90%, com impedâncias entre os 6300 k Ω e os 2 k Ω no caso do HCZ-D5, e entre os 8000 k Ω e os 0.8 k Ω no caso do HS15P [40] [41]. O sensor CHS-MSS mede humidades entre os 5% e os 95% e tem saída em tensão entre 0 V e 1 V [42].

Os sensores resistivos têm várias desvantagens quanto comparados com os sensores capacitivos [43]: apresentam um tempo de recuperação lento após serem expostos a uma quantidade elevada de humidade (logo não devem ser usados em ambientes com condensação), não medem humidades abaixo dos 20%, a sua estabilidade a longo prazo é inferior, necessitam de excitação AC para prevenir a polarização do sensor e a gama de temperaturas a que resistem é mais curta (-40 °C a 100 °C).

A gama de preços destes sensores é idêntica à dos sensores do tipo capacitivo.

2.3.2.4. Sensores de condutividade térmica

Os sensores de condutividade térmica medem humidade absoluta, ao contrário dos sensores anteriores que medem humidade relativa. Para o fazer, o sensor contém dois termístores iguais, um exposto ao ar e outro encapsulado num ambiente controlado. Quando é aplicada a mesma corrente aos dois termístores, a sua temperatura aumenta. Como o calor é dissipado de forma diferente nos dois termístores, devido à condutividade térmica do meio onde se encontram, a resistência dos dois termístores é diferente. A diferença de resistência dos termístores é proporcional à humidade absoluta do meio [44].

Estes sensores são muito duráveis e conseguem medir humidades em temperaturas até aos 300 °C. São usados essencialmente em processos de secagem industrial, nalguns eletrodomésticos como máquinas de secar roupa ou micro-ondas, e ainda para medir a eficiência de certos processos ou reações cujo produto seja vapor de água, como é o caso da combustão e operação de células de combustível [39].



Figura 13: Sensor de humidade absoluta baseado no princípio da condutividade térmica (ABS-FS11)

A Figura 13 mostra o sensor ABS-FS11. Trata-se de um sensor baseado neste princípio que mede humidades entre 0 e 130 g H₂O/m³. O sensor possui saída em tensão [45].

2.3.3. Sensores de humidade do solo

2.3.3.1. Tensiómetro

Os tensiómetros são equipamentos de medição de humidade do solo constituídos por um tubo com uma cápsula porosa na base e uma tampa no topo, e um medidor de vácuo. O tubo deve conter água que vai ser sugada pelo solo à medida que este perde humidade, através do copo poroso. Assim forma-se vácuo no interior do tubo que é medido pelo medidor de vácuo, oferecendo uma medida do nível de humidade do solo: quanto mais seco, maior o vácuo formado no tubo. No entanto, o próprio sensor é uma fonte de água à medida que o solo seca.

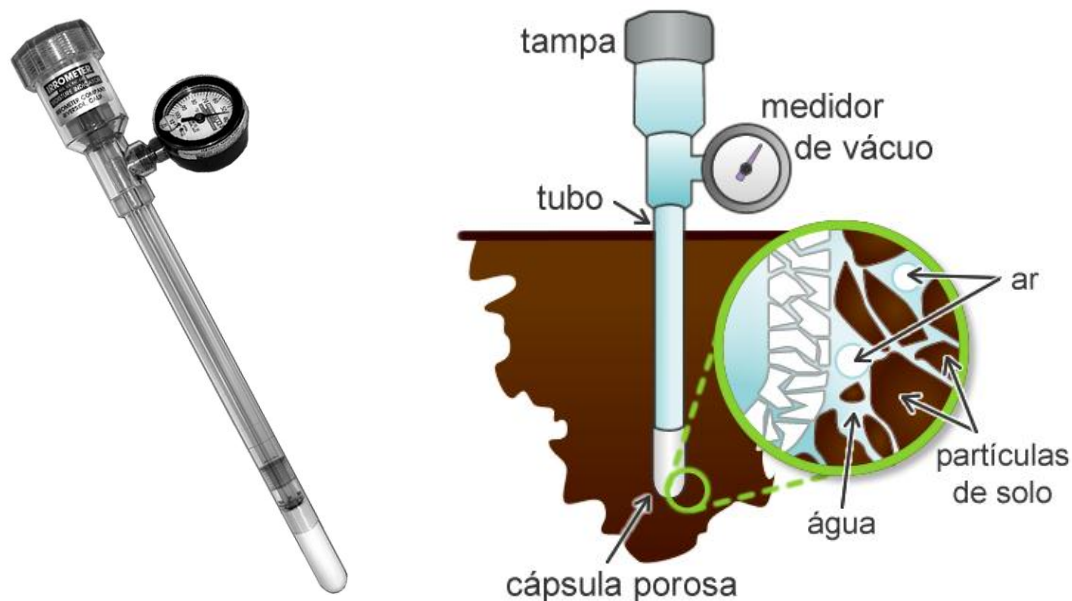


Figura 14: Tensiómetro (à esquerda); princípio de funcionamento de um tensiómetro (à direita)
(Adaptado de [46])

Os sensores deste tipo têm necessidade de reposição da água no tubo e são essencialmente usados para medidas esporádicas não sendo adequados para um sistema de baixa manutenção.

2.3.3.2. Sensor resistivo

Os sensores resistivos consistem em dois eléctrodos embutidos num bloco de um material poroso. A medição é possível pois a resistência entre os eléctrodos depende do conteúdo de água presente no bloco: quanto mais molhado estiver o bloco, menor a resistência. Ao contrário dos tensiómetros, os sensores resistivos não requerem manutenção, mas têm um tempo de vida curto (3 a 5 anos) devido ao desgaste do bloco poroso [47].

Para minorar os efeitos negativos da utilização dos sensores resistivos foram desenvolvidos os chamados sensores resistivos de matriz granular que possuem como vantagens sobre os sensores resistivos tradicionais os factos de terem um tempo de vida maior e serem menos sensíveis à salinidade do solo. Isto é conseguido à custa de uma membrana sintética, uma rede de aço inoxidável e uma protecção de borracha que envolvem o material de referência (bloco poroso) [48].



Figura 15: Bloco de gesso (à esquerda); Sensor de matriz granular WATERMARK (à direita)

Para se efetuar uma medição com um sensor deste tipo é necessário fornecer-lhe uma excitação AC para que não ocorra eletrólise, o que comprometeria a medição de humidade devido à formação de bolhas de ar na superfície do sensor.

2.3.3.3. Sensor capacitivo

Estes sensores funcionam sobre o mesmo princípio que os sensores capacitivos de humidade do ar: as alterações da constante dielétrica do solo devem-se maioritariamente ao conteúdo de água do mesmo, sendo assim possível medir a humidade do solo. Os sensores capacitivos consistem num par de eléctrodos que, juntamente com o solo (dielétrico) formam um condensador.



Figura 16: Sensor de humidade do solo capacitivo Vernier
(Retirado de [49])

A leitura de um sensor deste tipo é idêntica também à leitura de um sensor capacitivo de humidade do ar: um circuito ressonante em que o sensor é o elemento capacitivo para detetar alterações na frequência ressonante que se relacionam com o conteúdo de água do solo.

2.3.3.4. TDR (Time Domain Reflectometry)

Estes sensores trabalham sobre o princípio de que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética numa linha de transmissão depende do meio em que esta se encontra. Estes sensores procuram, portanto, saber a permitividade eléctrica do solo, tal como os sensores capacitivos, para calcular a humidade. São constituídos por dois ou mais guias de onda que são inseridos no solo, onde são injetados impulsos eléctricos. Estes impulsos percorrem o

comprimento dos guias de onda e são refletidos de volta. O tempo que demoram a percorrer este caminho é tanto maior quanto maior for a quantidade de água e quanto maior for a constante dielétrica do solo.



Figura 17: Sensor de humidade do solo TDR TRIME-PICO
(Retirado de [50])

Um sistema que use TDR para medir a humidade é composto pelos guias de onda, um gerador de pulsos e um analisador de sinal para medir o tempo que a onda demorou a percorrer os guias. Estes sensores são relativamente dispendiosos pois requerem eletrónica extremamente precisa a nível temporal.

2.3.3.5. Sonda de Neutrões

Uma sonda de neutrões contém uma fonte e um detetor de neutrões. A sonda de neutrões é inserida no solo através de um tubo de acesso e os neutrões são enviados para o solo a alta velocidade. Como os neutrões são do mesmo tamanho que os átomos de hidrogénio, as colisões entre os neutrões rápidos e os átomos de hidrogénio da água presente no solo fazem com que os neutrões percam energia, desacelerem e sejam retornados à sonda. O detetor de neutrões contabiliza estes neutrões lentos. O rácio entre os neutrões rápidos que são emitidos e os neutrões lentos detetados é usado para calcular a humidade do solo.

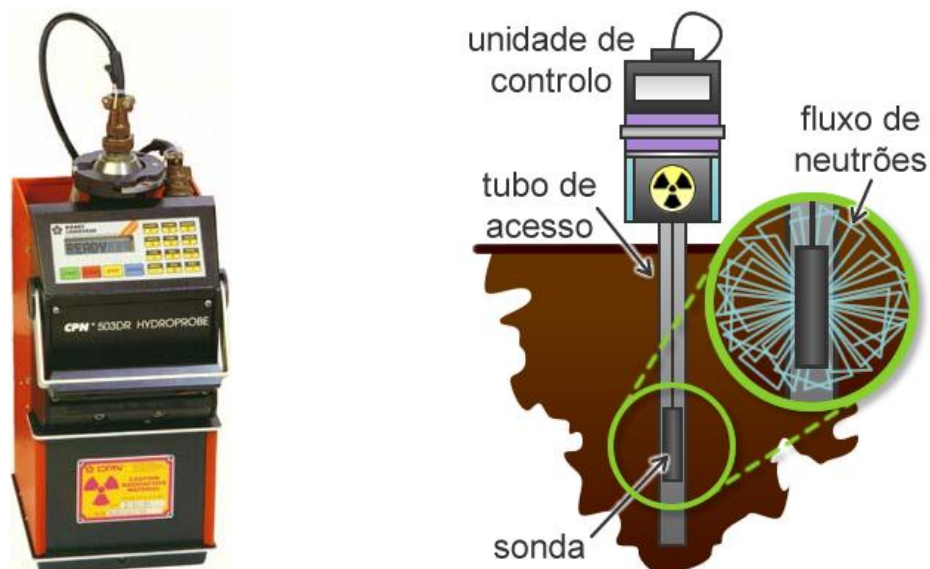


Figura 18: Sonda de neutrões e unidade de controlo Hydroprobe (CPN) (à esquerda); Princípio de funcionamento de uma sonda de neutrões (à direita)
(Adaptado de [51])

Estes sensores são dispendiosos e requerem um manuseamento extremamente cuidadoso visto que contêm material radioativo. É também necessária a existência de tubos de acesso em todos os locais onde se pretenda fazer a leitura.

2.3.4. Sensores de luminosidade/radiação

Para uma boa escolha do sensor de luminosidade, é necessário conhecer que radiação as plantas utilizam para fazer a fotossíntese. A figura seguinte mostra que as plantas utilizam radiação entre os 300 nm e os 700 nm e que são mais sensíveis a luz azul e vermelha. A radiação utilizada pelas plantas para a fotossíntese é denominada de radiação fotossinteticamente ativa ou PAR (Photosynthetically Active Radiation).

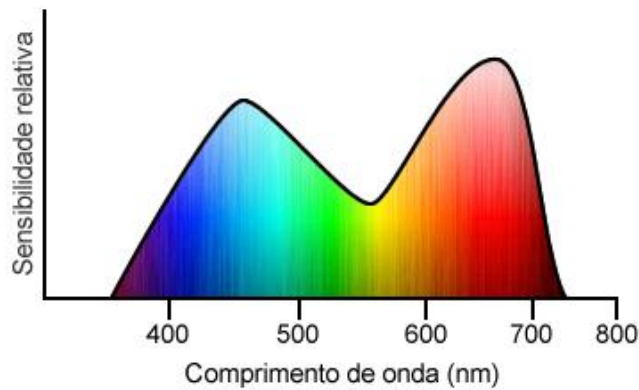


Figura 19: Sensibilidade luminosa das plantas para efeitos de fotossíntese em relação ao comprimento de onda (Adaptado de [18])

2.3.4.1. Sensores PAR

Os sensores PAR são sensores desenhados especificamente para medir radiação fotossinteticamente ativa.



Figura 20: Sensor PAR LI-190 (Retirado de [52])

Como a resposta das plantas à radiação varia significativamente com a espécie, é impossível fazer um sensor com uma resposta espectral perfeita. Assim, os sensores PAR têm uma resposta plana (são igualmente sensíveis) na gama dos 400 nm aos 700 nm, e têm um corte abrupto nesses comprimentos de onda [53].

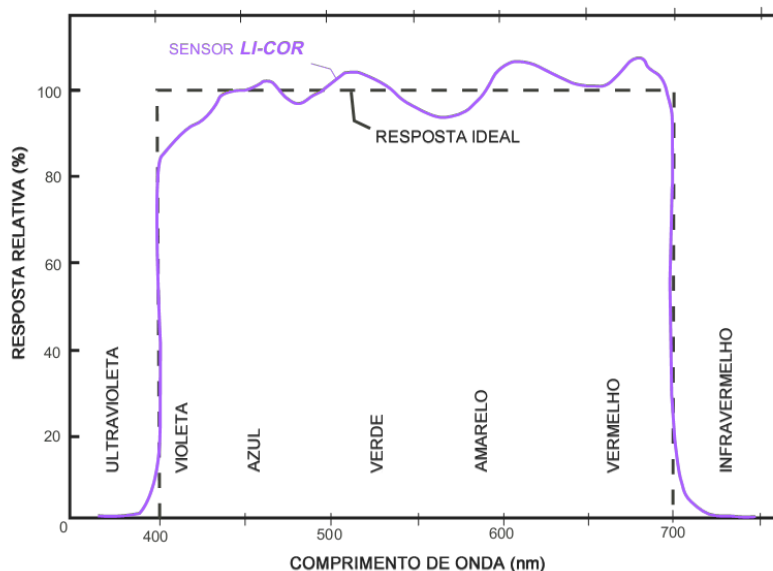


Figura 21: Resposta espectral do sensor LI-190
(Adaptado de [54])

O elemento principal de um sensor deste tipo é um fotodíodo⁶ de silicone. Esta resposta é conseguida com o uso de filtros de vidro coloridos e um filtro de interferência para garantir o corte abrupto nos 700 nm [54].

Apesar de serem os sensores mais indicados para medição de luz em ambientes relacionados com plantas, são também sensores muito dispendiosos (chegam a custar quatro centenas de euros) pelo que se usam maioritariamente em investigação hortícola, em aplicações de laboratório e em estudos de luz. Estes sensores medem o número de fótons incidentes em $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$. [18].

2.3.4.2. Piranómetros

Um piranómetro mede radiação solar total, ou seja, mede radiação ultravioleta, radiação visível e radiação infravermelha (comprimentos de onda entre os 280 nm e os 2800 nm [55]).

São sensores desenhados para medir a radiação recebida por um hemisfério inteiro, e a unidade de medida usada é geralmente o Watt por metro quadrado (W m^{-2}).

⁶ O princípio de funcionamento de um fotodíodo é descrito no ponto 2.3.4.3

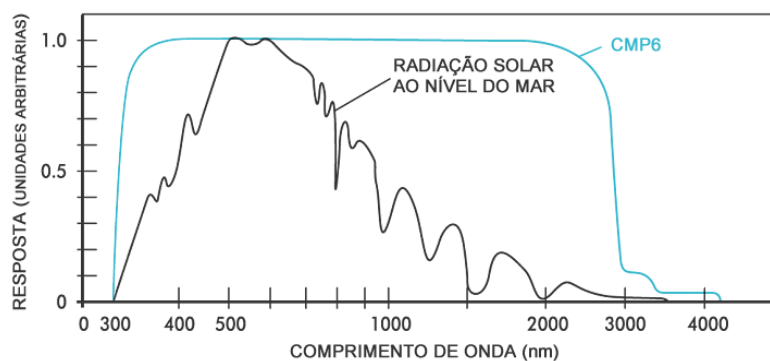


Figura 22: Resposta espectral do piranómetro CMP6
(Adaptado de [56])

Os piranómetros funcionam com base numa termopilha⁷. A radiação (numa gama alargada de comprimentos de onda) é quase totalmente absorvida por uma superfície negra. As junções quentes da termopilha estão localizadas abaixo da superfície negra de receção enquanto as junções frias se encontram acopladas termicamente com a cobertura do piranómetro que funciona como dissipador de calor. A termopilha mede então as diferenças de temperatura sentidas que, por sua vez, se relacionam com a quantidade de radiação recebida [57].



Figura 23: Piranómetro CMP6

Devido às suas características, os piranómetros devem ser usados no exterior e são particularmente úteis em estações meteorológicas. No entanto, quando usados no interior de uma estufa, um piranómetro pode dar indicações da uniformidade da luz que entra na estufa e na quantidade de sombreamento produzida por uma tela [18]. Tal como os sensores PAR, os piranómetros também são sensores dispendiosos, podendo atingir o patamar do milhar de euros.

2.3.4.3. Sensores optoelectrónicos

Os sensores optoelectrónicos, também conhecidos como detetores óticos, são dispositivos eletrónicos que se baseiam em fenómenos fotovoltaicos ou de fotocondutividade observados em junções p-n e materiais semicondutores [58].

⁷ Uma termopilha consiste em vários termopares ligados em série

Destes sensores destacam-se os seguintes:

- Fotodíodo: Um fotodíodo pode ser visto como um díodo comum cuja junção p-n está exposta à luz, gerando uma corrente ou tensão quando incide radiação sobre ele.

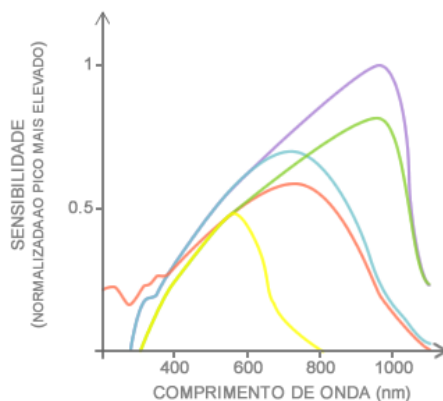


Figura 24: Resposta espectral de vários fotodíodos diferentes (Adaptado de [59])

- Fototransistor: Um fototransistor é um transistor desenhado para receber luz, normalmente numa embalagem transparente.
- LDR (*Light Dependent Resistor*): Trata-se de um material semiconductor cuja resistência diminui com a incidência de luz.

A Tabela 3 mostra as características principais de cada um destes sensores.

Sensor	Fotodíodo	Fototransistor	LDR (CdS)
Imagem ⁸			
Comprimentos de onda (nm)	200-2000	400-1100	400-700
Sensibilidade	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
Linearidade	Excelente	Bom	Bom
Tempo de resposta (ns)	Muito Baixo	Baixo (µs)	Elevado (ms)
Desempenho com ruído	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
Estabilidade	Muito Bom	Bom	Mau

Tabela 3: Comparação entre os sensores fotométricos mais usados (Adaptado de [60] e [61])

⁸ Existem outros tipos de encapsulamento

Os sensores optoelectrónicos são consideravelmente mais baratos que os sensores descritos nos pontos anteriores, custando desde cêntimos a uma dezena de euros (alguns fotodíodos podem custar até uma centena de euros se possuírem filtros coloridos de correção).

3. Estado da arte

Apesar da utilização de tecnologia sem-fios em ambientes industriais ser um tema relativamente recente, existem já no mercado e em fase de investigação vários sistemas sensoriais e de controlo sem-fios que podem ser utilizados em estufas agrícolas. Este capítulo apresenta alguns exemplos de soluções desenvolvidas por terceiros que são relevantes para trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação.

3.1. Soluções comerciais

Existem vários fabricantes de sensores que disponibilizam sensores e *Data Loggers* sem-fios. Existem também algumas empresas da área da automação industrial que estão a fazer um esforço por converter as suas soluções cabladas em equivalentes sem-fios. No entanto, devido aos requisitos de segurança, tempo-real e tolerância a falhas de alguns processos industriais, esta migração tem sido relativamente lenta. Nos pontos seguintes são descritas algumas soluções de empresas que já apresentam soluções sem-fios na área.

3.1.1. *Data Loggers* sem-fios

Como o nome indica, um *Data Logger* é um dispositivo que armazena os dados recolhidos de um sensor para que estes sejam mais tarde transferidos para um computador.

A empresa Campbell Scientific [62], por exemplo, possui uma sonda de humidade do solo sem-fios. A sonda comunica com o *Data Logger* numa frequência entre os 902 e os 918 MHz.

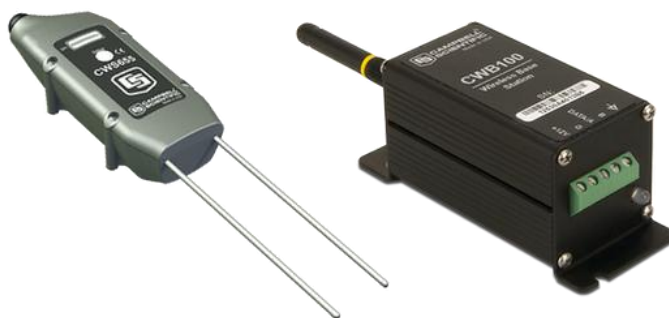


Figura 25: Sonda de humidade do solo e Data Logger da Campbell

Outro exemplo é o caso da empresa T&D [63] que possui na sua gama de produtos um *Data Logger* que, apesar de necessitar de cabos para ser interligado ao(s) sensor(es), consegue comunicar sem-fios com uma estação-base. Por sua vez, essa estação base pode ter uma ligação de USB a um terminal, uma ligação LAN ou comunicação GSM. Os sensores disponibilizados são de temperatura, humidade do ar, luminosidade e intensidade de radiação ultravioleta (UV).



Figura 26: Exemplo de Data Loggers e Base Stations da empresa T&D. Da esquerda para a direita: RTR-574, RTR-503, RTR-500AW/NW, RTR-500

3.1.2. Gemini Data Loggers

A empresa Gemini Data Loggers [64] desenvolveu uma linha com um *Data Logger* sem-fios denominada TinyTag Wireless. Apesar de a empresa denominar o seu recetor de *Data Logger*, na verdade este tem mais funcionalidades que um simples *Data Logger* no sentido em que foi desenhado para comunicar em tempo real com um terminal (a empresa disponibiliza o software necessário para a visualização dos dados) e consegue receber dados de vários sensores distintos. Assim, este sistema é na verdade uma rede de sensores sem-fios. Esta linha contém sensores de temperatura (termístor ou Pt1000) e humidade do ar. Além dos nós com sensores e o recetor, esta solução inclui também repetidores. O intervalo de amostragem pode variar entre 2 minutos e 10 dias e o equipamento tem uma capacidade de armazenamento de aproximadamente duas semanas caso o intervalo de amostragem seja de 10 minutos. É também possível programar alarmes.



Figura 27: Recetor sem-fios TinyTag Wireless

3.1.3. E-Senza® Technologies

Uma solução comercial que se destaca, por ser uma solução coesa e ser orientada à rede, é a oferecida pela empresa E-Senza® Technologies [65]. Trata-se de um sistema de monitorização constituído por blocos, em que cada bloco possui, no mínimo, um transceptor sem-fios e uma antena, para possibilitar a ligação à rede. A tecnologia sem-fios usada é baseada em IEEE 802.15.4. Os blocos podem ser sensores, adaptadores, *gateways* ou repetidores.



Figura 28: SenzaBlocks

A rede é montada interligando vários blocos dos diferentes tipos (os que forem necessários). Os sensores disponibilizados medem humidade e temperatura, pressão e concentração de CO₂. São também disponibilizados adaptadores com entradas ou saídas analógicas, entradas ou saídas digitais, e entradas em frequência.

3.1.4. Banner Engineering

A empresa Banner Engineering [66] também tem uma linha sem-fios que pode ser aplicada a estufas agrícolas. Esta linha possui vários *gateways* e nós, estes últimos com entradas e saídas analógicas (4-20 mA ou 0-10 VDC) ou discretas. Estas entradas e saídas podem ser então utilizadas para interligar à rede vários sensores ou atuadores.



Figura 29: Banner Wireless I/O

A própria empresa possui uma linha de sensores que podem ser usados com estes módulos que inclui sensores de humidade e temperatura. A alimentação dos módulos pode vir da rede elétrica, por bateria ou através de um kit painel solar. O sistema funciona a 900 MHz ou a 2.4 GHz.

3.1.5. Pepperl+Fuchs

A empresa Pepperl+Fuchs [67] tem uma gama de produtos baseados na tecnologia WirelessHART. Esta tecnologia foi desenvolvida para possibilitar comunicações robustas sem-fios para controlo de processos industriais.



Figura 30: Produtos Pepperl-Fuchs Wireless-HART

Esta solução contém *gateways*, adaptadores (4-20 mA ou HART) e um conversor de temperatura.

3.2. Investigação académica e científica

Atualmente existe uma grande quantidade de investigação académica na área das redes de sensores sem-fios. Naturalmente existem também vários artigos publicados sobre este tipo de redes para aplicação em estufas agrícolas.

Muitos dos documentos científicos encontrados relatam o uso de redes baseadas no protocolo ZigBee. Em [68] é usada uma rede mesh ZigBee constituída por nós terminais, routers e um coordenador que comunica com uma plataforma de monitorização (PC) por RS232. Os nós terminais são constituídos por um microcontrolador, um transceptor, um LCD e teclado e um sensor SHT11 [38] (sensor de humidade e temperatura). Os nós são alimentados por bateria.

A Figura 31 mostra a topologia de rede utilizada e o hardware desenvolvido.

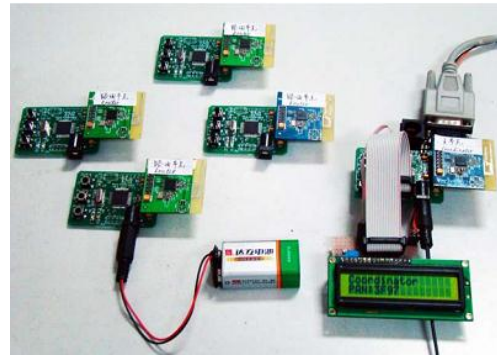
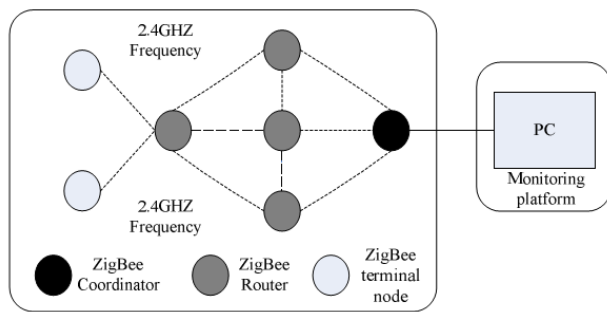


Figura 31: Topologia de rede (à esquerda) e hardware (à direita)
(Retirado de [68])

Em [69] é descrita uma solução que prevê comunicações dentro de uma estufa e entre diferentes estufas. Neste caso é utilizada uma rede em estrela para as comunicações dentro da estufa (entre os nós terminais – sensores e atuadores – e o router), e uma rede mesh para as comunicações entre estufas (entre os vários routers e o coordenador). O coordenador faz o envio de dados para um terminal remoto através de GPRS ou Ethernet. Estão previstos sensores de temperatura e humidade do ar (SHT1x), luminosidade (TSL2550 [70]), entre outros. Estão também previstos nós com atuadores, entre eles os atuadores das janelas, telas de sombreamento, aquecimento, ventoinha e bomba de água. A Figura 32 mostra a arquitetura de rede desenvolvida.

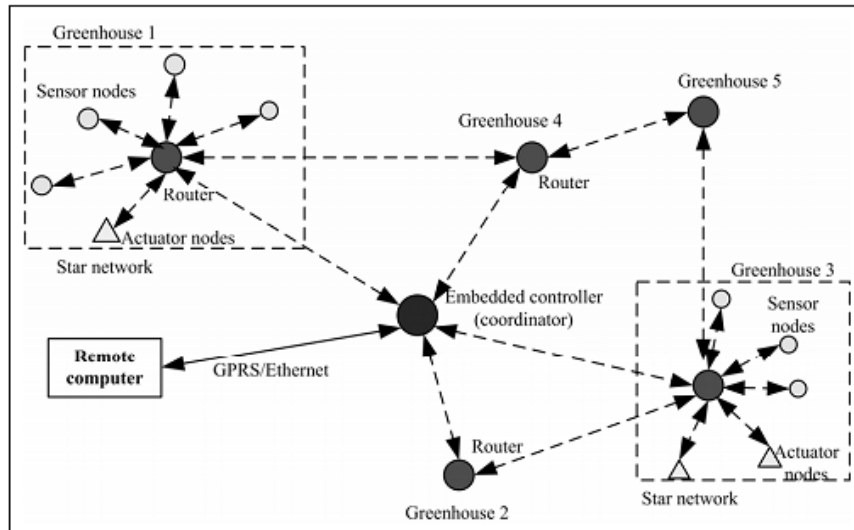


Figura 32: Arquitetura de rede
(Retirado de [69])

Finalmente, [71] demonstra o desenvolvimento de nós de sensores para uma rede sem-fios para estufas baseada em energia solar.

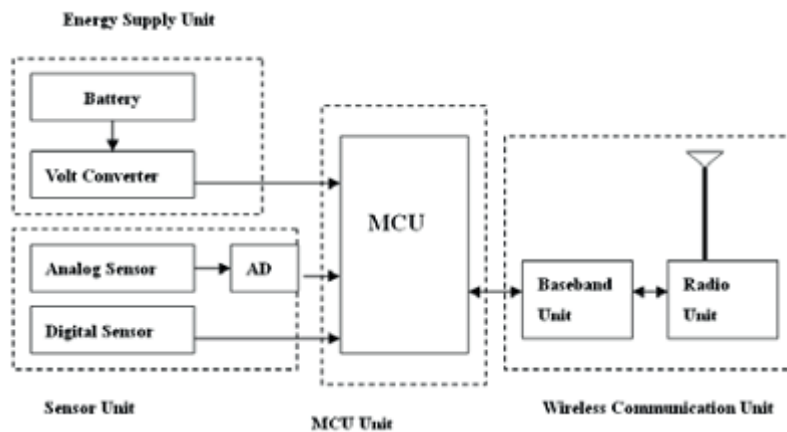


Figura 33: Estrutura típica de um nó de sensor
(Retirado de [71])

Estes nós seriam constituídos por um bloco de recolha e armazenamento de energia através de painel solar e bateria (baseado no chip CN3063 [72]), um bloco com entradas analógicas e digitais para sensores (apenas foi testado o sensor de temperatura digital 1-wire DS18B20 [73]), um bloco de microcontrolador e armazenamento (MSP430F149 [74] e FLASH-AT45DB041B [75]), e um bloco de comunicações sem-fios (baseado no transceptor nRF24L01 [76]). A Figura 33 mostra o diagrama de blocos típico de um nó deste tipo e a Figura 34 mostra a implementação de *hardware* do mesmo.

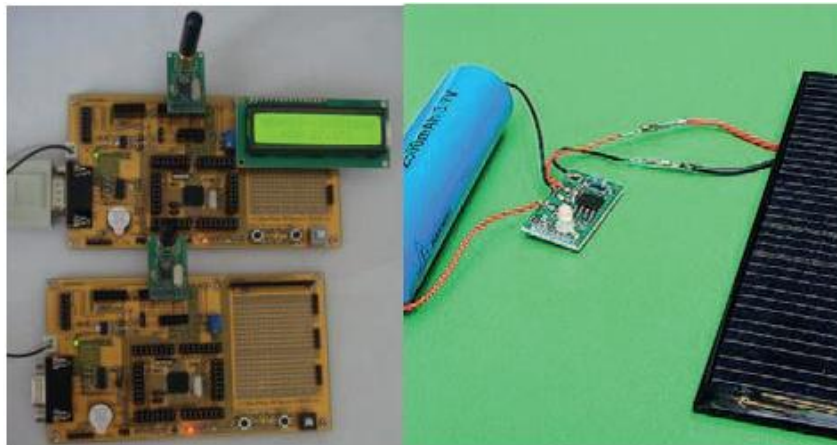


Figura 34: Implementação do nó de sensores e do sistema de recolha de energia solar
(Retirado de [71])

3.3. Discussão

A Tabela 4 faz um resumo das características mais importantes das soluções descritas acima do ponto de vista de uma estufa agrícola.

Solução	Sensor de Temperatura	Sensor de Humidade do Ar	Sensor de Humidade do Solo	Sensor de luminosidade	Entradas Analógicas ou Digitais	Saídas Analógicas ou digitais	Alimentação por energia solar
Campbell	x	x	✓	x	x	x	x
T&D	✓	✓	x	✓	x	x	x
Gemini Data Loggers	✓	✓	x	x	x	x	x
E-Senza Technologies	✓	✓	x	x	✓	✓	x
Banner Engineering	✓	✓	x	x	✓	✓	✓
Pepperl+Fuchs	✓	x	x	x	✓	x	x
Apresentada em [68]	✓	✓	x	x	x	x	x
Apresentada em [69]	✓	✓	x	✓	x	✓	x
Apresentada em [71]	✓	x	x	x	✓	x	✓

Tabela 4: Resumo das características das soluções descritas

Verifica-se facilmente que nenhuma das soluções apresentadas é completamente adequada a uma estufa. Em especial as soluções comerciais, apesar de poderem ser adaptadas a estufas, não trazem à partida todos os sensores necessários. Assim seria necessário adquirir vários sensores de diferentes fornecedores, cada um com um tipo de saída analógica ou digital, aumentando também o custo do sistema. Existe necessidade no mercado de um sistema desenvolvido especificamente para estufas, cujos sensores tenham uma saída comum para tornar a rede mais flexível. Verificou-se também que em todos os sistemas apresentados existe um transceptor por sensor, ou seja, cada sensor corresponde a um nó na rede sem-fios. Ora, numa estufa é comum que as medições de sensores distintos sejam feitas num único local. Assim sendo, seria preferível dispor de uma rede cujos nós possuam já todos os sensores necessários.

4. Desenvolvimento

O desenvolvimento deste trabalho passou por quatro fases distintas. Em primeiro lugar definiram-se alguns aspetos relacionados com as tecnologias a utilizar. De seguida escolheram-se os sensores e desenvolveu-se toda a eletrónica de condicionamento de sinal e interface. Definiram-se os aspetos relacionados com as comunicações como a topologia de rede, os protocolos de comunicação, entre outros. Finalmente, desenvolveu-se um sistema de *Energy Harvesting*⁹.

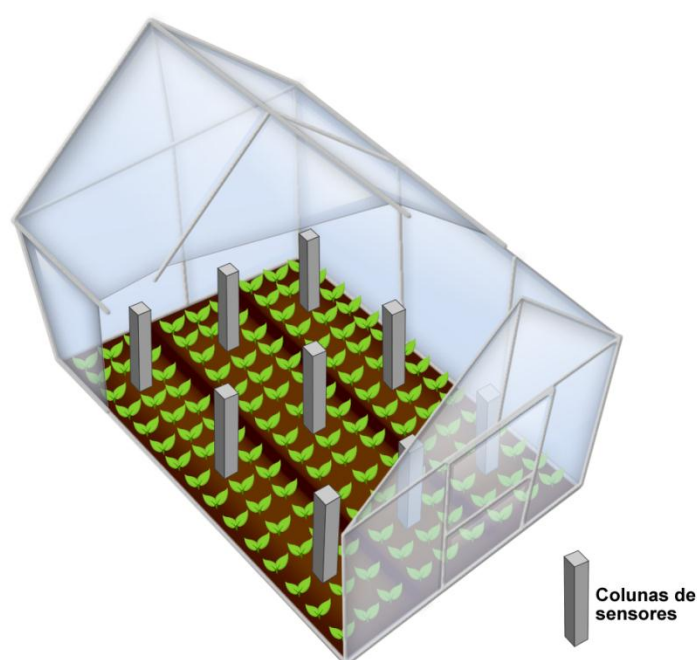


Figura 35: Diagrama funcional do sistema desenvolvido

A Figura 35 mostra um diagrama funcional do sistema. Este diagrama é derivado diretamente dos objetivos deste trabalho. Trata-se de uma estufa onde são distribuídas várias colunas de sensores (descritas no ponto 4.1.) possibilitando assim a medição das variáveis ambientais em vários pontos da estufa.

⁹ Sistema que recolhe energia do meio ambiente (energia solar, eólica, etc.)

4.1. Escolhas tecnológicas e ferramentas de desenvolvimento

O primeiro passo num projeto de eletrônica é conseguir uma visão panorâmica do sistema. Neste caso essa visão panorâmica corresponde a um sistema constituído por colunas com os sensores necessários para efetuar medições num determinado local da estufa, cada uma delas dotada de uma forma de comunicar (através de tecnologia sem-fios) com as outras. As colunas devem ser autossuficientes em termos energéticos de forma a evitar alimentação cablada, o que poria em causa a sua mobilidade. A Figura 36 mostra esquematicamente uma coluna de sensores deste tipo.

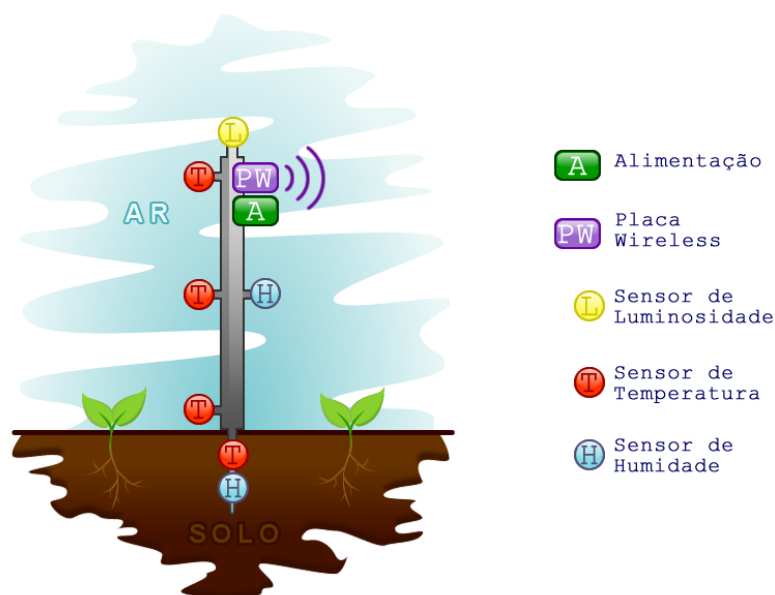


Figura 36: Esquema de uma coluna de sensores

A escolha de tecnologia sem-fios foi efetuada com base na Tabela 5 que faz uma comparação sucinta entre três possíveis tecnologias sem-fios: IEEE 802.15.4, Bluetooth/IEEE 802.15.1 e Wi-Fi/IEEE 802.11.

	IEEE 802.15.4	Bluetooth - (IEEE 802.15.1)	Wi-Fi - (IEEE 802.11a/b/g)
Taxa de transmissão	≤ 125 Kbit/s	723 Kbit/s	30.6 Mbit/s (Ethernet); 2.6 Mbit/s (60 bytes payload)
Consumo energético	Muito baixo	Baixo	Médio
Retransmissões	Sim	Sim	Sim
Alcance	10-100 m	10 (50-100) m	50-100 m

Tabela 5: Comparação entre tecnologias sem-fios
(Adaptado de [77])

Pode-se verificar pela tabela que a tecnologia sem-fios IEEE 802.15.4 permite comunicações com baixo consumo energético, sendo ideal para redes de sensores autónomos a nível de alimentação e com baixas taxas de transmissão como é o caso do sistema que se pretende desenvolver.

Como elemento de comunicação sem-fios foram utilizados os módulos uMRF e uMRFs desenvolvidos pela empresa Micro-I/O [78]. Estes módulos possuem já um microcontrolador e um transceptor IEEE 802.15.4 da Microchip (MRF24J40MA [79]).

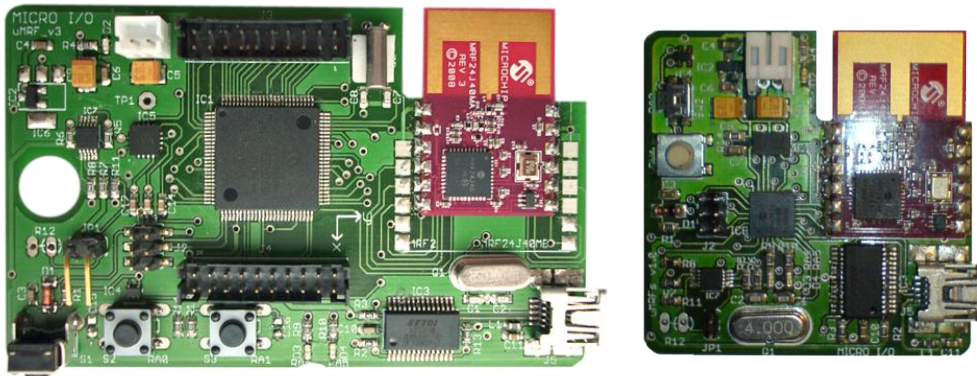


Figura 37: Módulos uMRF (à esquerda) e uMRFs (à direita)

A grande diferença entre os dois módulos são os seus microcontroladores: dsPIC33FJ256MC710-I/PF [80] no caso do uMRF e PIC18F26K20 [81] no caso do uMRFs. O módulo uMRF possui também um sensor de temperatura MCP9700 [28], um gestor de carga (MCP73833 [82]), dois botões e dois LEDs. Por sua vez, o módulo uMRFs possui o mesmo sensor de temperatura, o mesmo gestor de carga, apenas um botão, dois LEDs e um acelerómetro.

Outra diferença importante entre os dois módulos é o facto do módulo uMRF, ao contrário do uMRFs, ser compatível com outros transceptores IEEE 802.15.4 como é o caso do MRF24J40MB [83] e MRF24J40MC [84](este último suporta antenas externas).

Optou-se também pela utilização de um barramento 1-wire [85] para a ligação entre os sensores e o microcontrolador presente na placa sem-fios.

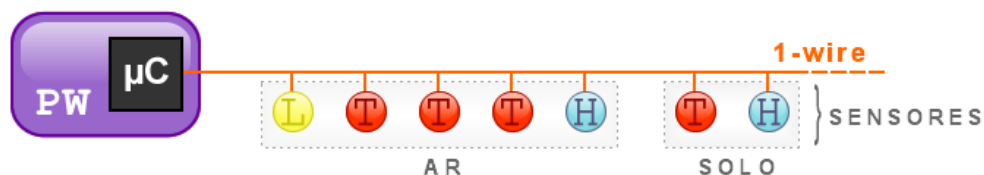


Figura 38: Esquema do barramento para a ligação sensores-microcontrolador (placa wireless)

O barramento 1-wire é um barramento que necessita apenas de uma linha de dados, e de um total de dois ou três condutores: dados, *ground* e alimentação (opcional: existem dispositivos 1-wire que conseguem retirar a energia necessária ao seu funcionamento da linha de dados). O protocolo 1-wire é um protocolo *série*, *master-slave* e *half-duplex* (as transmissões de dados não se podem efetuar nas duas direções simultaneamente). O master inicia e controla as

comunicações com um ou mais dispositivos 1-wire, e cada dispositivo possui um número identificativo de 64 bits que funciona como o seu endereço no barramento.

O protocolo 1-wire é orientado ao bit e funciona com base em quatro operações básicas: *reset*, escrita do bit '0', escrita do bit '1' e leitura de um bit. Estas operações são efetuadas com uma sequência predeterminada de pulsos com durações específicas. Cada dispositivo 1-wire possui um relógio interno que é sincronizado com o do master no pulso de *reset*, permitindo assim a comunicação. Os dispositivos 1-wire respondem ao pulso de *reset* com um pulso de presença. Através de um algoritmo de pesquisa, o master consegue obter os números de série de todos os dispositivos presentes no barramento.

Os requisitos de qualquer barramento 1-wire são os seguintes [86] [87]:

- A porta de comunicação deve ser bidirecional; a saída deve ser em dreno aberto e deve existir um *pull-up* fraco na linha.
- O sistema deve ser capaz de gerar um atraso preciso e repetível de 1 μ s (velocidade *standard*) ou 0.25 μ s (*overdrive*).
- As operações de comunicação não devem ser interrompidas quando estão a ser geradas.

A grande vantagem da utilização de 1-wire para a ligação microcontrolador-sensores é a facilidade em adicionar ou remover sensores ao barramento. Na Figura 38 o microcontrolador funciona como master 1-wire, controlando a comunicação com os sensores. A implementação de um master 1-wire por *software* com um microcontrolador é possível pois na maioria dos microcontroladores é possível configurar os pinos de saída digital como dreno aberto e, por *software*, cumprir os restantes requisitos.

Durante o desenvolvimento de todo o *hardware* e *software* foram utilizadas três ferramentas de desenvolvimento essenciais. São elas:

- **CadSoft EAGLE** – utilizado para fazer o desenho do esquemático elétrico e para o desenvolvimento das placas de circuito impresso.
- **Microchip MPLAB X IDE** – utilizado como ambiente de desenvolvimento de todo o *software* para os microcontroladores.
- **NetBeans IDE** – utilizado como ambiente de desenvolvimento da interface gráfica.

4.2. Interface microcontrolador – 1-wire

Tendo em conta que os microcontroladores utilizados no âmbito deste trabalho possuem pinos de I/O cujo output pode ser programado para ser dreno aberto, a interface de hardware microcontrolador – barramento 1-wire consiste apenas na resistência de *pull-up*, tal como mostra a Figura 39.

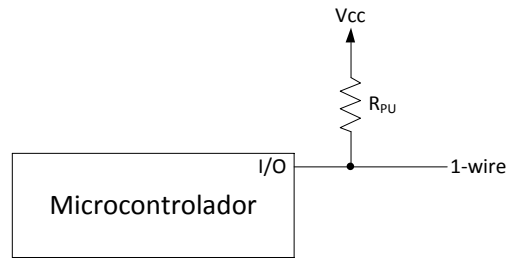


Figura 39: Interface de hardware microcontrolador – barramento 1-wire

O software de implementação do master 1-wire foi desenvolvido com base em [86], [87] e [88], fazendo as alterações necessárias para os microcontroladores em causa.

Foram implementadas as funções básicas de leitura e escrita de um bit, assim como funções de leitura e escrita de um byte. Foram também implementadas as funções de procura de dispositivos 1-wire no barramento (procura simples ou procura por família) e todas as funções específicas relativas a cada tipo de dispositivo 1-wire utilizado no âmbito deste trabalho.

4.3. Sensores e condicionamento de sinal

4.3.1. Sensor de temperatura

O sensor de temperatura escolhido foi o DS18S20 [25] pois as características deste encontram-se dentro dos requisitos, com a vantagem de já possuir saída digital 1-wire, não sendo necessário desenvolver hardware de condicionamento.



Figura 40: Esquema de ligação dos sensores de temperatura ao barramento 1-wire

Foi necessário encapsular o sensor para que este resistisse aos parâmetros ambientais dentro da estufa, nomeadamente a valores elevados de humidade. Optou-se por um encapsulamento feito em cobre onde o sensor é colocado embebido em pasta térmica, tentando minimizar assim as diferenças de temperatura entre o ambiente fora e dentro do encapsulamento. Finalmente terminou-se o encapsulamento com uma manga termo-retrátil na junção entre o encapsulamento de cobre e o condutor. O aspeto final do sensor pode ser observado na figura seguinte.



Figura 41: DS18S20 encapsulado

4.3.2. Sensor de humidade do ar

Foram exploradas várias soluções para o sensor e o circuito de condicionamento de sinal do sensor de humidade do ar. Pelas várias vantagens dos sensores capacitivos face aos sensores resistivos demonstradas no ponto 2.3.2., foi estabelecido à partida que seria um sensor deste tipo que seria utilizado.

Inicialmente considerou-se a hipótese de se utilizar um sensor capacitivo puro, o LS1101LF (já referido anteriormente). Como o sensor deve ser ligado a um barramento 1-wire, e a única hipótese de o fazer seria ligar o sensor a uma ADC, foi necessário desenvolver *hardware* para converter o valor de capacidade do sensor numa tensão. Para isso adaptou-se o circuito descrito em [89]: *Relative Humidity Sensor Signal Conditioner*.

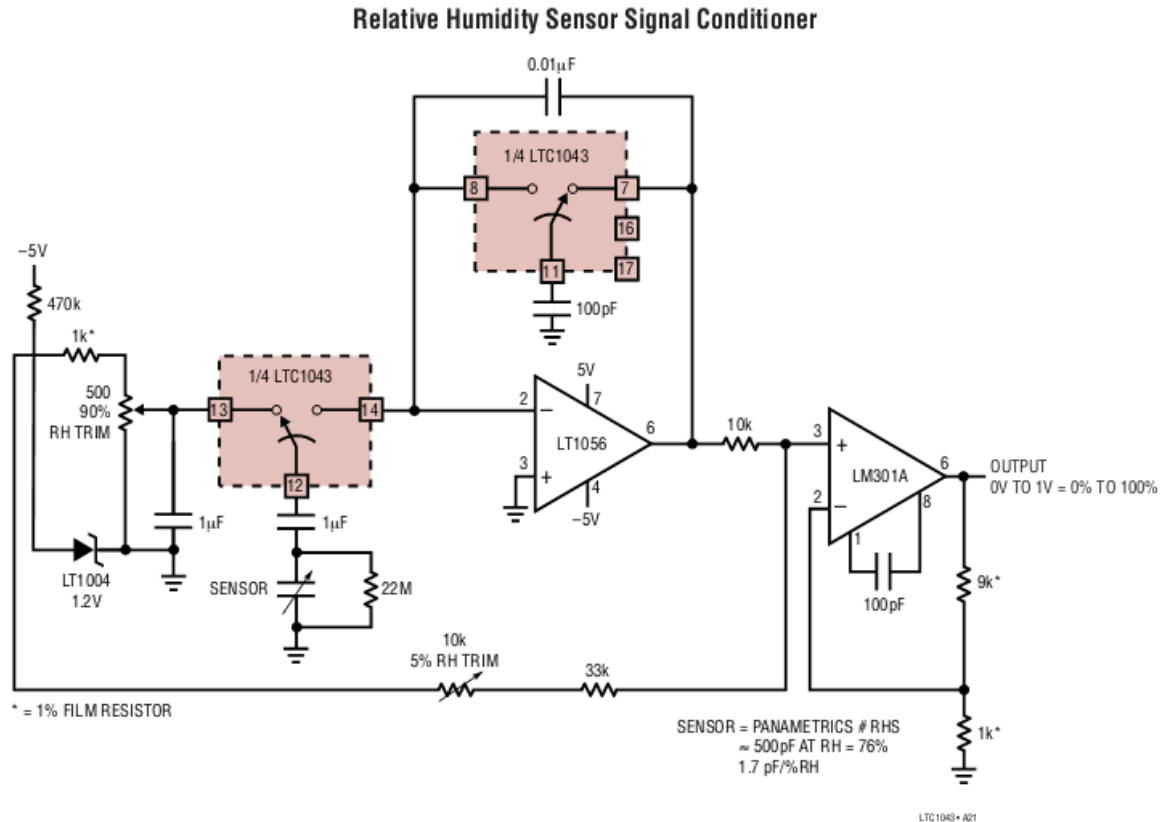
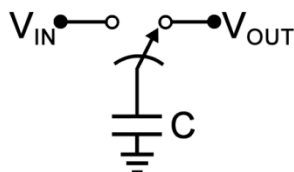


Figura 42: Condicionamento de sinal para sensores de humidade relativa do ar

Este circuito é baseado em *switched capacitor resistors*: blocos constituído por um condensador comutado na configuração da Figura 43 que podem ser considerados como uma resistência inversamente proporcional ao produto da capacidade pela frequência de comutação.



$$R = \frac{1}{C \cdot f_s}$$

f_s : Frequência de comutação

Figura 43: Switched Capacitor Resistor

O valor do condensador é convertido numa resistência cujo valor é função da capacidade (uma vez que a frequência de comutação é constante). De forma simplificada temos um filtro passa-baixo constituído pelo LT1056 cujo ganho DC depende do valor da capacidade do sensor seguido de um bloco de ganho feito com o LM301A. Obtém-se deste modo uma saída em tensão proporcional ao valor da capacidade do sensor. Os potenciómetros permitem um ajuste de *offset* e de amplitude do sinal de saída.

Foram efetuados testes preliminares com este circuito, verificando-se a saída em tensão variável com o valor da capacidade. No entanto existem dois grandes obstáculos à utilização deste circuito:

- É necessário inverter a tensão de alimentação (pois pelo barramento 1-wire apenas é fornecida uma tensão de alimentação positiva), o que implica acrescentar um conversor de tensão (relativamente dispendioso) ao circuito;
- Os cabos de ligação ao sensor acrescentaram uma capacidade em paralelo da mesma ordem de grandeza da capacidade do sensor, reduzindo significativamente a resolução;

Foram também exploradas formas de resolver o problema anterior, mas nenhuma destas se revelou satisfatória:

Solução	Inconveniente
Encapsular o condicionamento de sinal juntamente com o sensor para evitar cabos de ligação	Não é possível aceder aos potenciómetros de calibração
Encapsular o condicionamento de sinal juntamente com o sensor; Uso de potenciómetros digitais	Vai contra o princípio da utilização do barramento 1-wire: seria necessário ligar os potenciómetros ao microcontrolador
Encapsular o condicionamento de sinal juntamente com o sensor; Uso de resistências de precisão com calibração por software	Perda de resolução

Tabela 6: Possíveis soluções e problemas resultantes do uso das mesmas

Chegou-se então à conclusão que a utilização de um sensor puramente capacitivo ficava mais dispendioso e poderia dar origem a mais problemas a longo prazo do que a alternativa mais simples: utilizar um sensor capacitivo com condicionamento integrado e saída em tensão. Foi então efetuada uma nova escolha de sensor de humidade relativa do ar e o escolhido foi o HIH-5031. Esta escolha teve em conta o custo do sensor, assim como a vantagem deste possuir um filtro hidrofóbico sendo indicado para uso industrial e em estufas. Este sensor é também resistente a poeiras, óleos e a poluentes ambientais comuns [37].

Como o HIH-5031 já possui uma saída em tensão, foi desenvolvido hardware de conversão analógico para digital 1-wire. O circuito usado foi baseado em [90] (com algumas modificações):

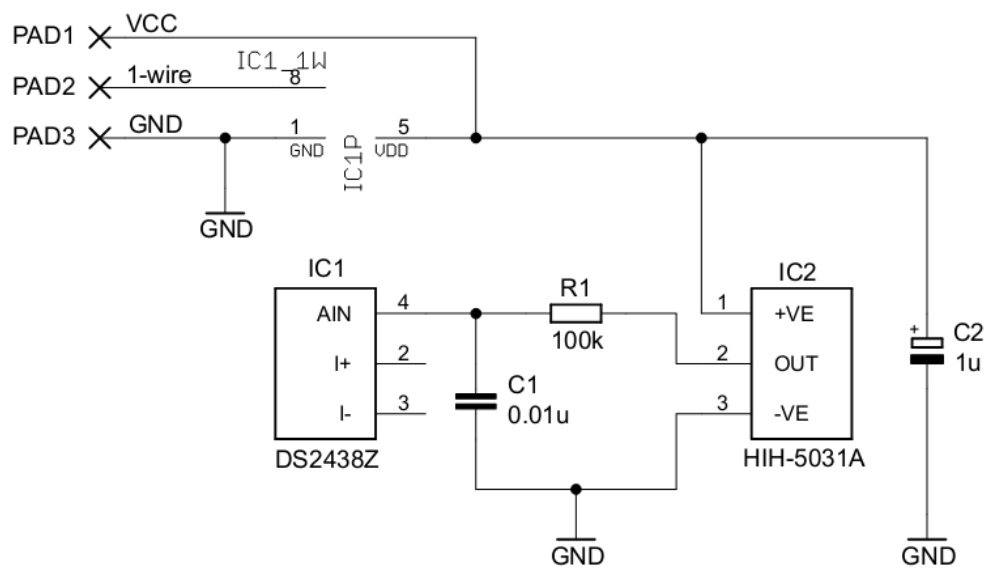


Figura 44: Esquema do circuito de interface do sensor de humidade do ar

O circuito consiste apenas no sensor de humidade com um filtro passa-baixo à saída e num DS2438 usado como ADC (Analog-to-digital Converter) 1-wire. O DS2438 lê a tensão da entrada AIN, a tensão de alimentação e a temperatura, sendo assim possível efetuar todas as compensações necessárias para se obter uma leitura de humidade correta. A figura seguinte apresenta o sensor HIH-5031 montado numa placa de circuito impresso.



Figura 45: Sensor de humidade do ar

As expressões para obter o valor de humidade relativa são dadas em [37]:

$$RH = \frac{\frac{V_{OUT}}{V_{CC}} - 0.1515}{0.00636} \quad a \ 25^{\circ}C$$

$$TrueRH = \frac{RH}{1.0546 - 0.00216 \cdot T} \quad , T \text{ em } ^{\circ}C$$

O valor de RH corresponde à humidade relativa a 25°C para os valores medidos enquanto TrueRH corresponde à mesma humidade relativa real compensada em temperatura.

Apesar de o sensor estar preparado para resistir ao ambiente dentro da estufa, o resto da eletrónica de condicionamento não tem qualquer proteção, pelo que deve ser encapsulada de forma adequada.

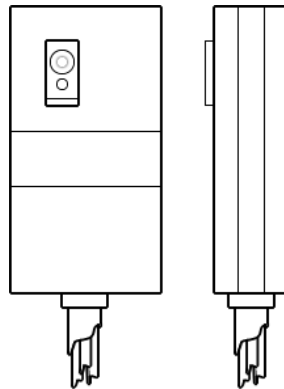


Figura 46: Exemplo de encapsulamento do sensor de humidade do ar

A figura acima demonstra um encapsulamento possível para o sensor e condicionamento. Deverá ser utilizada uma pequena caixa onde seja possível colocar o sensor e a eletrónica. Essa embalagem deve possuir um recorte do tamanho do sensor, para que uma parte saia para fora. Os três fios do barramento 1-wire saem para o exterior através de uma ranhura na parte inferior da caixa. Assim, toda a eletrónica estará protegida no interior e apenas o sensor estaria exposto ao ambiente.

4.3.3. Sensor de humidade do solo

O sensor de humidade do solo escolhido foi o sensor de matriz granular WATERMARK [91] devido ao seu baixo custo e tempo de vida razoável de 5 anos [92].

Foi necessário desenvolver *hardware* que excite o sensor com uma corrente AC, efetue a leitura do valor da sua resistência e envie o valor medido para o barramento 1-wire.

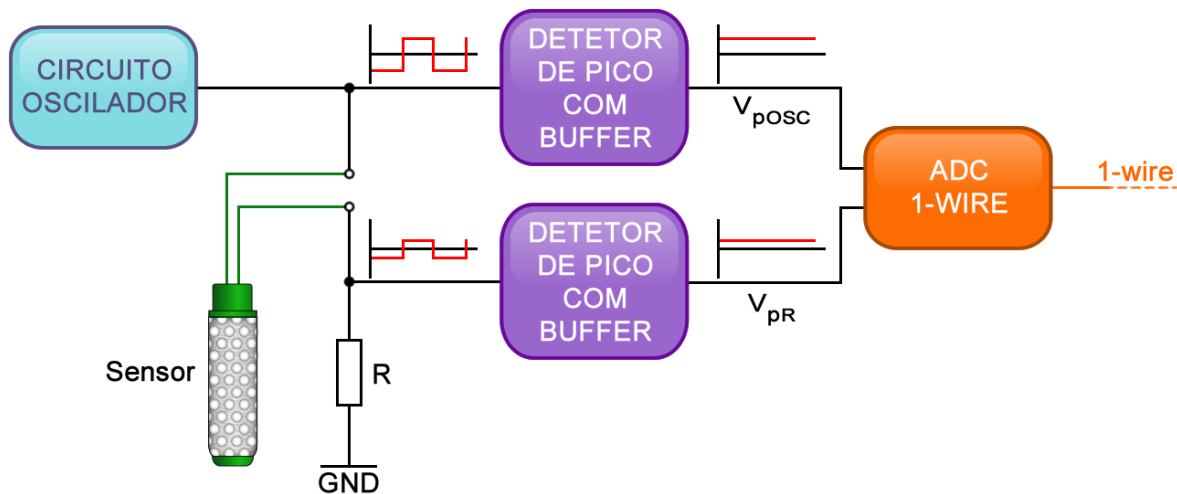


Figura 47: Diagrama de blocos conceptual do circuito de medição de humidade do solo

A figura acima mostra o diagrama de blocos conceptual do circuito de medição de humidade do solo. Neste circuito existe um oscilador que gera uma onda quadrada bipolar, cumprindo o requisito da excitação AC do sensor. O sensor forma um divisor resistivo com a resistência R . As tensões presentes à saída do oscilador e aos terminais da resistência R passam por um detetor de pico e são depois lidas por uma ADC que faz a conversão e envia o resultado para o barramento 1-wire. É fácil de verificar que, sabendo o valor de R e os valores das tensões medidas pela ADC, é possível saber o valor da resistência do sensor. Denominando o valor de pico da tensão à saída do oscilador por V_{pOSC} e o valor de pico da tensão aos terminais de R por V_{pR} :

$$V_{pR} = \frac{R}{R + R_{SENSOR}} \cdot V_{pOSC} \Leftrightarrow R_{SENSOR} = \left(\frac{V_{pOSC}}{V_{pR}} - 1 \right) \cdot R$$

O esquema elétrico do circuito implementado encontra-se no Anexo I.

A Figura 48 mostra uma fotografia da placa de circuito impresso.

Como este circuito foi o primeiro a ser desenvolvido, a placa de circuito impresso desenvolvida para este sensor suporta vários conectores para o barramento 1-wire, onde se podem ligar os outros sensores, pelo que foi denominada de placa de expansão principal.

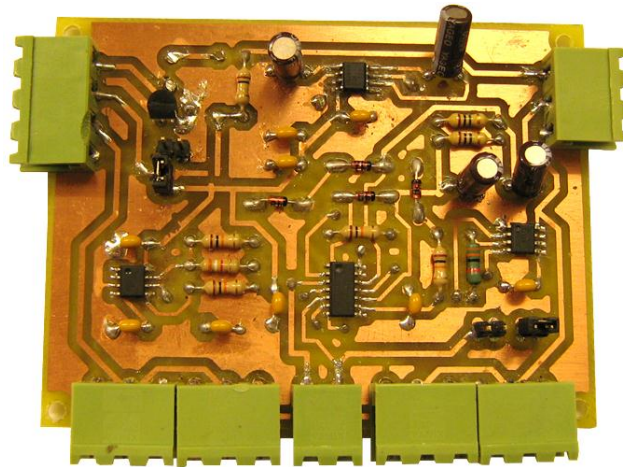


Figura 48: Placa de expansão principal

Após obter o valor de resistência do sensor é necessário convertê-lo num valor de humidade do solo, geralmente medida em kPa (ou cBar). Em [93] é feito um estudo da relação entre a resistência do sensor e o valor de humidade do solo.

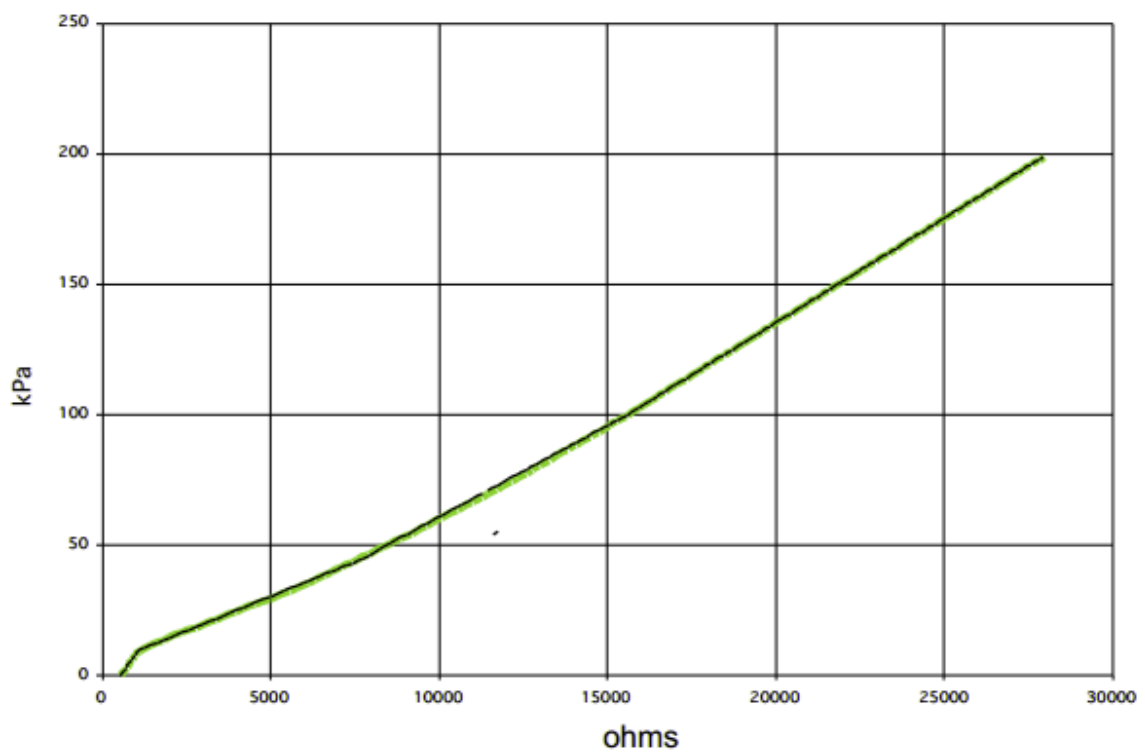


Figura 49: Relação entre a resistência do sensor e o valor de humidade do solo
(Retirado de [93])

Apesar da característica do sensor não ser linear, pode ser dividida em várias zonas aproximadamente lineares, obtendo-se a seguinte curva de calibração a 24°C:

$$kPa = \begin{cases} \frac{R_{sensor} - 550}{50}, & 550 \leq R_{sensor} < 1000 \\ 9 + \frac{R_{sensor} - 1000}{100}, & 1000 \leq R_{sensor} < 1100 \\ 10 + \frac{R_{sensor} - 1100}{180}, & 1100 \leq R_{sensor} < 2000 \\ 15 + \frac{R_{sensor} - 2000}{200}, & 2000 \leq R_{sensor} < 6000 \\ 35 + \frac{R_{sensor} - 6000}{160}, & 6000 \leq R_{sensor} < 9200 \\ 55 + \frac{R_{sensor} - 9200}{150}, & 9200 \leq R_{sensor} < 12200 \\ 75 + \frac{R_{sensor} - 12200}{135}, & 12200 \leq R_{sensor} < 15575 \\ 100 + \frac{R_{sensor} - 15575}{125}, & 15575 \leq R_{sensor} < 28078 \end{cases}$$

Para obter o valor de humidade real deve-se utilizar na curva acima, em vez do valor R_{sensor} , o valor R_{sensor_comp} (trata-se do valor da resistência compensado em temperatura).

$$R_{sensor_comp} = R_{sensor} \cdot (1 + 0.01 \cdot (T \cdot 1.8 - 43)) \quad , T \text{ em } ^\circ C$$

Esta compensação é necessária pois a temperatura exerce um efeito na leitura de resistência do sensor, ou seja, para o mesmo valor de humidade o valor de resistência obtido é maior a temperaturas mais baixas e menor a temperaturas mais elevadas.

4.3.4. Sensor de luminosidade

Para sensor de luminosidade foi escolhido um fotodíodo SFH2430 [94]. Apesar de um fotodíodo não ser a escolha mais adequada para medir a radiação fotossinteticamente ativa, é um sensor consideravelmente mais barato que também mede radiação na gama pretendida. Este fotodíodo em concreto foi escolhido com base na sua sensibilidade espectral (Figura 50).

De notar que a gama de medição (400 a 700 nm) está compreendida na gama de leitura do sensor, apesar de este ter um pico de sensibilidade na zona dos 550 nm.

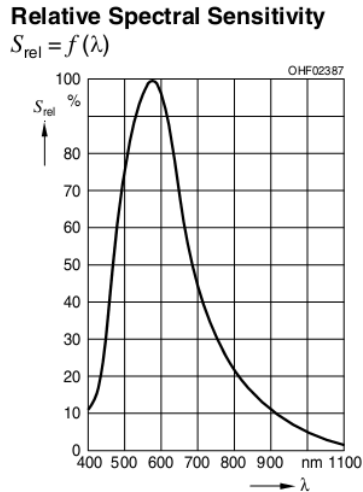


Figura 50: Sensibilidade espectral do sensor de luminosidade (Retirado de [94])

O fotodíodo foi colocado numa configuração em que está inversamente polarizado, onde a corrente que ele gera é lida com um DS2438. A iluminância relaciona-se com a corrente lida da seguinte forma: $E_v = \frac{I(nA)}{6,3} (lx)$ [94].

As duas figuras seguintes apresentam o circuito elétrico e uma fotografia do circuito real.

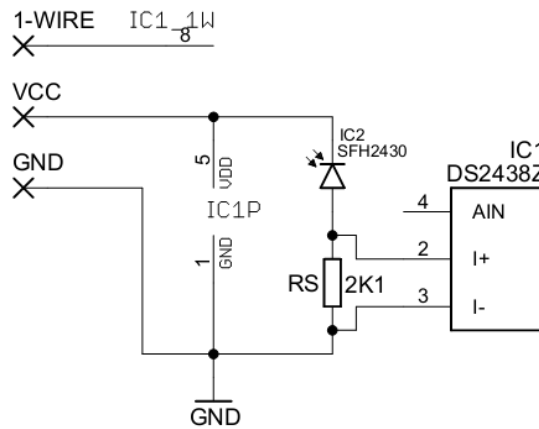


Figura 51: Esquema elétrico do *hardware* de condicionamento de sinal do sensor de luminosidade

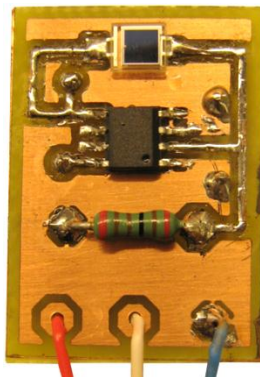


Figura 52: Sensor de luminosidade

Tal como o sensor de humidade do ar, a eletrónica adjacente ao sensor de luminosidade também necessita de encapsulamento adequado. A figura abaixo mostra um exemplo possível para o encapsulamento.

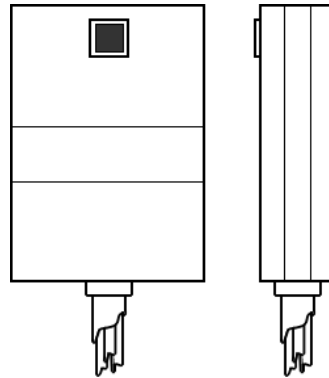


Figura 53: Exemplo de encapsulamento do sensor de luminosidade

4.4. Comunicações

Inicialmente foi previsto um modelo de comunicações em que as colunas de sensores comunicariam com um *Datasink(DS)/Gateway(G)* através de 802.15.4, e que esse nó seria responsável por enviar a informação para um terminal local e, possivelmente, também para um terminal remoto.

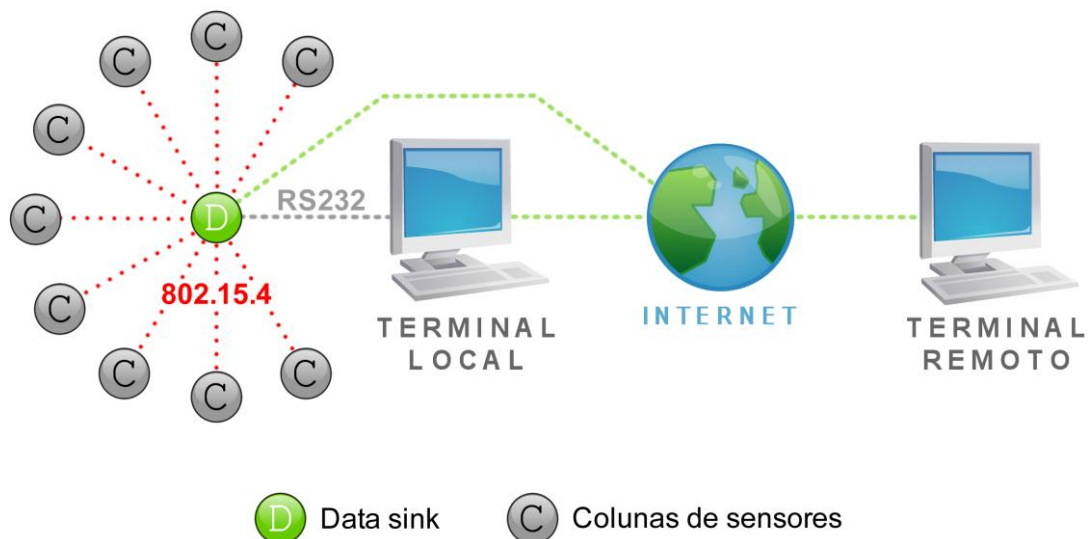
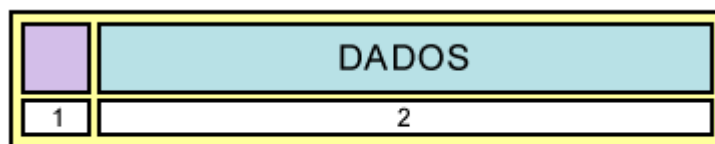


Figura 54: Esquema das comunicações possíveis

Sem nunca pôr de parte a comunicação para um terminal remoto no futuro, decidiu-se, nesta fase, desenvolver apenas as comunicações colunas de sensores <-> *Datasink/Gateway* <-> Terminal Local (TL) no âmbito deste trabalho.

O terminal local constitui uma forma de o utilizador conseguir comunicar com as colunas de sensores, assim como de visualizar a informação recolhida pelas mesmas. Como o terminal local comunica unicamente com o *Datasink/Gateway*, este é responsável pelo reencaminhamento das mensagens provenientes do terminal para a coluna de sensores destinatária e pelo reencaminhamento das mensagens provenientes das colunas de sensores para o terminal, assegurando uma comunicação terminal local <-> colunas de sensores o mais transparente possível.

Para simplificar as comunicações, definiu-se uma estrutura de dados básica constituída por um campo que especifica o tipo de mensagem e um campo de dados de tamanho variável que depende do tipo de mensagem.



- 1 - Tipo de mensagem
- 2 - Dados: campo variável de acordo com o tipo de mensagem

Figura 55: Estrutura básica de dados usada em todas as comunicações

A tabela abaixo faz um resumo dos tipos de mensagens trocadas entre o terminal local e as colunas de sensores e faz uma breve descrição da sua funcionalidade.

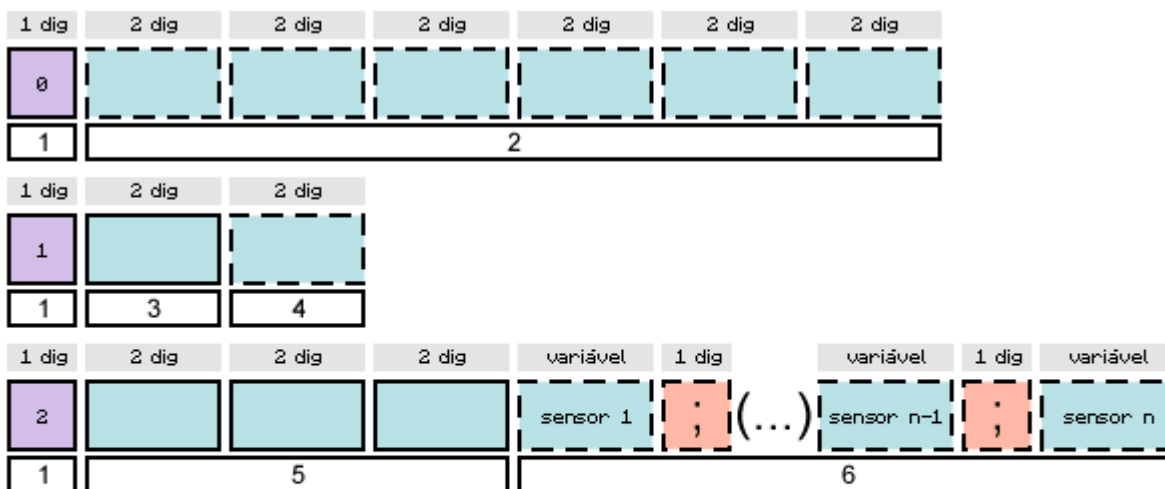
Tipo de mensagem	Percurso	Descrição
0 Inicialização <i>I'm Alive</i> Sincronização	TL -> DS -> Coluna	Mensagem que indica a inicialização do terminal local, quando em <i>broadcast</i> , ou a resposta a uma mensagem do mesmo tipo no sentido inverso. Esta mensagem funciona como mensagem de sincronização e contém a data e hora atuais.
	Coluna -> DS -> TL	Mensagem reencaminhada das colunas de sensores ao terminal que indica a inicialização ou presença de uma coluna de sensores. É enviada sempre que uma coluna é inicializada, como resposta a uma mensagem de inicialização do sentido contrário (em <i>broadcast</i>) e regularmente como <i>I'm alive</i> ¹⁰ .

¹⁰ *I'm alive*: Mensagem enviada periodicamente que indica que o nó da rede se encontra operacional. A ausência de envio de mensagens de *I'm alive* pode indicar o mau funcionamento de um nó ou que esse nó foi removido da rede.

1 Configuração	TL -> DS -> Coluna	Mensagem relativa ao processo de configuração. Neste caso o campo de dados corresponde a dois dígitos que indicam o passo da configuração em que se encontra.
	Coluna -> DS -> TL	Mensagem enviada como resposta a uma mensagem de configuração no sentido contrário, exatamente igual, que indica a conclusão do passo da configuração a que se refere.
2 Dados dos sensores	TL -> DS -> Coluna	Pedido de envio de dados dos sensores ligados a uma determinada coluna.
	Coluna -> DS -> TL	Mensagem de envio de dados lidos dos sensores. É enviada a cada intervalo de amostragem ou sempre que é feito um pedido de envio. Os dados são enviados no campo de dados.

Tabela 7: Descrição dos vários tipos de mensagem diferentes

A Figura 56 mostra de forma detalhada o campo de dados para cada tipo de mensagem.



- 1 - Tipo de mensagem
- 2 - Data e hora atuais. Formato: DDMMAAhmmss (D - Dia; M - Mês; A - Ano; h - hora; m - minuto; s - segundo) (é enviado apenas nas mensagens TL -> DS -> Coluna)
- 3 - Passo da configuração
- 4 - Tempo de amostragem (só para o passo de configuração respetivo)
- 5 - Time stamp. Formato: hhmss
- 6 - Dados dos sensores ativos (separados pelo carácter ';')

Figura 56: Descrição do campo de dados para cada tipo de mensagem

Nesta rede o *Datasink/Gateway* funciona maioritariamente como *Data Logger* e como reencaminhador de mensagens. É importante relembrar que as mensagens entre o *datasink/Gateway* e as colunas de sensores são enviadas por IEEE 802.15.4. Por sua vez, a comunicação entre o *Datasink/Gateway* e o Terminal Local é feita através de um barramento RS232.

A Figura 57 mostra o diagrama de blocos relativo às comunicações do *Datasink/Gateway*.

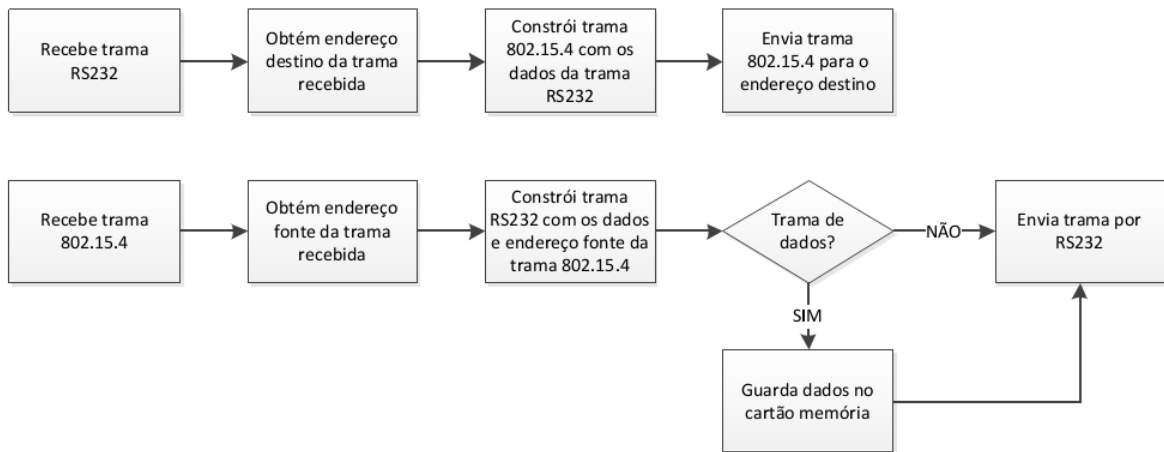


Figura 57: Diagrama de blocos do funcionamento do *Datasink/Gateway* em relação às comunicações

4.4.1. Comunicação *Datasink/Gateway* <-> Colunas de sensores

A comunicação *Datasink/Gateway* <-> Colunas de sensores foi definida como tendo uma topologia estrela, em que todas as comunicações são feitas ponto-a-ponto. Esta topologia foi escolhida por ser uma topologia fácil de implementar e por ser adequada a redes de sensores de dimensões espaciais reduzidas.

As tramas de dados 802.15.4 têm um formato definido no próprio protocolo. Para o envio de mensagens entre as colunas e o *Datasink/Gateway* usou-se o campo de *payload* de uma trama de dados como mostra a Figura 58.

Trama de dados 802.15.4

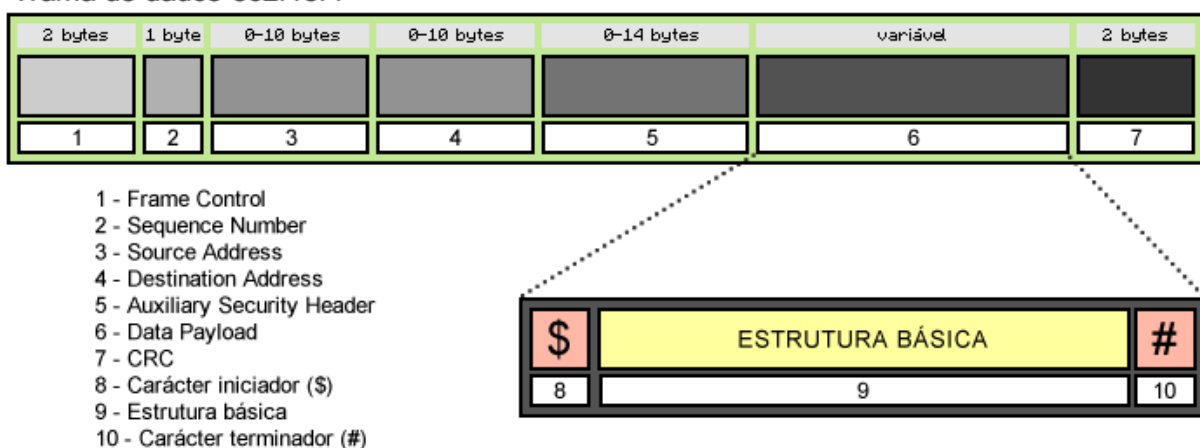


Figura 58: Empacotamento da estrutura básica numa trama de dados 802.15.4

Todas as mensagens enviadas por 802.15.4 têm um campo de CRC¹¹, pelo que se pode ter a certeza que os dados recebidos são válidos. Para efeitos de teste à rede, todas as mensagens são enviadas sem encriptação. No entanto, caso a segurança da rede seja um aspeto crítico no futuro, ou seja, caso se venham a utilizar mensagens encriptadas, foram acrescentados dois caracteres à trama enviada, um iniciador e um terminador, que vão permitir verificar uma descriptação correta das mensagens.

O modelo em estrela tem muitas vantagens em relação a outras topologias de rede: é uma topologia fácil de implementar, o consumo energético é reduzido e a latência das mensagens é menor (quando comparada com outras topologias multi-salto). No entanto, apesar deste modelo de comunicação ser perfeitamente viável em redes de reduzida dimensão, o mesmo não pode ser usado em redes de média ou grande dimensão onde o alcance da própria tecnologia não permite que todas as colunas comuniquem diretamente com o *Datasink/Gateway*. Assim sendo, foi desenvolvida, de forma conceptual, uma topologia híbrida que pode ser implementada no futuro.

Nesta nova topologia as colunas de sensores podem comunicar com o *Datasink* de duas formas:

- Comunicação direta: Quando o *Datasink* se encontra dentro do alcance da coluna de sensores e vice-versa
- Comunicação por saltos: Quando a comunicação direta é impossível.

Imagine-se então uma rede em que todos os nós da rede possuem uma tabela com os endereços dos nós vizinhos. Todos os endereços se encontram ordenados na tabela por intensidade de sinal recebido. No entanto, caso o *Datasink/Gateway* se encontre na vizinhança de um determinado nó, este automaticamente toma a primeira posição na tabela. Cada nó da rede tenta a comunicação com o *Datasink* através do primeiro endereço na tabela. Caso a comunicação não seja possível nesse caminho, o nó tenta a comunicação pelo endereço na posição seguinte da tabela e por aí adiante. O que vai acontecer é que, na prática, a rede tem uma topologia em estrela quando todos os nós se encontram próximos do *Datasink*. No entanto, caso seja necessária uma rede maior é possível fazê-lo desde que se garantam caminhos para o *Datasink*.

¹¹ CRC (Cyclic Redundancy Check): Método utilizado para deteção de erros numa transmissão de dados digitais [106].

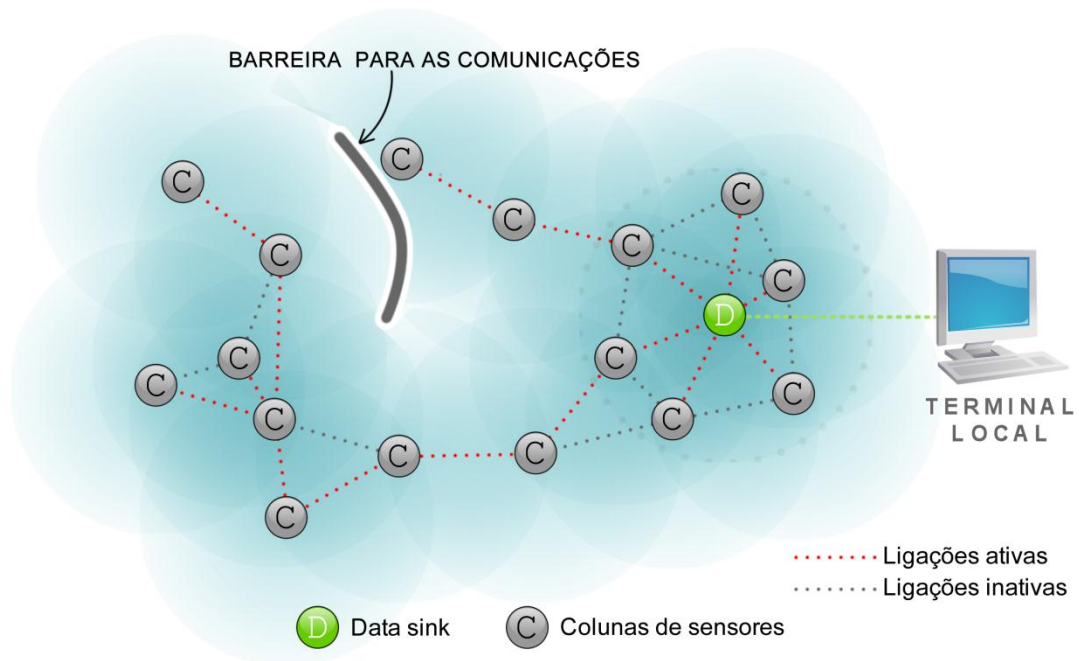


Figura 59: Exemplo de funcionamento da rede híbrida conceitual

A Figura 59 mostra um exemplo de funcionamento de uma rede deste tipo. Os círculos a azul representam o alcance das colunas de sensores. Nesta figura é possível visualizar algumas das vantagens e fragilidades da utilização de uma rede deste tipo.

Vantagens

- Rede expansível geograficamente
- Baixo consumo energético comparativamente com redes mesh puras: consegue-se diminuir o tráfego de pacotes (em especial pacotes de *routing*) que seriam necessários para o funcionamento de uma rede mesh, diminuindo o consumo energético dos nós de sensores

Fragilidades

- Consumo energético mais elevado que uma rede em estrela – todos os nós devem ter o transceptor sempre ligado
- Possíveis *single points of failure* – caso só exista um caminho possível entre um nó da rede e o *Datasink*
- Latência de pior caso aumenta em situações de alteração física dos elementos ou do meio de transmissão – quando uma mensagem não consegue chegar ao *Datasink* é necessário fazer uma atualização da tabela de reencaminhamento, aumentando assim o tempo decorrido até que a mensagem seja entregue com sucesso

É simples fazer a conversão entre a rede que está a funcionar atualmente para uma rede deste tipo. Uma implementação possível seria o envio de mensagens de *I'm Alive* em *broadcast*, desencadeando a atualização das tabelas de reencaminhamento.

4.4.2. Comunicação Datasink/Gateway <-> Terminal Local

Como já foi referido anteriormente, a comunicação *Datasink/Gateway* – Terminal Local é feita através de um barramento RS232.

As tramas para esta comunicação foram definidas da forma representada na figura seguinte:

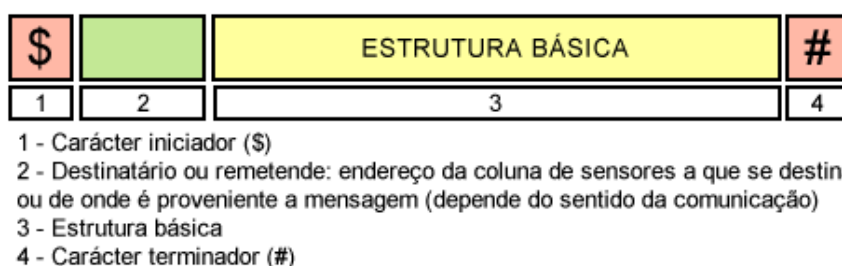


Figura 60: Estrutura de uma trama do protocolo sobre RS232

Como se pode verificar pela Figura 60, a estrutura básica de dados (Figura 55) é encapsulada numa trama que contém um carácter iniciador e terminador (possibilitando a verificação de receção de uma trama válida) e o endereço fonte ou destino em relação às colunas de sensores.

4.4.3. Processo de configuração

O processo de configuração, do ponto de vista da interface gráfica, encontra-se no Anexo III. No entanto, o mesmo processo é aqui descrito a nível de comunicações.

A configuração tem os seguintes passos:

1. Desligar todos os sensores da coluna a configurar
2. Ligar a placa principal de sensores à coluna
3. Ligar o sensor de temperatura 1
4. Ligar o sensor de temperatura 2
5. Ligar o sensor de temperatura 3
6. Ligar o sensor de temperatura 4
7. Ligar o sensor de luminosidade
8. Ligar o sensor de humidade do ar
9. Ligar o sensor de humidade do solo

10. Definir o intervalo de amostragem

O utilizador, através do terminal local, inicia a configuração e são enviadas mensagens de configuração para as colunas de sensores com o passo da configuração em que se encontram. Por sua vez, as colunas verificam se o respetivo passo está concluído e enviam uma mensagem de configuração idêntica à que receberam para confirmar a conclusão do passo e para permitir ao utilizador avançar na configuração. Assim sendo, o utilizador só pode avançar na configuração quando o passo anterior estiver concluído, exceto nos passos em que se adicionam sensores. Neste caso o utilizador pode escolher saltar o passo e passar ao sensor seguinte, permitindo assim configurações diferentes de sensores para as várias colunas (não é obrigatório que cada coluna tenha os sensores todos ligados).

Após uma configuração válida o sistema inicia o funcionamento e envia tramas de dados a cada intervalo de amostragem, dados esses que são apresentados de forma gráfica na interface.

4.5. Alimentação

A alimentação de toda a eletrónica da coluna provém de um sistema de *energy harvesting* solar com armazenamento de energia. Um sistema de colheita de energia deste tipo é constituído por:

- Dispositivo conversor de energia: Dispositivo que converte a energia proveniente da fonte de energia numa forma de energia útil, geralmente na forma de uma tensão DC.
- Conversor DC-DC: Converte, de forma eficiente, a tensão DC para outra tensão mais apropriada à carga.
- Gestor de energia: Dispositivo que gere a energia entregue à carga e armazenada
- Forma de armazenamento de energia: Geralmente uma bateria ou um super condensador.

Um diagrama de blocos típico de um sistema de colheita de energia deste tipo está presente na Figura 61.

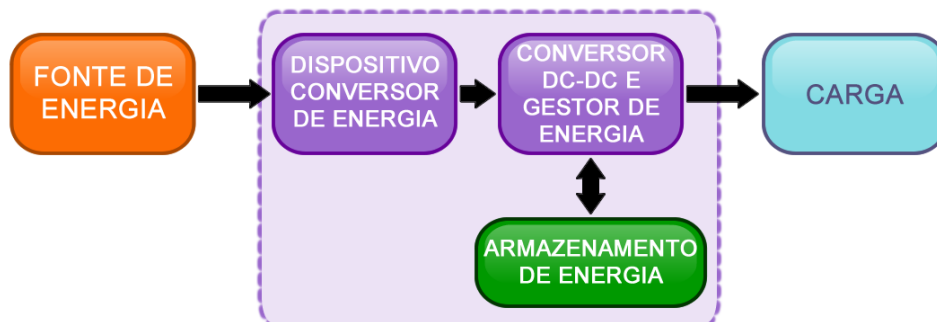


Figura 61: Diagrama de blocos de um sistema típico de energy harvesting

No caso concreto deste trabalho foi utilizado como gestor um LT3652 [95]. Trata-se de um conversor do tipo *step-down* desenhado especificamente para carregar baterias a partir de painéis solares fotovoltaicos. Este circuito carrega a bateria num regime de corrente-constante/tensão constante, sendo que a corrente máxima pode ser programada por *hardware*. Uma grande vantagem da utilização deste circuito integrado é o facto de este possuir uma malha de regulação à entrada que, devidamente dimensionada, pode manter o painel solar a funcionar no ponto de potência máxima de saída [95].

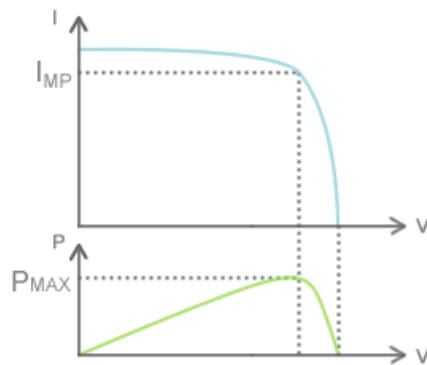


Figura 62: Ponto de potência máxima de um painel solar

A figura abaixo mostra o *hardware* desenvolvido, baseado em [96].

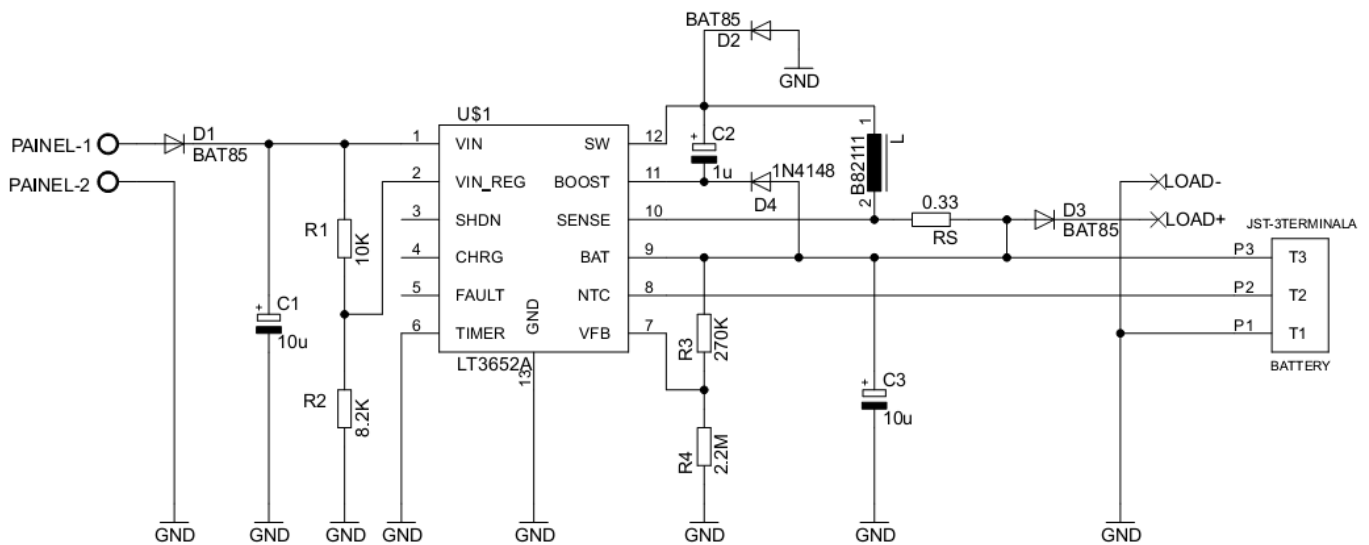


Figura 63: Circuito de *energy harvesting*

Este circuito foi desenhado para suportar baterias com tensão nominal de 3.7 V.

Uma regra empírica [97] diz que o ponto de potência máxima se situa entre os 75% e os 80% da tensão em circuito aberto do painel solar (V_{oc}). Com os valores de resistência utilizados, qualquer painel solar com V_{oc} entre 7.5 V e 8.0 V funciona próximo da região de potência máxima.

A figura abaixo mostra a implementação do circuito em placa de circuito impresso.



Figura 64: Placa de circuito impresso do circuito de *energy harvesting*

4.6. Interface gráfica

Foi desenvolvida uma interface gráfica para facilitar ao utilizador a operação do sistema. A interface permite ao utilizador configurar, de forma intuitiva, os sensores que estão ligados a cada coluna, definir o tempo de amostragem e visualizar (sob forma de gráficos temporais) os dados obtidos dos sensores. Permite também ter uma visão panorâmica de todas as colunas de sensores configuradas, assim como fazer pedidos de envio de dados gerais (a todas as colunas em simultâneo).



Figura 65: Separador inicial da interface gráfica

A figura acima mostra o separador inicial da interface. Uma descrição detalhada de todos os separadores encontra-se no Anexo II.

4.7. Registo em cartão de memória

Implementou-se um sistema de registo de dados em cartão de memória. Este sistema é importante para que se possa fazer, caso seja necessária, uma análise de todos os dados obtidos ao longo do tempo.

O cartão de memória foi ligado por SPI ao microcontrolador, como mostra a Figura 66.

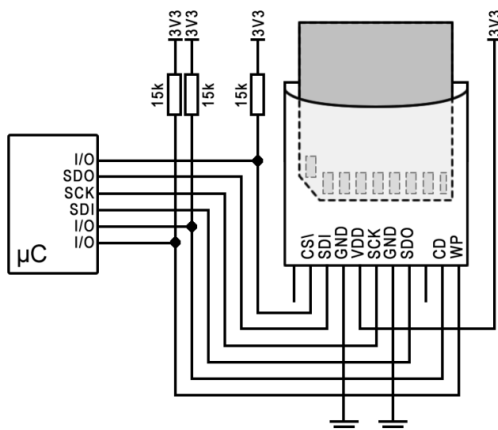


Figura 66: Esquema de ligação do cartão de memória ao microcontrolador

Os dados são gravados em ficheiros de texto diários, cujo nome é derivado da data e tem o seguinte formato:



Por sua vez, dentro de cada ficheiro os dados são gravados com o seguinte formato:

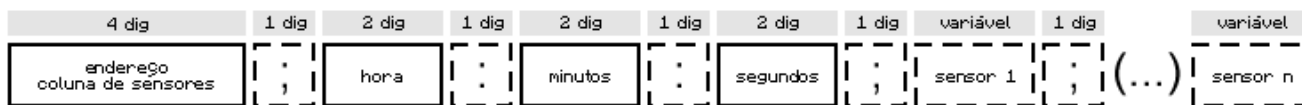


Figura 67: Formato de dados gravados no cartão de memória

5. Ensaaios e Resultados

5.1. Ensaaios individuais dos sensores

Todos os sensores foram testados de forma individual antes da montagem final do circuito. Estes ensaios serviram para verificar o bom funcionamento dos sensores como elementos individuais, validando os dados obtidos no futuro. Os pontos abaixo contêm, para cada sensor, a descrição do teste realizado, os resultados obtidos e uma breve discussão.

5.1.1. Sensores de temperatura

Os sensores de temperatura foram colocados lado a lado, juntamente com um termómetro Fluke 51 [98] numa câmara de temperatura e humidade controlada Angelantoni CH340 [99]. Variou-se a temperatura entre os 16,8 e os 39,2 °C. Os resultados encontram-se na Figura 68.

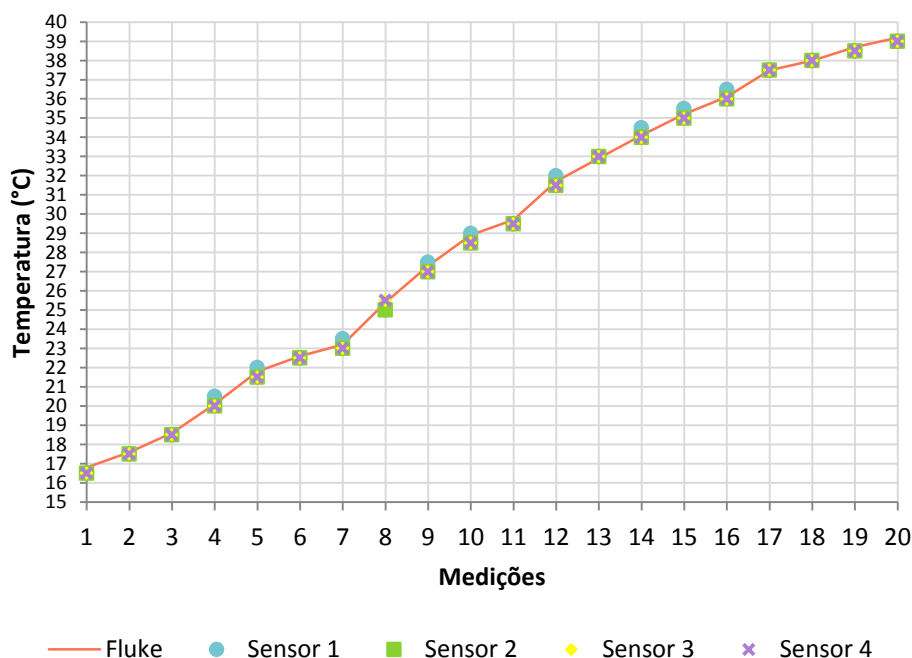


Figura 68: Dados recolhidos no teste aos sensores de temperatura

Considera-se que os valores obtidos pelo termómetro Fluke correspondem à temperatura real. É necessário relembrar que os sensores de temperatura utilizados possuem uma resolução

de 0.5 °C enquanto o termómetro Fluke tem uma resolução de 0.1 °C. Assim sendo, os resultados obtidos correspondem ao esperado.

5.1.2. Sensor de humidade do ar

Também o sensor de humidade do ar foi colocado na câmara de temperatura e humidade controlada. Neste caso, os valores para comparação usados foram os valores lidos diretamente da câmara. Para medir a humidade relativa, a câmara usa o método bolbo-seco bolbo-molhado já descritos anteriormente. Os resultados encontram-se na Figura 69.

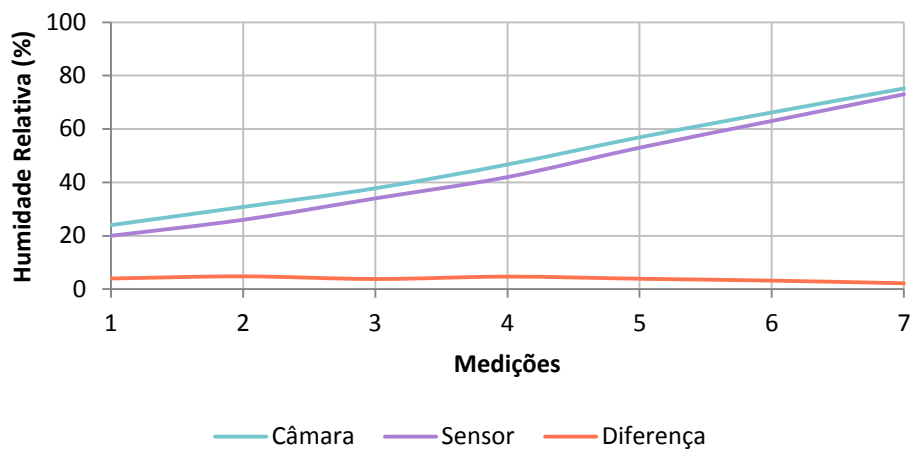


Figura 69: Resultados do ensaio ao sensor de humidade do ar

É importante referir que não foi possível colocar o sensor a testar junto ao sensor da câmara, pelo que os resultados variam ligeiramente. O erro médio foi de 3,8 pontos percentuais.

5.1.3. Sensor de humidade do solo

O circuito do sensor de humidade do solo foi testado usando resistências de precisão MR25, para confirmar de os valores obtidos de resistência correspondem aos reais. Os resultados seguem-se:

Resistência (Ω)	Valor medido (Ω)
487	486.39
1.2k	1.198k
5.1k	5.122k
10k	10.012k
20k	20.058k
33k	33.967k

Tabela 8: Teste ao circuito de condicionamento do sensor de humidade do solo

O desvio máximo observado foi de, aproximadamente, 3%.

5.1.4. Sensor de luminosidade

Dada a ausência de um sensor previamente calibrado optou-se por um teste simplificado. As medições fornecidas pelo sensor foram comparadas com alguns valores de referência:

Condição	Iluminância (lx)
Céu limpo	50 000 – 100 000
Névoa	25 000 – 50 000
Céu nublado (claridade elevada)	10 000 – 25 000
Céu nublado (baixa claridade)	2 000 – 10 000
Dia muito escuro	100 – 2 000
Anoitecer	1 – 100

Tabela 9: Níveis médios de luminosidade no exterior
(Adaptado de [100])

O sensor foi colocado no exterior, de forma paralela ao chão. As medições foram efetuadas num dia com céu limpo entre as 11:00 e as 22:30. As figuras abaixo mostram os resultados obtidos em dois períodos temporais de relevância: entre as 11:00 e as 13:30 (visualizando assim o ponto em que o sol se encontra na vertical) e entre as 12:30 e as 22:30 (visualizando assim a redução de luminosidade ao longo da tarde).

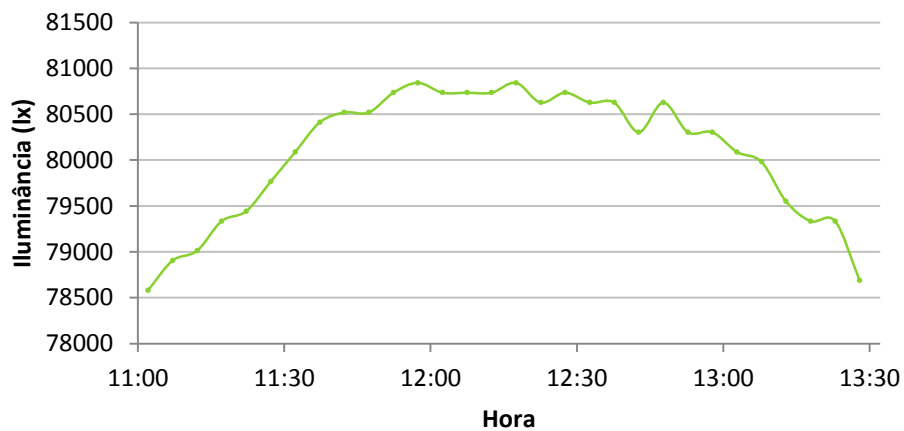


Figura 70: Teste ao sensor de luminosidade – período entre as 11:00 e as 13:30 (pico de luminosidade)

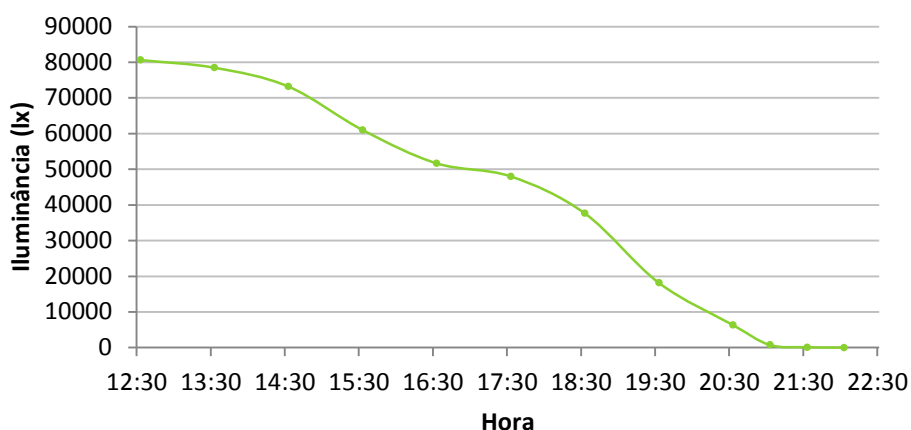


Figura 71: Teste ao sensor de luminosidade – período entre as 12:30 e as 22:30

A luminosidade máxima obtida durante o teste foi de 80842 lux, valor esse que se situa dentro do esperado para um dia limpo. Nesse mesmo dia o anoitecer deu-se às 21:43 [101]. Os pontos obtidos que rodeiam esta hora mostraram uma luminosidade de 108 lux às 21:33 e 0 lux às 22:03, situando-se também dentro da zona de valores esperados, comparando com a Tabela 9. Considera-se que apesar de os resultados irem ao encontro do esperado este sensor necessita de uma validação futura mais exigente.

5.2. Estudo energético

Existem várias componentes de consumo: o consumo em utilização normal, em que o microcontrolador não realiza nenhuma tarefa de medição ou de envio de pacotes, exibindo um consumo praticamente constante; o consumo durante os períodos de amostragem dos sensores e o consumo durante as operações de envio de dados.

É necessário referir que a tensão de alimentação é constante e igual a 3.3 V. Assim sendo, o consumo pode ser medido medindo a corrente de alimentação o que facilita a análise visto que a capacidade das baterias é medida geralmente em mAh. Esta corrente, para o consumo constante, foi medida com um multímetro Fluke 287 [102] com resolução máxima de 0.01 μ A, não ultrapassando os 21.5 mA. Durante um dia o consumo é dado por:

$$C_1 = I \cdot t = 21.5m \cdot 24(\text{horas}) = 516mAh$$

No ponto 5.2.2 será necessário saber os consumos num período de 18 horas (que corresponde ao período médio de escuridão diária) para fazer o dimensionamento da bateria, pelo que serão calculados também esses mesmos consumos.

$$C'_1 = 21.5m \cdot 18(\text{horas}) = 387mAh$$

Com o auxílio de um osciloscópio e de uma resistência de *sensing* de 10Ω foram observados os perfis de consumo durante as leituras dos sensores e as transmissões por 802.15.4. Em ambos foram considerados os consumos de pior caso, ou seja, quando estão todos os sensores ligados. De notar que a obtenção de valores dos sensores e o envio de dados por 802.15.4 ocorre, no pior caso, uma vez por minuto, ou seja, 1440 vezes num período de 24 horas e 1080 vezes num período de 18 horas. Os resultados seguem-se:

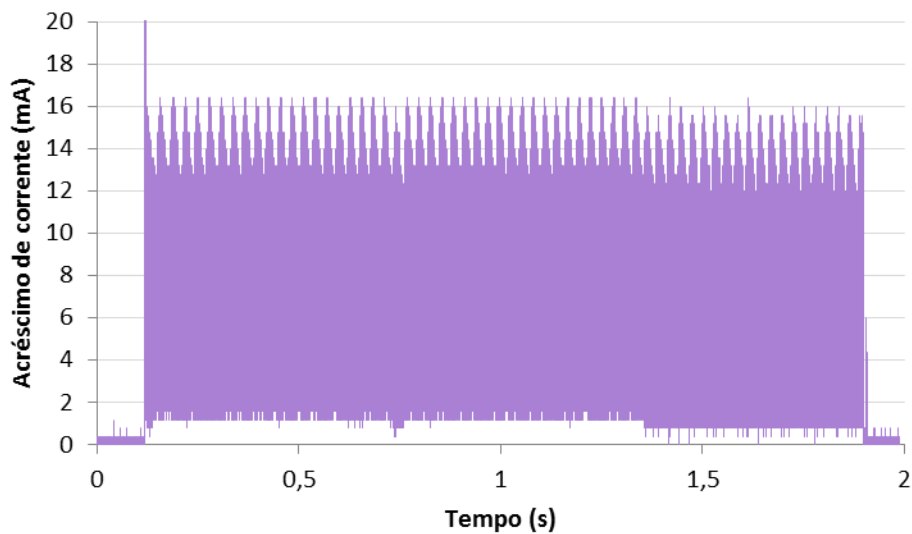


Figura 72: Perfil de consumo do nó de sensores durante a leitura dos sensores

Para o caso da leitura dos sensores, calculou-se a duração e a média de acréscimo de corrente. Os resultados foram 1.78 s e 5,63 mA respetivamente.

Calculando então os consumos:

$$C_2 = 5,63m \cdot \frac{1,78}{3600} \cdot 1440 = 4 mAh$$

$$C'_2 = 5,63m \cdot \frac{1,78}{3600} \cdot 1080 = 3 mAh$$

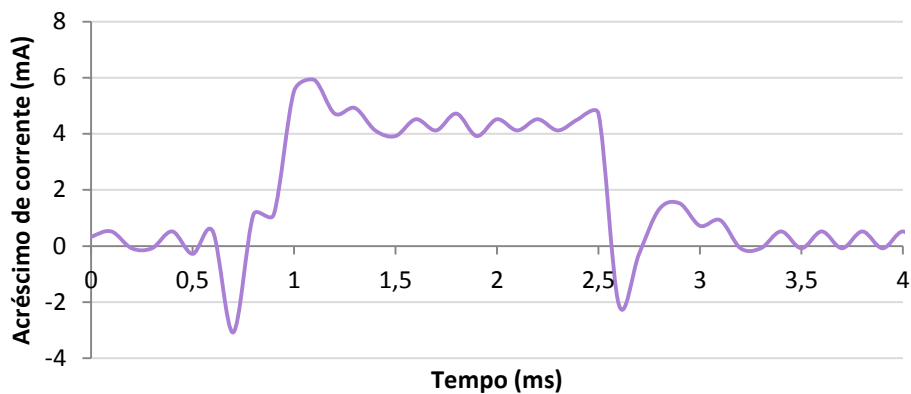


Figura 73: Perfil de consumo do nó de sensores durante a transmissão de dados

Considerando agora que a transmissão decorre entre os 0.5 e os 3.3ms, a média de acréscimo de corrente durante esse tempo é de 1.96mA.

Assim sendo:

$$C_3 = 1,96m \cdot \frac{3.3m - 0.5m}{3600} \cdot 1440 = 2.20 \mu Ah$$

$$C'_3 = 1,96m \cdot \frac{3.3m - 0.5m}{3600} \cdot 1080 = 1.34 \mu Ah$$

Os consumos totais são dados pela soma dos consumos individuais:

- Para um período de 24 horas: $C = C_1 + C_2 + C_3 = 520,0022 \text{ mAh}$
- Para um período de 18 horas: $C' = C'_1 + C'_2 + C'_3 = 390,00134 \text{ mAh}$

5.2.1. Dimensionamento do painel solar

Portugal possui uma média de insolação anual entre as 2200 e as 3000 horas [103]. O número médio de horas de sol diárias corresponde à duração em horas do sol caso a radiação recebida nesse local fosse constante e igual à intensidade de pico do dia. A Figura 74 mostra a relação entre o número de horas de sol diárias e o perfil de radiação solar durante um dia. De notar que a área das duas curvas é igual.

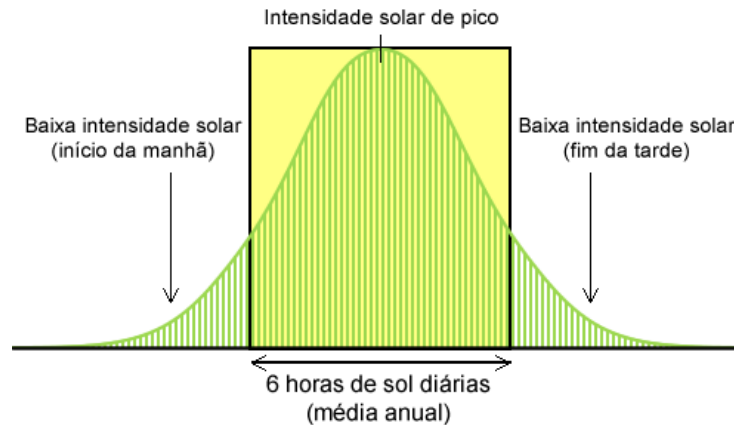


Figura 74: Relação entre o perfil de radiação solar e o número médio de horas de sol

Admitindo o pior caso, 2200 horas, pode-se afirmar que o número médio de horas solares diárias é dado por:

$$\text{Horas de sol diárias} = \frac{\text{Horas de sol anuais}}{\text{N}^\circ \text{ de dias num ano}} = \frac{2200}{365} \approx 6,03 \approx 6 \text{ horas}$$

A carga diária fornecida pelo painel solar para que o sistema funcione indefinidamente tem que ser igual ou superior ao consumo energético máximo do sistema durante um dia. Isto resulta numa corrente mínima igual a:

$$I_{min} = \frac{C}{6} = \frac{520,0022}{6} = 86,67 \text{ mA}$$

Admitindo, por exemplo:

- Um painel com tensão em circuito aberto (V_{oc}) de 8V
- O ponto de potência máxima a 77,5% da tensão em circuito aberto

$$V_{pmax} = 77,5\% \cdot 8 = 6,2 \text{ V}$$

- O funcionamento sempre na zona de potência máxima durante as horas de sol diárias consideradas (consideração derivada da definição de horas de sol diárias)

A potência do painel deve ser, no mínimo:

$$P = 6,2 \cdot 86,67 \text{ m} = 537 \text{ mW}$$

5.2.2. Dimensionamento da bateria

Se um dia tem em média 6 horas de sol, considere-se que tem também, em média, 18 horas de escuridão. Durante este tempo o painel solar não produzirá energia, sendo responsabilidade da bateria de manter o funcionamento do sistema. Assim sendo, a bateria tem que ter uma capacidade igual ou superior ao consumo energético durante as 18 horas de escuridão.

$$C_{min} = C' = 390,00134 \approx 391 \text{ mAh}$$

5.3. Teste ao painel solar e circuito de *Energy Harvesting*

Foi utilizado um painel solar de silício amorfo com 14 células e com dimensões 12.5 cm x 12.5 cm. A Figura 75 apresenta uma fotografia do painel solar.



Figura 75: Painel solar

O painel solar foi testado durante o período de luminosidade máxima (perto das 13:00) num dia limpo com várias cargas.

Os resultados obtidos são apresentados na figura seguinte:

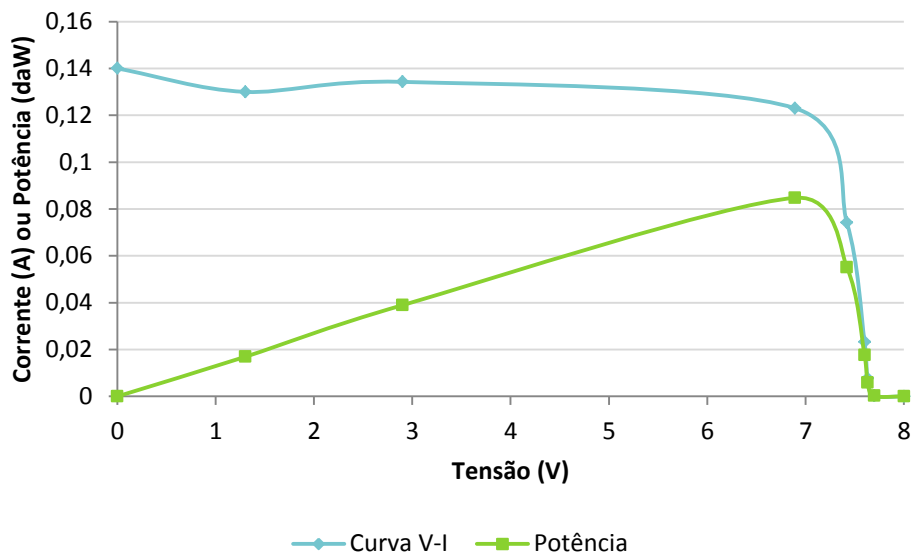


Figura 76: Resultados do teste ao painel solar

A Figura 76 mostra que:

- A tensão de circuito aberto (V_{oc}) do painel é de 8 V (aproximadamente)
- A corrente de curto circuito (I_{sc}) do painel é de 140 mA
- A potência máxima de funcionamento é de 0.848 W
- O ponto de funcionamento de potência máxima corresponde a uma tensão de 6.89 V e a uma corrente de 123 mA
- Este painel satisfaz os requisitos do ponto 5.2.1.

O circuito de Energy Harvesting foi testado com este mesmo painel. Observou-se, como era esperado, o circuito a manter (de acordo com as possibilidades) o ponto de potência máxima programado, isto é, com a diminuição da luminosidade o circuito reduziu a corrente de carga da bateria para conseguir manter a tensão de potência máxima.

Este estudo foi efetuado com o auxílio de um candeeiro de mesa com uma lâmpada incandescente. O candeeiro foi afastado progressivamente do painel solar a cada medição.

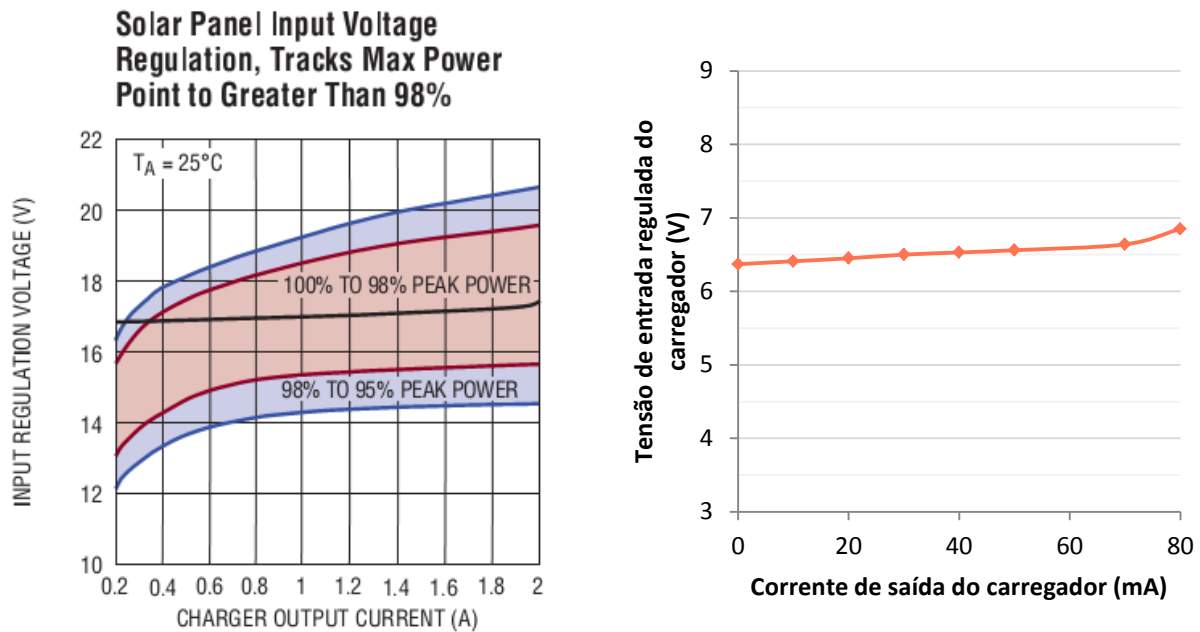


Figura 77: Exemplo de curva de tensão regulada de entrada em função da corrente de saída para um carregador solar com tensão de potência máxima de 17 V e uma corrente máxima de 2 A (à esquerda); Resultados experimentais para o circuito de Energy Harvesting (à direita)

Pelos resultados obtidos conclui-se que o circuito de Energy Harvesting funciona da forma pretendida.

5.4. Ensaios no exterior

Após os testes iniciais, todo o *hardware* foi montado numa coluna e colocado num jardim. Foram realizados dois ensaios segundo as condições da Tabela 10.

Ensaio 1	Ensaio 2
Data: 06 de Julho de 2012	Data: 11 e 12 de Julho de 2012
Início: 15:30	Início: 10:00
Duração: 7 horas	Duração: 24 horas
Dia(s) de sol pouco nebulado(s) com algum vento. Existência de nevoeiro e orvalho significativo na manhã do segundo dia do ensaio 2.	
Solo na zona do sensor de humidade recentemente regado até à saturação	

Tabela 10: Condições dos ensaios realizados no exterior

A Figura 78 mostra a montagem da coluna no exterior.



Figura 78: Coluna de sensores montada no exterior

A figura abaixo mostra a disposição das placas de circuito impresso no interior da caixa de eletrónica da coluna de sensores. Da esquerda para a direita: uMRFs, placa de expansão principal, circuito de Energy Harvesting. A bateria está montada na parte de trás da placa de expansão principal.

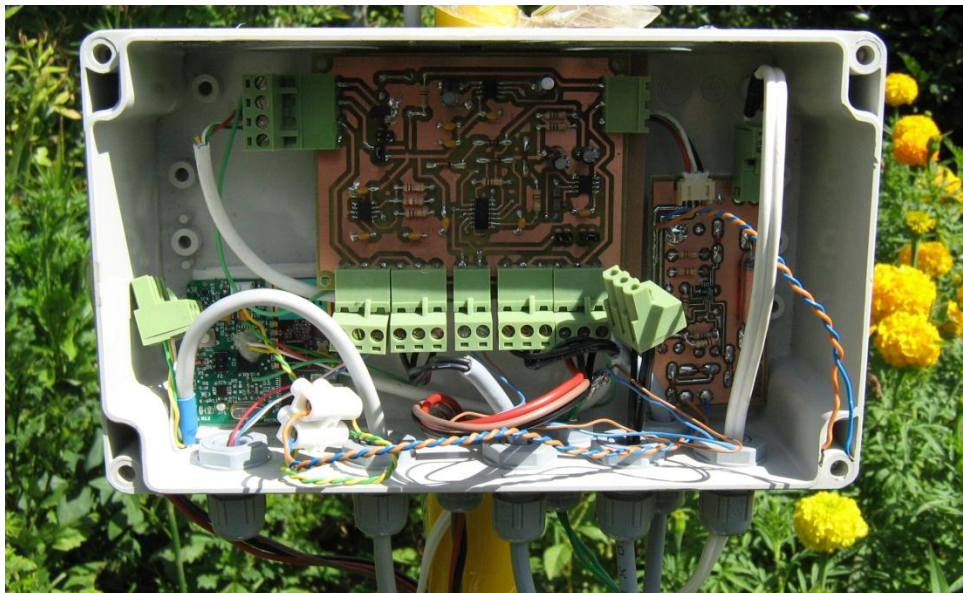


Figura 79: Disposição das placas de circuito impresso no interior da caixa na coluna de sensores

Os resultados obtidos durante os ensaios no exterior são apresentados de seguida.

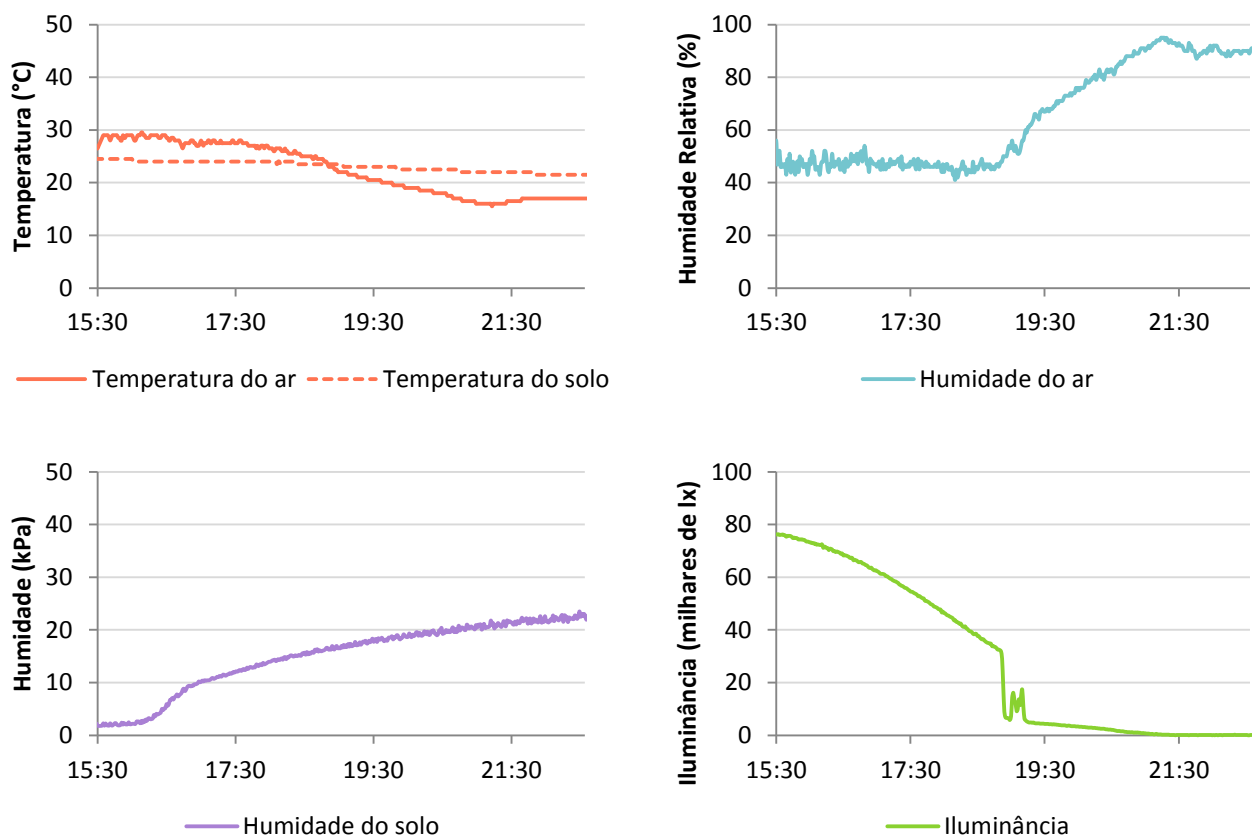


Figura 80: Resultados do ensaio 1

Em relação ao ensaio 1 existem alguns aspetos que são interessantes de referir:

- A temperatura do solo varia de forma mais lenta que a temperatura no exterior.
- No gráfico que representa a luminosidade é possível visualizar o ponto em que a sombra das árvores circundantes atingiu a coluna: cerca das 19:00
- Com a diminuição da luminosidade observou-se um aumento da humidade relativa do ar e uma diminuição da temperatura
- É possível visualizar uma relação entre a temperatura e a humidade do ar: pelas 21:00 a temperatura do ar sobe ligeiramente, subida essa que coincide com uma ligeira diminuição da humidade relativa do ar.
- O solo ficou progressivamente mais seco com o decorrer do dia visto que não existiram momentos de rega ou chuva. De notar que um valor de humidade do solo em kPa mais elevado corresponde a um solo mais seco. Este ensaio teve grande importância pois foi o primeiro momento de teste no terreno do sensor de humidade do solo.

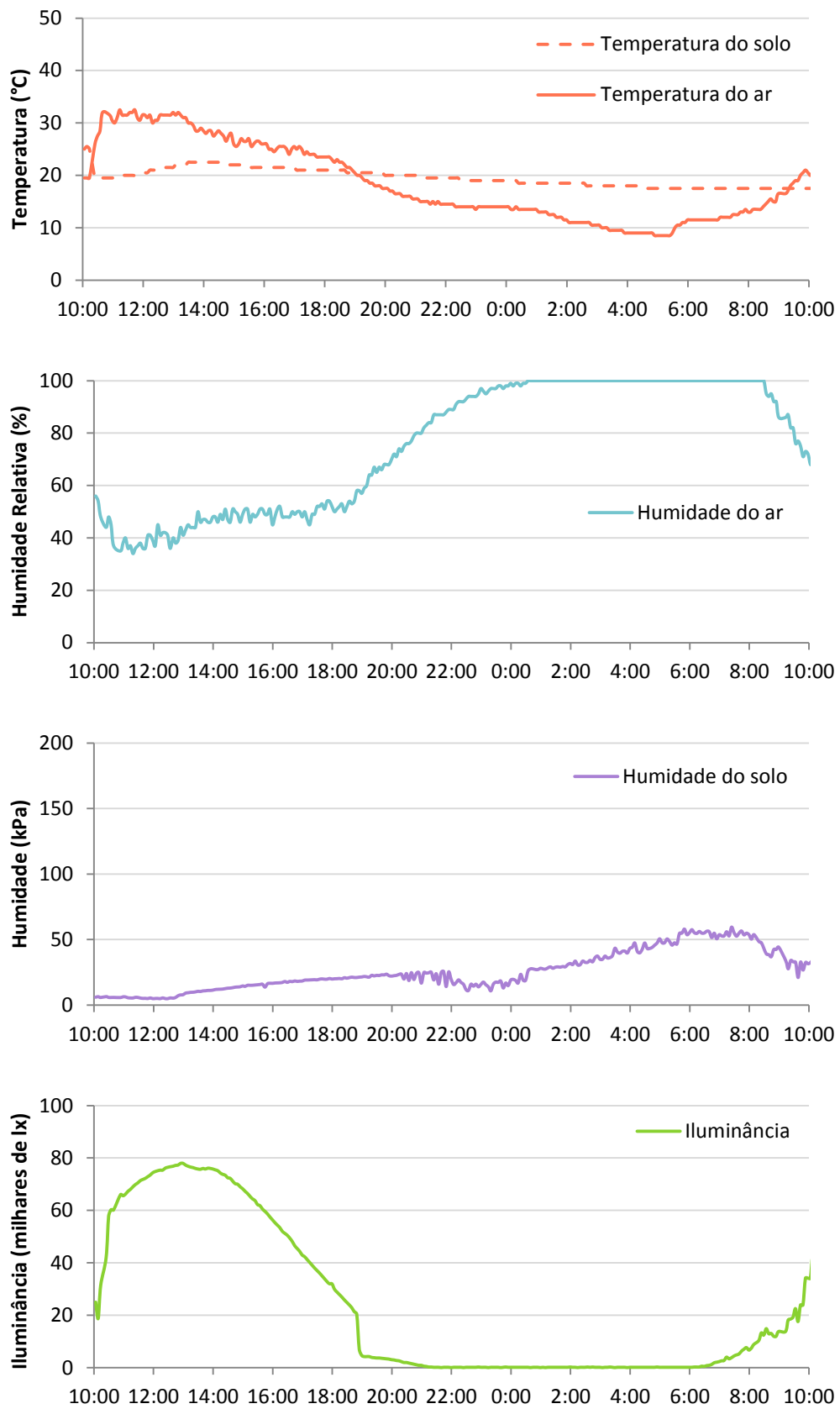


Figura 81: Resultados do ensaio 2

Quanto ao ensaio 2 verificaram-se os mesmos momentos relevantes que no ensaio 1, aos quais acresce:

- Observou-se alguma flutuação do valor da humidade do solo com o nascer do dia, que está relacionada com a formação de orvalho e com o nevoeiro verificado pela manhã.

Os resultados de ambos os ensaios vêm a comprovar a existência de relações intrínsecas entre os vários parâmetros ambientais.

5.5. Análise de custos

A análise de custos é uma ferramenta importante para determinar a viabilidade económica de um projeto. Abaixo se apresenta uma tabela com os valores dos componentes-chave do sistema.

Componente	Custo unitário ¹² (volume baixo / alto)
Datasink/Gateway	
MRF24J40MA	7.70 € / 6.22 €
dsPIC33FJ256MC710	6.08 € / 5.05 €
Suporte para cartão memória	1.59 € / 1.25 €
Cartão memória 4GB	4.99 € / -
Nó de sensores	
MRF24J40MA	7.70 € / 6.22 €
PIC18F26K20	1.77 € / 1.47 €
Sensores de temperatura	
DS18S20	4.70 € / 2.20 €
Sensor de humidade do ar	
HIH-5031	11.49 € / 7.73 €
DS2438	5.48 € / 2.65 €

¹² Estes valores correspondem aos valores mais baixos encontrados em pesquisas feitas em farnell.com e digikey.com

Sensor de humidade do solo	
Sensor WATERMARK	35.00 € / -
DS2438	5.48 € / 2.65 €
LMC6462	2.15 € / 1.06 €
LMC6464	5.24 € / 4.02 €
MAX660	1.57 € / 0.86 €
Sensor de luminosidade	
SFH2430	2.03 € / 1.35 €
DS2438	5.48 € / 2.65 €
Energy Harvesting	
LT3652	10.21 € / -
Bateria LiPo 1300mAh	12.96 € / 12.45 €
Painel Solar 6V @ 1W	8.81 € / -

Tabela 11: Análise de custos dos componentes essenciais ao sistema

De acordo com os valores descritos acima, uma coluna de sensores completa, em grandes quantidades, custaria aproximadamente 106 €. De notar que apenas se consideraram os componentes mais relevantes, e que se considerou o custo de baixa quantidade para os componentes cujo custo de grande volume é desconhecido. No entanto, este valor deve aproximar-se do custo total de *hardware* caso as colunas sejam desenvolvidas por uma empresa pois os distribuidores consultados não são os mais indicados para compras de grandes volumes, sendo que o preço dos componentes acima pode diminuir ainda mais. Para uma análise mais correta deve-se considerar ainda o custo da estrutura da coluna onde seria colocado todo o *hardware*.

6. Conclusão

As comunicações sem-fios vieram a facilitar todo o processo de instalação e manutenção de redes de sensores. Esta dissertação aproveita estas vantagens para desenvolver um sistema baseado numa rede de sensores sem-fios para ser aplicada em estufas agrícolas. Este sistema diferencia-se dos já existentes por ter sido desenhado especificamente para estufas agrícolas e por possuir todos os sensores necessários de medição num só ponto.

Foi desenvolvido o *hardware* necessário para fazer a medição das variáveis ambientais da estufa, assim como os protocolos de comunicação adequados. Foram efetuados ensaios a todo o hardware e software desenvolvido e foi implementado um protótipo funcional da coluna de sensores no exterior.

Apesar de ser um sistema dirigido a estufas agrícolas, é possível aplicá-lo em campos agrícolas descobertos, alargando-lhe o nicho de mercado.

6.1. Trabalho futuro

Pode-se dizer que o trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação se trata de um protótipo funcional do sistema. Existem, no entanto, vários pontos cuja implementação pode ser melhorada para que o sistema possa ser encarado como um produto de consumo final:

- O aspeto mais urgente que deve ser abordado num futuro mais próximo é a questão da validação dos dados do sensor de luminosidade.
- As placas uMRF e uMRFs devem ser substituídas por *hardware* novo desenvolvido especificamente para esta aplicação. Consegue-se assim reduzir consumo energético pois as placas utilizadas atualmente possuem vários componentes que não estão a ser usados no sistema final como é o caso dos acelerómetros, dos LEDs e botões, dos gestores de carga (no caso dos nós de sensores) e dos conversores USB-série (no mesmo caso). Além disso, com placas desenvolvidas em específico para esta aplicação é possível colocar mecanismos de corte e reposição de alimentações para partes do circuito que só são usadas esporadicamente. A redução de consumo possibilitará a utilização de baterias e/ou painéis solares com menor capacidade/potência, reduzindo o custo final do sistema.
- Esta dissertação não desenvolve a comunicação entre a estufa e um terminal remoto. Muitas vezes é importante conseguir visualizar os dados à distância, quer por necessidade (pois as estufas podem estar situadas em zonas pouco

habitacionais) quer por motivos logísticos. Sugere-se a implementação desta mesma comunicação para o futuro, sabendo que esta é essencial para que o sistema seja considerado completo.

- A topologia de rede híbrida desenvolvida conceptualmente nunca foi implementada. No futuro pretende-se implementar e confirmar a viabilidade de uma rede deste tipo, tendo especial atenção ao possível aumento do consumo energético em relação à topologia implementada atualmente. De acordo com os resultados obtidos esta poderá tornar-se na topologia *standard* no produto final.
- Os sensores de humidade do ar e luminosidade devem ser devidamente encapsulados.

7. Bibliografia

- [1] G. v. Straten, *Optimal Control of Greenhouse Cultivation*, USA: CRC Press, 2011.
- [2] H. Hu, L. Xu, R. Wei e B. Zhu, “Multi-Objective Control Optimization for Greenhouse Environment Using Evolutionary Algorithms”, *sensors*, 2011.
- [3] F. R. Díaz, “Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero”, Tese de Doutorado, Universidade de Almería, Almería, 2002.
- [4] D. E. Buffington, R. A. Bucklin, R. W. Henley e D. B. McConnell, *AE-10: Greenhouse Ventilation*, University of Florida, IFAS Extension, 2010.
- [5] C. v. Zabeltitz, *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates*, Springer, 2011.
- [6] D. Almeida e M. Reis, “10. Aquecimento de estufas”, *Vida Rural*, Junho 2010.
- [7] B. Eshenaur e R. Anderson, “Managing the Greenhouse Environment to Control Plant Diseases”, Plant Pathology Fact Sheet PPFS-GH-01, University of Kentucky - College of Agriculture, 2004.
- [8] C. M. A. Tamele, “Dimensionamento de um Sistema de Rega por Gotejamento para uma Área de 50 ha no Distrito de Chókwe”, Projecto Final, Universidade Eduardo Mondlane, 2007.
- [9] C. Shock, “Drip Irrigation: An Introduction”, EM 8782-E, Oregon State University, 2001.
- [10] D. Reich, R. Godin, J. Chávez e I. Broner, “Subsurface Drip Irrigation (SDI)”, Fact Sheet No. 4.716, Colorado State University Extension.
- [11] University of Massachussetts Extension, *Irrigation Systems* [Online]. Disponível em: <http://extension.umass.edu/floriculture/sites/floriculture/files/greenhouse-bmp/GHBMPIrrigationSystems.pdf>. [Acedido em Maio 2012].
- [12] G. Elliott, R. McAvoy e M. Gent, *Subirrigation: Watering From The Ground Up* 2012. [Online]. Disponível em: <http://www.greenhousegrower.com/article/26828/subirrigation-watering-from-the-ground-up>. [Acedido em Maio 2012].
- [13] W.-f. L. Uva, T. C. Weiler, R. A. Milligan, L. D. Albright e D. A. Haith, “Risk Analysis of Adopting Zero Runoff”, Northeastern Agricultural and Resource Economics Association, 2000.
- [14] BRITA Portugal, *Perguntas Mais Frequentes* [Online]. Disponível em: http://www.brita.net/pt/faqs_household.html?L=8#24. [Acedido em Maio 2012].
- [15] P. D. Robillard, W. E. Sharpe e B. R. Swistock, *Water Softening* Pennsylvania State University, College of Agricultural Sciences, [Online]. Disponível em: <http://www.aasl.psu.edu/WaterSoftening.pdf>. [Acedido em Maio 2012].
- [16] R. H. Thayer, “Carbon Dioxide Enrichment Methods”.
- [17] Spectrum Technologies, Inc., *Watermark Soil Moisture Sensor*.
- [18] Argus Control Systems Ltd., *Light and lighting control in greenhouses*, 2010.
- [19] Automation Wiki, *Thermistors* [Online]. Disponível em: <http://automationwiki.com/index.php?title=Thermistors>. [Acedido em 2 2012].

- [20] Watlow Electric Manufacturing Company, The Watlow Educational Series Book Four: Temperature Sensors, 1995.
- [21] pico technology, *PT100 Platinum Resistance Thermometers* [Online]. Disponível em: <http://www.picotech.com/applications/pt100.html>. [Acedido em Junho 2012].
- [22] National Instruments Corporation, “Measuring Temperature with RTDs – A Tutorial”, Application Note 046.
- [23] Agilent Technologies, “Practical Temperature Measurements”, Application Note 290.
- [24] National Semiconductor, “Precision Temperature Sensors”, LM135/LM235/LM335, LM135A/LM235A/LM335A Datasheet.
- [25] Maxim, “High-Precision 1-Wire Digital Thermometer”, DS18S20 Datasheet.
- [26] Analog Devices, “2-Terminal IC Temperature Transducer”, AD590 Datasheet.
- [27] Texas Instruments, “Digital Temperature Sensor and Thermal Watchdog with Two-Wire Interface”, LM75A Datasheet.
- [28] Microchip, “Low-Power Linear Active Thermistor™ ICs”, MCP9700/9700A, MCP9701/9701A Datasheet.
- [29] Ohmic Instruments Company, Instruction manual for the ABS-300, 2008.
- [30] Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, “Humidade do Ar”, Notícia Explicativa 1.6.1985.
- [31] The Engineering Toolbox, *Water Vapor and Saturation Pressure in Humid Air* [Online]. Disponível em: http://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-saturation-pressure-air-d_689.html. [Acedido em Maio 2012].
- [32] SENSIRION, Introduction to Humidity - Basic Principles on Physics of Water Vapor, 2009.
- [33] The Schumacher Centre for Technology & Development, “Evaporative Cooling”, Technical Brief.
- [34] Bureau of Meteorology, “How to measure humidity using a hygrometer”, Weather Kit.2001.
- [35] Measurement Specialities, HS1101LF Datasheet.
- [36] Honeywell, HCH-1000 Series Datasheet.
- [37] Honeywell, HIH-5030/5031 Series Datasheet.
- [38] SENSIRION, SHT1x Datasheet.
- [39] D. K. Roveti, Choosing a Humidity Sensor: A Review of Three Technologies 2001. [Online]. Disponível em: <http://www.sensormag.com/sensors/humidity-moisture/choosing-a-humidity-sensor-a-review-three-technologies-840>. [Acedido em Fevereiro 2012].
- [40] multicom, “Humidity Sensor”, HCZ-D5 datasheet.
- [41] GE Measurement & Control Solutions, “Relative Humidity Sensor”, HS12P, HS15P datasheet.
- [42] TDK, “Humidity Sensor Units”, CHS series datasheet.
- [43] SENSIRION, “Introduction to Relative Humidity”, Application Note.
- [44] ohmic instruments, “Absolute Humidity Sensor”, ABS-300 datasheet.
- [45] Hygrosens Instruments, “Absolute Humidity Sensor”, ABS-FS11 datasheet.
- [46] M. Hegney e H. Hoffman, Farmnote 107/1991: Using tensiometers for scheduling irrigation for potatoes Julho 2005. [Online]. Disponível em: http://www.agric.wa.gov.au/PC_92500.html. [Acedido em Fevereiro 2012].

- [47] Ian Goodwin, *Gypsum Blocks for Measuring the Dryness of Soil* 2000. [Online]. Disponível em: <http://www.dpi.vic.gov.au/agriculture/farming-management/soil-water/soil/ag0294-gypsum-blocks-for-measuring-the-dryness-of-soil>. [Acedido em Janeiro 2012].
- [48] R. Muñoz-Carpena, "Field Devices For Monitoring Soil Water Content". University of Florida.
- [49] Vernier, "Soil Moisture Sensor", Manual.
- [50] IMKO GmbH, "Soil moisture sensors with internal TDR-electronics", TRIME-PICO32/64 Datasheet.
- [51] M. Risinger, *NEUTRON MOISTURE METERS* [Online]. Disponível em: <http://www.soilcropandmore.info/crops/sorghum/neutron.htm>. [Acedido em Fevereiro 2012].
- [52] Li-Cor, *Terrestrial Quantum* [Online]. Disponível em: <http://www.licor.com/env/products/light/terrestrial.html>. [Acedido em Maio 2012].
- [53] Li-Cor inc., "Comparison of Quantum Sensors with Different Spectral Sensitivities", Technical Note #126.
- [54] Li-Cor inc., *LI-190SA Quantum Sensor* [Online]. Disponível em: http://envsupport.licor.com/docs/LI190_20099214180.pdf. [Acedido em Maio 2012].
- [55] A. J. Both e E. F. Wheeler, *Instruments for Monitoring the Greenhouse Aerial Environment - Part 2 of 3*, 2002.
- [56] KIPP & ZONEN, "CMA series Albedometer, CMP series Pyranometer", Instruction Manual.
- [57] Kipp & Zonen, *Measuring Global Solar Irradiation* [Online]. Disponível em: <http://kippzonen-blog.nl/solar-energy/measuring-global-solar-irradiance/>. [Acedido em Julho 2012].
- [58] M. Piedade e T. Almeida, "Sensores Optoelectrónicos", Trabalho de Laboratório, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1992.
- [59] Hamamatsu Corporation, *Photodiode Technical Guide* [Online]. Disponível em: <http://sales.hamamatsu.com/assets/html/ssd/si-photodiode/index.htm>. [Acedido em Maio 2012].
- [60] L. Godfrey, *Choosing the Detector for your Unique Light Sensing Application* [Online]. Disponível em: <http://denethor.wlu.ca/pc300/sensors/ChoosingTheDetector.pdf>. [Acedido em Maio 2012].
- [61] T. Papalias e M. Wong, "Making sense of light sensors", Design Article, Intersil Corporation, 2006.
- [62] C. Scientific, *Wireless Sensors* [Online]. Disponível em: <http://www.campbellsci.com/wireless-sensors>. [Acedido em Junho 2012].
- [63] T&D Corporation, *Announcing the RTR-500 Series EU Version with 5 Language Support* [Online]. Disponível em: http://tandd.com/about_tandd/newsrelease/20110127001.html. [Acedido em Junho 2012].
- [64] Gemini Data Loggers UK, *TinyTag Wireless* [Online]. Disponível em: <http://www.gemindataloggers.com/data-loggers/tinytag-wireless>. [Acedido em Junho 2012].
- [65] E-Senza Technologies, *Wireless Data Infrastructure and Adapters* [Online]. Disponível em: <http://www.e-senza.com/products/wireless-data-infrastructure-and-adapters>. [Acedido em Junho 2012].
- [66] Banner Engineering, *SureCross® Wireless I/O Products* [Online]. Disponível em: http://www.bannerengineering.com/en-US/wireless/surecross_web_proselect. [Acedido

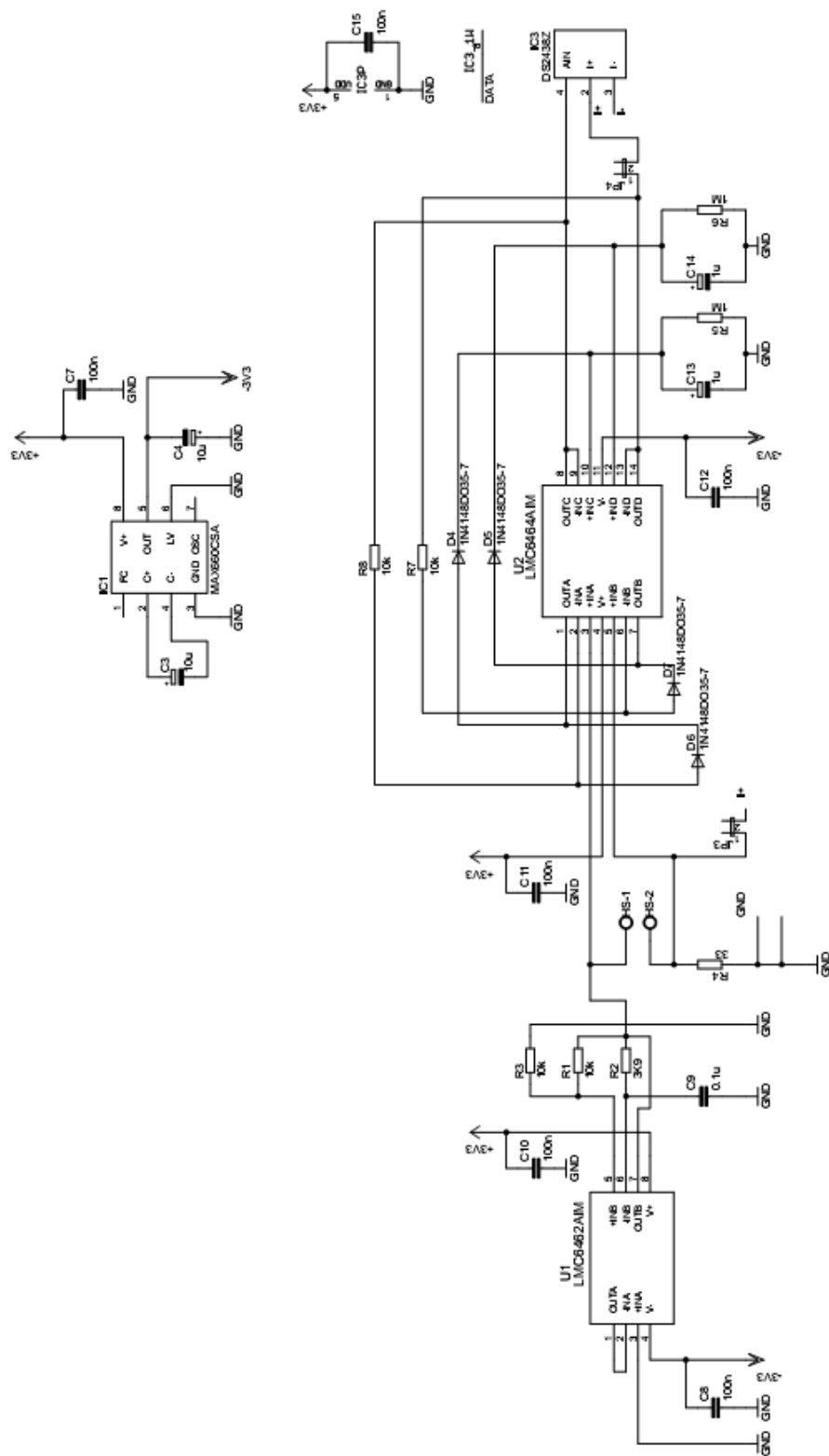
em Junho 2012].

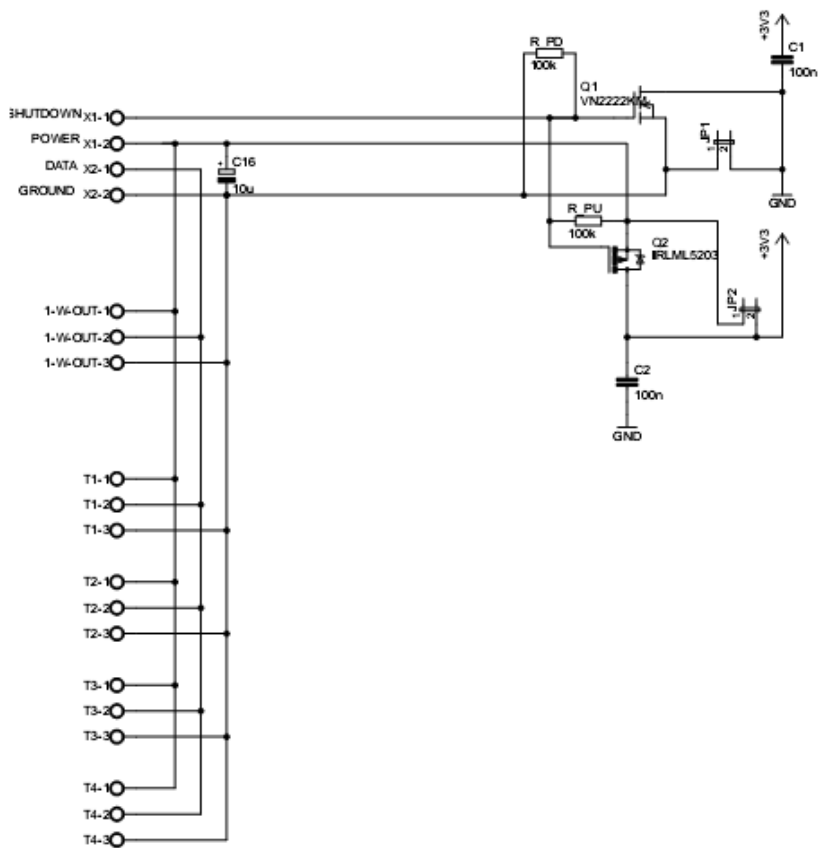
- [67] Pepperl+Fuchs GmbH, *WirelessHART* [Online]. Disponível em: http://www.pepperl-fuchs.com/global/en/classid_2434.htm. [Acedido em Junho 2012].
- [68] N. Pang, “ZigBee Mesh Network For Greenhouse Monitoring”, Beihua University, 2011.
- [69] Z. Yiming, Y. Xianglong, G. Xishan, Z. Mingang e W. Liren, “A Design of Greenhouse Monitoring & Control System Based on ZigBee Wireless Sensor Network”, Zhejiang University, Hangzhou, China, 2007.
- [70] TAOS, “AMBIENT LIGHT SENSOR WITH SMBus INTERFACE”, TSL2550 Datasheet.
- [71] J. Hou e Y. Gao, “Greenhouse Wireless Sensor Network Monitoring System Design Based on Solar Energy”, Civil Aviation University of China, NanKai University, TianJin, China, 2010.
- [72] CONSONANCE, “Lithium Ion Battery Charger for Solar-Powered Systems”, CN3063 Datasheet.
- [73] Maxim Integrated Products, “Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer”, DS18B20 Datasheet.
- [74] Texas Instruments, “Mixed Signal Microcontroller”, MSP430x13x, MSP430x14x, MSP430x14x1.
- [75] Atmel.AT45DB041B Datasheet.
- [76] Nordic Semiconductor, “Ultra low power 2.4GHz RF Transceiver”, nRF24L01 Datasheet.
- [77] A. Willig, K. Matheus e A. Wolisz, “Wireless Technology in Industrial Networks”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, Junho 2005.
- [78] Micro I/O, *Micro I/O serviços de eletrónica* [Online]. Disponível em: <http://microio.pt/>. [Acedido em Junho 2012].
- [79] Microchip, “2.4 GHz IEEE Std. 802.15.4 RF Transceiver Module”, MRF24J40MA Datasheet.
- [80] Microchip, “High-Performance,16-Bit Digital Signal Controllers”, dsPIC33FJXXMCMX06/X08/X10 Datasheet.
- [81] Microchip, “28/40/44-Pin Flash Microcontrollers with nanoWatt XLP Technology”, PIC18F23K20/24K20/25K20/26K20/43K20/44K20/45K20/46K20 Datasheet.
- [82] Microchip, “Stand-Alone Linear Li-Ion / Li-Polymer Charge Management Controller”, MCP73833/4 Datasheet.
- [83] Microchip, “2.4 GHz IEEE Std. 802.15.4 20 dBm RF Transceiver Module”, MRF24J40MB Datasheet.
- [84] Microchip, “2.4 GHz IEEE Std. 802.15.4 RF Transceiver Module with PA/LNA and External Antenna Connector”, MRF24J40MC Datasheet.
- [85] Maxim Integrated Products, *1-Wire Devices* [Online]. Disponível em: <http://www.maxim-ic.com/products/1-wire/>. [Acedido em Janeiro 2012].
- [86] Microchip Technology Inc., “1-Wire Communication with PIC Microcontroller”, Application Note 1199.
- [87] Maxim Integrated Products, “1-Wire Communication Through Software”, Application Note 126.
- [88] Maxim Integrated Products, “1-Wire Search Algorithm”, Application Note 187.
- [89] Linear Technology, “Dual Precision Instrumentation Switched Capacitor Building Block”, LTC1043 Datasheet.
- [90] D. Awtrey, “A 1-Wire Humidity Sensor”, *Sensors*.
- [91] Irrrometer.WATERMARK Soil Moisture Sensor — MODEL 200SS Datasheet.

- [92] Irrrometer, *Frequently Asked Questions* [Online]. Disponível em: <http://www.irrometer.com/faq.html>. [Acedido em Maio 2012].
- [93] EME Systems, “SMX - Electrical Interface for Watermark or Gypsum Block Sensors”, 2002.
- [94] OSRAM Opto Semiconductors GmbH, “Silicon Photodiode with VλCharacteristics”, SFH2430 Datasheet.
- [95] Linear Technology, “Power Tracking 2A Battery Charger for Solar Power”, LT3652 Datasheet.
- [96] L. Technology, “Power Tracking 2A Battery Charger for Solar Power”, LT3652 Datasheet.
- [97] Linear Technology, “Harvest Energy from a Single Photovoltaic Cell”, *Journal of Analog Innovation*, 2011.
- [98] FLUKE, *Fluke 51 II Termómetro* [Online]. Disponível em: <http://www.fluke.com/fluke/ptpt/Electrical-Test-Tools/Thermometers/Fluke-50-Series-II.htm?PID=56085>. [Acedido em Julho 2012].
- [99] Angelantoni, *ACS Environmental Test Chambers* [Online]. Disponível em: http://www.angelantoni.it/acs/en_acs_angelantoni.asp. [Acedido em Julho 2012].
- [100] METREL, *The illuminance handbook*, 2002.
- [101] *GAISMA - Sunrise, sunset, dawn and dusk times around the World!* [Online]. Disponível em: <http://www.gaisma.com/en/location/aveiro.html>. [Acedido em Junho 2012].
- [102] FLUKE, *Fluke 280 Multímetro True-rms de registo para electrónica, com TrendCapture* [Online]. Disponível em: <http://www.fluke.com/fluke/ptpt/multimetros-digitais/fluke-287.htm?PID=56058>. [Acedido em Julho 2012].
- [103] Portal das Energias Renováveis, *Estado em Portugal - Actualidade: Solar Térmico* [Online]. Disponível em: http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=47&ID_area=8&ID_sub_area=27. [Acedido em Julho 2012].
- [104] D. Almeida e M. Reis, “13. Ventilação e arrefecimento de estufas”, *Vida Rural*, Outubro 2010.
- [105] Thermometrics Corporation, *Accuracy Standards* [Online]. Disponível em: <http://www.thermometricscorp.com/rtd-accuracy.html>. [Acedido em Maio 2012].
- [106] R. Barbosa, “Detecção de erros de comunicação de dados - CRC”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

Anexos

Anexo I: Esquema elétrico da placa de expansão principal



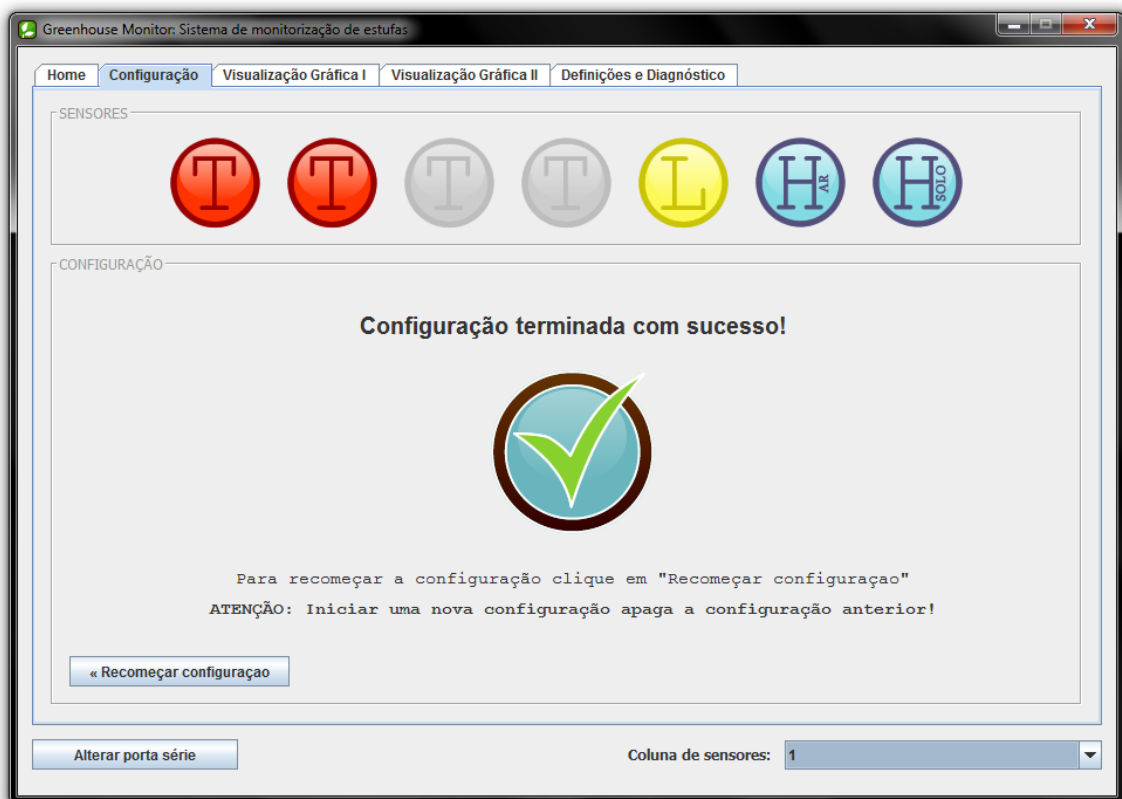


Anexo II: Interface gráfica

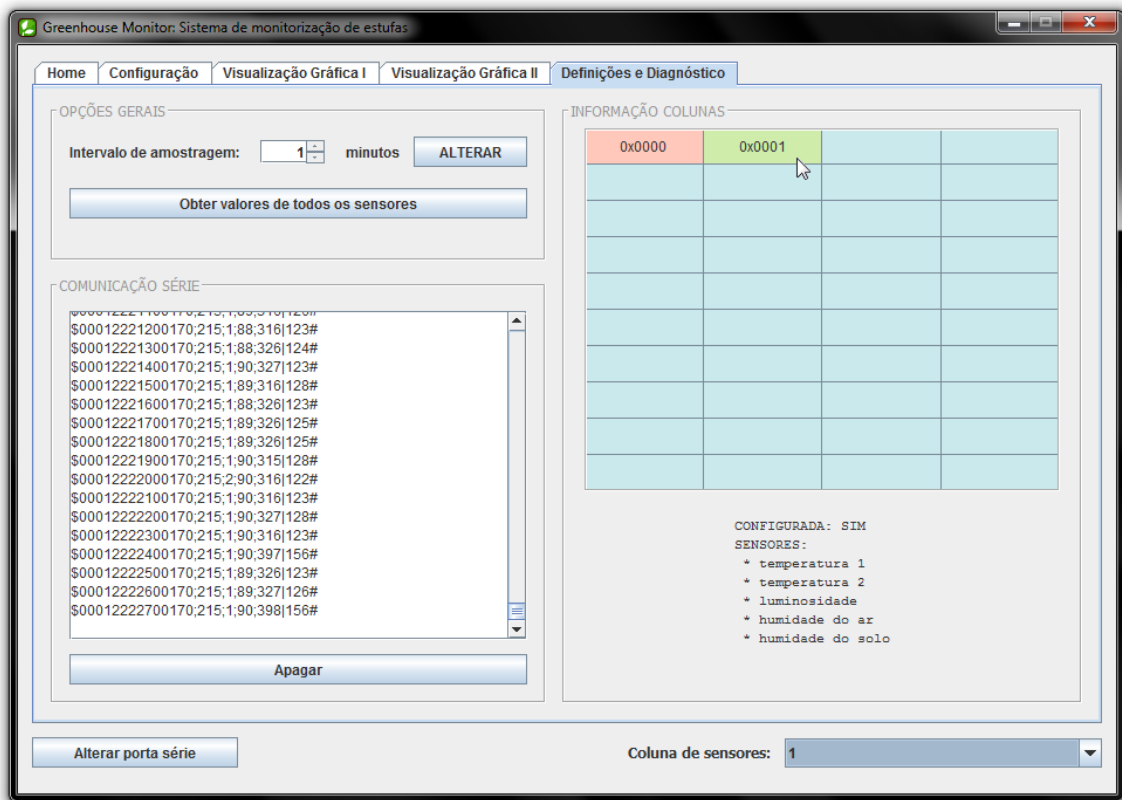
A interface gráfica é composta, no total, por cinco separadores. São eles:

- Home: Separador inicial.
- Configuração: Separador onde se processa toda a configuração das colunas de sensores.
- Visualização gráfica I: Separador que contém quatro gráficos, um para cada tipo de variável medida: temperatura, luminosidade, humidade do ar e humidade do solo.
- Visualização gráfica II: Gráfico que combina todas as variáveis medidas.
- Definições e Diagnóstico: Separador onde se pode alterar o intervalo de amostragem, fazer um pedido de dados, visualizar a comunicação por RS232 e visualizar o estado das colunas de sensores ativas.

As imagens seguintes mostram todos estes separadores.







Anexo III: Processo de configuração das colunas de sensores (interface gráfica)

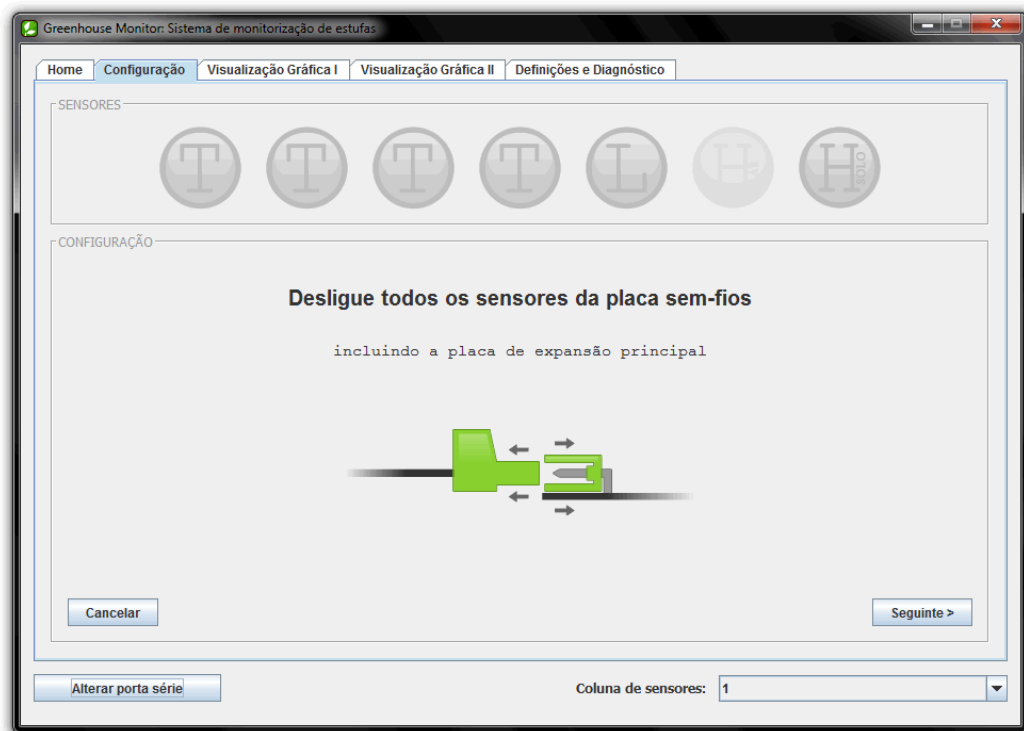
O processo de configuração das colunas através do qual é possível associar sensores às respectivas colunas, é efetuado de forma intuitiva e visual pela interface gráfica desenvolvida.



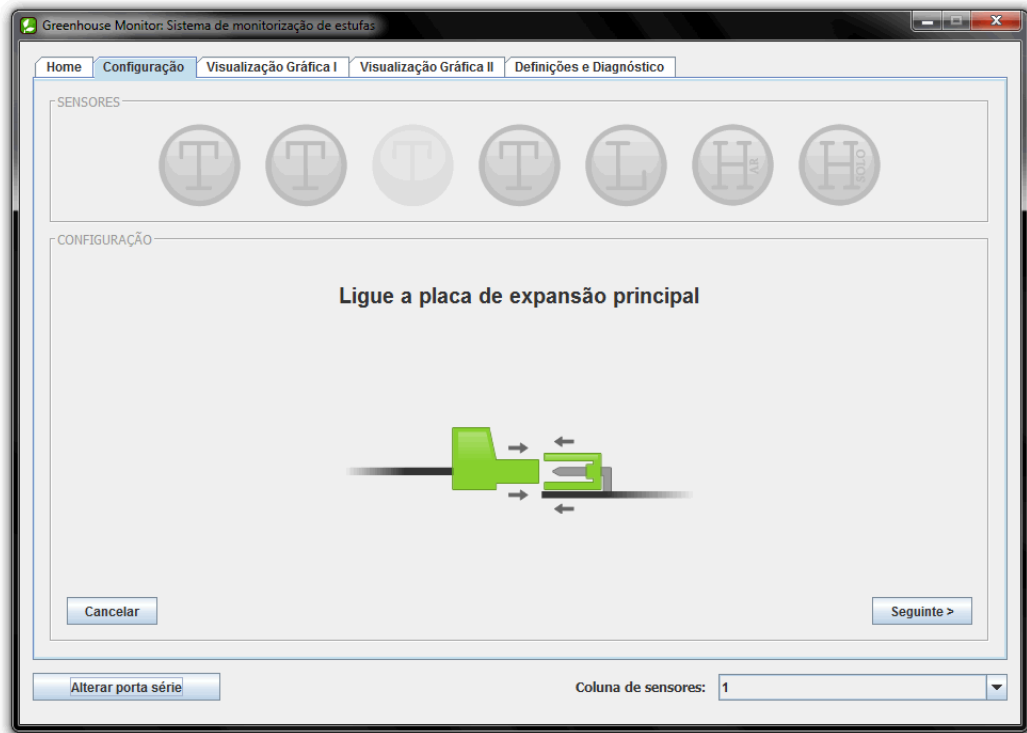
O primeiro passo para iniciar a configuração é passar ao separador “Configuração” e escolher a coluna que se pretende configurar. A lista de colunas encontra-se no canto inferior direito, e esta lista é atualizada automaticamente quando se liga (ou desliga) uma nova coluna. De seguida, deve-se clicar no botão “Iniciar configuração”.



O próximo passo será desligar todos os sensores e a placa de expansão da placa sem-fios. Caso esta seja a primeira configuração, basta clicar em “Seguinte”. O botão “Seguinte” só se encontrará ativo após a conclusão correcta de cada fase.



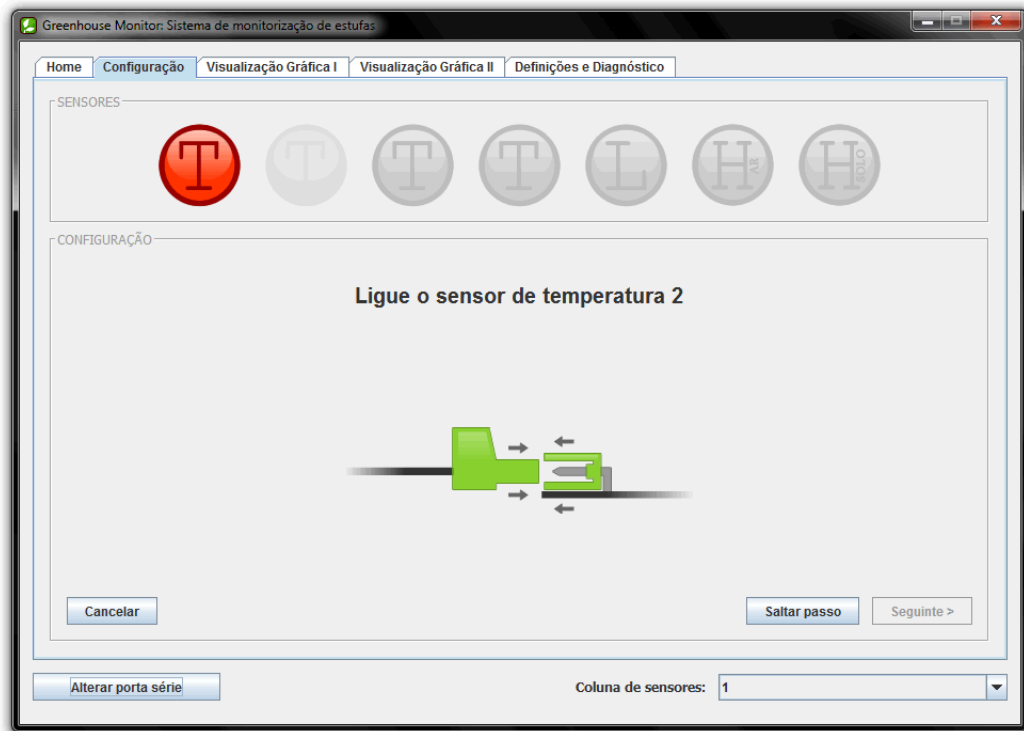
De seguida, começa-se por ligar a placa de expansão principal...



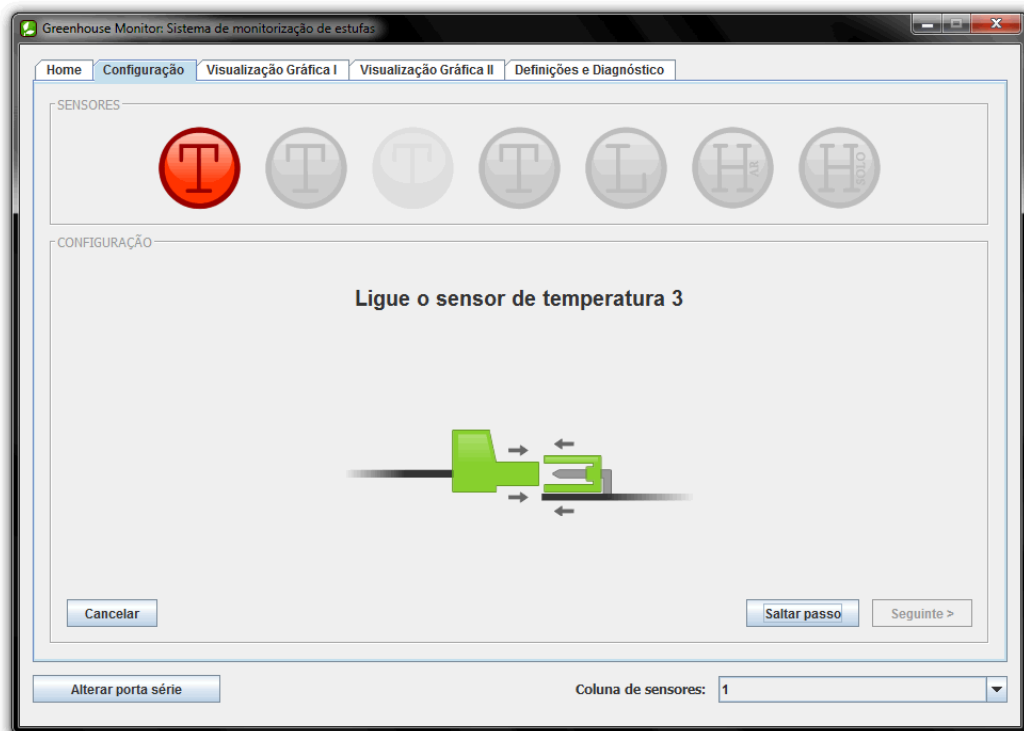
... e os sensores um a um.



Quando um sensor é adicionado corretamente, o seu ícone fica a cores.



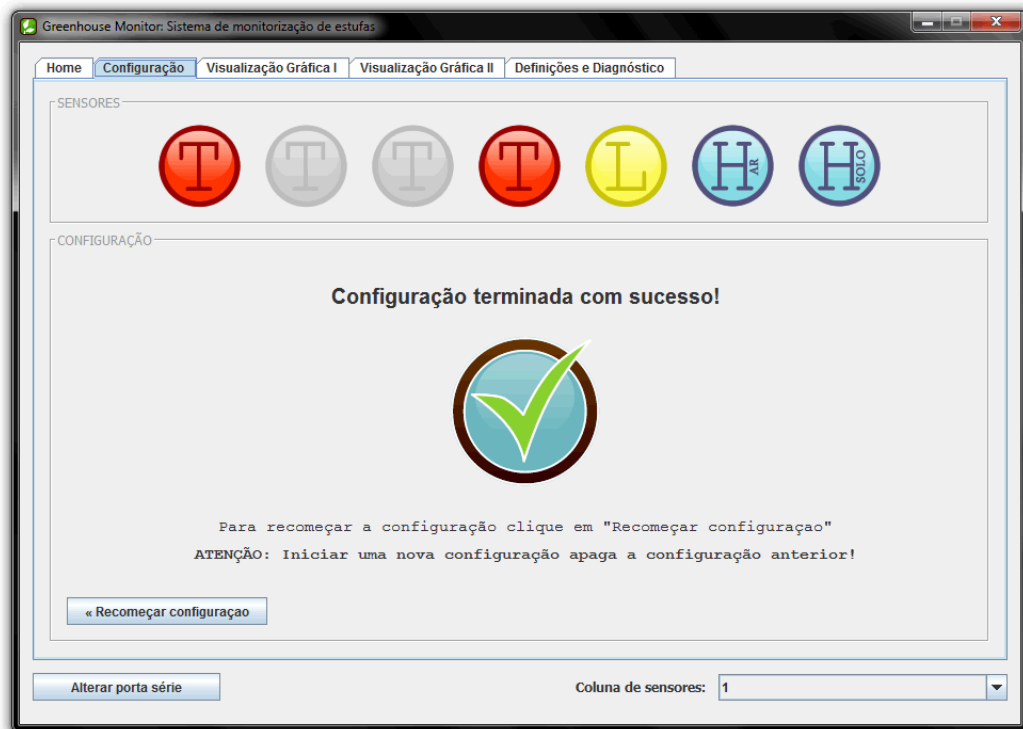
Também é possível saltar passos de adição de sensores. Nessa caso o seu ícone permanece a tons de cinzento, indicando que o sensor não se encontra ligado à coluna.



Quando forem adicionados todos os sensores pretendidos, escolhe-se o intervalo de amostragem...



... e a configuração está terminada.



No separador “Definições e Diagnóstico” é possível ver quais as colunas que se encontram configuradas (a verde), assim como quais os sensores que estão ligados a cada coluna (a informação respetiva a cada coluna é mostrada quando se passa o rato por cima do endereço respectivo).

